



**Теоретические вопросы информатики, прикладной математики,
компьютерных наук и когнитивно-информационных технологий**

<https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.821-827>

УДК 519.872

Анализ возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания

Н. Ю. Гриценко*, С. И. Матюшенко

Оригинальная статья

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса
Лумумбы», г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

nikGrekIT@yandex.ru

Аннотация

В статье исследована постановка задачи анализа пикового возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания. В начале даны определения возраста информации и пикового возраста информации и ссылки на результаты, полученные при анализе данных метрик в однофазных системах массового обслуживания. Далее представлена модель в виде двухфазной системы массового обслуживания, и рассмотрены сценарии поведения системы для двух заявок, последовательно поступающих в систему. Сценарии различаются разным взаимным расположением моментов времени прихода в систему, окончания обслуживания в узле 1 и окончания обслуживания в узле 2 для двух заявок. Сценарии разделены на две группы, в зависимости от того, что больше: время между генерацией двух заявок или время, которое первая из заявок проводит в узле 1. Для каждого сценария представлен график изменения возраста информации в зависимости от времени и получена формула расчета пикового возраста информации. На основе результатов, полученных для конкретных сценариев, исследована постановка задачи нахождения общего вида аналитического выражения для преобразования Лапласа-Стилтьеса пикового возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания.

Ключевые слова: возраст информации, пиковый возраст информации, многофазная система массового обслуживания, моделирование сетей

Финансирование: публикация выполнена в рамках проекта № 021937-2-000 «Модели математической теории телетрафика для анализа приоритетного обслуживания потокового и эластичного трафика в сетях новых поколений» Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-00804 «Исследование возраста информации в задачах обеспечения качества предоставления услуг URLLC и mMTC в беспроводных сетях 5G», <https://rscf.ru/project/24-19-00804/>).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гриценко Н. Ю., Матюшенко С. И. Анализ возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 4. С. 821-827. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.821-827>

© Гриценко Н. Ю., Матюшенко С. И., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Analysis of the Age of Information in a Two-Phase Queuing System

N. Yu. Gritsenko^{*}, S. I. Matyushenko

Original article

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
Moscow, Russian Federation

Address: 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation

nikGrekIT@yandex.ru

Abstract

The paper examines the problem of analyzing the Peak Age of Information (PAoI) in a two-phase queuing system. At the beginning, definitions for Age of Information (AoI) and Peak Age of Information are given as well as the review of the results obtained from the analysis of these metrics in single-phase queuing systems. Next, a model for a two-phase queuing system is presented. The cases of system behavior are considered for two requests that enter the system sequentially. The cases differ in the different relationships between the times of arrival into the system, the end of service in node 1 and the end of service in node 2 for two requests. Further, the cases are divided into two groups, depending on which is greater: the time between the generation of two requests or the time that the first request spends in node 1. For each case a graph of the AoI as a function of time is presented and a formula for calculating the PAoI is obtained. Based on the results obtained for specific cases, the formulation of the problem of finding a general formula for calculating the Laplace-Stieltjes transform of the PAoI in a two-phase queuing system is obtained.

Keywords: age of information, peak age of information, multiphase queuing system, network modeling

Funding: This publication has been supported by the RUDN University Scientific Projects Grant System, project No. 021937-2-000 "Models of the mathematical theory of teletraffic for analyzing priority service of streaming and elastic traffic in next-generation networks". This research was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-19-00804 "Research on the age of information in the context of ensuring service quality for URLLC and mMTC in 5G wireless networks" (<https://rscf.ru/en/project/24-19-00804/>).

Conflict of interests: The authors declares no conflict of interest.

For citation: Gritsenko N.Yu., Matyushenko S.I. Analysis of the Age of Information in a Two-Phase Queuing System. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(4):821-827. <https://doi.org/10.25559/SITITO.019.202304.821-827>



Введение

Возраст информации является новой характеристикой качества сетей, отражающей на стороне получателя время, прошедшее с момента генерации отправителем последнего полученного на стороне получателя пакета. Она особенно важна для сетей, в которых критично, чтобы информация имела максимальную свежесть, например, в системах беспилотного транспорта [1, 2] или системах мониторинга чрезвычайных ситуаций [3]. Кроме того, оптимизация этой метрики может дать существенный рост производительности в разных приложениях, например системах реального времени, сетях БПЛА, при кэшировании данных и других [4-6]. Возраст информации порождает связанную с ним метрику пикового возраста информации. Эта метрика отражает максимальное значение возраста информации непосредственно перед получением обновления получателем. Пиковый возраст информации является важной характеристикой качества сети, для которой важно минимизировать значение возраста информации в наихудшем случае.

Существует множество зарубежных [6-17], и российских исследований [18-23], где эти, а также другие характеристики связанные с возрастом информации (средний возраст информации [7], стационарное распределение возраста информации [8] и т.д.), анализируются с помощью аппарата СМО, например [6] является одной из классических работ по данной теме или [9], в которой представлены результаты анализа для разнообразных моделей СМО и дисциплин обслуживания. Но в основном все эти результаты относятся к однофазным системам.

В данной статье мы остановимся на исследовании пикового возраста информации в двухфазных системах массового обслуживания [24]. На примере системы, содержащей 2 заявки, определим, какие параметры влияют на пиковый возраст информации в таких системах. Рассмотрим возможные сценарии нахождения заявок в такой системе и их влияние на исследуемую характеристику. В конце статьи осуществим постановку задачи нахождения общей формулы расчета преобразования Лапласа-Стилтьеса пикового возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания.

Анализ возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания

Представим двухфазную систему массового обслуживания в виде модели, состоящей из двух последовательно соединенных узлов. Каждый узел содержит очередь бесконечной емкости и обслуживающий прибор. Схема модели изображена на Рис. 1.

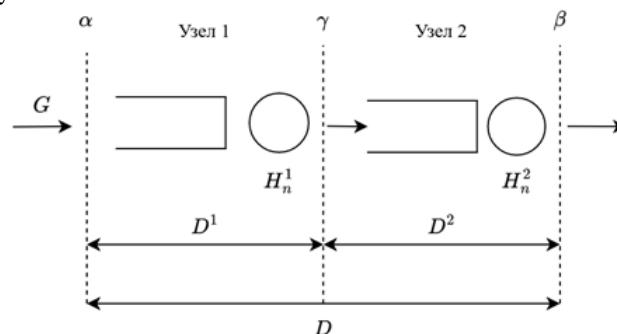
На вход узла 1 поступает произвольный поток заявок, причем будем считать, что момент поступления заявки на узел 1 эквивалентен моменту генерации этой заявки. Сначала заявка попадает в очередь узла 1, из которой попадает на прибор узла 1 согласно дисциплине FCFS.

После окончания обслуживания в узле 1 заявка переходит в узел 2, где также сначала попадает в очередь узла 2, из которой попадает на прибор узла 2 согласно дисциплине FCFS. После окончания обслуживания в узле 2 заявка покидает систему. Выделим ключевые моменты времени в данной системе:

α – время прихода заявки в систему

γ – время, когда завершается обслуживание заявки в узле 1

β – время, когда завершается обслуживание заявки в узле 2



Р и с. 1. Схема модели
F i g. 1. Model diagram

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.
Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Также введем обозначения для некоторых временных интервалов в системе:

$G_n = a_n - a_{n-1}$ – время, прошедшее между поступлением в систему заявки n и $n-1$ (считаем, что эквивалентно времени между генерацией заявок n и $n-1$)

H^1 – время обслуживания заявки на приборе узла 1

D^1 – время нахождения заявки в узле 1

H^2 – время обслуживания заявки на приборе узла 2

D^2 – время нахождения заявки в узле 2

$D = D^1 + D^2$ – время нахождения заявки в системе

Рассмотрим сценарии поведения системы, схематично изображенные на Рис. 2 и Рис. 3, показывающие взаимосвязь моментов времени (Рис. 1) прихода (α), окончания обслуживания в узле 1 (γ) и окончания обслуживания в узле 2 (β) для двух заявок, последовательно поступающих в систему. Эти сценарии можно разбить на 2 группы, в зависимости от того что больше: время между генерацией заявок $n-1$ и n или время, которое заявка $n-1$ проводит в узле 1. Для каждого из сценариев построим графики зависимости возраста информации от времени и найдем формулу расчета пикового возраста информации, который обозначим A_p .

Для начала рассмотрим группу сценариев, в которых $G_n > D_{n-1}^1$ (время между генерацией заявок $n-1$ и n больше времени, которое заявка $n-1$ проводит в узле 1).



I сценарий : $\alpha_{n-1} < \gamma_{n-1} < \beta_{n-1} < \alpha_n < \gamma_n < \beta_n$



II сценарий : $\alpha_{n-1} < \gamma_{n-1} < \alpha_n < \beta_{n-1} < \gamma_n < \beta_n$

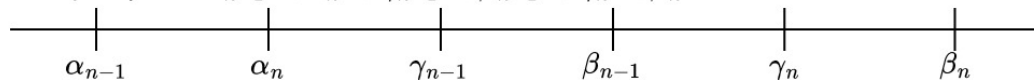


III сценарий : $\alpha_{n-1} < \gamma_{n-1} < \alpha_n < \gamma_n < \beta_{n-1} < \beta_n$

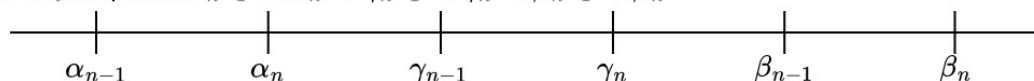


Р и с. 2. Сценарии $G_n > D_{n-1}^1$
F i g. 2. Scenario $G_n > D_{n-1}^1$

IV сценарий : $\alpha_{n-1} < \alpha_n < \gamma_{n-1} < \beta_{n-1} < \gamma_n < \beta_n$

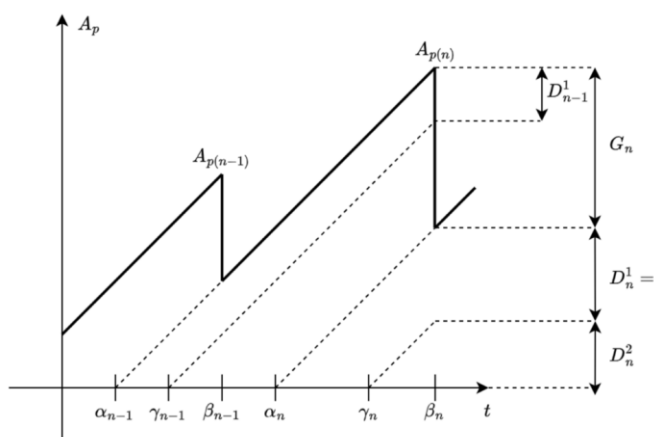


V сценарий : $\alpha_{n-1} < \alpha_n < \gamma_{n-1} < \gamma_n < \beta_{n-1} < \beta_n$



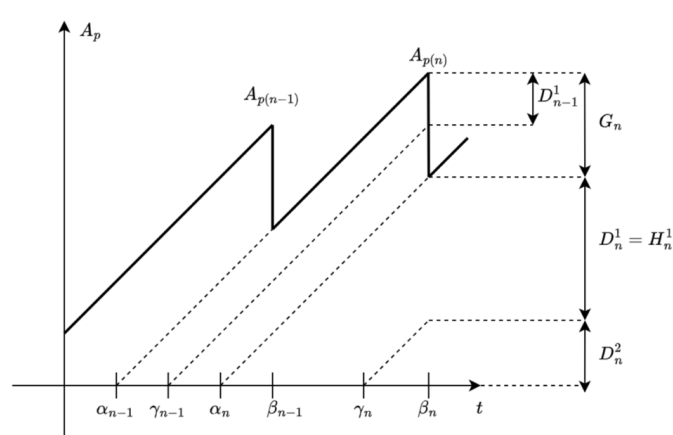
Р и с. 3. Сценарии $G_n < D_{n-1}^1$
F i g. 3. Scenario $G_n < D_{n-1}^1$

I сценарий



Р и с. 4. Зависимость $A(t)$ в сценарии I
F i g. 4. The behavior of $A(t)$ in Scenario I

II сценарий

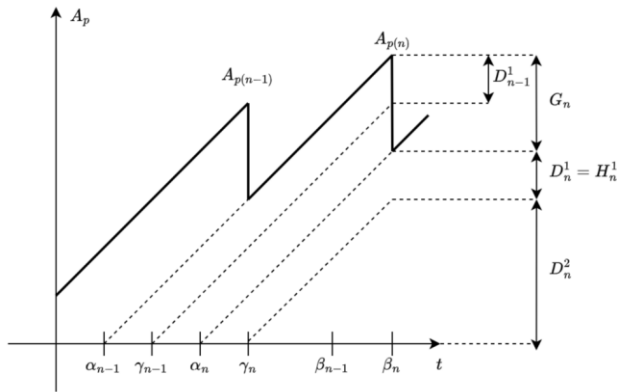


Р и с. 5. Зависимость $A(t)$ в сценарии II
F i g. 5. The behavior of $A(t)$ in Scenario II

На графике видно, что $A_{p(n)} = G_n + D_n^1 + D_n^2$, но так как в момент прихода заявки n в узел 1 очередь узла 1 пуста, то $D_n^1 = H_n^1$ и получаем: $A_{p(n)} = G_n + H_n^1 + D_n^2$

На графике видно, что $A_{p(n)} = G_n + D_n^1 + D_n^2$, но так как в момент прихода заявки n в узел 1 очередь узла 1 пуста, то $D_n^1 = H_n^1$ и получаем:

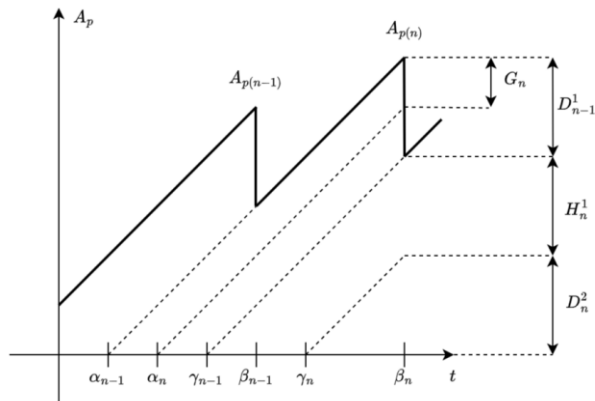
$$A_{p(n)} = G_n + H_n^1 + D_n^2$$

**III сценарий**Р и с. 6. Зависимость $A(t)$ в сценарии III
F i g. 6. The behavior of $A(t)$ in Scenario III

На графике видно, что $A_{p(n)} = G_n + D_n^1 + D_n^2$, но так как в момент прихода заявки n в узел 1 очередь узла 1 пуста,

то $D_n^1 = H_n^1$ и получаем: $A_{p(n)} = G_n + H_n^1 + D_n^2$

Теперь перейдем к группе сценариев, где $G_n < D_{n-1}^1$ (время между генерацией заявок $n - 1$ и n меньше времени, которое заявка $n - 1$ проводит в узле 1)

IV сценарийР и с. 7. Зависимость $A(t)$ в сценарии IV
F i g. 7. The behavior of $A(t)$ in Scenario IV

В этом сценарии $\gamma_n - \gamma_{n-1} = H_n^1$, так как заявка n начинает обслуживаться на приборе узла 1, сразу как с него уходит заявка $n - 1$.

На графике видим, что: $A_{p(n)} = D_{n-1}^1 + H_n^1 + D_n^2$

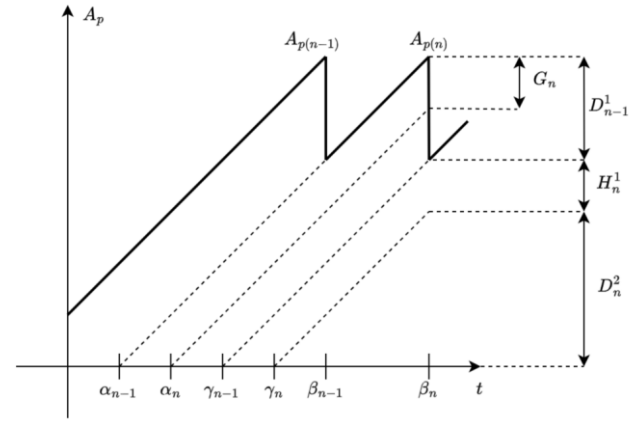
V сценарий

В этом сценарии также $\gamma_n - \gamma_{n-1} = H_n^1$, так как заявка n начинает обслуживаться на приборе узла 1, сразу как с него уходит заявка $n - 1$. И также из графика видим, что:

$$A_{p(n)} = D_{n-1}^1 + H_n^1 + D_n^2$$

Таким образом, проанализировав все возможные сценарии нахождения 2 заявок в двухфазной СМО, видим, что значение $A_{p(n)}$ вычисляется в зависимости от того, какая величина больше: время между генерацией заявок $n - 1$ и n или время, которое заявка $n - 1$ проводит в узле 1.

Получаем следующую формулу расчета пикового возраста информации для заявки n , который обозначим как $A_{p(n)}$

Р и с. 8. Зависимость $A(t)$ в сценарии V
F i g. 8. The behavior of $A(t)$ in Scenario V

$$A_{p(n)} = \begin{cases} G_n + H_n^1 + D_n^2, & G_n > D_{n-1}^1 \\ D_{n-1}^1 + H_n^1 + D_n^2, & G_n \leq D_{n-1}^1 \end{cases}$$

Теперь из этой формулы получим общую формулу расчета функции распределения пикового возраста информации в двухфазной СМО.

Если записать формулу не для конкретной заявки, а в целом для случайной величины A_p , получим:

$$A_p = \begin{cases} G + D_2 + H_1, & G > D_1 \\ D_1 + D_2 + H_1, & G \leq D_1 \end{cases} \Rightarrow A_p = \max(G + D_2, D_1 + D_2) + H_1$$

Таким образом, видим, что A_p является суммой двух случайных величин

$$A_p = \varepsilon + y$$

$$\varepsilon = \max(G + D_2, D_1 + D_2)$$

Значит, мы можем воспользоваться свойством преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) для суммы двух независимых неотрицательных случайных величин [25]:

$\alpha(s) = \varphi(s) h(s)$, где $\alpha(s)$ – ПЛС A_p , $\varphi(s)$ – ПЛС случайной величины ε , а $h(s)$ – ПЛС H_1 .

Также нам известно, что функция распределения суммы случайных величин равна свертке функций распределений этих случайных величин:

$$A_p(y) = F(y) * H(y)$$

И известно, что вероятность появления одного из двух несовместных событий равна:

$$F(y) = F_1(y) + F_2(y)$$

Получаем выражение для нахождения ПЛС:

$$\alpha(s) = [\varphi_1(s) + \varphi_2(s)] h(s)$$

Заключение

$$\varphi_1(s) = \int_0^\infty e^{-sx} F_{G+D_2}(x) dD_1(x) = \int_0^\infty e^{-sx} G(x) * D_2(x) dD_1(x)$$

$$\varphi_2(s) = \int_0^\infty e^{-sx} F_{D_1+D_2}(x) dG(x) = \int_0^\infty e^{-sx} D(x) dG(x)$$

В статье проведен анализ пикового возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания. Рассмотрены все возможные сценарии прохождения системы заявками для модели системы, содержащей 2 заявки. Осуществлена постановка задачи нахождения общей формулы расчета преобразования Лапласа-Стилтьеса пикового возраста информации в двухфазной системе массового обслуживания.



Благодарности

Авторы благодарят заведующего кафедрой теории вероятностей и кибербезопасности Института компьютерных наук и телекоммуникаций Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, доктора технических наук, профессора Константина Евгеньевича Самуйлова за постановку задачи и рекомендации методов исследования, а также доктора физико-математических наук, профессора кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Института компьютерных наук и телекоммуникаций Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Юлию Васильевну Гайдамаку за ценные замечания и предложения.

Acknowledgements

The authors thank Konstantin Evgenievich Samouylov, Head of the Probability Theory and Cybersecurity Department, Applied Mathematics & Communications Technology Institute, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor, for formulating the problem and recommending research methods. They also thank Yulia Vasilyevna Gaidamaka, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Probability Theory and Cybersecurity Department, Applied Mathematics & Communications Technology Institute, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, for her valuable comments and suggestions.

References

1. Sorkhoh I., Assi C., Ebrahimi D., Sharafeddine S. Optimizing Information Freshness for MEC-Enabled Cooperative Autonomous Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022;23(8):13127-13140. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3119961>
2. Thunberg J., Bischoff D., Schiegg F.A., Meuser T., Vinel A. Unreliable V2X Communication in Cooperative Driving: Safety Times for Emergency Braking. *IEEE Access*. 2021;9:148024-148036. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124450>
3. Liang T., Liu W., Yang J., Zhang T. Age of Information Based Scheduling for UAV Aided Emergency Communication Networks. In: ICC 2022 – IEEE International Conference on Communications. Seoul, Korea, Republic of; IEEE Press; 2022. p. 5128-5133. <https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838496>
4. Khorsandmanesh Y., Emadi M.J. Peak Age of Information Analysis for Virtual Reality in Terahertz Communications. In: 2020 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT). Tehran, Iran; 2020. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IWCIT50667.2020.9163486>
5. Zhang J., Kang K., Yang M., Zhu H., Qian H. AoI-minimization in UAV-assisted IoT Network with Massive Devices. In: 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Austin, TX, USA: IEEE Press; 2022. p. 1290-1295. <https://doi.org/10.1109/WCNC51071.2022.9771857>
6. Kosta A., Pappas N., Angelakis V. Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool. *Foundations and Trends® in Networking*. 2017;12(3):162-259. <http://dx.doi.org/10.1561/13000000060>
7. Moltafet M., Leinonen M., Codreanu M. An Exact Expression for the Average AoI in a Multi-Source M/M/1 Queueing Model. In: 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. London, UK: IEEE Press; 2020. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC48278.2020.9217386>
8. Kosta A., Pappas N., Ephremides A., Angelakis V. The Age of Information in a Discrete Time Queue: Stationary Distribution and Non-Linear Age Mean Analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021;39(5):1352-1364. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3065045>
9. Inoue Y., Masuyama H., Takine T., Tanaka T. A General Formula for the Stationary Distribution of the Age of Information and Its Application to Single-Server Queues. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2019;65(12):8305-8324. <https://doi.org/10.1109/TIT.2019.2938171>
10. Hu C., Dong Y. Age of information of two-way data exchanging systems with power-splitting. *Journal of Communications and Networks*. 2019;21(3):295-306. <https://doi.org/10.1109/JCN.2019.000037>
11. Song M., Yang H.H., Shan H., Lee J., Lin H., Quek T.Q.S. Analysis of AoI Violation Probability in Wireless Networks. In: 2021 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Berlin, Germany: IEEE Press; 2021. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISWCS49558.2021.9562141>
12. Zeng Q., Chen Z., Jia Y., Wang M. Dynamic Resource Sharing for Non-preemptive M/M/1/1 Queueing System : An Age of Information Perspective. In: 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Xiamen, China: IEEE Press; 2021. p. 659-663. <https://doi.org/10.1109/ICCC52777.2021.9580289>
13. Zhao F., Sun X., Zhan W., Wang X., Chen X. Information Freshness in Random-Access Poisson Network: Average AoI versus Peak AoI. In: 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). London, United Kingdom: IEEE Press; 2022. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012816>
14. Moltafet M., Leinonen M., Codreanu M. On the Age of Information in Multi-Source Queueing Models. *IEEE Transactions on Communications*. 2020;68(8):5003-5017. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2997414>
15. Cao J., Zhu X., Jiang Y., Wei Z., Sun S., Wang Y. Peak AoI vs. Delay: Closed-Form Analysis in the Finite Block Length Regime. In: 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Changsha, China: IEEE Press; 2021. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCSP52459.2021.9613475>



16. Kim J., Kim M., Lee J. Sensing and Transmission Design for AoI-Sensitive Wireless Sensor Networks. In: 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Taipei, Taiwan: IEEE Press; 2020. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GCWkshps50303.2020.9367414>
17. Zhang G., Shen C., Shi Q., Ai B., Zhong Z. AoI Minimization for WSN Data Collection With Periodic Updating Scheme. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2023;22(1):32-46. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3190986>
18. Zhabankova E., Khakimov A., Markova E., Gaidamaka Y. The Age of Information in Wireless Cellular Systems: Gaps, Open Problems, and Research Challenges. *Sensors*. 2023;23:8238. <https://doi.org/10.3390/s23198238>
19. Zhabankova E., Manaeva V., Markova E., Gaidamaka Y. Age of Information Performance of Ultra Reliable Low Latency Service in 5G New Radio Networks. In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds.) Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2023. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 14123. Cham: Springer; 2024. p. 387-398. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50482-2_30
20. Matyushenko S.I., Samouylov K.E. Stationary distribution of the peak age of information in a two-channel transmission group modeled by a queuing system with resequence of applications and with phase-type distributions. *Vestnik TVGU. Ser. Prikl. Matem.* = Herald of Tver State University. Ser. Appl. Math. 2024;(1):17-36. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26456/vtpmk700>
21. Gaidamaka Yu.V., Matyushenko S.I., Samouylov K.E. About the peak age of information in a single-channel transmission group modeled by the PH/PH/1/r/LCFS/PH/1/r/LCFS system with inversion discipline, interruption maintenance and re-service of applications. *Vestnik TVGU. Ser. Prikl. Matem.* = Herald of Tver State University. Ser. Appl. Math. 2024;(1):37-52. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26456/vtpmk701>
22. Matyushenko S.I. The Laplace-Stieltjes Transformation of the Distribution Function of the Peak Age of Information in a Multichannel Transmission Group. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2024;13(1):57-73. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14529/cmse240104>
23. Matyushenko S.I., Samouylov K.E. Laplace – Stieltjes Transform of the Peak Age of Information for the Case when Packet Transmission is Modeled by A P H/P H/1/R Queueing System with FCFS discipline. *Large-Scale Systems Control*. 2023;106:300-313. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25728/ubs.2023.106.11>
24. Naumov V.A., Abaev P.O. Approximate Performance Analysis of Queues in Series. *Vestnik RUDN. Series Mathematics. Computer science. Physics*. 2007;(3-4):64-69. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: JWJLWL
25. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing Theory]. Moscow: RUDN University Publ.; 1995. 528 p. (In Russ., abstract in Eng.)

Поступила 07.08.2023; одобрена после
рецензирования 14.09.2023; принята к публикации
28.10.2023.

Submitted 07.08.2023; approved after reviewing
14.09.2023; accepted for publication 28.10.2023.

Об авторах:

Гриценко Николай Юрьевич, аспирант кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Института компьютерных наук и телекоммуникаций, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), **ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4826-8013>**, nikGrekIT@yandex.ru

Матюшенко Сергей Иванович, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности Института компьютерных наук и телекоммуникаций, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), кандидат физико-математических наук, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8247-8988>**, matyushenko-si@rudn.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Nikolai Yu. Gritsenko, Postgraduate student of the Probability Theory and Cybersecurity Department, Applied Mathematics & Communications Technology Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4826-8013>**, nikGrekIT@yandex.ru

Sergey I. Matyushenko, Associate Professor of the Probability Theory and Cybersecurity Department, Applied Mathematics & Communications Technology Institute, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8247-8988>**, matyushenko-si@rudn.ru

All authors have read and approved the final manuscript.