

# НА ПУТИ К УЛЬТРАНИЗКИМ ЗАДЕРЖКАМ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В СЕТЯХ LORAWAN

## ON THE WAY TO ULTRA-LOW LATENCY AND ENERGY EFFICIENCY IN LORAWAN NETWORKS

**M. Mutanna  
Y. Lyachek  
T. Nasr**

*Summary.* LoRaWAN is one of the most promising standards for IoT technology. However, the expected number of huge traffic and applications run over the IoT system puts high constraints on the system design. To this end, this paper proposes a reliable LoRaWAN system for ultra-dense IoT networks. The system employs to recent technologies to enable the ultra-low latency applications besides managing massive traffic results from the expected deployed devices. The first system deploys mobile edge computing to provide the computing and energy resources at the edge of the access network, while the second part deploys the software defined networking (SDN) at the core network to manage and control the whole network traffic. The novelty of the proposed system comes from the deploying of a distributed version of the SDN controller at the edge servers, to reduce the load on the core network. The system is simulated for various simulation scenarios and the results validate the proposed structure for ultra-dense and ultra-low latency IoT networks.

*Keywords:* LoRaWAN, MEC, SDN, Latency, Dense deployment.

**Мутанна Мохаммед Салех Али**

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)  
muthanna@mail.ru

**Лячек Юлий Теодосович**

К.т.н., доцент, Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ytlyachek@mail.ru

**Наср Тарек Мохаммед Абдулджаббар**

Аспирант, Санкт-Петербургский Национальный  
исследовательский университет информационных  
технологий, механики и оптики (Университет ИТМО)  
tarek01021988@mail.ru

*Аннотация.* LoRaWAN представляет многообещающую технологию Интернета вещей (IoT), которая недавно завоевала высокий рыночный и академический интерес. С текущим прогрессом в сенсорном производстве количество подключенных устройств резко увеличивается, и возникает высокая потребность в надежной сети IoT, способной обеспечить покрытие для такого количества устройств. В этой статье предложена надежная архитектура LoRaWAN для сверхплотных сетей IoT. Предлагается, чтобы мобильные пограничные вычисления предоставляют вычислительные и энергетические ресурсы на границе сети LoRa доступа, в то время как программно-определяемая сеть (SDN) развернута в базовой сети для управления и контроля всего сетевого трафика. Новизна предлагаемой системы заключается в развертывании распределенной версии контроллера SDN на пограничных серверах для снижения нагрузки на базовую сеть. Система рассматривается в различных сценариях моделирования, и результаты подтверждают эффективность предложенной архитектуры для сетей IoT со сверхплотной и сверхнизкой задержкой.

*Ключевые слова:* LoRaWAN, MEC, SDN, Задержка, Плотное развертывание.

## Введение

**LPWAN** сети являются одними из наиболее развитых, и имеющих наибольшее число имплементаций, сетей Интернета вещей (IoT), которые привлекли как рыночный, так и академический секторы [1]. Они обеспечивают много преимуществ по сравнению с другими парадигмами IoT, которые реализуют энергоэффективность и широкий диапазон охвата [2]. LoRa является одной из наиболее эффективных технологий, которые были использованы для LPWAN [3]. В последнее время LoRaWAN широко используется в качестве эффективной сети IoT, которая может быть развернута для многих приложений Интернета вещей, подходящей для большинства развертываемых сред. Тем не менее,

есть много проблем дизайна и проблем, связанных с протоколом LoRaWAN, которые еще не были решены [4]. Одной из основных проблем является плотное развертывание сенсорных устройств [5]. К 2020 году ожидается, что количество подключенных устройств будет составлять миллиарды, что требует надежной системы, обеспечивающей покрытие для таких сверхплотных сетей [6]. Таким образом, LoRaWAN должна быть адаптирована для работы сверхплотных сетей с обеспечением требуемых характеристик. Огромное количество подключенных к сети устройств приводит к огромному количеству трафика, который влияет на работу всей сети [7]. Другой проблемой является сквозная задержка, связанная с приложениями, которые работают в сетях LoRaWAN [6].

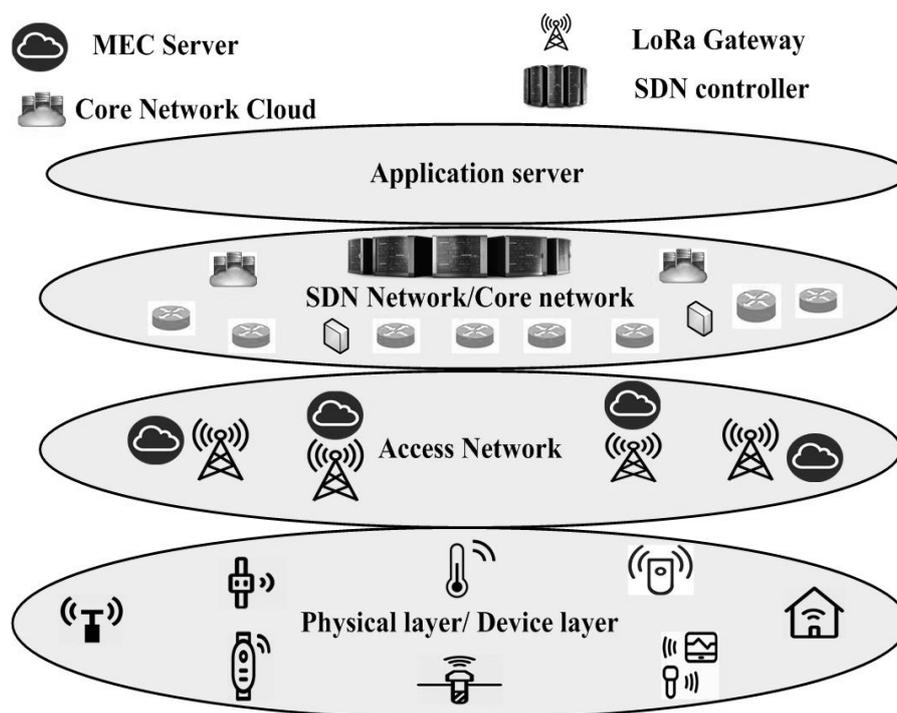


Рис. 1. Предлагаемая архитектура сети LoRaWAN с использованием MEC / SDN.

Для преодоления этих проблем и, кроме того, для достижения других важных требований, таких как надежность, масштабируемость и доступность системы, в LoRaWAN следует применять новые парадигмы связи, такие как мобильные периферийные вычисления (MEC) и программно-определяемые сети (SDN) [9]. MEC — это новая коммуникационная парадигма, впервые введенная Европейским институтом стандартов электросвязи (ETSI) в 2014 году для разрушения централизации облачных вычислений и перехода от централизованных огромных центров обработки данных к распределенным небольшим пограничным серверам [10]. MEC перемещает вычислительные и энергетические ресурсы от удаленных облачных устройств к границе сети доступа; примерно на один или два шага (hop) от конечного устройства, то есть устройства IoT. MEC был впервые представлен для использования в сотовых сетях, однако MEC можно использовать для сетей IoT интеграции сетей IoT с сотовыми сетями. MEC также может использоваться для подключения разнородных технологий IoT и обмена данными между ними. Например, связав сеть NB-IoT с сетью LoRaWAN с помощью технологии MEC [11].

SDN — это еще одна коммуникационная парадигма, которая не так давно нашла применение в современных сетях связи. Она представляет собой способ отделения плоскости данных от плоскости управления, что открывает новую эру сетей софтверизации [12]. Плоскость управления представляет собой шину устройств, кото-

рая контролирует и управляет всей сетью. Единственный централизованный контроллер SDN или распределенные контроллеры SDN могут использоваться для плоскости управления. Распределенные коммутаторы OpenFlow, которые поддерживают интерфейс протокола OpenFlow, развернуты на уровне плоскости данных [9]. Внедрение технологии SDN для IoT и любых других сетей связи обеспечивает высокую гибкость и надежность сети [13].

Основной целью этой работы является создание архитектуры LoRaWAN для поддержки ожидаемого плотного развертывания устройства IoT. Это может быть достигнуто путем внедрения технологий MEC и SDN в LoRaWAN. Работа имеет следующую структуру: в разделе 2 представлены предлагаемая схема сети LoRaWAN MEC/SDN и входящие в нее методы. Раздел 3 содержит оценку эффективности предлагаемой системы и методов. В разделе 4 будет сделан общий вывод.

### 1 Система LoRaWAN на базе MEC/SDN

В этом разделе представлена предлагаемая архитектура сети LoRaWAN на основе MEC/SDN, которая визуализирована на Рис. 1. Две ранее описанные технологии внедрены в традиционную сеть LoRaWAN; MEC и SDN. Предложенную сеть LoRaWAN можно рассматривать как четыре слоя.

Первый уровень — это сеть доступа, которая представлена конечными устройствами.

Второй уровень — включает в себя серверы MEC и шлюзы LoRaWAN. Как показано на Рис. 1, серверы MEC развернуты на границе сети доступа. Каждый шлюз LoRaWAN подключен к пограничному облачному серверу через высокоскоростную оптоволоконную сеть. Внедрение серверов MEC на границе сети доступа на расстоянии одного шага (hop) от конечных устройств обеспечивает вычислительные и энергетические ресурсы для конечных пользователей.

Третий уровень — это базовая сеть, в которой используется технология SDN. Эта базовая сеть построена на основе предложенной нами интеллектуальной базовой сети для приложений со сверхнизкой задержкой, разработанной в [9]. Единый централизованный контроллер SDN расположен в базовой сети, что позволяет контролировать и управлять распределенными коммутаторами OpenFlow и пограничными облачными серверами. Этот контроллер представляет плоскость управления сети SDN, в то время как распределенные коммутаторы OpenFlow образуют плоскость данных. Взаимодействие и связь между плоскостью данных и плоскостью управления поддерживаются через соответствующий интерфейс связи, например, протокол OpenFlow. Кроме того, предполагается, что развернутые коммутаторы OpenFlow имеют ограниченные вычислительные ресурсы, так что коммутаторы могут выполнять некоторые операции обработки пакетов [14].

Распределенные и менее производительные версии контроллера SDN устанавливаются на пограничных серверах. Сервер MEC развертывает контроллер, который взаимодействует с контроллером SDN, развернутым в базовой сети. ВМ главного контроллера, расположенная на сервере MEC, перемещает операции управления к границе сети доступа и, следовательно, снижает нагрузку на базовую сеть и уменьшает задержку ответа конечному устройству.

Четвертый уровень — предназначен для развертывания приложений. Он также включает в себя сервера с базами данных для различных приложений.

Одной из основных особенностей предлагаемой системы является разгрузка вычислений и перенос вычислений с конечных устройств. Это преимущество добавляется введением системы MEC в LoRaWAN. Свойство разгрузки вычислений позволяет устройствам IoT дольше работать, поскольку конечные устройства всегда работают от батареи с ограниченными вычислительными ресурсами. Процесс разгрузки позволяет конечным

устройствам передавать свои вычислительные задачи на соседний сервер MEC и, таким образом, снижает энергопотребление конечных устройств и продлевает срок службы устройств. Кроме того, разгрузка вычислительных задач на ближайший сервер MEC, сокращает время прохождения сигнала в обоих направлениях и, таким образом, позволяет создавать приложения с ультранизкой задержкой в сетях LoRaWAN. В [15] мы разработали алгоритм разгрузки с учетом энергопотребления и задержек, который эффективно использовать в предлагаемой сети LoRaWAN на основе MEC. Предложенная схема решает процесс разгрузки через механизм принятия решений, который реализует непосредственно алгоритм разгрузки. Предполагается, что каждое конечное устройство, т.е. устройство IoT, имеет этот механизм принятия решений, также, как и каждый сервер MEC. Основываясь на текущем уровне энергии и задержке, необходимой для обеспечения требуемого качества обслуживания (QoS), механизм принятия решения решает, выполнять ли разгрузку или производить обработку локально.

Другая ключевая особенность — это процесс контроля границы. Каждый сервер MEC развертывает контроллер SDN, который содержит упрощенную версию контроллера базовой сети и имеет прямое соединение с главным контроллером SDN, развернутым в ядре сети. Это свойство дает различные преимущества для LoRaWAN, особенно в сверхплотных сетях. Преимущества включают в себя снижение трафика и коммуникационной нагрузки в базовой сети и увеличение общей пропускной способности сети. Кроме того, введение схемы управления на границе сети доступа уменьшает задержку связи и, таким образом, позволяет существовать приложениям со сверхнизкой задержкой в сетях LoRaWAN.

Кроме того, внедрение распределенных серверов MEC на границе сети доступа позволяет реализовать алгоритмы искусственного интеллекта. Это обеспечивает поддержку высокой степени сжатия данных и уменьшает итоговый объем трафика, а также снижает общую задержку связи. Предложенная система с методами разгрузки, представленными в [15], обеспечивает следующее:

1. Эффективное использование полосы пропускания,
2. Возможность внедрения новых сервисов и услуг,
3. Уменьшение сквозной задержки,
4. Эффективное управление трафиком,
5. Снижение вероятности блокировки,
6. Увеличение энергоэффективности,
7. Сверхвысокую надёжность,
8. Высокую масштабируемость сети,
9. Высокую доступность, и
10. Высокую гибкость.

Таблица 1. Параметры симуляции

Параметр	Значение
Количество конечных устройств	200 / 400 /600
Время симуляции	3000 с
Задержка на один сетевой шаг (hop) к пограничному серверу/сети доступа/ LoRaWAN	1мс
Задержка для базовой сети	2мс
Размер одного пакета	32 Байт
Поток данных	3 пакета
Полоса частот базовой станции	868 МГц
Размер памяти конечного устройства/RAM [IoT]	512Мб
Частота процессора конечного устройства/CPU	[0.1,0.2] ГГц
Размер памяти сервера (MEC)/RAM	2048Мб
Размер диска сервера (MEC)/HDD	5Гб
Частота процессора (MEC)/CPU	[0.5,2.5] ГГц
SDN контроллер	Спецификация ODL
SDN коммутаторы	OpenFlow со спецификациями, представленными в [14]

## 2 Оценка эффективности

### 2.1 Обзор

В этом разделе предложенная система со схемой разгрузки, представленной в [15], моделируется в надежной среде для оценки производительности и валидации системы. В первой части описана настройка моделирования, а во второй части представлены результаты моделирования и анализ.

### 2.2 Настройка симуляции

Симулятор на основе событий, представленный в [15] и [16], используется для построения и моделирования предлагаемой системы и схемы разгрузки. Представленная на Рис. 1 система построена с распределенными оконечными устройствами. Шлюз LoRa, подключен к серверу MEC. Параметры моделирования, используемые для оценки производительности предлагаемой системы, представлены в Таблице 1. Конечные устройства генерируют трафик на основе экспоненциального распределения.

Для оценки производительности рассматриваются два основных сценария моделирования. Первый сценарий вводится для оценки эффективности системы для работы в сверхплотной сети и масштабируемости предлагаемой системы. Для этого сценария показатели, используемые для оценки предлагаемой производительности системы и возможности масштабирования, представляют собой надежность системы и среднюю задержку. Второй сценарий представлен для оценки производительности процесса разгрузки и эффективности использования ресурсов. Для обоих сценариев рассма-

триваются три случая моделирования, в каждом случае сеть работает с определенным количеством конечных устройств. В случае (1) сеть работает с 200 устройствами IoT, во втором случае число развернутых устройств IoT удваивается, а в случае (3) число конечных устройств увеличивается до 600.

### 2.3 Результаты симуляции

На рисунках 2, 3 и 4 представлены результаты для первого сценария моделирования. Рисунок 2 иллюстрирует среднее количество принятых пакетов для каждого рассматриваемого случая. Значение принятого пакета записывается для двух систем; предлагаемая система и традиционная LoRaWAN сеть без внедрения MEC и SDN. Результаты показывают, что предлагаемая система MEC/SDNLoRaWAN достигает более высокой эффективности с точки зрения принятых пакетов для трех рассмотренных случаев моделирования. Однако для случая (3), который представляет собой плотное развертывание, так как количество развернутых устройств увеличивается, предлагаемая система достигает процентного улучшения производительности относительно традиционной сети, более высокого, чем в предыдущих двух случаях. Это указывает на то, что традиционная система LoRaWAN уступает в работе с большим количеством устройств по сравнению с предлагаемой системой MEC/SDN. Поскольку надежность может быть измерена количеством принятых пакетов, то предлагаемая система достигает более высокой надежности.

На Рис. 3 показана средняя задержка принятого трафика для рассматриваемых приложений IoT, для обеих рассматриваемых систем. Результаты показывают, что

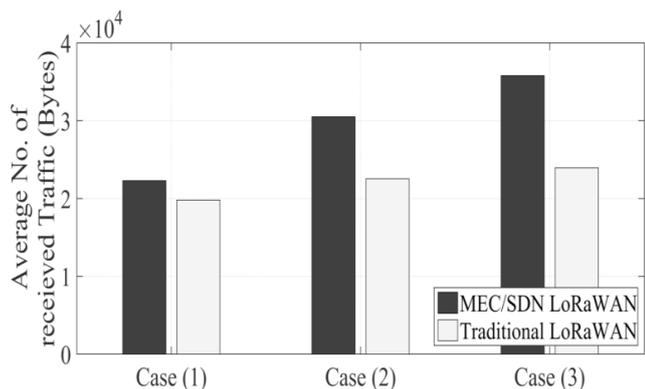


Рис. 2. Среднее количество полученных пакетов для первого сценария моделирования.

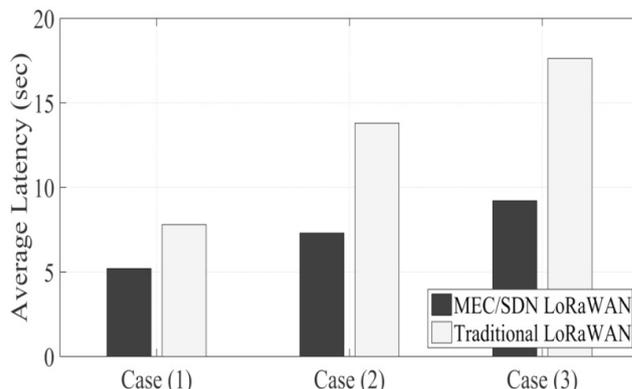


Рис. 3. Средняя задержка для первого сценария моделирования.

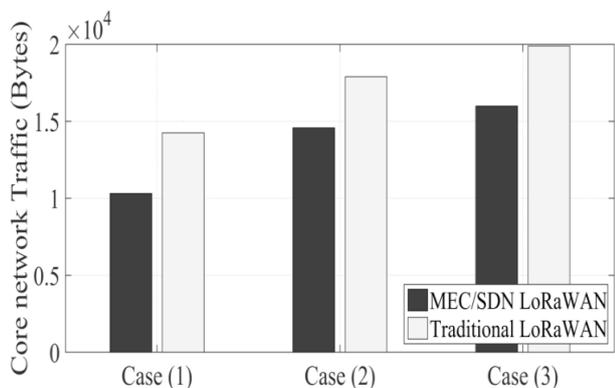


Рис. 4. Количество трафика, передаваемого в базовую сеть, для первого сценария моделирования.

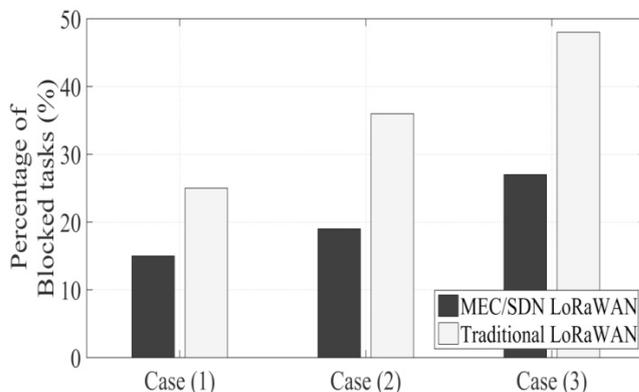


Рис. 5. Процент заблокированных задач для второго сценария моделирования.

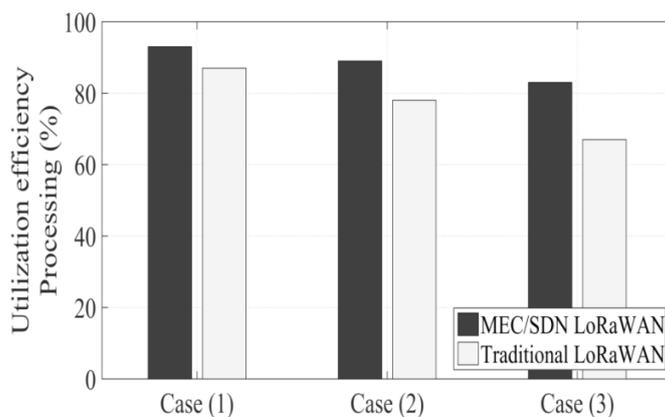


Рис. 6. Эффективность использования ресурсов, с точки зрения обработки, для второго сценария моделирования.

предлагаемый MEC/SDN достигает более высокой эффективности задержки, чем традиционная система LoRaWAN.

Кроме того, на рисунке 4 показан объем трафика, передаваемого в базовую сеть для двух рассматриваемых систем в трех рассмотренных случаях. Результаты показывают, что предлагаемая система снижает нагрузку на базовую сеть, поскольку объем трафика, передаваемого в базовую сеть, уменьшается на заметную величину.

На рисунках 5 и 6 показаны результаты для второго сценария. Как показано на рисунке 5, процент заблокированных задач уменьшается в предлагаемой системе MEC/SDN, в основном за счёт использования алгоритма разгрузки. Это может быть объяснено введением MEC на границе сети доступа, которая предоставляет ресурсы

рядом с конечными устройствами. Кроме того, внедрение SDN в распределенной форме управляет и контролирует трафик между сетями и уменьшает коллизии.

Рис. 6 иллюстрирует использование ресурсов системы с точки зрения обработки для рассмотренных двух

систем для трех рассмотренных случаев моделирования. Как показывают результаты, разработанная MEC/SDNLoRaWAN использует вычислительные ресурсы более эффективно, чем традиционная система LoRaWAN.

## ВЫВОД

В этой работе представлена структура системы MEC/SDNLoRaWAN, обеспечивающая работу сверхплотных сетей и приложений со сверхнизкой задержкой. Предлагаемая система использует сервер MEC, подключенный к базовой станции LoRa, и один централизованный контроллер SDN, расположенный в базовой сети. Упрощённые версии контроллера SDN расположены на каждом сервере MEC. Это снижает нагрузку на базовую сеть и перемещает схему управления к границе сети доступа. Разработанная структура обеспечивает более высокую надежность, доступность и гибкость системы. Предлагаемая сеть MEC/SDN была смоделирована в надежной среде для трех сценариев и для каждого сценария дана оценка производительности. Результаты проверяют систему с точки зрения надежности, задержки и использования ресурсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. Haxhibeqiri, E. D. Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of lorawan for iot: From technology to application," *Sensors*, Vol. 18, no. 11, pp: 3995, 2018.
2. R. S. Sinha, Y. Wei, and S. H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *IctExpress*, Vol. 3, no. 1, pp: 14–21, 2017.
3. J. Finnegan, and S. Brown, "A comparative survey of LPWA networking," *arXiv preprint arXiv:1802.04222*, 2018.
4. F. Adelantado, X. Vilajosana, P. T. Peiro, B. Martinez, J. M. Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications magazine*, Vol. 55, no. 9, pp: 34–40, 2017.
5. O. Georgiou, and U. Raza, "Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?," *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 6, no. 2, pp: 162–165, 2017.
6. A. Ateya, M. Al-Bahri, A. Muthanna, and A. Koucheryavy, "End-to-end system structure for latency sensitive applications of 5G," *Электросвязь*, Vol. 6, pp: 56–61, 2018.
7. R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez, J. Ballesta-Viñas, M. Cano, and A. Skarmeta, "Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions," *Sensors*, Vol. 18, no. 3, pp: 772, 2018.
8. A.A. Ateya, A. Muthanna, M. Makolkina, and A. Koucheryavy, "Study of 5G services standardization: specifications and requirements," In 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 1–6. IEEE, Nov. 2018.
9. A.A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova, A. Abuarqoub, A. Vybornova, and A. Koucheryavy, "Development of intelligent core network for tactile internet and future smart systems," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 7, no. 1, 2018.
10. A. Ateya, A. Vybornova, R. Kirichek and A. Koucheryavy, "Multilevel cloud based Tactile Internet system", *IEEE-ICACT2017 international conference*, Korea, Feb.2017.
11. D. Kim, S. Kim, and J. H. Park, "Remote software update in trusted connection of long range IoT networking integrated with mobile edge cloud", *IEEE Access*, Vol. 6 pp: 66831–66840, 2017.
12. I. Farris, T. Taleb, Y. Khettab, and J. Song, "A survey on emerging SDN and NFV security mechanisms for IoT systems", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 21, no. 1, pp: 812–837, 2018.
13. O. Salman, I. Elhajji, A. Chehab, and A. Kayssi, "IoT survey: An SDN and fog computing perspective", *Computer Networks*, 2018.
14. A. Muthanna, A. A. Ateya, A. Khakimov, I. Gudkova, A. Abuarqoub, K. Samouylov, and A. Koucheryavy, "Secure and Reliable IoT Networks Using Fog Computing with Software-Defined Networking and Blockchain", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 8, no. 1, pp: 15, 2019.
15. A.A/ Ateya, A. Muthanna, A. Vybornova, P. Darya, and A. Koucheryavy, "Energy-Aware Offloading Algorithm for Multi-level Cloud Based 5G System", In *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, pp. 355–370. Springer, Cham, 2018.
16. A.A. Ateya, A. Vybornova, K. Samouylov, and A. Koucheryavy, "System model for multi-level cloud based tactile internet system", In *International Conference on Wired/Wireless Internet Communication*, pp. 77–86. Springer, Cham, 2017.