

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРИОРИТЕТНОГО РЕЗЕРВИРОВАННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ПОТОКА ЗАПРОСОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В. А. БОГАТЫРЕВ, И. А. СЛАСТИХИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com*

Рассмотрены системы передачи данных с неоднородным потоком запросов различной критичности к допустимому времени ожидания. Цель работы — исследование возможностей повышения вероятности своевременной и безошибочной доставки пакетов за счет их приоритетного резервированного обслуживания. Приоритет и кратность резервирования запроса (число создаваемых копий запроса) задаются в зависимости от допустимого времени ожидания, при этом резервные копии запросов могут помещаться в очереди различных приоритетов. Исследуется многоканальная система массового обслуживания с очередями разных приоритетов. Все каналы обслуживания доступны для очередей всех приоритетов. При резервированном обслуживании запрос считается своевременным и безошибочно выполненным, если за предельно допустимое время приоритетного обслуживания неоднородного потока запросов определяется по вероятности своевременного и безошибочного выполнения всех типов запросов, при различной кратности их резервирования и предельно допустимого времени ожидания. Предложена имитационная модель поддержки выбора проектных решений по организации обмена через резервированные каналы, реализуемая в среде AnyLogic 7. Показано, что повышение кратности резервирования для критичных запросов при небольшой нагрузке приводит к возрастанию вероятности своевременного безошибочного обслуживания всех типов запросов, при этом существует граница целесообразности их резервирования.

**Ключевые слова:** *сеть, надежность, критичность к времени доставки, приоритеты, резервированная передача пакетов, пакеты, передача данных*

**Введение.** Высокие надежность, отказоустойчивость, производительность и безопасность [1—7] распределенных вычислительных систем и сетей [8, 9] различного прикладного назначения достигаются при резервировании и консолидации ресурсов хранения, обработки и передачи данных [10—13].

Высокий уровень функциональной надежности систем хранения, передачи и обработки данных достигается в результате не только введения структурной избыточности оборудования, но и резервирования процессов обработки и передачи данных, особенно когда повтор после неудачного обслуживания затруднен, например из-за условий функционирования в „жестком“ реальном времени [14—21]. В системах передачи данных (в том числе реального

времени) возможно формирование неоднородного потока запросов различной критичности по допустимому времени пребывания в системе.

Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения вероятности своевременной и безошибочной доставки пакетов различной критичности к задержкам в результате приоритетного резервированного обслуживания. При этом кратность резервирования запроса (число создаваемых копий запросов) зависит от его критичности, а резервные копии запросов могут ставиться в очереди различных приоритетов. Предлагаемые исследования базируются на имитационном моделировании.

**Объект и задачи исследования.** В качестве объекта исследования рассмотрим систему передачи данных с  $m$  зарезервированными каналами связи (рис. 1). В систему поступает неоднородный (смешанный) поток, который содержит несколько типов (например, три) запросов, различающихся допустимым временем пребывания в системе.

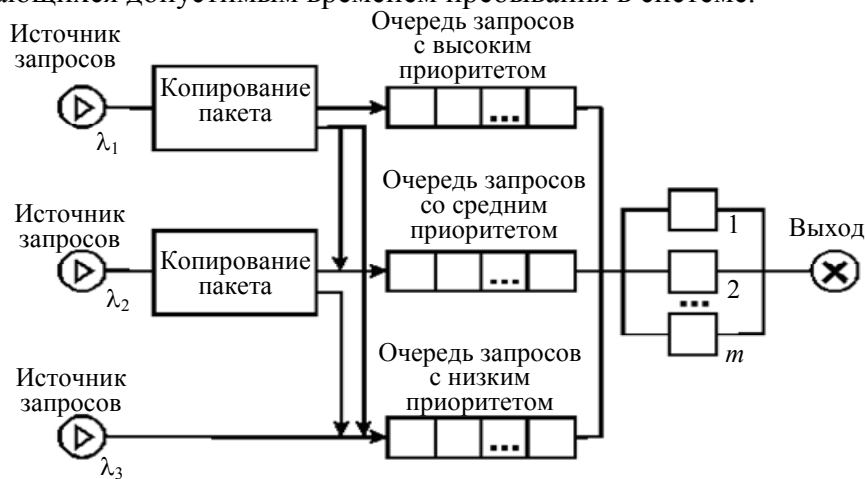


Рис. 1

Ставится задача исследовать возможность повышения вероятности своевременной и безошибочной доставки пакетов вследствие приоритетного резервированного обслуживания запросов, когда относительные приоритеты и кратность резервирования задаются с учетом критичности времени пребывания запросов в системе.

Входной поток содержит пакеты с различными относительными приоритетами (условно: высоким, средним и низким). Каждый поток является простейшим с интенсивностью  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ . В первую очередь происходит направление на обслуживание запросов (отправка пакетов) с высоким приоритетом, если таковых нет, то — со средним, затем — с низким.

В настоящей работе исследуется возможность обслуживания критичных запросов в результате их копирования с направлением копии пакетов как в очередь соответствующего приоритета, так и в очереди с более низким приоритетом. Для пакетов с различными приоритетами задано максимально допустимое время доставки (предельно допустимое время пребывания запроса в системе). В случае нахождения пакета или его копии в очереди дольше максимально допустимого времени они уничтожаются как неактуальные (для снижения непроизводительной загрузки системы обслуживания и соответственно сокращения задержек обслуживания запросов) [8, 9]. Все пакеты имеют ограничение длины сверху и снизу. Исследуется многоканальная система массового обслуживания с очередями разных приоритетов. В рассматриваемых многоканальных системах все  $m$  каналов обслуживания доступны для очередей всех приоритетов.

Требуется определить вероятность  $P$  того, что пакеты доставлены вовремя и безошибочно. При исследовании дополнительных возможностей повышения эффективности передач за счет увеличения кратности резервирования для пакетов с высоким приоритетом кратность резервирования передач зададим как 3/1, со средним — 2/1, с низким — 1/1 (последнее соот-

ветствует отсутствию резервирования). При резервированном обслуживании пакет считается своевременно доставленным, если за предельно допустимое время безошибочно доставлена хотя бы одна из его копий.

Резервированное обслуживание запросов сопряжено с техническим противоречием: с одной стороны, повышается вероятность доставки пакетов за счет увеличения кратности передачи, с другой — возрастают нагрузки, что приводит к увеличению времени пребывания пакетов в системе и снижению вероятности своевременной доставки.

**Построение имитационной модели системы.** Исследование возможностей повышения эффективности обслуживания в многоканальных системах передачи данных на основе приоритетного резервированного обслуживания с заданием копиям запросов различных приоритетов проведем на основе имитационного моделирования.

Имитационная модель поддержки выбора проектных решений по организации обмена через резервированные каналы разработана в среде AnyLogic 7 (рис. 2).

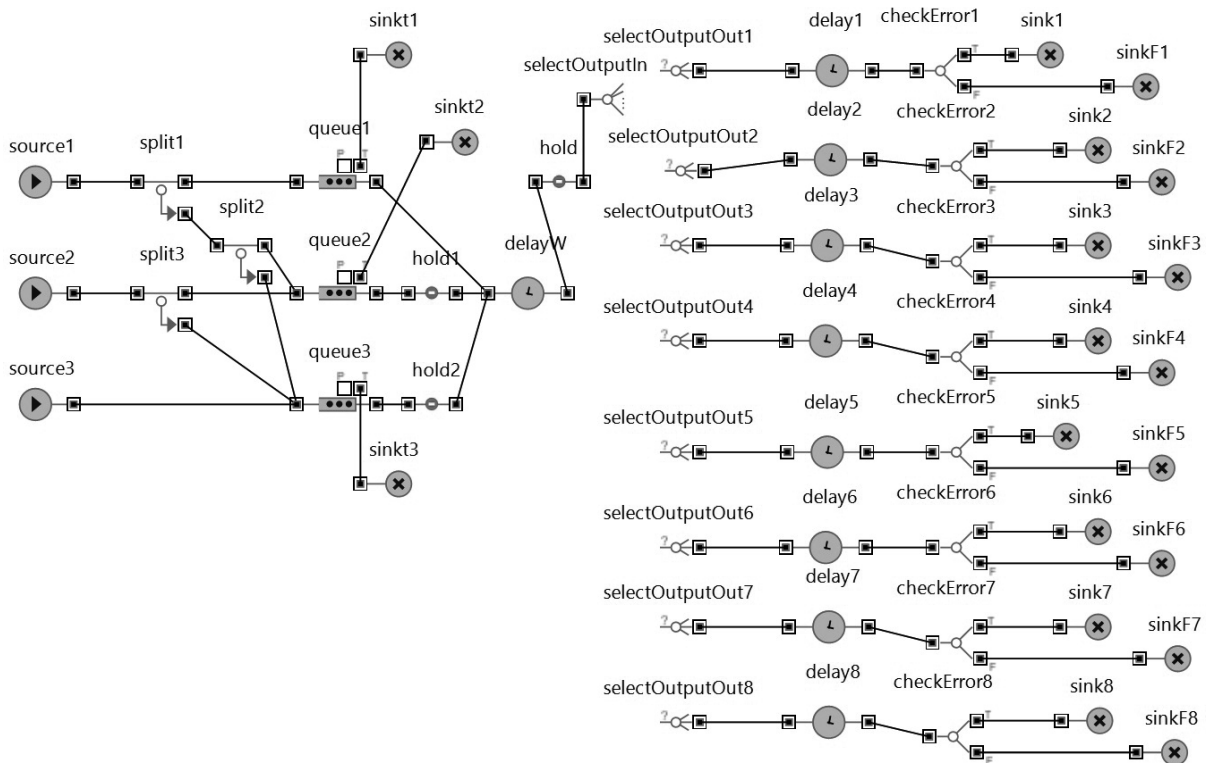


Рис. 2

В данной модели блок *source1* служит источником пакетов с высоким приоритетом, *source2* — со средним, блок *source3* — с низким. Блок *spliti* создает необходимое число копий, *queuei* — бесконечные очереди пакетов. Блоки *hold1* и *hold2* отвечают за блокировку отправки пакетов с более низким приоритетом, а *delayW* и *hold* — за задержку и блокировку доступа к каналу. Блоки *selectOutputIn*, *selectOutputOuti* отвечают за распределение пакетов по каналам связи, *checkErrori* — за проверку правильности доставки пакета, *sinki* — учет правильно доставленных пакетов, *sinkFi* — учет пакетов, доставленных с ошибкой, *sinkt* — учет вытесненных по тайм-ауту пакетов из очередей *queuei*.

**Варианты дисциплин приоритетного резервированного обслуживания.** В исследуемой многоканальной системе приоритетного резервированного обслуживания возможны варианты распределения копий пакетов с высоким и средним приоритетом по очередям.

Рассмотрим следующие варианты дисциплин резервированного приоритетного обслуживания.

1. Базовый без введения приоритетов: пакеты с разным максимально допустимым временем на доставку попадают в единую очередь (рис. 3, а).

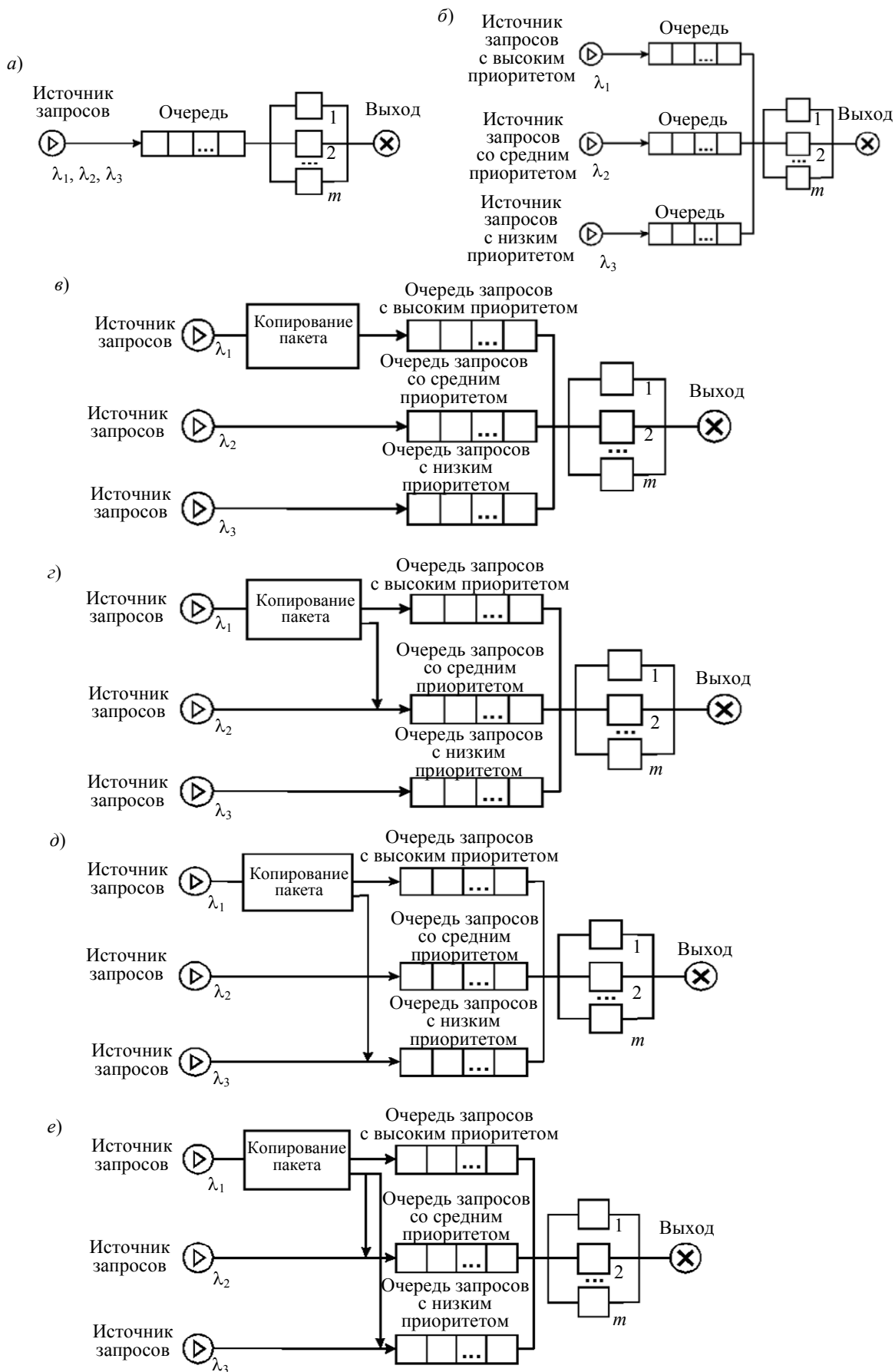


Рис. 3

2. Базовый с приоритетной передачей: существуют три потока пакетов с разными приоритетами, и каждый поток попадает в отдельную очередь соответствующего приоритета. При этом пакеты с более высоким приоритетом отправляются раньше, чем пакеты с более низким приоритетом (рис. 3, б).

3. Для пакетов с высоким приоритетом кратность передач составляет 2/1, все копии попадают в одну высокоприоритетную очередь; для пакетов с остальными приоритетами кратность составляет 1/1 (рис. 3, в).

4. Для пакетов с высоким приоритетом кратность передач составляет 2/1, одна копия направляется в очередь высокого приоритета, а вторая — со средним; для пакетов с остальными приоритетами кратность передач составляет 1/1 (рис. 3, г).

5. Для пакетов с высоким приоритетом кратность передач составляет 2/1, одна копия направляется в очередь высокого приоритета, вторая в очередь с низким приоритетом; для пакетов с остальными приоритетами кратность передач составляет 1/1 (рис. 3, д).

6. Для пакетов с высоким приоритетом кратность передач составляет 3/1, одна копия направляется в очередь высокого приоритета, вторая — в очередь среднего приоритета, а третья — низкого; для пакетов с остальными приоритетами кратность передач составляет 1/1 (рис. 3, е).

В качестве интегрального показателя эффективности, учитывающего, что запросы всех потоков должны быть выполнены безошибочно за установленное для них предельно допустимое время, воспользуемся  $P = p_1 p_2 p_3$ , где  $p_1, p_2, p_3$  — вероятность того, что пакеты с высоким, средним и низким приоритетами будут обслужены своевременно и безошибочно.

Для каждого варианта проведены имитационные эксперименты с варьированием интенсивностей входных потоков при  $\lambda = 1\text{--}50\,000\text{ с}^{-1}$ , интенсивность поступления пакетов в систему одинакова для всех потоков;  $m = 8$  — число каналов в системе обслуживания;  $L = 1$  Мбит/с — пропускная способность каждого из каналов связи; вероятность битовой ошибки в канале  $B = 0,001$ ;  $N = 1024$  бит — средняя длина поступающих в систему пакетов; максимально допустимое время доставки пакетов с высоким, средним и низким приоритетом соответственно равно  $t = 0,000\,224\text{ с}; 2t; 3t$ .

На рис. 4 представлена зависимость своевременного и безошибочного обслуживания всех потоков запросов от интенсивности их поступления  $\lambda$ : вариант 5 — кривая 1; 4 — 2; 6 — 3; 2 — 4; 1 — 5; 3 — 6.

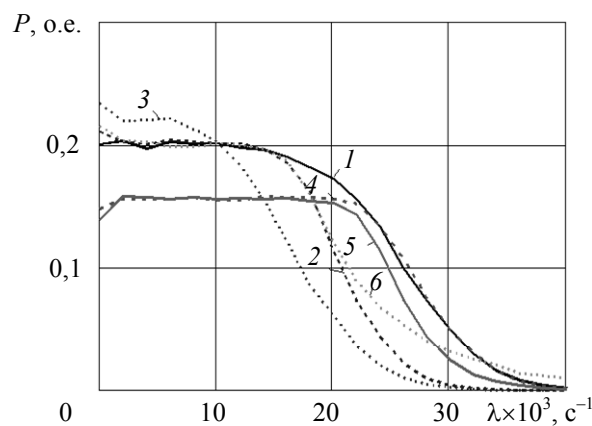


Рис. 4

Из графиков видно, что для запросов с высоким приоритетом (кривые 1, 2, 3, 6) при небольшой нагрузке эффективность резервирования запросов возрастает и при направлении копий в разные очереди (кривая 3). Видно существование границы значений интенсивности запросов, определяющей целесообразность их резервирования.

**Заключение.** Проанализированы возможности повышения вероятности своевременной и безошибочной доставки пакетов, характеризующихся различной критичностью к допустимому времени ожидания в очереди, за счет их приоритетного обслуживания с разной кратностью резервирования.

На основе имитационного моделирования проанализированы различные варианты распределения копий пакетов в исследуемой многоканальной системе приоритетного резервированного обслуживания с различной предельно допустимой задержкой ожидания по очередям разных приоритетов.

Проведены имитационные эксперименты по оценке вероятности своевременной и безошибочной доставки пакетов для различных вариантов резервированного приоритетного обслуживания. Установлена область целесообразности резервирования высокоприоритетных запросов при различных вариантах распределения их копий по очередям разных приоритетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kopetz H.* Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. Springer, 2011. 396 p.
2. *Sorin D.* Fault Tolerant Computer Architecture. Morgan & Claypool, 2009. 103 p.
3. *Фокин Р. Р.* и др. Компьютерные технологии в науке и производстве: Метод. указания. СПб: СПбГУСЭ, 2009.
4. *Верзун Н. А., Колбанев М. О., Татарникова Т. М.* Технологическая платформа четвертой промышленной революции // Геополитика и безопасность. 2016. № 2(34). С. 73—78.
5. *Советов Б. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.* Технологии инфокоммуникации и их роль в обеспечении информационной безопасности // Геополитика и безопасность. 2014. № 1(25). С. 69—77.
6. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Защита обрабатываемых в информационной системе данных от целевых атак // Вопросы защиты информации. 2017. № 4(119). С. 3—12.
7. *Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.* Физические ресурсы информационных процессов и технологий // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2014. Т. 14, № 6. С. 113—123.
8. *Алиев Т. И., Муравьева-Витковская Л. А.* Приоритетные стратегии управления трафиком в мультисервисных компьютерных сетях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 44—48.
9. *Калинин И. В., Махарева Э., Муравьева-Витковская Л. А.* Оценка характеристик функционирования корпоративных информационных систем с неоднородной нагрузкой // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 5(99). С. 863—868.
10. *Korobeynikov A. G., Fedosovsky M. E., Gurjanov A. V., Zharinov I. O., Shukalov A. V.* Development of Conceptual Modeling Method to Solve the Tasks of Computer-Aided Design of Difficult Technical Complexes on the Basis of Category Theory // Intern. J. of Applied Engineering Research, IET. 2017. Vol. 12, N 6. P. 1114—1122.
11. *Коломойцев В. С.* Вероятностно-временные показатели при поэтапном применении средств защиты информации // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2017. № 11(161). С. 37—43.
12. *Parshutina S. A.* Models to support design of highly reliable distributed computer systems with redundant processes of data transmission and handling // Intern. Conf. "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), IET. 2017. P. 96—99.
13. *Гурьянов А. В., Коробейников А. Г., Федосовский М. Е., Шукалов А. В., Жаринов И. О.* Автоматизация проектирования сложных технических комплексов на основе теории категорий // Вопр. оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 3—4(105—106). С. 9—16.
14. *Богатырев В. А., Богатырев А. В.* Надежность функционирования кластерных систем реального времени с фрагментацией и резервированным обслуживанием запросов // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 6. С. 409—416.
15. *Богатырев В. А., Богатырев С. В.* Резервированная передача данных через агрегированные каналы в сети реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 9. С. 735—740.

16. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Функциональная надежность вычислительных систем с перераспределением запросов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 10. С. 53—56.
17. Богатырев В. А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6. С. 21—26.
18. Bogatyrev V. A. Fault Tolerance of Clusters Configurations with Direct Connection of Storage Devices // Automatic Control and Computer Sciences. 2011. Vol. 45, N 6. P. 330—337.
19. Bogatyrev V. A., Slastikhin I. A. The Models of The Redundant Transmission Through The Aggregated Channels // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2017. Vol. 72. P. 294—299.
20. Богатырев В. А., Сластихин И. А. Эффективность резервированного выполнения запросов в многоканальных системах обслуживания // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 2(102). С. 311—317.
21. Богатырев В. А., Сластихин И. А. Эффективность резервированной передачи данных через агрегированные каналы // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 370—376.

#### Сведения об авторах

- Владимир Анатольевич Богатырев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Иван Александрович Сластихин** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: stopgo89@gmail.com

Поступила в редакцию  
08.05.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Богатырев В. А., Сластихин И. А. Имитационная модель приоритетного резервированного обслуживания неоднородного потока запросов в многоканальных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1017—1024.

### SIMULATION MODEL OF PRIORITY RESERVED SERVICE OF NON-UNIFORM REQUEST TRAFFIC IN MULTICHANNEL SYSTEMS

V. A. Bogatyrev, I. A. Slastikhin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com

Data transmission systems with a heterogeneous flow of queries of various criticality to the admissible time of stay in the system are considered. The possibilities of increasing the probability of timely and error-free delivery of packets due to their priority redundant service are analyzed. Priority and multiplicity of a reserved request (the number of copies of created queries) is set depending on the allowable waiting time, the backup copies of requests can be placed in queues of different priorities. Multichannel queuing system with the allocation of queues of different priorities is investigated. In the multichannel systems under consideration, all service channels are available for all priority queues. With a redundant service, the request is considered timely and error-free if at least one of its copies is accurately executed for the maximum allowable time. The effectiveness of the discipline of priority maintenance of the non-uniform flow of requests is determined by the probability of timely and error-free execution of all types of requests, with different multiplicities of their reservation and the maximum allowable waiting time. A simulation model for supporting the choice of design solutions for the organization of exchange through redundant channels implemented in the AnyLogic 7 environment is proposed. It is shown that increasing the reservation multiplicity for critical queries with a small load, leads to an increase in the probability of timely error-free servicing of all types of requests, and there is a limit of expediency of their reservation.

**Keywords:** network, reliability, criticality to the time of delivery, priorities, redundant packet transmission, packets, data transmission

#### REFERENCES

1. Kopetz H. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*, Springer, 2011, 396 p.
2. Sorin D. *Fault Tolerant Computer Architecture*, Morgan & Claypool, 2009, 103 p.
3. Fokin R.R. et al. *Компьютерные технологии в науке и производстве* (Computer Technologies in Science and Industry), St. Petersburg, 2009. (in Russ.)

4. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. *Geopolitika i bezopasnost'*, 2016, no. 2(34), pp. 73–78. (in Russ.)
5. Sovetov B.Ya., Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. *Geopolitika i bezopasnost'*, 2014, no. 1(25), pp. 69–77. (in Russ.)
6. Shcheglov K.A., Shcheglov A.Yu. *Voprosy Zashchity Informatsii*, 2017, no. 4(119), pp. 3–12. (in Russ.)
7. Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 6(14), pp. 113–123. (in Russ.)
8. Aliyev T.I., Murav'yeva-Vitkovskaya L.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6(54), pp. 44–48. (in Russ.)
9. Kalinin I.V., Makharevs E., Murav'yeva-Vitkovskaya L.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, no. 5(15), pp. 863–868. (in Russ.)
10. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Gurjanov A.V., Zharinov I.O., Shukalov A.V. *Intern. Journal of Applied Engineering Research*, IET, 2017, no. 6(12), pp. 1114–1122.
11. Kolomoitsev V.S. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* (Herald of computer and information technologies), 2017, no. 11(161), pp. 37–43. (in Russ.)
12. Parshutina S.A. *International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, IET-2017, 2017, pp. 96–99.
13. Gur'yanov A.V., Korobeynikov A.G., Fedosovskiy M.E., Shukalov A.V., Zharinov I.O. *Military Engineering. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*, 2017, no. 3–4(105–106), pp. 9–16. (in Russ.)
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. *Information Technologies* (Informacionnye Tehnologii), 2016, no. 6(22), pp. 409–416 (in Russ.)
15. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 9(59), pp. 735–740 (in Russ.)
16. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 10(55), pp. 53–56 (in Russ.)
17. Bogatyrev V.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 6, pp. 21–26. (in Russ.)
18. Bogatyrev V.A. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2011, no. 6(45), pp. 330–337.
19. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. *ACSR-Advances in Computer Science Research*, 2017, Vol. 72, pp. 294–299.
20. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, no. 2(16), pp. 311–317 (in Russ.)
21. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 5(59), pp. 370–376 (in Russ.)

#### Data on authors

- Vladimir A. Bogatyrev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computation Technologies; E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Ivan A. Slastikhin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computation Technologies; E-mail: stopgo89@gmail.com

**For citation:** Bogatyrev V. A., Slastikhin I. A. Simulation model of priority reserved service of non-uniform request traffic in multichannel systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 12. P. 1017–1024 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1017-1024