



АЛГОРИТМ ВЫБОРА ЧИСЛА ПОВТОРЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ БЛОКОВ В СЕТИ УЗКОПОЛОСНОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ ДОБЫЧИ

**Польщиков К. А. ORCID ID 0000-0001-6967-3295,
Терский М. О. ORCID ID 0009-0007-2277-7274,
Шинкарев Д. В. ORCID ID 0009-0004-7541-8484**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный национальный исследовательский университет», Белгород,
Российская Федерация, e-mail: polshchikov@mail.ru*

Цель исследования состоит в обеспечении требуемых характеристик доставки сообщений в беспроводной сети мониторинга газовой добычи на основе разработки алгоритма выбора числа повторений информационных блоков. Выполнение предложенного алгоритма базируется на использовании оригинальных моделей, позволяющих оценить вероятность и среднее время доставки телеметрических сообщений в условиях возникновения предаварийных ситуаций на контролируемом оборудовании. Ключевыми особенностями обеспечения связи в предаварийных ситуациях являются резкое повышение интенсивности передачи данных и ужесточение требований к качеству доставки сообщений. В отличие от стандартного алгоритма, имеющего аналогичное назначение, в предложенном модифицированном алгоритме в качестве критериев обоснованности выбора числа повторений информационных блоков используется достижение требуемых значений вероятностно-временных характеристик доставки сообщений. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что использование предложенного алгоритма способствует выбору значений параметров передачи данных, при которых обеспечивается высокое качество доставки сообщений, требуемое в условиях предаварийных ситуаций в процессе добычи газа. Применение модифицированного алгоритма позволяет существенно повысить обоснованность принятия решений о выборе числа повторений информационных блоков по сравнению с реализацией стандартного алгоритма в сети узкополосного интернета вещей.

Ключевые слова: узкополосный интернет вещей, мониторинг добычи газа, повторения информационных блоков, телеметрические данные, качество доставки сообщений, предаварийные ситуации

ALGORITHM FOR SELECTING THE NUMBER OF REPETITIONS OF INFORMATION BLOCKS IN A NARROWBAND INTERNET OF THINGS NETWORK FOR GAS PRODUCTION MONITORING

**Polschikov K. A. ORCID ID 0000-0001-6967-3295,
Terskiy M. O. ORCID ID 0009-0007-2277-7274,
Shinkarev D. V. ORCID ID 0009-0004-7541-8484**

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Belgorod National Research University”, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: polshchikov@mail.ru*

The objective of this study is to ensure the required message delivery characteristics in a wireless gas production monitoring network by developing an algorithm for selecting the number of information block repetitions. The proposed algorithm is based on original models that allow estimating the probability and average delivery time of telemetry messages during pre-emergency situations at the monitored equipment. Key features of ensuring communication in pre-emergency situations include a sharp increase in data transmission intensity and stricter requirements for the quality of message delivery. Unlike the standard algorithm, which has a similar purpose, the proposed modified algorithm uses the required values of the probability-temporal characteristics of message delivery as the criteria for justifying the selection of the number of information block repetitions. The results of the computational experiments conducted showed that the use of the proposed algorithm facilitates the selection of data transmission parameter values that ensure the high quality of message delivery required in pre-emergency situations during gas production. The use of the modified algorithm allows for a significant improvement in the validity of decisions regarding the number of information block repetitions compared to the implementation of the standard algorithm in a narrowband Internet of Things network.

Keywords: Narrowband Internet of Things, gas production monitoring, information block repetition, telemetry data, message delivery quality, pre-emergency situations

Введение

В настоящее время большое значение приобретают вопросы повышения качества передачи данных в сетях интернета вещей

(Internet of Things, IoT), активно применяемых для контроля производственных процессов [1–3]. Эти вопросы актуальны, в частности, для решения задач авто-

матизации технологических процессов и управления цифровыми медицинскими сервисами [4–6]. На промышленных предприятиях развернуты беспроводные сети, функционирующие на основе различных IoT-стандартов [7–9]. В сфере добычи газа мониторинг работы оборудования осуществляется с помощью систем связи, основанных, в частности, на использовании протокола узкополосного интернета вещей (Narrowband Internet of Things, NB-IoT) [10, 11]. В таких системах одним из ключевых параметров, значения которого влияют на качество доставки телеметрических данных, является число повторений (repetitions) передаваемых информационных блоков [12, 13]. Увеличение этих значений, с одной стороны, позволяет повысить отношение «сигнал/шум» в сложных условиях использования радиоканалов, а с другой стороны, приводит к нежелательному росту времени доставки сообщений.

В соответствии со стандартным NB-IoT-алгоритмом число повторений удваивается до тех пор, пока вероятность обнаружения ошибок в переданных информационных блоках (Block Error Rate, BLER) станет не больше 10 % [14, 15]. Опыт применения NB-IoT-сетей на газодобывающих предприятиях показал необходимость совершенствования алгоритма выбора числа повторений информационных блоков с учетом возникновения на газодобывающем оборудовании предаварийных ситуаций, когда резко повышается интенсивность передачи данных и ужесточаются требования к характеристикам качества доставки сообщений.

Цель исследования – обеспечение требуемых характеристик доставки сообщений в беспроводной сети мониторинга газовой добычи на основе разработки алгоритма выбора числа повторений информационных блоков в условиях возникновения предаварийных ситуаций на контролируемом оборудовании.

Материалы и методы исследования

В целях обеспечения требуемых вероятностно-временных характеристик доставки телеметрических сообщений в процессе контроля работы газодобывающего оборудования разработан алгоритм выбора числа повторений информационных блоков в сети узкополосного интернета вещей. Блок-схема алгоритма предоставлена на рис. 1.

Предлагаемый алгоритм предписывает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Ввод исходных данных: NSc – число используемых поднесущих в канале

случайного доступа; TTP – продолжительность передачи преамбулы; $Tatt$ – пауза между попытками связаться с базовой станцией; $NAtt$ – разрешенное число попыток связаться оконечному устройству с базовой станцией; $TDCI$ – продолжительность передачи DCI без повторений; $LDCI$ – битовая длина DCI; $TTB1$ – продолжительность передачи транспортного блока без повторений; LTB – битовая длина транспортного блока; MDL – размерность модуляции для нисходящего канала; RDL – скорость кодирования для нисходящего канала; MUL – размерность модуляции для восходящего канала; RUL – скорость кодирования для восходящего канала; $GPMess$ и $GT-Mess$ – требуемые значения вероятности и среднего времени доставки телеметрических сообщений. Устанавливаются начальные значения $NRDCI$ (число повторений DCI) и $NRTB$ (число повторений транспортного блока).

Шаг 2. Выполняется процедура измерения начального отношения «сигнал/шум» SNR и подсчета числа корректно принятых преамбул NRP в окне канала случайного доступа.

Шаг 3. Выполняется процедура вычисления числа оконечных устройств, пытающихся связаться с базовой станцией, по формуле

$$NTP = \left\lfloor \frac{W_0 \left[\left(\frac{NSc-1}{NSc} \right) \cdot NRP \cdot \ln \left(\frac{NSc-1}{NSc} \right) \right]}{\ln \left(\frac{NSc-1}{NSc} \right)} \right\rfloor, \quad (1)$$

где $W_0(\dots)$ – главная ветвь функции Ламберта.

Шаг 4. Значение $NRDCI$ увеличивается в 2 раза. Если текущее значение $NRDCI$ превышает значение 1024, то осуществляется переход к шагу 9.

Шаг 5. Значение $NRTB$ увеличивается в 2 раза. Если текущее значение $NRTB$ превышает значение 1024, то осуществляется переход к шагу 4.

Шаг 6. Выполняется процедура вычисления значений вероятности $PMess$ и среднего времени $TMess$ доставки телеметрических сообщений в нижеуказанном порядке.

Оценивается вероятность отсутствия коллизии при передаче преамбулы по классической формуле попадания шара в пустую урну:

$$PRP = \left(\frac{NSc-1}{NSc} \right)^{NTP-1}. \quad (2)$$

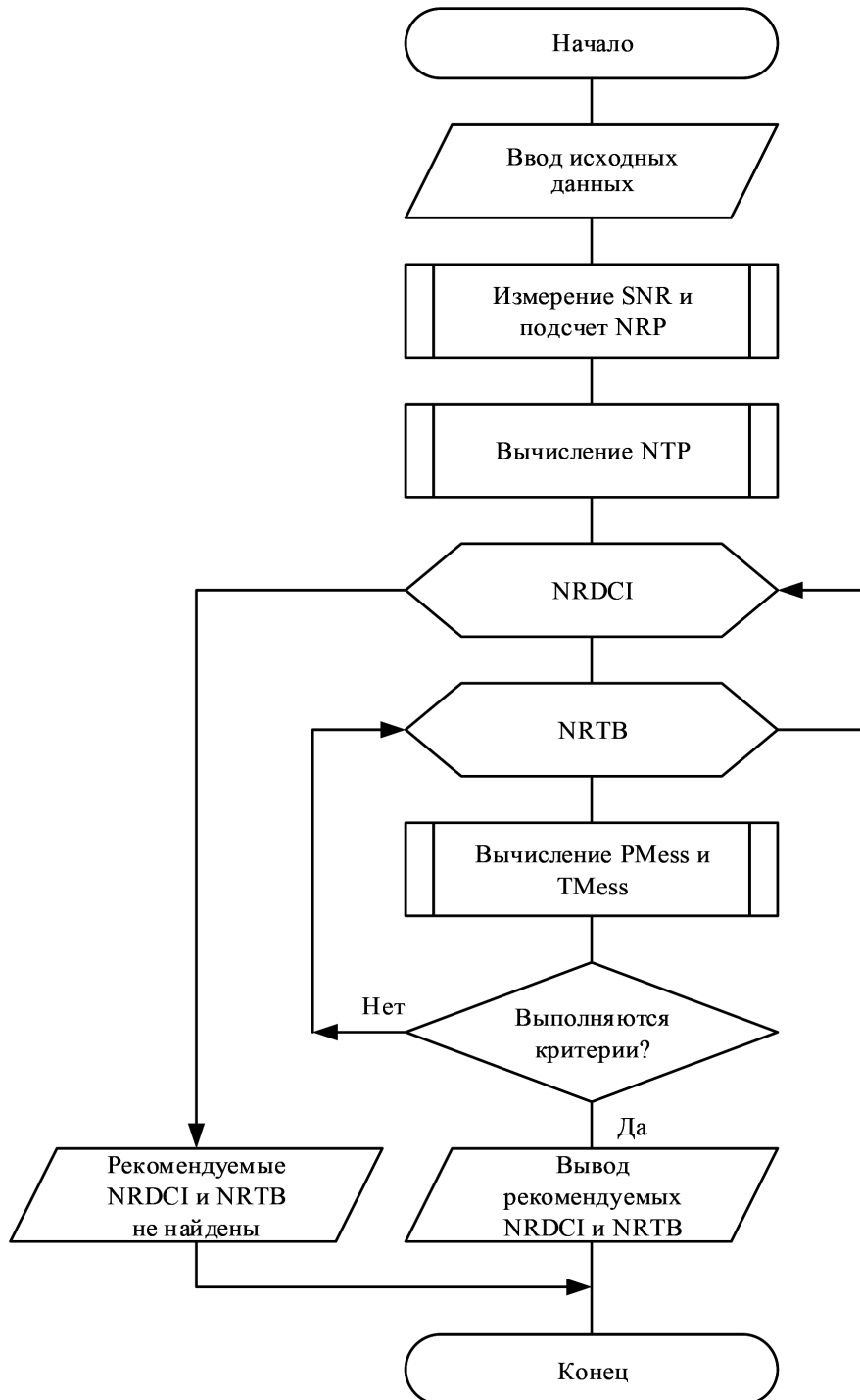


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Примечание: составлена автором по результатам данного исследования

Вычисляется отношение «сигнал/шум» для нисходящего канала после $NRDCI$ повторений DCI:

$$SNRDL = 10^{\frac{SNR + 10 \cdot \lg NRDCI}{10}} \quad (3)$$

С использованием Q-функции оценивается вероятность отсутствия ошибок в DCI на стороне оконечного устройства после применения $NRDCI$ повторений и исправляющего турбокода [16]:

$$PDCI = 1 - Q \left(\frac{\log_2(1 + SNRDL) - RDL \cdot \log_2 MDL + \frac{\log_2 LDCI}{2 \cdot LDCI}}{\sqrt{\frac{SNRDL \cdot (SNRDL + 2) \cdot \log_2^2 e}{(SNRDL + 1)^2 \cdot LDCI}}} \right). \quad (4)$$

Вычисляется отношение «сигнал/шум» для восходящего канала после *NRTB* повторений транспортного блока:

$$SNRUL = 10^{\frac{SNR + 10 \cdot \lg NRTB}{10}}. \quad (5)$$

С использованием Q-функции оценивается вероятность отсутствия ошибок в транспортном блоке на стороне базовой станции после применения *NRTB* повторений и исправляющего турбокода [16]:

$$PDTB = 1 - Q \left(\frac{\log_2(1 + SNRUL) - RUL \cdot \log_2 MUL + \frac{\log_2 LTB}{2 \cdot LTB}}{\sqrt{\frac{SNRUL \cdot (SNRUL + 2) \cdot \log_2^2 e}{(SNRUL + 1)^2 \cdot LTB}}} \right). \quad (6)$$

Вычисляется значение производящей функции процесса доставки телеметрических сообщений при параметре $z = 1$:

$$F(z) = PRP \cdot PDCI \cdot PTB \cdot z^{\frac{\sum_{i=1}^{NRP} TDCI \cdot NRDCI \cdot i}{NRP} + TTB1 \cdot NRTB} \times \sum_{i=1}^{NAtt} \sum_{j=0}^{NAtt-i} \left[[(i-1) + j]^{X(i,j)} \cdot [PRP \cdot (1 - PDCI) \cdot z^{TAtt}]^{i-1} \cdot [(1 - PPR) \cdot z^{TAtt}]^j \right], \quad (7)$$

где функция $X(i, j)$ может принимать значения 1 или 0:

$$X(i, j) = \begin{cases} 1, & (i-1) \cdot j > 0; \\ 0, & (i-1) \cdot j \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Оцениваются значения вероятности и среднего времени доставки сообщения [17, 18]:

$$PMess = F(z) \Big|_{z=1}, \quad (9)$$

$$TMess = \frac{d}{dz} F(z) \Big|_{z=1}, \quad (10)$$

Шаг 7. Проверяется выполнение критериев эффективности доставки сообщений:

$$PMess > GPMess, \quad (11)$$

$$TMess < GTMess. \quad (12)$$

Если условия (11) и (12) выполняются, то осуществляется переход к шагу 8. В противном случае выполнение алгоритма переходит к шагу 5.

Шаг 8. Осуществляется вывод текущих *NRDCI* и *NRTB* в качестве рекомендуемых значений числа повторений информационных блоков. Выполняется переход к шагу 10.

Шаг 9. Осуществляется вывод информации о том, что рекомендуемые значения числа повторений информационных блоков не найдены.

Шаг 10. Конец алгоритма.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе применения логики предложенного алгоритма проведены вычислительные эксперименты с использованием выражений (1)–(10) и следующих исходных данных: *NSc* = 24; *TTP* = 0,716 с; *Tatt* = 1,28 с; *NAtt* = 8; *TDCI* = 0,002 с; *LDCI* = 39; *TTB1* = 0,032 с; *LTB* = 88; *MDL* = 4; *RDL* = 1/3; *MUL* = 4; *RUL* = 1/3; *GPMess* = 0,99; *GTMess* = 10 с. Полученные результаты представлены в виде диаграмм на рис. 2 и 3.

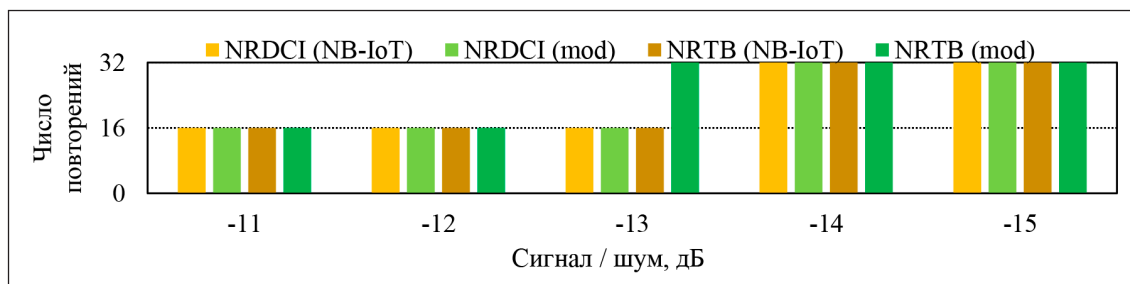


Рис. 2. Выбираемое число повторов информационных блоков при $SNR = -11 \dots -15$ дБ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

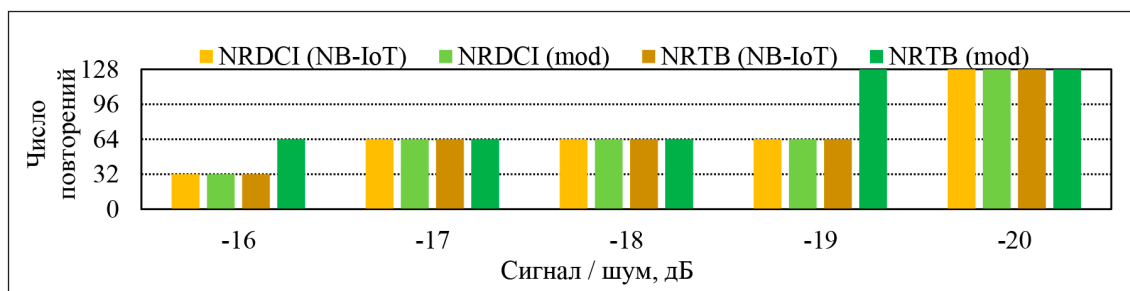


Рис. 3. Выбираемое число повторов информационных блоков при $SNR = -16 \dots -20$ дБ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты вычислительных экспериментов

SNR, дБ	NB-IoT-алгоритм			Модифицированный алгоритм		
	PMess	TMess	Правильность решения	PMess	TMess	Правильность решения
-11	0,9989	2,3094	+	0,9989	2,3094	+
-12	0,9962	2,3422	+	0,9962	2,3422	+
-13	0,9521	2,3923	-	0,9949	3,0094	+
-14	0,9989	2,9646	+	0,9989	2,9646	+
-15	0,9963	2,9952	+	0,9963	2,9952	+
-16	0,9532	3,0178	-	0,9950	4,1692	+
-17	0,9989	4,2750	+	0,9989	4,2750	+
-18	0,9963	4,3019	+	0,9963	4,3019	+
-19	0,9542	4,2706	-	0,9951	6,4915	+
-20	0,9988	6,8960	+	0,9988	6,8960	+

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Диаграммы показывают, что с ухудшением условий доставки данных (уменьшением отношения «сигнал/шум») растут значения повторов передаваемых блоков при реализации стандартного алгоритма, обозначенные столбцами NRDCI (NB-IoT) и NRTB (NB-IoT). При этом увеличиваются и значения повторов информационных блоков, выбираемые на основе использования предложенного (модифицированного) алгоритма. На рассматриваемых диаграммах эти значения обозначены столбцами NRDCI (mod) и NRTB (mod). Видно, что в отдельных случаях (при $SNR = -13$ дБ, $SNR = -16$ дБ и $SNR = -19$ дБ) при выпол-

нении модифицированного алгоритма применяется большее число повторов транспортных блоков, чем при реализации стандартного NB-IoT-решения. Это объясняется тем, что за счет использования повышенных значений параметров NRDCI и NRTB можно обеспечить высокую вероятность доставки сообщений, требуемую в условиях предаварийных ситуаций.

В таблице представлены значения PMess и TMess, которые по данным вычислительных экспериментов обеспечиваются на основе применения стандартного и модифицированного алгоритмов при различных значениях отношения «сигнал/шум».

Будем считать, что правильные решения о выборе числа повторений информационных блоков принимаются в тех случаях, когда выполняются условия (11) и (12). Эти случаи в столбцах «Правильность решения» обозначены плюсами. Тогда результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что применение модифицированного алгоритма позволяет на 30 % повысить обоснованность принятия решений о выборе значений параметров *NRDCI* и *NRTB* по сравнению с использованием стандартного алгоритма узкополосного интернета вещей. Следует также отметить, что предложенный алгоритм не может быть применен в сетях широкополосного интернета вещей, так как в их стандартных версиях практически не используется многократное повторение информационных блоков на физическом уровне для повышения суммарной мощности принятых сигналов.

Заключение

Таким образом, предложен алгоритм выбора числа повторений информационных блоков в беспроводной сети мониторинга газодобывающего оборудования, функционирующей на основе протокола узкополосного интернета вещей. Новизна алгоритма состоит в использовании оригинальных моделей, учитывающих текущие характеристики используемых радиоканалов и передаваемых сигналов в условиях возникновения предаварийных ситуаций при оценивании значений вероятности и среднего времени доставки сообщений. Применение предложенного алгоритма позволяет существенно повысить обоснованность принятия решений при управлении параметрами передачи данных в процессе контроля газовой добычи по сравнению с реализацией стандартного NB-IoT-алгоритма.

Список литературы

1. Chi H. R., Wu C. K., Huang N.-F., Tsang K.-F., Radwan A. A Survey of Network Automation for Industrial Internet-of-Things Toward Industry 5.0 // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2023. Vol. 19 (2). P. 2065–2077. DOI: 10.1109/TII.2022.3215231.
2. Балакшин М. С., Польщиков К. А. Оценка характеристик доставки данных в системе промышленного Интернета вещей // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 8. С. 35–40. DOI: 10.17513/snt.40109.
3. 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.
4. Махди Т. Н. Разработка метода выбора параметров дублирования информационных пакетов в сети удаленного медицинского мониторинга: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2025. 130 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.disserscat.com/content/razrabotka-metoda-vybora-parametrov-dublirovaniya-informatsionnykh-paketov-v-seti-udalennogo> (дата обращения: 08.03.2026).
5. Балакшин М. С., Польщиков К. А. Алгоритм автоматизированного управления параметрами передачи телеметрических сообщений в системе промышленного интернета вещей // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 9. С. 10–15. DOI: 10.17513/snt.40141.
6. Балакшин М. С. Автоматизация управления режимами передачи телеметрических сообщений в сети промышленного интернета вещей: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2025. 132 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.disserscat.com/content/avtomatizatsiya-upravleniya-rezhimami-peredachi-telemetricheskikh-soobshchenii-v-seti-promys> (дата обращения: 08.03.2026).
7. Wang Y., Cao Q., Devaraj M. Using IoT to promote the construction of natural gas industry ecosystem // Second International Conference on Digital Society and Intelligent Systems: Proceedings. 2022. Vol. 12599. P. 125992K. Chendgu, 2023. DOI: 10.1117/12.2673422.
8. Yaser M. J., Polshchikov K. A., Polshchikov 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. URL: <https://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/article/view/208> (дата обращения: 03.04.2026).
9. 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: 03.04.2026).
10. Dangana M., Ansari S., Abbasi Q. H., Hussain S., Imran M. A. Suitability of NB-IoT for Indoor Industrial Environment: A Survey and Insights // Sensors. 2021. Vol. 21 (16). P. 5284. DOI: 10.3390/s21165284.
11. Ren W., Cheng L., Xu H., Liao Y., Zhao Z. Application of Narrow Band Internet of Things Technology in Coalbed Methane Well Production // 4th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). Hohhot. 2019. P. 622–624. DOI: 10.1109/ICMCCE48743.2019.00144.
12. Manzoor B., Homssi B. A., Al-Hourani A. IoT Coverage Enhancement Using Repetition in Energy Constrained Devices: An Analytic Approach // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. 2022. Vol. 6 (2). P. 1122–1131. DOI: 10.1109/TGCN.2021.3132081.
13. Azari A., Miao G., Stefanovic C., Popovski P. Latency-Energy Tradeoff Based on Channel Scheduling and Repetitions in NB-IoT Systems // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi. 2018. P. 1–7. DOI: 10.1109/GLOBECOM.2018.8648024.
14. Saneif F., Hamed F. A link adaptation scheme for reliable downlink communications in narrowband IoT // Microelectronics Journal. 2021. Vol. 114. P. 105154. DOI: 10.1016/j.mejo.2021.105154.
15. Sarkar S. NB-IoT: BLER and Throughput Analysis in Downlink Physical Shared Channel // 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC). Coimbatore. 2022. P. 501–508. DOI: 10.1109/ICESC54411.2022.9885680.
16. Polyanskiy Y., Poor H. V., Verdú S. Channel Coding Rate in the Finite Blocklength Regime // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56 (5). P. 2307–2359. DOI: 10.1109/TIT.2010.2043769.
17. 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.
18. Джамил К. Д. К., Лихошерстов Р. В., Польщиков К. А. Модель передачи видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети // Экономика. Информатика. 2022. Т. 49. № 2. С. 403–415. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.