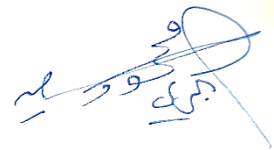


На правах рукописи



Аль Бахри Махмуд Саид Нассер

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ
УСТРОЙСТВ И ПРИЛОЖЕНИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ
НА БАЗЕ АРХИТЕКТУРЫ ЦИФРОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Киричек Руслан Валентинович

Официальные оппоненты: **Сарьян Вильям Карпович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГУП «Научно-исследовательский институт
радио», кафедра радио и информационных
технологий, профессор кафедры

Сторожук Николай Леонидович,
кандидат технических наук,
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
советник генерального директора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», Санкт-Петербург

Защита состоится 26 июня 2019 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 219.004.04, созданного при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 23 мая 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.004.04,
канд. техн. наук



М.А. Маколкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Интернет вещей (ИВ) является современной концепцией развития сетей связи в краткосрочной и долгосрочной перспективах. Концепция подразумевает объединение устройств («вещей»), оснащённых встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой, в единую всемирную сеть. На сегодняшний день число устройств, подключенных к сети, превышает число всех жителей планеты и продолжает стремительно увеличиваться, что поднимает вопрос о присвоении каждому объекту уникального адреса для обеспечения конфиденциальности и безопасности при передаче данных, а также однозначной идентификации устройств интернета вещей в масштабах глобальной сети. Несмотря на это, до сих пор нет общепринятого метода идентификации вещей, который бы удовлетворял всем требованиям как для существующих устройств и приложений Интернета вещей, так и для вновь создаваемых.

Существуют различные методы идентификации, которые не могут использоваться многими устройствами интернета вещей по ряду объективных причин. При этом очень важным свойством является фиксированность соотношения идентификатора с фактическим устройством интернета вещей (физическим адресом), а также универсальность в применении идентификатора в различных отраслях.

Одним из направлений обеспечения гарантированной и однозначной идентификации устройств интернета вещей является использование уникального идентификатора устройства ИВ в ССОП в совокупности с параметрами самого устройства. При этом надо учитывать, что так называемый универсальный идентификатор должен поддерживать (быть совместим) с уже существующими методами идентификации, такими как IMEI, MAC, ID и другие.

В качестве уникального глобального идентификатора предлагается множество различных программных и аппаратных решений. Одним из решений, которое удовлетворяет предъявляемым требованиям по идентификации устройств и приложений Интернета вещей, является архитектура цифровых объектов DOA (Digital Object Architecture).

Архитектура цифровых объектов и ее базовая система резолюции "Handle system" представляют двухуровневую систему резолюций и распределенную архитектуру, что позволяет с высокой надежностью осуществлять идентификацию цифровых объектов в Интернет.

В связи с тем, что архитектура цифровых объектов наиболее полно удовлетворяет перечисленным выше требованиям разработка моделей и методов для идентификации устройств и приложений ИВ представляется весьма актуальной.

Степень разработанности темы. На сегодняшний день в научных школах, возглавляемых российскими и зарубежными учеными А.Е. Кучерявым,

В.М. Вишневым, К.Е. Самуйловым, С.Н. Степановым, А.П. Пшеничниковым, А.В. Росляковым, В.Г. Карташевским, В.К. Сарьяном, Е.А. Кучерявым, М.А. Медришом, Р.В. Киричком, Р.Э. Каном, К. Бланки, Л. Ланном, П.А. Лайонсом, Г. Манепалли, С. Саном и др. ведутся работы по исследованию Интернета вещей, а также сетей связи пятого поколения. Идентификация устройств и приложений Интернета вещей является одной из задач, рассматриваемых в перечисленных научных школах. Дальнейшее увеличение количества устройств Интернета вещей диктует необходимость уже сегодня предпринимать решительные действия по исследованию и внедрению новых методов идентификации. В связи с этим, тема диссертационной работы «Разработка моделей и методов идентификации устройств и приложений Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов» является актуальной и направлена на совершенствование научно-методического аппарата исследования идентификации устройств Интернета вещей в гетерогенных сетях связи.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка моделей и методов идентификации устройств и приложений Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- проанализировать существующие методы идентификации для проводных и беспроводных технологий Интернета вещей;
- проанализировать архитектуру цифровых объектов и возможности ее использования в качестве платформы идентификации в современных телекоммуникационных сетях связи;
- разработать методы модернизации сетевой архитектуры цифровых объектов для улучшения параметров качества обслуживания при идентификации устройств и приложений Интернета вещей;
- проанализировать эффективность использования протоколов сигнализации архитектуры цифровых объектов для обеспечения сетевой безопасности устройств Интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов;
- разработать модель системы массового обслуживания, характеризующую время обслуживания заявок и распределение времени между поступления заявок на сервер глобального регистра;
- разработать методы интеграции идентификаторов DOA для идентификации устройств и приложений Интернета вещей в гетерогенных сетях связи для проводных и беспроводных технологий передачи данных;
- провести серию натурных экспериментов для исследования параметров качества обслуживания при использовании архитектуры цифровых объектов для идентификации устройств и приложений Интернета вещей.

Предмет исследования. Предметом исследования является идентификация устройств и приложений Интернета вещей в гетерогенных сетях связи.

Объект исследования. Объектом исследования являются физические и виртуальные Интернет вещи.

Методологические и теоретические основы исследования. Проводимые исследования базируются на теории массового обслуживания, математической статистике, методах моделирования и натуральных экспериментах. Моделирование фрагмента сети ИВ проведено на основе пакета имитационного моделирования Anylogic.

Научная новизна исследования.

1. Разработанный метод построения сетевой архитектуры цифровых объектов с промежуточным уровнем взаимодействия отличается от известных тем, что позволяет снизить сетевую задержку при обмене служебными сообщениями между локальными и глобальными регистрами DOA.

2. Разработана модель обслуживания заявок на сервере GHR, отличающаяся от известных тем, что для представления этого процесса используется система массового обслуживания типа M/M/n/m. Это позволяет оценить производительность системы с произвольным распределением входных и выходных потоков и временем обслуживания на GHR и тем самым увеличить производительность (обслуживание заявок) в 15 раз при максимальной интенсивности нагрузки.

3. Предложенный метод идентификации устройств и приложений Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов отличается от известных тем, что для идентификации устройств и приложений Интернета вещей предложено использовать архитектуру цифровых объектов, что позволяет интегрировать все уникальные параметры устройств, существующие идентификаторы и другие метаданные как для проводных, так и беспроводных технологий передачи данных.

4. Разработана модельная сеть, позволяющая проводить тестирование идентификации устройств и приложений Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов, отличающаяся тем, что позволяет провести тестирования идентификаторов Интернета вещей для наиболее распространенных беспроводных технологий передачи данных.

Теоретическая и практическая значимость исследования: Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что на основе разработки моделей и методов идентификации устройств и приложений Интернета вещей были получены новые результаты, позволившие рассмотреть возможные сценарии внедрения идентификации на базе архитектуры цифровых объектов и предложить технические решения по обеспечению совместимости с существующими методами идентификации и функционирование в гетерогенных сетях связи.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждается актом внедрения и состоит в разработке модельной сети для тестирования методов идентификации устройств и приложений Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Метод построения сетевой архитектуры цифровых объектов за счет введения промежуточного уровня взаимодействия.

2. Модель повышения производительности архитектуры цифровых объектов.

3. Метод идентификации устройств и приложений Интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных автором научных и практических результатов определяется обоснованным выбором исходных данных при постановке частных задач исследования, основных допущений и ограничений, принятых в процессе математического моделирования, соответствием расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами, и апробацией результатов исследований на международных, всероссийских и ведомственных научно-технических конференциях и конгрессах.

Основные теоретические и практические результаты работы реализованы в учебном процессе кафедры Сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ. Кроме того, научные результаты, полученные Аль Бахри М.С.Н., были использованы при подготовке вкладов СПбГУТ в Сектор Стандартизации Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2015), Международной научной конференции «Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям», АРСТ (Москва, 2017), 71–73-й Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 2016–2018), 3-й Международной конференции молодых ученых «Интернете вещей и его приложения» INTNITEN (Санкт-Петербург, 2017), X Международном конгрессе по ультрасовременным системам телекоммуникаций и управления, ICUMT (Москва, 2018), 18-й Международной конференции «Интернет вещей, умные пространства, сети и системы следующего поколения», NEW2AN (Санкт-Петербург, 2018), 4-й Международной конференции по мобильным пограничным вычислениям «Большие данные и умный город», ICBDS (Оман, 2019).

Лабораторные стенды демонстрировались на Региональном форуме МСЭ «Интернет вещей, телекоммуникационные сети и большие данные как базовая инфраструктура для цифровой экономики» 4–6 июня 2018 года в Санкт-Петербурге и семинаре-практикуме МСЭ «Глобальные подходы к борьбе с контрафактом и похищенными устройствами ИКТ» 23 июня 2018 года в Женеве.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них: 4 в рецензируемых научных изданиях; 6 в изданиях, индексируемых в международных базах данных; 6 в других изданиях и материалах конференций.

Личный вклад автора. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Соответствие специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 3, 10, 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и 2 приложений. Общий объем работы – 153 страниц, из них основного текста – 142 страницы. Работа содержит 13 рисунков и 18 таблиц. Список литературы включает 142 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, описано состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определена научная новизна и практическая ценность результатов, описана область их применения, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме работы, описана структура диссертации и ее объем.

В первой главе диссертационной работы приведен анализ существующих методов идентификации Интернета вещей, включая классификацию идентификаторов для ИВ и категории требований для идентификаторов ИВ, стандарты идентификаторов. Аналитический обзор по международным исследованиям идентификации в Интернете вещей показал, что существуют недостатки, представленные в работах авторов, которые будут восполнены на базе проведенного исследования.

Из материалов проведенного обзора можно сделать заключение, что вопрос идентификации в Интернете вещей недостаточно исследован. Глобальные исследования по применению DOA для задач идентификации устройств интернета вещей только начинаются, что подчеркивает перспективу повсеместного применения архитектуры цифровых объектов и создание уникальных условий для транснациональной единой системы идентификации.

Рассмотрена общая концепция архитектуры цифровых объектов. Показано, что основными структурными элементами DOA являются цифровой объект, система резолюции идентификатора (Handle System) и репозиторий и реестр цифровых объектов. Каждому цифровому объекту в описываемой архитектуре ставится в соответствие уникальный идентификатор – DOI (*от англ.* Digital Object Identifier). Присваиваемые идентификаторы остаются постоянными и не зависят от состояния цифрового объекта. Именно система резолюции связывает идентификатор с информацией о текущем статусе цифрового объекта (местонахождение, доступ, информация об аутентичности).

В архитектуре DOA система резолюции является двухуровневой. Первым уровнем резолюции является глобальный реестр (GHR, *от англ.* Global Handle Registry); вторым уровнем – набор локальных реестров (LHR, *от англ.* Local Handle Registry) или локальных сервисов (LHS, *от англ.* Local Handle Service). Для разрешения идентификатора в данной подсистеме вначале идет обращение к глобальному реестру GHR, который сообщает информацию о локальном реестре LHR, в котором содержится необходимая информация о цифровом объекте. Схематически данный процесс представлен на рисунке 1.

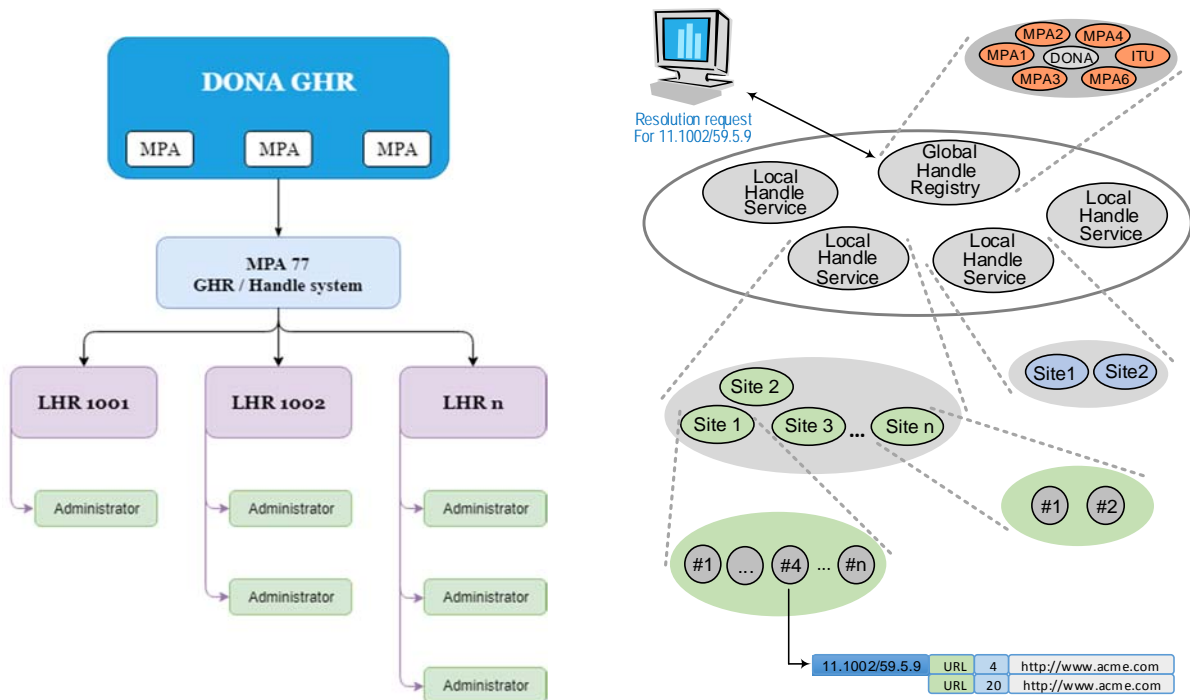


Рисунок 1 – Структура системы резолюции (Handle system)

Сама структура идентификатора DOA также соответствует двухуровневой системе. Первая часть называется префикс; вторая часть – суффикс. Префикс позволяет установить сведения о локальном реестре цифрового объекта LHR. Данное соответствие префикса и информации об администраторе хранится в глобальном реестре GHR. Суффикс же уже однозначно идентифицирует конкретный объект, и данная информация, связывающая суффикс с конкретным объектом, хранится в локальном реестре LHR.

Во **второй** главе диссертационной работы приведен анализ системы идентификации на базе архитектуры цифровых объектов. Подробно рассмотрены основные элементы: система резолюций, модель данных, идентификатор цифровых объектов. Показано как осуществляется взаимодействие между регистрами, а также рассмотрены протоколы сигнализации DOIP и IRP.

Взаимодействие элементов в рамках DOA предполагает коммуникации между распределенными LHR-серверами, расположенными в разных странах. Однако распределенность приводит к увеличению сетевой задержки, величина которой может оказаться неприемлемой для сервисов и приложений, требующих ультрамалых задержек в сетях связи 5G/IMT-2020. Таким образом, одной из характеристик системы резолюции, критичной для идентификации Интернета вещей, является среднее время обслуживания одного запроса.

Для минимизации сетевой задержки предлагается разбить систему резолюций, введя регистры промежуточного уровня между GHR и распределенными LHR – Middle Handle Register, MHR. Каждый MHR может быть привязан к определенному географическому региону на карте мира с учетом плотности и количества расположенных там устройств, а также плотности производителей (т.е. плотности

LHR). LHR взаимодействует с ближайшим MHR вместо удаленного GHR, что уменьшает расстояние передачи данных по каналам связи и как следствие снижает сетевую задержку. Рисунок 2 иллюстрирует структуру системного уровня с новыми MHR. Выбор оптимального количества MHR и их географического распределения – задача, которая должна быть решена с учетом параметров качества обслуживания сетей связи и удорожания общей стоимости системы.

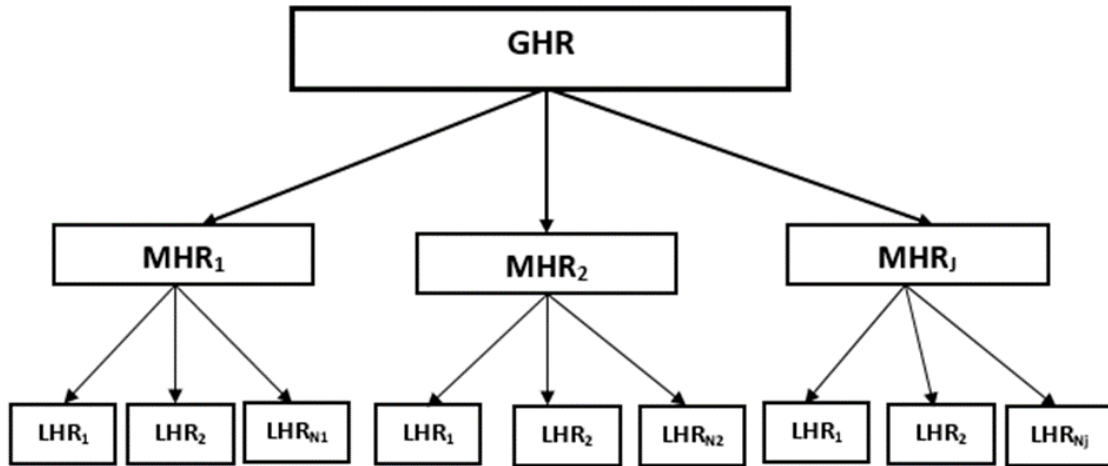


Рисунок 2 – Основные компоненты DOA с промежуточным уровнем взаимодействия

Предположим, что глобальный регистр GHR располагается в Женеве (Швейцария), таким образом, серверы MHR могут располагаться по окружности круга радиуса r , центром которого будет Женева. Стоит отметить, что r – это проектный параметр, т.е. он может быть получен путем решения задачи линейной оптимизации.

В предлагаемой системе сообщения передаются в основном между LHR и MHR. Таким образом, сетевая задержка для такой системы может быть рассчитана следующим образом:

$$L_i^j \propto D_i^j, \quad (1)$$

$$D_i^j = \sqrt{(l_i^j - l_j)^2 + (h_i^j - h_j)^2},$$

где L_i^j – это сетевая задержка для данных, передаваемых между i -м LHR и j -м MHR; D_i^j – расстояние между передатчиком i -го LHR и приемником j -го MHR.

Если отсутствует MHR, то регистры LHR взаимодействуют с GHR. Таким образом, сетевая задержка вычисляется между LHR и GHR, которые сохраняют свои местоположения в обеих системах (т.е. в системе с MHR и в традиционной системе без MHR). Сетевую задержку для системы без MHR можно рассчитать на основе следующего уравнения:

$$L_i^{GHR} \propto D_i^{GHR}, \quad (2)$$

$$D_i^{GHR} = \sqrt{(l_i^j - l)^2 + (h_i^j - h)^2},$$

где L_i^{GHR} представляет собой сетевую задержку данных, передаваемых между i -м регистром LHR и GHR; D_i^{GHR} – это расстояние между i -м LHR и GHR.

Для сравнения между системой без MHR и новой структурой с MHR уравнения (2) и (1) представляются следующим образом:

$$\frac{L_i^{GHR}}{L_i^j} \propto \frac{D_i^{GHR}}{D_i^j}.$$

Тогда

$$\frac{L_i^{GHR}}{L_i^j} \propto \frac{\sqrt{(l_i^j - l)^2 + (h_i^j - h)^2}}{\sqrt{(l_i^j - l_j)^2 + (h_i^j - h_j)^2}}.$$

Так как $D_i^j \ll D_i^{GHR}$, то $L_i^{GHR} \gg L_i^j$.

Следовательно, предлагаемая система резолуций обеспечивает более низкую сетевую задержку за счет уменьшения расстояния между серверами.

На базе предложенного метода и соответствующей математической модели был проведен численный анализ и проведено тестирование на базе модельной сети для проверки производительности по сравнению с существующей архитектурой DOA. Для численного анализа был использован программный пакет Matlab. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Процент уменьшения задержки при использовании MHR

MHR _j	Уменьшение сетевой задержки LHR _i , %										Среднее значение уменьшения сетевой задержки t , %
	LHR ₁	LHR ₂	LHR ₃	LHR ₄	LHR ₅	LHR ₆	LHR ₇	LHR ₈	LHR ₉	LHR ₁₀	
MHR ₁	73,82	40,70	61,86	84,82	80,55	43,09	1,59	46,16	26,19	27,19	48,60
MHR ₂	93,17	47,18	24,97	62,11	50,68	83,48	55,38	61,04	–	–	59,75
MHR ₃	27,24	48,23	25,74	61,11	13,67	16,15	–	–	–	–	32,02
MHR ₄	61,52	66,53	54,21	33,94	–	–	–	–	–	–	54,05
MHR ₅	39,75	74,39	66,94	62,12	85,03	88,06	44,33	59,54	–	–	67,54
MHR ₆	76,98	86,87	76,96	70,36	98,75	74,97	81,23	92,70	37,43	42,62	73,89
MHR ₇	45,25	78,69	38,50	28,35	1,29	–	–	–	–	–	38,42
MHR ₈	79,57	75,66	85,57	82,75	–	–	–	–	–	–	80,89
MHR ₉	84,09	72,33	74,40	85,06	64,88	–	–	–	–	–	76,15
MHR ₁₀	76,41	95,68	76,93	88,25	–	–	–	–	–	–	84,32
Уменьшение средней сетевой задержки всех MHR											61,56

Предположим, что предлагаемая система MHR содержит $N = 10$ промежуточных регистров, которые расположены в разных странах и работают со всеми группами локальных регистров LHR по всему миру.

В таблице 1 представлены данные о процентном уменьшении сетевой задержки каждого LHR при использовании модифицированной системы регистров по сравнению с существующей системой регистров, а также средние значения уменьшения задержки для каждой группы LHR, связанных с определенным MHR. Средняя сетевая задержка всех LHR, используемых в предлагаемой системе с промежуточными MHR, на 61,56 % меньше, чем в существующей системе LHR. Таким образом, модифицированная система регистров может уменьшить сетевую задержку до 60 % по сравнению с существующей системой регистров без MHR.

В третьей главе диссертационной работы проанализирован состав факторов, влияющих на идентификацию интернета вещей. Далее обобщены основные особенности идентификации для интернета вещей, а именно:

- различный жизненный цикл устройств (одни объекты ИВ могут существовать довольно длительное время, другие же – наоборот);
- взаимоотношение объектов интернета вещей с другими сущностями, не входящими в данную систему (у устройств интернета вещей в течении жизненного цикла могут изменяться владельцы и администраторы, что влияет на процессы идентификации, аутентификации и авторизации);
- особые требования к контексту, в котором работают устройства (в определенных случаях доступ объектов к одним и тем же данным может быть разрешен или ограничен в зависимости от ситуации);
- требования к обеспечению механизмов защиты (при проектировании данных механизмов стоит учитывать ограниченность устройств интернета вещей по ресурсам и производительности);
- возможность расширения системы идентификации до огромного количества устройств (свыше миллиарда);
- возможность эффективно работать для самых различных устройств (устройства в сети ИВ могут быть крайне разнородны по своим ресурсам и производительности);
- прозрачность системы адресации и независимость от сети (в отличие от классических систем адресации, применяемых, например, в сети Интернет, идентификация устройств Интернета вещей должна быть независима от того, в какой сети они находятся или какому пользователю принадлежат; кроме того, следует учитывать, что устройства Интернета вещей могут менять свое местоположение, но при этом быть однозначно идентифицированы в сети);
- гибкий и эффективный механизм резолуции идентификаторов (устройства Интернета вещей должны быть точно определены в независимости от их

местоположения; кроме того, должна присутствовать простота в подключении и настройке нового объекта IoT к существующей сети);

– безопасность и сохранность пользовательских данных (не стоит забывать, что устройства ИВ работают зачастую с огромным количеством персональных данных, что требует дополнительных мер защиты).

Одним из возможных решений по проверке реализации перечисленных выше факторов при идентификации ИВ на базе архитектуры цифровых объектов является разработка имитационных моделей в пакете Anylogic.

В качестве системы СМО рассматривалась модель обслуживания заявок на сервере GHR, отличающаяся от известных тем, что для представления этого процесса используется система массового обслуживания типа M/M/n/m. Данная модель характеризует систему с экспоненциальным распределением времени обслуживания заявок и экспоненциальным распределением времени между поступления заявок. Кроме того, модель удовлетворяет следующим условиям:

– наличие нескольких каналов обработки. В модели рассматривались серверы GHR как самостоятельные сущности, обрабатывающие входящие запросы;

– ограничение на длину буфера GHR отсутствует. Каждый запрос, поступивший в систему будет обслужен;

– нет приоритетности у поступающих запросов, каждый запрос обрабатывается в той последовательности, в которой поступил в систему.

В качестве времени работы системы был выбран промежуток в 200 с.

На базе разработанной имитационной модели был проведен оптимизационный эксперимент, направленный на установление наиболее подходящей инфраструктуры GHR-серверов при текущей конфигурации временных задержек с целью снизить среднее время разрешения идентификатора. Основным параметром для оптимизации будет количество GHR-серверов, используемым каждым из МРА. В качестве целевой функции будем стремиться минимизировать время разрешения запроса. Установим время разрешения не более 1 секунды. Зададимся значением интенсивности в 50 Эрл.

На рисунке 3 (синяя линия) показана зависимость среднего времени разрешения идентификатора (сек.) от интенсивности поступающих запросов (Эрл.) при текущей конфигурации системы резолуции и полученной на основе оптимизационного эксперимента. Как видно из графика, с ростом интенсивности нагрузки увеличивается и среднее время разрешения одного идентификатора, причем при больших нагрузках это время доходит до 30 секунд, что достаточно много для реальных приложений, особенно если сравнивать с показателями системы DNS.

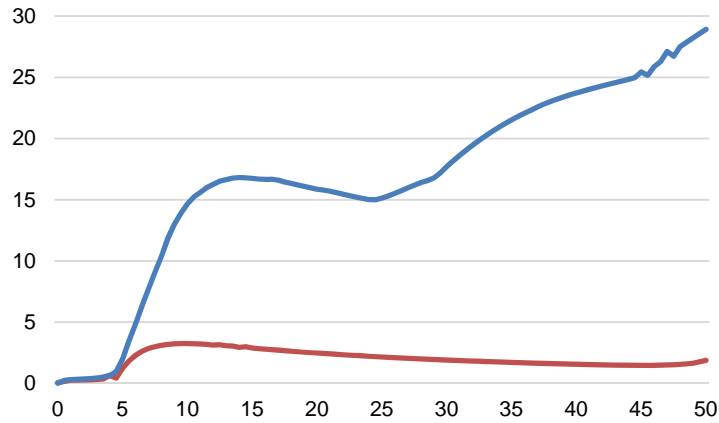


Рисунок 3 – Зависимость времени разрешения идентификаторов от интенсивности запросов при текущей (синяя линия) и оптимальной конфигурации (красная линия)

Основываясь на результатах моделирования системы можно сделать выводы о том, что текущая инфраструктура системы резолюции требует дальнейшего масштабирования и распределения для того, чтобы быть способной выдерживать большие нагрузки и минимизировать время разрешения поступающих запросов.

Была разработана математическая модель системы резолюций. В модели группа реестров GHR определяется символом G_j , где $j = 1, 2, 3 \dots N$, где N – общее число реестров GHR в системе. Каждый реестр GHR объединяет и контролирует определенный набор локальных реестров. Набор локальных реестров, подсоединенных к j -му GHR, обозначается символом L_{ji} , где $i = 1, 2, 3 \dots M_j$, где M_j – общее количество LHR, подсоединенных к j -му GHR. Переданные пакеты прибывают на сервер с определенной частотой, соответствующей Пуассоновскому процессу, формируя одиночную очередь на контроллере. Такая система может быть представлена на основе многоканальной модели массового обслуживания (M/M/s).

Тогда среднее время ответа T_j реестра GHR G_j равно сумме времени в очереди и времени обработки, и может быть вычислено при помощи формулы Эрланга, как функция частоты поступления λ_j запросов и частоты обслуживания μ :

$$T_j(\lambda) = \frac{f\left(s, \frac{\lambda_j}{\mu}\right)}{s\mu_j - \lambda_j} + \frac{1}{\mu}. \quad (3)$$

Функция $f\left(s, \frac{\lambda}{\mu}\right)$ определяет вероятность того, что все серверы в системе используются, и любая из поступивших заявок попадет в очередь:

$$f\left(s, \frac{\lambda}{\mu}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{1-\gamma}\right) \left(\frac{s!}{(s\gamma)^s}\right) \sum_{k=0}^{s-1} \frac{(s\gamma)^k}{k!}}, \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\lambda_j}{s \cdot \mu}. \quad (5)$$

Функция γ показывает, что использование системы отражает также ее стабильность. Система стабильно распределена, только если показатель использования системы γ меньше единицы. Данная информация может быть корректно интерпретирована при помощи диаграммы состояний многоканальной модели M/M/s. В случае, когда число заявок в очереди больше, чем на сервере контроллера, обработка будет происходить с той же частотой μ , при этом контроллер будет предельно заполнен (Рис. 4).

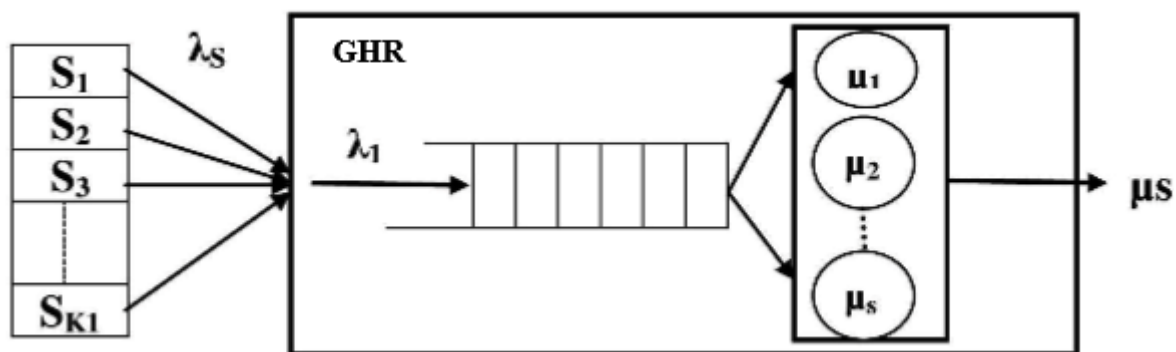


Рисунок 4 – Представление процесса разрешения идентификаторов на сервере GHR в виде объектов СМО

Частота поступления заявок λ_j реестра GHR G_j рассчитывается как сумма средних частот поступления заявок на локальных реестрах (L_i), подсоединенных к реестру G_j :

$$\lambda_j = \sum_{L_i} \lambda_i. \quad (6)$$

Средняя нагрузка на сервер-посредник G_j рассчитывается как среднее число поступивших и обработанных запросов. При помощи формулы Эрланга рассчитывается средняя нагрузка L_j на реестрах GHR:

$$L_j(\lambda) = s\gamma + \frac{\gamma}{1-\gamma} f\left(s, \frac{\lambda_j}{\mu}\right). \quad (7)$$

Таким образом, на базе полученной формулы Эрланга можно произвести численный расчет средней нагрузки L_j на GHR.

В четвертой главе диссертационной работы представлен метод идентификации устройств и приложений интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов, который позволяет идентифицировать устройства и приложения ИВ в глобальном масштабе.

Для решения ряда задач перед повсеместным внедрением архитектуры цифровых объектов необходимо проанализировать методы интеграции и совместимости уникального DOA идентификатора в электронные устройства ИВ.

В качестве примеров базовых технологий передачи данных, применяемых для взаимодействия устройств интернета вещей с Интернет (как напрямую, так и через шлюз) рассмотрим технологии: WiFi, ZigBee (IEEE 802.15.4) и LoRa (IEEE 802.15.4g).

Перечисленные технологии передачи данных предполагают наличие собственного физического адреса, который задается заводом-производителем, и логического адреса. С учетом этого, в зависимости параметров устройств ИВ, определялся доступный функционал и методы добавления записи с DOA идентификатором, однако базовые методы внесения идентификатора в устройства ИВ являлся одинаковыми для всех (Рис. 5).



Рисунок 5 – Внесение базовой информации в устройство на микроконтроллере на этапе производства

В данном случае, на этапе производства каждое устройство ИВ, определяемое в глобальной системе резолюции, обязано иметь прописанный программными методами (по аналогии с существующими идентификаторами, такими как MAC или IMEI) цифровой идентификатор объекта и ключ для доступа к модификации метаданных идентификатора. Вписывание этих данных должно сопровождаться созданием соответствующих handle-записей в LHS-базах производителя устройства ИВ.

Наличие у микроконтроллера собственной цифровой копии в глобальной системе резолюции обусловлено возможностью создания универсальных методов для идентификации устройств интернета вещей. В качестве подобной информации, хранимой в уникальном для каждого выпущенного устройства домене, может выступать версия доступных протоколов устройства, привязка к иным технологиям идентификации, сопровождающая информация или даже базовые команды доступа для устройства ИВ. В общем случае, ключ доступа и DOI должны быть доступны для управляющих устройств. В случае наличия у управляющего устройства полноценной операционной системы, доступ к этим данным осуществляется при помощи драйвера ОС; если в качестве управляющего устройства выступает микроконтроллер, доступ к данным осуществляется через базовые команды микроконтроллера.

На рисунке 6 представлена реализация предлагаемого метода, когда устройство 1 при помощи приложения осуществляет запись в доступное для устройства поле цифрового объекта «network_address» актуальный глобальный адрес в IP-сети. Благодаря этому возможно взаимодействие двух различных устройств (1 и 2) без

серверов-посредников, обычно оказывающих поддержку в установлении соединения. Для установления соединения достаточно иметь DOI устройства ИВ.

Указанный способ подходит для сложных устройств ИВ, содержащих как минимум два устройства на микропроцессоре, примером которых является большинство современных смартфонов. Отсутствие реализации криптографических функций, необходимых для модификации данных в системе резолюции, а также отсутствие прямых методов доступа в глобальную сеть делают невозможным реализацию подобных функций на простых устройствах (функционирующих на базе микроконтроллеров или микрочипов). В случае использования устройств ИВ в приложениях типа Умный дом, на базе протокола ZigBee, данный пример не является реализуемым, т.к. доступ к Интернет осуществляется через шлюз, и как следствие, к системе резолюции у конечных устройств нет доступа. Реализация подобного функционала должна осуществляться через программное обеспечение шлюзов в совокупности с реализацией необходимого функционала в приложениях ZigBee.

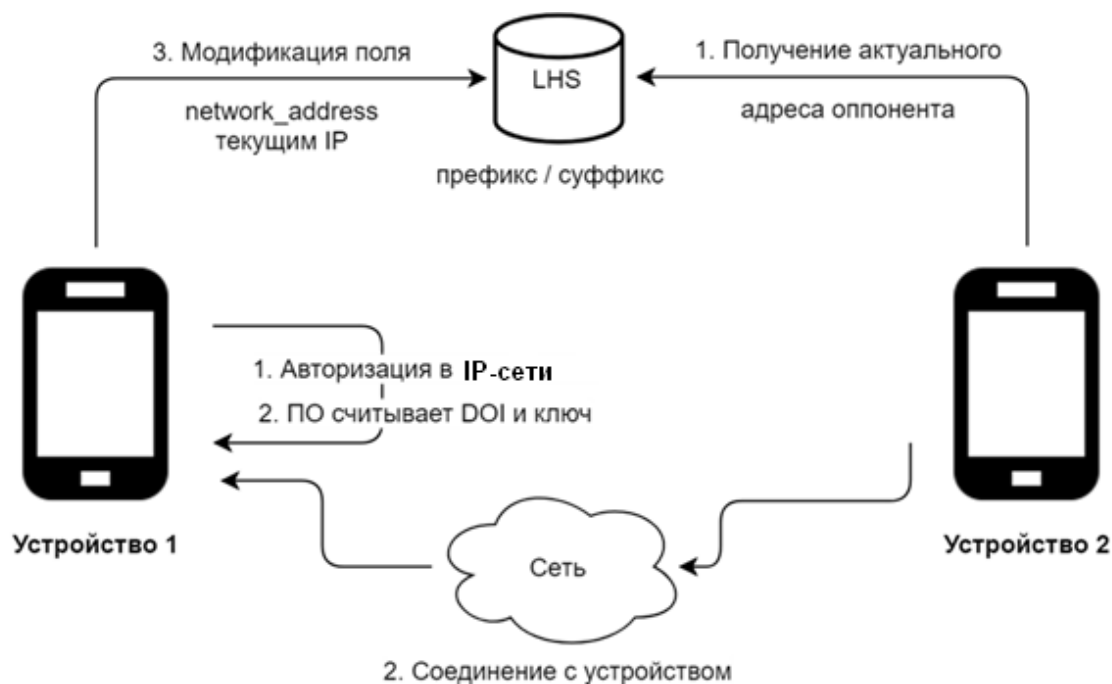


Рисунок 6 – Реализация полей цифрового объекта для хранения сетевого адреса устройства

Дополнительным функционалом, необходимым для реализации на устройствах ИВ одновременно с получением DOI и уникального ключа является возможность перезаписи таковых на произвольные с сохранением оригинальных значений метаданных для подтверждения подлинности устройств и борьбы с контрафактом.

В рамках проводимого исследования была разработана математическая модель модификации архитектуры цифровых объектов с целью повышения доверия и безопасности при обмене данными между элементами архитектуры цифровых объектов и устройствами ИВ. Целью предлагаемого метода и соответствующей

математической модели является защита конфиденциальности ИВ в домене приложений.

На базе модели удалось минимизировать число сообщений для обеспечения процесса аутентификации. Данная схема эффективна для применения в устройствах ИВ, т.к. она позволяет сократить общий объем передаваемых данных и одновременно уменьшить сетевые задержки в процессе обеспечения безопасности.

Рассмотрены перспективы внедрения идентификации устройств и приложений интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов. Показано, что предлагаемая интеграция должна способствовать более открытому обмену данными между разными устройствами и приложениями ИВ, а предлагаемые в диссертации методы, модели и подходы позволят модернизировать существующую инфраструктуру DOA и обеспечить лучшие параметры ее функционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения настоящей диссертационной работы автором получены следующие основные результаты:

1. Проанализированы различные системы идентификации, их архитектура, структура идентификаторов и примеры их использования в повседневной жизни. Проведенный обзор международной деятельности по исследованиям идентификации в концепции Интернета вещей показал, что в настоящее время отсутствуют прикладные исследования, посвященные идентификации устройств и приложений Интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов.

2. Разработан метод построения сетевой архитектуры цифровых объектов за счет введения промежуточного уровня взаимодействия (Middle Handle Register – MHR) между глобальным регистром (Global Handle Register – GHR) и локальным регистром (Local Handle Register – LHR). На базе предложенной математической модели был проведен численный анализ, который показал, что предлагаемая система обеспечивает более высокую производительность с точки зрения сетевой задержки, ввиду уменьшения расстояния между серверами LHR, что достигается путем развертывания регистров промежуточного уровня обработки (MHR). Результаты моделирования показали, что введение промежуточного уровня регистров MHR позволит снизить задержку на 60% по сравнению с существующей архитектурой.

3. Проанализирован состав факторов, влияющих на идентификацию интернета вещей. Определены обобщены основные особенности идентификации для интернета вещей. Разработана модель системы резолюции идентификаторов цифровых объектов как системы массового обслуживания, на базе которой выполнен оптимизационный эксперимент и получена конфигурация системы резолюции, позволяющая сократить время на разрешение идентификатора устройства. Система резолюций идентификаторов DOA была представлена в виде СМО. Разработана имитационная модель в пакете Anylogic, которая с заданным уровнем абстракции воспроизводит обмен данными между компонентами DOA. Проведенные эксперименты показали, что разрешение идентификатора в системе происходит гораздо быстрее на базе предлагаемого метода обращений к МРА. Прирост скорости в 15 раз достигается на максимальной интенсивности нагрузки сервера.

4. Разработан метод идентификации устройств и приложений Интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов, который позволяет идентифицировать устройства и приложения ИВ в глобальном масштабе. Рассмотрены методы интеграции идентификаторов DOA в устройства интернета вещей, поддерживающих различные технологии беспроводной передачи данных и представлена структура метаданных, которые могут использоваться в архитектуре цифровых объектов для устройств интернета вещей для подтверждения оригинальности в совокупности с традиционными идентификаторами.

5. Рассмотрены перспективы внедрения идентификации устройств и приложений интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов. Показано, что предлагаемая интеграция должна способствовать более открытому обмену данными между разными устройствами и приложениями ИВ.

Разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы реализованы в виде лабораторных стендов, что позволяет использовать их для моделирования различных сценариев взаимодействия.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Аль-Бахри, М.С. Архитектура цифровых объектов как основа идентификации в эпоху цифровой экономики / М.С. Аль-Бахри, Р.В. Киричек, А.С. Бородин // *Электросвязь*. – 2019. – № 1. – С. 12–22.
2. Аль-Бахри, М.С. Метод идентификации устройств и приложений интернета вещей в гетерогенных сетях связи на базе архитектуры цифровых объектов / М.С. Аль-Бахри // *Электросвязь*. – 2019. – № 4. – С. 41–47.
3. Аль-Бахри М.С. Моделирование системы идентификации устройств интернета вещей на базе архитектуры цифровых объектов / М.С. Аль-Бахри, Р.В. Киричек, Д.Д. Сазонов // *Труды учебных заведений связи*. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 42–47.
4. Ateya, A. End-to-end system structure for latency sensitive applications of 5G / A. Ateya, M. Al-Bahri, A. Muthanna, and A. Koucheryavy // *Электросвязь*. – 2018. – № 6. – С. 56-61.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных база данных

1. Al-Bahri, M. Combating Counterfeit for IoT System based on DOA / M. Al-Bahri, A.A. Ateya, A. Muthanna, et al. // *Proceedings of the 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) 2018, St. Petersburg, Russia, November 5-9, 2018*. – IEEE, 2018. – P. 338–342.
2. Al-Bahri, M. Smart System Based on DOA and IoT for Products Monitoring and Anti-counterfeiting / M. Al-Bahri, A. Yankovsky, A. Borodin, R. Kirichek // *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*. – IEEE, 2019. – P. 25–31.
3. Al-Bahri, M. Testbed for Identify IoT Devices Based on Digital Object Architecture / M. Al-Bahri, A. Yankovsky, A. Borodin, R. Kirichek // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Proceedings of 18th International Conference, NEW2AN 2018, and 11th Conference, ruSMART 2018, St. Petersburg, Russia, August 27–29, 2018*. – Cham: Springer, 2018. – P. 129–137.
4. Kirichek, R. Transfer of multimedia data via LoRa / R. Kirichek, V.D. Pham, A. Kolechkin, M. Al-Bahri, A. Paramonov // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2017. – Vol. 10531. – P. 708–720.
5. Muthanna, A. Delay Tolerant Network model based on D2D communication / M.S.A. Muthanna, K. Abdukodir, A.A. Ateya, & M. Al-Bahri // *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC) (pp. 1–5)*. IEEE.
6. Mahmood, A. Analysis of the Internet of Things devices integration in 5G networks / L. Ignatova, A. Khakimov, A. Mahmood, & A. Muthanna // *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO) (pp. 1–4)*. IEEE.

Публикации в других изданиях и материалах научных конференций

1. Аль Бахри М.С. Машинное обучение как метод для идентификации устройств IoT анализа сетевого трафика / М.С. Аль-Бахри, Р.В. Киричек // 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2018. – С. 214–215.
2. Аль Бахри М.С. Обзор внедрения технологии SigFox в государстве Оман / М.С. Аль Бахри, Р.В. Киричек // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2017. – С. 172–173.
3. Аль Бахри М.С. Обзор методов децентрализованного хранения данных для Интернета вещей / М.С. Аль Бахри, Р.В. Киричек // 71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2016. – С. 190–191.
4. Аль Бахри, М.С. Исследование взаимодействия фрагмента беспроводной сенсорной сети с сетью связи общего пользования на базе шлюза LTE / М.С. Аль Бахри, Р.В. Киричек // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах. – СПб.: СПбГУТ, 2015. – С. 174–178.
5. Аль Б.М.С. Энергоэффективность и покрытие LPWAN (SIGFOX) как базовый компонент четвертой промышленной революции / М.С. Аль-Бахри, Р.В. Киричек // Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ2017). 2nd International School on Applied Probability Theory & Communications Technologies. – 2017. – С. 17.
6. Аль-Бахри М.С. Архитектура цифровых объектов как основа идентификации устройств Интернета вещей в сетях 5G/ИМТ-2020 / М.С. Аль-Бахри, Р.В. Киричек // INTNITEN. – 2017 – С. 159–163.