

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ
Кафедра математического моделирования и анализа данных

КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ДАННЫХ В IoT
СИСТЕМАХ

Дипломная работа

Шиляева Ивана Владимировича
студента 4 курса, 9 группы
специальность
«компьютерная безопасность»

Научный руководитель:
ассистент
М.А. Казловский

Минск, 2022

Оглавление

Введение	3
1 Анализ литературы	5
1.1 Технологии Интернета вещей	5
1.2 Используемые протоколы	6
1.2.1 Bluetooth	6
1.2.2 Протоколы дальнего действия	7
1.2.3 ZigBee	8
1.2.4 Z-Wave	12
1.2.5 Wi-Fi	14
1.3 Сравнение протоколов	16
2 Безопасность сетевых протоколов IoT	18
2.1 ZigBee	18
2.2 Z-Wave	20
2.3 Wi-Fi	21
2.4 Сравнение безопасности	22
3 Криптографические угрозы и атаки	24
3.1 ZigBee	24
3.2 Z-Wave	24
3.3 Wi-Fi	26
Заключение	27
Список использованных источников	29

Введение

Термин «Интернет вещей» («Internet of Things») появился более 20 лет назад, а история развития технологии насчитывает почти два столетия. Среди множества определений термина можно выделить следующее: интернет вещей — это глобальная сеть объектов, подключённых к интернету, которые взаимодействуют между собой и обмениваются данными без вмешательства человека.

Основными компонентами IoT систем являются:

- объекты, или «вещи»;
- данные, которыми они обмениваются;
- инфраструктура, с помощью которой осуществляется взаимодействие.

К последнему пункту можно отнести разнообразные виды соединения и каналы связи, программные средства и протоколы. Инфраструктура и её криптографический аспект представляют собой наибольший практический интерес и составляют предметную область данной работы.

Говоря о практическом применении Интернета вещей, многие отрасли выигрывают при использовании этой технологии. И в каждой из этих отраслей необходимо думать о безопасности и защите данных. В связи с этим возникают задачи актуализации знаний об алгоритмах и протоколах, применяемых в данной сфере, их сравнения и реализации в рамках программного обеспечения, а также рассмотрения вариантов модификации и улучшения этих протоколов с применением белорусской криптографии. Эти задачи и легли в основу данной работы. В соответствии с задачами были поставлены следующие цели:

1. Изучить сетевые протоколы, применяемые в сфере IoT, и провести их сравнительный анализ;
2. Разобрать криптографический аспект изученных в соответствии с первой целью сетевых протоколов в контексте используемых в них криптографических протоколов и алгоритмов;

3. Описать уязвимости и угрозы используемых решений.

Данная работа состоит из 3 глав, в которых последовательно раскрываются все перечисленные выше вопросы.

Глава 1

Анализ литературы

1.1 Технологии Интернета вещей

IoT включает в себя бесчисленное количество технологий и решений, и чтобы понять их все, необходимо потратить немало времени. Однако в целях упрощения существует возможность разбить весь IoT стек на четыре базовых технологических уровня, которые позволяют функционировать всему Интернету вещей.

Аппаратное обеспечение устройств является первым из этих уровней. Устройства — это те самые «вещи» в аббревиатуре IoT. Выступая в роли интерфейса между реальным и цифровым миром, они могут принимать разные формы и размеры, а также иметь разные уровни технологической оснащённости в зависимости от выполняемой задачи. Практически любой предмет может быть подключен к Интернету и оснащён необходимым инструментарием (сенсорами, датчиками и т.д.) в целях измерения и сбора данных. Единственным существенным ограничением может быть реальный практический сценарий использования.

Программное обеспечение является элементом, который делает девайсы по-настоящему «умными». Программы ответственны за коммуникацию с облаком, сбор данных, взаимодействие между устройствами, а также анализ данных в реальном времени. Более того, программное обеспечение помогает взаимодействовать с IoT системами на уровне приложения конечному пользователю, визуализируя обработанные данные для него.

Уровень коммуникации (уровень сообщения) тесно связан с программным и аппаратным обеспечением, однако важно рассматривать его отдельно. Этот уровень содержит средства для обмена информацией между умными устройствами и остальным IoT миром. Он включает в себя как физическое соединение, так и специальные протоколы, на которых будет сделан акцент в данной работе. Выбор правильного решения для обмена сообщения-

ми является ключевым при построении каждой системы. Технологии отличаются в зависимости от способа передачи данных и управления устройствами.

Благодаря программному и аппаратному обеспечению девайсы могут считывать, что происходит вокруг, и коммуницировать с пользователями по специальным каналам связи. **IoT платформа** — это место, в котором все собранные данные обрабатываются, анализируются и представляются пользователю в удобном виде. Её достоинством является извлечение полезных данных из большого объёма информации, который передаётся от устройств по каналам связи.

1.2 Используемые протоколы

Существует множество разнообразных способов взаимодействия умных устройств между собой. Поэтому при выборе протоколов для Интернета вещей часто возникает вопрос о том, есть ли реальная необходимость разработки новых решений, в то время как хорошо зарекомендовавшие себя протоколы сети Интернет уже используются повсеместно десятилетиями. Причина для этого кроется в том, что существующие протоколы часто оказываются недостаточно эффективными и слишком энергоёмкими для работы с возникающими IoT технологиями. Поэтому речь пойдёт об альтернативных решениях, посвящённых именно IoT системам.

Одна из возможных классификаций разбивает все протоколы на три группы: ближнего, среднего и дальнего действия. Наиболее ярким представителем первой группы является Bluetooth, который несмотря на свою повсеместную распространённость остаётся далеко не лучшим решением, особенно при передаче больших объёмов данных. К последней группе относят такие протоколы как NB-IoT, LoRaWAN и SigFox. Эти решения являются весьма современными и продвинутыми, однако используются часто в масштабах предприятий. Наша же цель заключается в изучении решений, применимых к простым пользователям IoT систем, поэтому данный раздел будет преимущественно сконцентрирован вокруг второй группы, а именно протоколов средней зоны действия.

Однако для полноты картины посмотрим вначале на протоколы ближнего и дальнего действия.

1.2.1 Bluetooth

Bluetooth — это стандарт беспроводной связи, предназначенный для обмена информацией на небольших расстояниях между мобильными и неко-

торыми другими типами устройств. Этот стандарт описан в спецификации IEEE 802.15.1. Первая версия Bluetooth 1.0 была выпущена в 1998 году. Начиная с версии Bluetooth 4.2 (2014 год) было заявлено о поддержке IoT, а Bluetooth 5 и вовсе позиционируется как одна из лидирующих технологий в среде IoT. Однако у неё есть свои нюансы. До версии 5.0 главным из них было малое количество устройств, способных объединяться в одну сеть. Оно ограничивалось лишь 8-ю узлами. Но в последних версиях этот показатель был увеличен на порядок. На данный момент максимальное количество устройств в Bluetooth-сети составляет 32767.

Bluetooth функционирует в частотах от 2,4 до 2,485 ГГц. Дальность действия в 5-й версии составляет 40 метров, а скорость передачи данных — до 2 Mbit/s. Была проведена существенная работа над энергопотреблением устройств. А кроме того в последней версии заявлено о поддержке ячеистой топологии сети (более подробно о ней в разделе о ZigBee), что в будущем, при появлении большего количества устройств на новых версиях, позволит технологии как минимум сравниться по популярности и сценариям использования с другими стандартами, такими как ZigBee, Z-Wave и Wi-Fi.

1.2.2 Протоколы дальнего действия

Рассмотрим лишь некоторые, самые популярные решения.

- NarrowBand-IoT. Это новый стандарт радио технологий, который обеспечивает экстремально низкое энергопотребление устройств (до 10 лет от одной батареи). Кроме того, он использует уже существующую инфраструктуру сетей сотовой связи, что обеспечивает глобальное покрытие и гарантированное качество сигнала.
- LoRaWAN. Расшифровывается как Long Range Wide-Area Networking. Он заточен под низкое энергопотребление и поддерживает огромные сети с миллионами устройств. Используется в масштабах умных городов. Типичным примером может послужить дистанционное считывание показаний счётчиков электроэнергии и водоснабжения в многоквартирных домах.
- SigFox. Технология обеспечивает простую и быструю связь между сенсорными устройствами в пределах беспроводной сети. Характеризуется ещё более низким энергопотреблением (до 20 лет от одной батареи), однако имеет зависимость от существующей сотовой инфраструктуры.

Поскольку перечисленные протоколы сильно отличаются по своим характеристикам от протоколов ближнего и среднего действия, имеет смысл сравнить их отдельно в приведенной ниже таблице.

	NB-IoT	LoRaWAN	Sigfox
Скорость передачи	100 Kbit/s	50 Kbit/s	100 bit/s
Энергопотребление	Низкое	Низкое	Низкое
Частота	< 1 GHz	150 MHz - 1 GHz	900 MHz
Топология сети	Звезда	Звезда	Звезда

Таблица 1.1: Сравнение протоколов дальнего действия

1.2.3 ZigBee

ZigBee — это один из протоколов верхнего уровня, используемый в домашней автоматизации и других сферах IoT, построенный на базе стандарта IEEE 802.15.4. Он поддерживает высокую отказоустойчивость, низкое энергопотребление, безопасность и надёжность.

Протокол ZigBee описывает беспроводные персональные сети (Wireless personal area network, WPAN). Индивидуальные устройства в подобной сети могут работать на одной батарее до двух лет. Сети на основе ZigBee характеризуются довольно низкой пропускной способностью (до 250 Кбит/с) и дальностью связи между узлами до 100 метров. Протокол был задуман в 1998 году. Первоначальная спецификация была признана стандартом IEEE в 2003 году, а первые модули, совместимые с ZigBee, появились в массовой продаже в начале 2006 года [1].

Существует три типа устройств ZigBee:

1. Координатор ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC). Каждая сеть ZigBee должна иметь один координатор, который управляет всей сетью. Координатор выполняет функцию «центра доверия» (Trust Center, TC), обеспечивая генерацию, хранение и распространение ключей безопасности. Он отвечает за создание сети путём выбора наиболее свободного канала для коммуникации устройств. После этого координатор разрешает другим устройствам присоединяться к сети и покидать её, ведя учёт всех устройств в сети. ZigBee координатор не может находиться в спящем режиме и должен быть непрерывно подключён к источнику питания.
2. Маршрутизатор ZigBee (ZigBee Router, ZR). Маршрутизатор выступает в качестве промежуточного звена между координатором и конечными

устройства. Сперва он должен получить разрешение на присоединение к сети от координатора, а после может перенаправлять трафик между устройствами и позволять новым устройствам подключаться к сети. По аналогии с координатором маршрутизатор не может находиться в спящем режиме. Является опциональным устройством в сети.

3. Конечное устройство ZigBee (ZigBee End Device, ZED). Это самый простой тип устройств в сети ZigBee. Обычно они питаются от батарее. Потребитель чаще всего знаком именно с этим типом устройства, к которому относятся, например, умные лампочки или датчики движения. Они содержат достаточно функций, чтобы общаться с координатором или маршрутизатором, но не могут передавать данные от других устройств. Такое взаимодействие позволяет узлу находиться в спящем режиме значительную часть времени, что обеспечивает длительность автономной работы. ZED требует наименьшего объёма памяти, поэтому является более дешёвым в производстве, чем координатор или маршрутизатор.

	ZC	ZR	ZED
Создание сети ZigBee	x		
Разрешение на присоединение к сети другим устройствам	x	x	
Назначение 16-битного сетевого адреса	x	x	
Обнаружение и запись путей для эффективной доставки сообщений	x	x	
Маршрутизация сетевых пакетов	x	x	x
Присоединение и выход из сети	x	x	x
Режим сна			x

Таблица 1.2: Типы устройств ZigBee

ZigBee был разработан как стандарт для радиосетей с ячеистой (mesh) топологией. Кроме того, ZigBee поддерживает сети с топологией «звезда» и «дерево». В каждой сети должно быть одно устройство-координатор. В сетях с топологией «звезда» координатор должен быть центральным узлом. Как древовидные, так и ячеистые сети позволяют использовать маршрутизаторы ZigBee для расширения связи на сетевом уровне. Благодаря этому, используя несколько координаторов, дальность соединения может быть намного более базовых 100 метров. А за счёт построения оптимального маршрута в сетях с ячеистой топологии сеть в некоторых случаях может продолжать работу даже при выходе из строя одного из координаторов.

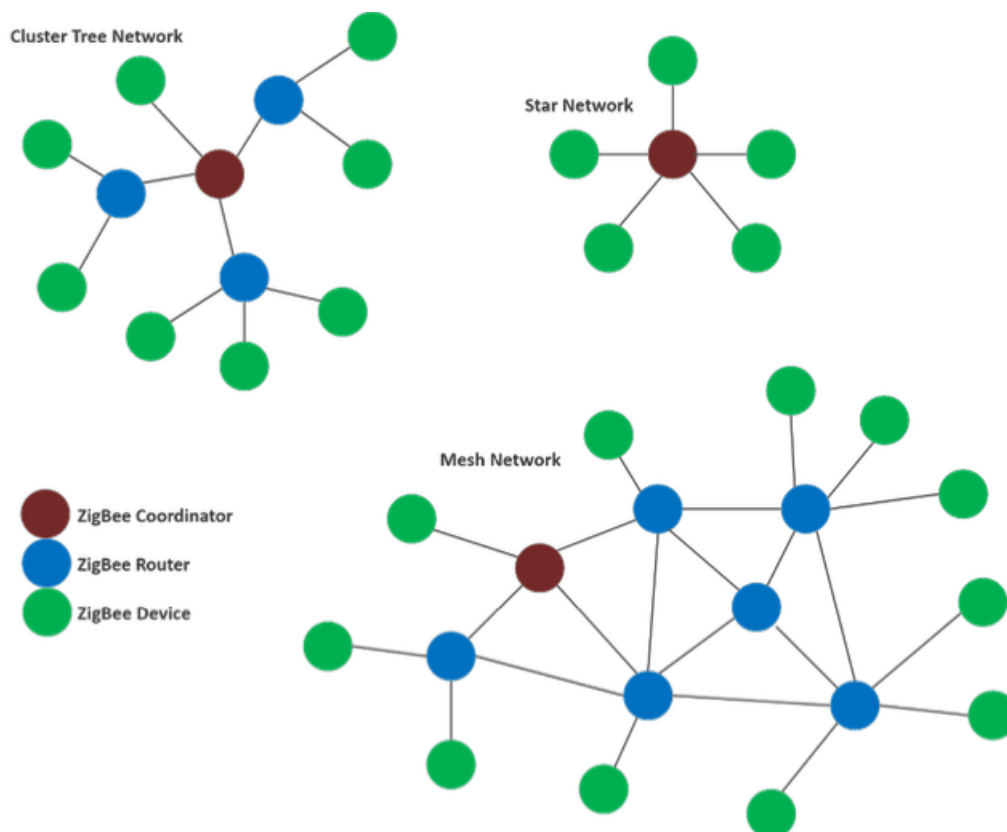


Рис. 1.1: Топологии сети ZigBee

Архитектура протокола состоит из четырёх уровней:

1. Физический (PHY). Физический уровень относится к стандарту IEEE 802.15.4. Этот уровень является ответственным за передачу битов информации путём отправки и получения пакетов данных, а также за выбор канала (и, соответственно, частоты).
2. MAC (Medium Access Control). MAC — ещё один уровень, относящийся к стандарту IEEE 802.15.4. Он служит интерфейсом между физическим и сетевым уровнями. MAC обеспечивает механизмы адресации и управления доступом к каналам.
3. Сетевой (NWK). Этот уровень определяется уже ZigBee-спецификацией. Он ответственен в первую очередь за выбор топологии сети. После выбора канала координатор назначает каждому присоединяющемуся к сети устройству специальный идентификатор — PAN ID (Personal Area Network ID). Этот идентификатор (16-битное число) используется для логического отделения узлов одной сети ZigBee от узлов другой. На сетевом уровне также устанавливается адрес каждого узла в сети.

4. Прикладной (APL). Прикладной уровень (или уровень Приложения) включает несколько подуровней. Application Support Sublayer (APS) предоставляет программный интерфейс между уровнем NWK и приложениями, которые могут работать на устройстве. Именно он отвечает за безопасность всего прикладного уровня. ZigBee Device Object (ZDO) определяет, будет ли устройство координатором или конечным устройством. Application Framework является окружением для приложений ZigBee. Он определяется вендором, реализующим спецификацию, однако в последнее время много усилий направлено на совместимость устройств от различных производителей.

Таким образом, ZigBee — это спецификация протоколов APS (прикладного) и NWK (сетевого) уровней, использующих сервисы нижних уровней (MAC и PHY), регламентированных стандартом IEEE 802.15.4.

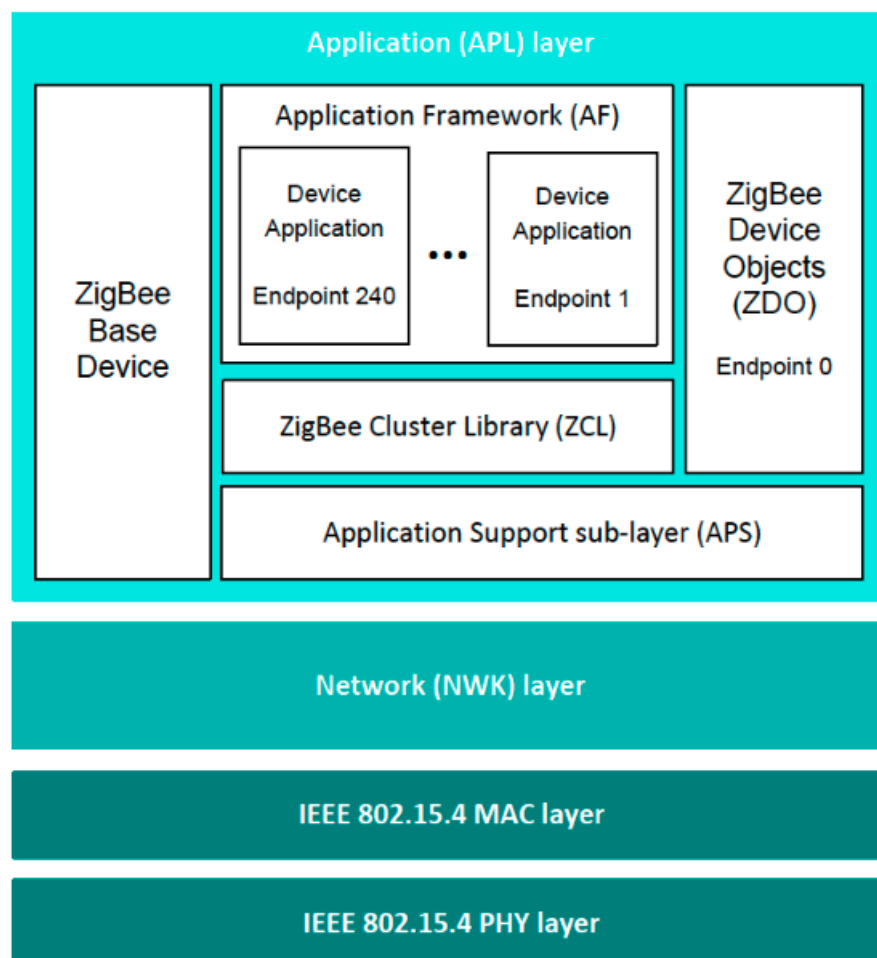


Рис. 1.2: Сетевые уровни ZigBee

Типичные сферы применения протокола:

- домашняя автоматизация;
- промышленные системы управления;
- сбор медицинских данных;
- оповещение о задымлении и несанкционированном проникновении;
- автоматизация зданий.

ZigBee Alliance — это группа компаний, которые поддерживают и публикуют стандарт ZigBee [2]. Название ZigBee является зарегистрированной торговой маркой этой группы и представляет собой не просто технический стандарт. Организация публикует материалы, которые позволяют производителям создавать совместимые продукты. Связь между IEEE 802.15.4 и ZigBee похожа на связь между IEEE 802.11 и Wi-Fi Alliance. За годы существования альянса его членами стали более 500 компаний.

1.2.4 Z-Wave

Z-Wave — это протокол беспроводной связи, используемый в основном для домашней автоматизации. Он применяется преимущественно для управления бытовой техникой и другими устройствами, такими как освещение, охранные системы, термостаты, окна, замки, бассейны и открыватели гаражных дверей. Как и другие протоколы, предназначенные для рынка автоматизации дома и офиса, система Z-Wave может управляться через Интернет со смартфона, планшета или компьютера, а также локально через умную колонку или хаб, настенную панель со шлюзом Z-Wave или центральным устройством управления. Z-Wave обеспечивает совместимость на прикладном уровне между системами управления домом различных производителей, входящих в её альянс. Число совместимых продуктов Z-Wave значительно растёт, к 2019 году их количество составляло более 2600 [3].

Протокол Z-Wave был разработан датской компанией Zensys, расположенной в Копенгагене, в 1999 году. В этом же году была представлена потребительская система управления светом. Набор микросхем серии 100 был выпущен в 2003 году, а серии 200 — в мае 2005 года. Микросхема серии 500, также известная как Z-Wave Plus, была выпущена в марте 2013 года, с увеличенным в четыре раза объёмом памяти, улучшенным радиусом действия беспроводной связи и увеличенным временем автономной работы. Технология начала распространяться в Северной Америке примерно в 2005 году, когда пять компаний приняли Z-Wave и сформировали Z-Wave Alliance, целью

которого является продвижение использования технологии Z-Wave [4]. При этом все продукты компаний, входящих в альянс, должны быть совместимы. В том же 2005 году технология получила первые инвестиции.

В настоящее время Z-Wave Alliance насчитывает более 700 производителей. Основными членами альянса являются ADT Corporation, Assa Abloy, Jasco, Leedarson, LG Uplus, Nortek Security & Control, Ring, Silicon Labs, SmartThings, Trane Technologies и Vivint.

Взаимодействие Z-Wave на уровне приложений обеспечивает обмен информацией между устройствами и позволяет всем аппаратным и программным средствам Z-Wave работать вместе. Технология беспроводной ячеистой сети (аналогичная с ZigBee) позволяет любому узлу напрямую или косвенно общаться с соседними узлами, управляя любыми дополнительными узлами. Узлы, находящиеся в радиусе действия, общаются друг с другом напрямую. Если они не находятся в радиусе действия, они могут связаться с другим узлом, который расположен в зоне действия обоих узлов, чтобы получить доступ и обмениваться информацией.

Z-Wave разработан для обеспечения надёжной передачи небольших пакетов данных с низкой задержкой на скорости до 100 кбит/с. Пропускная способность составляет 40 кбит/с и подходит для приложений управления и датчиков, в отличие от Wi-Fi и других систем беспроводных локальных сетей на базе IEEE 802.11, которые предназначены в основном для высокой скорости передачи данных. Расстояние связи между двумя узлами составляет около 40 метров.

Z-Wave функционирует в диапазоне частот до 1 ГГц. Этот диапазон конкурирует с некоторыми беспроводными телефонами и другими устройствами бытовой электроники, но позволяет избежать помех в виде Wi-Fi, Bluetooth и других систем, работающих в переполненном диапазоне 2,4 ГГц.

Z-Wave использует архитектуру ячеистой сети с маршрутизацией от источника. Устройства могут связываться друг с другом, используя промежуточные узлы для активной маршрутизации и обхода бытовых препятствий или мертвых зон. Таким образом, сеть Z-Wave может охватывать гораздо большее расстояние, чем радиус действия одного узла. Однако при наличии нескольких таких переходов может возникнуть небольшая задержка между управляющей командой и желаемым результатом.

Простейшая сеть представляет собой одно управляемое устройство и первичный контроллер. Дополнительные устройства могут быть добавлены в любое время, как и вторичные контроллеры, включая приложения для смартфонов и ПК, разработанные для управления и контроля сети Z-Wave. Сеть может включать до 232 устройств, а при необходимости увеличения количества устройств возможно объединение сетей.

Каждой сети Z-Wave назначается идентификатор, а каждое устройство содержит идентификатор узла. Идентификатор сети (Home ID) — это общая идентификация всех узлов, принадлежащих к одной логической сети Z-Wave. Сетевой ID имеет длину 4 байта и присваивается каждому устройству первичным контроллером, когда устройство добавляется в сеть. Узлы с разными сетевыми идентификаторами не могут взаимодействовать друг с другом. Идентификатор узла — это адрес одного узла в сети. Идентификатор узла имеет длину 1 байт и является уникальным в своей сети.

Чип Z-Wave оптимизирован для устройств, работающих от батарей, и большую часть времени находится в режиме энергосбережения, чтобы потреблять меньше энергии, просыпаясь только для выполнения своей функции. В ячеистых сетях Z-Wave каждое устройство в доме распространяет беспроводные сигналы по всему дому, что приводит к низкому энергопотреблению, позволяя устройствам работать годами без необходимости замены батарей. Чтобы устройства Z-Wave могли передавать сторонние сообщения, они не должны быть в спящем режиме. Поэтому устройства, работающие от батарей, не предназначены для использования в качестве ретрансляторов.

1.2.5 Wi-Fi

Построенный на базе стандарта IEEE 802.11, Wi-Fi остаётся самым распространённым и наиболее известным беспроводным протоколом взаимодействия. Его широкое использование в мире IoT в основном ограничено энергопотреблением выше среднего по причине удержания качественного сигнала и быстрой передачи данных для лучшего соединения и надёжности. Несмотря на это Wi-Fi является ключевой технологией в развитии и распространении IoT.

Для создания сети Wi-Fi требуются устройства, способные передавать беспроводные сигналы, то есть такие устройства, как телефоны, компьютеры или маршрутизаторы. В домашних условиях маршрутизатор используется для передачи интернет-соединения из общественной сети в частную домашнюю или офисную сеть. Wi-Fi обеспечивает подключение к Интернету близлежащих устройств, находящихся в определенном радиусе действия. Другой способ использования Wi-Fi — создание точки доступа.

Wi-Fi использует радиоволны, которые передают информацию на определенных частотах. Двумя основными частотами являются 2,4 ГГц и 5 ГГц. Оба частотных диапазона имеют ряд каналов, по которым могут работать различные беспроводные устройства, что помогает распределить нагрузку таким образом, чтобы индивидуальные соединения устройств не прерывались. Это в значительной степени предотвращает переполнение беспроводных се-

тей.

Диапазон в 100 метров является типичным для стандартного Wi-Fi соединения. Однако чаще всего радиус действия ограничивается 10-35 метрами. На эффективное покрытие влияет мощность антенны и частота передачи. Дальность и скорость Wi-Fi подключения к Интернету зависит от окружающей среды и от того, обеспечивает ли оно внутреннее или внешнее покрытие.

Технология Wi-Fi была создана в 1998 году. В 2018 году Wi-Fi Alliance [5] ввёл упрощенную нумерацию поколений Wi-Fi для обозначения оборудования, поддерживающего Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac) и Wi-Fi 6 (802.11ax). Эти поколения имеют высокую степень обратной совместимости с предыдущими версиями. Альянс заявил, что уровень поколения 4, 5 или 6 может быть указан в пользовательском интерфейсе при подключении, наряду с уровнем сигнала.

Поколение	Стандарт IEEE	Частота	Скорость передачи	Год
Wi-Fi 0	802.11	2.4 GHz	2 Mbit/s	1997
Wi-Fi 1	802.11b	2.4 GHz	11 Mbit/s	1999
Wi-Fi 2	802.11a	5 GHz	54 Mbit/s	1999
Wi-Fi 3	802.11g	2.4 GHz	54 Mbit/s	2003
Wi-Fi 4	802.11n	2.4/5 GHz	600 Mbit/s	2008
Wi-Fi 5	802.11ac	5 GHz	6933 Mbit/s	2014
Wi-Fi 6	802.11ax	2.4/5 GHz	9608 Mbit/s	2019
Wi-Fi 6E	802.11ax	6 GHz	9608 Mbit/s	2020

Таблица 1.3: Основные поколения Wi-Fi

Основные поколения Wi-Fi представлены в Таблице ???. Однако для технологии IoT особый интерес представляют только некоторые из этих поколений, а именно:

- IEEE 802.11b/g/n. Эти стандарты отличаются относительно небольшим радиусом действия. Они функционируют в полосе частот 2400—2483,5 МГц. В стандарте IEEE 802.11n, выпущенном в 2008 году, скорость соединения была существенно увеличена. Однако новая скорость может быть достигнута лишь в одном из трёх режимов работы, в котором не поддерживается обратная совместимость со стандартами IEEE 802.11b/g. Данные стандарты являются весьма популярными в устройствах для домашней автоматизации, где не всегда нужны огромные скорости передачи данных или большой радиус покрытия, а существенным параметром является энергоэффективность.

- IEEE 802.11ah. Этот протокол беспроводных сетей был опубликован в 2017 году под названием Wi-Fi HaLow. Он использует освобождённые от лицензий полосы частот 900 МГц для обеспечения сетей Wi-Fi с увеличенной дальностью действия по сравнению с обычными сетями Wi-Fi, работающими в диапазонах 2,4 ГГц и 5 ГГц. Он также отличается более низким энергопотреблением, что позволяет создавать большие группы станций или датчиков, которые взаимодействуют для обмена сигналами, поддерживая концепцию Интернета вещей. Благодаря низкому энергопотреблению протокол конкурирует с Bluetooth и имеет дополнительные преимущества в виде более высокой скорости передачи данных и более широкого радиуса действия.

1.3 Сравнение протоколов

	ZigBee	Z-Wave	Wi-Fi	Bluetooth
Стандарт IEEE	802.15.4	802.15.4	802.11	802.15.1
Скорость передачи	250 Kbit/s	100 Kbit/s	300+ Mbit/s	2 Mbit/s
Энергопотребление	Низкое	Низкое	Высокое	Низкое
Частота	2.4 GHz	908.42 MHz	2.4 GHz/5 GHz	2.4 GHz
Топология сети	Ячеистая	Ячеистая	Звезда	Ячеистая

Таблица 1.4: Сравнение основных протоколов IoT

В Таблице 1.4 приведено сравнение основных характеристик трёх подробно рассмотренных протоколов. Кроме того, для полноты картины в таблицу добавлен Bluetooth 5-го поколения. В сравнение не включена дальность действия: говоря о Wi-Fi, радиус непосредственного взаимодействия между двумя устройствами обычно является большим, однако сети на основе ZigBee и Z-Wave, как указано в таблице, имеют ячеистую топологию, за счёт чего они могут использовать промежуточные устройства для передачи сигнала и увеличения радиуса действия. Что касается энергопотребления, устройства, работающие по Wi-Fi, находясь в активном режиме, способны потреблять в 5 раз больше энергии, чем их аналоги, использующие ZigBee или Z-Wave.

Говоря о технических характеристиках, отличие ZigBee от Z-Wave невелико: Z-Wave выделяется только используемой частотой. Но кроме этого существует разница в распространении устройств на основе обоих протоколов. Z-Wave получил более широкое распространение в США, в то время как ZigBee больше популярен в Европе. Существует ещё одно небольшое отличие, которое заключается в частотных диапазонах. В Северной Америке, Европе, и ряде других стран под Z-Wave и другие протоколы отводятся разные

диапазоны частот. Однако в большинстве случаев это не оказывает большого влияния, поскольку вне зависимости от используемой частоты схожие устройства, как правило, обладают одинаковым функционалом.

Немаловажным фактором в сравнении является стоимость конечных устройств. В данном случае она может заметно варьироваться. Говоря, например, о домашней автоматизации, стоимость устройств, поддерживающих Wi-Fi, оказывается выше. Более дешёвая цена устройств на основе ZigBee и Z-Wave достигается за счёт специализированных модулей и чипов.

Но кроме цены комплектующих влияние на стоимость оказывает способ управления конечными устройствами. Гаджеты на основе Wi-Fi могут управляться с любого смартфона, в то время как для управления ZigBee и Z-Wave сетями в подавляющем большинстве случаев требуется некоторое промежуточное устройство: хаб. Хаб позволяет преобразовывать сигналы от устройств в тот же самый Wi-Fi, добавляя возможность управления практически с любого устройства. Хаб имеет дополнительную стоимость. Устройства, совместимые с Wi-Fi, являются более дорогими, поскольку дают возможность обходиться без него.

Наконец, стоит отметить, что для каждого протокола со временем появляется всё больше производителей. В связи с этим встаёт вопрос совместимости между устройствами различных производителей. Не редки случаи, когда несколько устройств не имеют возможности взаимодействия, несмотря на то, что они работают на одном протоколе. При совместном использовании устройств, работающих на различных протоколах, вероятность возникновения проблем совместимости возрастает.

Глава 2

Безопасность сетевых протоколов IoT

2.1 ZigBee

Безопасность работы ZigBee базируется в первую очередь на стандарте IEEE 802.15.4, который реализует протокол. Сам стандарт опирается на правильное управление симметричными ключами и корректную реализацию методов и политик безопасности. Кроме того, модель сети ZigBee уделяет особое внимание соображениям безопасности по причине формирования структуры сети «на лету» (ad-hoc сети), поскольку такие сети могут быть физически доступны для внешних устройств.

В силу своей дешевизны протокол предполагает открытую модель, в которой сетевые уровни доверяют друг друга. Следовательно, криптографическая защита существует только между устройствами, но не между уровнями одного устройства. Этот факт позволяет переиспользовать ключи на разных уровнях.

Среди других допущений предполагается надёжное хранение симметричных ключей шифрования. Ключи не должны быть доступны вне устройства в незашифрованном виде. Исключение в некоторых случаях составляет конфигурация нового устройства в сети, о чём речь будет идти далее. Из-за дешёвой природы устройств политика безопасности ZigBee не предполагает защиту от физических атак на аппаратное обеспечение. Это означает, что, имея физический доступ к устройству, злоумышленник будет иметь теоретическую возможность извлечь из него ключи безопасности. Наконец, предполагается, что производители устройств будут полностью следовать спецификации, а в устройствах будет присутствовать криптостойкий генератор случайных чисел. Очевидно, что на практике не всегда соблюдаются все из пе-

речисленных выше допущений.

Рассмотрим типы ключей безопасности протокола ZigBee. Напомним, что спецификация протокола описывает только сетевой и прикладной уровни, а более низкие физический и MAC уровни определены в стандарте IEEE 802.15.4. На сетевом уровне используется следующий ключ:

- Сетевой ключ (network key). Это ключ шифрования сообщений между всеми устройствами сети (широковещательных сообщений). Генерируется ТС (Trust Center, доверительным центром), в роли которого выступает координатор, случайным образом. Распределяется между всеми подключающимися к сети устройствами и зашифровывается с помощью pre-configured link key (о нём речь пойдёт ниже).

Прикладной уровень располагает бóльшим набором ключей:

- Предустановленный глобальный ключ соединения (pre-configured global link key). Используется для шифрования сетевого ключа в момент его передачи от ТС. Данный ключ используется в версии протокола ZigBee 1.0 и является одинаковым для всех узлов в сети. Он может быть предустановлен либо ZigBee, либо производителем устройств. Ключ, предустановленный ZigBee (ZigbeeAlliance09), позволяет устройствам от различных производителей подключаться к одной сети. Он известен заранее всем участникам:

5A 69 67 42 65 65 41 6C 6C 69 61 6E 63 65 30 39

Ключ, установленный непосредственно производителем, позволяет объединяться в сеть только устройствам от этого производителя. Предустановлен во все устройства, только если не используется pre-configured unique link key.

- Предустановленный уникальный ключ соединения (pre-configured unique link key). В версии ZigBee 3.0 вместо pre-configured global link key для передачи сетевого ключа от ТС может быть использован pre-configured unique link key. Данный ключ уникален для каждой пары ТС-узел. Один из возможных сценариев использования следующий. Ключ располагается на устройстве в виде QR-кода. При подключении устройства в сеть пользователь считывает QR-код с помощью смартфона, а от смартфона ключ попадает в хаб (координатор). После этого хаб высылает устройству network key, зашифрованный на только что полученном ключе, для дальнейшей коммуникации.

- Ключ соединения доверительного центра (Trust Center Link Key, TCLK). Используется между ТС и определённым узлом. Извлекается из pre-configured unique link key, передаётся от ТС к узлу, шифруется с помощью network key и pre-configured unique link key. Предназначен для шифрования всех последующих сообщений между ТС и узлом, заменяя pre-configured unique link key (однако узел продолжает хранить pre-configured unique link key для возможного повторного соединения в дальнейшем). Не является обязательным для использования ключом в сеансе.
- Ключ соединения приложения (Application Link Key). Используется между парой узлов (без ТС). Запрашивается у ТС одним из узлов, генерируется ТС случайным образом. Шифруется с помощью network key и pre-configured unique link key. Может возникнуть вопрос, зачем для коммуникации двух устройств нужен отдельный ключ, когда уже есть network key. Network key известен всем устройствам в сети, поэтому любое устройство сможет расшифровать сообщение. Если нужна защищённая коммуникация для двух отдельных устройств, ТС выпускает данный ключ. Не является обязательным для использования ключом в сеансе.

ZigBee использует симметричное шифрование AES с длиной ключа 128 бит для реализации своих механизмов безопасности. Контроль целостности осуществляется за счёт имитовставки, которая в стандарте носит название MIC (Message Integrity Code) в целях избежания путаницы с названием уровня MAC.

2.2 Z-Wave

До 2008 года в спецификации Z-Wave не было никаких упоминаний о способах защиты каналов связи. Таким образом, все устройства Z-Wave коммуницировали открыто. Это означало, что любая сеть Z-Wave была доступна извне и взламывать её было не нужно. В 2008 в спецификацию было добавлено понятие шифрования (Z-Wave S0 Security), а в качестве алгоритма шифрования был выбран AES с длиной ключа 128 бит. Это изменение было призвано решить проблему распространения устройств Z-Wave. Однако разработчики не учли мелких деталей на этапе подключения новых устройств.

В 2013 году в спецификации Z-Wave S0 Security была обнаружена уязвимость. В момент первичной инициализации соединения перед началом сеанса передачи данных устройству отправляется ключ шифрования. На тот момент

этот ключ представлял собой последовательность из 128 нулевых бит. Таким образом, злоумышленник мог легко подслушать первичный сеанс связи, ключ которого был заранее известен. Далее не составляло труда отследить последующие изменения ключей шифрования. В результате практически каждая Z-Wave сеть оказалась уязвимой.

После этой истории репутация Z-Wave была существенно испорчена. Для решения проблемы в 2016 году появилась улучшенная версии спецификации Z-Wave S2 Security. В ней для первичной выработки ключей используется протокол Диффи-Хеллмана. Однако более детальная информация о конкретном его варианте (на основе эллиптических кривых или конечных полей) и уровне стойкости, а также сроке жизни ключей шифрования в спецификации не раскрывается.

2.3 Wi-Fi

Основными протоколами защиты информации в сетях Wi-Fi являются WEP, WPA, WPA2 и WPA3.

Протокол WEP (Wired Equivalent Privacy) был разработан в 1997 году вместе с первой версией Wi-Fi. Для шифрования использовался алгоритм RC4 со статическим ключом длиной 64 или 128 бит. Некоторое время протокол успешно функционировал и был способен противостоять базовым атакам типа «человек посередине». Недостатки заключались в слабости самого шифра RC4, а также малой длине ключа. Wi-Fi Alliance отказался от использования WEP в 2004 году, официально объявив этот протокол небезопасным.

В 2003 году на замену WEP пришёл протокол WPA (Wi-Fi Protected Access). WPA использует протокол целостности временного ключа (TKIP) с всё той же длиной ключа 64 или 128 бит [6]. Для шифрования использовался тот же самый алгоритм RC4, но синхропосылка была увеличена вдвое: с 24 до 48 бит. TKIP с помощью уникального базового ключа для сеанса связи динамически генерирует новый 128-битный ключ для каждого пакета и таким образом предотвращает типы атак, которые скомпрометировали WEP. Несмотря на все улучшения протокол WPA позиционировался как временная мера для замены уязвимого протокола WEP.

Полноценной же заменой стал протокол WPA2, который появился в использовании с 2004 года. С этого же года началась сертификация, а с 2006 по 2020 год сертификация WPA2 была обязательной для всех новых устройств с торговой маркой Wi-Fi. В качестве замены TKIP был внедрён протокол блочного шифрования с имитовставкой и режимом сцепления блоков и счётчика: CCMP. TKIP использовался только для обратной совместимости. CCMP ос-

нован на алгоритме шифрования AES с длиной ключа 128 бит. Одним из преимуществ по сравнению со старыми версиями является генерация ключей шифрования во время соединения.

В январе 2018 года Wi-Fi Alliance объявил WPA3 в качестве замены WPA2. Сертификация началась в июне 2018 года. Самое крупное изменение связано с новым методом аутентификации. SAE (Simultaneous Authentication of Equals) явился заменой PSK (Pre-Shared Key), который использовал 4-этапное установление связи в протоколе WPA2. SAE работает на основе предположения о равноправности устройств, вместо того, чтобы считать одно устройство отправляющим запросы, а второе — предоставляющим право на подключение. Кроме того, SAE обеспечивает защиту от «чтения назад». 128-битное шифрование осталось минимально допустимой нормой, а для промышленных масштабов предложен вариант использования AES с длиной ключа 256 бит в режиме GCM с SHA-384 в качестве HMAC для контроля целостности информации. С выходом WPA3 появились две новые сопутствующие технологии: Easy Connect и Enhanced Open. Первая позволяет сделать процесс добавления новых устройств в сеть более простым и является весьма актуальной для домашней автоматизации. Отныне у каждого устройства будет уникальный QR-код, который сможет работать в качестве открытого ключа. Для добавления устройства необходимо будет просканировать код при помощи смартфона, который уже находится в сети. После сканирования между устройством и сетью произойдёт обмен ключами аутентификации для установления последующего соединения. Вторая технология усиливает защиту пользователей в открытых сетях, где по умолчанию нет защиты с аутентификацией. Данные технологии не зависят напрямую от WPA3, но улучшают безопасность для определённых типов сетей. Таким образом, вместо полной переработки безопасности Wi-Fi, WPA3 концентрируется на новых технологиях, которые позволят устранить уязвимости, обнаруженные в WPA2.

2.4 Сравнение безопасности

Схожие в техническом плане ZigBee и Z-Wave, с точки зрения безопасности также не имеют существенных различий: оба протокола используют симметричный алгоритм блочного шифрования AES с длиной ключа 128 бит. Единственным отличием является метод распределения ключей: в Z-Wave используется протокол Диффи-Хеллмана, в то время как в ZigBee этот процесс по-прежнему доверен центру управления безопасностью.

В сетях на основе Wi-Fi безопасности уделяется значительно больше внимания в силу их повсеместного распространения. В контексте домашней авто-

матизации и некоторых других сфер, в которых Wi-Fi конкурирует с ZigBee и Z-Wave, отличия всё также незначительны. Для шифрования используются дополнительные надстройки и протоколы, но в основе лежит AES-128. В случае промышленного использования для Wi-Fi применяются более продвинутое технологии защиты информации.

Глава 3

Криптографические угрозы и атаки

3.1 ZigBee

Несколько вариантов атак на протокол ZigBee детально описаны в [7]. Среди прочих атак интерес вызывает так называемая атака повторной отправки сообщения, при которой в случае отсутствия в сети удостоверяющего центра или использования статического ключа шифрования злоумышленнику удаётся получить управления над конечными устройствами. Стоит отметить, что при правильной конфигурации сети устройства на основе ZigBee не подвержены атакам, направленным на этап присоединения нового устройства в сеть. Поскольку во всех трёх решениях (ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi) в том или ином виде используется алгоритм AES, шифрование данных оказывается весьма надёжным. И именно этап установки соединения является наиболее уязвимым. В отличие от ZigBee, подобным атакам оказываются подвержены два других решения, о чём пойдёт речь ниже.

3.2 Z-Wave

Многие устройства домашней автоматизации напрямую влияют на нашу безопасность. К таким устройствам можно отнести, например, автоматизированные дверные замки. В случае их компрометации последствия могут оказаться весьма неудачными. И такой случай имел место. В зашифрованных алгоритмом AES дверных замках на основе протокола Z-Wave была обнаружена ранняя уязвимость. Используя её, злоумышленник получал возможность удалённо отпираться двери без знания ключей шифрования. А после изменения ключей последующие сетевые сообщения, например, «дверь от-

крыта», игнорировались установленным контроллером сети. Уязвимость не была связана с недостатком в спецификации Z-Wave, а являлась ошибкой в реализации, допущенной производителем дверного замка.

Безопасность протокола Z-Wave была улучшена в 2016 году с появлением спецификации Z-Wave S2 Security. Однако из-за обратной совместимости с предыдущей версией спецификации S0 устройства оказались по-прежнему уязвимы в процессе подключения. В Z-Wave S0 Security использовался статический первичный ключ, состоящий из 128 нулевых бит, из-за чего дальнейший взлом и управление устройствами оказывались весьма тривиальными. В качестве улучшения в S2 для первичной выработки ключей используется протокол Диффи-Хеллмана, а также дополнительно может потребоваться ввод 5-символьного кода устройства. Но в 2018 году была обнародована атака, которая позволяла понижать версию спецификации с S2 до S0 и эксплуатировать старые уязвимости.

Рассмотрим более подробно процесс понижения версии. Первые шаги при сопряжении устройства и контроллера в спецификациях S0 и S2 аналогичны и заключаются в следующем:

1. На контроллере (управляющем устройстве) необходимо выбрать режим добавления нового устройства.
2. Далее пользователь нажимает кнопку (или последовательность кнопок) на присоединяемом устройстве.
3. После этого новое устройство посылает в сеть информацию о себе (Node info).
4. Контроллер получает эту информацию и приступает к процессу выработки ключей.

Единственным отличием в полезной нагрузке Node info для устройств на основе S2 Security является поддержка класса команды 0x9F – COMMAND_CLASS_SECURITY_2. Стоит отметить, что вся информация в Node info является незашифрованной. Таким образом, активный атакующий может убрать соответствующую команду из Node info и отправить подделанные данные контроллеру. Контроллер посчитает, что устройство не поддерживает спецификацию S2 Security, и будет выбрана уязвимая к атакам спецификация S0. Справедливо заметить, что в этом случае контроллер должен выдать предупреждение пользователю об использовании более ранней версии, однако данное предупреждение, как правило, игнорируется. Подделанный Node info должен содержать тот же Home ID, что и у оригинального устройства. Поле

Home ID не является константным, а генерируется каждый раз при добавлении или перезагрузке устройства. Это значит, что злоумышленник сперва должен завладеть Home ID. Эта задача выполнима и требует лишь пересчитывания длины сообщения и контрольной суммы после удаления команды о поддержке S2.

Резюмируя, можно сказать, что данная атака подчёркивает проблему множества протоколов, а именно проблему улучшения безопасности при необходимости поддержания старых устройств. Стоит отметить, что уже подключённые в сеть с использованием S2 Security и успешно функционирующие устройства находятся в относительной безопасности, однако новые устройства остаются подверженными уязвимости.

3.3 Wi-Fi

WPA2 являлся основным стандартом шифрования для Wi-Fi на протяжении 14 лет: с 2004 по 2018 год. Однако в 2016 году на WPA2 была разработана атака с переустановкой ключа (Key Reinstallation Attack, Krack). Krack — это атака повторного воспроизведения [8]. Многократно сбрасывая одноразовый код, передаваемый на третьем этапе установки соединения WPA2, злоумышленник может постепенно сопоставить зашифрованные пакеты, сохранённые ранее, и узнать ключ шифрования. Уязвимость проявляется в самом стандарте Wi-Fi и не связана с ошибками реализации. В связи с этим любая корректная реализация WPA2 вероятнее всего является уязвимой. Уязвимость затрагивает основные программные платформы.

При подключении нового клиента к сети Wi-Fi с защитой по WPA2 общий ключ шифрования согласуется за 4 этапа. Данный ключ служит для шифрования всех пакетов данных. Однако, из-за потери отдельных сообщений точка доступа (роутер) может повторно отправлять сообщения третьего этапа до получения подтверждения о его получении. Каждый раз при получении подобного сообщения клиент устанавливает уже имеющийся ключ шифрования. На практике злоумышленник заставляет жертву выполнить переустановку ключа.

Благодаря повторному использованию ключа шифрования появляется возможность воспроизведение пакетов, расшифрования и подделки содержания. При определённых условиях злоумышленник способен осуществлять атаки типа «человек посередине».

С появлением стандарта WPA3 данная уязвимость была устранена благодаря введению SAE (Simultaneous Authentication of Equals).

Заключение

Интернет вещей всё глубже проникает в жизнь конечного потребителя, набирая всё большую популярность. В связи с этим вопросы обеспечения безопасности конечных устройств и криптографической защиты данных пользователей остаются открытыми и актуальными.

В первой главе текущего исследования были описаны ключевые технологии, применимые в IoT. Основными технологическими уровнями являются программное и аппаратное обеспечение, уровень коммуникации между устройства и платформа, которая их объединяет. Среди большого разнообразия используемых протоколов были выбраны три основных решения: ZigBee, Z-Wave, Wi-Fi — и проведён сравнительный анализ их технических характеристик.

Вторая глава продолжает описание и сравнение выбранных протоколов уже с точки зрения безопасности. Были рассмотрены алгоритмы выработки и распределения ключей, шифрования и контроля целостности данных, используемые в протоколах.

Третья часть рассказывает об угрозах, свойственных сетям на основе ZigBee, Z-Wave и Wi-Fi, а также содержит описание успешно проведённых атак, с целью выявления уязвимостей и дальнейшего их устранения.

В качестве направлений для дальнейшего исследования можно выделить следующие:

- Построить матрицу угроз, которая отображает потенциальную уязвимость IoT протоколов к определённым типам криптографических атак;
- Исходя из результатов сравнительного анализа свойств IoT протоколов и их стойкости к криптографическим атакам выбрать один из протоколов для дальнейшей модификации;
- Обратить внимание на концепцию легковесной криптографии; предложить облегчённую модификацию sponge-функции из белорусского криптографического стандарта СТБ 34.101.77 (bash);

- Для выбранного протокола разработать модификацию, использующую исключительно модифицированные белорусские криптографические алгоритмы; провести оценку предложенного уровня стойкости;
- Реализовать прототип, демонстрирующий работу выбранного протокола с модификациями;
- Продемонстрировать стойкость разработанного протокола к классическим атакам на IoT решения.

Литература

- [1] List of ZigBee certified products. -Mode of access:
https://zigbeealliance.org/product_type/certified_product/. -Date of access:
13.12.2021.
- [2] ZigBee Alliance. -Mode of access:
<https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>. -Date of access: 13.12.2021.
- [3] List of Z-Wave certified products. -Mode of access:
<https://products.z-wavealliance.org>. -Date of access: 13.12.2021.
- [4] Z-Wave Alliance. -Mode of access:
<https://z-wavealliance.org/>. -Date of access: 13.12.2021.
- [5] Wi-Fi Alliance. -Mode of access:
<https://www.wi-fi.org/>. -Date of access: 13.12.2021.
- [6] IEEE 802.11i, IEEE Computer Society, 2004.
- [7] Ján Ďurech, Mária Franeková: Security attacks to ZigBee technology and their practical realization. SAMI, Herľany, Slovakia, 2014.
- [8] Common Vulnerabilities and Exposures: WPA2 reinstallation key. -Mode of access: <https://cve.mitre.org/cgi-bin/cvename.cgi?name=CVE-2017-13077>. -Date of access: 13.12.2021.