

УДК 004.85
DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-1-216-226
EDN WICNHS

Модель передачи сообщений в сети узкополосного интернета вещей газодобывающего предприятия

¹ Польщикова К.А., ² Терский М.О.

¹ Корпорация «Фазотрон – Научно-исследовательский институт радиостроения»,
Россия, 115516, г. Москва, Кавказский Бульвар, д. 59

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85
polshchikov@bsuedu.ru, mailbox4job@mail.ru

Аннотация. В статье представлено исследование, которое нацелено на обеспечение требуемых вероятностно-временных характеристик доставки сообщений в сети узкополосного интернета вещей, развернутой для контроля работы оборудования газовой добычи. С использованием математического аппарата вероятностно-временных графов разработана модель передачи сообщений в указанной сети, которая адекватно отражает зависимость вероятности и среднего времени доставки сообщений от основных параметров исследуемого процесса. Проведены вычислительные эксперименты, результаты которых показали возможность применения разработанной модели для оптимизации процесса передачи сообщений о состоянии контролируемых технических объектов газодобывающего предприятия.

Ключевые слова: узкополосный интернет вещей, контроль оборудования, добыча газа, телеметрия, вероятностно-временной граф

Для цитирования: Польщикова К.А., Терский М.О. 2026. Модель передачи сообщений в сети узкополосного интернета вещей газодобывающего предприятия. *Экономика. Информатика*, 53(1): 216–226. DOI10.52575/2687-0932-2026-53-1-216-226. EDN WICNHS

Model for Transmitting Messages in a Narrowband Internet of Things Network of a Gas Producing Enterprise

¹ Konstantin A. Polshchikov, ² Maxim O. Terskiy

¹ Phazotron Corporation – Research Institute of Radio Engineering,
59 Kavkazsky Blvd., Moscow 115516, Russia

² Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod 308015, Russia
polshchikov@bsuedu.ru, mailbox4job@mail.ru

Abstract. This article presents a solution to a pressing scientific and technical problem: developing a message transmission model for a gas production enterprise's wireless network based on the NB-IoT narrowband Internet of Things protocol. The model was developed using the mathematical apparatus of probabilistic-temporal graphs. The scientific novelty of the developed model lies in its adequate reflection of the dependence of the probability and average message delivery time on the transmission characteristics of preambles, control information, and transport blocks. Computational experiments demonstrated that the model can be used to substantiate the implementation characteristics of the main stages of message delivery. The application of the presented model allows for the optimization of parameter values used in the delivery of messages containing data on the controlled parameters of gas production equipment. Further research on the topic of this article should be devoted to developing the proposed model in terms of its ability to estimate the probabilities of successful attempts to complete various stages of message delivery in a narrowband internet of things network operating over cellular communications. This will

© Польщикова К.А., Терский М.О., 2026

make it possible to improve algorithms for managing the process of transmitting telemetry data on the state of individual sections of gas production equipment in pre-emergency situations.

Keywords: Narrowband Internet of Things, equipment control, gas production, telemetry, probability-time graph

For citation: Polshchikov K.A., Terskiy M.O. 2026. Model for Transmitting Messages in a Narrowband Internet of Things Network of a Gas Producing Enterprise. *Economics. Information technologies*, 53(1): 216–226 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-1-216-226. EDN WICNHS

Введение

В настоящее время для осуществления мониторинга и управления технологическими процессами применяются различные цифровые системы передачи данных, в частности, Wi-Fi-сети для локального контроля и видеонаблюдения [Sathya, Zhang, Yavuz, 2022; Du, 2025], ячеистые (mesh) Zigbee-сети [Jha, Kaur, 2023; Cobo et al., 2023], беспроводные самоорганизующиеся сети [Agrawal et al., 2024; Al-Shamkhee et al., 2025; Alghazali et al., 2025], энергоэффективные беспроводные сети дальнего радиуса действия [Taleb et al., 2022; Almufareh et al., 2024; Yaser, Polshchikov, Polshchikov, 2023], широкополосные WiMAX-сети, обеспечивающие покрытие значительных промышленных территорий [Porhelvi, Titus, 2024; Arumun, Akowua, 2025]. Широко используются также системы мобильного интернета вещей, построенные, в частности, в соответствии со стандартом NB-IoT (NarrowBand Internet of Things) [Ugwuanyi, Hansawangkit, Irvine, 2020; Hu et al., 2022; Lo et al., 2025]. Такие системы базируются на применении сотовой связи и обеспечивают низкоскоростную передачу небольших объемов данных многочисленными оконечными устройствами в узкой полосе частот [Qasim et al., 2024; Iiyambo, Hancke, Abu-Mahfouz, 2024]. Благодаря способности передавать телеметрическую информацию на значительные расстояния с низким энергопотреблением при размещении сенсорных узлов в труднодоступных местах NB-IoT-сети активно применяются для контроля функционирования оборудования в сфере добычи углеводородного сырья [Головнин, Гаврилов, 2021; Quamar, Khan, Khalid, 2023; Guan et al., 2023].

Известны многочисленные примеры использования сетей сотового узкополосного интернета вещей на газодобывающих предприятиях [Ni, Yang, Wang, 2021; Wang, Cao, Devaraj, 2023]. Тысячи оконечных устройств с датчиками подключаются к NB-IoT-сети и через базовые станции периодически передают на сервер данные мониторинга корректности работы оборудования. Эти данные в виде сообщений поступают в центр принятия решений, в котором формируются команды для необходимых управляющих воздействий. При возникновении нештатных ситуаций оконечные устройства, датчики которых зафиксировали выход контролируемых величин за пределы стандартного режима функционирования, немедленно пытаются проинформировать об этом центр принятия решений. В предаварийных условиях возможны случаи, когда десятки устройств в течение короткого интервала времени стремятся направить по радиоканалам соответствующие сообщения. В таких ситуациях может возникать временный дефицит канальных ресурсов, приводящий к потерям или недопустимым задержкам важных сообщений. Вследствие этого возможны очень серьезные негативные последствия, если, например, не удастся вовремя перекрыть определенные задвижки, чтобы предотвратить аварию.

С учетом вышеизложенного можно утверждать, что важное значение имеет обеспечение требуемых вероятностно-временных характеристик доставки сообщений в NB-IoT-сети газодобывающего предприятия. Разработкам, способствующим достижению этой цели, в научно-технической литературе уделяется недостаточно внимания. В этой связи создание модели, предназначенной для оценивания вероятности и среднего времени доставки сообщений в сети узкополосного интернета вещей, является актуальной задачей.

Разработка модели

В соответствии с протоколом NB-IoT при передаче данных от оконечных устройств на базовую станцию используются каналы восходящих сообщений (uplink-каналы), а в обратном

направлении осуществляется передача по каналам нисходящих сообщений (downlink-каналам). В процессе доставки сообщения из оконечного устройства через базовую станцию на сервер выполняются следующие этапы:

- 1) передача преамбулы по uplink-каналу;
- 2) передача управляющей информации (Downlink Control Information, DCI) по downlink-каналу;
- 3) передача по uplink-каналу транспортного блока (Transport Block, TB), в котором содержится сообщение.

Предлагаемая модель разрабатывалась с использованием математического аппарата вероятностно-временных графов, который позволяет адекватно представить основные состояния исследуемого процесса и переходов между ними [Ясир, Польщиков, Федоров, 2023; Yaser et al., 2025]. Граф, моделирующий передачу сообщений в сети узкополосного интернета вещей газодобывающего предприятия, представлен на рис. 1. Он соответствует такому варианту настройки параметров протокола NB-IoT, когда число попыток, которые разрешено предпринять для доставки сообщения из оконечного устройства на сервер, не превышает $N = 2$.

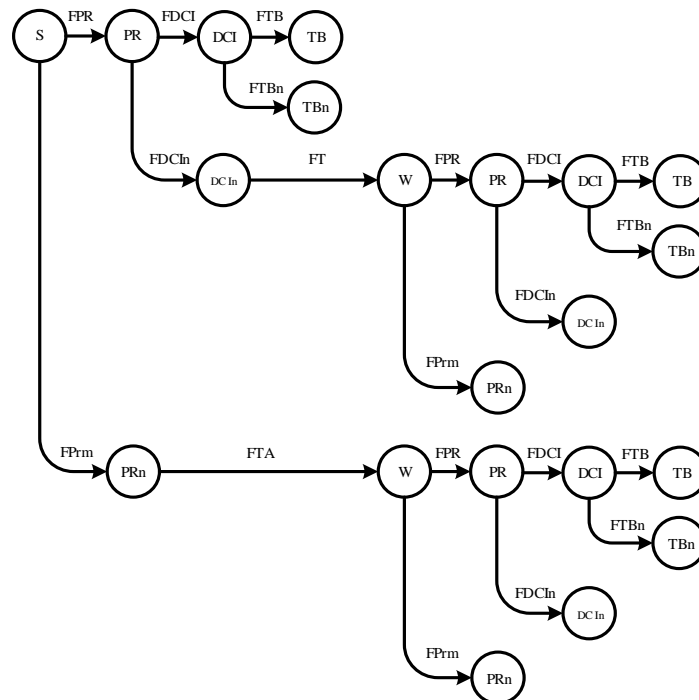


Рис. 1. Граф при $N = 2$

Fig. 1. Graph for $N = 2$

К беспроводной сети подключены многочисленные оконечные устройства, в составе которых функционируют датчики, измеряющие характеристики работы газодобывающего оборудования. Приемно-передающий модуль каждого оконечного устройства большую часть времени находится в режиме сна, в котором обеспечивается минимальное энергопотребление. Начальная вершина «S» на рис. 1 соответствует состоянию, когда оконечное устройство, датчик которого зафиксировал отклонение контролируемого параметра от нормы, «пробуждается» и предпринимает попытку связаться с базовой станцией с помощью отправки преамбулы (специальных сигналов) по uplink-каналу. При этом преамбула передается с многочисленными повторениями в течение суммарного времени TPR . Повторения (repetitions) позволяют повысить вероятность PPR корректной доставки преамбулы на базовую станцию [Manzoor, Homssi, Hourani, 2022]. В случае корректной доставки преамбулы моделируемый процесс переходит в состояние, обозначаемое вершиной «PR». Функция ребра графа, соединяющего вершину «S» с вершиной «PR», имеет вид:

$$FPR(z) = PPR \cdot z^{TPR}, \quad (1)$$

где z – безразмерный параметр функции ребра графа.

Получив преамбулу, базовая станция по downlink-каналу отправляет информационный блок DCI, в котором содержатся данные о канальных ресурсах, выделяемых оконечному устройству для дальнейшей передачи сообщения. В случае корректного приема оконечным устройством этой управляющей информации осуществляется переход из вершины «PR» к вершине «DCI». Функция ребра графа, соединяющего эти вершины, имеет вид:

$$FDCI(z) = PDCI \cdot z^{TDCI}, \quad (2)$$

где $PDCI$ – вероятность корректного приема DCI оконечным устройством; $TDCI$ – среднее время передачи DCI с учетом переповторов.

После корректного приема DCI оконечное устройство с использованием предписанных канальных ресурсов отправляет по uplink-каналу блок ТВ, в котором содержится сообщение об отклонении контролируемой величины от нормы. В случае корректной передачи этого транспортного блока моделируемый процесс переходит из состояния, обозначаемого вершиной «DCI», в состояние, обозначаемое вершиной «ТВ». Функция ребра, соответствующего такому переходу, имеет вид:

$$FTB(z) = PTB \cdot z^{TTB}, \quad (3)$$

где PTB – вероятность корректной доставки блока ТВ; TTB – время передачи блока ТВ с учетом его переповторов.

Оказавшись в терминальной вершине «ТВ», моделируемый процесс завершается успешной доставкой сообщения. Если же транспортный блок не удалось корректно передать по uplink-каналу, то осуществляется переход из состояния «DCI» в состояние «ТВn». такому переходу соответствует следующая функция ребра:

$$FTBn(z) = (1 - PTB) \cdot z^{TTB}. \quad (4)$$

Безуспешной может быть также попытка корректно доставить DCI оконечному устройству. В этом случае из вершины «PR» осуществляется переход к вершине «DCIn». Функция ребра, соответствующего такому переходу, имеет вид:

$$FDCIn(z) = (1 - PDCI) \cdot z^{TDCI}. \quad (5)$$

Из вершины «DCIn» (если она не является терминальной) осуществляется переход к вершине «W», которая моделирует состояние, когда после определенной паузы оконечное устройство начинает осуществлять следующую попытку связаться с базовой станцией. такому переходу соответствует следующая функция ребра:

$$FT(z) = z^{TAtt - TPR - TDCI}, \quad (6)$$

где $TAtt$ – интервал времени между попытками отправить преамбулу по uplink-каналу.

Следует также учитывать, что из начальной вершины «S» или из вершины «W» возможен переход к вершине «PRn». Такой переход произойдет в том случае, если преамбула не будет корректно доставлена по uplink-каналу. Функция ребра, соответствующего этому переходу, имеет вид:

$$FPRn(z) = (1 - PPR) \cdot z^{TPR}. \quad (7)$$

Из вершины «PRn» (если она не является терминальной) осуществляется переход к вершине «W». Такому переходу соответствует следующая функция ребра:

$$FTA(z) = z^{TA_{tt}-TPR} \quad (8)$$

В случаях перехода к одной из терминальных вершин «PRn», «DCIn» или «TBn» моделируемый процесс завершается тем, что все разрешенные попытки доставить сообщение оказались безуспешными.

Производящая функция, учитывающая переходы из начальной вершины «S» ко всем трем терминальным вершинам «TB» при $N = 2$, может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} F2(z) = & FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^1 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^1 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0. \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 2 показан граф, моделирующий исследуемый процесс при $N = 3$.

Производящая функция, учитывающая переходы из начальной вершины «S» ко всем семи терминальным вершинам «TB» при $N = 3$, может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} F3(z) = & FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^1 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^2 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^1 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot 2 \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^1 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^1 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^2 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0. \end{aligned} \quad (10)$$

Исследования показали, что граф, моделирующий исследуемый процесс при $N = 4$, содержит 15 терминальных вершин «TB», а производящая функция, учитывающая все переходы к ним из начальной вершины «S», имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} F4(z) = & FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^1 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^2 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^0 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^3 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^1 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot 2 \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^1 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^1 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot 3 \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^1 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^2 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^2 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot 3 \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^2 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^1 + \\ & + FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^3 \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^0. \end{aligned} \quad (11)$$

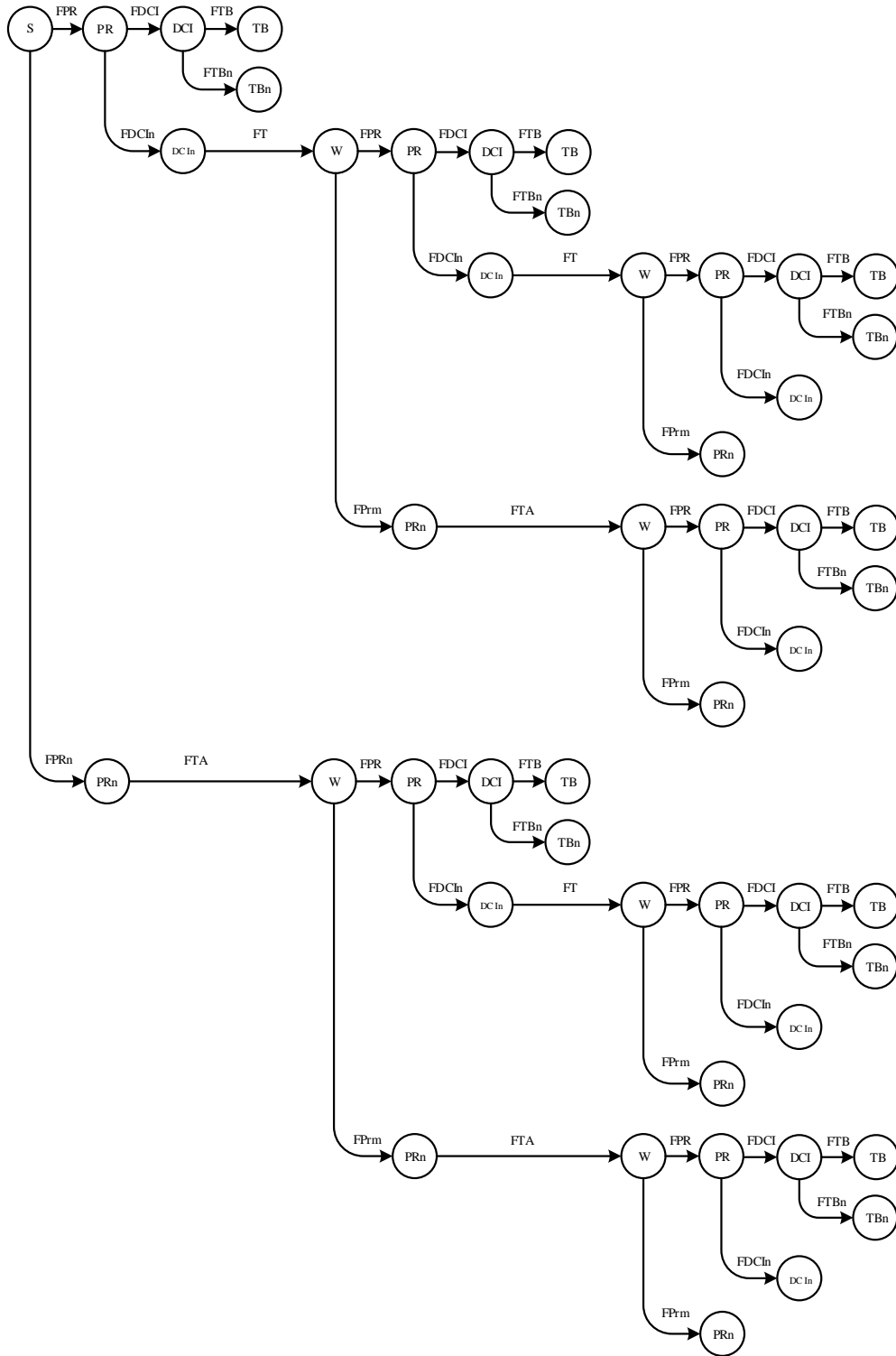


Рис. 2. Граф при $N = 3$
 Fig. 2. Graph for $N = 3$

Сопоставление выражений (9)–(11) позволяет выявить в них закономерности и представить обобщенное выражение для производящей функции при любом натуральном N :

$$F(z) = FPR(z) \cdot FDCI(z) \cdot FTB(z) \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{N-i} \left[[(i-1) + j]^{X(i,j)} \cdot [FPR(z) \cdot FDCIn(z) \cdot FT(z)]^{i-1} \cdot [FPRn(z) \cdot FTA(z)]^j \right]. \quad (12)$$

При этом функция $X(i, j)$ принимает следующие значения:

$$X(i, j) = \begin{cases} 1, & (i-1) \cdot j > 0; \\ 0, & (i-1) \cdot j \leq 0. \end{cases} \quad (13)$$

Тогда для оценивания вероятности $PDMess$ и среднего времени $TDMess$ доставки сообщений, содержащих данные о контролируемых параметрах газодобывающего оборудования, можно использовать следующие выражения:

$$PDMess = F(z) \Big|_{z=1}, \quad (14)$$

$$TDMess = \frac{d}{dz} F(z) \Big|_{z=1}. \quad (15)$$

Полученные выражения (1)–(15) позволяют оценить вероятностно-временные характеристики процесса доставки данных в сети узкополосного интернета вещей газодобывающего предприятия. С использованием этих выражений проведены вычислительные эксперименты, результаты которых представлены ниже.

Вычислительные эксперименты

Вычисления выполнялись с использованием следующих исходных данных: $TPR = 0,716$ с; $TDCI = 0,64$ с; $TTB = 2,048$ с; $TAtt = 1,28$ с; $PTB = 0,98$; $PDCI = 0,8$ и $N = 8$.

На рис. 3 и 4 показаны графики зависимости вероятности и среднего времени доставки сообщений в сети узкополосного интернета вещей от вероятности корректной доставки преамбулы на базовую станцию.

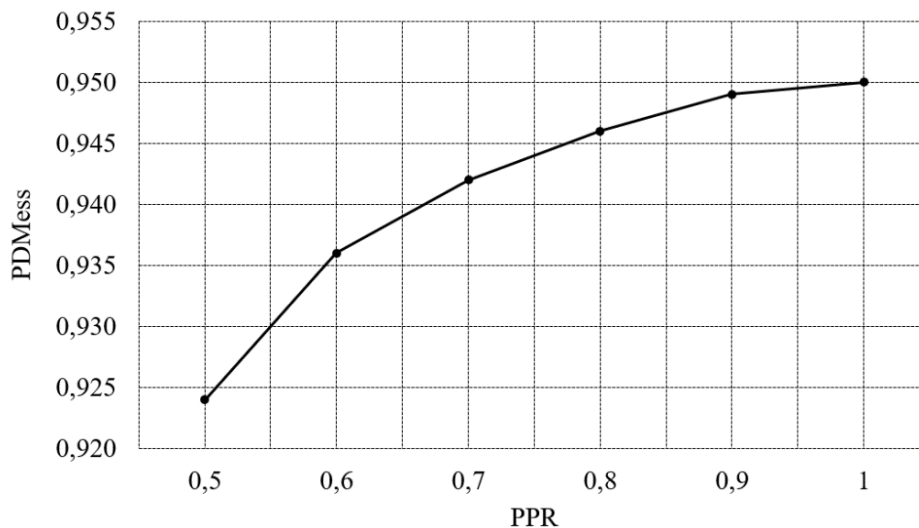


Рис. 3. График зависимости вероятности доставки сообщений от вероятности корректной доставки преамбулы на базовую станцию

Fig. 3. Graph of the dependence of the message delivery probability on the probability of preamble correct delivery to the base station

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что с помощью разработанной модели можно обосновать характеристики определенных этапов доставки сообщений в NB-IoT-сети газодобывающего предприятия. Так, например, чтобы при рассмотренных выше исходных данных добиться выполнения условия $TDMess \leq 4$ (с), необходимо обеспечить значение вероятности корректной доставки преамбулы на базовую

станцию не ниже 0,73. В качестве инструментария повышения величины PPR , как было указано выше, может быть использовано увеличение числа повторений преамбулы по uplink-каналу.

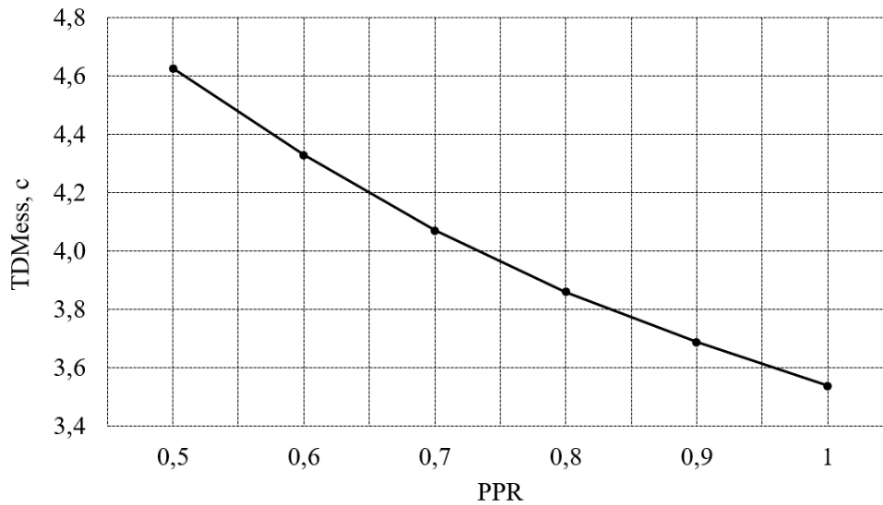


Рис. 4. График зависимости среднего времени доставки сообщений от вероятности корректной доставки преамбулы на базовую станцию

Fig. 4. Graph of the dependence of the average message delivery time on the probability of preamble correct delivery to the base station

Заключение

Таким образом, в статье представлено решение актуальной научно-технической задачи, состоящей в разработке модели передачи сообщений в беспроводной сети газодобывающего предприятия, функционирующей на основе протокола узкополосного интернета вещей NB-IoT. При создании модели использован математический аппарат вероятностно-временных графов. Научная новизна разработанной модели состоит в том, что она адекватно отражает зависимость вероятности и среднего времени доставки сообщений от характеристик передачи преамбул, управляющей информации и транспортных блоков. Проведение вычислительных экспериментов показало, что модель может быть использована для обоснования характеристик реализации основных этапов доставки сообщений. Применение представленной модели позволяет оптимизировать выбор значений параметров, используемых в процессе доставки сообщений, в которых содержатся данные о контролируемых параметрах газодобывающего оборудования.

Дальнейшие исследования по теме представленной статьи целесообразно посвятить развитию разработанной модели в части возможности оценивания на её основе значений вероятности успешных попыток выполнения различных этапов доставки сообщений в сети узкополосного интернета вещей, работающей на основе сотовой связи. Это даст возможность усовершенствовать алгоритмы управления процессом передачи телеметрических данных о состоянии отдельных участков газодобывающего оборудования в предаварийных ситуациях.

Список литературы

- Головнин И.В., Гаврилов А.В. 2021. Применение автономных датчиков при работе в стандарте NB-IoT на примере нефтедобывающего предприятия. *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика*, 1: 142–148.
- Ясир М.Д.Я., Польшиков К.А., Федоров В.И. 2023. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением. *Экономика. Информатика*, 50(2): 439–447. DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.
- Agrawal N.K., Kumar S., Bisht G.S., Srivastav A., Bansla V., Jain A. 2024. Development of a Novel Quality of Service Aware Video Streaming on Demand System for the Internet of Thing Enabled MANET. 2024

- International Conference on Communication, Computer Sciences and Engineering (IC3SE). Gautam Buddha Nagar: 80–85.
- Almufareh M.F., Humayun M., Ahmad Z., Khan A. 2024. An Intelligent LoRaWAN-Based IoT Device for Monitoring and Control Solutions in Smart Farming Through Anomaly Detection Integrated with Unsupervised Machine Learning. *IEEE Access*, 12: 119072–119086.
- Al-Shamkhee A.A.O., Almawlawe M.D.H., Polshchikov K.A., Likhosherstov R.V. 2025. Intelligent Control for Video Broadcasting in Flying Ad Hoc Networks: A Simulation Study. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 37: 141–149.
- Alghazali S.M.M., Aljeazna W.K.M., Rasol M.N., Polshchikov K.A., Likhosherstov R.V. 2025. An algorithm for controlling the transmission of video streams in a flying ad hoc network. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 14(5): 4290.
- Arumun J., Akowua K. 2025. Wireless Sensor Technologies for Industrial Applications. *Scholars Bulletin*, 11(6): 105–110.
- Coboi A., Nguyen M.T., Pham V.N., Vu T.C., Nguyen M.D., Nguyen D.T. 2023. Zigbee Based Mobile Sensing for Wireless Sensor Networks. *Computer Networks and Communications*, 1(2): 325–342.
- Du R. 2025. An Overview on IEEE 802.11bf: WLAN Sensing. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(1): 184–217.
- Guan M., Qi L., Jin X., Guan S., Xia C., Xu C. 2023. Low-Power Heterogeneous Networking Method Based on NB-IoT and WSN. 2023 6th International Conference on Communication Engineering and Technology (ICCET). Xi'an: 26–29.
- Hu Z., Xue G., Chen Y., Li M., Wang M., Lv F. 2022. City-Wide NB-IoT Network Monitoring and Diagnosing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022: 3153274.
- Iiyambo L., Hancke G., Abu-Mahfouz A.M. 2024. A Survey on NB-IoT Random Access: Approaches for Uplink Radio Access Network Congestion Management. *IEEE Access*, 12: 95487–95506.
- Jha H., Kaur S. 2023. A Survey on ZigBee Technology. 2023. 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Delhi: 1–5.
- Lo Y.W., Tsoi M.H., Chow C.-F., Mung S.W.Y. 2025. An NB-IoT Monitoring System for Digital Mobile Radio with Industrial IoT Performance and Reliability Evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 25(3): 5337–5348.
- Manzoor B., Homssi B.A., Al-Hourani A. 2022. IoT Coverage Enhancement Using Repetition in Energy Constrained Devices: An Analytic Approach. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 6(2): 1122–1131.
- Ni N., Yang F., Wang C. 2021. Research on Smart gas safety supervision system based on IOT technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 651(3): 032013.
- Porchelvi N., Titus S. 2024. Compact novel circular shaped fractal quad-port MIMO antenna loaded with DGS and stub for 6G, WiMax and weather monitoring. *Optical and Quantum Electronics*, 56: 1048.
- Qasim N.H., Salman A.J., Salman H.M., Abdel-Rahman A.A., Kondakova A. 2024. Evaluating NB-IoT within LTE Networks for Enhanced IoT Connectivity. 35th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Tampere: 552–559.
- Quamar M.M., Khan K.A., Khalid M. 2023. Narrowband-IoT Based Integrated Framework for Monitoring Pipeline Condition in Oil and Gas Industry. 2023 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). Rome: 1–6.
- Sathya V., Zhang L., Yavuz M. 2022. A Comparative Measurement Study of Commercial WLAN and 5G LAN Systems. IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). London: 1–7.
- Taleb H., Nasser A., Andrieux G., Charara N., Cruz E.M. 2022. Energy Consumption Improvement of a Healthcare Monitoring System: Application to LoRaWAN. *IEEE Sensors Journal*, 22(7): 7288–7299.
- Ugwuanyi S., Hansawangkit J., Irvine J. 2020. NB-IoT Testbed for Industrial Internet of Things. 2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Montreal: 1–6.
- Wang Y., Cao Q., Devaraj M. 2023. Using IoT to promote the construction of natural gas industry ecosystem. Proceedings SPIE 12599, Second International Conference on Digital Society and Intelligent Systems. Chendgu: 125992K.
- Yaser M.Ja., Abdullateef D., Polshchikov K.A., Balakshin M.S. 2025. Estimating the Message Delivery Probability Without Duplication in an Industrial Internet of Things Network System. *Journal of Advances in Information Technology*, 16(6):830–837.
- Yaser M.Ja., Polshchikov K.A., Polshchikov I.K. 2023. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(4): 168–174.

References

- Golovnin I.V., Gavrilov A.V. 2021. Primenenie avtonomnykh datchikov pri rabote v standarte NB-IoT na primere neftedobyvayushchego predpriyatiya [The use of autonomous sensors in the NB-IoT standard: an example of an oil production company]. *Innovacionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika*, 1: 142–148.
- Yaser M.J.Y., Polshchikov K.A., Fedorov V.I. 2023. Message Delivery Model in a Low-Power Sensor Network. *Economics. Information technologies*, 50(2): 439–447(in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.
- Agrawal N.K., Kumar S., Bisht G.S., Srivastav A., Bansla V., Jain A. 2024. Development of a Novel Quality of Service Aware Video Streaming on Demand System for the Internet of Thing Enabled MANET. 2024 International Conference on Communication, Computer Sciences and Engineering (IC3SE). Gautam Buddha Nagar: 80–85.
- Almufareh M.F., Humayun M., Ahmad Z., Khan A. 2024. An Intelligent LoRaWAN-Based IoT Device for Monitoring and Control Solutions in Smart Farming Through Anomaly Detection Integrated with Unsupervised Machine Learning. *IEEE Access*, 12: 119072–119086.
- Al-Shamkhee A.A.O., Almawlawe M.D.H., Polshchikov K.A., Likhosherstov R.V. 2025. Intelligent Control for Video Broadcasting in Flying Ad Hoc Networks: A Simulation Study. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 37: 141–149.
- Alghazali S.M.M., Aljezna W.K.M., Rasol M.N., Polshchikov K.A., Likhosherstov R.V. 2025. An algorithm for controlling the transmission of video streams in a flying ad hoc network. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 14(5): 4290.
- Arumun J., Akowua K. 2025. Wireless Sensor Technologies for Industrial Applications. *Scholars Bulletin*, 11(6): 105–110.
- Coboi A., Nguyen M.T., Pham V.N., Vu T.C., Nguyen M.D., Nguyen D.T. 2023. Zigbee Based Mobile Sensing for Wireless Sensor Networks. *Computer Networks and Communications*, 1(2): 325–342.
- Du R. 2025. An Overview on IEEE 802.11bf: WLAN Sensing. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(1): 184–217.
- Guan M., Qi L., Jin X., Guan S., Xia C., Xu C. 2023. Low-Power Heterogeneous Networking Method Based on NB-IoT and WSN. 2023 6th International Conference on Communication Engineering and Technology (ICCET). Xi'an: 26–29.
- Hu Z., Xue G., Chen Y., Li M., Wang M., Lv F. 2022. City-Wide NB-IoT Network Monitoring and Diagnosing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022: 3153274.
- Iiyambo L., Hancke G., Abu-Mahfouz A.M. 2024. A Survey on NB-IoT Random Access: Approaches for Uplink Radio Access Network Congestion Management. *IEEE Access*, 12: 95487–95506.
- Jha H., Kaur S. 2023. A Survey on ZigBee Technology. 2023. 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Delhi: 1–5.
- Lo Y.W., Tsoi M.H., Chow C.-F., Mung S.W.Y. 2025. An NB-IoT Monitoring System for Digital Mobile Radio with Industrial IoT Performance and Reliability Evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 25(3): 5337–5348.
- Manzoor B., Homssi B.A., Al-Hourani A. 2022. IoT Coverage Enhancement Using Repetition in Energy Constrained Devices: An Analytic Approach. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 6(2): 1122–1131.
- Ni N., Yang F., Wang C. 2021. Research on Smart gas safety supervision system based on IOT technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 651(3): 032013.
- Porchelvi N., Titus S. 2024. Compact novel circular shaped fractal quad-port MIMO antenna loaded with DGS and stub for 6G, WiMax and weather monitoring. *Optical and Quantum Electronics*, 56: 1048.
- Qasim N.H., Salman A.J., Salman H.M., Abdel-Rahman A.A., Kondakova A. 2024. Evaluating NB-IoT within LTE Networks for Enhanced IoT Connectivity. 35th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Tampere: 552–559.
- Quamar M.M., Khan K.A., Khalid M. 2023. Narrowband-IoT Based Integrated Framework for Monitoring Pipeline Condition in Oil and Gas Industry. 2023 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). Rome: 1–6.
- Sathya V., Zhang L., Yavuz M. 2022. A Comparative Measurement Study of Commercial WLAN and 5G LAN Systems. IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). London: 1–7.

- Taleb H., Nasser A., Andrieux G., Charara N., Cruz E.M. 2022. Energy Consumption Improvement of a Healthcare Monitoring System: Application to LoRaWAN. *IEEE Sensors Journal*, 22(7): 7288–7299.
- Ugwuanyi S., Hansawangkit J., Irvine J. 2020. NB-IoT Testbed for Industrial Internet of Things. 2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Montreal: 1–6.
- Wang Y., Cao Q., Devaraj M. 2023. Using IoT to promote the construction of natural gas industry ecosystem. Proceedings SPIE 12599, Second International Conference on Digital Society and Intelligent Systems. Chendgu: 125992K.
- Yaser M.Ja., Abdullateef D., Polshchikov K.A., Balakshin M.S. 2025. Estimating the Message Delivery Probability Without Duplication in an Industrial Internet of Things Network System. *Journal of Advances in Information Technology*, 16(6):830–837.
- Yaser M.Ja., Polshchikov K.A., Polshchikov I.K. 2023. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(4): 168–174.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 16.01.2026

Received January 16, 2026

Поступила после рецензирования 27.02.2026

Revised February 27, 2026

Принята к публикации 02.03.2026

Accepted March 02, 2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Польщиков Константин Александрович, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, АО «Корпорация «Фазотрон – Научно-исследовательский институт радиостроения», г. Москва, Россия

Konstantin A. Polshchikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, JSC Phazotron Corporation – Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russia

Терский Максим Олегович, аспирант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Maxim O. Terskiy, postgraduate student, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia