

УДК 004.451.622:004.451.25
DOI 10.17513/snt.40109

ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДОСТАВКИ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Балакшин М.С., Польщиков К.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, e-mail: polshchikov@mail.ru

Статья посвящена оцениванию характеристик доставки телеметрических сообщений в системе промышленного Интернета вещей. Цель исследования – обеспечить теоретически обоснованный выбор уровня качества передачи данных и разрешенного числа повторных передач в вышеуказанной системе. Для достижения цели исследования в статье предложены модели процесса доставки сообщений в соответствии с тремя уровнями качества передачи данных. Представленные в работе модели адекватно отражают зависимость вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений от интенсивности битовых ошибок, используемого уровня качества передачи данных и разрешенного числа повторных передач. В качестве параметров, учитываемых в процессе выбора уровня качества передачи данных и разрешенного числа повторных передач, предложено использовать вероятность доставки сообщений, вероятность их дублирования, а также объем передаваемого трафика. На основе применения представленных моделей выполнены вычислительные эксперименты. В результате отмечено, что предложенные в статье модели позволяют оценить вероятностные показатели доставки данных в системе промышленного Интернета вещей и обеспечить теоретически обоснованный выбор уровня качества передачи данных и разрешенного числа повторных передач с учетом требований к характеристикам доставки сообщений, которые обусловлены спецификой контролируемого производственного процесса.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей, качество передачи данных, телеметрические сообщения, информационные пакеты, повторные передачи, сенсорное устройство, сервер

ASSESSING DATA DELIVERY CHARACTERISTICS IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS SYSTEM

Balakshin M.S., Polschikov K.A.

Belgorod National Research University, Belgorod, e-mail: polshchikov@mail.ru

The article is devoted to the evaluation of the delivery characteristics of telemetry messages in the Industrial Internet of Things system. The purpose of the study is to provide a theoretically sound choice of the data transmission quality level and the permitted number of retransmissions in the above-mentioned system. To achieve the goal of the study, the article proposes models of the message delivery process in accordance with three levels of data transmission quality. The models presented in the work adequately reflect the dependence of the delivery probability and the probability of message duplication on the bit error rate, the used data transmission quality level and the permitted number of retransmissions. It is proposed to use the probability of message delivery, the probability of their duplication, and the volume of transmitted traffic as parameters taken into account in the process of selecting the data transmission quality level and the permitted number of retransmissions. Based on the application of the presented models, computational experiments were performed. As a result, it was noted that the models proposed in the article make it possible to evaluate the probabilistic indicators of data delivery in the Industrial Internet of Things system and provide a theoretically sound choice of the data transmission quality level and the permitted number of retransmissions, taking into account the requirements for the message delivery characteristics, which are due to the specifics of the controlled production process.

Keywords: Industrial Internet of Things, data transmission quality, telemetry messages, information packets, sensor device, retransmissions, server

Введение

В настоящее время активно развиваются беспроводные технологии передачи данных, предназначенные для проведения удаленного мониторинга и контроля в различных сферах [1–3]. На практике востребованы технические решения, реализованные в рамках концепции Internet of Things (IoT) [4–6]. IoT-системы применяются, в частности, на производственных предприятиях для превентивного управления технологическими процессами. На основе сенсорных технологий, используемых в це-

лях контроля производственных процессов, строятся системы промышленного Интернета вещей (IIoT) [7, 8]. К числу распространенных стандартов, регламентирующих работу таких систем, относится протокол прикладного уровня MQTT [9, 10] и его модификация MQTT-SN, адаптированная для сенсорных сетей [11]. Указанные протоколы для доставки телеметрических данных регламентируют использование сервера как промежуточного устройства, к которому подключаются устройства-клиенты. В качестве таких клиентов в IIoT-системе применяются сенсорные устройства, кото-

рые осуществляют измерение контролируемых параметров и отправку на сервер соответствующих телеметрических сообщений, а также IoT-устройства центра управления производственным процессом, на которые эти сообщения передаются из сервера.

В MQTT-системе предусмотрены три уровня качества передачи данных (QoS-0, QoS-1 и QoS-2) [12, 13]. Наименьшей протокольной избыточностью обладает самый низкий уровень (QoS-0). При его реализации не используются повторные передачи искаженных или потерянных информационных пакетов, что обеспечивает невысокий объем передаваемого в PoT-системе трафика.

Уровень QoS-1 предполагает передачу подтверждений на корректно (безошибочно) принятые информационные пакеты; при этом, если до истечения времени таймаута подтверждение не было получено устройством-отправителем, осуществляется повторная передача соответствующего информационного пакета. Число разрешенных повторных передач N_{retry} является одним из управляемых параметров в системе. Особенность уровня QoS-1 состоит в том, что при его использовании возможно дублирование доставляемых сообщений.

QoS-2 – это наивысший уровень качества передачи данных, который гарантирует отсутствие дубликатов доставляемых сообщений за счет использования двойных подтверждений корректного приема пакетов. Недостатком этого уровня является то, что при его реализации объем передаваемого трафика является самым высоким.

При выборе используемого уровня QoS и разрешенного числа повторных передач необходимо, с одной стороны, добиваться повышения вероятности доставки сообщений в PoT-системе. С другой стороны, следует минимизировать дублирование доставляемых сообщений, так как оно может привести к некорректному диагностированию состояния контролируемого оборудования. Кроме того, важным критерием является уменьшение объема передаваемого трафика. Анализ показал, что вопросам выбора уровня QoS и параметра N_{retry} с учетом достижения всех перечисленных требований в системах промышленного Интернета вещей в научно-технических публикациях уделяется недостаточно внимания. Вышеизложенные аргументы определяют актуальность представленного исследования.

Целью исследования является обеспечение теоретически обоснованного выбора уровня качества передачи данных и разрешенного числа повторных передач в системе промышленного Интернета вещей на основе оценивания характеристик

доставки сообщений в соответствии с протоколом MQTT-SN.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели исследования требуется разработка и применение вероятностных моделей процесса доставки сообщений в PoT-системе в соответствии с регламентируемыми протоколом MQTT-SN уровнями качества передачи данных. При обеспечении уровня QoS-2 и использовании параметра $N_{retry} = 1$ сообщение не будет доставлено из сенсорного устройства на IoT-устройство центра управления, если произойдет любая из семи следующих последовательностей событий:

1) корректно принят информационный пакет PUBLISH; корректно и своевременно принят подтверждающий пакет PUBREC; некорректно принят служебный пакет PUBREL; после повторной передачи некорректно принят служебный пакет PUBREL;

2) корректно принят информационный пакет PUBLISH; некорректно и/или несвоевременно принят подтверждающий пакет PUBREC; после повторной передачи корректно принят информационный пакет PUBLISH; корректно и своевременно принят подтверждающий пакет PUBREC; некорректно принят служебный пакет PUBREL; после повторной передачи некорректно принят служебный пакет PUBREL;

3) корректно принят информационный пакет PUBLISH; некорректно и/или несвоевременно принят подтверждающий пакет PUBREC; после повторной передачи корректно принят информационный пакет PUBLISH; некорректно и/или несвоевременно принят подтверждающий пакет PUBREC;

4) корректно принят информационный пакет PUBLISH; некорректно и/или несвоевременно принят подтверждающий пакет PUBREC; после повторной передачи некорректно принят пакет PUBLISH;

5) некорректно принят информационный пакет PUBLISH; после повторной передачи корректно принят информационный пакет PUBLISH; корректно и своевременно принят подтверждающий пакет PUBREC; некорректно принят служебный пакет PUBREL; после повторной передачи некорректно принят служебный пакет PUBREL;

6) некорректно принят информационный пакет PUBLISH; после повторной передачи корректно принят информационный пакет PUBLISH; некорректно и/или несвоевременно принят подтверждающий пакет PUBREC;

7) некорректно принят информационный пакет PUBLISH; после повторной передачи некорректно принят информационный пакет PUBLISH.

Тогда вероятность того, что сообщение не будет доставлено из сенсорного устройства на IoT-устройство центра управления, можно оценить по формуле

$$P0 = P1 \cdot P2 \cdot PC \cdot (1 - P2) \cdot (1 - P2) + P1 \cdot (1 - P2 \cdot PC) \cdot P1 \cdot P2 \cdot PC \cdot (1 - P2) \cdot (1 - P2) + \\ + P1 \cdot (1 - P2 \cdot PC) \cdot (1 - P2 \cdot PC) + P1 \cdot (1 - P2 \cdot PC) \cdot (1 - P1) + \\ + (1 - P1) \cdot P1 \cdot P2 \cdot PC \cdot (1 - P2) \cdot (1 - P2) + (1 - P1) \cdot P1 \cdot (1 - P2 \cdot PC) + (1 - P1) \cdot (1 - P1), \quad (1)$$

где $P1$ – вероятность корректного приема информационного пакета PUBLISH; $P2$ – вероятность корректного приема подтверждающего пакета PUBREC; PC – вероятность своевременного приема подтверждающего пакета PUBREC, то есть приема этого пакета истечения времени тайм-аута.

Вероятность корректного приема информационного пакета PUBLISH можно оценить с помощью выражения

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

где $L1$ – битовая длина информационного блока физического уровня, в который инкапсулирован пакет PUBLISH; BER – интенсивность битовых ошибок в используе-

мых беспроводных каналах, используемых для передачи данных.

Для вычисления вероятности корректного приема подтверждающего пакета PUBREC предлагается использовать выражение

$$P2 = 1 - (L2 \cdot BER), \quad (3)$$

где $L2$ – битовая длина информационного блока физического уровня, в который инкапсулирован подтверждающий пакет PUBREC или служебный пакет PUBREL.

После алгебраических преобразований выражение (1) может быть представлено в обобщенном виде для любого натурального значения $Nretry$:

$$P0 = (1 - P1 \cdot P2 \cdot PC)^{Nretry+1} + P1 \cdot P2 \cdot PC \cdot (1 - P2)^{Nretry+1} \cdot \sum_{i=0}^{Nretry} (1 - P1 \cdot P2 \cdot PC)^i, \quad (4)$$

Тогда вероятность доставки сообщения в PoT-системе при обеспечении уровня QoS-2:

$$PD2 = \left[1 - \left((1 - P1 \cdot P2 \cdot PC)^{Nretry+1} + P1 \cdot P2 \cdot PC \cdot (1 - P2)^{Nretry+1} \cdot \sum_{i=0}^{Nretry} (1 - P1 \cdot P2 \cdot PC)^i \right) \right]^2. \quad (5)$$

При обеспечении уровня QoS-1 и установке $Nretry = 1$ сообщение не будет доставлено из сенсорного устройства на IoT-устройство центра управления, если информационный пакет PUBLISH будет некорректно принят в результате первой попытки и после его повторной передачи. С учетом этого можно оценить вероятность доставки сообщения в PoT-системе, в которой реализуется вышеуказанный уровень качества передачи данных, с помощью следующего выражения:

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

При обеспечении уровня QoS-0 сообщение будет доставлено в PoT-системе, если информационный пакет PUBLISH сначала

будет корректно принят сервером после его отправки из сенсорного устройства, а затем после его отправки из сервера он будет корректно принят IoT-устройством центра управления. С учетом этого вероятность доставки сообщения в PoT-системе, в которой реализуется самый низкий уровень качества передачи данных, можно оценить по формуле

$$PD0 = P1^2. \quad (7)$$

Кроме вероятности доставки сообщения, важной характеристикой функционирования в PoT-системе при обеспечении уровня QoS-1 является вероятность дублирования сообщений. В результате исследования, опубликованного в работе [14], получено следующее выражение для оценивания этой величины:

$$PDUBL = 2 \cdot (1 - PONCE - PNOT) - (1 - PONCE - PNOT)^2, \quad (8)$$

где $PONCE$ – вероятность доставки сообщения без дубликатов из сенсорного устройства на сервер, а также вероятность доставки сообщения без дубликатов из сервера на IoT-устройство центра управления;

$PNOT$ – вероятность того, что сообщение не будет доставлено из сенсорного устройства на сервер, а также вероятность того, что сообщение не будет доставлено из сервера на IoT-устройство центра управления.

Величину $PONCE$ можно оценить по формуле [14]

$$PONCE = P1 \cdot \left[(1 - P1)^{Nretry} \cdot (1 + Nretry \cdot (1 - P2 \cdot PC)) + P2 \cdot PC \cdot \sum_{i=0}^{Nretry-1} (1 - P1)^i \right]. \quad (9)$$

Значение величины $PNOT$ можно оценить с помощью выражения

$$PNOT = (1 - P1)^{Nretry+1}. \quad (10)$$

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием выражений (1)–(10) проведены вычислительные эксперименты для исследования зависимости вероятности доставки сообщений (величины PD) и вероятности дублирования сообщений (величины $PDUBL$) от значений интенсивности битовых ошибок и параметра повторных передач в PoT-системе. В процессе вычислений использовались следующие исходные данные:

$$L1 = 256 \text{ бит}; L2 = 128 \text{ бит}; PC = 1.$$

Полученные результаты представлены в виде диаграмм на рис. 1–4.

Допустим, исходя из специфики производства, на котором развернута PoT-система, вероятность доставки телеметрического сообщения должна быть не ниже уровня 0,9, а вероятность дублирования сообщений не должна превышать значение 0,1. Тогда, судя по рис. 1, при интенсивности битовых ошибок до 2×10^{-4} включительно можно использовать уровень качества передачи данных QoS-0. Анализ рис. 4 показывает, что при значениях BER от 3×10^{-4} до 4×10^{-4} для передачи данных в PoT-системе можно использовать уровень QoS-1, так как вероятность дублирования сообщений в этих случаях не превышает требуемую величину, а, судя по рис. 1, для достижения требуемой величины PD достаточно установить $Nretry = 1$.

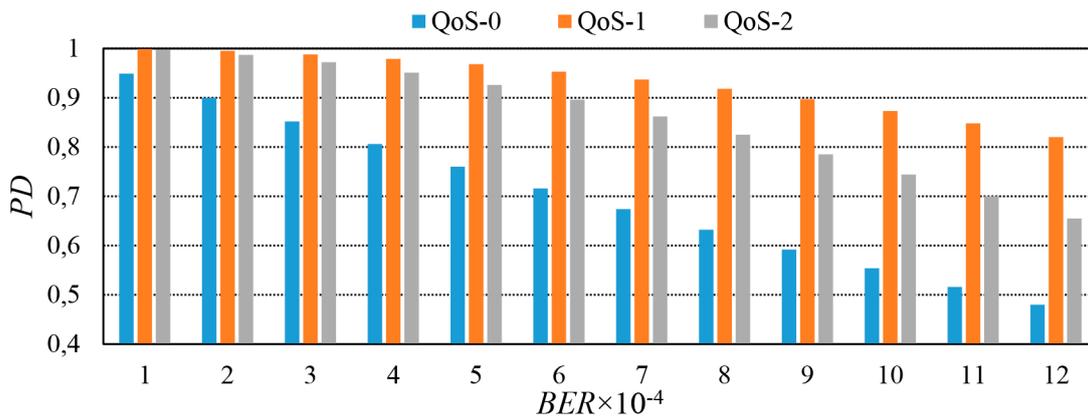


Рис. 1. Диаграмма зависимости величины PD от значений BER при $Nretry = 1$

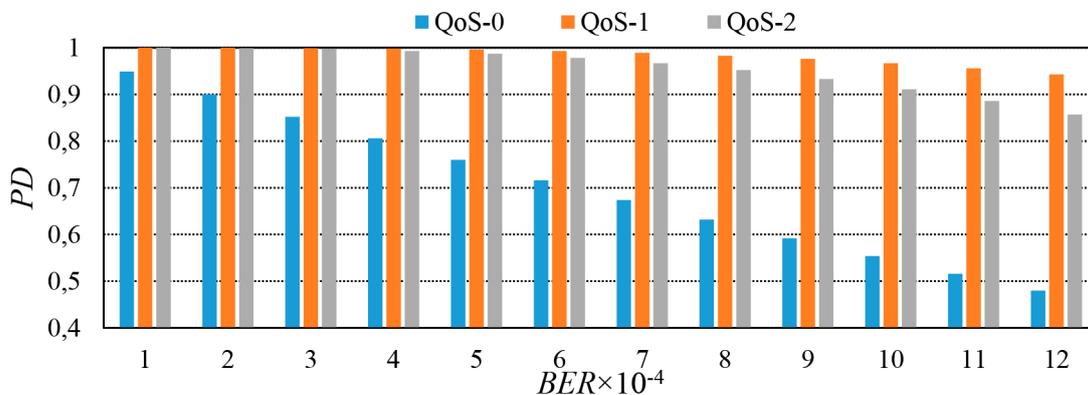


Рис. 2. Диаграмма зависимости величины PD от значений BER при $Nretry = 2$

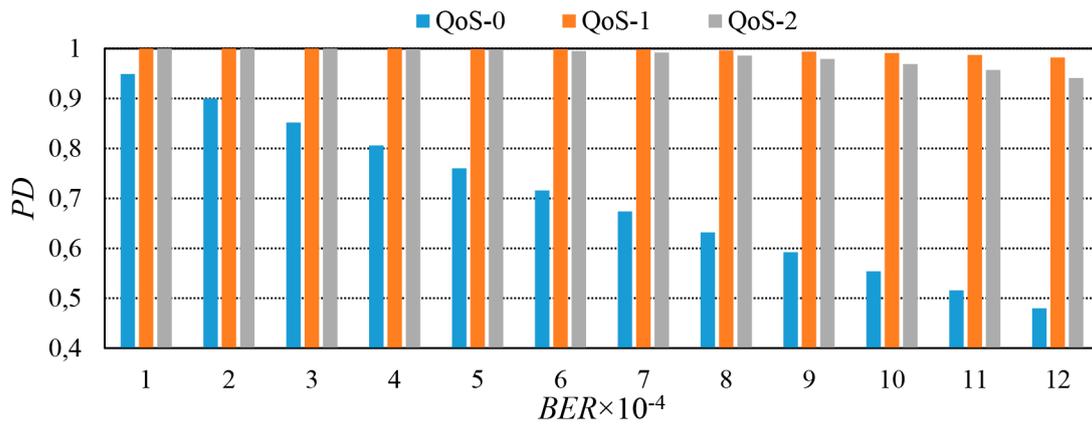


Рис. 3. Диаграмма зависимости величины PD от значений BER при Nretry = 3

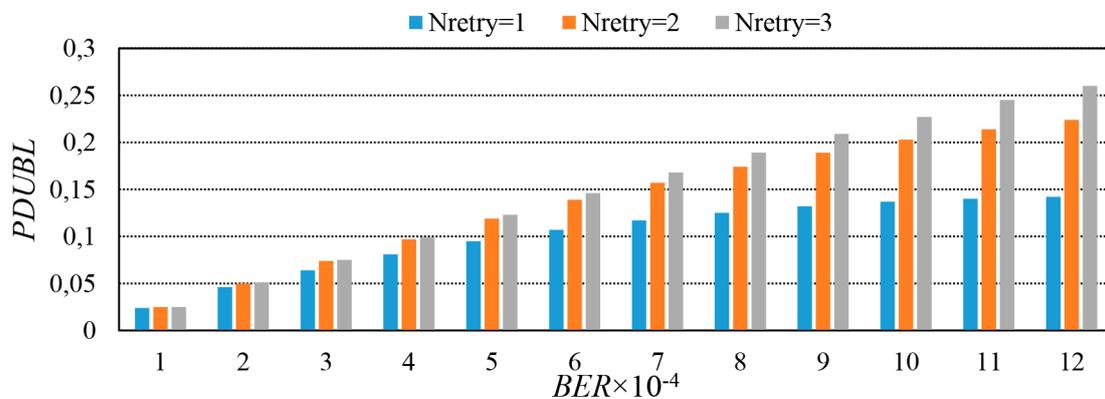


Рис. 4. Диаграмма зависимости величины PDUBL от значений BER при обеспечении уровня QoS-1

Рекомендуемые значения уровня QoS и Nretry при текущих значениях BER

BER × 10 ⁻⁴	Уровень QoS	Nretry
1	0	–
2	0	–
3	1	1
4	1	1
5	2	1
6	2	2
7	2	2
8	2	2
9	2	2
10	2	2
11	2	3
12	2	3

Анализ рис. 1–3 показывает, что при значениях BER = 5 × 10⁻⁴ рекомендуется ис-

пользование QoS-2 и Nretry = 1, при BER от 6 × 10⁻⁴ до 10 × 10⁻⁴ следует использовать QoS-2 и Nretry = 2, а при значениях BER от 6 × 10⁻⁴ до 10 × 10⁻⁴ необходимо использовать QoS-2 и Nretry = 3. Рекомендуемые значения уровня QoS и Nretry при различных значениях BER сведены в таблице.

Заключение

Представленные в работе модели адекватно отражают зависимость вероятности доставки и вероятности дублирования сообщений от интенсивности битовых ошибок, используемого уровня качества передачи данных и разрешенного числа повторных передач в соответствии с протоколом MQTT-SN. Вычислительные эксперименты, выполненные на основе применения указанных моделей, проиллюстрировали возможность теоретически обоснованного выбора уровня QoS и параметра Nretry в системе промышленного Интернета вещей.

Список литературы

1. Yew H.T., Wong G.X., Wong F., Mamat M., Chung S.K. IoT-Based Patient Monitoring System // *Internet of Things*. 2024. DOI: 10.1007/978-981-97-1432-2_2.
2. Polschykov K., Lazarev S., Kiselev V., Shabeeb A.H.T. Justification for the decision on loading channels of the network of geoeological monitoring of resources of the agroindustrial complex // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021. Vol. 9 (3). P. 781–787.
3. Константинов И.С., Пилипенко О.В., Польщиков К.А., Иващук О.Д. К вопросу обеспечения связи в процессе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах строительства // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 1 (63). С. 40–46.
4. Hamoud H., Alshammari. The internet of things health-care monitoring system based on MQTT protocol // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 69. P. 275–287. DOI: 10.1016/j.aej.2023.01.065.
5. Yaser M.J., Polschykov 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.
6. Ananda Kusuma A.A.N., Agastani T., Nugroho T., Anggraeni S.P., Hartawan A.R. Estimating MQTT Performance in A Virtual Testbed of INA-CBT Communication Sub-System // *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*. Bandung, 2022. P. 73–77. DOI: 10.1109/ICRAMET56917.2022.9991213.
7. Torres P.M.B., Spencer G., Lopes P., Santos F. Industrial IoT Platforms Enabling Industry 4.0 Digitization Towards Industry 5.0 // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-61575-7_1.
8. Sari A., Lekidis A., Butun I. Industrial Networks and IIoT: Now and Future Trends // *Industrial IoT*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-42500-5_1.
9. Raikar M.M., Meena S.M. Vulnerability assessment of MQTT protocol in Internet of Things (IoT) // *2nd International Conference on Secure Cyber Computing and Communications (ICSCCC)*, Jalandhar, 2021. P. 535–540. DOI: 10.1109/ICSCCC51823.2021.9478156.
10. Quincozes S., Emilio T., Kazienko J. MQTT Protocol: Fundamentals, Tools and Future Directions // *IEEE Latin America Transactions*. 2019. Vol. 17 (9). P. 1439–1448. DOI: 10.1109/TLA.2019.8931137.
11. Palmese F., Redondi A.E.C., Cesana M. Adaptive Quality of Service Control for MQTT-SN // *Sensors*. 2022. Vol. 22 (22). P. 8852.
12. Boujrad M., Kasmi M.A., Ouerdi N. MQTT Protocol Analysis According to QoS Levels and SSL Implementation for IoT Systems // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 712. DOI: 10.1007/978-3-031-35251-5_38.
13. Da Rocha H., Monteiro T.L., Pellenz M.E., Penna M.C., Alves Junior J. An MQTT-SN-Based QoS Dynamic Adaptation Method for Wireless Sensor Networks // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 926. DOI: 10.1007/978-3-030-15032-7_58.
14. Балакшин М.С., Польщиков К.А. Оценивание вероятности дублирования сообщений в системе промышленного Интернета вещей // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 8. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_47N8y24_Balakshin_Polshchikov.pdf (дата обращения: 16.06.2024).