

## СТАТЬИ

УДК 621.391

DOI 10.17513/snt.40141

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРАМИ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ  
В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ****Балакшин М.С., Польщикова К.А.***ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,  
Белгород, e-mail: polshchikov@mail.ru*

Цель исследования состоит в обеспечении требуемых характеристик доставки данных в системе промышленного Интернета вещей на основе разработки алгоритма автоматизированного управления параметрами передачи телеметрических сообщений. Для достижения цели исследования в статье предложены блок-схема и пошаговое описание алгоритма, который базируется на применении моделей для оценивания вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений при реализации различных уровней качества передачи данных. В качестве исходных данных задаются характеристики доставки сообщений, обусловленные спецификой контролируемого технологического процесса. Управляемыми параметрами являются выбираемый уровень качества передачи данных и число разрешенных повторных передач потерянных или некорректно доставленных информационных пакетов. На основе применения алгоритма выполнены вычислительные эксперименты, подтвердившие логическую корректность его работы. В результате отмечено, что представленный алгоритм обеспечивает теоретически обоснованный выбор уровня качества доставки сообщений и разрешенного числа повторных передач пакетов в зависимости от текущей интенсивности битовых ошибок. Применение алгоритма позволяет обеспечить заданные значения вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений, существенно снижая при этом среднюю интенсивность трафика по сравнению с реализацией фиксированного уровня качества передачи данных с двойными подтверждениями.

**Ключевые слова:** промышленный Интернет вещей, автоматизированное управление, качество передачи данных, телеметрические сообщения, пакетный трафик, доставка сообщений, дублирование сообщений

**ALGORITHM FOR AUTOMATED CONTROL  
OF TELEMETRY MESSAGE TRANSMISSION PARAMETERS  
IN THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS SYSTEM****Balakshin M.S., Polschikova K.A.***Belgorod National Research University, Belgorod, e-mail: polshchikov@mail.ru*

The objective of the study is to ensure the required characteristics of data delivery in the Industrial Internet of Things system based on the development of an algorithm for automated control of telemetry message transmission parameters. To achieve the objective of the study, the article proposes a block diagram and a step-by-step description of the algorithm, which is based on the use of models for estimating the probability of delivery and the probability of message duplication when implementing various levels of data transmission quality. The initial data are the characteristics of message delivery due to the specifics of the controlled technological process. The controlled parameters are the selected level of data transmission quality and the number of permitted retransmissions of lost or incorrectly delivered information packets. Based on the application of the algorithm, computational experiments were performed that confirmed the logical correctness of its operation. As a result, it was noted that the presented algorithm provides a theoretically sound choice of the level of message delivery quality and the permitted number of packet retransmissions depending on the current bit error rate. The use of the algorithm allows for the specified values of the probability of delivery and the probability of message duplication, while significantly reducing the average traffic intensity compared to the implementation of a fixed level of data transmission quality with double confirmations.

**Keywords:** Industrial Internet of Things, automated control, data transmission quality, telemetry messages, packet traffic, message delivery, message duplication

**Введение**

Беспроводные системы передачи данных сегодня выступают в качестве технической основы мониторинга и управления для решения различных прикладных задач [1–3]. В частности, востребованы энергоэффективные беспроводные сенсорные сети, на базе которых функционируют системы Интернета вещей [4–6]. Такие системы обеспечивают сбор данных, поступающих в виде телеметрических сообщений от многочис-

ленных датчиков [7]. Системы Интернета вещей применяются в сельском хозяйстве [8], энергетике [9], медицине [10] и многих других сферах.

В настоящее время активно развиваются системы промышленного Интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT), позволяющие в реальном времени отслеживать техническое состояние и корректность функционирования многочисленных элементов производственного оборудования

[11, 12]. Одним из наиболее распространенных стандартов, на основе которых функционируют IoT-системы, является протокол MQTT, предусматривающий реализацию трех уровней качества передачи данных [13]. Самый низкий уровень, который именуется QoS-0, не использует повторные передачи искаженных или потерянных сообщений. Уровень QoS-1 предполагает отправку подтверждений на корректно принятые информационные пакеты, однако допускает дублирование сообщений. Наивысший уровень (QoS-2) использует двойные подтверждения и гарантирует отсутствие дубликатов доставленных сообщений. Выбор реализуемого уровня QoS существенно влияет на характеристики доставки сообщений в системе. Он должен обеспечивать вероятность доставки сообщений не ниже заданной величины, вероятность доставки дубликатов сообщений не выше заданного значения, а также минимизацию передаваемого в IoT-системе пакетного трафика. Вопросам контроля качества передачи данных в MQTT-сетях посвящены отдельные разработки [14, 15]. Они на основе выбора уровня QoS позволяют управлять безопасностью связи, средней задержкой и количеством корректно принятых пакетов, однако напрямую не нацелены на обеспечение требуемых значений вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений в IoT-системе, а также не учитывают интенсивность пакетного трафика. Необходимость совершенствования процесса доставки данных в системе промышленного Интернета вещей и нехватка теоретически обоснованных средств автоматизированного управления параметрами передачи телеметрических IoT-сообщений с учетом критериев, обусловленных спецификой контролируемого технологического процесса, определяют актуальность изложенного в статье исследования.

**Целью исследования** является обеспечение требуемых характеристик доставки данных в системе промышленного Интернета вещей на основе разработки алгоритма автоматизированного управления параметрами передачи телеметрических сообщений.

#### Материалы и методы исследования

Модели, на основе применения которых могут быть оценены значения вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений с учетом реализуемого уровня качества передачи данных в IoT-системе, предложены в работе [12]. С использованием этих моделей разработан алгоритм автоматизированного управления параметрами

передачи телеметрических сообщений в системе промышленного Интернета вещей. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

Предлагаемый алгоритм предписывает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Ввод исходных данных. На этом шаге задаются значения следующих величин:  $L1$  – битовой длины информационного блока физического уровня, в который инкапсулирован пакет PUBLISH;  $L2$  – битовой длины информационного блока физического уровня, в который инкапсулирован подтверждающий пакет PUBREC или служебный пакет PUBREL;  $PC$  – вероятности того, что подтверждающий пакет PUBREC будет принят узлом-отправителем до срабатывания таймера повторной передачи;  $N$  – максимальное значение разрешенного числа повторных передач. Затем пользователем вводятся значения следующих показателей:  $GPDUBL$  – заданная вероятность дублирования доставленных сообщений;  $GPD$  – заданная вероятность доставки сообщений.

Шаг 2. Вычисляется вероятность доставки сообщения в IoT-системе при обеспечении уровня QoS-0 с использованием выражения, представленного в работе [12]:

$$PD0 = P1^2, \quad (1)$$

где  $P1$  – вероятность корректного приема информационного пакета PUBLISH.

Значение  $P1$  оценивается по формуле

$$P1 = 1 - (L1 \cdot BER), \quad (2)$$

где  $BER$  – интенсивность битовых ошибок в беспроводных каналах, используемых для передачи данных [12].

Шаг 3. Значение  $PD0$  сравнивается с заданной вероятностью доставки сообщений. Если  $PD0 \geq GPD$ , то выполняется переход к шагу 4. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 5.

Шаг 4. Вывод рекомендуемого уровня QoS-0. Конец алгоритма.

Шаг 5. Число разрешенных повторных передач устанавливается  $Nretry = 0$ .

Шаг 6. Значение  $Nretry$  увеличивается на 1. Если текущее значение  $Nretry$  превышает значение  $N$ , то осуществляется переход к шагу 12.

Шаг 7. Вычисляется вероятность дублирования доставленных сообщений в IoT-системе при обеспечении уровня QoS-1 с использованием моделей, представленных в работе [12]:

$$PDUBL = A \cdot (2 - A), \quad (3)$$

где  $A$  – величина, которая оценивается с помощью выражения

$$A = 1 - P1 \cdot \left[ (1 - P1)^{Nretry} \cdot (1 + Nretry \cdot (1 - P2 \cdot PC)) + P2 \cdot PC \cdot \sum_{i=0}^{Nretry-1} (1 - P1)^i \right] - (1 - P1)^{Nretry+1}, \quad (4)$$

где  $P2$  – вероятность корректного приема подтверждающего пакета PUBREC:

$$P2 = 1 - (L2 \cdot BER). \quad (5)$$

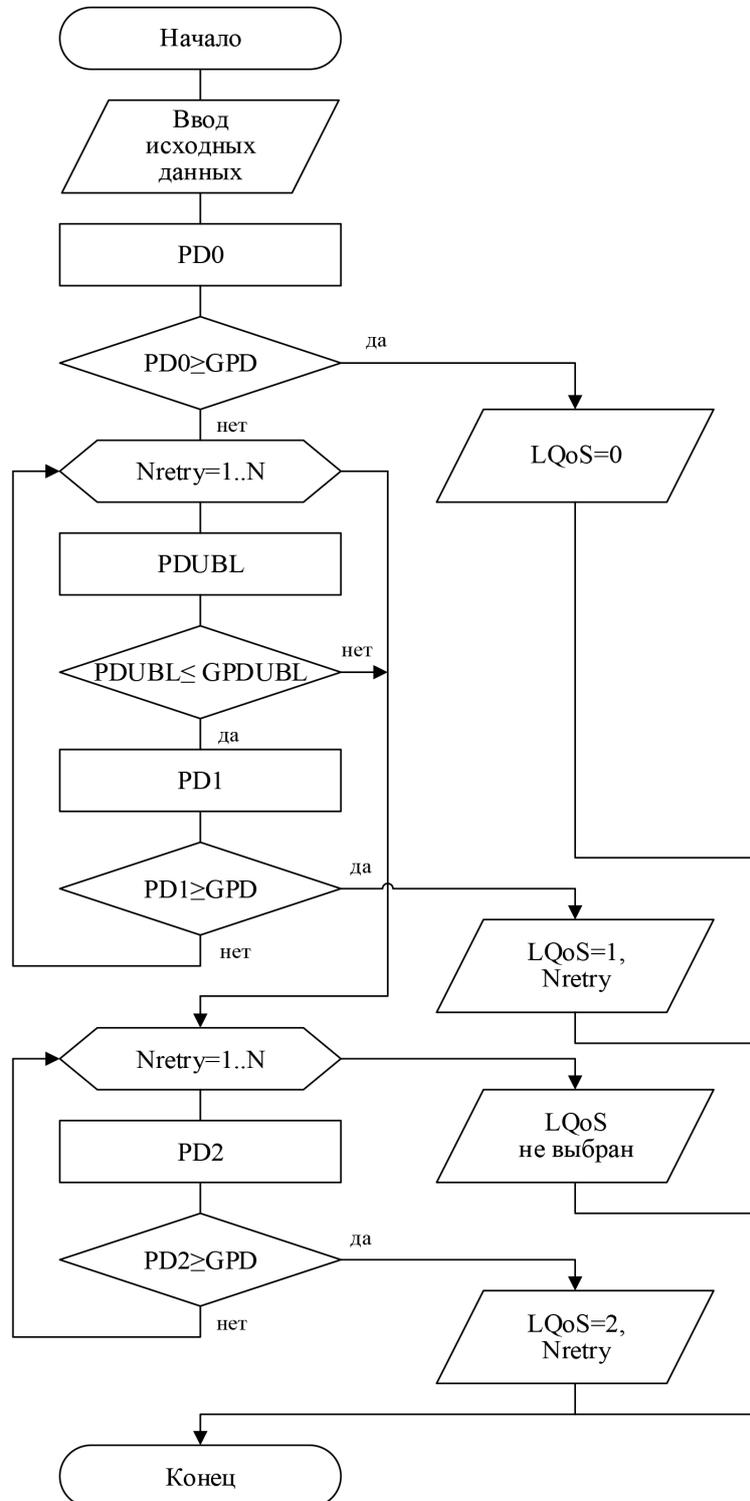


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Шаг 8. Значение  $PDUBL$  сравнивается с заданной вероятностью дублирования доставленных сообщений. Если  $PD1 \leq GPDUBL$ , то выполняется переход к шагу 9. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 12.

Шаг 9. Вычисляется вероятность доставки сообщения в PoT-системе при обеспечении уровня QoS-1 с использованием выражения, представленного в работе [12]:

$$PD1 = \left[ 1 - (1 - P1)^{Nretry+1} \right]^2. \quad (6)$$

Шаг 10. Значение  $PD1$  сравнивается с заданной вероятностью доставки сообщений. Если  $PD1 \geq GPD$ , то выполняется переход к шагу 11.

$$PD2 = \left[ 1 - \left( (1 - P1 \cdot P2 \cdot PC)^{Nretry+1} + P1 \cdot P2 \cdot PC \cdot (1 - P2)^{Nretry+1} \cdot \sum_{i=0}^{Nretry} (1 - P1 \cdot P2 \cdot PC)^i \right) \right]^2. \quad (7)$$

Шаг 16. Значение  $PD2$  сравнивается с заданной вероятностью доставки сообщений. Если  $PD2 \geq GPD$ , то выполняется переход к шагу 17. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 13.

Шаг 17. Вывод рекомендуемого уровня QoS-2 с текущим  $Nretry$ . Конец алгоритма.

### Результаты исследования и их обсуждение

Разработанный алгоритм реализован в виде программного обеспечения на языке Python версии 3.12.5, на основе применения которого проведена серия вычислительных экспериментов со следующими исходными данными:  $L1 = 256$  бит;  $L2 = 128$  бит;  $PC = 1$ ;  $GPD = 0,9$ ;  $GPDUBL = 0,1$ . В результате экспериментов установлено, что в PoT-системе при значениях  $BER$  не выше  $2 \times 10^{-4}$  рекомендуется использовать уровень QoS-0, при значениях  $BER$  от  $3 \times 10^{-4}$  до  $4 \times 10^{-4}$  следует использовать уровень QoS-1 и  $Nretry = 1$ , а при  $BER$  от  $6 \times 10^{-4}$  до  $10 \times 10^{-4}$  следует использовать уровень QoS-2 и  $Nretry = 2$ . Эти результаты полностью совпадают с результатами моделирования, изложенными в работе [12], что подтверждает логическую корректность разработанного алгоритма.

Затем была проведена вторая серия вычислительных экспериментов, в ходе которой проверялось выполнение заданных требований к доставке данных и оценивалась величина пакетного трафика в PoT-системе без применения предложенного алгоритма и с его применением. При этом оценива-

лись значения величины  $V$ , то есть среднего числа пакетов, передаваемых в PoT-системе в течение 1 ч. Предполагалось, что пакетный трафик генерировали 1000 сенсорных устройств, каждое из которых в течение 1 ч передавало по 4 телеметрических сообщения. Полученные результаты представлены в таблице.

В противном случае выполнение алгоритма возвращается к шагу 6.

Шаг 11. Вывод рекомендуемого уровня QoS-1 с текущим  $Nretry$ . Конец алгоритма.

Шаг 12. Устанавливается  $Nretry = 0$ .

Шаг 13. Значение  $Nretry$  увеличивается на 1. Если текущее значение  $Nretry$  превышает значение  $N$ , то осуществляется переход к шагу 14.

Шаг 14. Выводится сообщение о том, что при имеющихся исходных данных реализация любого уровня QoS не позволяет обеспечить требуемые характеристики доставки телеметрических сообщений. Конец алгоритма.

Шаг 15. Вычисляется вероятность доставки сообщения в PoT-системе при обеспечении уровня QoS-2 с использованием выражения, представленного в работе [12]:

Обработка представленных в таблице данных дала возможность построить диаграммы, изображенные на рис. 2. Анализ диаграмм показывает, что в случаях установки фиксированных уровней качества передачи данных без применения разработанного алгоритма реализация уровня QoS-0 позволяет выполнить требования по доставке данных только на 20% и сопровождается средней интенсивностью трафика 0,8 тыс. пакетов в течение 1 ч; реализация уровня QoS-1 позволяет выполнить требования по доставке данных на 40% при повышении средней интенсивности трафика до 17,78 тыс. пакетов в течение 1 ч; реализация уровня QoS-2 позволяет на 100% выполнить требования по доставке данных при повышении средней интенсивности трафика до 36,06 тыс. пакетов в течение 1 ч. Применение разработанного алгоритма управления параметрами передачи сообщений позволяет на 100% обеспечить достижение требуемых характеристик доставки данных и по сравнению с реализацией фиксированного уровня QoS-2 дает возможность снизить среднюю интенсивность трафика на 32,5% (до 24,32 тыс. пакетов в течение 1 ч).

## Результаты вычислительных экспериментов

$BER \times 10^{-4}$	Без применения алгоритма						С применением алгоритма	
	QoS-0		QoS-1, $N_{retry} = 1$		QoS-2, $N_{retry} = 2$		Выполнение требований	$V \times 10^3$
	Выполнение требований	$V \times 10^3$	Выполнение требований	$V \times 10^3$	Выполнение требований	$V \times 10^3$		
1	да	0,8	да	16,4	да	32,7	да	0,8
2	да	0,8	да	16,8	да	33,4	да	0,8
3	нет	0,8	да	17,1	да	34,3	да	17,1
4	нет	0,8	да	17,4	да	35,0	да	17,4
5	нет	0,8	нет	17,7	да	35,8	да	17,7
6	нет	0,8	нет	18,0	да	36,5	да	36,5
7	нет	0,8	нет	18,3	да	37,2	да	37,2
8	нет	0,8	нет	18,5	да	37,9	да	37,9
9	нет	0,8	нет	18,7	да	38,6	да	38,6
10	нет	0,8	нет	18,9	да	39,2	да	39,2

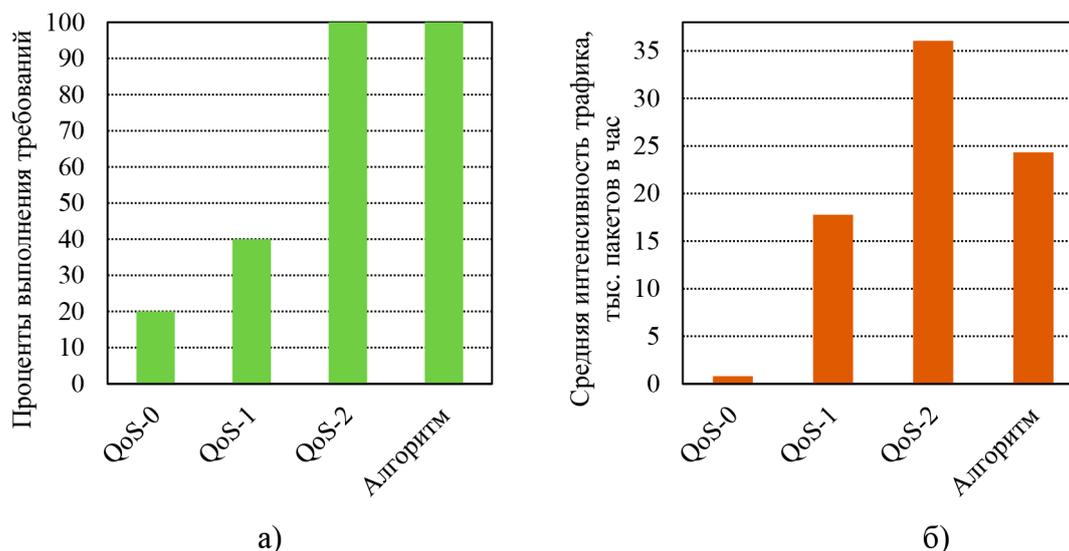


Рис. 2. Диаграммы выполнения требований по доставке данных (а) и средней интенсивности пакетного трафика (б)

### Заключение

Представленный в работе алгоритм автоматизированного управления параметрами передачи телеметрических сообщений в PoT-системе обеспечивает теоретически обоснованный выбор уровня качества доставки сообщений и разрешенного числа повторных передач пакетов в зависимости от текущей интенсивности битовых ошибок. Применение алгоритма позволяет обеспечить заданные значения вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений, существенно снижая при этом среднюю интенсивность трафика по срав-

нению с реализацией фиксированного уровня качества передачи данных с двойными подтверждениями.

### Список литературы

1. Wibisono A., Alsharif M.H., Song H.-K., Lee B.M. A Survey on Underwater Wireless Power and Data Transfer System // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 34942–34957. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3373791.
2. Константинов И.С., Польщиков К.А., Лазарев С.А. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2015. № 13 (210). С. 156–163.
3. Kong L., Li W., Zhang T., Ma H., Cao Y., Wang K., Zhou Y., Shamim A., Zheng L., Wang X., Huang W. Wireless

Technologies in Flexible and Wearable Sensing: From Materials Design, System Integration to Applications // *Advanced Materials*. 2024. Vol. 36. P. 2400333. DOI: 10.1002/adma.202400333.

4. Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Федоров В.И. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением // *Экономика. Информатика*. 2023. Т. 50, № 2. С. 439–447. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.

5. Daousis S., Peladarinos N., Cheimaras V., Papageorgas P., Piromalis D.D., Munteanu R.A. Overview of Protocols and Standards for Wireless Sensor Networks in Critical Infrastructures // *Future Internet*. 2024. Vol. 6 (1). P. 33. DOI: 10.3390/fi16010033.

6. Yamini B., Pradeep G., Kalaiyarasi D., Jayaprakash M., Janani G., Uthayakumar G.S. Theoretical study and analysis of advanced wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT) // *Measurement: Sensors*. 2024. Vol. 33. P. 101098. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101098.

7. Yaser M.J., Polschikov K.A., Polschikov I.K. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2023. Vol. 11, Is. 4. P. 168–174.

8. Aggarwal K., Reddy G.S., Makala R., Srihari T., Sharma N., Singh C. Studies on energy efficient techniques for agricultural monitoring by wireless sensor networks // *Computers and Electrical Engineering*. 2024. Vol. 113. P. 109052. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2023.109052.

9. Karthick Raghunath K.M., Koti M.S., Sivakami R. Utilization of IoT-assisted computational strategies in wireless sensor

networks for smart infrastructure management // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2024. Vol. 15. P. 28–34. DOI: 10.1007/s13198-021-01585-y.

10. Jan I., Sofi S. Data management for resource optimization in medical IoT // *Health and Technology*. 2024. Vol. 14. P. 51–68. DOI: 10.1007/s12553-023-00796-6.

11. Khan N., Solvang W.D., Yu H. Industrial Internet of Things (IIoT) and Other Industry 4.0 Technologies in Spare Parts Warehousing in the Oil and Gas Industry: A Systematic Literature Review // *Logistics*. 2024. Vol. 8 (1). P. 16. DOI: 10.3390/logistics8010016.

12. Балакшин М.С., Польщиков К.А. Оценивание характеристик доставки данных в системе промышленного интернета вещей // *Современные наукоемкие технологии*. 2024. № 8. С. 35–40. DOI: 10.17513/snt.40109.

13. Yakupov D.R. Overview and comparison of protocols Internet of Things: MQTT and AMQP // *International Journal of Open Information Technologies*. 2022. Vol. 10, Is. 9. URL: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/1371/1296> (дата обращения: 16.07.2024).

14. Pawar S., Jadhav D.B., Lokhande M. Evaluation of quality of service parameters for MQTT communication in IoT application by using deep neural network // *International Journal of Information Technology*. 2024. Vol. 16. P. 1123–1136. DOI: 10.1007/s41870-023-01664-2.

15. Palmese F., Redondi A.E.C., Cesana M. Adaptive Quality of Service Control for MQTT-SN // *Sensors*. 2022. Vol. 22 (22). P. 8852.