

# Проектирование компьютерных сетей

DOI 10.66032/2221-2574-2024-1-2-41-51

УДК 621.391

## ВЛИЯНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ РАЗНОПРИОРИТЕТНОГО ТРАФИКА В УЗЛАХ КОММУТАЦИИ НА КАЧЕСТВО ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ СВЯЗИ

**Обердерфер Валерий Николаевич**

кандидат технических наук, преподаватель ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»<sup>1</sup>

E-mail: [oberkadet@mail.ru](mailto:oberkadet@mail.ru)

**Лунёв Артём Дмитриевич**

кандидат технических наук, преподаватель Военного учебного центра<sup>2</sup> при ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

E-mail: [a.d.lunev@urfu.ru](mailto:a.d.lunev@urfu.ru)

**Мустивый Семен Константинович**

директор Хабаровского филиала<sup>3</sup> АО «Воентелеком»

**Филин Андрей Викторович**

адъюнкт кафедры безопасности инфокоммуникационных систем ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»<sup>1</sup>

E-mail: [fily@mail.ru](mailto:fily@mail.ru)

**Филин Фёдор Викторович**

адъюнкт кафедры безопасности инфокоммуникационных систем ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»<sup>1</sup>

E-mail: [f.sakhalin@mail.ru](mailto:f.sakhalin@mail.ru)

<sup>1</sup>Адрес: 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3.

<sup>2</sup>Адрес: 620049, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 62.

<sup>3</sup>Адрес: 680028, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Калинина, д. 108.

**Аннотация:** Рассматривается проблема качества обслуживания разноприоритетного сетевого трафика в мультисервисных сетях связи военного назначения. Предложены подходы для оценки качества предоставления разноприоритетных мультисервисных услуг связи с использованием обобщённого показателя качества и приведена процедура получения этого показателя. Описан способ получения частных показателей качества обслуживания разноприоритетного мультисервисного трафика на имитационной модели узла коммутации сети связи военного назначения. Представлено описание принципов построения и функционирования этой имитационной модели, порядок её работы и значение используемых параметров, а также приведены результаты её работы. Проведён анализ результатов имитационного моделирования полученных зависимостей частных показателей качества обслуживания разноприоритетного сетевого трафика от степени загрузки узла коммутации. Моделирование проводилось при использовании различных алгоритмов построения и обслуживания очередей потока IP-пакетов. На основе полученных результатов исследована зависимость обобщённого показателя качества обслуживания разноприоритетного сетевого трафика от степени загрузки узла коммутации в условиях применения различных алгоритмов обработки очередей IP-пакетов в узлах коммутации мультисервисной сети связи военного назначения. Сделаны выводы о необходимости выбора соответствующего алгоритма обработки очередей потока IP-пакетов в зависимости от значения коэффициента загрузки узла коммутации.

**Ключевые слова:** Мультисервисная сеть, разноприоритетный трафик, алгоритмы обслуживания очередей.

Объёмы информации, передаваемые органами военного управления, постоянно увеличиваются. При этом информация имеет различные требования как по своевременности доставки, так и по качеству её обработки. В условиях воздействия противника зачастую снижаются возможности системы связи по обработке передаваемого трафика, что требует применения механизмов, обеспечивающих поддержание требуемого качества обслуживания абонентов. Одним из таких механизмов является применение различных алгоритмов организации и обслуживания очередей, механизмы динамического выбора используемых речевых кодеков и другие [1].

Вопросы эффективности функционирования мультисервисных сетей связи отражены в работах Сычева К.И., Яновского Г.Г., Бронштейна О.И. [2, 3, 4]. Однако вопросы исследования качества обслуживания разноприоритетного речевого трафика в мультисервисной сети связи военного назначения с учётом влияния механизмов по поддержанию качества обслуживания в условиях изменяющейся пользовательской нагрузки и интенсивности обслуживания, вследствие дестабилизирующего воздействия на сеть противника, остаются открытыми.

Мультисервисная сеть связи военного назначения построена на основе современных инфокоммуникационных технологий (технологий коммутации пакетов) и обеспечивает предоставление должностным лицам органов военного управления широкого спектра информационных и телекоммуникационных услуг.

Для определения оптимального алгоритма обслуживания входящего потока пакетов на узле коммутации необходимо выбрать параметр, изменение которого будет служить своеобразным «маркером» для применения соответствующего алгоритма обслуживания очередей. Под оптимальным алгоритмом будем понимать такой алгоритм, при работе которого выполняются требования по качеству обслуживания и своевременности доставки разно-

приоритетного трафика с минимальными вычислительными затратами.

В качестве такого «маркера» предлагается использовать коэффициент загрузки узла коммутации  $\rho_z$ , расчёт значения которого будем производить по формуле:

$$\rho_z = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\mu}, \quad (1)$$

где  $\sum_{i=1}^n \lambda_i$  — суммарная интенсивность поступающего на узел коммутации трафика;  $\mu$  — интенсивность обработки трафика в узле коммутации.

Для оценки качества обслуживания разноприоритетных абонентов введём обобщённый показатель качества

$$\bar{Q}_{pcч}^* = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \alpha_{ku} Q_{ku}, \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_{pcч}^*$  — обобщённый показатель качества предоставления услуг;  $\alpha_{ku}$  — весовой коэффициент услуг (в диапазоне [0, 1]), который определяется в зависимости от категории трафика  $k \in [1, K]$  и типа трафика  $u \in [1, U]$  методом экспертных оценок;  $\bar{Q}_{ku}$  — рассчитанное значение частного интегрального показателя качества предоставления услуг для различных категории трафика  $k \in [1, K]$  и типа трафика  $u \in [1, U]$ .

Сбор параметров качества функционирования сети производится путём их измерения в фиксированных точках, в данном случае на входе и выходе узла коммутации. Частные показатели качества  $\bar{Q}_{ku}$  формируются из соответствующих параметров  $\bar{Q}_{ku} = (T_{ku}, P_{ku})$ , где  $T_{ku}$  и  $P_{ku}$  — время задержки и вероятность своевременной доставки соответственно.  $\bar{Q}_{ku}$  будет определяться как обобщённая (интегральная) оценка по двум показателям с учё-

том весовых коэффициентов  $g_i$ , также определяемых методом экспертных оценок.

Для проведения каких-либо вычислений с параметрами  $T_{ku}$  и  $P_{ku}$  необходимо произвести их нормировку (к безразмерной величине в диапазоне  $[0, 1]$ ). Нормировка показателей может быть произведена по формуле:

$$\tilde{X}_j = \frac{X_{\max} - x}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (3)$$

где  $\tilde{X}_j$  — нормированное значение параметра в диапазоне  $[0, 1]$ ;  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  — максимальное и минимальное значение нормируемого параметра соответственно, которые определяются действующими нормативными документами [5, 6];  $x$  — измеренное значение нормируемого параметра.

Существует несколько групп методов получения интегральных оценок, например:

- метод интегрирования одномерных величин (метод суммирования, метод поиска эквивалента);
- метод многомерных сравнений (включает метод многомерных средних, суммы мест, геометрической средней и др.);
- метод регрессионных зависимостей.

В данном случае, применимо к оценке качества обслуживаемого трафика для каждой группы пользователей по значениям параметров, приведённых к единой форме методом нормировки по формуле (3), для вычисления интегральной оценки удобно применить методы интегрирования одномерных величин.

Достоинством данной группы методов является их простота. Для нахождения интегральной оценки существуют численные методы, например, арифметический и геометрический. В данном случае был выбран арифметический метод, к достоинствам которого нужно отнести то, что он учитывает удельный вес каждого индивидуального компонента оценки. С учётом этого формула для нахождения частного интегрального показателя будет иметь вид:

$$\bar{Q}_{ku} = g_1\tilde{X}_1 + g_2\tilde{X}_2 + \dots + g_i\tilde{X}_i, \quad (4)$$

где  $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_j$  — значения показателей;  $g_1, g_2, \dots, g_j$  — весовые коэффициенты для соответствующих показателей.

Однако, как показывает практика, когда балльная оценка одного из составляющих интегральной оценки равна нулю (минимальному значению), интегральная оценка тоже должна быть равна минимальному значению. То есть, очевидно, что при значениях каждого из показателей (задержки и вероятности своевременной доставки пакетов) выходящего за рамки установленных требований — интегральная оценка качества обслуживания разнородного трафика для определённой группы пользователей тоже будет не соответствовать требованиям. Так как формула (4) никак этого не отражает, то для устранения этого недостатка скорректируем данную формулу (4). Тогда оценка арифметическим методом примет вид:

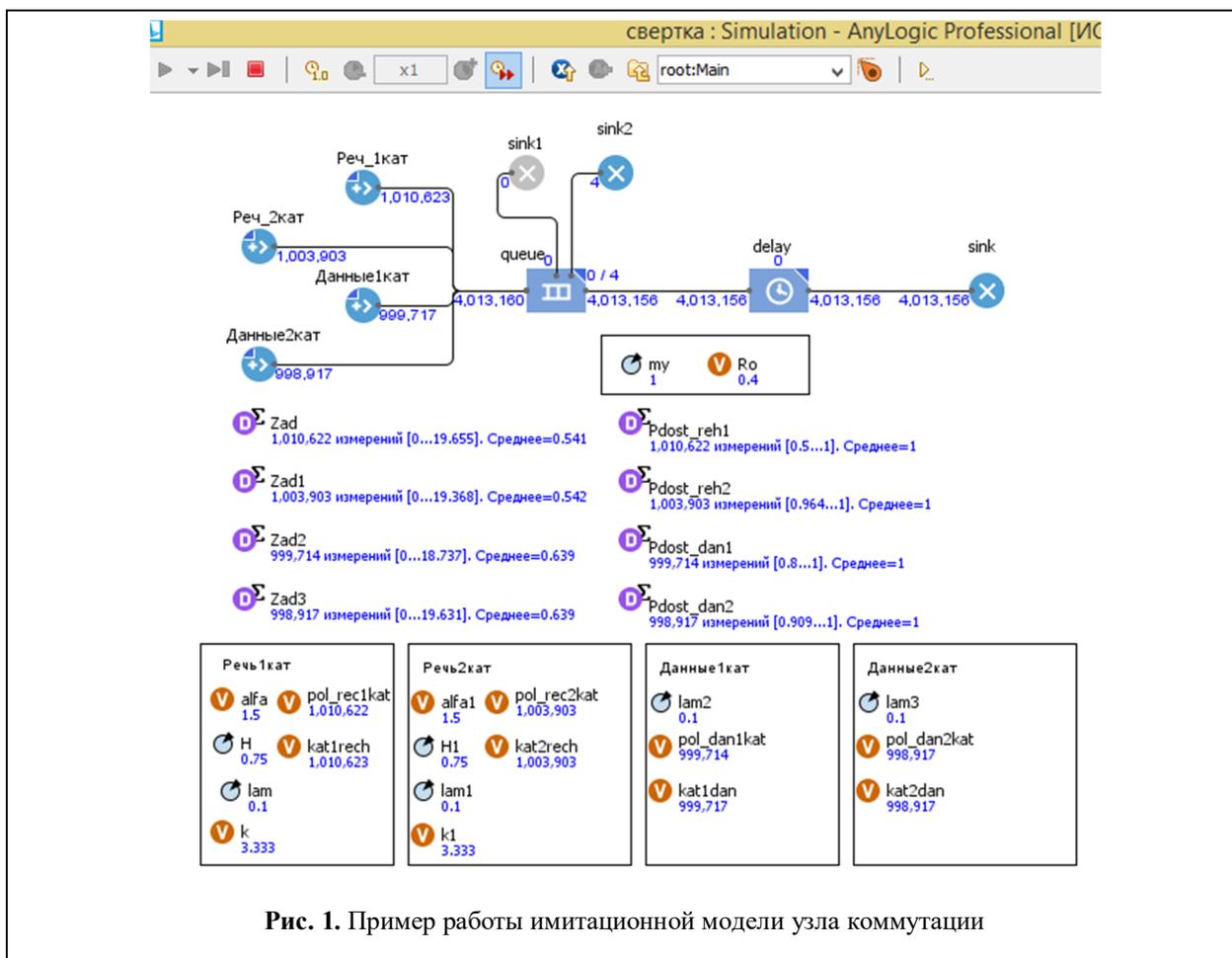
$$\bar{Q}_{ku} = S(g_1\tilde{X}_1 + g_2\tilde{X}_2 + \dots + g_i\tilde{X}_i), \quad (5)$$

где  $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_j$  — значения показателей;  $g_1, g_2, \dots, g_j$  — весовые коэффициенты для соответствующих показателей;  $S$  — коэффициент, значение которого корректируется в зависимости от значений показателей:

- $S = 1$ , если  $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_j$  не равны нулю;
- $S = 0$ , если оценка хотя бы одного из указанных показателей равна нулю.

В данной статье для наглядности действия различных механизмов на качество обслуживания весь трафик предлагается поделить на два типа  $u \in [1, 2]$ , где  $u_1$  — трафик реального времени (речь, видео),  $u_2$  — эластичный трафик (электронная почта, данные). Категорий трафика  $k \in [1, 2]$  для простоты расчётов и наглядности тоже предлагается использовать две [8].

Для расчёта частных показателей  $T_{ku}$  и  $P_{ku}$  воспользуемся имитационной моделью [7]. Данная модель узла коммутации мультисер-

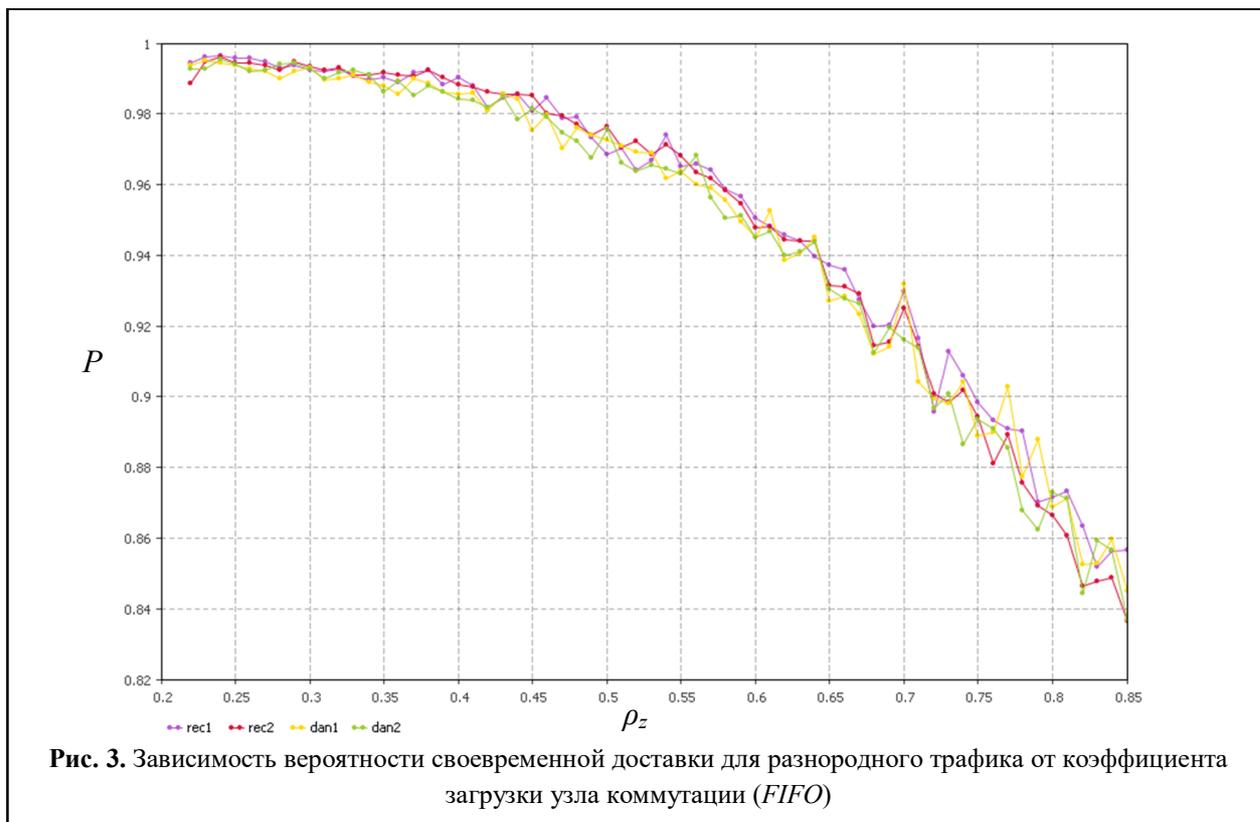
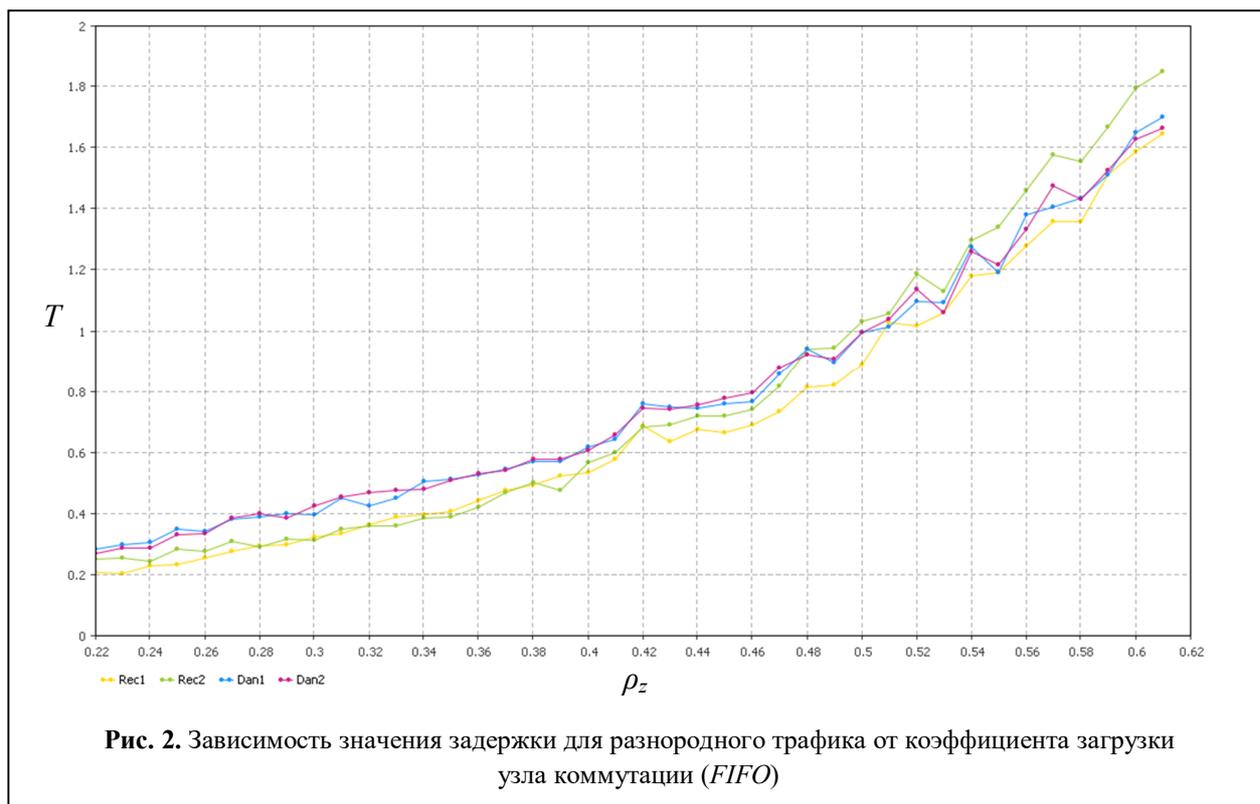


висной сети связи военного назначения была построена в среде моделирования *AnyLogic* [10], и в обобщённом виде представляет собой систему массового обслуживания. Пример работы модели представлен на рис. 1.

Поток пакетов генерируется четырьмя источниками. У источников речевой информации время между поступлениями очередных пакетов распределено по закону Парето, при этом при задании интенсивности нагрузки учитывается степень самоподобия трафика реального времени (параметр Херста), у источников трафика данных — по экспоненциальному. Время обслуживания заявок (*delay*) также распределено по экспоненциальному закону. Агрегированный поток поступает в очередь, и, если в момент поступления заявки буфер пуст и обслуживающее устройство свободно, то заявка сразу же передаётся на обслуживание. Если в момент поступления пакета буфер пуст, но об-

служивающее устройство занято обработкой ранее поступившего пакета, то пакет ожидает его завершения в буфере. Как только обслуживающее устройство завершает обслуживание очередного пакета, пакет поступает на обслуживание в обслуживающее устройство. Если прибывший пакет застаёт буфер не пустым, то он становится в очередь и ожидает обслуживания. Пакет выбирается из очереди согласно работе того или иного алгоритма обслуживания очередей. В имитационной модели реализована работа различных алгоритмов обслуживания очередей, а именно: *FIFO* — первый пришёл, первый вышел; *PQ* — очередь с приоритетами; *WFQ* — взвешенное справедливое обслуживание.

Искомые значения  $T_{ku}$  и  $P_{ku}$  представлены значениями параметров на главном экране работы модели значениями *Zad*, *Zad1*, *Zad2*, *Zad3* и *Pdost\_reh1-2*, *Pdost\_dan1-2* соответственно.



На имитационной модели [7] был проведён ряд экспериментов, результаты которых представлены на рис. 2 – рис. 7.

На рис. 2 представлена зависимость времени задержки от коэффициента загрузки УК, при использовании дисциплины обслуживания

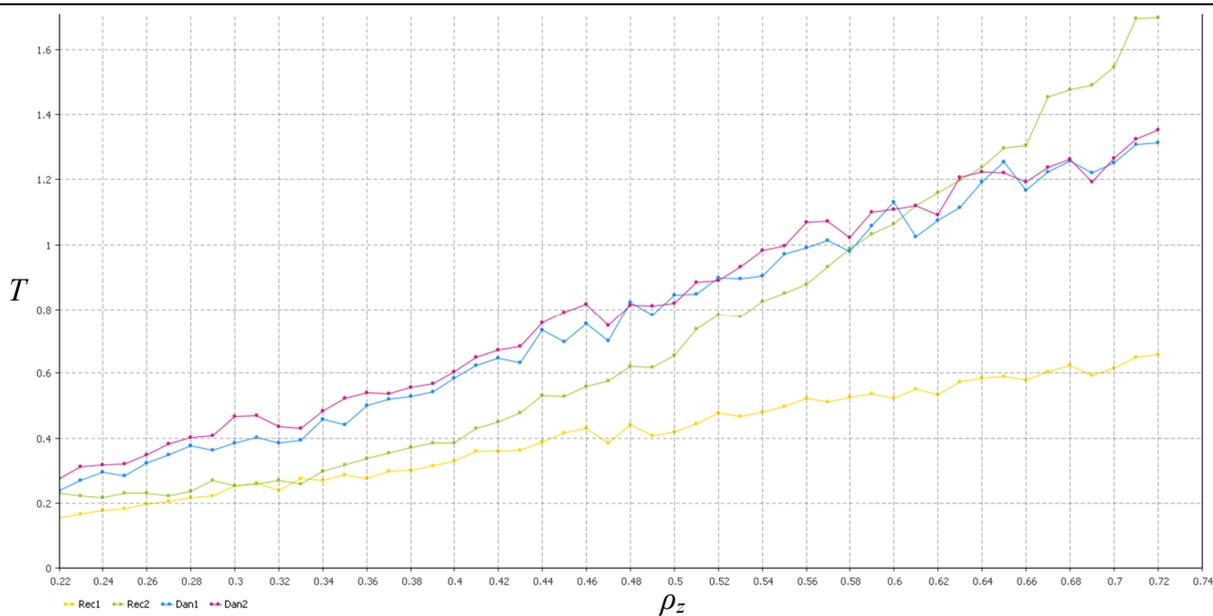


Рис. 4. Зависимость значения задержки для разнородного трафика от коэффициента загрузки узла коммутации ( $PQ, \lambda_0 > \lambda_{p\theta}$ )

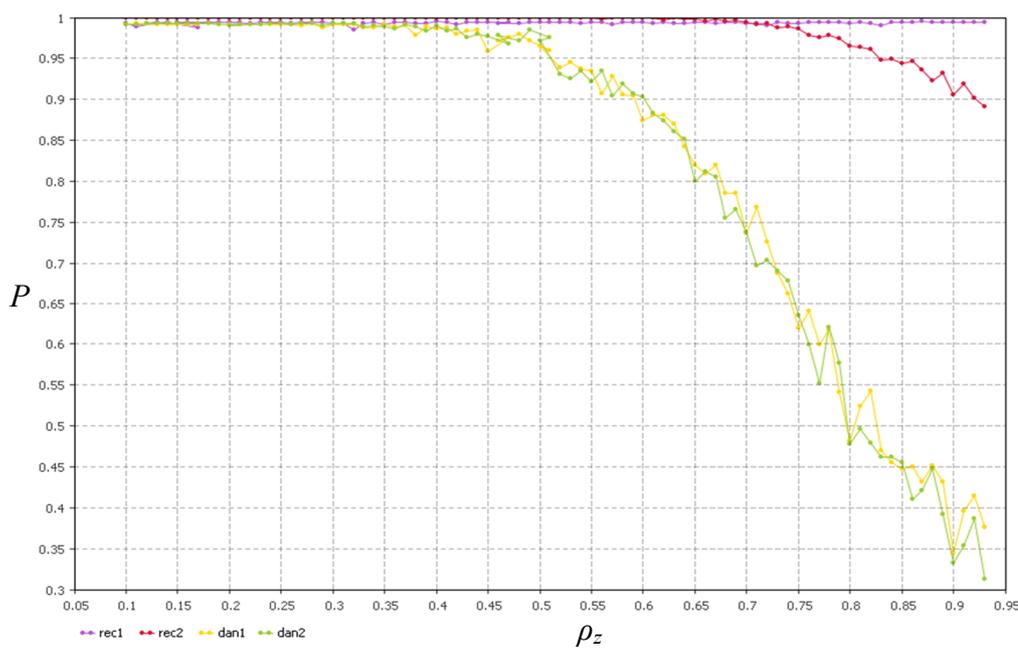


Рис. 5. Зависимость вероятности своевременной доставки для разнородного трафика от коэффициента загрузки узла коммутации ( $PQ, \lambda_0 > \lambda_{p\theta}$ )

очереди *FIFO*. Из графиков видно, что при значении  $\rho_z = 0,36$ , значение задержки для речевого трафика первой и второй категории составляют  $T = 450$  мс, что является максимально допустимым значением согласно руководящим документам. Для трафика данных

первой и второй категории значения задержки принимают максимально допустимый результат при  $\rho_z = 0,5$ .

На рис. 3 представлена зависимость вероятности своевременной доставки от коэффициента загрузки УК, при использовании

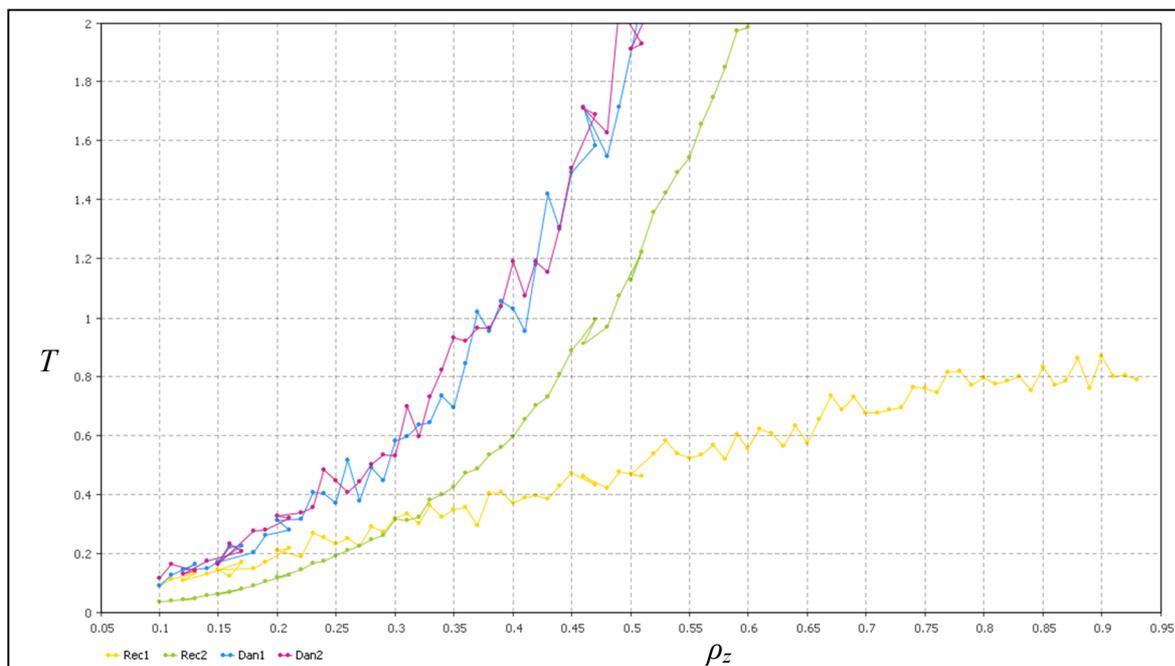


Рис. 6. Зависимость значения задержки для разнородного трафика от коэффициента загрузки узла коммутации ( $PQ, \lambda_0 < \lambda_{pe}$ )

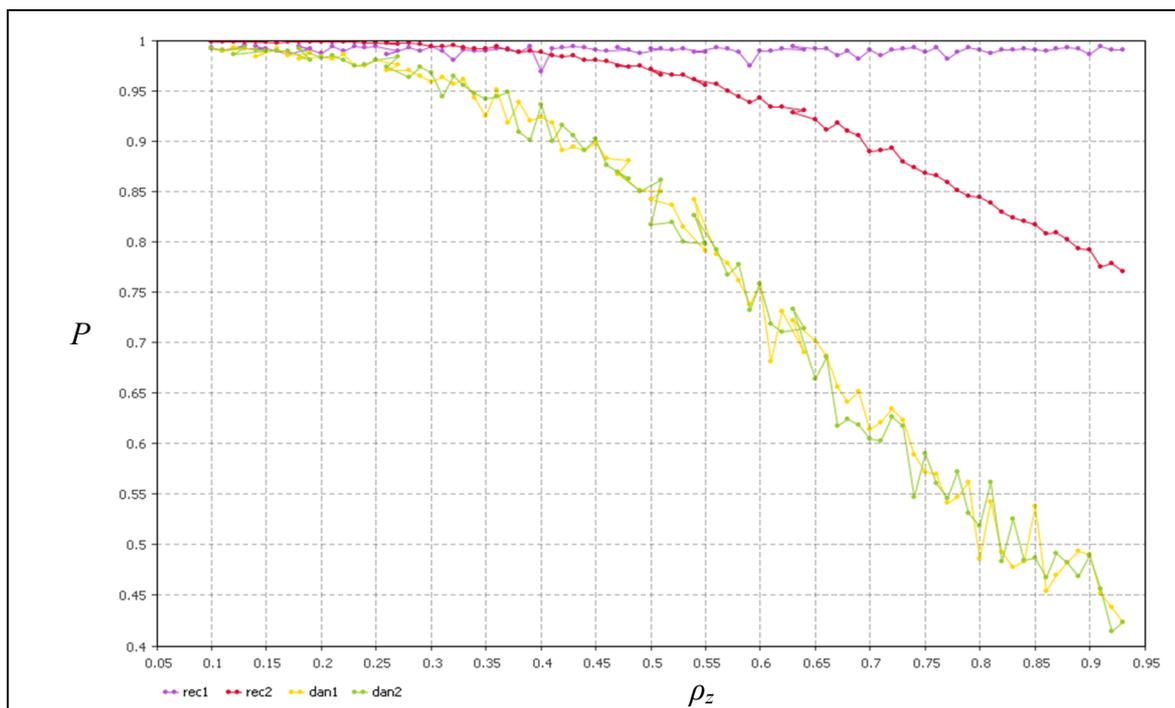


Рис. 7. Зависимость вероятности своевременной доставки для разнородного трафика от коэффициента загрузки узла коммутации ( $PQ, \lambda_0 < \lambda_{pe}$ )

дисциплины обслуживания очередей *FIFO*. Из графиков видно, что при значении  $\rho_z = 0,4$  вероятность своевременной доставки принимает максимально допустимое, согласно руко-

водящим документам, значение.

Применение алгоритма PQ для обслуживания разнородного трафика целесообразно при условии, что объём трафика данных (низ-

коприоритетного) превышает объёмы трафика реального времени, в частности трафика речи. На рис. 4 представлена зависимость времени задержки от коэффициента загрузки УК при использовании дисциплины обслуживания очередей PQ, в случае, когда интенсивность поступления трафика данных больше интенсивности поступления трафика реального времени  $\lambda_d > \lambda_{pe}$ .

Из графиков видно, что максимально допустимая задержка для речевого трафика первого приоритета достигается при значении  $\rho_z = 0,51$ , а для речевого трафика второго приоритета при значении  $\rho_z = 0,42$ . Для трафика данных результаты для первой и второй категории практически одинаковы и составляют  $\rho_z = 0,58$

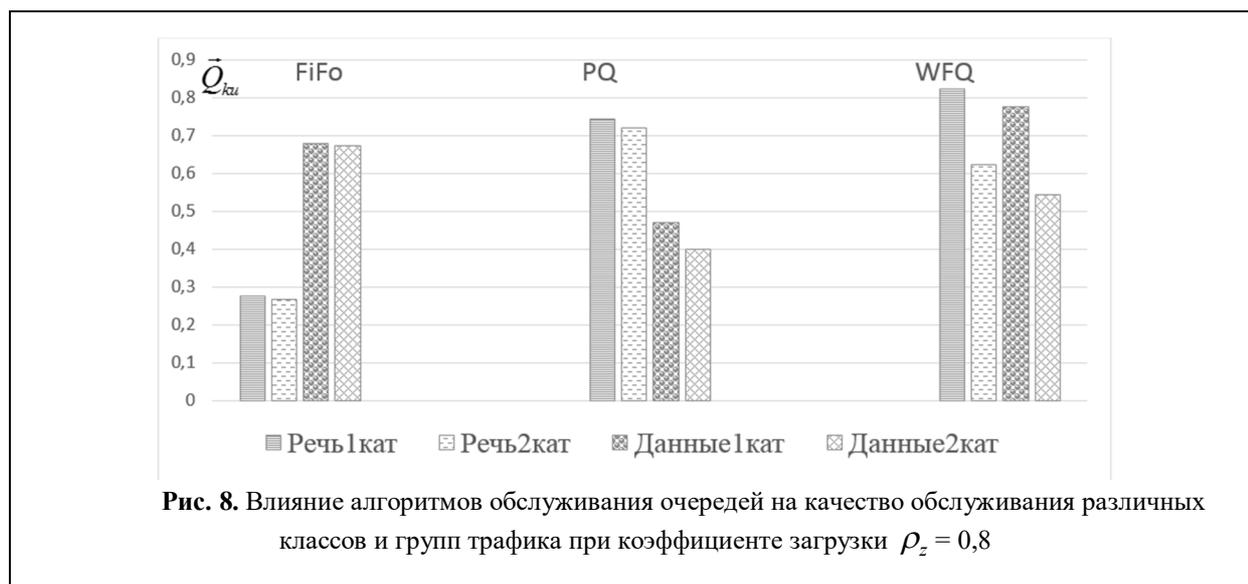
На рис. 5 представлена зависимость вероятности своевременной доставки от коэффициента загрузки УК при использовании дисциплины обслуживания очередей PQ при  $\lambda_d > \lambda_{pe}$ . Из графиков видно, что при значении  $\rho_z = 0,5$  вероятность своевременной доставки трафика данных первого и второго приоритетов принимает максимально допустимое, согласно руководящим документам, значение. Вероятность доставки для речевого трафика первого приоритета сохраняется в допустимых

пределах при любой загрузке УК в пределах проведения эксперимента, а для речевого трафика второго приоритета при  $\rho_z = 0,75$ .

На рис. 6 представлена зависимость времени задержки, от коэффициента загрузки УК, при использовании дисциплины обслуживания очередей PQ, в случае, когда интенсивность поступления трафика меньше интенсивности поступления трафика реального времени  $\lambda_d < \lambda_{pe}$ . Из анализа графика становится ясно, что большая интенсивность поступления высокоприоритетного трафика приводит к ситуации, когда высокоприоритетный трафик вытесняет трафик низких приоритетов. Особенно ярко это видно на рис. 7, где показана зависимость вероятности своевременной доставки от коэффициента загрузки УК.

Таким образом, исходя из проведённого эксперимента, можно сделать вывод о целесообразности применения различных механизмов поддержания качества обслуживания при разных значениях загрузки узла коммутации.

На основе полученных результатов в качестве примера после их нормировки и получения интегральной оценки частного показателя качества  $\bar{Q}_{ki}$  для каждого типа трафика и группы абонентов была построена гистограмма, представленная на рис. 8. Коэффициент загрузки узла коммутации равен  $\rho_z = 0,8$ .



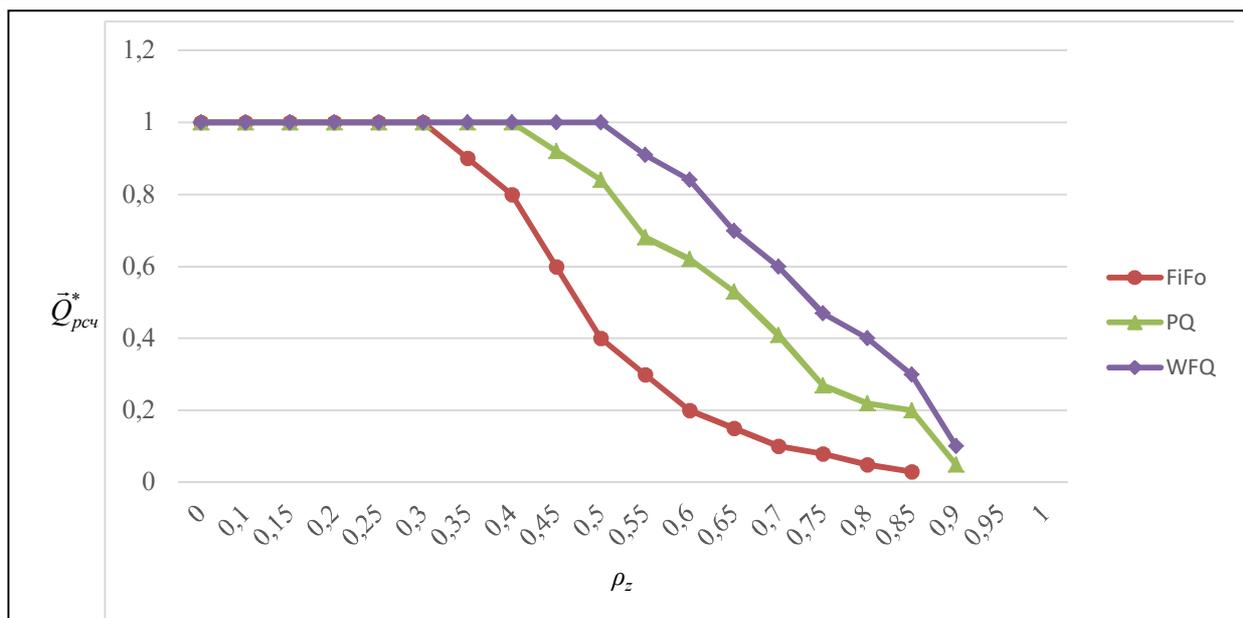


Рис. 9. Зависимость обобщенного показателя качества обслуживания от коэффициента загрузки узла коммутации при работе различных алгоритмов обслуживания очередей

После расчёта обобщенного показателя качества передачи разнородного трафика  $\bar{Q}_{рсч}^*$  по формуле (2), для различного уровня загрузки узла коммутации, получили график, представленный на рис. 9.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение различных механизмов обслуживания очередей обеспечивает поддержание требуемого качества обслуживания разноприоритетного трафика при увеличении загрузки узла коммутации. Применения данных алгоритмов наиболее эффективно, при значениях  $\rho_z > 0,3$ . Также стоит отметить, что при значениях коэффициента загрузки  $\rho_z > 0,8$  работа алгоритма *WFQ* оказывается мало эффективной. Это обуславливается заблаговременной настройкой выделяемого ресурса на обслуживание различных групп пользователей и типа трафика, и не позволяет учитывать процесса динамического изменения входящей пользовательской нагрузки или же изменения интенсивности обслуживания, вследствие воздействия на сеть противника. Для решения данной проблемы в дальнейших исследованиях предлагается разработка такого

алгоритма, работа которого позволила бы устранить данную проблему и обеспечить гибкую настройку распределения ресурсов узла коммутации в зависимости от изменяющихся пользовательской нагрузки и интенсивности обслуживания.

#### Литература

1. Воробьев Л.В., Обердерфер В.Н. Анализ алгоритмов организации и обслуживания очередей потоков пакетов в мультисервисной сети связи специального назначения. Материалы IV научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях», Том 1, СПб: ВАС, 2019. С. 238–241.
2. Сычев К.И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 272 с.
3. Яновский Г.Г. Качество обслуживания в сетях IP // Вестник связи. №1. 2008. С. 1–16.
4. Бронштейн О.И., Духовный О.М. Модели приоритетного обслуживания в информационно-вычислительных системах. М.: Наука, 1976. 220с.
5. Нетес В.А. Качество обслуживания на сетях связи. Обзор рекомендаций МСЭ-Т. Сети и системы связи. 1999. №3. С. 66–71
6. ITU-T X.213. Information technology – Open Systems Interconnection – Network service definition. 2001.
7. Обердерфер В.Н. Модель узла коммутации мультисервисной сети связи с поддержкой алго-

ритмов обеспечения качества обслуживания абонентов различного приоритета // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019619416.

8. *Симонова О.А.* Модели расчета показателей QoS в сетях следующего поколения: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 125 с.

9. *Одоевский С.М., Бусыгин А.В., Кочешков А.К.* Особенности моделирования процесса обслу-

живания мультимедийного трафика на основе распределения Парето // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвящённой 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6 томах. 2019. С. 295–302.

10. *Боев В.Д., Сыпченко Р.П.* Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики. Учебное пособие. СПб.: ВАС, 2009. 436 с.

Поступила 21 ноября 2023 г.

English

## PROCESSING ALGORITHMS FOR MULTI-PRIORITY TRAFFIC IN SWITCHING NODES AND THEIR IMPACT ON THE COMMUNICATION SERVICE QUALITY

**Valery Nikolaevich Oberderfer** — PhD, lecturer, Military Academy<sup>1</sup> of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny.

E-mail: [oberkadet@mail.ru](mailto:oberkadet@mail.ru)

**Artem Dmitrievich Lunev** — PhD, Lecturer, Military Training Center<sup>2</sup> of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

E-mail: [a.d.lunev@urfu.ru](mailto:a.d.lunev@urfu.ru)

**Semyon Konstantinovich Mustivy** — Director of the Khabarovsk branch<sup>3</sup> of JSC Voentelcom.

E-mail: [antvk@mail.ru](mailto:antvk@mail.ru)

**Andrey Viktorovich Filin** — Post-graduate Student, Military Academy<sup>1</sup> of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny.

E-mail: [fily@mail.ru](mailto:fily@mail.ru)

**Fyodor Viktorovich Filin** — Post-graduate Student, Military Academy<sup>1</sup> of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny.

E-mail: [f.sakhalin@mail.ru](mailto:f.sakhalin@mail.ru)

<sup>1</sup>Address: 194064, Russian Federation, Saint-Petersburg, Tikhoretsky Ave., 3.

<sup>2</sup>Address: 620049, Russian Federation, Yekaterinburg, Komsomolskaya St., 62.

<sup>3</sup>Address: 680028, Russian Federation, Khabarovsk, Kalinina St., 108.

*Abstract:* The article examines the issue of the service quality of multi-priority network traffic in multi-service military communications networks. A specific feature of military communication networks is the difference in the significance of the transmitted information, that is, the need to categorize it, and the explicit hierarchy of command units among which it is transmitted. This feature is taken into account when obtaining a composite quality measure, which is formed by additive folding of partial quality measures and weight coefficients, which are determined depending on the traffic category and type. Partial quality measures are formed from the values of the delay time and the probability of timely delivery of network traffic. The values of the timeout parameters and the probability of timely delivery of network traffic given in the article are obtained using simulation method. The simulation model of the switching node in the military communication network enables to obtain the value of the above parameters using various processing algorithms for queuing, namely: FIFO – first in, first out; PQ – priority queue; WFQ – weighted fair queuing. The simulation resulted in getting dependences of the delay time and probability of IP packets timely delivery on the use factor of switching node when using the above queuing disciplines. The histogram was constructed based on the obtained results as an example, after their normalization and getting the integral estimate of the partial quality indicator for each type of traffic and user group. This histogram reveals the impact of the queuing service algorithms on the service quality of various classes and groups of traffic with the preset use factor of the switching node. The composite quality measure is calculated. And the article presents the dependence of the composite quality measure for multi-priority traffic on the use factor of the switching node when using the proposed queue processing algorithms. Concluding the article, the authors assess the applicability of various queuing service algorithms with different use factors of the switching node.

*Keywords:* Multiservice network, multi-priority traffic, queuing service algorithms.

### References

1. *Vorobyov L.V., Oberderfer V.N.* Analysis of algorithms for organizing and maintaining queues of packet flows in a multiservice special-purpose communication network. Materials of the IV scientific and practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions". Vol. 1. St. Petersburg: VAS, 2019. Pp. 238-241.
2. *Sychev K.I.* Multicriteria design of multiservice communication networks. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic. unita, 2008. 272 p.
3. *Yanovsky G.G.* Quality of service in IP networks. Bulletin of Communications. No. 1. 2008. Pp. 1–16.
4. *Bronstein O.I., Dukhovny O.M.* Models of priority service in information and computing systems. Moscow: Nauka, 1976. 220 p.
5. *Netes V.A.* Quality of service on communication networks. Review of ITU-T recommendations. Networks and communication systems. No. 3. 1999. Pp. 66–71
6. ITU-T X.213. Information technology – Open Systems Interconnection – Network service definition. 2001.
7. *Oberderfer V.N.* Model of the switching node of a multiservice communication network with support for algorithms to ensure the quality of customer service of various priorities. Certificate of state registration of the computer program No. 2019619416.
8. *Simonina O.A.* Models for calculating QoS indicators in next-generation networks: PhD thesis. St. Petersburg, 2005. 125 p.
9. *Odoevsky S.M., Busygin A.V., Kocheshkov A.K.* Features of modeling the process of servicing multimedia traffic based on Pareto distribution. Radar, navigation, communication. Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 160th anniversary of the birth of A.S. Popov. In 6 volumes. 2019. Pp. 295–302.
10. *Boev V.D., Sypchenko R.P.* Computer modeling. Elements of theory and practice. A study guide. St. Petersburg: VAS, 2009. 436 p.