

МАР- И ВМАР-ПОТОКИ В МОДЕЛЯХ ТРАФИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Лихтциндер Б.Я., Мусеев В.И.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: lixt@psuti.ru

Рассматриваются модели одноканальных систем массового обслуживания с входными потоками, имеющими произвольную корреляцию. Для данных систем приведены обобщения формулы Хинчина – Поллачека, рассмотрена интервальная модель входного потока видеотрафика и определены влияния ее параметров на средние размеры очередей. Показана недостаточная эффективность применения моделей самоподобных процессов к анализу очередей в телекоммуникационных системах. Обозначена перспективность применения разрабатываемых автором интервальных методов анализа очередей в системах массового обслуживания с коррелированными входными потоками. Рассмотрена эволюция моделей потоков, управляемых цепью Маркова, в том числе МАР- и ВМАР-потоков. Рассмотрены возможности применения марковских потоков в качестве моделей трафика телекоммуникационных систем. На примерах показана адекватность характеристик таких моделей характеристикам реальных потоков видеотрафика. Сделанные выводы подтверждены результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: *системы массового обслуживания, групповые модели, очереди, видеотрафик, корреляции, формула Хинчина – Поллачека*

Введение

Успешное применение результатов анализа систем массового обслуживания (СМО) для оценивания очередей и задержек в реальных системах требует предварительного осуществления операции аппроксимации характеристик реального потока, типичного для данной системы. И от того, какие характеристики аппроксимируются и какие математические модели применены для их аппроксимации, существенно зависит возможность получения адекватного результата анализа. Наиболее ранние математические модели процессов обработки информационных потоков в телекоммуникационных сетях основывались на представлении потоков заявок пуассоновскими потоками. Потоки определялись как стационарные, ординарные с отсутствием последствия. Такие потоки имели экспоненциальное распределение интервалов времени между соседними заявками, а сами интервалы времени были взаимно независимы. Кроме того, предполагалось, что и время обслуживания заявок имеет экспоненциальное распределение и не зависит от моментов поступления заявок. Потоки запросов на соединения в телефонной станции представляли суперпозицию большого числа потоков заявок малой интенсивности от отдельных пользователей, которые, как известно, сходятся к пуассоновскому потоку. В силу этого модель стационарного пуассоновского потока хорошо согласовывалась с реальными потоками в телефонных сетях.

Появление сетей передачи данных с коммутацией пакетов показало, что пуассоновские модели потоков не являются адекватными, и потребо-

вало разработки новых моделей, основанных на непугассоновских распределениях. Исследуются потоки с распределениями Вейбулла и Эрланга, гамма-распределением, распределением Парето и др. Все интервалы времени, представляемые данными распределениями вероятностей, по-прежнему считались взаимно независимыми. Это позволяло применить хорошо разработанный аппарат теории очередей для анализа сетей с пакетной коммутацией. Однако с появлением мультисервисных телекоммуникационных сетей, в которых единый ресурс использовался для передачи весьма разнородных информационных потоков, оказалось, что модели с независимыми заявками не отражают поведения реальных потоков пакетов. Реальные потоки имеют высокую степень корреляции, и пренебрегать корреляционными свойствами потоков уже нельзя. Например, нами показано, что для потока видеотрафика доля корреляционной составляющей в образующих очередях в десятки раз превышает долю дисперсионной составляющей [1].

Описание сложных коррелированных потоков в современных телекоммуникационных сетях часто производилось с использованием «фрактальных» процессов. Работы посвящены анализу «самоподобного» трафика, однако ощутимых практических результатов указанные исследования не принесли. Причины этого, изложенные в [2], а также рассмотренные в [3], сводятся к следующему. Самоподобный входной поток нельзя рассматривать в отрыве от системы, где происходит его обработка. Размеры очередей определяются совокупностью двух потоков заявок: вход-

ного и потока обработанных заявок, покидающих очередь. Оба эти потока имеют высокую степень взаимной корреляции. Очереди в таких системах имеют циклический характер, и участки, на которых происходит обработка поступивших заявок, чередуются с участками, где заявки отсутствуют и процессор «простаивает». В [4] показано, что корреляционные зависимости очередей ограничиваются размерами циклов очередей, а корреляционные связи между значениями очередей различных циклов отсутствуют. В итоге результирующий поток, образующий очередь, свойства долговременной зависимости «самоподобных» потоков теряет.

Недостаточная эффективность представления трафика моделями «самоподобных» процессов привела к созданию класса моделей потоков, управляемых цепью Маркова. Этапы развития указанных моделей представлены в обзоре [2]. В нашей стране они были названы МС-потоками, а в США эволюционировали от «разносторонних (versatile) потоков», через «N-потоки (потоки Ньюта)» [5] до марковских входных потоков (MAP – Markovian Arrival Process) и их обобщений – групповых марковских входных потоков (BMAP – Batch Markovian Arrival Process) [8–10]. На ранних стадиях указанных моделей интервалы поступления стационарного пуассоновского потока чередовались с интервалами, имеющими показательное распределение, где этот поток отсутствовал (IPP-потоки). Затем перешли к рассмотрению SPP-потоков, где чередовались между собой интервалы поступления нескольких стационарных пуассоновских потоков различной интенсивности.

Следует отметить, что подобные потоки получили также название «гиперэкспоненциальные», а их обобщения – «гиперэрланговские» и «гипер-Г-потоки» [1]. На базе указанных потоков еще в 70-х годах прошлого века были получены формулы для средних значений размеров очередей [6]. Однако работы с их применением появляются и поныне [7]. Стимулом к развитию BMAP-моделей явились их матричные представления, предложенные в работах М. Ньюта. Переход к матричным представлениям вероятностных характеристик BMAP-потоков позволил эффективно осуществлять описание их работы и открыл широкий простор для аналитических исследований. Однако определение характеристик входного потока заявок по-прежнему осуществлялось отдельно от характеристик обрабатывающей его системы. Вместе с тем такая характеристика, как время обработки пакета в телекоммуникацион-

ных системах, не только зависит от пропускной способности системы, но и тесно связано с размером пакета, который является одной из характеристик входного потока.

Интервальный метод

Одним из перспективных, на наш взгляд, направлений изучения пакетного трафика является разрабатываемый нами интервальный метод [1], позволяющий заменить анализ интервалов времени между соседними заявками и интервалов времени обработки заявок анализом одной случайной величины – числом заявок, поступающих в течение последовательных интервалов времени обработки каждой из заявок. Нами показано, что дисперсия и корреляционные свойства указанной случайной величины при заданной загрузке полностью характеризуют средний размер очереди в системах массового обслуживания [1].

Для одноканальных СМО нами было получено соотношение (1), обобщающее известную формулу Хинчина – Поллачека для среднего значения очереди $\overline{q}(\rho)$ и справедливое для любых стационарных потоков заявок при заданном коэффициенте загрузки ρ .

$$\overline{q}(\rho) = \frac{D_m(\rho) + 2\text{Cov}[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)]}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}. \quad (1)$$

Анализ числителя (1) показывает, что среднее значение очереди для потоков любого вида зависит от двух составляющих: первой является дисперсия $D_m(\rho)$ числа заявок (пакетов) $m_i(\rho)$, поступающих в течение интервала времени обработки одной заявки; вторая обусловлена наличием корреляционных связей в указанном потоке. Корреляционные связи учитываются ковариацией $\text{Cov}[q_{i-1}(\rho); m_i(\rho)]$ между значениями $m_i(\rho)$ и значениями очереди $q_{i-1}(\rho)$ на предыдущем интервале анализа. Для пуассоновского потока в частном случае указанная составляющая равна нулю, а дисперсия $D_m(\rho) = \rho$. При этом обобщенная формула (1) приобретает обычный вид:

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

Анализ видеотрафика

В мультисервисных сетях связи (МСС) с пакетной коммутацией поток пакетов существенно отличается от пуассоновского и носит явно выраженный пачечный характер. На рисунке 1 представлена реализация видеотрафика (узкие пачки) на фоне равномерного пуассоновского потока одинаковой с ним интенсивности (серый фон). На рисунке 2 показан фрагмент указанной реали-

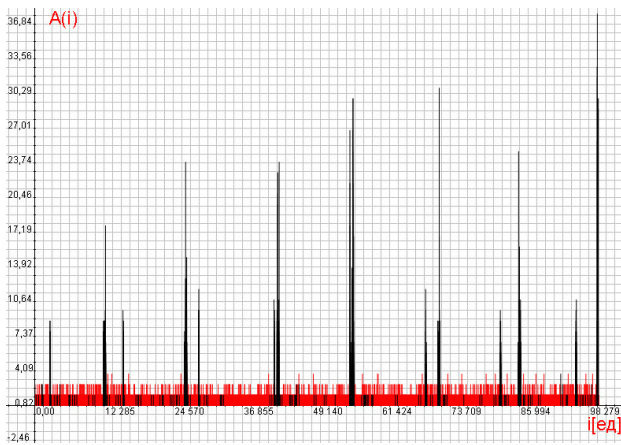


Рисунок 1. Поток видеотрафика и пуассоновский поток

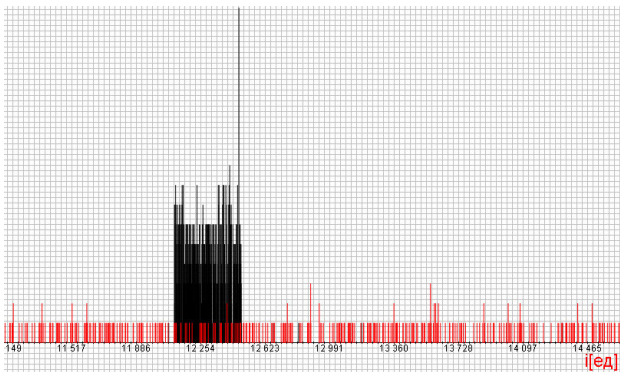


Рисунок 2. Поток видеотрафика и пуассоновский поток в увеличенном масштабе времени

зации в увеличенном масштабе времени. Каждая тонкая вертикальная полоска соответствует числу пакетов, поступающих в течение интервала времени обработки одного пакета. Из графиков следует, что для видеопотока имеются интервалы, в течение которых поступают десятки пакетов, в то время как пуассоновский поток содержит на указанных интервалах один или два пакета. Это и объясняет наличие больших очередей при передаче потоков видеотрафика.

Пачечный характер видеотрафика объясняется тем, что декодер приемника периодически запрашивает у сервера «порции» видеoinформации объемом порядка одной секунды видеопередачи. Указанная информация хранится в ячейках буферной памяти и равномерно потребляется из нее в процессе воспроизведения. Перед началом передачи в буферную память заносится некоторый начальный объем информации (приблизительно на 10 с видеовоспроизведения), который в процессе воспроизведения стараются поддерживать постоянным. Для пачечного потока видеотрафика составляющая, обусловленная дисперсией $D_m(\rho)$, оказывается существенно меньше,

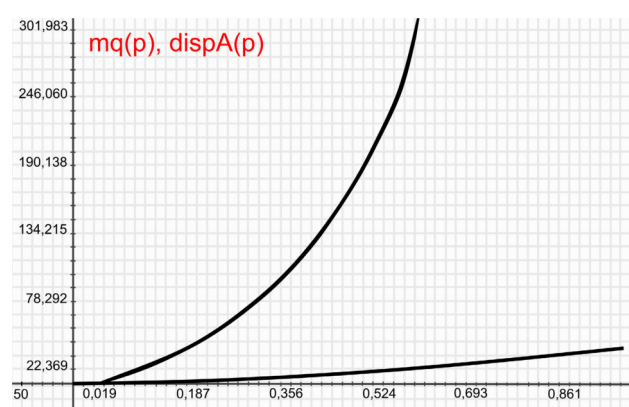


Рисунок 3. Зависимости дисперсии и средних размеров очередей видеотрафика при различных значениях коэффициента загрузки ρ

чем составляющая, обусловленная наличием корреляционных связей.

На рисунке 3 для рассматриваемого видеотрафика показаны зависимости дисперсии (нижняя кривая) и средних размеров очереди (верхняя кривая) при различных значениях коэффициента загрузки ρ , полученные в результате имитационного моделирования.

Значение дисперсии $D_m(0,5) = 8,8$, в то время как средний размер очереди $q(0,5)$ превышает 150 пакетов. Корреляционная составляющая потока видеотрафика очень велика.

МАР-модели

Развитие МАР- и ВМАР-моделей открыло широкое поле для аналитических исследований пачечных потоков в СМО. Основными строительными элементами указанных моделей являются фрагменты простейших потоков, которые коммутируются цепью Маркова. Поскольку заявки в простейших потоках взаимно независимы и корреляционные связи между ними отсутствуют, казалось бы, что вероятность появления корреляционных связей в результирующем потоке должна быть мала. Однако это далеко не так: путем изменения параметров МАР-потока можно получить модели, интервальные характеристики которых весьма близки к соответствующим характеристикам потоков реального видеотрафика.

В качестве примера рассмотрим поток реального видеотрафика, представленный на рисунках 1, 2. Поток образуется пачками пакетов, циклически повторяющимися через достаточно большие интервалы времени. Пакеты в пачках следуют один за другим с весьма высокой интенсивностью, которую в модели обозначим через λ_1 . Примем, что интервалы между соседними пакетами в пачке имеют экспоненциальное

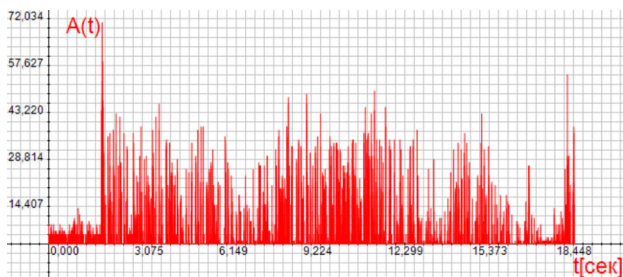


Рисунок 4. Реализация потока видеотрафика, полученного от сервера U-TUBE

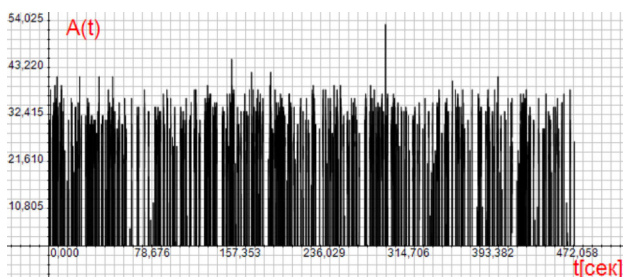


Рисунок 5. Реализация MAP-потока, полученного от сервера U-TUBE

распределение вероятностей. Примем также, что интервалы времени между пачками также имеют экспоненциальное распределение вероятностей с параметром интенсивности λ_2 , много меньшим, чем λ_1 . Таким образом, нами рассматривается двухфазная модель.

Обозначим через P_{12} и P_{21} вероятности того, что при поступлении очередного пакета система перейдет из одной фазы в другую. Вероятности в процессе остаются неизменными. Рассмотрим модель, имеющую следующие исходные параметры: $P_{12} = 0,005$; $P_{21} = 0,995$; $\lambda_1 = 10000$; $\lambda_2 = 1,0$. Объем выборки $N = 100000$.

На рисунке 4 представлена реализация реального потока видеотрафика, полученного от сервера U-TUBE, при коэффициенте загрузки канала $\rho = 0,5$. Поток носит пачечный характер, и интервалы обработки одного пакета, содержащие более 30 поступивших пакетов, чередуются с интервалами, где пакеты отсутствуют. На рисунке 5 представлена реализация сгенерированного MAP-потока с указанными выше параметрами.

Естественно, что моделирующий поток более равномерный, чем реальный, однако оба они имеют пачечную структуру, и интервалы обработки одного пакета, содержащие более 30 поступивших пакетов, также чередуются с интервалами, где пакеты отсутствуют.

На рисунке 6 показаны зависимости средних размеров очередей (верхние графики) и дисперсий (нижние графики) для реализаций MAP-потока и рассматриваемого потока видеотрафика,

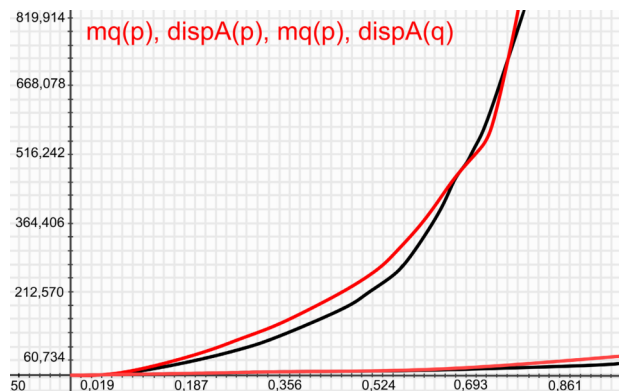


Рисунок 6. Зависимости средних размеров очередей и дисперсий для реализаций MAP-потока и потока видеотрафика

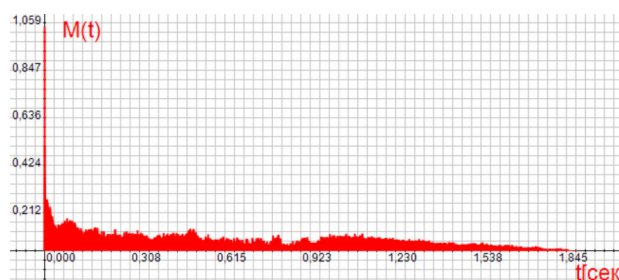


Рисунок 7. Нормированная ковариационная функция чисел заявок $m_i(\rho = 0,5)$ для потока видеотрафика

графики зависимостей очередей имеют вполне достаточное для практических целей совпадение. Нижние графики дисперсий показывают, что, в соответствии с (1), дисперсионные составляющие, в отличие от ковариационных, в обоих случаях оказывают незначительное влияние на размеры очередей.

На рисунках 7, 8 представлены нормированные ковариационные функции $r(k; \rho) = \frac{\mu_m(k; \rho)}{D_m(\rho)}$ чисел заявок $m_i(\rho)$ при коэффициенте загрузки $\rho = 0,5$ для рассматриваемого потока видеотрафика и MAP-потока соответственно.

Обе ковариационные функции имеют похожий вид и весьма медленное затухание, они знакопеременны, причем все значения корреляционных коэффициентов малы по сравнению с дисперсией. Однако их сумма при сдвиге в пределах цикла очередей все же намного превосходит значение дисперсии.

Заключение

Рассмотренные примеры показывают, что даже такие неравномерные потоки, как потоки пакетов видеотрафика, достаточно адекватно отображаются MAP-моделями, которые по своей структуре намного проще моделей самоподобных процессов, что открывает широкие перспек-

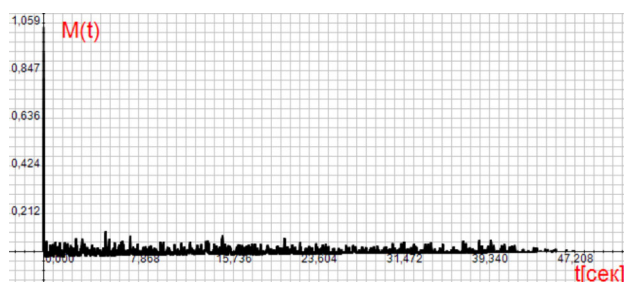


Рисунок 8. Нормированная ковариационная функция чисел заявок $m_i(\rho = 0,5)$ для MAP-потока

тивы для аналитического исследования трафика мультисервисных телекоммуникационных сетей.

Литература

1. Лихтциндер Б.Я. Интервальный метод анализа мультисервисного трафика сетей доступа // Электросвязь. 2015. № 12. С. 52–54.
2. Вишневский В.М., Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.
3. Лихтциндер Б.Я. Самоподобие трафика мультисервисных сетей связи: мифы и реальность // Инфокоммуникационные технологии. 2019. Т. 17. № 3. С. 276–282.
4. Лихтциндер Б.Я., Блатов И.А. Об оценке длин очередей с произвольной корреляцией // Информационные технологии и нанотехнологии (ITNT). 2018. С. 1607–1616.
5. Neuts M.F. Versatile Markovian point process // J. Appl. Probab. 1979. Vol. 16. № 4. P. 764–779.
6. Основы моделирования сложных систем / под ред. И.В. Кузьмина. Киев: Вища школа. 1981. 360 с.
7. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Када О. Математическая модель телетрафика на базе системы с эрланговскими и гиперэрланговскими распределениями // Инфокоммуникационные технологии. 2019. Т. 17. № 3. С. 270–276.
8. Flexible dual connectivity spectrum aggregation for decoupled uplink and downlink access in 5G heterogeneous systems / M.A. Lema [et al.] // IEEE J. Selected Areas Commun. 2016. № 99. P. 1–12.
9. A multiband OFDMA heterogeneous network for millimeter wave 5G wireless applications / S. Niknam [et al.] // IEEE Access. 2016. № 4. P. 640–648.
10. Vishnevsky V., Larionov A., Frolov S. Design and scheduling in 5G stationary and mobile communication systems based in wireless millimeter-wave mesh networks // Distributed Computer and Communication Networks, Commun. Comput. Inform. Sci. 2014. № 279. P. 11–27.

Получено 25.02.2020

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

Моисеев Виктор Игоревич, аспирант кафедры СССР ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 342 239-66-26. E-mail: vim@psu.ru

MAP- AND BMAP-FLOWS IN TRAFFIC MODELS OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Likhtsinder B.Ya., Moiseev V.I.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: lixt@psuti.ru

Models of single-channel queueing systems with arbitrary correlated input streams are considered. For these systems, generalizations of the Khinchin – Pollachek formula are given, an interval model of the video traffic input stream is considered, and the influence of its parameters on the average size of the queues is determined. The insufficient efficiency of applying self-similar process models to the analysis of queues in telecommunication systems is shown. The prospects of using the interval methods of queue analysis developed by the author in queueing systems with correlated input flows is shown. The evolution of flow models controlled by the Markov chain, including MAP and BMAP flows, is considered. The possibilities of using Markov flows as traffic models in telecommunication

systems are considered. By means of an example, the equivalence of such models' characteristics to the characteristics of the real flows of video traffic is shown. The conclusions are confirmed by the results of simulation modeling.

Keywords: *queueing systems, group models, queues, video traffic, correlations, Khinchin – Pollachek formula*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.2.04

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443090, Russian Federation; Doctor of Technical Science, Professor of Networks and Communication Systems Department. Tel. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Moiseev Victor Igorevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443090, Russian Federation; PhD Student of Networks and Communication Systems Department. Tel. +7 342 239-66-26. E-mail: vim@psu.ru

References

1. Likhttsinder B.Ya. Interval analysis method of multiservice traffic access networks. *Elektrosvyaz*, 2015, no. 12, pp. 52–54. (In Russian.)
2. Vishnevsky V.M., Dudin A.N. Queueing systems with correlated input flows and their application for modeling telecommunication networks. *Automation and Telemekhanics*, 2017, no. 8, pp. 3–59. (In Russian.)
3. Likhttsinder B.Ya. Self-similarity of multiservice communication network traffic: myths and reality. *Infocommunication technologies*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 276–282. (In Russian.)
4. Likhttsinder B.Ya., Blatov I.A. On estimating queue lengths with arbitrary correlation. *ITNT*, 2018, pp. 1607–1616. (In Russian.)
5. Neuts M.F. Versatile Markovian point process. *J. Appl. Probab.*, 1979, vol. 16, no. 4, pp. 764–779.
6. *Fundamentals of the modeling of complex systems*. Ed. by I.V. Kuzmina. Kiev: Vishcha school, 1981, 360 p. (In Russian.)
7. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kada O. A mathematical model of teletraffic based on a system with Erlang and hyper Erlang distributions. *Infocommunication technologies*, 2019, vol. 17, no. 3, p. 270–276. (In Russian.)
8. Lema M.A. et al. Flexible dual connectivity spectrum aggregation for decoupled uplink and downlink access in 5G heterogeneous systems. *IEEE J. Selected Areas Commun.*, 2016, no. 99, pp. 1–12.
9. Niknam S. et al. A multiband OFDMA heterogeneous network for millimeter wave 5G wireless applications. *IEEE Access.*, 2016, no. 4, pp. 640–648.
10. Vishnevsky V., Larionov A., Frolov S. Design and scheduling in 5G stationary and mobile communication systems based in wireless millimeter-wave mesh networks. *Distributed Computer and Communication Networks, Commun. Comput. Inform. Sci.*, 2014, no. 279, pp. 11–27.

Received 25.02.2020