

- Workshop on Automotive and Autonomous Vehicle Security*, 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.14722/autosec.2021.23035> (accessed: 20.11.2023).
2. Tariq S. et al. CAN-ADF: The controller area network attack detection framework. *Computers & Security*, 2020, vol. 94, pp. 101857. DOI: 10.1016/j.cose.2020.101857
 3. Avatefipour O. et al. An intelligent secured framework for cyberattack detection in electric vehicles' CAN bus using machine learning. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 127580–127592. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937576
 4. Song H.M., Woo J., Kim H.K. In-vehicle network intrusion detection using deep convolutional neural networks. *Vehicular Communications*, 2020, vol. 21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2019.100198> (accessed: 10.12.2023).
 5. Sun H. et al. Anomaly detection for in-vehicle network using CNN-LSTM with attention mechanism. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, no. 10, pp. 10880–10893. DOI: 10.1109/TVT.2021.3106940
 6. Wei Y. et al. LSTM-Autoencoder-based anomaly detection for indoor air quality time-series data. *IEEE Sensors Journal*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 3787–3800. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3230361
 7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2016. 800 p.
 8. Ergen T., Mirza A.H., Kozat S.S. Unsupervised and Semi-supervised Anomaly Detection with LSTM Neural Networks, 2017. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.09207> (accessed: 20.11.2023).
 9. Wei Y. et al. Reconstruction-based LSTM-Autoencoder for Anomaly-based DDoS Attack Detection over Multivariate Time-Series Data, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.09475> (accessed: 20.11.2023).
 10. Car-Hacking: Attack & Defense Challenge 2020 Dataset. URL: <https://iee-dataport.org/open-access/car-hacking-attack-defense-challenge-2020-dataset> (accessed: 25.11.2023).
 11. Troshin A.V. Network traffic anomaly detection by dimensionality reduction methods. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 34–43. DOI: 10.18469/ikt.2022.20.4.05 (In Russ.)
 12. Troshin A. Car Hacking Detection by LSTM Neural Network. URL: https://github.com/avtroshin77/car_hacking (accessed: 25.11.23).

Received 15.04.2024

УДК 621.391: 621 39

СРАВНЕНИЕ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ И ГРУППОВЫХ ПУАССОНОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Лихтциндер Б.Я.¹, Привалов А.Ю.²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарский национальный исследовательский университет имени С.П.Королева, Самара, РФ

E-mail: b.lihtcinder@psuti.ru, privalov1967@gmail.com

Целью работы было проведение сравнения гиперэкспоненциальных и групповых пуассоновских потоков заявок в качестве моделей пачечного трафика мультисервисных сетей связи. Рассматриваются различные модели трафика для задачи приближения средней очереди, создаваемой видеотрафиком современных мультисервисных сетей. Рассмотрены пуассоновский и гиперэкспоненциальный потоки, как ординарные, так и групповые. Показано, что для задачи приближения очереди видеотрафика подходят групповые потоки обоих типов. Групповые пуассоновские потоки позволяют получить весьма простые аналитические зависимости средних значений очередей от коэффициента загрузки систем массового обслуживания и поэтому являются наиболее предпочтительными. Показана неадекватность применения ординарных гиперэкспоненциальных моделей для аппроксимации пачечных потоков заявок, поскольку, при малых значениях коэффициента загрузки, зависимости средних значений очередей для гиперэкспоненциальных потоков практически близки к нулю, в то время, как указанные зависимости для пачечных потоков имеют весьма значительный угол наклона. Сделанные выводы подтверждаются результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: видеотрафик, пуассоновский поток, гиперэкспоненциальный поток, групповые потоки

Введение

Одной из наиболее популярных моделей телекоммуникационного трафика, являются гиперэкспоненциальные потоки, для которых функция распределения вероятностей интервалов между соседними заявками имеет вид [1]:

$$F(x) = 1 - \sum_{i=1}^k p_i e^{-\lambda_i x}.$$

Промежутки времени между соседними заявками в гиперэкспоненциальном потоке описываются экспоненциальными распределениями, однако, параметр распределения для различных промежутков времени может быть разным, причем, с вероятностью p_i , ($i = 1, \dots, k$) параметр распределения потока равен λ_i , а $\sum_{i=1}^k p_i = 1$.

Весь процесс образования потока может быть разбит на отдельные, чередующиеся фазы, причем, длительность каждой фазы будет равной одному промежутку времени между соседними заявками, а фазы чередуются случайным образом независимо друг от друга. Случайный промежуток времени между двумя любыми соседними заявками во всем потоке обозначен символом θ .

Рассмотрим систему массового обслуживания (СМО), в которой заявки поступают и обслуживаются по гиперэкспоненциальным законам второго порядка (система $H2 / H2 / 1$).

Входной поток заявок задан распределением, вида:

$$F(\theta) = 1 - a_1 e^{-\lambda_1 \theta} - a_2 e^{-\lambda_2 \theta},$$

а поток событий обслуживания задан распределением вида:

$$\Phi(\tau) = 1 - b_1 e^{-\mu_1 \tau} - b_2 e^{-\mu_2 \tau},$$

где τ – интервал времени обслуживания одной заявки, μ_i интенсивность обслуживания заявок на i -й фазе, b_i – вероятность i -й фазы обслуживания.

СМО с гиперпуассоновскими потоками хорошо изучены. Еще в середине прошлого века для подобных распределений было получено соотношение, непосредственно определяющее среднее время ожидания T_{ia} в очередях одноканальной СМО [1].

$$T_{ia} = \frac{(\mu_1 + \xi_1)(\mu_2 + \xi_1)}{(-\xi_1)\mu_1\mu_2(1 - \frac{\xi_1}{\xi_2})} + \frac{(\mu_1 + \xi_2)(\mu_2 + \xi_2)}{(-\xi_2)\mu_1\mu_2(1 - \frac{\xi_2}{\xi_1})},$$

где ξ_1 и ξ_2 – корни уравнения

$$\left(\frac{a_1 \lambda_1}{\lambda_1 - s} + \frac{a_2 \lambda_2}{\lambda_2 - s}\right) \left(\frac{b_1 \mu_1}{\mu_1 + s} + \frac{b_2 \mu_2}{\mu_2 + s}\right) = 1,$$

лежащие в левой полуплоскости $\text{Re}(s) < 0$.

Там же рассмотрены модели СМО с входными потоками и гиперэкспоненциальными распреде-

лениями интервалов обработки заявок, наряду с моделями с гиперэкспоненциальными входными потоками и эрланговскими распределениями интервалов обработки заявок.

Все рассмотренные выше модели предполагают отсутствие в потоках корреляционных связей и полную взаимную независимость поступающих заявок и временных интервалов их обработки. Подобные допущения ограничивают область применения гиперэкспоненциальных моделей при анализе реальных потоков мультисервисных сетей связи, заявки в которых носят пачечный характер и существенно коррелируют между собою.

Групповые гиперэкспоненциальные модели

Нами предлагается гиперэкспоненциальный групповой поток – это поток независимых событий, в котором интервалы между соседними событиями распределены по гиперэкспоненциальному закону, т.е. образуют отдельные фазы. Также, как это происходит в обычном гиперэкспоненциальном потоке, длительность каждой фазы равна одному промежутку времени между соседними событиями, а фазы чередуются случайным образом, независимо друг от друга. Однако, в отличие от обычного гиперэкспоненциального потока, в котором в качестве событий выступают отдельные заявки, здесь каждое событие заключается в одновременном появлении в момент t_k «пачки» из μ_k независимых случайно распределенных чисел заявок. Для гиперэкспоненциального потока второго порядка имеем всего две фазы, последовательно и независимо следующие друг за другом с вероятностями p и $(1-p)$.

$$F(\theta) = 1 - p e^{-\lambda_1 \theta} - (1-p) e^{-\lambda_2 \theta}.$$

Вероятности чисел заявок в «пачках» на каждой из фаз могут быть распределены по различным законам: f_{1k} и f_{2k} .

Для демонстрации возможностей ординарного и группового гиперэкспоненциальных потоков, приведем далее результаты имитационного моделирования для средней очереди в СМО с постоянным значением времени обслуживания.

На рисунке 1 приведены зависимости средней очереди от загрузки прибора для ординарного гиперэкспоненциального потока с параметрами $p = 0,5$, $\lambda_1 = 30$, $\lambda_2 = 6$ и группового гиперэкспоненциального потока с параметрами $p = 0,5$, $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = 0,6$, все пачки имеют постоянный размер 10.

Видно, что наклон кривой при малых загрузках близок к нулю для обоих потоков, что говорит о малой пригодности гиперэкспоненциальных и даже групповых гиперэкспоненциальных моделей

потоков с малыми размерами пачек пакетов, для аппроксимации зависимостей очередей в СМО мультисервисных систем. При повышении интенсивности высокочастотной составляющей ординарного гиперэкспоненциального потока, он стремится к групповому пуассоновскому потоку с геометрическим распределением чисел заявок в «пачке».

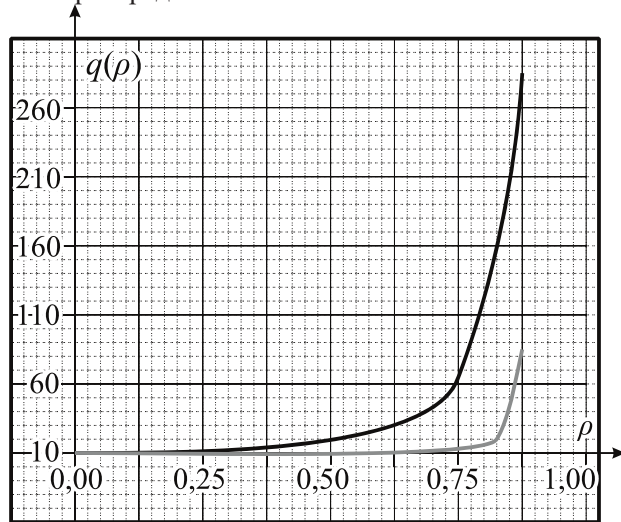


Рисунок 1. Зависимости размеров средних очередей группового гиперэкспоненциального и обычного гиперэкспоненциального потоков от коэффициента загрузки ρ

Групповые пуассоновские модели потоков

Другой моделью обобщения пуассоновских потоков, сочетающей в себе простоту анализа, свойственную классическим пуассоновским моделям и возможность учета пачечного характера современного пакетного трафика являются *групповые потоки* Пуассона. [4; 6; 12].

Они обобщают пуассоновские потоки и являются альтернативой моделям, учитывающим *фрактальные* свойства потоков [2; 3; 8–11], которые, в виду весьма высокой сложности, нашли ограниченное применение на практике.

В таких потоках выполняются свойство стационарности и отсутствия последствия, но не выполняется свойство ординарности.

Групповой пуассоновский поток – это поток независимых событий с параметром λ . Интервалы между соседними событиями распределены по экспоненциальному закону. Каждое событие заключается в одновременном появлении в момент t_k «пачки» из μ_k независимых случайно распределенных чисел заявок, с распределением f_k . Примем, что τ – это интервал времени обработки одной заявки в некоторой СМО. Разделим достаточно большой промежуток времени T , в течение которого действует поток указанных событий, на N_τ таких по-

следовательных интервалов. Пусть $m_i(\tau)$ – число событий, произошедших в течение i -го интервала времени τ . Тогда вероятности наступления на интервале τ ровно n событий подчиняются закону Пуассона:

$$P\{m_i(\tau) = n\} = P_n(\lambda\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} e^{-\lambda\tau}.$$

Нами получены соотношения, определяющие зависимости математического ожидания $\overline{m(\tau)}$ и дисперсии $D_m(\tau)$ чисел заявок, поступающих в течение интервалов τ [6].

$$\overline{m(\tau)} = \lambda\tau\bar{k}, \quad (1)$$

$$D_m(\tau) = \rho\bar{k}(1 + v_k^2) = E\rho,$$

где $\bar{k}$ – среднее число заявок в «пачке» $\rho = \lambda\tau\bar{k} = \overline{m(\tau)}$ – общий коэффициент загрузки; $v_k^2 = \frac{D_k}{(\bar{k})^2}$ – квадрат коэффициента вариации чисел заявок в пачках. Дисперсия $D_m(\rho)$ линейно зависит от коэффициента загрузки ρ (рисунок 2), так же, как это бывает в обычном пуассоновском потоке, где $D_m(\rho) = \rho$.

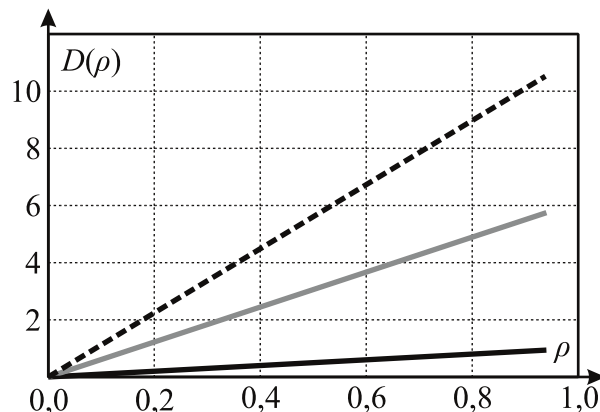


Рисунок 2. Зависимости дисперсий групповых потоков от коэффициента загрузки

Средние значения очередей в системах массового обслуживания с групповыми пуассоновскими потоками.

С применением интервального метода анализа трафика, нами была получена зависимость средних размеров очередей для одноканальных СМО [5].

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho) + 2\mu_{q_{i-1}m_i}(\rho)}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2},$$

Здесь $D_m(\rho)$ – дисперсия $m_i(\rho)$, а $\mu_{q_{i-1}m_i}(\rho)$ – второй взаимный центральный момент последовательностей $q_{i-1}(\rho)$ и $m_i(\rho)$, называемый ковариационным моментом или ковариацией. Он определяется, как математическое ожидание произведений центрированных значений элементов $q_{i-1}(\tau)$ и $m_i(\tau)$.

Рассмотрим указанную формулу применительно к модели группового пуассоновского потока. Дисперсия $D_m(\rho)$ определяется соотношением (1), а $\mu_{q_i, m_i}(\rho) = 0$ ввиду независимости событий в рассматриваемом потоке. Следовательно, для рассматриваемых групповых пуассоновских потоков получаем простое соотношение

$$\overline{q(\rho)} = \frac{\rho E}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2}.$$

Для обычного пуассоновского потока $E = 1$, получаем известную формулу Хинчина-Поллачека для СМО с постоянным значением времени обслуживания.

Наклон кривой, реализуемой зависимостью (1) на начальном участке, при весьма малых значениях коэффициента загрузки определяется производной $\overline{q(0)} = E - 1$.

На рисунке 3 представлены полученные в результате имитационного моделирования зависимости размеров средних очередей для обычного пуассоновского (нижняя кривая) потоков и группового пуассоновского (верхняя кривая).

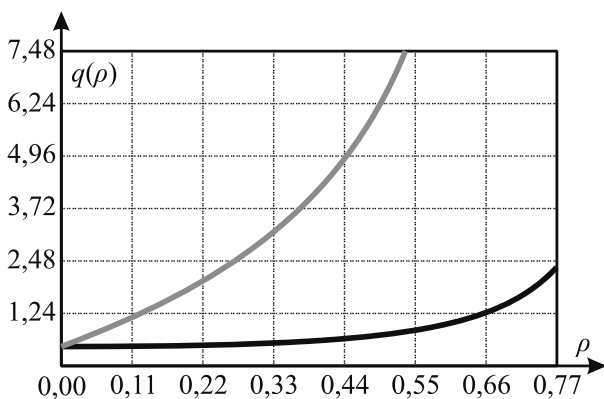


Рисунок 3. Зависимости размеров средних очередей группового пуассоновского и обычного пуассоновского потоков от коэффициента загрузки ρ

В верхнем углу рисунка 3 показано значение размера очереди для группового потока, при коэффициенте загрузки $\rho = 0,5$, полученное непосредственно с графика, $\overline{q(\rho)} = 5,186$. Теоретическое значение, определенное по формуле (5), $\overline{q(\rho)} = 5,25$. Незначительная разница объясняется погрешностью процесса имитационного моделирования. Как и следовало ожидать, наклон кривой для пуассоновского потока при малых значениях коэффициента загрузки практически равен нулю. Это свойство является основной причиной препятствующей хорошей аппроксимации зависимостей очередей в СМО мультисервисных сетей с помощью пуассоновских и гиперэкспоненциальных моделей трафика.

На рисунке 4 представлены результаты приближения очереди реального видеотрафика с помощью

группового пуассоновского и гиперэкспоненциального потоков для малых значений загрузки канала. Сверху вниз: групповой пуассоновский поток-2, реальный трафик-1, групповой гиперэкспоненциальный поток-3, ординарный гиперэкспоненциальный поток-4, который имеет следующие параметры: отношение интенсивности высокочастотной фазы к интенсивности низкочастотной фазы – равно 20, вероятность высокочастотной фазы P – равна 0,95.

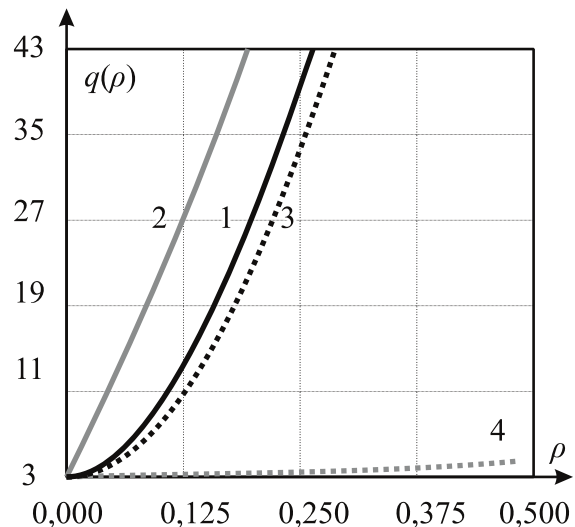


Рисунок 4. Зависимости размеров средних очередей реального трафика и приближений

Из графиков следует, что ординарный гиперпуассоновский поток совершенно не пригоден в качестве модели видеотрафика, поскольку даже при самом широком изменении параметров, средние размеры его очередей при малых загрузках изменяются весьма незначительно.

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрировано, что ординарные потоки, как пуассоновские, так и гиперэкспоненциальные, малоприспособны для аппроксимации очередей, образуемых реальным видеотрафиком современных мультисервисных сетей. Для хорошей аппроксимации можно использовать групповые потоки обоих типов. Однако, групповые пуассоновские потоки позволяют получить весьма простые аналитические зависимости средних значений очередей от коэффициента загрузки систем массового обслуживания и поэтому являются наиболее предпочтительными.

Литература

1. Основы моделирования сложных систем: учебное пособие для вузов / Л.М. Дыхненко [и др.]; под общей ред. И.В. Кузьмина. Киев: Выща школа, 1981. 359 с.
2. Вишневский В.М., Дудин А.Н. Системы мас-

- сового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.
3. Neuts M.F. Versatile Markovian point process // Journal of Applied Probability. 1979. Vol. 16, no. 4. P. 764–779. DOI: <https://doi.org/10.2307/3213143>.
 4. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000. 175 с.
 5. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 290 с.
 6. Likhtsinder B.Ya., Bakay Yu.O. Models of group Poisson flows in telecommunications traffic control // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28, № 3. С. 75–89.
 7. Likhtsinder B.Ya., Kitaeva E.V., Privalov A.Yu. Queue analysis for video traffic using the generalized interval method // Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2022): VIII International Conference. Samara, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848604
 8. Ramaswami V. The N/G/1 queue and its detailed analysis // Advances in Applied Probability. 1980. Vol. 12, no. 1. P. 222–261. DOI: <https://doi.org/10.2307/1426503>
 9. Lakatos L., Szeidl L., Telek M. Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications. Springer, 2013. 388 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>
 10. Singh G., Gupta U.C., Chaudhry M.L. Detailed computational analysis of queueing time distributions of the BMAP/G/1 queue using roots // Journal of Applied Probability. 2016. Vol. 53. P. 1078–1097.
 11. Dudin A.N., Piscopo R., Manzo R. Queue with group admission of customers // Computer and Operations Research. 2015. Vol. 61. P. 89–90.
 12. Лихтциндер Б.Я., Моисеев В.И., Привалов А.Ю. Вторые моменты очередей в системах массового обслуживания с групповыми пуассоновскими потоками // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023): материалы IX Международной конференции и молодежной школы. Самара, 2023. P. 050192.

Получено 20.11.2023

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Привалов Александр Юрьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной математики и физики Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева. 443086, Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 846 332-56-07. E-mail: privalov1967@gmail.com

COMPARISON OF HYPEREXPONENTIAL AND GROUP POISSON TRAFFIC MODELS OF MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORKS

Lichtzinder B.Ya.¹, Privalov A.Yu.²

¹ *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

² *Samara National Research University, Samara, Russian Federation*

E-mail: b.lihtcinder@psuti.ru, privalov1967@gmail.com

The goal of the study was to compare hyperexponential and group Poisson flows of requests as models of burst traffic of multiservice communication networks. Various traffic models are considered for the problem of approximating the average queue created by video traffic of modern multiservice networks. Poisson and hyperexponential flows, both ordinary and group, are also considered. It is shown that group flows of both types are suitable for the task of approximating the video traffic queue. Group Poisson flows make it possible to obtain very simple analytical dependences of the average values of queues on the load factor of queueing systems and are therefore the most preferable. The inadequacy of using ordinary hyperexponential models for approximating burst flows of requests is also provided shown, since, at low values of the load factor, the dependences of the average values of queues for hyperexponential flows are practically close to zero, while the indicated dependences for burst flows have a very significant slope angle. The conclusions drawn are confirmed by the results of simulation modeling.

Keywords: *video traffic, Poisson flow, hyper exponential flow, group flows*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.03

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Doctor of Technical Science, Professor of Networks and Communication Systems Department. Tel. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Privalov Alexander Yurievich, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Professor of the Chair of Applied Mathematics and Physics, Doctor of Technical Science. Tel. +7 846 332-56-07. E-mail: privalov1967@gmail.com

References

1. Dyhnenko L.M. et al. *Fundamentals of modeling complex systems: Textbook for University*. Ed. by I.V. Kuzmin. Kiev: Vyshcha shkola, 1981. 359 p. (In Russ.)
2. Vishnevsky V.M., Dudin A.N. Queueing systems with correlated arrival flows and their applications to modeling telecommunication networks. *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 8, pp. 3–59. (In Russ.)
3. Neuts M.F. Versatile Markovian point process. *Journal of Applied Probability*, 1979, vol. 16, no. 4, pp. 764–779. DOI: <https://doi.org/10.2307/3213143>. (In Russ.)
4. Dudin A.N., Klimenok V.I. *Queueing systems with correlated flows*. Minsk: BSU, 2000. 175 p. (In Russ.)
5. Lichtzinder B.Ya. *Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2018, 290 p. (In Russ.)
6. Likhttsinder B.Ya., Bakay Yu.O. Models of group Poisson flows in telcommunications traffic control. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 75–89.
7. Likhttsinde B.Ya., Kitaeva E.V., Privalov A.Yu. Queue analysis for video traffic using the generalized interval method. *Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2022): VIII International Conference*. Samara, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848604
8. Ramaswami V. The N/G/1 queue and its detailed analysis. *Advances in Applied Probability*, 1980, vol. 12, no. 1, pp. 222–261. DOI: <https://doi.org/10.2307/1426503>
9. Lakatos L., Szeidl L., Telek M. *Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications*. Springer, 2013, 388 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>
10. Singh G., Gupta U.C., Chaudhry M.L. Detailed computational analysis of queueing time distributions of the BMAP/G/1 queue using roots. *Journal of Applied Probability*, 2016, vol. 53, pp. 1078–1097.
11. Dudin A.N., Piscopo R., Manzo R. Queue with group admission of customers. *Computer and Operations Research*, 2015, vol. 61, pp. 89–90.
12. Lichtzinder B.Ya., Moiseev V.I., Privalov A.Yu. Second moments of queues in queueing systems with group Poisson flows. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii n (ITNT-2023): materialy IX Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkol*. Samara, 2023, pp. 050192. (In Russ.)

Received 20.11.2023

СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 004.032.26

ГРУППОВЫЕ ГАММА-ПОТОКИ И НЕЙРОСЕТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ СОВРЕМЕННОГО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА

Лихтциндер Б.Я.¹, Привалов А.Ю.², Максимова Т.Д.¹

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, РФ

E-mail: lixt@psuti.ru, privalov.ayu@ssau.ru, td.pavlova@psuti.ru