

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ  
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.391



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-113-121

Оригинальная статья/ Original article

**Оценивание вероятности доставки сообщений в IoT-системе**

**К.А. Польщиков, Т.Н. Махди**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка модели для оценивания вероятности доставки сообщений в системе Интернета вещей медицинского назначения (IoT-системе) и исследования зависимости этой величины от числа повторных передач, применяемых для восполнения искаженных или потерянных телеметрических данных. **Метод.** Передача телеметрических сообщений осуществляется в соответствии с протоколом MQTT-SN. Доставка сообщений выполняется с использованием сервера как устройства-посредника, к которому подключаются устройства-клиенты, т.е. сенсорные устройства, передающие измеряемые данные, и беспроводные устройства медработников, принимающие эти данные. Для разработки модели доставки сообщений предложено применение аппарата вероятностных графов. Проверка адекватности модели выполнялась на основе проведения вычислительных экспериментов. **Результат.** Разработана математическая модель процесса доставки телеметрических сообщений в IoT-системе, которая адекватно отражает зависимость вероятности доставки сообщений от характеристик беспроводных каналов, параметров передаваемых пакетов и подтверждений, а также разрешенного числа повторных передач. **Вывод.** Результаты вычислительных экспериментов, выполненных на основе применения разработанной модели, показали, что модель может быть использована для оценивания вероятности доставки сообщения в системе Интернета вещей медицинского назначения. Применение модели предоставляет возможность выбрать теоретически обоснованные значения допустимого числа повторных передач, устанавливаемого для достижения требуемых значений вероятности доставки сообщений в условиях текущего уровня интенсивности битовых ошибок в беспроводных каналах.

**Ключевые слова:** IoT, протокол MQTT-SN, сенсорное устройство, вероятность доставки телеметрических сообщений, повторные передачи, BER.

**Для цитирования:** К.А. Польщиков, Т.Н. Махди. Оценивание вероятности доставки сообщений в IoT-системе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):113-121. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-113-121

**Estimating the probability of messages delivery in an IoT system**

**K.A. Polshchykov, T.N. Mahdi**

Belgorod National Research University,  
85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop a model for estimating the probability of message delivery in a medical Internet of Things (IoT) system and to study the dependence of this value on the number of retransmissions used to compensate for distorted or lost telemetry data. **Method.** The transmission of telemetry messages is carried out in accordance with the MQTT-SN protocol. Message delivery is performed using the server as an intermediary device to which client devices connect, i.e. sensor devices that transmit measured data, and wireless devices for healthcare workers that receive this data. To develop a message delivery model, it is proposed to use the apparatus of probabilistic graphs. The adequacy of the model was veri-

fied based on computational experiments. **Result.** A mathematical model of the process of delivering telemetry messages in an IoT system has been developed, which adequately reflects the dependence of the probability of message delivery on the characteristics of wireless channels, parameters of transmitted packets and acknowledgments, as well as the allowed number of retransmissions. **Conclusion.** The model can be used to estimate the probability of message delivery in the medical Internet of Things system. The use of the model makes it possible to select theoretically justified values of the permissible number of retransmissions, established to achieve the required values of message delivery probability under the current level of bit error rate in wireless channels.

**Keywords:** IoT, MQTT-SN protocol, sensor device, telemetry message delivery probability, retransmissions, BER.

**For citation:** K.A. Polshchykov, T.N. Mahdi. Estimating the probability of messages delivery in an IoT system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):113-121. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-113-121

**Введение.** В настоящее время актуальны исследования, связанные с разработкой и совершенствованием беспроводных систем передачи данных, применение которых позволяет обеспечить информационный обмен для решения многочисленных прикладных задач. Значительное число научных публикаций посвящено развитию беспроводных самоорганизующихся (ad hoc) сетей (MANET [1–7], FANET [8–11], VANET [12–14]), а также сенсорных сетей [15–17], функционирующих в рамках систем Интернета вещей (Internet of Things, IoT) различного назначения: промышленного Интернета вещей [18, 19], «умного города» [20, 21], «точного сельского хозяйства» [22–24] и т.д.

В последние годы активно развиваются системы Интернета вещей медицинского назначения (Internet of Medical Things, IoMT). Применение IoMT-систем весьма полезно для осуществления удаленного мониторинга за пациентами, нуждающимися в постоянном наблюдении [25, 26]. С помощью таких систем медперсоналу предоставляется возможность в реальном времени отслеживать значения физиологических параметров организма, измеряемые прикрепленными к телу человека датчиками. В этой связи важное значение имеет обеспечение высокой вероятности доставки телеметрических сообщений, что позволяет медицинским работникам при необходимости своевременно оказывать помощь наблюдаемым пациентам при недопустимом ухудшении их показателей жизненно важных функций.

**Постановка задачи.** Многие современные IoMT-системы функционируют на основе применения протокола MQTT-SN [27]. В соответствии с этим протоколом доставка телеметрических сообщений выполняется с использованием сервера как устройства-посредника, к которому подключаются устройства-клиенты.

В качестве таких клиентов в IoMT-системе выступают, во-первых, сенсорные приемо-передающие устройства, которые осуществляют отправку на сервер телеметрических сообщений, содержащих результаты измерений, и во-вторых, беспроводные устройства медицинских работников, на которые вышеуказанные сообщения передаются из сервера. В процессе доставки из сенсорных узлов на сервер и далее из сервера на IoT-устройства медработников телеметрические сообщения могут искажаться под влиянием помех, а также чрезмерно задерживаться в канальных очередях, образующихся из-за низкой скорости передачи данных в беспроводных каналах.

Эти факторы уменьшают величину  $PDEL$  – вероятность доставки сообщений в IoMT-системе. В целях повышения значений  $PDEL$  протоколом MQTT-SN предусмотрены повторные передачи искаженных или потерянных сообщений. Важным параметром протокола является разрешенное число повторных передач. В целях оценивания величины  $PDEL$  и изучения влияния на ее значение числа повторных передач требуется разработать модель доставки сообщений в IoMT-системе.



Из состояния «S1» возможен также переход в состояние «D0», которое соответствует некорректному или несвоевременному приему пакета-подтверждения сенсорным устройством. Вероятность такого перехода равна  $(1 - PDack \cdot PRD)$ . Если моделируемый процесс перешёл в состояние «D0», то из сенсорного устройства на сервер осуществляется повторная передача, т.е. отправляется дубликат пакета PUBLISH.

С вероятностью  $PSpack$  моделируемый процесс перейдет из состояния «D0» в состояние «S1». Возможен также переход из состояния «D0» в состояние «S0». Такой переход осуществится, если дубликат пакета PUBLISH, отправленный из сенсорного устройства, не будет корректно принят сервером. Вероятность перехода из состояния «D0» в состояние «S0» равна  $(1 - PSpack)$ .

Из состояния «S0» с вероятностью  $PSpack$  возможен переход в состояние «S1», а с вероятностью  $(1 - PSpack)$  моделируемый процесс снова перейдет в состояние «S0». В первом случае после предыдущей неудачной попытки дубликат пакета PUBLISH всё же будет корректно принят сервером, а во втором случае повторная попытка его передать из сенсорного устройства на сервер опять окажется неудачной.

Если из сенсорного устройства разрешенное число попыток повторно передать на сервер пакет PUBLISH будет исчерпано, и моделируемый процесс при этом будет находиться в состоянии «D0» или «S0», то возможен переход с вероятностью, равной 1, только в состояние «0», которое обозначает, что доставить сообщение из сенсорного устройства на сервер так и не удалось.

Вероятность доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при  $NDretry = 2$  соответствует вероятности перехода из состояния «B» в состояние «1».

Значение этой вероятности можно оценить с помощью выражения:

$$\begin{aligned}
 PDEL1 &= PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\
 &+ PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\
 &+ PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\
 &+ PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\
 &+ (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\
 &+ (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\
 &+ (1 - PSpack) \cdot (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD = \\
 &= PSpack \cdot PDack \cdot PRD \cdot \left( 1 + \sum_{k=1}^2 (1 - PSpack \cdot PDack \cdot PRD)^k \right). \tag{3}
 \end{aligned}$$

Было проведено также моделирование процесса доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при  $NDretry = 1, 3$  и 4. Результаты моделирования позволили вывести обобщенную формулу для оценивания вероятности доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при любом натуральном числе  $NDretry$ :

$$PDEL1 = PSpack \cdot PDack \cdot PRD \cdot \left( 1 + \sum_{k=1}^{NDretry} (1 - PSpack \cdot PDack \cdot PRD)^k \right). \tag{4}$$

Аналогичным образом проведено моделирование процесса доставки сообщения из сервера на IoT-устройство медработника. В результате удалось получить выражение для оценивания вероятности доставки сообщения из сервера на IoT-устройство медработника:

$$PDEL2 = PDpack \cdot PSack \cdot PRS \cdot \left( 1 + \sum_{k=1}^{NSretry} (1 - PDpack \cdot PSack \cdot PRS)^k \right), \tag{5}$$

где  $PDpack$  – вероятность корректного приема пакета PUBLISH IoT-устройством медработника;  $PSack$  – вероятность корректного приема сервером пакета-подтверждения PUBACK;  $PRS$  – вероятность приема сервером пакета-подтверждения

PUBACK до момента срабатывания таймера повторной передачи;  $NSretry$  – разрешенное число повторных передач из сервера.

Значение вероятности корректного приема пакета PUBLISH IoT-устройством медработника можно вычислить по формуле:

$$PDpack = 1 - (Lpack \cdot BER2), \quad (6)$$

где  $BER2$  – интенсивность битовых ошибок в беспроводных каналах, соединяющих сервер с IoT-устройством медработника.

Значение вероятности корректного приема сервером пакета-подтверждения PUBACK можно вычислить по формуле:

$$PSack = 1 - (Lack \cdot BER2). \quad (7)$$

Наконец, результирующую вероятность доставки сообщения в IoMT-системе можно оценить с помощью выражения:

$$PDEL = PDEL1 + PDEL2. \quad (8)$$

С использованием выражений (1) – (8) были проведены вычислительные эксперименты для исследования зависимости вероятности доставки сообщения в IoMT-системе от различных параметров. Результаты вычислительных экспериментов представлены ниже.

**Обсуждение результатов.** С применением разработанной модели процесса доставки сообщения в IoMT-системе и исходных данных, представленных в табл. 1, были проведены вычислительные эксперименты.

Таблица 1. Исходные данные

Table 1. Initial data

№ п/п	Величины Quantities	Значения Values	Единицы измерения Units of measurement
1	$PRD$	1	-
2	$PRS$	1	-
3	$Lpack$	256	бит
4	$Lack$	256	бит

Полученные результаты показаны на рис. 2 – 4. На рис. 2 изображена диаграмма зависимости величины  $PDEL$  от значений  $BER1$  при фиксированных значениях  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NDretry = 2$  и  $NSretry = 2$ .

Анализ диаграммы показывает, что вероятность доставки сообщений в IoMT-системе уменьшается с ростом интенсивности битовых ошибок в беспроводных каналах.

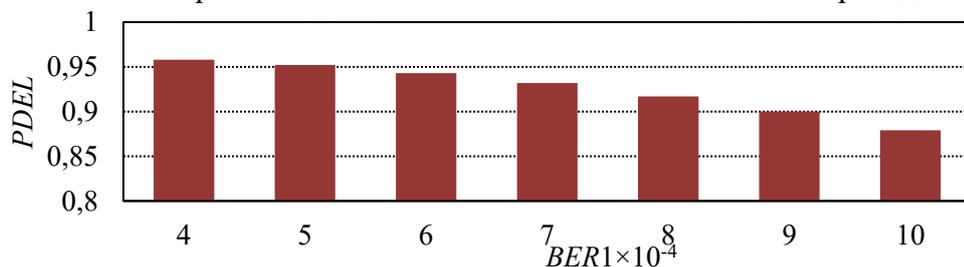


Рис. 2 - Диаграмма зависимости величины  $PDEL$  от значений  $BER1$

при  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NDretry = 2$ ,  $NSretry = 2$

Fig. 2- Diagram of the dependence of the value of  $PDEL$  on the value of  $BER1$

at  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NDretry = 2$ ,  $NSretry = 2$

На рис. 3 показана диаграмма зависимости величины  $PDEL$  от значений  $NDretry$  при фиксированных значениях  $BER1 = 8 \times 10^{-4}$ ,  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$  и  $NSretry = 2$ .

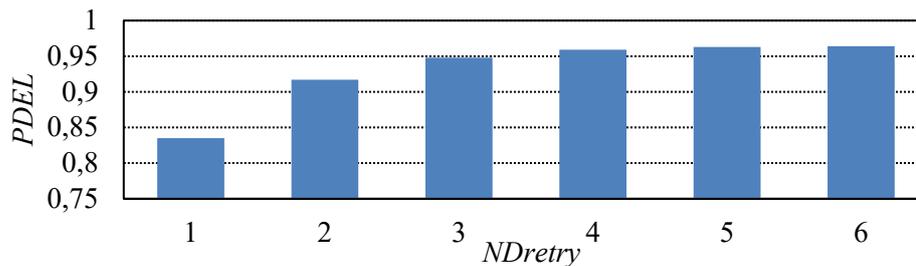


Рис. 3- Диаграмма зависимости величины *PDEL* от значений *NDretry*

при  $BER1 = 8 \times 10^{-4}$ ,  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NSretry = 2$

Fig. 3 - Diagram of the dependence of the value of *PDEL* on the value of *NDretry*

at  $BER1 = 8 \times 10^{-4}$ ,  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NSretry = 2$

Диаграмма зависимости величины *PDEL* от значений *NSretry* при фиксированных значениях  $BER1 = 8 \times 10^{-4}$ ,  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$  и  $NDretry = 2$  представлена на рис. 4. Из указанных диаграмм видно, что с увеличением числа повторных передач вероятность доставки сообщений в ИоМТ-системе повышается.

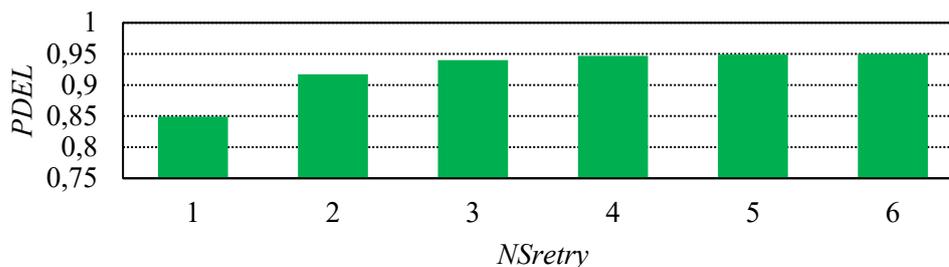


Рис. 4- Диаграмма зависимости величины *PDEL* от значений *NSretry*

при  $BER1 = 8 \times 10^{-4}$ ,  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NDretry = 2$

Fig. 4- Diagram of the dependence of the value of *PDEL* on the value of *NSretry*

at  $BER1 = 8 \times 10^{-4}$ ,  $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ ,  $NDretry = 2$

**Вывод.** Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты вычислительных экспериментов, выполненных на основе применения разработанной модели доставки сообщения в ИоМТ-системе, соответствуют логике процессов в области теории и практики передачи информации.

Представленная в статье модель может быть использована для оценивания вероятности доставки сообщения в системе Интернета вещей медицинского назначения.

Применение модели предоставляет возможность выбрать теоретически обоснованные значения допустимого числа повторных передач, устанавливаемого для достижения требуемых значений вероятности доставки сообщений в условиях текущего уровня интенсивности битовых ошибок в беспроводных каналах.

#### Библиографический список:

1. Wang N., He J., Xiang S., Yang J. Transmission reliability evaluation of the wireless mobile ad hoc network considering the routing protocol and randomness of channel capacity. *Quality and Reliability Engineering International*. 2024; 40: 664-680. DOI: 10.1002/qre.3432.
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): 156-163. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24313935>.
3. Elias E.M., Baharuddin M.N., Zaki M., Nur A., Roshartini O., Santoso B. Analyzing Data Transmission Reliability in Mobile Ad-Hoc Networks under Dynamic Scenarios. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2024; 18(11): 41. DOI: 10.3991/ijim.v18i11.49061.
  4. Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*. 2017; 1839: 174-186. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31032898>.
  5. Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Zdorovtsov A.D. Neuro-Fuzzy Control of Data Sending in a Mobile Ad Hoc Network. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017; 9(2S): 1494-1501. DOI: 10.4314/jfas.v9i2s.856.
  6. Bhatti D.S., Saleem S., Imran A. et al. Detection and isolation of wormhole nodes in wireless ad hoc networks based on post-wormhole actions. *Scientific Reports*. 2024; 14. DOI: 10.1038/s41598-024-53938-9.
  7. Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Kiseleva E.D. Mathematical Model of Multimedia Information Exchange in Real Time Within a Mobile Ad Hoc Network. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2018; 18(6): 20-24. URL: [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/201806/20180603.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/201806/20180603.pdf).
  8. Soran A.H., Marwan A.M., Sazan K.S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Review of Communications, Challenges, Applications, Future direction and Open Research Topics. *ITM Web Conferences*. 2024; 64: 01002. DOI: 10.1051/itmconf/20246401002.
  9. Kundu J., Alam S., Das J. C., Dey A., De D. Trust based Flying ad-hoc Network: A Survey. *IEEE Access*. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3419904.
  10. Джамил К.Дж.К., Лихошерстов Р.В., Польщиков К.А. Модель передачи видеопотоков в летающей беспилотной самоорганизующейся сети. *Экономика. Информатика*. 2022; 49(2): 403-415. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415.
  11. Bhatia T.K., Gilhotra S., Bhandari S.S., Suden R. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2024; 11. URL: <https://publications.eai.eu/index.php/ew/article/view/5489>.
  12. Hemmati A., Zarei M., Rahmani A.M. A systematic review of congestion control in internet of vehicles and vehicular ad hoc networks: Techniques, challenges, and open issues. *International Journal of Communication Systems*. 2024; 37(1): e5625. DOI: 10.1002/dac.5625.
  13. Wu C.-M., Tsai C.-T., Hou C.-C., Yang J.-J., Lin G.-D., Kuang M.-Y. Emergency Message Broadcast Mechanism in Vehicular Ad-Hoc Networks Based on Reinforcement Learning With Contention Estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2024. DOI: 10.1109/TIV.2024.3418778.
  14. Alaya B., Sellami L., Lorenz P. An ontological approach to the detection of anomalies in vehicular ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*. 2024; 156: 103417. DOI: 10.1016/j.adhoc.2024.103417.
  15. Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Федоров В.И. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением. *Экономика. Информатика*. 2023; 50(2): 439-447. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447
  16. Gulati K., Boddu R.S.K., Kapila D., Bangare S.L., Chandnani N., Saravanan G. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*. 2022; 51(1): 161-165. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.067.
  17. 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; 11(4): 168-174. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v11i4.3779>.
  18. Munirathinam S. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). *Advances in Computers*. 2020; 117(1): 129-164. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.01.
  19. Tabaa M., Monteiro F., Bensag H., Dandache A. Green Industrial Internet of Things from a smart industry perspectives. *Energy Reports*. 2020; 6(6): 430-446. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.022.
  20. Jiang D. The construction of smart city information system based on the Internet of Things and cloud computing. *Computer Communications*, 2020; 150: 158-166. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.035.
  21. Ghazal T.M., Hasan M.K., Alzoubi H.M., Alshurideh M., Ahmad M., Akbar S.S. Internet of Things Connected Wireless Sensor Networks for Smart Cities. *Studies in Computational Intelligence*. 2023; 1056. DOI: 10.1007/978-3-031-12382-5\_107.
  22. Sanjeevi P., Prasanna S., Siva Kumar B., Gunasekaran G., Alagiri I., Vijay Anand R. Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2020; 31:e3978. DOI: 10.1002/ett.3978.
  23. Polshchikov K., Shabeeb A. H. T., Lazarev S., Kiselev V. Justification for the decision on loading channels of the network of geocological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021; 9(3): 781-787. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v9i3.2281>.

24. Abu N. S., Bukhari W. M., Ong C. H., Kassim A. M., Izzuddin T. A., Sukhaimie M.N., Norasikin M.A., Rasid A.F.A. Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control*. 2022; 3(3). URL: <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/14159>.
25. Razdan S., Sharma S. Internet of Medical Things (IoMT): Overview, Emerging Technologies, and Case Studies. *IETE Technical Review*. 2021; 39(4): 775-788. DOI: 10.1080/02564602.2021.1927863.
26. Arora S. IoMT (Internet of Medical Things): Reducing Cost While Improving Patient Care. *IEEE Pulse*, 2020; 11(5): 24-27. DOI: 10.1109/MPULS.2020.3022143.
27. Shanmugapriya D., Patel A., Srivastava G., Lin J.C.W. MQTT Protocol Use Cases in the Internet of Things. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021; 13147. DOI: 10.1007/978-3-030-93620-4\_12.
28. Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhosherstov R.V., Kiselev V.E. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2022; 10(6): 84-95. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v10i6.3381>.

#### References:

1. Wang N., He J., Xiang S., Yang J. Transmission reliability evaluation of the wireless mobile ad hoc network considering the routing protocol and randomness of channel capacity. *Quality and Reliability Engineering International*. 2024; 40: 664-680. DOI: 10.1002/qre.3432.
2. Konstantinov I.S., Polshchikov K.A., Lazarev S.A. Simulation model for transmitting information flows in a special-purpose mobile radio network. *Scientific bulletins of Belgorod State University. Series: Economics. Computer science*. 2015; 13(210): 156-163. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24313935>. (In Russ).
3. Elias E.M., Baharuddin M.N., Zaki M., Nur A., Roshartini O., Santoso B. Analyzing Data Transmission Reliability in Mobile Ad-Hoc Networks under Dynamic Scenarios. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2024; 18(11): 41. DOI: 10.3991/ijim.v18i11.49061.
4. Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*. 2017; 1839: 174-186. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31032898>.
5. Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Zdorovtsov A.D. Neuro-Fuzzy Control of Data Sending in a Mobile Ad Hoc Network. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017; 9(2S): 1494-1501. DOI: 10.4314/jfas.v9i2s.856.
6. Bhatti D.S., Saleem S., Imran A. et al. Detection and isolation of wormhole nodes in wireless ad hoc networks based on post-wormhole actions. *Scientific Reports*. 2024; 14. DOI: 10.1038/s41598-024-53938-9.
7. Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Kiseleva E.D. Mathematical Model of Multimedia Information Exchange in Real Time Within a Mobile Ad Hoc Network. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2018; 18(6): 20-24. URL: [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/201806/20180603.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/201806/20180603.pdf).
8. Soran A.H., Marwan A.M., Sazan K.S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Review of Communications, Challenges, Applications, Future direction and Open Research Topics. *ITM Web Conferences*. 2024; 64: 01002. DOI: 10.1051/itmconf/20246401002.
9. Kundu J., Alam S., Das J. C., Dey A., De D. Trust based Flying ad-hoc Network: A Survey. *IEEE Access*. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3419904.
10. Jameel K.J.Q., Likhosherstov R.V., Polshchikov K.A. Model of Video Streams Transmission in a Flying Ad Hoc Network. *Economics. Information technologies*. 2022; 49(2): 403-415 DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415. (In Russ).
11. Bhatia T.K., Gilhotra S., Bhandari S.S., Suden R. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2024; 11. URL: <https://publications.eai.eu/index.php/ew/article/view/5489>.
12. Hemmati A., Zarei M., Rahmani A.M. A systematic review of congestion control in internet of vehicles and vehicular ad hoc networks: Techniques, challenges, and open issues. *International Journal of Communication Systems*. 2024; 37(1): e5625. DOI: 10.1002/dac.5625.
13. Wu C.-M., Tsai C.-T., Hou C.-C., Yang J.-J., Lin G.-D., Kuang M.-Y. Emergency Message Broadcast Mechanism in Vehicular Ad-Hoc Networks Based on Reinforcement Learning With Contention Estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2024. DOI: 10.1109/TIV.2024.3418778.
14. Alaya B., Sellami L., Lorenz P. An ontological approach to the detection of anomalies in vehicular ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*. 2024; 156: 103417. DOI: 10.1016/j.adhoc.2024.103417.
15. Yaser M.J.Y., Polshchikov K.A., Fedorov V.I. Message Delivery Model in a LowPower Sensor Network. *Economics. Information technologies*. 2023; 50(2): 439-447 DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447. (In Russ).
16. Gulati K., Boddu R.S.K., Kapila D., Bangare S.L., Chandnani N., Saravanan G. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*. 2022; 51(1): 161-165. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.067.

17. 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; 11(4): 168-174. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v11i4.3779>.
18. Munirathinam S. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). *Advances in Computers*. 2020; 117(1): 129-164. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.01.
19. Tabaa M., Monteiro F., Bensag H., Dandache A. Green Industrial Internet of Things from a smart industry perspectives. *Energy Reports*. 2020; 6(6): 430-446. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.022.
20. Jiang D. The construction of smart city information system based on the Internet of Things and cloud computing. *Computer Communications*, 2020; 150: 158-166. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.035.
21. Ghazal T.M., Hasan M.K., Alzoubi H.M., Alshurideh M., Ahmad M., Akbar S.S. Internet of Things Connected Wireless Sensor Networks for Smart Cities. *Studies in Computational Intelligence*. 2023; 1056. DOI: 10.1007/978-3-031-12382-5\_107.
22. Sanjeevi P., Prasanna S., Siva Kumar B., Gunasekaran G., Alagiri I., Vijay Anand R. Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2020; 31:e3978. DOI: 10.1002/ett.3978.
23. Polshchikov K., Shabeeb A. H. T., Lazarev S., Kiselev V. Justification for the decision on loading channels of the network of geocological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021; 9(3): 781-787. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v9i3.2281>.
24. Abu N. S., Bukhari W. M., Ong C. H., Kassim A. M., Izzuddin T. A., Sukhaimie M.N., Norasikin M.A., Rasid A.F.A. Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control*. 2022; 3(3). URL: <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/14159>.
25. Razdan S., Sharma S. Internet of Medical Things (IoMT): Overview, Emerging Technologies, and Case Studies. *IETE Technical Review*. 2021; 39(4): 775-788. DOI: 10.1080/02564602.2021.1927863.
26. Arora S. IoMT (Internet of Medical Things): Reducing Cost While Improving Patient Care. *IEEE Pulse*, 2020; 11(5): 24-27. DOI: 10.1109/MPULS.2020.3022143.
27. Shanmugapriya D., Patel A., Srivastava G., Lin J.C.W. MQTT Protocol Use Cases in the Internet of Things. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021; 13147. DOI: 10.1007/978-3-030-93620-4\_12.
28. Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhoshesterov R.V., Kiselev V.E. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2022; 10(6): 84-95. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v10i6.3381>.

**Сведения об авторах:**

Польщикова Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных и робототехнических систем; [polshchikov@mail.ru](mailto:polshchikov@mail.ru).

Махди Тарек Нассер, аспирант кафедры прикладной информатики и информационных технологий; [tareq.nasser.m@gmail.com](mailto:tareq.nasser.m@gmail.com).

**Information about authors:**

Konstantin A. Polshchikov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Assoc. Prof., Prof., Department of Information and Robotic Systems; [polshchikov@mail.ru](mailto:polshchikov@mail.ru).

Mahdi Tarek Nasser, Graduate student, Department of Applied Informatics and Information Technologies; [tareq.nasser.m@gmail.com](mailto:tareq.nasser.m@gmail.com).

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.**

**Поступила в редакцию/ Received 16.09.2024.**

**Одобрена после рецензирования / Revised 26.10.2024.**

**Принята в печать / Accepted for publication 17.01.2025.**