

ОТЧЕТ

Разработка рекомендаций по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей»

Содержание

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| 1 Рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» на основе анализа материалов Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) | 5 |
| 1.1. Основы теории и практики тестирования в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т | 5 |
| 1.2. Рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» на примере лаборатории ПАО «Ростелеком» и СПбГУТ..... | 7 |
| 1.2.1. Существующее положение в области лаборатории «Интернета вещей» | 7 |
| 1.2.2. Состав лаборатории «Интернета вещей»..... | 9 |
| 1.2.3. Характеристики помещений лаборатории «Интернета вещей»..... | 9 |
| 1.2.4. Структура лаборатории «Интернета вещей»..... | 10 |
| 1.2.5. Локальная вычислительная сеть лаборатории «Интернета вещей» | 12 |
| 1.2.6. Основные технические решения по локальной вычислительной сети лаборатории «Интернета вещей» | 13 |
| 1.2.7. Сеть лаборатории «Интернета вещей» | 15 |
| 1.2.8. Характеристики стендов. | 18 |
| 1.2.9. Пример тестовых спецификаций для лаборатории «Интернета вещей»..... | 19 |
| 2 Рекомендации по созданию региональных лабораторий «Интернета вещей» на базе модельной сети SDN. | 28 |
| 2.1 Роль SDN в современных сетях связи. | 28 |
| 2.2 Тестирование контроллеров SDN..... | 31 |
| 3 Рекомендации по взаимодействию региональных лабораторий «Интернета вещей» при использовании распределенной модельной сети..... | 37 |
| 3.1 Распределенные модельные сети. | 37 |
| 3.2 Виртуализация и сегментация модельных сетей. | 37 |
| 3.3 Минимальная конфигурация модельной сети в условиях создания распределенной модельной сети..... | 39 |
| 4 Перспективы развития региональных лабораторий «Интернета вещей» при широкомасштабном внедрении сетей связи с ультра малыми задержками..... | 41 |
| Заключение | 45 |
| Список литературы | 47 |

Перечень рисунков и таблиц

Таблицы

| | |
|---|----|
| Таблица 1.1 – Тестовая спецификация «Проверка корректности обработки GET-запроса» | 20 |
| Таблица 1.2 – Тестовая спецификация «Проверка корректности выполнения операции обновления ресурса» | 21 |
| Таблица 1.3 – Тестовая спецификация «Проверка корректности выполнения операции создания ресурса» Идентификатор теста | 22 |
| Таблица 1.4 – Тестовая спецификация «Проверка корректности выполнения операции удаления» | 23 |
| Таблица 1.5 – Тестовая спецификация «Определение времени задержки в процессе регистрации устройств на сервере (брокере)» | 24 |
| Таблица 1.6 – Тестовая спецификация «Определение возможности предоставления окончательным устройствам услуг при нарушении их связности» | 24 |
| Таблица 1.7 – Тестовая спецификация «Определение максимально возможного количества CoAP-запросов в секунду, обрабатываемого интернет вещью» | 25 |
| Таблица 1.8 – Тестовая спецификация «Проверка устойчивости IoT-системы к атакам по словарю» | 26 |
| Таблица 1.9 – Тестовая спецификация «Проверка устойчивости IoT-системы к DDoS-атакам» | 27 |
| Таблица 2.1 | 33 |
| Таблица 3.1. Сравнение эмуляторов сетей | 41 |

Рисунки

| | |
|---|----|
| Рисунок 1. Структура модельной сети для тестирования «Интернета вещей» | 6 |
| Рисунок 2. Структура модельной сети лаборатории «Интернета вещей» с сегментом индустриального Интернета | 8 |
| Рисунок 3. Характеристики помещений | 10 |
| Рисунок 4. Структура лаборатории «Интернета вещей» | 11 |
| Рисунок 6. Структура сети лаборатории «Интернета вещей» (часть 1) | 16 |
| Рисунок 7. Структура сети лаборатории «Интернета вещей» (часть 2) | 17 |
| Рисунок 8. Конфигурация тестируемой системы (COAP_CONF) | 20 |
| Рисунок 9. Архитектура современной сети SDN | 30 |
| Рисунок 10. Классификация тестирования для контроллеров SDN | 32 |
| Рисунок 11. Структура тестирования контроллера SDN | 36 |
| Рисунок 12. Сегмент модельной сети, представляющий собой беспроводную сенсорную сеть (БСС) | 38 |
| Рисунок 13. Сегмент модельной сети, представляющий собой программно-конфигурируемую сеть (SDN) | 39 |
| Рисунок 14. Структурная схема модельной сети | 40 |
| Рисунок 15. Модельная сеть Тактильного Интернета | 42 |
| Рисунок 16. Экспериментальный стенд на базе модельной сети Тактильного Интернета | 43 |

Введение

В отчете приведены рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей», разработанные на основе анализа рекомендаций Сектора стандартизации электросвязи (МСЭ-Т) и отчетов Сектора развития электросвязи (МСЭ-D) Международного союза электросвязи и опыта создания региональной лаборатории «Интернета вещей» ПАО «Ростелеком» и СПбГУТ. Приводятся конкретные рекомендации по структуре и составу региональной лаборатории «Интернета вещей», построению модельной и вычислительной сетей региональной лаборатории «Интернета вещей», характеристики стендов для тестирования, примеры тестовых спецификаций. Отдельный раздел посвящен использованию технологий программно-конфигурируемых сетей SDN для построения сетей региональной лаборатории «Интернета вещей». Рассмотрены возможности и проблемы создания распределенных модельных сетей для региональных лабораторий «Интернета вещей», а также перспективы их развития и требуемые решения при внедрении сетей связи с ультра малыми задержками.

1 Рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» на основе анализа материалов Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т)

1.1. Основы теории и практики тестирования в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т

Тестирование в современных сетях связи приобретает все более и более важное значение [1]. Этому способствует:

- увеличение номенклатуры производителей оборудования вследствие роста доли программного продукта в реализации технических средств электросвязи и большей открытости рынка,
- уменьшение периода разработки и внедрения новых услуг,
- отставание процесса стандартизации от процессов разработки и внедрения, увеличение доли корпоративной нормативной документации.
- увеличение стоимости тестирования по сравнению с сетями с коммутацией каналов из-за большей функциональности оборудования.
- гетерогенный характер новых сетей связи и новые требования по задержкам, надежности, плотности сетей и т.д.

Для сетей и систем связи еще на этапе сетей связи следующего поколения NGN (Next Generation Networks) были определены следующие виды тестирования [2]:

- тестирование соответствия (conformance),
- тестирование совместимости (compatibility),
- тестирование взаимодействия (interworking).

Тестирование соответствия предполагает проведения тестирования на соответствие стандартам. Этот вид тестирования в стандартах ETSI [3] определяется как тестирование протоколов и спецификаций в интересах, в основном, производителя оборудования и преимущественно проводится непосредственно на предприятиях.

Тестирование совместимости предусматривает уже проведение тестирования технических средств и/или программного обеспечения для двух и более производителей, а тестирование взаимодействия расширяет тестирование совместимости и на случай взаимодействия с существующими сетями связи. Последние два вида тестирования, как правило, во время испытаний объединяются и тогда речь идет о тестировании совместимости и взаимодействия (interoperability) [4, 5].

В том же документе ETSI тестирование совместимости и взаимодействия определяется как тестирование в интересах операторов для обеспечения сетью возможностей для пользователя по получению корректных, целостных и надежных услуг. Это тестирование проводится на сети или ее части.

Необходимость тестирования совместимости и взаимодействия с учетом роста числа производителей оборудования и увеличения доли программного продукта в нем привели к появлению модельных сетей [2]. Действительно, при необходимости тестирования даже на относительно большом промежутке времени, например, технических средств и/или

программного обеспечения 15 производителей на сети потребовалось бы создание 105 (число сочетаний из 15 по 2) опытных зон на сети, что, естественно, нереально. Поэтому, в Секторе стандартизации телекоммуникаций международного союза электросвязи была разработана базовая рекомендация по созданию модельных сетей для тестирования совместимости и взаимодействия Q.3900 [2], явившаяся основой для последующих рекомендаций по использованию модельных сетей для тестирования технических и/или программных средств для различных сетей связи.

На Рисунок 1 приведена структура модельной сети для тестирования «Интернета вещей» и его приложений из рекомендации Q.3952 [6].



Рисунок 1. Структура модельной сети для тестирования «Интернета вещей»

Модельная сеть в соответствии с Рисунок 1 и рекомендацией Q.3952 включает в себя следующее оборудование:

- для тестирования прототипов «Интернет вещей» на базе микроконтроллеров различных производителей, а также одноплатных компьютеров на базе проприетарных и открытых аппаратных платформ, таких как: ArduinoYun, IntelGalileo, IntelEdison, RaspberryPi и др.
- для тестирования беспроводных сенсорных сетей (подвижных и фиксированных);
- для тестирования систем локального позиционирования на базе IEEE 802.11 и 802.15.4a.

При этом на модельной сети могут быть осуществлены следующие виды тестирования:

- тестирование соответствия,
- тестирование совместимости и взаимодействия,
- нагрузочное тестирование,
- рейтинговое тестирование (бенчмаркинг),
- тестирование легальности.

Как видим, по сравнению с классическими видами тестирования в возможностях модельной сети для «Интернета вещей» появилось еще несколько видов тестирования, связанных, в том числе и с особенностями построения сетей и систем «Интернета вещей».

Нагрузочное тестирование подразумевает проведение тестирования сетей и систем под нагрузкой. При этом могут быть определены и предельные значения тех или иных параметров, например, длительности жизненного цикла беспроводных сенсорных сетей [7, 8], периода их стабильной работы и покрытия пространства. Это относится уже к рейтинговому тестированию или бенчмаркингу, что определено в рекомендациях МСЭ-Т [9, 10]. Тестирование легальности представляет собой новый вид тестирования, который появился при внедрении на сети связи самоорганизующихся сетей [11, 12]. Этот вид тестирования позволяет выявить наличие инородных узлов, например, в беспроводной сенсорной сети на основе тестирования профиля трафика и выявления его аномалий [13, 14]. Тестирование легальности пока не нашло широкого распространения, но такую возможность целесообразно учесть при создании модельных сетей региональных лабораторий «Интернета вещей».

В МСЭ-Т продолжают работы по определению требований к модельным сетям для тестирования новых технологий телекоммуникаций. Так, для тестирования программно-конфигурируемых сетей утверждена рекомендация Q.4061 «Структура тестирования контроллера программно-коммутируемых сетей» [15], а для сетей связи с ультра малыми задержками в завершающей стадии находится проект рекомендации Q.TI-TEST «Структура модельной сети для тестирования Тактильного Интернета» [16]. Эти направления работ будут рассмотрены в отдельных разделах, посвященных развитию модельных сетей региональных лабораторий «Интернета вещей» (разделы 2 и 3). Здесь же детализируем рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» на примере созданной в Российской Федерации лаборатории ПАО «Ростелеком».

1.2. Рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» на примере лаборатории ПАО «Ростелеком» и СПбГУТ

1.2.1. Существующее положение в области лаборатории «Интернета вещей»

Прототип лаборатории «Интернета вещей» был создан в 2012 году на базе кафедры Сетей связи и передачи данных СПбГУТ [17, 18]. В лаборатории была развернута 5-ти сегментная модельная сеть, что позволило проводить комплексное тестирование как реальных, так и виртуальных параметров «Интернета вещей». Кроме того, был создан лабораторный стенд для захвата и последующего анализа сетевого трафика на любом участке модельной сети. Структурная схема модельной сети соответствует рекомендации Q.3952.

В такой лаборатории возможно проводить исследования и тестирование для следующих технологий: Ethernet, WiFi, ZigBee, 6LoWPAN, RPL, Bluetooth Low Energy, Lora, RFID, SAW, для этих целей имеются соответствующие радиомодули с интерфейсами UART, SPI и т.д.

Минимальная конфигурация модельной сети должна включать в себя следующие составные элементы:

- не менее двух транзитных узлов, моделирующих поведение узлов сети связи общего пользования или локальных вычислительных сетей, учитывая возможность использования оборудования различных производителей;

- сети связи внутри выделенных модельных сетей, имеющие возможность использования различных технологий, учитывая возможность использования оборудования различных производителей;
- сервер имитации процессов в ССОП, являющийся участком транзитной сети, моделирующей процессы, происходящие в различных сегментах сети связи общего пользования;
- исследуемые интернет вещи с источниками питания и набором соответствующего измерительного оборудования;
- сервер управления, обеспечивающий мониторинг и общее управление сетью и процессом тестирования, генерацию потоков трафика, хранение и обработку промежуточных результатов тестирования, формирование итоговых отчетов и т.д.
- SDN-контроллер, обеспечивающий интеграцию по управлению сегментами модельной сети;
- устройство сопряжения для создания устойчивого канала связи между транзитной сетью и тестируемым оборудованием, с возможностью использования широкого спектра технологий передачи данных.

В рамках лаборатории также развернут сегмент Промышленного «Интернета вещей» (Рисунок 2).



Рисунок 2. Структура модельной сети лаборатории «Интернета вещей» с сегментом индустриального Интернета

На базе данного сегмента могут проводиться:

- исследование и оптимизация трафика Промышленного «Интернета вещей» на базе модельной сети;
- планирование топологий Промышленного «Интернета вещей»;

- разработка алгоритмов самоорганизации для сетей Промышленного «Интернета вещей»;
- тестирование взаимодействия Промышленного «Интернета вещей» с сетями связи общего пользования;
- тестирование совместимости устройств Промышленного «Интернета вещей»;
- исследования уязвимости Промышленного «Интернета вещей».

В настоящее время для развития региональной лаборатории «Интернета вещей» ПАО «Ростелеком» и СПбГУТ в целях модернизации лаборатории разработан проект, который учитывает современную специфику тестирования «Интернета вещей» с учетом предстоящего широкомасштабного внедрения сетей связи пятого поколения. При этом также учтены действующие документы Сектора развития Международного союза электросвязи по тестированию совместимости [19, 20] и проект приложения А к документу [19] по лабораториям «Интернета вещей».

1.2.2. Состав лаборатории «Интернета вещей».

Анализ потребностей рынка и наиболее актуального оборудования позволяет сформировать минимально необходимый список стендов для модельной сети в рамках лаборатории IoT:

- Стенд тестирования ПО, приложений и периферии на основе устройств Raspberry Pi3;
- Стенд тестирования ПО, приложений и периферии на основе устройств ESP32;
- Стенд тестирования ПО, приложений и устройств, работающих по технологии LoRa;
- Стенд тестирования ПО, приложений и устройств, работающих по технологии 6LoWPAN;
- Стенд тестирования технологий идентификации устройств IoT.

Стенд № 5 находится в разработке, ведутся документальные и теоретические изыскания. Но учитывая высокий процент готовности, было решено включить данный стенд в рамках общего представления создаваемой лаборатории.

Для эффективного использования ресурсов лаборатории «Интернета вещей» в ее составе предусмотрен также Центр обучения.

1.2.3. Характеристики помещений лаборатории «Интернета вещей».

Лаборатория «Интернета вещей» представляет собой ряд помещений, общей площадью 440 м², без привязки к этажности и взаимному расположению (Рисунок 3). А именно:

- 3 кабинета (20 м²);
- Лабораторная зона с серверной (210 м²);
- Центр обучения (170 м²).

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|

| Экспликация помещений | | | |
|-----------------------|-------------------|------------------------|-------|
| № пом. | Наименование | Площадь м ² | Кат.* |
| 1 | Офисное помещение | 20,00 | |
| 2 | Офисное помещение | 20,00 | |
| 3 | Офисное помещение | 20,00 | |
| 4 | Лабораторная зона | 200,00 | |
| 5 | Серверная | 10,00 | Д |
| 5 | Центр обучения | 170,00 | |

Рисунок 3. Характеристики помещений

Площадь помещений соответствует российским требованиям.

Расчет для центра обучения производится по максимально возможному нормативу в 7,65 чел./м², учитывая возможность работы инвалидов-колясочников. Предполагается установить 10 академических парт (20 человек), предусмотрено 1 место преподавателя (1 человек) и 1 рабочее место за стендом тестирования идентификации (1 человек). Таким образом, площадь составляет $22 \cdot 7,65 = 168,3$ м² минимум.

Для лабораторной зоны используется тот же норматив. Учтем 10 рабочих мест (10 человек), по 1 рабочему месту для каждого стенда тестирования (4 человека), и 2 рабочих места в помещении серверной (2 человека). Следовательно, получаем $16 \cdot 7,65 = 122,4$ м². Но в силу специфики помещения, а именно наличия производственных зон и демонстрационных стендов примем общую площадь равную 210 м².

Площади кабинетов руководителей должны составлять не более 15% от площади рабочих помещений. К расчетам примем наименьшую площадь рабочего помещения – площадь центра обучения равную 170 м². Путем вычислений методом пропорции, где x – искомое значение, $x = (170 \cdot 15) / 100$, получим максимально допустимую площадь в 25,5 м². Но к использованию используем значение в 20 м².

1.2.4. Структура лаборатории «Интернета вещей».

Для передачи информации между всеми элементами инфраструктуры комплекса предусматривается построение ядра модельной сети (локальной вычислительной сети) с применением современного оборудования, с обеспечением условий централизованной формы организации сети (Рисунок 4).

Цели построения локальной вычислительной сети:

- Организация единого информационного пространства для всех территориально распределенных телекоммуникационных устройств, обслуживающих отдельные зоны;
- Реализация современного информационного обеспечения для пользователей и всех функциональных единиц;
- Обеспечение эффективности схем управления, эксплуатации и сервисного обслуживания систем;
- Построение структуры сети таким образом, чтобы обеспечивалась возможность ее развития и повышения эффективности применения.

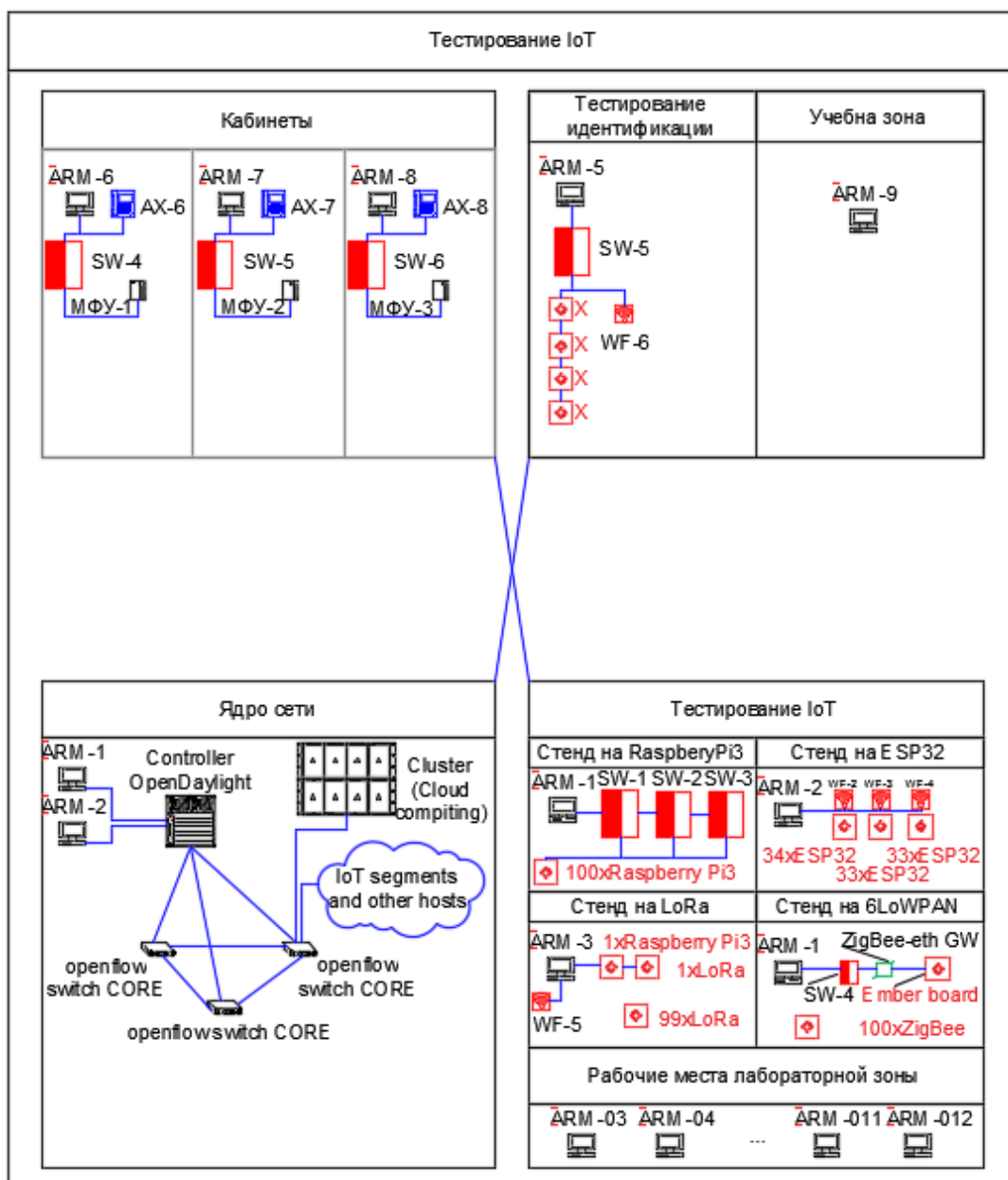


Рисунок 4. Структура лаборатории «Интернета вещей»

1.2.5. Локальная вычислительная сеть лаборатории «Интернета вещей».

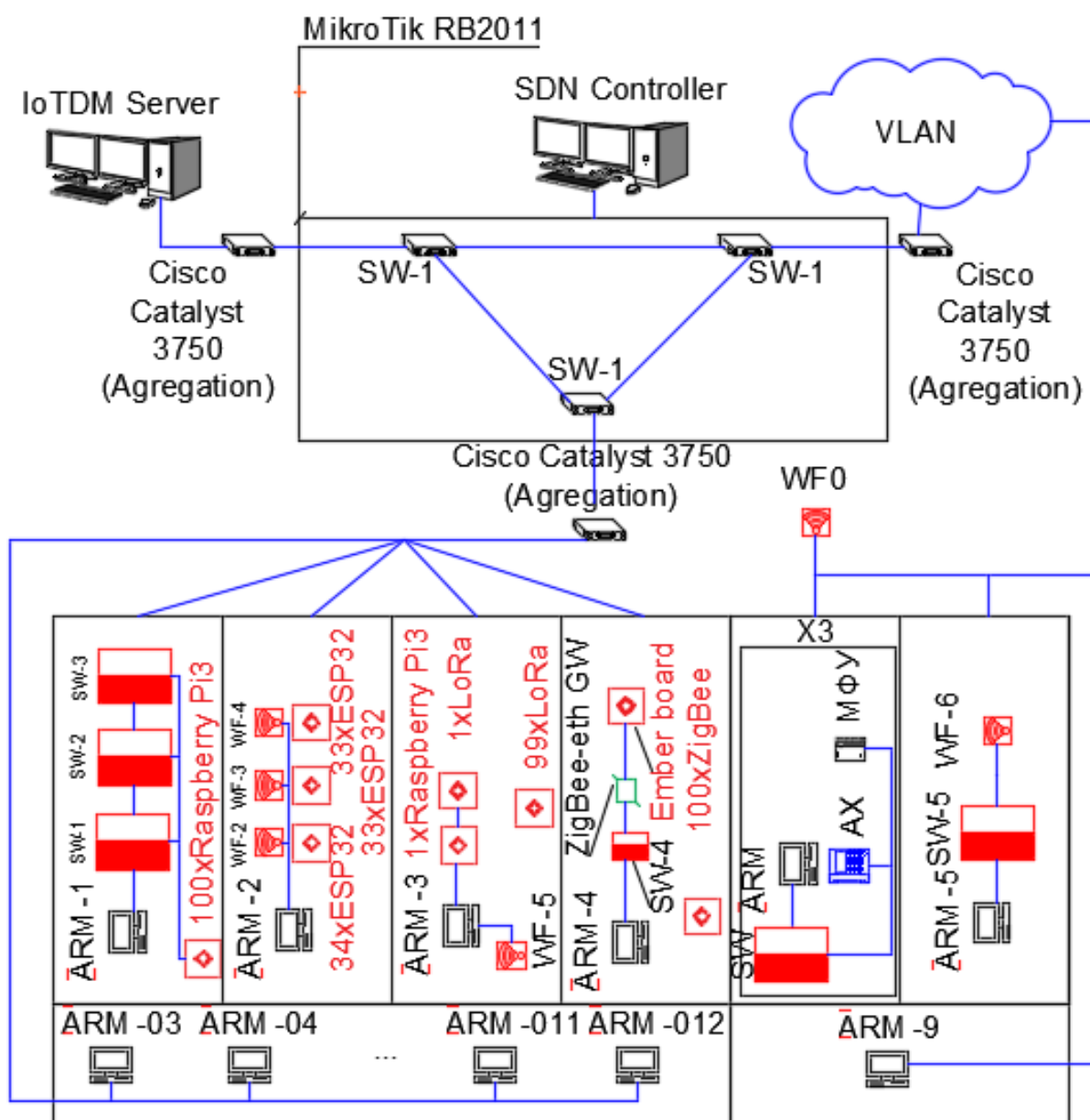


Рисунок 5. Локальная вычислительная сеть лаборатории «Интернета вещей»

Основные принципы, которые заложены в основу при создании локальной вычислительной сети, представленной на рисунке 5:

- Производительность. Оборудование ЛВС выбрано, исходя из требований к выполняемым в данный момент функциям, и имеет достаточный запас мощности для обеспечения бесперебойной работы при дальнейшем развитии системы;
- Надежность и доступность. Используемое оборудование обеспечивает функционирование локальной вычислительной сети (ЛВС) в непрерывном круглосуточном режиме (режим 24x7 – 24 часа 7 дней в неделю). 365 (366) дней в году. Критически важные элементы ЛВС имеют полное резервирование. Менее

важные элементы имеют частичное резервирование. В данном случае резервирование обеспечивается дублированием сетевых компонентов;

- Сетевая доступность серверного оборудования достигается дублированием сетевого оборудования, а также организацией бесперебойного электрического питания (учитывается проектом электропитания). Оборудование допускает «горячую замену» собственных блоков;
- Масштабируемость. Все оборудование имеет резерв, как по производительности, так и по возможности установки дополнительных модулей и расширению функциональности;
- Эффективность. Ресурсы ЛВС представляют собой ресурсы оборудования и ресурсы каналов передачи данных (пропускная способность). ЛВС спроектирована для эффективного использования собственных ресурсов, что в свою очередь снижает общую стоимость владения системой;
- Управляемость. ЛВС поддерживает возможность дистанционного управления оборудованием из единого центра управления, позволяя проводить круглосуточный мониторинг, сбор статистики, регистрацию событий, выдачу статистики;
- Безопасность. Учитываются требования информационной безопасности и защиты от несанкционированного доступа (НСД) в локальную вычислительную сеть. Все устройства входящие в состав ЛВС, защищаются системой паролей, и обладают дополнительными функциями по безопасности, такими как списки доступа и др.;
- Унификация и стандартизация. Все телекоммуникационное и активное сетевое оборудование, используемое при построении ЛВС имеет стандартные интерфейсы. Перечень используемого для построения ЛВС оборудования по возможности, минимизирован и унифицирован с целью упрощения обслуживания сети и минимизации затрат на поддержание ЗИП.

1.2.6. Основные технические решения по локальной вычислительной сети лаборатории «Интернета вещей».

Локальная вычислительная сеть создается посредством структурированной кабельной системы и активного сетевого оборудования.

Локальная вычислительная сеть обеспечивает возможность подключения к сети персональных компьютеров и иного периферийного оборудования.

Состав помещений (Рисунок 5):

- Офисные помещения. В них предусмотрены рабочие места для руководящего состава, состоящие из персонального компьютера, IP-телефона, МФУ, для каждого.
- Лабораторная зона с серверной. В серверной расположен сегмент транспортной сети SDN. Лабораторная зона представляет собой 10 рабочих мест, оборудованных персональными компьютерами на каждом, 4 стендами тестирования IoT с ЭВМ и оборудованием на каждом и 2 рабочих мест в помещении серверной с ПК соответственно.

- Центр обучения состоит из стенда тестирования идентификации с 1 рабочим местом и 21 рабочего места, где 1 из них место преподавателя с ПК, и 10 – лекционные парты, для 20 обучающихся.

SDN-контроллер, openflow-коммутатор и 3 коммутатора компании Cisco, находящиеся на серверной стойке оборудования 42U, образуют ядро ЛВС, обеспечивающее подключение коммутаторов уровня доступа и агрегирует трафик, поступающий от периферийных устройств. Уровень доступа стоит на основе привязки к местам установки коммутационных шкафов, при наличии (Далее - модульный корпус). Он обеспечивает подключение оконечных структурных единиц проектируемой модельной сети.

Модульные корпуса с коммутаторами MOXA и сопутствующим им оборудованием (при наличии) располагаются вне зоны серверной у зон тестирования и нагружаются оборудованием стендов.

Связь между структурными единицами системы осуществляется посредством медного кабеля U/UTP cat.6. Для подключения оконечных устройств используются интерфейсы 10/100/100 Base-T.

В соответствии с иерархией ЛВС на каждом уровне применяется оборудование определенного типа. Выбор осуществляется на основании требований по эксплуатационным характеристикам, возможности масштабирования, требованиям по надежности и отказоустойчивости.

Электроснабжение оборудования ЛВС осуществляется от электрической сети здания, где непосредственно находятся эти помещения. Для обеспечения бесперебойного питания оборудования ЛВС используются батареи/комплекты батарей, устанавливаемые в помещении серверной, для каждой активной сетевой единицы, и для каждого рабочего места индивидуально. И обеспечивают автономную работу системы в течении 30 минут. Электрическая часть подробно не рассматривается в рамках данной работы.

Отопление, кондиционирование и вентиляция, естественное и искусственное освещение помещений и рабочих мест учитывается аналогично положением об электроснабжении - отдельными проектами строительной направленности.

Кабельные трассы ЛВС в помещении выполнить с использованием кабельного лотка и пластикового кабельного канала DLP 50x150 мм. Кабельный лоток используется для прокладки кабельных трасс из помещения серверной к рабочим помещениям, и проходит над подвесным потолком.

Спуск с лотка кабельной трассы выполнить кабельным каналом до модульного корпуса или до уровня горизонтального участка кабельного канала на высоте на отметке не менее +0,900 от уровня пола. У каждого рабочего места предусмотрены розетки RJ-45 и в дополнении к ним в офисных помещениях расположить по 1 телефонной розетке RJ-45. Каждую кабельную линию следует промаркировать в соответствии с кабельным журналом. В целях соблюдения техники безопасности необходимо выполнение следующих мероприятий: заземление проектируемых стоек, размещение проектируемого оборудования с организацией нормальных эксплуатационных проходов, ограждение токоведущих частей, находящихся на доступной высоте.

В силу специфики технологического процесса, отсутствия отходов и сопутствующих вредных материалов, проектируемые сооружения связи не оказывают вредного влияния

на окружающую среду. Вычислительная инфраструктура построена на оборудовании, не являющимся источником повышенного уровня шума и вибрации, и не требует организации специальных мер защиты здания или персонала. Вычислительные средства не наносят никакого вреда окружающей среде и людям ее эксплуатирующим. Специальных мероприятий по охране труда и защите окружающей среды не требуется. Все компоненты имеют необходимые сертификаты. Все оборудование соответствует требованиям экологических, санитарно-гигиенических и других норм, действующих на территории РФ.

1.2.7. Сеть лаборатории «Интернета вещей».

Центром сети является SDN Controller, который располагается в помещении серверной. Он непосредственно соединен с коммутатором MikroTik RB2011 (общей емкостью 10 портов RJ-45), логически и физически разбитым на 3. К нему подключаются 3 агрегационных коммутатора Cisco Catalyst3750 (емкость - 24 порта RJ-45 каждый), объединяющие на себе все оборудование кабинетов, лабораторной и учебных зон.

К коммутатору SW-1, в составе MikroTik RB2011, подключается первый агрегационный коммутатор, к которому в свою очередь коммутируется только IoTDM Server располагающийся в помещении серверной лаборатории. Таким образом на Cisco Catalyst3750-1 остаются свободными еще 22 порта, зарезервированные под дальнейшее расширение системы и создания резервных связей.

Коммутатор Cisco Catalyst3750-2, первый порт подключен к порту 5 MikroTik RB2011 (второй логический коммутатор.). Он является основным, и самым загруженным из всех, поскольку на портах 2-12 обеспечивает функцию коммутации главной рабочей зоны проекта, а это формирует основную часть модельной сети - стенды тестирования IoT. Интерфейсы с 13 по 22 включительно нагружены ЭВМ рабочих мест лабораторной зоны. Порты 23 и 24 остаются свободными.

Коммутатор Cisco №3 объединен с ядром сети посредством 1 и 9 порта соответственно. На нем настроен VLAN, для подключения территориально выделенных помещений: 3 кабинета административного персонала и учебной зоны со стендом тестирования идентификации. С одной стороны, такое решение обусловлено унификацией ядра сети, а с другой – реализацией 2 типов модельных сетей: выделенной и распределенной. Это позволит производить тестирование при всех возможных параметрах и сценариях, и соответственно повысить качество тестирования. Посредством ССОП подключаются офисные помещения. Подключение каждого происходит по однотипной схеме: они имеют свою сеть доступа, в виде модульного корпуса в составе коммутаторов MOXA (SW6-8) с сопутствующим оборудованием, емкостью 7 портов Ethernet каждый, к которым подключаются ПК, IP-телефон и МФУ соответственно начиная с первого. Описание подключения стенда тестирования идентификации см. далее. Наравне с VLAN, подключенная к порту 3 общая точка доступа WFO, реализует принципы удаленного сетевого управления. Остальные порты отведены под масштабируемость архитектуры.

Порты 4-5 и 6-7, коммутатора MikroTik RB2011, объединены между собой для образования резервных путей передачи трафика, в рамках кольцевой топологии. А на последний 10 порт скоммутирован SDN Controller.

В рамках коммутации и настройки системы необходимо учесть наличие 7 беспроводных точек доступа. Следовательно, для обеспечения бесконфликтной работы комплекса, следует применить различные настройки каждой точки доступа.

Структура сети лаборатории «Интернета вещей» представлена на Рисунок 6 и Рисунок 7.

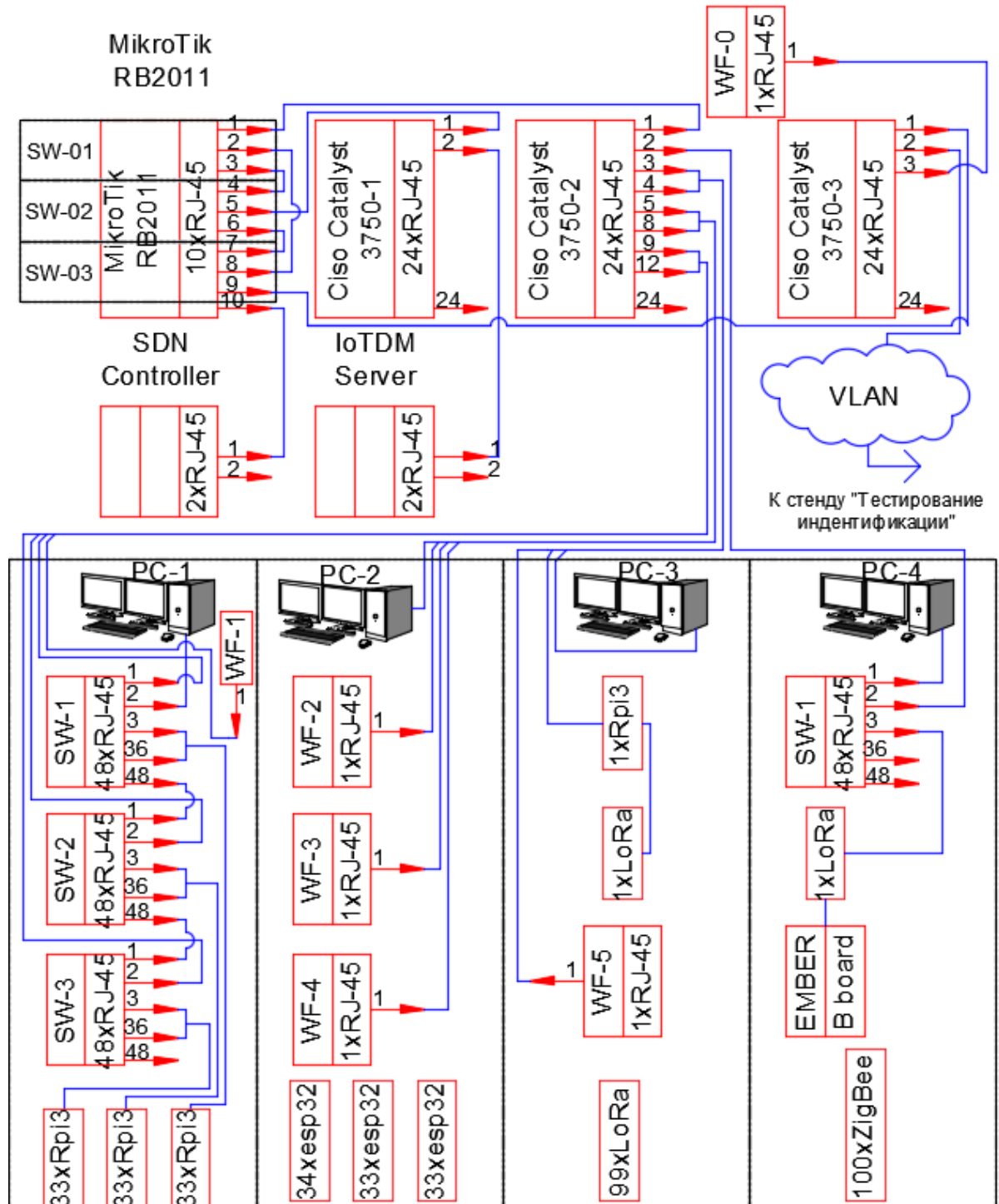


Рисунок 6. Структура сети лаборатории «Интернета вещей» (часть 1)

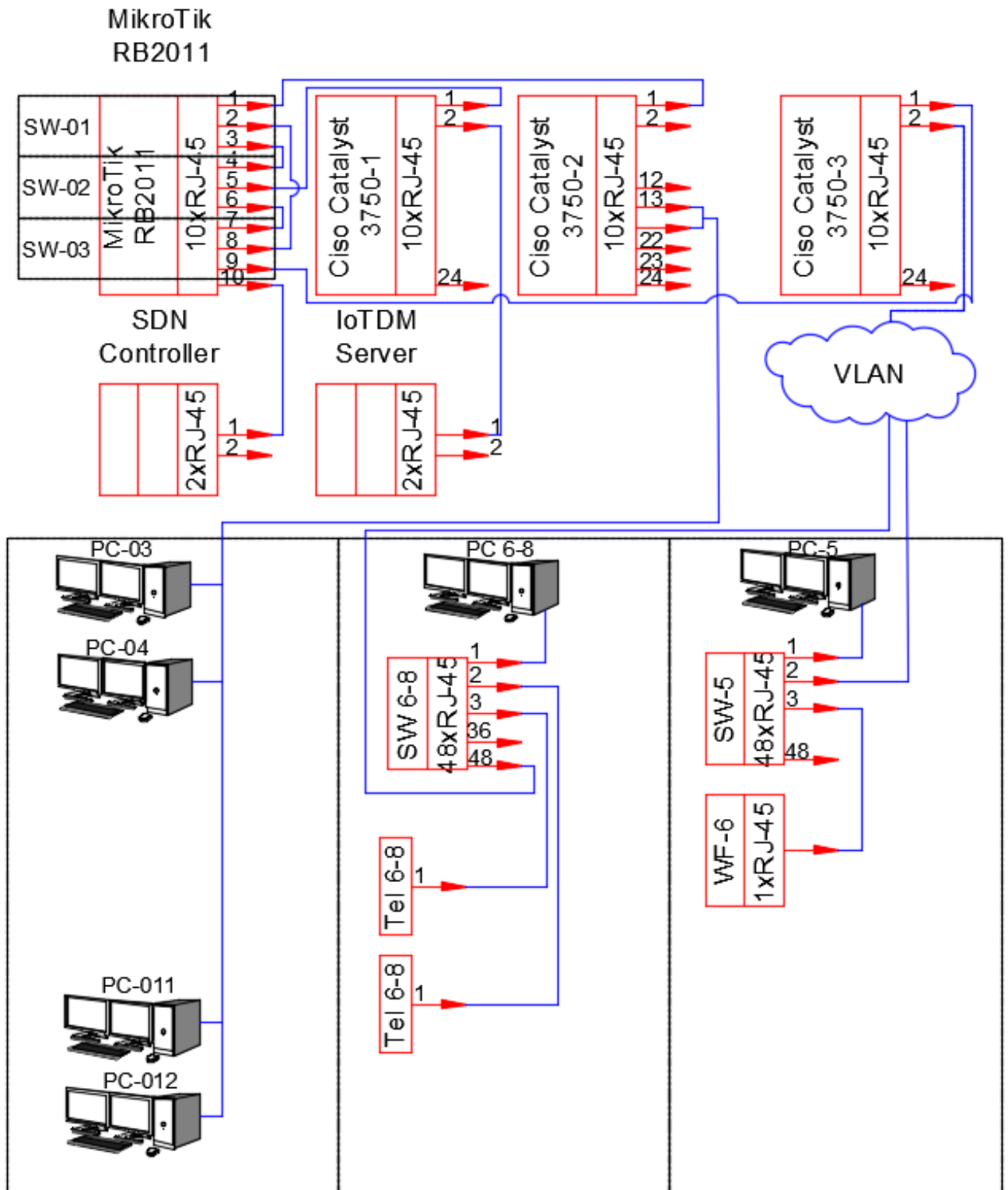


Рисунок 7. Структура сети лаборатории «Интернета вещей» (часть 2)

1.2.8. Характеристики стендов.

Описание и состав стендов представлены в порядке перечня стендов.

Стенд тестирования ПО, приложения и периферийных устройств на основе одноплатного компьютера Raspberry Pi3 Model B.

Описание и назначение. Данный стенд позволяет решать задачи тестирования ПО, приложений «Интернета вещей» и сети, образованной кластером однотипных одноплатных компьютеров как в базовом исполнении, так и с набором датчиков и актуаторов. Особенностью системы является применение универсального оборудования, позволяющего решать обширный спектр задач.

Состав стенда № 1. Состоит из участка сети доступа и рабочего пространства с персональными компьютерами и оборудованием. Сеть доступа представлена модульным корпусом, в котором расположены 3 коммутатора MOXA емкостью 48 портов Ethernet каждый и точка доступа. Порт 1 SW-1, связан с персональным компьютером PC-1. Вторые порты каждого SW, подключены к агрегационному коммутатору ядра сети на порты 9-11, а на порт 12 коммутатора Cisco Catalyst 3750-2, подключается точка доступа. Порты 3-36 задействованы для компьютеров Raspberry Pi3 в количестве 99 штук.

Стенд тестирования ПО, приложения и периферийных устройств на основе модулей ESP32.

Описание и назначение. Второй стенд, так же как и первый, позволяет решать задачи тестирования ПО, приложений «Интернета вещей» и сети, образованной кластером однотипных одноплатных компьютеров как в базовом исполнении, так и с набором датчиков и актуаторов. Оборудование данного стенда обладает меньшими возможностями, в отличие от первого, но в силу форм-фактора самой платы и ее отдельных характеристик является отличной альтернативой платам Raspberry Pi3 Model B.

Состав стенда № 2. Состоит из рабочего пространства с располагающейся на нем рабочей машиной PC-2, 3 точками доступа, подключенным к портам 5-8 второго агрегационного коммутатора соответственно, а также 100 модулей ESP32, взаимодействующих с точками доступа по схеме:

- ESP32 1-34 взаимодействует с WF2;
- ESP32 35-67 взаимодействует с WF3;
- ESP32 68-100 взаимодействует с WF4.

Стенд тестирования ПО, приложений и устройств, работающих по технологии LoRa.

Описание и назначение. Оборудование стенда №3, предназначено для создания, исследования и тестирования комплексов с автономными единицами, которые критичны к дальности передачи данных и энергопотреблению.

Состав стенда № 3. Состоит из PC-3, 1 одноплатного компьютера Raspberry Pi3 с модулем LoRa на борту для связи с остальными 99 модулями LoRa на рабочем пространстве. PC-3 и Raspberry Pi3 с модулем LoRa занимают 3 и 4 порты Catalyst 3750-2. Интерфейс Ethernet-2 ЭВМ, допускает подключение отдельного шлюза LoRa-Ethernet.

Стенд тестирования ПО, приложений и устройств, работающих по технологии 6LoWPAN.

Описание и назначение. Оборудование данного стенда предназначено для создания, исследования и тестирования комплексов с автономными единицами, для которых важны параметры самоорганизации и зависимость от энергопотребления.

Состав стенда № 4. Состоит из участка сети доступа и рабочего пространства с ПК и оборудованием. Сеть доступа представлена модульным корпусом, в котором расположен 1 коммутатор MOXA емкостью 48 портов Ethernet. Порт 1 отведен для PC-4, порт 2 – для подключения к агрегатору на 2 интерфейсный порт, а порт 3 – соединен с Ember ISA3 из набора Ember ZigBee. Интерфейсным кабелем, Ember ISA3 коммутируется с отладочной платой Ember Breakout Board с модулем ZigBee борту, которые являются шлюзом для остальных 99 автономных модулей ZigBee.

Стенд тестирования технологий идентификации устройств IoT.

Описание и назначение. Оборудование стенда нацелено на решение задач, связанных с идентификацией устройств IoT, а именно с выявлением контрафактных, подложных изделий и верификацией легально произведенного.

Состав стенда № 5. Состоит из участка сети доступа и рабочего пространства с PC-5 и оборудованием. Сеть доступа представлена модульным корпусом, в котором расположен 1 коммутатор MOXA емкостью 48 портов Ethernet. Порт 1 отведен для PC-5, порт 2 – для подключения к коммутатору Cisco Catalyst 3750-3, посредством ССОП, на 2 интерфейс, а порт 3 – для подключения точки доступа. Поскольку в рамках стенда еще проводятся документальные и теоретические работы, то не представляется возможным введение его в эксплуатацию. Следовательно, оставшиеся порты зарезервированы для будущего оборудования.

1.2.9. Пример тестовых спецификаций для лаборатории «Интернета вещей».

В качестве примера тестовых спецификаций рассмотрим спецификации для тестирования протокола COAP, которые используются в лаборатории «Интернета вещей» [21, 22, 23]. Тестовая процедура в лаборатории «Интернета вещей», как правило, выполняется между 2 устройствами различных производителей, но в ряде случаев для некоторых целей тестирования может потребоваться и большее число тестируемых устройств. Сведения о конфигурации теста, такие как число «Интернет вещей», требуемые условия и т.д., указываются в таблицах, непосредственно описывающих ту или иную спецификацию.

При проведении теста учитываются следующие типы действий инженера по тестированию:

- Воздействие (stimulus) – соответствует событию, которое побуждает тестируемую систему к выполнению определенного действия протокола (например, отправки сообщения);
- Сверка результатов (check) – обеспечивает проверку корректности протокольных сообщений на заранее определенных опорных точках, заданных в соответствии с конкретной целью функционального тестирования;
- Проверка (verify) – заключается в подтверждении того факта, что тестируемая система или устройство функционирует в соответствии с ожидаемым поведением, описанном в стандарте используемого протокола (например, создание ресурсов, обновление, удаление и т.д.).

В качестве инструментов тестирования тестировщик может использовать такие анализаторы трафика, как *wireshark*, *tcpdump* и т.п., для регистрации и анализа сообщений в целях проверки.

Для реализации тестов, учитывающих возможные задержки и потери данных в сетях с коммутацией пакетов, может быть задействован шлюз, который будет служить промежуточным звеном между клиентом и сервером для имитации среды с потерями (технически это реализовано с использованием метода перенаправления UDP-портов).

В качестве исследуемого протокола в данном примере тестирования, как уже отмечалось выше, в лаборатории «Интернета вещей» рассматривается протокол CoAP. Конфигурация тестируемой системы приведена на Рисунок 8.

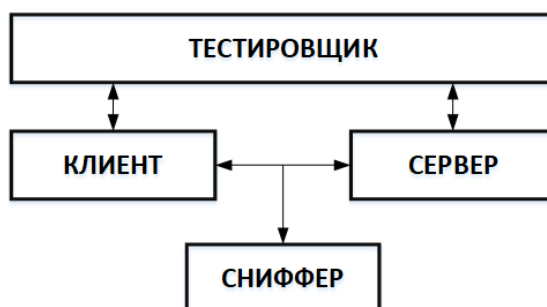


Рисунок 8. Конфигурация тестируемой системы (COAP_CONF)

Если не указано иное, то в процессе тестирования каждое устройство должно иметь unicast-адрес, а также кэш должен быть очищен после проведения каждого теста.

Тест 1. Проверка корректности обработки GET-запроса

Таблица 1.1 – Тестовая спецификация «Проверка корректности обработки GET-запроса»

| | | | |
|--|--|--------------|---|
| Идентификатор теста | COAP_T_01 | | |
| Название теста | Проверка корректности обработки GET-запроса (режим CON) | | |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень приложения | | |
| Тип теста | Функциональное тестирование | | |
| Статус | Обязательный | | |
| Цель теста | Проверка ситуации, при которой сервер предоставляет некоторый ресурс с заданным содержимым (/test), способным обрабатывать GET-запросы от ИВ с произвольной полезной нагрузкой | | |
| Конфигурация | COAP_CONF | | |
| Тестовая процедура | шаг | тип действия | описание |
| | 1 | воздействие | клиенту предлагается отправить запрос GET с параметрами: <ul style="list-style-type: none"> • тип = 0 (CON) • код = 1 (GET) |

| | | | |
|--|---|--------------------|--|
| | 2 | сверка результатов | запрос, отправленный клиентом серверу, содержит: <ul style="list-style-type: none"> • тип = 0 и код = 1 • идентификатор сообщения клиента (CMID) • маркер клиента (СТОК) |
| | 3 | сверка результатов | сервер отправляет ответ, содержащий: <ul style="list-style-type: none"> • код = 2.05 (ответ, содержащий запрашиваемую информацию) • идентификатор сообщения (CMID), маркер (СТОК) • формат представления полезной нагрузки • полезная нагрузка |
| | 4 | проверка | клиент отображает полученную от сервера информацию |

Тест 2. Проверка корректности выполнения операции обновления ресурса

Таблица 1.2 – Тестовая спецификация «Проверка корректности выполнения операции обновления ресурса»

| | | | |
|--|--|--------------------|--|
| Идентификатор теста | COAP_T_02 | | |
| Название теста | Проверка корректности выполнения операции обновления ресурса (режим CON) | | |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень приложения | | |
| Тип теста | Функциональное тестирование | | |
| Статус | Обязательный | | |
| Цель теста | Проверка ситуации, при которой сервер предоставляет некоторый ресурс с заданным содержимым (/test), способный осуществлять операцию обновления | | |
| Конфигурация | COAP_CONF | | |
| Тестовая процедура | шаг | тип действия | описание |
| | 1 | воздействие | клиенту предлагается отправить запрос PUT с параметрами: <ul style="list-style-type: none"> • тип = 0 (CON) • код = 3 (PUT) • формат представления полезной нагрузки • полезная нагрузка (опционально) |
| | 2 | сверка результатов | запрос, отправленный клиентом серверу, содержит: <ul style="list-style-type: none"> • тип = 0 и код = 3 • идентификатор сообщения клиента |

| | | | |
|--|---|--------------------|--|
| | | | (CMID) • маркер клиента (СТОК) |
| | 3 | проверка | сервер отображает полученный от клиента запрос |
| | 4 | сверка результатов | сервер отправляет ответ, содержащий: • код = 2.04 (ресурс обновлен) • идентификатор сообщения (CMID), маркер (СТОК) • формат представления полезной нагрузки (если нагрузка ненулевая) • полезная нагрузка (опционально) |
| | 5 | проверка | клиент отображает полученный от сервера ответ |

Тест 3. Проверка корректности выполнения операции создания ресурса

Таблица 1.3 – Тестовая спецификация «Проверка корректности выполнения операции создания ресурса» Идентификатор теста

| | | | |
|--|--|--------------------|--|
| | COAP_T_03 | | |
| Название теста | Проверка корректности выполнения операции создания ресурса (режим CON) | | |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень приложения | | |
| Тип теста | Функциональное тестирование | | |
| Статус | Обязательный | | |
| Цель теста | Проверка ситуации, при которой сервер позволяет создать новый ресурс | | |
| Конфигурация | COAP_CONF | | |
| Тестовая процедура | шаг | тип действия | описание |
| | 1 | воздействие | клиенту предлагается отправить запрос PUT с параметрами: • тип = 0 (CON) • код = 2 (POST) • формат представления полезной нагрузки • полезная нагрузка (опционально) |
| | 2 | сверка результатов | запрос, отправленный клиентом серверу, содержит: • тип = 0 и код = 2 • идентификатор сообщения клиента (CMID) • маркер клиента (СТОК) |
| | 3 | проверка | сервер отображает полученный от клиента запрос |
| | 4 | сверка результатов | сервер отправляет ответ, содержащий: • код = 2.01 (ресурс создан) |

| | | | |
|--|---|----------|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> • идентификатор сообщения (CMID), маркер (СТОК) • формат представления полезной нагрузки (если нагрузка ненулевая) • адрес созданного ресурса • полезная нагрузка (опционально) |
| | 5 | проверка | клиент отображает полученный от сервера ответ |

Тест 4. Проверка корректности выполнения операции удаления

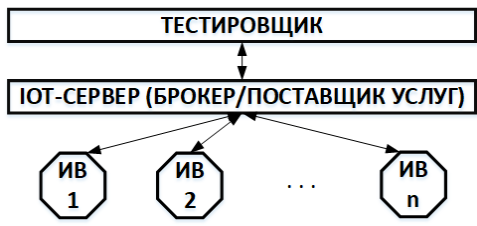
Таблица 1.4 – Тестовая спецификация «Проверка корректности выполнения операции удаления»

| | | | |
|--|--|--------------------|---|
| Идентификатор теста | COAP_T_04 | | |
| Название теста | Проверка корректности выполнения операции удаления (режим CON) | | |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень приложения | | |
| Тип теста | Функциональное тестирование | | |
| Статус | Обязательный | | |
| Цель теста | Проверка ситуации, при которой сервер предоставляет некоторый ресурс с заданным содержимым (/test), способным осуществлять операцию удаления | | |
| Конфигурация | COAP_CONF | | |
| Тестовая процедура | шаг | тип действия | описание |
| | 1 | воздействие | клиенту предлагается отправить запрос DELETE с параметрами: <ul style="list-style-type: none"> • тип = 0 (CON) • код = 4 (DELETE) |
| | 2 | сверка результатов | запрос, отправленный клиентом серверу, содержит: <ul style="list-style-type: none"> • тип = 0 и код = 4 • идентификатор сообщения клиента (CMID) • маркер клиента (СТОК) |
| | 3 | сверка результатов | сервер отправляет ответ, содержащий: <ul style="list-style-type: none"> • код = 2.02 (ресурс удален) • идентификатор сообщения (CMID), маркер (СТОК) • формат представления полезной нагрузки (если нагрузка ненулевая) • полезная нагрузка (опционально) |
| | 4 | проверка | клиент отображает полученный от сервера ответ |

Далее приводятся тестовые спецификации по проверке производительности системы «Интернета вещей».

Тест 1. Определение времени задержки в процессе регистрации устройств на сервере (брокере)

Таблица 1.5 – Тестовая спецификация «Определение времени задержки в процессе регистрации устройств на сервере (брокере)»

| | |
|--|--|
| Идентификатор теста | PERF_T_01 |
| Название теста | Определение времени задержки в процессе регистрации устройств на сервере (брокере) |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень сети |
| Тип теста | Тестирование производительности |
| Статус | Обязательно |
| Цель теста | Необходимо количественно определить значения задержек при регистрации устройств на брокере в условиях изменяющейся пропускной способности канала связи |
| Конфигурация |  <pre> graph TD T[ТЕСТИРОВЩИК] <--> S[ИОТ-СЕРВЕР (БРОКЕР/ПОСТАВЩИК УСЛУГ)] S --> D1{{ИБ 1}} S --> D2{{ИБ 2}} S --> Dn{{ИБ n}} </pre> |
| Тестовая процедура | В процессе тестирования необходимо изменять (уменьшать / увеличивать) пропускную способность канала связи для того, чтобы определить возможность регистрации устройств на сервере (брокере) |
| Ожидаемые результаты | <ul style="list-style-type: none"> • вероятные задержки в процессе регистрации и их количественное значение • таймаут ожидания |

Тест 2. Определение возможности предоставления оконечным устройствам услуг брокерами при нарушении их связности

Таблица 1.6 – Тестовая спецификация «Определение возможности предоставления оконечным устройствам услуг при нарушении их связности»

| | |
|--|---|
| Идентификатор теста | PERF_T_02 |
| Название теста | Определение возможности предоставления оконечным устройствам услуг брокерами при нарушении их связности |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень поддержки услуг и поддержки приложений |
| Тип теста | Тестирование производительности |

| | |
|----------------------|---|
| Статус | Обязательно |
| Цель теста | Необходимо оценить возможность предоставления услуг оконечным устройствам в том случае, если нарушена связность между брокерами (двумя и более) |
| Конфигурация | |
| Тестовая процедура | <ol style="list-style-type: none"> 1. Запустить брокеры, оконечные устройства; 2. Инициализировать и завершить процесс регистрации устройств; 3. Нарушить связность между брокерами (двумя и более). |
| Ожидаемые результаты | <ul style="list-style-type: none"> • брокеры предоставляют услуги уже зарегистрированным устройствам • брокеры не предоставляют услуги зарегистрированным устройствам либо предоставляют их частично |

Тест 3. Определение максимально возможного количества CoAP-запросов в секунду, обрабатываемого интернет вещью

Таблица 1.7 – Тестовая спецификация «Определение максимально возможного количества CoAP-запросов в секунду, обрабатываемого интернет вещью»

| | |
|--|---|
| Идентификатор теста | PERF_T_03 |
| Название теста | Определение максимально возможного количества CoAP-запросов в секунду, обрабатываемого интернет вещью |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Уровень устройства |
| Тип теста | Тестирование производительности |
| Статус | Обязательно |
| Цель теста | Необходимо определить максимально возможное количество CoAP-запросов, обрабатываемое аппаратной платформой, на базе которой разрабатывается интернет вещь, без значительных потерь в производительности |
| Конфигурация | |
| Тестовая процедура | <ol style="list-style-type: none"> 1. Определить набор аппаратных платформ для проведения теста; 2. Подготовить инструмент тестирования и запустить IoT- |

| | |
|----------------------|--|
| | <p>приложение (CoAP-сервер) на каждой из платформ;</p> <p>3. Провести тестирование, генерируя необходимое количество запросов в секунду со стороны клиента с привязкой к общей продолжительности теста;</p> <p>4. Проанализировать результаты и оценить максимально возможную производительность каждой из платформ.</p> |
| Ожидаемые результаты | По окончании теста определить платформу, оптимально подходящую под те задачи, которые в дальнейшем будут реализованы при помощи разрабатываемой интернет вещи |

Следующие тестовые спецификации относятся к тестированию безопасности «Интернета вещей».

Тест 1. Проверка устойчивости IoT-системы к атакам по словарю

Таблица 1.8 – Тестовая спецификация «Проверка устойчивости IoT-системы к атакам по словарю»

| | |
|--|---|
| Идентификатор теста | SEC_T_01 |
| Название теста | Проверка устойчивости IoT-системы к атакам по словарю |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Возможности обеспечения безопасности |
| Тип теста | Тестирование безопасности |
| Статус | Обязательно |
| Цель теста | Установление степени безопасности применяемого способа шифрования и хранения данных в целом |
| Конфигурация | |

| | |
|----------------------|---|
| Тестовая процедура | <pre> classDiagram class Sniffer { sniff() dictionaryAttack() } class IoTThing { PSK sendRequest() receiveResponse() } class Server { PSK receiveRequest() sendResponse() } Sniffer "1..*" -- "1" IoTThing Sniffer "1..*" -- "1" Server IoTThing "1..*" -- "1" Server : запрос группового ключа </pre> <ol style="list-style-type: none"> Интернет вещь и сервер учетных записей устанавливают соединение между собой; Злоумышленник при помощи sniffера (прослушивающего устройства способного перехватывать передаваемые данные) обнаруживает данное соединение и перехватывает сообщение (CoAP response), содержащее групповой ключ; Затем злоумышленник проводит так называемую атаку по словарю, для того чтобы расшифровать перехваченное сообщение и в итоге получить групповой ключ. |
| Ожидаемые результаты | Если в ходе этой процедуры удастся получить групповой ключ, то тест не пройден, в противном случае он считается успешным |

Тест 2. Проверка устойчивости IoT-системы к DDoS-атакам

Таблица 1.9 – Тестовая спецификация «Проверка устойчивости IoT-системы к DDoS-атакам»

| | |
|--|--|
| Идентификатор теста | SEC_T_02 |
| Название теста | Проверка устойчивости IoT-системы к DDoS-атакам |
| Уровень тестирования (по эталонной модели IoT) | Возможности обеспечения безопасности |
| Тип теста | Тестирование безопасности |
| Статус | Обязательно |
| Цель теста | Определение вероятности переполнения буфера на сервере учетных записей |

| | |
|-----------------------------|---|
| <p>Конфигурация</p> | |
| <p>Тестовая процедура</p> | <p>Злоумышленник(и) запускает процесс обмена DTLS-сообщениями одновременно с интернет вещью, и таким образом в один и тот же момент времени отправляет сообщение «Client Hello» на сервер учетных записей</p> |
| <p>Ожидаемые результаты</p> | <p>Если интернет вещь не получает от сервера ответное сообщение «Hello Verify», а время ожидания истекает, то тест не пройден, в противном случае он считается успешным</p> |

2 Рекомендации по созданию региональных лабораторий «Интернета вещей» на базе модельной сети SDN.

2.1 Роль SDN в современных сетях связи.

Программно-конфигурируемые сети SDN (Software Defined Network) – достаточно новая технология телекоммуникаций, которая с появлением концепции сетей связи пятого

поколения приобрела для них исключительно важное значение для решения проблем управления трафиком и уменьшения задержки [24].

Действительно, в сетях связи пятого поколения основной проблемой является обеспечение задержки из конца в конец величиной в 1мс. С целью уменьшения круговой задержки и выполнения требования по величине задержки в 1мс для Тактильного Интернета, число сетевых узлов, включенных в процесс обеспечения связи, должно быть как можно меньше и располагаться эти узлы должны как можно ближе к пользовательскому оборудованию [25]. Такие характеристики могут быть достигнуты совместным использованием новых технологий программно-конфигурируемых сетей SDN, виртуализации сетевых функций NFV и мобильных граничных вычислений MEC в сетях связи пятого поколения 5G.

При этом совместное использование SDN и NFV обеспечивает возможность реализации такой важной концепции как сетевой слайсинг. Сетевой слайсинг можно рассматривать как группу сетевых функций, работающих вместе с определенной технологией радиодоступа (RAT) для достижения рационального варианта использования сети. Другими словами, сетевой слайсинг является способом поддержки услуг связи посредством специального соединения. Сетевой слайсинг позволяет оператору сети построить несколько логических сетей (каждая для определенного варианта использования) на одной физической инфраструктуре [26].

Динамические изменения в объеме поступающего трафика, в свою очередь, приводят к изменению числа задействованных на сети контроллеров. Когда трафик на сети возрастает, новые контроллеры должны быть активированы, в то время как при снижении поступающего трафика определенное число контроллеров может быть деактивировано. Частота изменения трафика приводит к соответствующему процессу активации и деактивации контроллеров в мульти контроллерной сети SDN. Спящий режим может быть рассмотрен как альтернативный вариант деактивации контроллера. Решение об использовании того или иного режима для каждого из контроллеров способствует лучшей производительности системы в целом и может быть оптимизировано с использованием мета эвристических алгоритмов.

На Рисунок 9 показана архитектура сети для выполнения требований Тактильного Интернета по круговой задержке. Сеть предоставления услуг Тактильного Интернета из конца в конец включает в себя пользовательские устройства, сети радиодоступа RAN (базовые станции eNBs), облака, коммутаторы доступа, коммутаторы OpenFlow, промежуточные устройства (Middlebox) и, наконец, SDN контроллер [27].

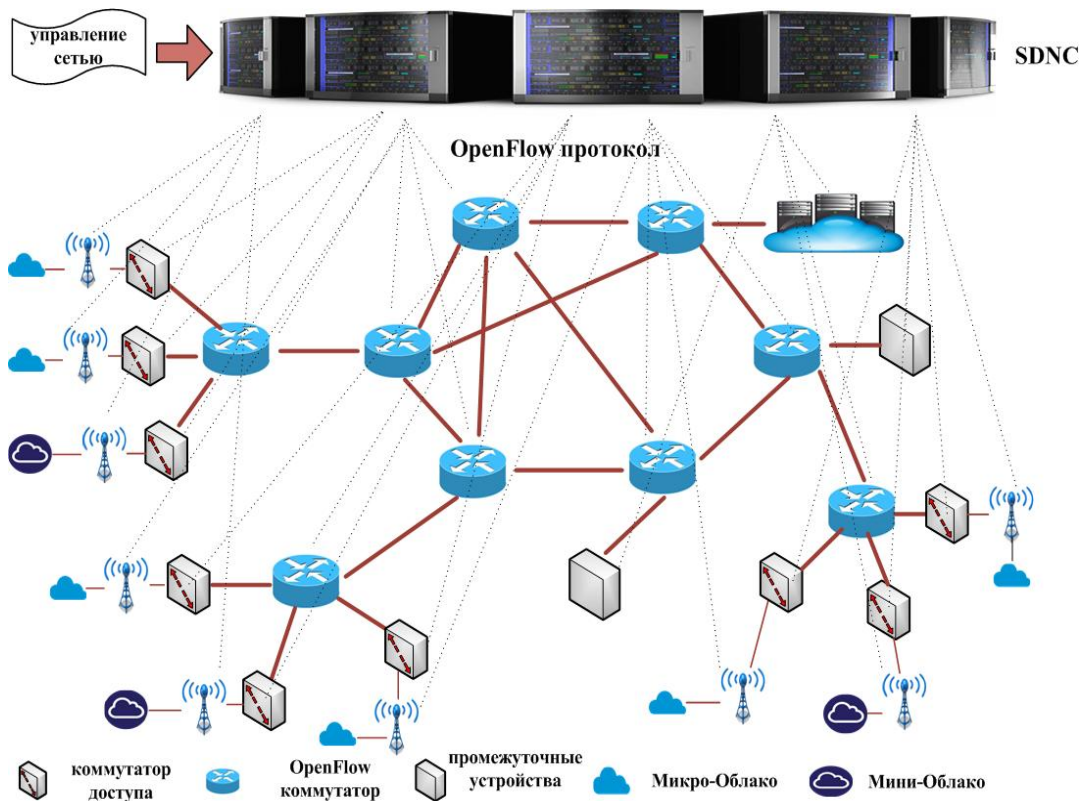


Рисунок 9. Архитектура современной сети SDN

Каждая базовая станция eNB подсоединена к сети через коммутатор доступа, который обеспечивает классификацию пакетов от пользовательских устройств. Эти коммутаторы реализуются программно и известны как Open vSwitch .

Предлагаемая архитектура сети обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционной архитектурой:

- Сеть становится более гибкой, поскольку для маршрутизации может быть использован централизованный контроллер SDNC.
- Сеть становится более надежной, используя протоколы открытых систем и другие стандартизованные технологии.
- Функции виртуализации сети могут быть легко добавлены вследствие использования контроллера SDNC.
- Требования по достижению определенного уровня качества обслуживания (QoS) могут быть обеспечены при использовании технологии программно-конфигурируемых сетей SDN.
- Обеспечивается большая масштабируемость сети по сравнению с традиционным пакетным ядром. Действительно, контроллер занимается исключительно процессами управления и не принимает участия в непосредственной передаче данных.

Как видим, в контроллере SDN сосредоточено очень много сетевых функций, в связи с чем адекватное тестирование контроллера SDN в условиях лаборатории «Интернета вещей» приобретает первостепенное значение для обеспечения устойчивости сетей связи, основой которых являются Интернет вещи.

2.2 Тестирование контроллеров SDN.

В МСЭ-Т разработана и утверждена рекомендация Q.4061 по тестированию контроллеров программно-конфигурируемых сетей.

В соответствии с этой рекомендацией при проведении тестирования контроллеров SDN требуются соответствующие подходы, учитывающие особенности того или иного варианта реализации программно-конфигурируемой сети. Требуется учитывать множество факторов, как со стороны реализации сетевой инфраструктуры, так и инфраструктуры уровня приложений контроллера. В ближайшем будущем также требуется проводить тестирование с учетом мульти контроллерной структуры. В результате проводимых испытаний с последующим анализом полученных результатов, требуется провести комплексный анализ, который включает в себя изучение параметров, относящиеся к проводимым испытаниям со стороны всех интерфейсов, что в итоге может дать обоснованное решение о пригодности к использованию рассматриваемого контроллера во множестве различных ситуаций или в частности — в определенной. При исследовании параметров контроллера в отдельности с последующим комплексным анализом не дает точной картины поведения контроллера при комплексном воздействии на него всех возможных (рассматриваемых) в отдельности воздействий, что также требуется учитывать и принимать во внимание и соответственно закладывать необходимые ресурсы по соответствующих характеристикам.

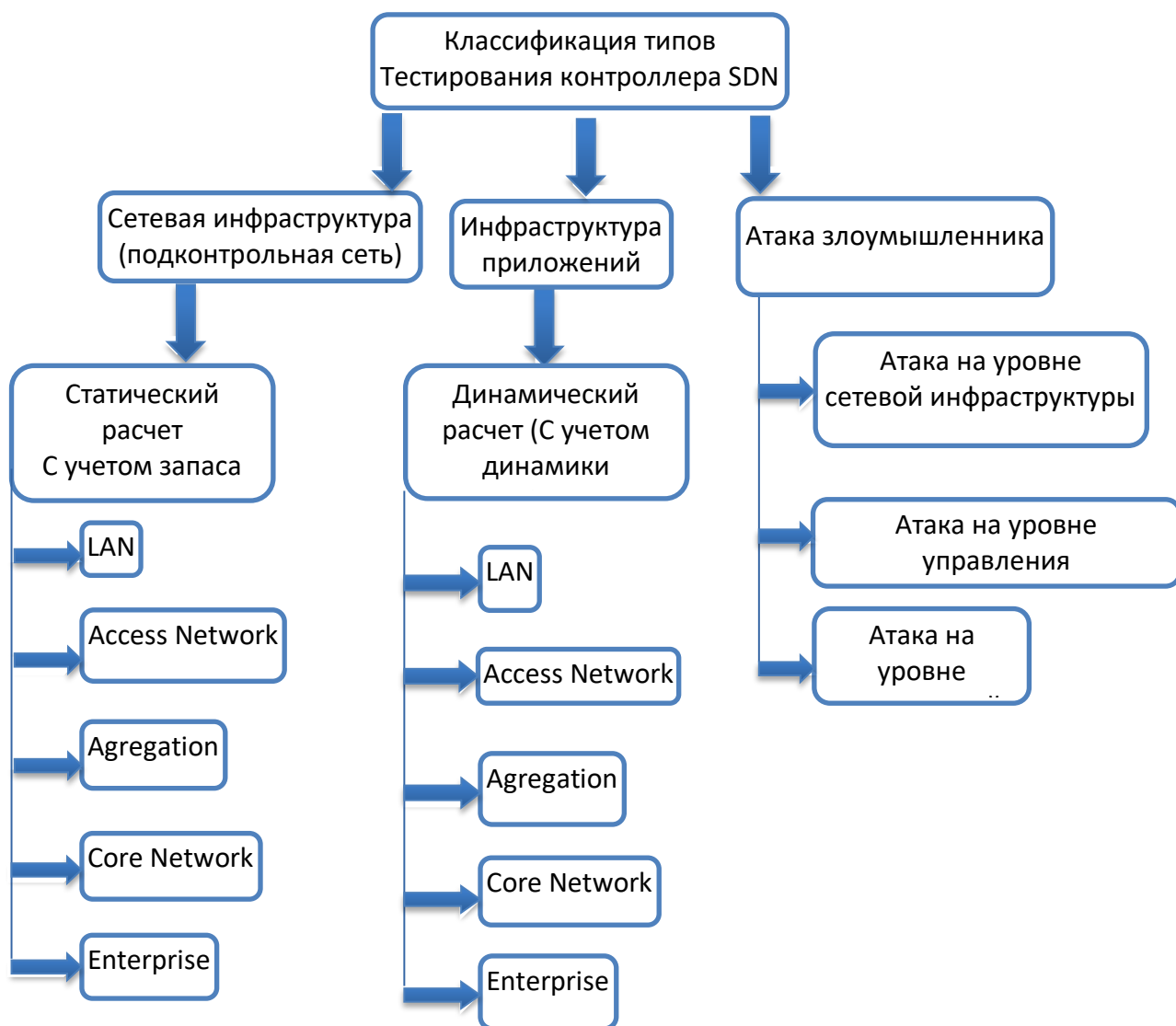


Рисунок 10. Классификация тестирования для контроллеров SDN

В ходе тестирования контроллера требуется определить определенный ряд параметров (его характеристик), необходимых для проводимого на последующем шаге комплексного анализа работоспособности контроллера программно-определяемой сети в определенных условиях. При этом для каждого типа тестирования требуется свой, определенный ряд параметров, комплексный анализ которых именно в данном случае даст более корректный ответ о пригодности исследуемого контроллера.

В таблице приведен ряд возможных параметров, тип испытания, соответствующие характеристики и рекомендации по рассмотрению того или иного параметра, как необходимого элемента для проведения последующего анализа совокупности характеристик и принятия решения о пригодности контроллера в определенных условиях.

Таблица 2.1

| № | Наименование испытания | Вид испытания | Оцениваемые характеристики | Условия применения контроллера |
|---|--|--------------------------|--|--|
| 1 | Измерение пропускной способности контроллера в зависимости от числа подключенных управляемых коммутаторов, при постоянном количестве хостов за каждым коммутатором | Нагрузочное тестирование | 1.Пропускная способность контроллера [поток/секунды] | 1. Во всех случаях; |
| 2 | Измерение пропускной способности контроллера в зависимости от числа хостов подключенных к постоянному количеству управляемых контроллером коммутаторов | Нагрузочное тестирование | 1.Пропускная способность контроллера [поток/секунды] | 1. Во всех случаях; |
| 3 | Измерение времени обработки одного запроса (задержки) в зависимости от числа подключенных коммутаторов, при постоянном количестве хостов | Нагрузочное тестирование | 1.Время обработки одного запроса [миллисекунды] | 1. Сети уровня агрегации; 2. Сети уровня ядра; 3. Корпоративные сети |
| 4 | Измерение времени обработки одного запроса (задержки) в зависимости от числа конечных узлов, при постоянном количестве коммутаторов | Нагрузочное тестирование | 1.Время обработки одного запроса [миллисекунды] | 1. Локальные сети; 2. Корпоративные сети |

| | | | | |
|---|--|--------------------------|--|----------------------|
| 5 | Исследование масштабируемости контроллера (производительность контроллера, в режиме максимальной нагрузки на контроллер) | Стрессовое тестирование | 1.Производительность процессора контроллера [Kbyte/sec] по ядрам 2.Доступность файлового сервиса (контроллера ПКС) [%] | 1. Во всех случаях; |
| 6 | Тестирование надежности работы контроллера (производительность контроллера, в режиме максимальной нагрузки на контроллер) | Нагрузочное тестирование | 1.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 2.Занимаемая память RAM [Гб] 3.Температура [°C] | 1. Во всех случаях; |
| 7 | Тестирование производительности контроллера, в зависимости от времени и частоты изменения топологии сети, при постоянном параметре количества измерений. | Нагрузочное тестирование | 1.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 2.Занимаемая память RAM [Гб, %] | 1. Сети уровня ядра; |
| 8 | Тестирование влияния подгружаемого модуля того или иного протокола на производительность контроллера, при увеличении нагрузки на данный модуль | Нагрузочное тестирование | 1.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 2.Занимаемая память RAM [Гб, %] 3. Время обработки одного запроса [миллисекунды] на данный модуль | 1. Во всех случаях; |
| 9 | Тестирование влияния подгружаемого модуля того или иного протокола на производительность контроллера, при увеличении нагрузки на контроллер | | 1.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 2.Занимаемая память RAM [Гб, %] 3. Время обработки одного запроса [миллисекунды] | 1. Во всех случаях; |

| | | | | |
|----|---|--|---|---------------------|
| 10 | Тестирование производительности контроллер в зависимости от увеличения нагрузки на API контроллера (каждого из его модулей) | | 1.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 2.Занимаемая память RAM [Гб, %] 3. Время обработки одного запроса [миллисекунды] при постоянном количестве хостов и коммутаторов | 1. Во всех случаях; |
| 11 | Тестирование производительности контроллера в зависимости от количества подключенных приложений, при условии тах нагрузки на них | | 1.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 2.Занимаемая память RAM [Гб, %] 3. Время обработки одного запроса [миллисекунды] при постоянном количестве хостов и коммутаторов | 1. Во всех случаях; |
| 12 | Тестирование реакции контроллера на скорость переключения, при использовании его как резервного (в момент резкого увеличения количества запросов) | | 1.Доступность файлового сервиса (контроллера ПКС) [%] 2.Производительность процессора контроллера [%] по ядрам 3.Время обработки одного запроса [миллисекунды] при переходе на резерв. 4.Длительность переходного процесса, [мс] | 1. Во всех случаях; |

3 Рекомендации по взаимодействию региональных лабораторий «Интернета вещей» при использовании распределенной модельной сети.

3.1 Распределенные модельные сети.

Как уже отмечалось выше, модельная сеть повторяет архитектуру фрагмента уже существующей или проектируемой телекоммуникационной сети. За счёт дополнительного элементов (генератор трафика, генератор помех и т.д.) она позволяет проводить тестирование оборудования или приложений в штатном режиме работы сети и под нагрузкой, что позволяет более точно оценить исследуемые характеристики.

Создание модельной сети для тестирования «Интернета вещей» в полном объеме достаточно затратный проект. Впрочем, это наблюдалось и при создании модельных сетей для тестирования пакетных сетей связи. Поэтому, и ранее, и сейчас осуществляются попытки создания распределенных модельных сетей, которые могли бы эффективно использовать все ресурсы, находящиеся в ведении участников проекта распределенной модельной сети.

Однако до настоящего времени подобные проекты не реализованы, хотя в настоящее время ведутся работы в направлении объединения ресурсов нескольких модельных сетей, причиной чего являются не столько технические сложности, сколько экономические и коммерческие проблемы. Далее приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории «Интернета вещей», в части возможных вариантов построения распределенных модельных сетей [29, 30].

3.2 Виртуализация и сегментация модельных сетей.

Один из путей совершенствования модельной сети – её виртуализация. Она позволяет перейти от использования реального оборудования к эмуляции его работы в рамках программы эмулятора или целого пакета программ, которые необходимы для наиболее точной и полной эмуляции сетевых процессов во время тестирования. Такой переход обеспечивает уменьшение расхода материальных ресурсов:

- исчезает необходимость использовать дорогостоящее сетевое оборудование;
- развёртывание и конфигурация модельной сети не требуют расходных материалов;
- экономится рабочее пространство, необходимое для проведения тестирования;
- уменьшается время, необходимое на развёртывание и конфигурацию сети, т.к. виртуальная модельная сеть может быть реализована в рамках одной программно-аппаратной платформы (сервера и т.д.).

Сегментация – это ещё один из эффективных инструментов совершенствования структуры модельной сети. Под сегментацией понимают разделение сети на независимые сегменты. Каждый из таких сегментов может имитировать работу сегмента ССОП, построенного по определённым технологиям, и отражать его свойства. Конфигурация сегментов может храниться в базе данных и вызываться при необходимости. Приведём примеры таких сегментов:

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – строится на основе самоорганизующейся сети, состоящей из сенсорных узлов. Оконечные узлы посредством измерительного

оборудования собирают информацию из окружающей среды и передают её узлам-маршрутизаторам, которые доставляют её к шлюзу ССОП.

В состав этого сегмента может быть включена летающая сенсорная сеть, строящаяся чаще всего на базе квадрокоптеров общего пользования, которые применяются для сбора данных с сенсорных узлов или непосредственно из внешней среды, и доставки этих данных к шлюзам сети связи общего пользования.

Также в состав сегмента может входить система позиционирования, которая строится на базе узлов БСС, взаимодействующих с коммуникационным оборудованием пользователя и позволяющих определить его точные координаты.

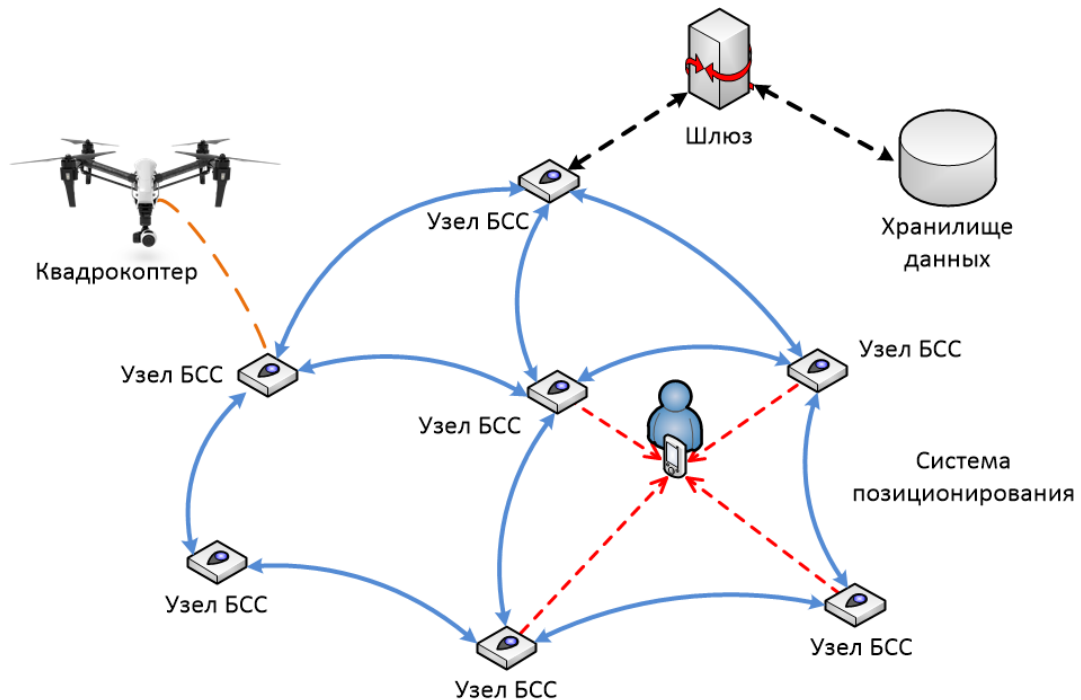


Рисунок 12. Сегмент модельной сети, представляющий собой беспроводную сенсорную сеть (БСС)

Другим примером может послужить реализация сегмента программно-конфигурируемой сети (SDN). На сегодняшний день технология SDN является одним из лучших решений задачи сетевой конвергенции, задачи управления и конфигурирования сетевого оборудования. SDN реализует идеологию сетевой виртуализации, при которой плоскость управления сетевого устройства отделяется от плоскости данных. При этом обеспечивается требуемый баланс между степенью централизованного управления посредством SDN-контроллера и децентрализованных операций по маршрутизации потока. SDN позволяет обеспечить строгое выполнение требований к качеству обслуживания для максимально возможного числа потоков и обеспечить максимальную утилизацию сети.

Таким образом, данный сегмент модельной сети, например, позволяет обеспечить тестирование с участием сегмента SDN-сети при передаче трафика IoT.

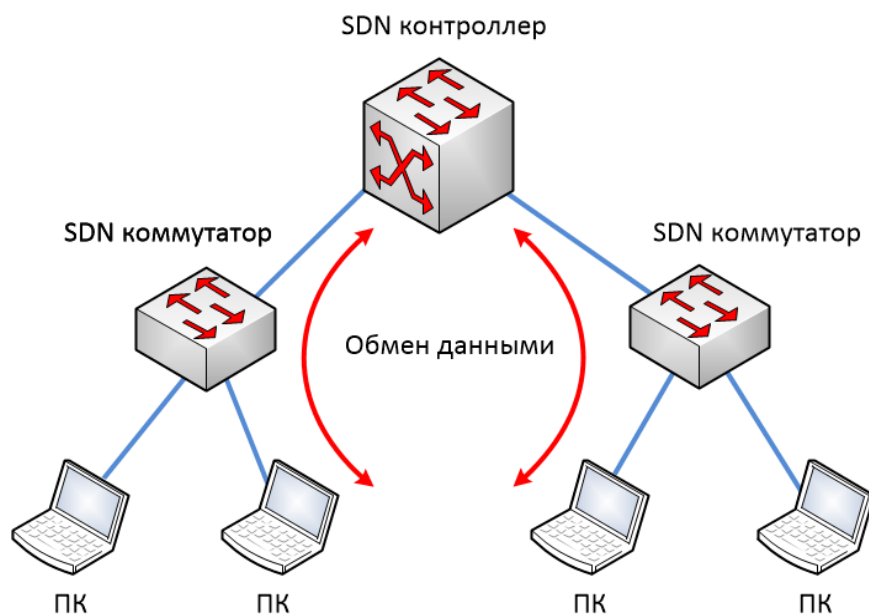


Рисунок 13. Сегмент модельной сети, представляющий собой программно-конфигурируемую сеть (SDN)

3.3 Минимальная конфигурация модельной сети в условиях создания распределенной модельной сети.

Минимальная конфигурация модельной сети должна включать в себя следующие составные элементы:

- сервер имитации процессов в ССОП, моделирующий процессы, происходящие в различных сегментах сети связи общего пользования (потери, задержки, джиттер и т.д.);
- терминал управления;
- промежуточные узлы (маршрутизаторы);
- исследуемое оборудование, фрагменты сетей;
- базу данных, обеспечивающую хранение различных конфигураций виртуальной модельной сети и долговременное хранение результатов тестирования;
- сервер управления тестированием, обеспечивающий мониторинг и общее управление сетью и процессом тестирования, генерацию потоков трафика необходимого типа, хранение и обработку промежуточных результатов тестирования и т.д.;
- шлюз для создания канала связи между виртуальной модельной сетью и тестируемым оборудованием или фрагментами реально существующих сетей.

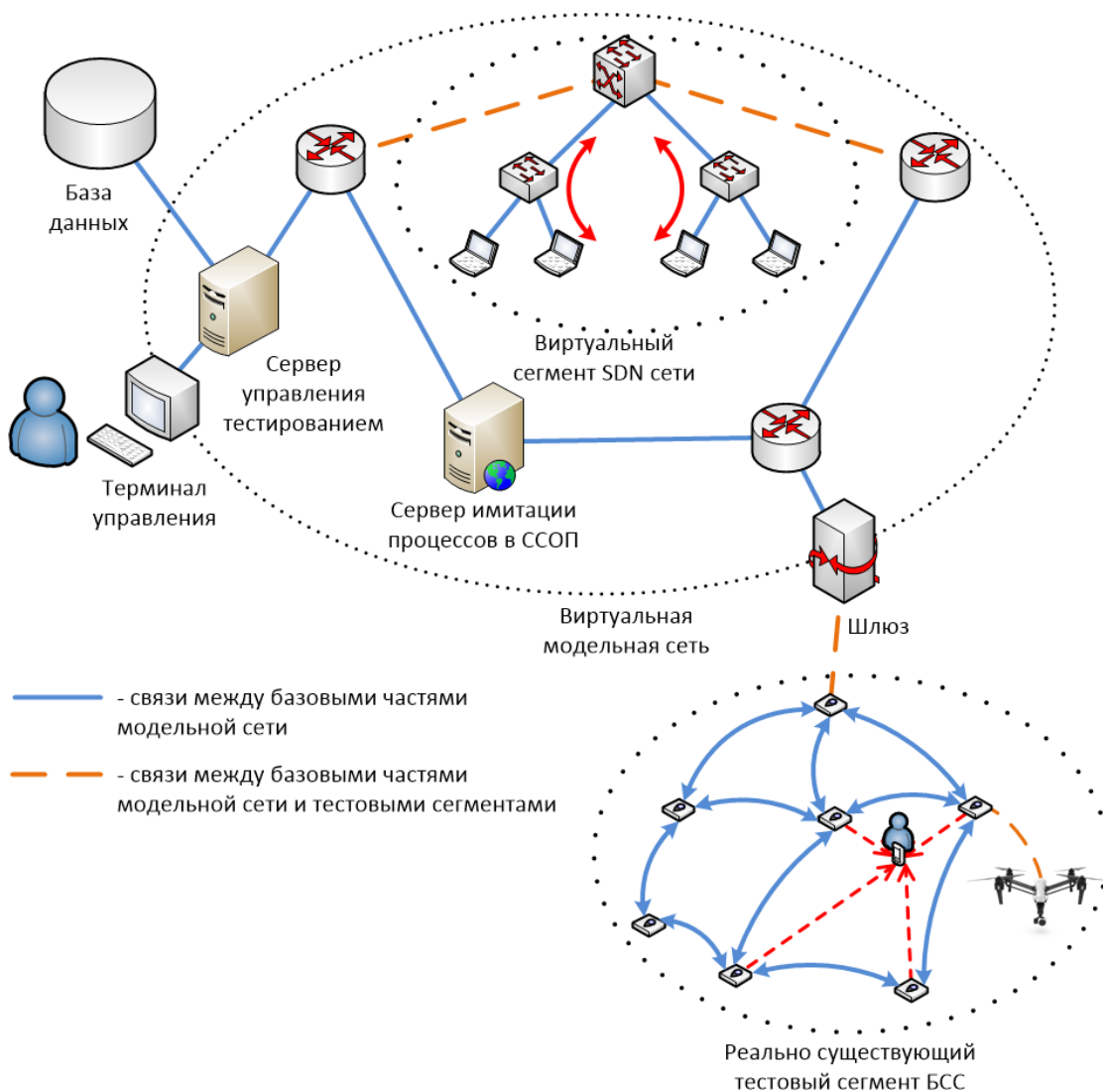


Рисунок 14. Структурная схема модельной сети

Данная структурная схема отражает только один из возможных вариантов построения модельной сети. В целях обеспечения наибольшей достоверности тестирования и для обеспечения соответствия сети необходимой архитектуре, имеется возможность быстро переконфигурировать сеть, включив в её состав дополнительные составляющие элементы и перераспределив потоки трафика.

Для того чтобы реализовать виртуализацию и сегментацию модельной сети необходимо выбрать программу-эмулятор. Проведём критериальное сравнение нескольких распространённых эмуляторов сетей: Cisco VIRL, GNS3 и UnetLab. В качестве критериев будем рассматривать возможность поддержки оборудования различных производителей, поддержки сетевого оборудования различных типов (router, switch, firewall и т.д.), возможность бесплатного использования и поддержку многопользовательского режима.

Таблица 3.1. Сравнение эмуляторов сетей

| Cisco VIRL | GNS3 | UNetLab | Характеристика |
|------------|------|---------|---|
| + | + | ++ | Поддержка оборудования различных производителей |
| ++ | + | ++ | Поддержка сетевого оборудования различных типов |
| – | + | + | Стоимость |
| – | – | + | Многопользовательский режим |
| +++ | +++ | +++++ | Итого |

Из критериального сравнения следует, что наиболее подходящий инструмент для реализации модельной сети – эмулятор UnetLab.

UNetLab (Unified Networking Lab, UNL) – это мультивендорная и многопользовательская платформа для моделирования сетей. Этот эмулятор позволяет создать виртуальную сеть из маршрутизаторов, коммутаторов, устройств безопасности и другого сетевого оборудования. Существует возможность создавать независимые друг от друга модельные сети в рамках одной платформы, а также совместно работать с модельной сетью нескольким пользователям одновременно. Данная особенность очень важна, т.к. позволяет производить отладку работы модельной сети и её настройку нескольким пользователям одновременно, что значительно экономит время тестирования.

4 Перспективы развития региональных лабораторий «Интернета вещей» при широкомасштабном внедрении сетей связи с ультра малыми задержками

В соответствии с проектом рекомендации Q.TI-TEST “Структура модельной сети для тестирования Тактильного Интернета”[16] для тестирования сетей с ультра малыми задержками предложены соответствующие решения.

Одной из главных задач, которые необходимо решить, прежде чем можно будет использовать услуги Тактильного Интернета, является углублённое исследование соответствия инфраструктуры необходимым требованиям. Предлагая услуги Тактильного Интернета, необходимо учитывать то обстоятельство, что круговая задержка не должна превышать 1мс. В связи с большой сложностью сетей связи с ультра малыми задержками и отсутствием на сегодняшний день соответствующих моделей и методов аналитического

моделирования рациональным решением будет проведение исследований на модельной сети, в ходе которого можно оценить различные варианты взаимодействия основных элементов системы Тактильного Интернета. Модельная сеть для приложений Тактильного Интернета представляет собой прототип действующей сети, построенной с участием соответствующего аппаратного оборудования. Использование такой сети даёт возможность провести комплексное исследование сети для Тактильного Интернета как в штатном режиме работы, так и в условиях перегрузки, что позволяет дать более качественную и объективную оценку характеристик [31].

Структурная схема модельной сети Тактильного Интернета изображена на Рисунок 15.

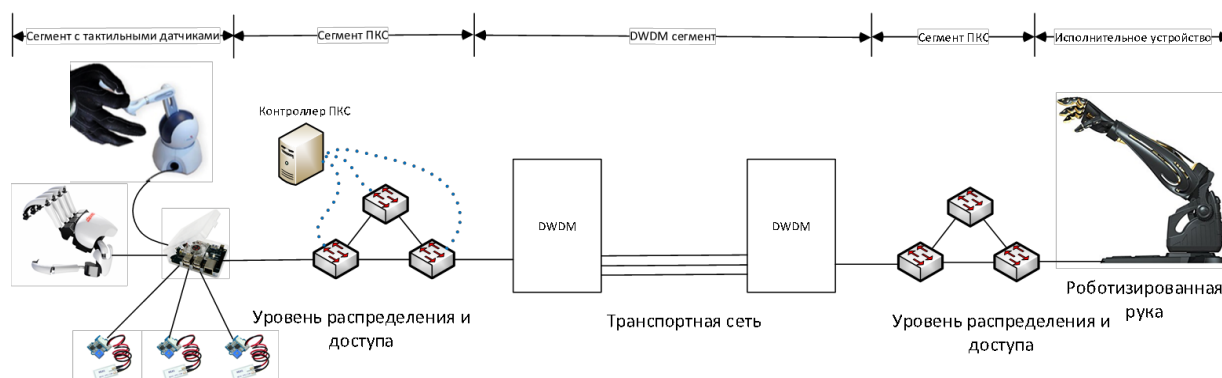


Рисунок 15. Модельная сеть Тактильного Интернета.

Модельная сеть состоит из следующих основных сегментов:

Сегмент 1: Тактильные датчики – могут быть представлены в виде нескольких датчиков, способных регистрировать каждое движение рук, тактильные данные, получаемые от поверхности кожи и т.д. Можно также использовать другие датчики, которые могут отслеживать движения с помощью сенсорных устройств или приложений дополненной реальности (ДР).

Сегмент 2: Уровень распространения и доступа – традиционно представлен в виде элемента программно-конфигурируемой сети, позволяющей осуществлять имитацию передачи данных через реальную сеть и изменять различные параметры, такие как, например, задержки и потери пакетов. На этом уровне определяются классы сетевого трафика и устанавливаются приоритеты. Для трафика, генерируемого приложениями Тактильного Интернета, приоритет определяется с учётом необходимости минимизации круговых задержек.

Сегмент 3: Магистральная сеть – представлена как участок DWDM-сети с пропускной способностью более 10 Гбит/с. Использование оборудования DWDM и подключение контроллера программно-конфигурируемой сети (SDN) даёт возможность управлять параметрами качества обслуживания в отношении трафика.

Сегмент 4: Тактильные драйверы – представлены в виде действующих механизмов (например, робота-манипулятора) для выполнения команд, передаваемых через сеть. Время, необходимое для выполнения команд, зависит от технических характеристик аппаратных устройств, используемых в модельной сети.

Модельная сеть Тактильного Интернета была использована для тестирования еще одной перспективной технологии – Интернета Навыков. Структура экспериментального стенда для тестирования Интернета Навыков приведена на Рисунок 16.

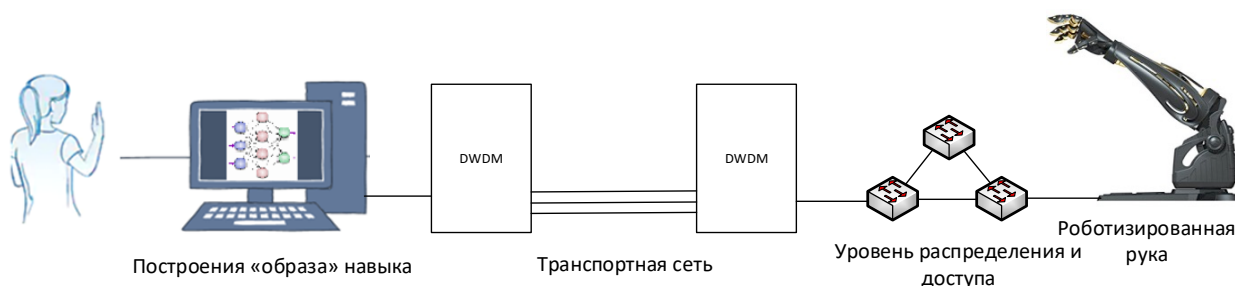


Рисунок 16. Экспериментальный стенд на базе модельной сети Тактильного Интернета.

Термин Internet of Skills (Интернет Навыков) был введен M.Dohler для совместного использования роботов, Искусственного Интеллекта, сетей связи пятого поколения и Тактильного Интернета в [32]. Отсюда следует, что приложения Интернета Навыков могут быть самыми разнообразными [33]. Мало того, на сегодняшний день предполагается, что Интернет Навыков может предложить пользователю существенно более привлекательные услуги, чем существующий контент. В качестве приложений Интернета Навыков могут быть здравоохранение, искусство, образование, в том числе не обязательно только высшее, зоология, спорт. Совершенно новыми приложениями могут быть, например, такие приложения как передача музыкальных навыков. Поскольку навыки определяют возможное поведение и людей, и животных, и роботов можно говорить о том, что Интернет Навыков обладает всепроникающими (Ubiquitous) свойствами. Поэтому, в обозримом будущем следует считать, что внедрение приложений Интернета Навыков окажет принципиальное воздействие на сеть связи. Последнее требует уже сегодня учитывать модели приложений Интернета Навыков.

Для подтверждения актуальности и существования научно-исследовательских задач в области сетей и систем связи для внедрения концепции Интернета Навыков на модельной сети кафедры сетей связи и передачи данных были проведены экспериментальные исследования, где в качестве конечных устройств использовались созданные на кафедре тактильная перчатка и роботизированная рука [31]. Тактильная перчатка преобразовывала движения отдельных фаланг пальцев кисти руки в цифровой вид и отправляет данные на сервер. В тактильной перчатке используются датчики изгиба Flex sensors, которые при изменении угла изгиба пальцев изменяют сопротивление. Эти датчики соединены к с платформой Arduino Uno, которая и преобразовывает движения кисти руки в цифровой вид.

Затем по результатам оцифровки данных создается образ для каждого отдельного эксперимента, который по модельной сети транслируется на сервер, на котором осуществляется обучение соответствующей нейронной сети. В результате экспериментальных исследований установлено адекватное воспроизведение движений руки в перчатке роботизированной рукой при передаче информации через созданную на кафедре модельную сеть Тактильного Интернета. Роботизированная рука была напечатана на кафедре на 3D принтере из open-source проекта InMoov. При этом на странице проекта можно загрузить 3D модели всех узлов. Движение роботизированной руки обеспечивалось сервомоторами: кисть и отдельные фаланги пальцев управлялись с помощью сервоприводов, которые изменяют натяжение нитей при получении

определенных управляющих команд от контроллера, тем самым меняя положение фаланг.

При всей привлекательности этого экспериментального исследования одновременно в нем может участвовать ограниченное число исследователей. Для существенного расширения круга участников экспериментальных исследований вместо тактильной перчатки использовали камеру дополненной реальности Intel Real Sense 102, достаточно большое количество которых есть на кафедре сетей связи и передачи данных. В экспериментальных исследованиях участвовали 20 человек разного пола и разного возраста. Каждому испытанному предлагалось показать на международном языке жестов (на основе типовых демонстрационных материалов) ряд из заданных слов. Поскольку для каждого человека специфика жестикюляции сугубо индивидуальна, каждый испытаннный демонстрировал жесты по-своему. При этом можно было обучить нейтронную сеть усредненному навыку.

В ходе накопления опыта навыков для последующих поколений не меньший интерес представляет воспроизведение действий, которые выполняли другие люди или их предки. Это, как уже отмечалось выше, позволит передавать наилучшую практику навыков через поколения. Навыки могут быть накоплены как индивидуальные (например, выдающиеся рабочие, инженеры, ученые, деятели культуры), так и усредненные по любой из профессий.

В проведенном эксперименте в результате усреднения данных от достаточно большого числа людей на базе нейронной сети был сформирован типовой образ для отдельных символов, которые могут быть воспроизведены с помощью актуаторов. В качестве актуатора использовалась та же роботизированная рука, что и ранее, приводимая в движение с помощью сервоприводов. Разумеется, точность воспроизведения во многом зависит от сложности исполнения конкретной роботизированной руки. При этом можно отметить, что с каждым днем роботизированные системы становятся все более совершенными и более точно воспроизводят человеческие движения.

В результате передачи образа (храняемого в базе данных нейронной сети) на исполнительный контроллер осуществлялось преобразование этого образа в управляющие команды для сервоприводов, которые пропорционально поворачивали шестерни и меняли натяжения нитей. При этом роботизированная рука воспроизводила образ с допустимой точностью. В результате субъективной оценки воспроизводимых образов была зафиксирована высокая точность демонстрации.

Подобные конструкции в свою очередь можно использовать в здравоохранении, медицине и т.п., так как они являются безопасными для человека. Также данная конструкция может послужить отличным тренажером для тех, кто хотел бы улучшить свои навыки.

Заключение

В отчете разработаны рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» на основе анализа материалов Сектора стандартизации электросвязи (МСЭ-Т) и отчетов Сектора развития электросвязи (МСЭ-D). Рекомендации по созданию и эксплуатации региональных лабораторий «Интернета вещей» конкретизированы на примере лаборатории ПАО «Ростелеком» и СПбГУТ:

1. Создание региональных лабораторий «Интернета вещей» целесообразно осуществлять на основе модельных сетей в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т серии Q. Определены минимальная конфигурация модельной сети для реализации тестирования современных технологий «Интернета вещей», а также перечень технологий, которые можно тестировать на такой сети.
2. С учетом предстоящего широкомасштабного внедрения «Интернета вещей» на промышленных предприятиях в рамках промышленной революции 4.0 рекомендовано по возможности расширить состав модельной сети региональной лаборатории «Интернета вещей» за счет создания сегмента Промышленного «Интернета вещей».
3. На основе решений по созданию модернизированной региональной лаборатории «Интернета вещей» ПАО «Ростелеком» и СПбГУТ в целях модернизации существующей лаборатории разработаны рекомендации, которые учитывают современную специфику тестирования «Интернета вещей» с учетом предстоящего широкомасштабного внедрения сетей связи пятого поколения и цифровой экономики.
4. Рекомендуются в состав региональной лаборатории «Интернета вещей» включить пять стендов тестирования:
 - Стенд тестирования ПО, приложений и периферии на основе устройств Raspberry Pi3;
 - Стенд тестирования ПО, приложений и периферии на основе устройств ESP32;
 - Стенд тестирования ПО, приложений и устройств работающих по технологии LoRa;
 - Стенд тестирования ПО, приложений и устройств работающих по технологии 6LoWPAN;
 - Стенд тестирования технологий идентификации устройств IoT.
5. Для эффективного использования ресурсов лаборатории «Интернета вещей» в ее составе предусмотрен также Центр обучения.
6. Рекомендуются создавать ядро модельной сети на основе технологий программно-конфигурируемых сетей, что также дает возможность построения для региональной лаборатории «Интернета вещей» на этом же ядре локальной вычислительной сети, обеспечивающей создание единого информационного пространства для всей лаборатории.
7. В отчете приведены рекомендации по конкретным проектным решениям для построения сети региональной лаборатории «Интернета вещей», составу персонала, требуемым помещениям, рабочим местам сотрудников лаборатории, кабельным трассам, электроснабжению и т.п.
8. Определены рекомендации по числу рабочих мест для Центра обучения и требуемым площадям.
9. Рекомендованы состав оборудования, программного обеспечения и численные характеристики для стендов региональной лаборатории «Интернета вещей».
10. Приведен пример тестовых спецификаций для протокола SOAP для тестирования в условиях региональной лаборатории «Интернета вещей».

11. Рекомендованы варианты использования программно-конфигурируемых сетей как для региональных лабораторий, так и для распределенных модельных сетей.
12. Рекомендованы подходы к тестированию контроллера программно-коммутируемых сетей, играющего решающую роль при построении модельной сети региональной лаборатории «Интернета вещей».
13. Рассмотрены возможности организации распределенных модельных сетей и даны рекомендации по возможным вариантам их построения на основе виртуализации и сегментации, а также по использованию различных эмуляторов сети.
14. Рассмотрены перспективы использования технологий Тактильного Интернета и Интернета Навыков при построении сетей с ультра малыми задержками и рекомендована структура модельной сети для тестирования таких технологий с соответствующими требованиями к новым элементам модельных сетей.

Список литературы

1. Васильев А.Б. Тестирование сетей связи следующего поколения. / Васильев А.Б., Тарасов Д.В., Андреев Д.В., Кучерявый А.Е. // М.: ФГУП ЦНИИС, 2008, 140 стр.
2. ITU-T Recommendation Q.3900 "Methods of testing and model architecture for NGN technical means testing as applied to public telecommunication networks", September 2006.
3. ETSI ETR 101 667, v1.1.2. July, 1999.
4. ITU-T Resolution 76 (Rev. Hammamet, 2016) "Studies related to conformance and interoperability testing, assistance to developing countries, and a possible future ITU MARK Programme", 2016.
5. ITU Council Resolution 122.
6. ITU-T Recommendation Q.3952 "The architecture and facilities of a model network for Internet of things testing", January, 2018.
7. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. - С. Петербург: Любавич, 2011, 312с.
8. Koucheryavy A. State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models. ICACT'2014, Proceedings, 16-19 February, Phoenix Park, Korea.
9. ITU-T Recommendation Q.3930 "Performance testing of distributed systems – Concept and terminology", August, 2012.
10. ITU-T Recommendation Q.3932.1 "IMS/NGN performance benchmark – Part 1: Core concept", June, 2015.
11. И.А.Богданов, А.И.Парамонов, А.Е.Кучерявый. Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий. Электросвязь, №1, 2013.
12. И.А.Богданов, А.Е.Кучерявый. Характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий. Информационные технологии и телекоммуникации. Электронный научный журнал. СПб ГУТ, выпуск 3 (7), 2014, с.59-74.
13. О.И.Шелухин, Р.А.Судариков. Анализ информативных признаков в задачах обнаружения аномалий трафика статистическими методами. T-Comm, №3, 2014, с.14-18.
14. О.И.Шелухин. Сетевые аномалии. Обнаружение, локализация, поиск. Горячая линия-Телеком, 2019, 448 стр.
15. ITU-T Recommendation Q.4061 "Структура тестирования контроллера программно-конфигурируемых сетей", April, 2019.
16. Draft ITU-T Recommendation Q.TI-TEST "Framework of model network for Tactile Internet Testing", SG11 – TD842/GEN.
17. Kirichek R., Koucheryavy A. Internet of Things Laboratory Test Bed // International Conference on Wireless Communication, Networking and Application. WCNA 2014. — LNEE – Vol. 348. — Heidelberg: Springer, 2016.
18. Kirichek R., Vladyko A., Zakharov M., Koucheryavy A. Model networks for internet of things and SDN// 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACTION), 2016, pp. 76-79.
19. Feasibility study for a conformance testing centre. Report, ITU-D, December, 2013.
20. Establishing conformity and interoperability regimes: basic guidelines. Report, ITU-D, February, 2014.

21. Долгушев, Р. А. Обзор возможных видов и методов тестирования интернет-вещей / Р. А. Долгушев, Р. В. Киричек, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2016. — Т. 4. — № 2. — С. 1–11.
22. Долгушев, Р. А. Обзор возможных видов и методов тестирования интернет-вещей / Р. А. Долгушев, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016). 19-я Международная научная конференция, 21–25 нояб. 2016 г.: материалы в 3 томах; под общ. ред. В. М. Вишневого и К. Е. Самуйлова. — М.: РУДН, 2016. — С. 122–128.
23. Долгушев, Р.А., Разработка моделей и методов тестирования устройств и приложений «Интернета вещей» на базе модельной сети / Р. А. Долгушев, Р. В. Киричек // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018) VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2018. С. 299-304.
24. Ateya, A.A. Intelligent core network for Tactile Internet system / A.A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova, A. Vybornova, A. Koucheryavy // In Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems, p. 15, ACM, July 2017.
25. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. — 2016. — № 1 . — С. 44-46.
26. С.Мухизи, А.А.Атея, А.С.Мутханна, Р.В.Киричек. Модели сегментации и кластеризации ресурсов в программно-конфигурируемых сетях // Электросвязь. -2019. - №4. – С.26-31.
27. Атея, А.А. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34-40.
28. Парамонов А.И. Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей связи общего пользования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПбГУТ, СПб, 2014.
29. Захаров М.В., Киричек Р.В., Кучерявый А.Е. Виртуальные модельные сети на базе эмулятора UNETLAB//72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио, 2017, с. 183-185.
30. Захаров М.В., Киричек Р.В. Разработка виртуальной гетерогенной модельной сети для тестирования оборудования приложений «Интернета вещей». Труды конференции АПИНО, СПбГУТ, 2019.
31. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А., Киричек Р.В., Бородин А.С., Маколкина М.А., Выборнова А.И., Фам В.Д., Ястребова А.А. Интернет Навыков. Электросвязь, №1, с.29-32.
32. Dohler M. and all. Internet of Skills, Where Robotics Meets AI, 5G and the Tactile Internet. European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Oulu, Finland, 12-15 June, 2017. P.1-5.
33. Lema, M. A. 5G case study of Internet of Skills: Slicing the human senses / Lema, M. A.; Antonakoglou, K.; Sardis, F.; Sornkarn, N.; Condoluci, M.; Mahmoodi, T.; Dohler, M. // In Networks and Communications (EuCNC), 2017 Eu-ropean Conference on, (pp. 1-6). IEEE, June 2017.