

УДК 004.7

Н. А. Верзун, М. О. Колбанёв, А. А. Романова, В. В. Цехановский
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Модель регулируемого множественного доступа в сети интернета вещей

Предлагается протокол множественного доступа к коммуникационным ресурсам на участке последней мили – сенсорной сети интернета вещей. Разработанный протокол доступа учитывает особенности киберфизических систем: неоднородность поддерживаемых приложений, сверхплотность сетей, необходимость экономии ресурсов компонентов сетей (частотного ресурса канала, энергоёмкости умных вещей). Описан сценарий доступа к ресурсам эфирной сети доступа на последней миле, использующий двухфазную модель обслуживания потоков неоднородных данных от умных вещей. Первая фаза: управление объемом трафика, поступающего к глобальным инфокоммуникационным ресурсам. Вторая фаза – передача блоков данных в соответствии с регулируемым синхронно-временным методом множественного доступа. Предложена математическая модель, позволяющая оценивать качество передачи в рассматриваемой сети интернета вещей. Получены выражения для расчета вероятностно-временных характеристик процесса передачи различных типов данных: среднего времени и вероятности своевременной доставки блоков данных, формируемых умными вещами, и информационной скорости реального времени. Проведен численный расчет и анализ влияния процедур управления объемом трафика и параметров множественного доступа на вероятностно-временные характеристики процесса передачи на сетях последней мили.

Интернет вещей, последняя миля, регулируемый множественный доступ, двухфазная модель обслуживания, вероятностно-временные характеристики

Инфраструктурная база для приложений интернета вещей во многих предметных областях – эфирные сенсорные сети. Их использование при создании киберфизических систем [1] поддержки какой-либо хозяйственной деятельности требует учитывать следующие аспекты:

– автономность питания умных вещей (УВ) и, соответственно, ограниченность их ресурсов (прежде всего энергоресурсов, определяющих длительность жизни УВ) и необходимость их экономии [2];

– большое число УВ и образование так называемых сверхплотных сетей [3], [4], для которых актуальной задачей становится рациональное распределение ограниченных ресурсов (имеющихся каналов передачи) между источниками данных;

– число УВ, обеспечивающих покрытие какого-либо пространства информационной решеткой и собирающих однотипную информацию о своем окружении, изначально избыточно, сенсоры со-

бирают и передают дублирующую информацию. Поэтому частичная потеря информации от группы однотипных сенсоров, ведущих мониторинг одного пространства, существенным образом не скажется на адекватности оценки ситуации в этом пространстве;

– разнообразие поддерживаемых приложений интернета вещей, которые могут предъявлять различные требования к качеству [5] и надежности передачи данных [6], необходимых для их функционирования. Например, в медицине: показания датчиков измерения температуры тела пациента можно передавать гораздо реже, чем показания датчиков измерения частоты его пульса.

Совокупность перечисленных особенностей обусловила рост нагрузки на сети последней мили. Дефицит доступного частотного ресурса эфирной сети ведет к возникновению ситуаций перегрузки и невозможности полноценного обслуживания всех УВ. Для минимизации негативного воздействия

перегрузок на функционирование инфраструктуры киберфизической системы, поддерживаемых приложений интернета вещей необходимо:

- при организации сбора данных на последней миле предусматривать механизмы ограничения (или отбрасывания) части трафика, поступающего от умных вещей [7];
- учитывать гетерогенный характер поддерживаемых приложений интернета вещей (например, чувствительность приложений к задержкам передачи [5]).

Физическая структура сети и протокол множественного доступа. Актуальной задачей является разработка новых протоколов доступа к глобальным инфокоммуникационным ресурсам, которые учитывали бы все перечисленные особенности современных сетей и позволяли бы адаптивно управлять объемом поступающего трафика для устранения перегрузок сетей на последней миле, а также обеспечивать требуемое качество передачи для различных видов приложений интернета вещей [8].

Физическая структура исследуемой эфирной сети последней мили приведена на рис. 1.

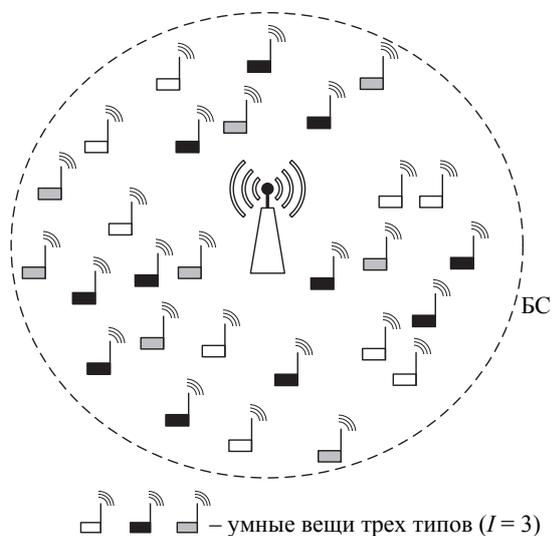


Рис. 1

Базовая станция (БС) обеспечивает множественный доступ УВ к глобальным инфокоммуникационным ресурсам. Зона ее действия охватывает пространство, на котором расположены умные вещи I типов. На рис. 1 выделено 3 типа таких вещей ($I = 3, i = 1, 2, \dots, I$). Базовая станция использует фиксированное число (Z) однотипных радиоканалов. Каждый такой радиоканал, в свою очередь, представляет собой общий ресурс для некоторого числа УВ. Для разделения канального

ресурса используются алгоритмы множественного доступа. Предполагается, что УВ каждого типа поддерживают работу приложений одного вида. Каждое из I таких приложений предъявляет специфические требования к качеству передачи, которые описываются функцией распределения времени доставки блоков данных от УВ к ресурсам глобальной сети. В рамках данного исследования будем предполагать, что для каждого типа УВ устанавливается экспоненциальное время допустимой задержки блока данных со средним значением T_i (в секундах), $i = 1, 2, \dots, I$.

Одно передаваемое сообщение от УВ всех типов представляет собой один блок данных длиной k бит, поэтому временные окна для передачи этих блоков имеют одинаковую длительность. Это позволяет при использовании регулируемого синхронно-временного доступа организовать N временных окон в каждом из Z радиоканалов. Таким образом, общее число временных окон, доступных УВ:

$$W = NZ.$$

При администрировании работы такой сети имеется возможность разными способами распределять пропускную способность радиоканалов между УВ разного типа. На рис. 2, а показан пример (для $I = 3$), когда за УВ каждого типа закрепляется один фиксированный радиоканал. На рис. 2, б пропускная способность каждого радиоканала в равных долях распределяется между УВ всех типов (для $I = 3$).

В данном исследовании предлагается использовать более общий, регулируемый множественный доступ, в соответствии с которым любая УВ имеет доступ к любому радиоканалу, а пропускная способность каждого радиоканала разделяется между УВ в неравных долях, что позволяет обеспечивать разное качество обслуживания для трафика разного типа. УВ каждого типа выделяется различное число временных окон в каждом цикле.

N_i – количество временных окон, которые доступны умным вещам i -го типа ($i = 1, 2, \dots, I$).

Если УВ одного типа допускают большую временную задержку при передаче блока данных, чем УВ другого типа, то в цикле им выделяется меньшее число временных окон. Закрепление временных окон за вещами разного типа должно осуществляться таким образом, чтобы использовались все временные окна. На рис. 3 показан пример структуры цикла передачи при использо-

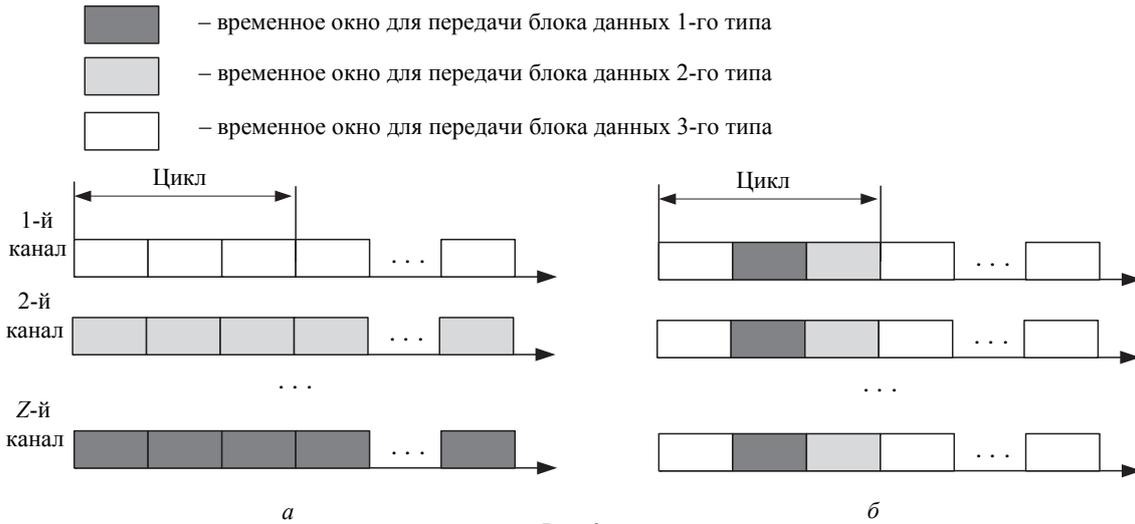


Рис. 2

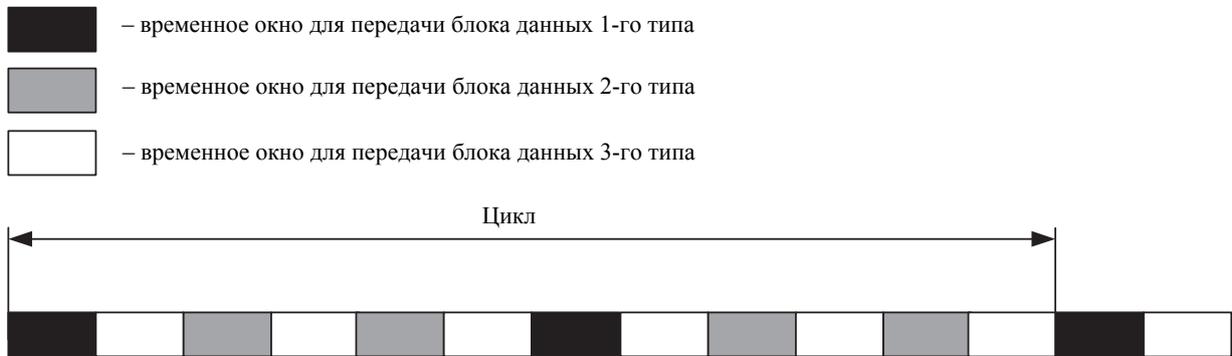


Рис. 3

вании регулируемого синхронно-временного множественного доступа для случая $N = 12, I = 3, N_1 = 2, N_2 = 4, N_3 = 6$. Подобный подход позволяет гибко делить общий ресурс радиоканалов в сети последней мили.

Для снижения нагрузки на каналные ресурсы сети последней мили предлагается динамично, в зависимости от объема поступающего от УВ трафика, отбрасывать ту его часть, для которой не хватает свободных каналов соответствующего типа. При этом передача поступающих от УВ блоков данных осуществляется в 2 фазы:

I фаза – ограничение объема трафика. Возможны 2 варианта организации I фазы:

1 – режим обслуживания с потерями, т. е. в случае, когда поступает заявка на передачу блока данных от УВ, а свободных каналов соответствующего типа нет, заявка на обслуживание отбрасывается;

2 – режим обслуживания с ожиданием, т. е. в случае, когда поступает заявка на передачу блока данных от УВ, а свободных каналов соответствующего типа нет, заявка ставится в очередь и ждет освобождения канала для передачи.

Далее в данной статье предполагается применение 1-го режима – режима с явными потерями блоков, поступающих на передачу.

II фаза – передача блоков данных в соответствии с регулируемым синхронно-временным методом множественного доступа, в котором предусмотрено регулирование доступа УВ к каналу передачи: чем строже требования к допустимому времени задержки блока данных по сети, предъявляемые приложением интернета вещей, тем чаще УВ, поддерживающая работу данного приложения, получает право на передачу и тем меньше интервал однократной передачи блока данных для УВ такого типа.

Сценарий доступа к ресурсам эфирной сети на последней миле приведен на рис. 4.

Математическая модель. При разработке математической модели будем предполагать следующее:

I – количество типов УВ ($i = 1, 2, \dots, I$). УВ с меньшим номером нуждаются в меньшей скорости передачи данных, а наименьшая скорость требуется УВ 1-го типа – и соответственно для них значение среднего допустимого времени старения данных T_i (в секундах) – максимально;

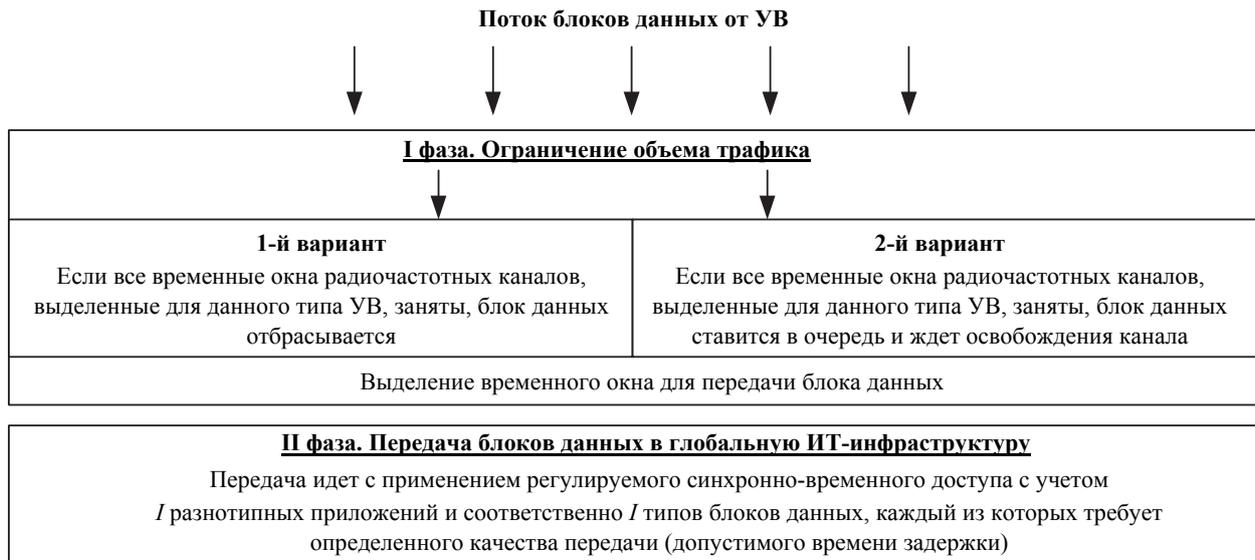


Рис. 4

N – общее число окон в одном канале передачи:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_I.$$

Вещи одного типа используют выделенные им ресурсы на первой и второй фазах. Формируемые ими блоки данных образуют пуассоновский поток;

v – скорость передачи данных по радиоканалу на второй фазе (в битах в секунду). Предполагается, что скорости всех радиоканалов одинаковы.

Все время передачи одного канала разделяется на циклы, которые поделены на временные окна:

$T_{\text{ок}}$ – длительность окна для передачи одного блока данных (в секундах):

$$T_{\text{ок}} = \frac{k}{v},$$

где k – длина передаваемых блоков данных, бит.

Длительность окна достаточна для передачи блока данных и одинакова для УВ всех типов;

τ_i – средний интервал однократной передачи блока данных для УВ i -го типа (время передачи одного блока данных, поступившего от вещей i -го типа):

$$\tau_i = T_{\text{ок}} \frac{N}{N_i}, \quad i = 1, 2, \dots, I;$$

Y_i – количество временных окон на второй фазе, которые доступны УВ i -го типа:

$$Y_i = N_i Z, \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

где I – число типов умных вещей в сети последней мили.

Предполагается, что все радиочастотные каналы идентичны по своей логической структуре (см., например, рис. 3);

Λ – интенсивность потока поступающих данных (в блоках в секунду); Λ_i – интенсивность поступления блоков данных от УВ i -го типа ($i = 1, 2, \dots, I$):

$$\Lambda_i = \Lambda q_i,$$

где q_i – доля блоков данных i -го типа в общем потоке блоков данных Λ ;

A_i – интенсивность нагрузки, которую создают УВ i -го типа:

$$A_i = \Lambda_i \tau_i.$$

I фаза. P_i – вероятность блокировки блока данных от УВ i -го типа на первой фазе из-за отсутствия свободных временных каналов на второй фазе. Вероятность P_i можно рассчитать по первой формуле Эрланга:

$$P_i = \frac{A_i^{Y_i}}{Y_i!} \left[\sum_{n=0}^{Y_i} \frac{A_i^n}{n!} \right]^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

где n – число временных каналов ($n = 1, 2, \dots, Y_i$).

II фаза. λ_i – интенсивность поступления блоков данных i -го типа УВ на один произвольный радиоканал второй фазы. Предполагается, что блоки данных, поступающие на вторую фазу, равномерно распределяются между всеми радиочастотными каналами и поэтому интенсивность их поступления в систему множественного доступа одного радиоканала определяется следующим образом:

$$\lambda_i = \frac{\Lambda_i (1 - P_i)}{Z};$$

$B_i(s)$ – преобразование Лапласа–Стилтьеса (ПЛС) времени передачи блока данных i -го типа УВ ($i = 1, 2, \dots, L$):

$$B_i(s) = e^{-s \frac{N}{N_i} T_{\text{ок}}}; \quad (1)$$

$W_i(s)$ – ПЛС времени ожидания начала передачи блока данных от УВ i -го типа:

$$W_i(s) = \frac{s(1 - \rho_i)}{s - \lambda_i + \lambda_i B_i(s)}, \quad (2)$$

где ρ_i – загрузка среды передачи блоками данных i -го типа ($i = 1, 2, \dots, L$):

$$\rho_i = \lambda_i T_{\text{ок}} \frac{N}{N_i}.$$

Условие эргодичности для второй фазы:

$$0 < \rho_i < 1, \quad i = 1, 2, \dots, L.$$

Вероятностно-временные характеристики процесса обслуживания заявок. Среднее время задержки передачи блоков данных, поступающих от УВ i -го типа:

$$\bar{t}_i = - \left. \frac{d[W_i(s)B_i(s)]}{ds} \right|_{s=0}. \quad (3)$$

Из (3), с учетом (1) и (2) получаем окончательное выражение для расчета \bar{t}_i :

$$\bar{t}_i = \frac{\frac{N}{N_i} T_{\text{ок}} (\rho_i - 2)}{2(\rho_i - 1)}. \quad (4)$$

Вероятность своевременной доставки блоков данных, поступающих от УВ i -го типа:

$$Q_i = \left. \frac{d[W_i(s)B_i(s)]}{ds} \right|_{s = \frac{1}{T_i}}.$$

Из (4), с учетом (1) и (2) получаем окончательное выражение для расчета Q_i :

$$Q_i = \frac{\frac{1}{T_i} (1 - \rho_i)}{\frac{1}{T_i} - \lambda_i + \lambda_i e^{-\frac{1}{T_i} \frac{N}{N_i} T_{\text{ок}}}} e^{-\frac{1}{T_i} \frac{N}{N_i} T_{\text{ок}}},$$

где T_i – среднее допустимое время задержки передачи блока данных от УВ i -го типа ($i = 1, 2, \dots, L$).

Информационная скорость сети реального времени для каждого типа УВ показывает объем реально переданной вовремя информации соответствующего типа (в битах) за единицу времени (в секунду). Потери в моделируемой системе могут возникать:

на I фазе. Потери характеризуются P_i – вероятностью блокировки блока данных от УВ i -го типа на первой фазе из-за отсутствия свободных временных каналов на второй фазе;

на II фазе. Потери характеризуются Q_i – вероятностью своевременной доставки блоков данных, поступающих от УВ i -го типа.

Соответственно выражение для расчета информационной скорости реального времени (РВ) для УВ i -го типа будет иметь вид

$$R_{\text{РВ}i} = \Lambda_i k P_i Q_i.$$

Результаты численных экспериментов.

Проводились численные эксперименты – расчет вероятностно-временных характеристик передачи блоков данных от УВ трех типов (т. е. $L = 3$) в беспроводной сенсорной сети интернета вещей.

Исходные данные для расчетов: $Z = 2$, $N_1 = 1$, $N_2 = 2$, $N_3 = 3$, $k = 1024$ бит, $v = 210\,000$ бит/с, $q_1 = \frac{1}{15}$, $q_2 = \frac{1}{3}$, $q_3 = \frac{3}{5}$, $T_1 = 0.1$ с, $T_2 = 0.3$ с, $T_3 = 0.6$ с.

На рис. 5–13 приведены графики, иллюстрирующие результаты численных экспериментов. Исследовалось влияние интенсивности поступления блоков данных на передачу, а также введения ограничения объема поступающего трафика (т. е. первой фазы обслуживания) на вероятностно-временные характеристики процесса передачи блоков данных от УВ трех типов в сети доступа последней мили.

Рис. 5 – график зависимости вероятностей блокировки блоков данных на первой фазе от интенсивности их поступления от УВ всех типов. Он показывает, что для разного типа вещей блокировка будет различной в зависимости от соотношения интенсивности нагрузки и числа временных каналов, выделенных для вещей соответствующего типа на второй фазе.

Рис. 6 – график зависимости интенсивности поступления блоков данных на вторую фазу от интенсивности поступления блоков данных на первую фазу. Этот график иллюстрирует процесс отбрасывания на первой фазе части поступающих от УВ блоков – той части, которая не получит

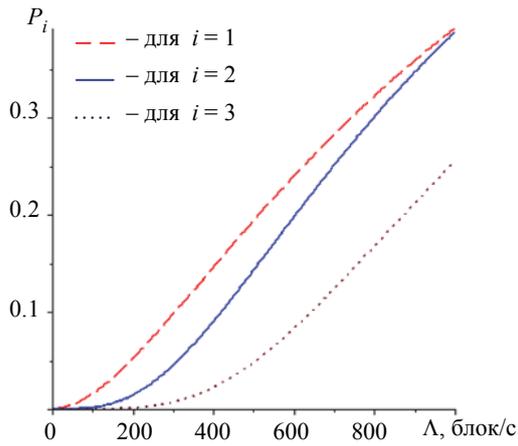


Рис. 5

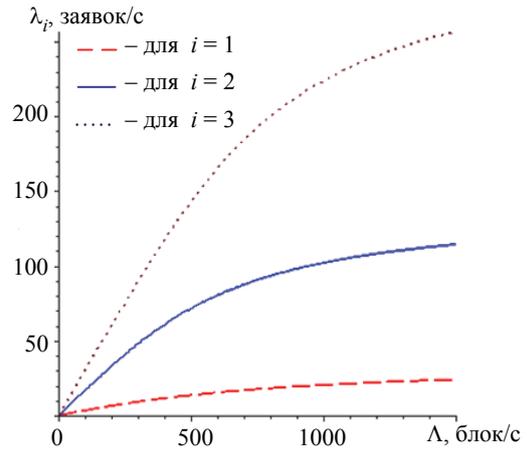


Рис. 6

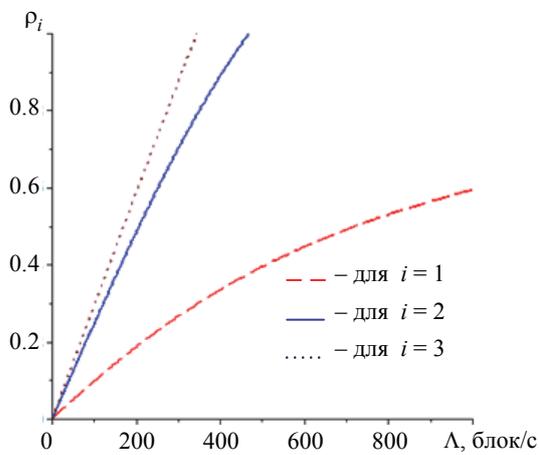


Рис. 7

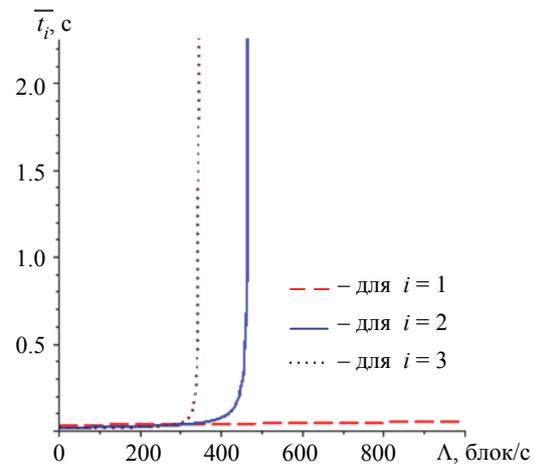


Рис. 8

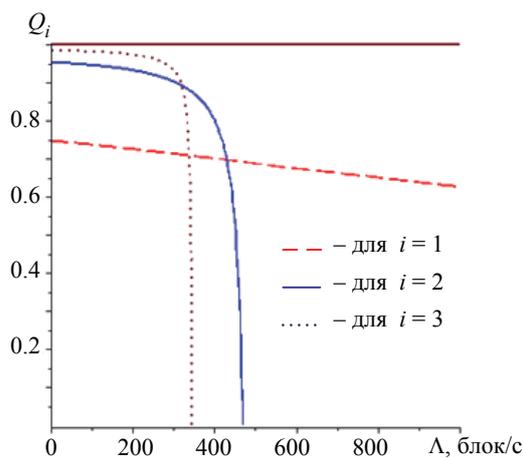


Рис. 9

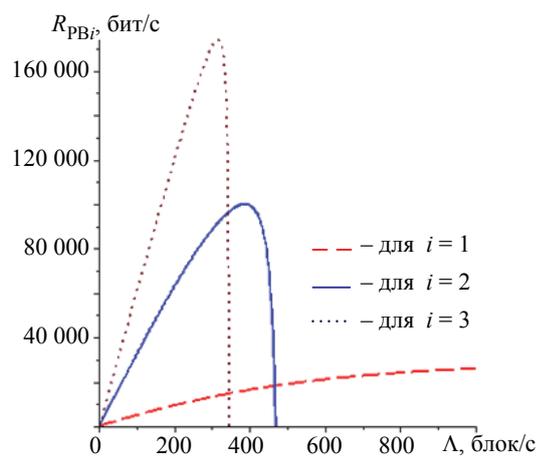


Рис. 10

качественного обслуживания на второй фазе. Например, для блоков второго типа с учетом наличия двух частотных каналов ($Z = 2$) и доли в

общем потоке блоков $q_2 = 1/3$ при интенсивности $\Lambda = 250$ блоков/с на вторую фазу будет пропущено 95 % трафика.

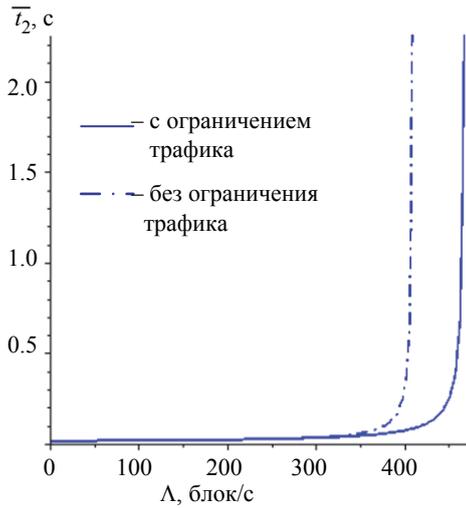


Рис. 11

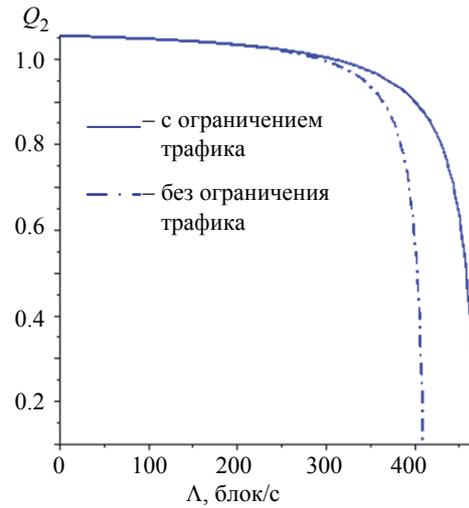


Рис. 12

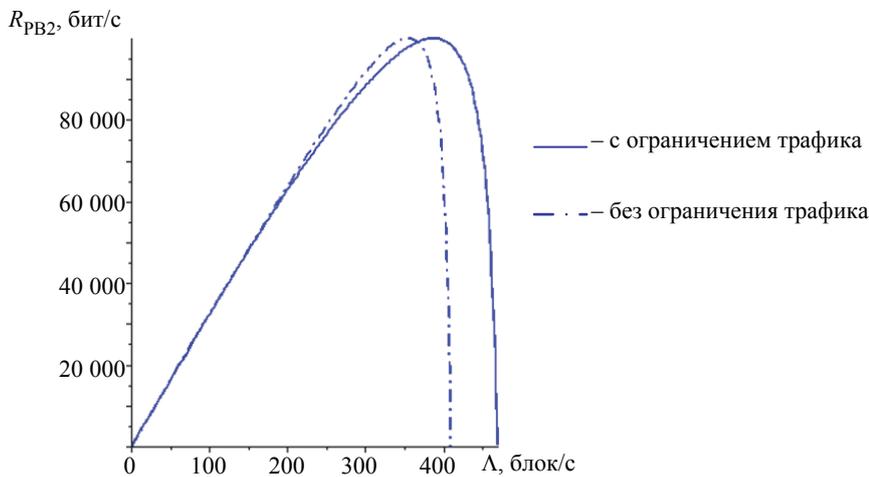


Рис. 13

Рис. 7 – график зависимости загрузки временных каналов, выделенных для передачи блоков данных каждого типа на второй фазе обслуживания, от интенсивности поступления блоков данных. Выбранный регулируемый метод доступа позволяет обслуживать блоки одного типа даже в ситуации потери эргодичности во временных каналах других типов. Это обстоятельство иллюстрируют рис. 8–10, на которых представлены графики зависимости среднего времени задержки (рис. 8), вероятности своевременной доставки (рис. 9) и информационной скорости сети реального времени (рис. 10) блоков данных от интенсивности их поступления на передачу.

На рис. 11–13 показаны те же характеристики, только для второго типа УВ: $\bar{t}_2(\Lambda)$ – на рис. 11; $Q_2(\Lambda)$ – на рис. 12 и $R_{PB2}(\Lambda)$ – на рис. 13 для двух случаев – наличия и отсутствия первой фазы

(т. е. наличие и отсутствие ограничения объема трафика). Как видно из графиков зависимостей, введение процедуры ограничения на первой фазе позволяет повысить устойчивость работы сети по мере увеличения интенсивности поступающих блоков данных. Рабочий диапазон интенсивности поступления блоков больше при условии введения данной процедуры: $\Lambda = 0\text{--}400$ блок/с – без и $\Lambda = 0\text{--}470$ блок/с с использованием ограничения объема трафика.

Полученная модель массового обслуживания описывает процесс передачи данных от УВ различных типов в виде двухфазной СМО и позволяет оценить вероятностно-временные характеристики процесса передачи данных вещей разных типов в сети интернета вещей на последней миле в случае использования протокола регулируемого множественного доступа к радиоресурсам сети.

Проведены численные эксперименты для оценки влияния процедуры ограничения объема трафика на первой фазе обслуживания, предусматривающей отсеивание части блоков данных, поступающих для передачи, в случае отсутствия свободных каналов в сети, на качество передачи в сети доступа последней мили – на вероятностно-временные характеристики процесса передачи блоков данных от УВ трех типов. Результаты чис-

ленных экспериментов показали эффективность использования предложенного протокола и сценария регулируемого множественного доступа. Введение процедуры ограничения трафика на первой фазе позволяет повысить устойчивость сети последней мили к перегрузкам и увеличить диапазон рабочей интенсивности поступающих на передачу блоков данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Синягов С. А. Кибер-физические системы как основа цифровой экономики // Intern. J. of Open Information Technologies. 2016. Vol. 4, № 2. P. 18–25.
2. Росляков А. В. Оценка энергопотребления будущих сетей // Электросвязь. 2016. № 8. С. 43–50.
3. Захаров М. В., Киричек Р. В. Методы построения сверхплотной сети e-health с использованием граничных вычислений // СПБНТОРС: тр. ежегодной НТК. 2020. № 1(75). С. 145–147.
4. Бородин А. С., Кучерявый А. Е., Парамонов А. И. Особенности использования D2D-технологий в зависимости от плотности пользователей и устройств // Электросвязь. 2018. № 10. С. 40–45.
5. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44–46.

6. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Derkach A. N. Timeliness of the Reserved Maintenance by Duplicated Computers of Heterogeneous Delay-Critical Stream // CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol. 2522. P. 26–36.
7. Verzun N., Kolbanev M., Shamin A. The Architecture of the Access Protocols of the Global Infocommunication Resources Computers. 2020. 9, 49. URL: <https://doi.org/10.3390/computers9020049> (дата обращения 25.07.11)
8. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омелян А. В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей // Омский науч. вестн. Сер. Информатика, вычислительная техника и управление. 2016. № 4 (148). С. 147–151.

N. A. Verzun, M. O. Kolbanev, A. A. Romanova, V. V. Tsehanovsky
Saint Petersburg Electrotechnical University

MODEL OF REGULATED MULTIPLE ACCESS IN THE NETWORK INTERNET OF THINGS

A Protocol for multiple access to communication resources on the last mile section of the Internet of Things sensor network is proposed. The developed access Protocol takes into account the features of cyber-physical systems: heterogeneity of supported applications, super-density of networks, the need to save resources of network components (channel frequency resource, power consumption of smart things). The scenario of access to the resources of the last-mile access network using a two-phase model for servicing flows of heterogeneous data from smart things is described. First phase: managing the volume of traffic coming to global infocommunication resources. The second phase is the transfer of data blocks in accordance with the regulated synchronous-time multiple access method. A mathematical model is proposed that allows evaluating the quality of transmission in the Internet of things network under consideration. Expressions are obtained for calculating the probability-time characteristics of the process of transmitting various types of data: the average time and probability of timely delivery of data blocks generated by smart things, and the real-time information speed. Numerical calculation and analysis of the impact of traffic volume management procedures and multiple access parameters on the probabilistic and time characteristics of the transmission process on last-mile networks are performed.

Internet of things, last mile, regulated multiple access, two-phase service model, probability-time characteristics