



УДК 004.75

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ С АГРЕГИРОВАНИЕМ КАНАЛОВ И СЛУЧАЙНЫМ МЕТОДОМ ДОСТУПА ПРИ РЕЗЕРВИРОВАНИИ ПЕРЕДАЧ

И.И. Носков<sup>a</sup>, В.А. Богатырев<sup>a,b</sup>, И.А. Сластихин<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 28.09.18, принята к печати 29.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Носков И.И., Богатырев В.А., Сластихин И.А. Имитационная модель локальной компьютерной сети с агрегированием каналов и случайным методом доступа при резервировании передач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1047–1053. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053

### Аннотация

**Предмет исследования.** Построена и исследована имитационная модель компьютерной сети и случайным доступом к каналам и возможностью предоставления резервирования передач. Выявлена эффективность использования модели на сетях с разным коэффициентом резервирования. Проанализирована эффективность резервирования передач в компьютерных сетях, построенных на базе общей шины. **Метод.** Эффективность использования резервирования передач проанализирована с помощью имитационного моделирования компьютерных сетей. Показателем эффективности служит мультипликативный критерий, учитывающий средний запас времени на передачу пакетов и безошибочность доставки. **Основные результаты.** Разработана модель компьютерной сети на общей шине, позволяющая выполнять резервирование передач путем отправки копий пакетов по нескольким каналам связи. При выполнении экспериментов варьировались кратность резервирования и интенсивность поступления пакетов в систему. Разработана имитационная модель компьютерной сети, обеспечивающая возможность резервирования передач. На основе полученных в имитационных экспериментах результатов выделена область эффективности применения резервированных передач в сетях, основанных на случайном доступе и имеющих ограничения на среднее время доставки. **Практическая значимость.** Представленные результаты могут быть использованы при проектировании надежных компьютерных систем, в том числе систем реального времени.

### Ключевые слова

компьютерные сети, резервирование передач, имитационное моделирование, агрегирование каналов, случайный метод доступа

## SIMULATION MODEL OF LOCAL COMPUTER NETWORK WITH CHANNEL AGGREGATION AND RANDOM ACCESS METHOD AT REDUNDANT TRANSFER

I.I. Noskov<sup>a</sup>, V.A. Bogatyrev<sup>a,b</sup>, I.A. Slastikhin<sup>a</sup><sup>a</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup>Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

### Article info

Received 28.09.18, accepted 29.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053

Article in Russian

**For citation:** Noskov I.I., Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Simulation model of local computer network with channel aggregation and random access method at redundant transfer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1047–1053 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1047-1053.

### Abstract

**Subject of Research.** Computer network simulation model with random access to channels and redundant transfer is developed and researched. Efficiency of this model application on configurations with different redundancy coefficient is defined. The efficiency of redundant transfer in computer networks based on common bus topology is studied. **Method.** The efficiency analysis of the

redundant packet transmissions is carried out on the basis of computer network simulation modeling. The performance index is determined on the basis of the multiplicative criterion, which takes into account the error-free transmission and the average time margin relative to the maximum permissible transmission delay. **Main Results.** Computer network model with common bus topology is developed. This model gives the possibility to transmit packets via several channels and provides redundant transfer of data. Intensity and redundancy coefficient are changed while experiments were carried out. Simulation model of computer network with redundant transfer opportunity is developed. On the basis of obtained results in simulation experiments the domain of application efficiency is defined for redundant transmissions in networks based on random access and limited in average time of delivery. **Practical Relevance.** The presented results can be used in the design of high-reliable computer systems including computer systems providing real-time services.

#### Keywords

computer networks, redundant transfer, simulation modeling, channel aggregation, random access method

### Введение

В настоящее время актуальна задача повышения надежности [1–3], отказоустойчивости [4, 5], безопасности [5, 6] и производительности [7–12] распределенных вычислительных систем и сетей различного прикладного назначения [13–16], в том числе функционирующих в реальном масштабе времени [17, 18] в условиях возможного целенаправленного деструктивного воздействия на канал [5] с целью исказить передаваемые данные или вовсе предотвратить передачу. Обеспечение надежности и отказоустойчивости сетей со снижением задержек при балансировке загрузки достигается при резервировании каналов связи и их агрегации. Применение для гарантированной доставки протоколов более высокого, чем канальный, уровня, например транспортного протокола TCP (Transmission Control Protocol), не представляется возможным, так как актуальность передаваемых данных теряется за время, в течение которого будет выявлена потеря пакета более высоким уровнем и повторно инициирован процесс передачи.

В работах, посвященных системам с агрегированными каналами [19, 20], не уделяется должного внимания моделированию [21–23] и изучению процесса передачи данных с использованием протоколов реальных компьютерных сетей. Моделирование компьютерной сети с агрегированием каналов при резервировании передач позволит выделить области применения тех или иных методов в построении реальных отказоустойчивых вычислительных систем [24–26], построенных на базе современных сетевых протоколов.

Целью настоящей работы является исследование возможности повышения эффективности передачи трафика в реальном времени для локальных компьютерных сетей со случайным доступом и обнаружением коллизий (CSMA/CD) при агрегировании каналов связи и резервировании передач копий пакетов по разным каналам. Для достижения указанной цели необходимо разработать модели компьютерных сетей в среде OMNeT++, провести эксперименты с различными вариантами агрегирования каналов и выделить области применения той или иной конфигурации сети для повышения эффективности работы вычислительной системы в условиях ненадежности передач.

В качестве пакета моделирования выбрана среда OMNeT++<sup>1</sup>, предоставляющая пользователю возможности в построении сетей, основанных на реальных сетевых протоколах всех уровней эталонной сетевой модели [27, 28].

### Объект и задачи исследования

Объектом исследования является компьютерная сеть, состоящая из  $n$  каналов связи, представляющих собой разделяемую среду передачи данных, и  $m$  клиентов, подключенных к этим каналам, которые в случайные моменты времени генерируют данные, предназначенные серверу (рис. 1).

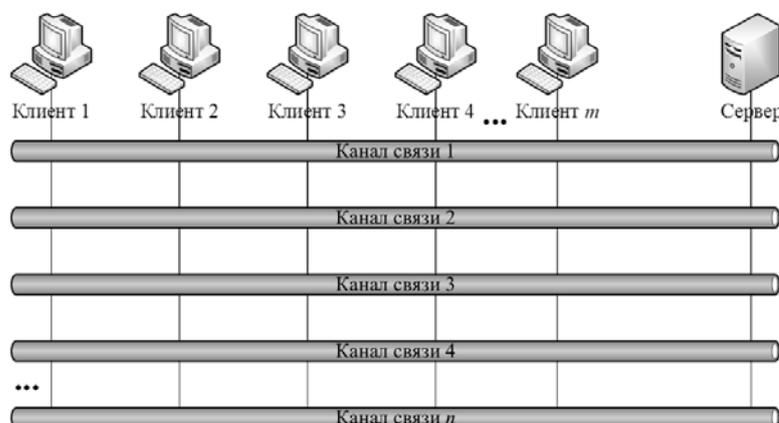


Рис. 1. Система передачи данных с несколькими каналами

<sup>1</sup> <https://omnetpp.org/>

Вероятность битовых ошибок в каждом из каналов связи данной системы равна  $B$ . Интенсивность потока данных, генерируемых каждым клиентом, равна  $\lambda$ .

Для повышения вероятности доставки сообщений до сервера в данной системе применяется резервирование передач копий пакетов с кратностью  $K$ . Значение  $K$  соответствует числу каналов связи, по которым происходит передача копии пакета для сервера от каждого клиента. Однако стоит учитывать, что эти каналы связи являются разделяемой средой, и при повышении кратности резервирования в системе увеличивается вероятность доставки, однако возникает больше коллизий, и время доступа к среде для каждого клиента увеличивается, что влечет за собой увеличение общего времени пребывания кадра в системе.

В системе предусмотрено два вида увеличения кратности числа передач:

1) разделение каналов передачи между клиентами. Так, при  $K = 2$  первый клиент передает копии кадров по первому и второму каналам связи, а второй – по второму и третьему и т.д.;

2) выделение нескольких каналов в монопольное пользование одному клиенту. Так, при  $K = 2$  первый клиент будет передавать копии своих кадров по первому и второму каналам, а второй – по третьему и четвертому. При этом снижается вероятность возникновения коллизий в системе, однако увеличиваются затраты на выделение отдельных каналов при их возможном недоиспользовании.

Рассмотрим более детально первый способ организации резервирования передач.

### Разработка имитационной модели компьютерной сети в среде OMNeT++

Среда моделирования OMNeT++ предоставляет множество различных сетевых протоколов и генераторов трафика, использующих эти протоколы. В настоящей работе использован UDP (User Datagram Protocol), так как предполагается передача данных, чувствительных к задержке для управляющих воздействий на систему реального времени. В среде OMNeT++ реализованы различные виды генераторов и потребителей UDP-трафика. Приложение UDPBasicApp передает пакеты определенного размера с заданной интенсивностью по адресу, указанному в конфигурационном файле [28]. В свою очередь, приложение UDPSink принимает все пришедшие в сокет пакеты от источника. Однако модели данных приложений не предполагают использования резервированной передачи: приложение-генератор отправляет только один пакет в заданный канал связи, а приложение-получатель не может распознавать копии одного и того же пакета и принимает их все, предполагая, что это различные пакеты. В написанной на языке программирования C++ системе моделирования OMNeT++ возможно дорабатывать ядро системы и разработанные модели. Для возможности построения моделей с резервированными передачами были разработаны новые классы приложений, расширяющие существующие.

UDPBasicAppCopy является расширением базового класса и позволяет задавать в его конфигурации несколько адресов, по которым будет производиться передача по различным каналам связи с целью увеличения вероятности доставки пакетов и выполнения резервированной передачи. При генерации и отправке пакета в ядре сетевого симулятора данное приложение осуществляет копирование пакета и отправку его копий в основной и резервные каналы связи. С целью корректной идентификации пакетов на принимающей стороне основному пакету и его копиям присваивается один идентификационный номер. На рис. 2 приведен пример конфигурации доработанного приложения, в которой заданы адреса для резервированной передачи, порт назначения приложения сервера, размер пакетов, интервал между пакетами, другие параметры.

```

**.Client_1.numUdpApps = 1
**.Client_1.udpApp[0].typename = "UDPBasicAppCopy"
**.Client_1.udpApp[0].destAddresses = "10.10.10.6 10.10.20.6"
**.Client_1.udpApp[0].destPort = 1000
**.Client_1.udpApp[0].messageLength = 100B
**.Client_1.udpApp[0].startTime = 0s
**.Client_1.udpApp[0].sendInterval = exponential(0.0001s)

```

Рис. 2. Конфигурация генератора UDP-трафика на клиенте

В этой конфигурации задается одно UDP-приложение для первого клиента с заданным номером порта назначения и длиной пакета. Также тут заданы два IP-адреса сервера с целью резервной отправки пакетов по двум каналам связи.

UDPSinkCopy расширяет базовый класс приемника UDP-трафика и позволяет принимать пакеты, отбрасывая лишние с одинаковым идентификационным номером. Настройка данного приложения является тривиальной и состоит только в задании номера порта.

После доработки компонентов для моделирования была построена имитационная модель рассмотренной выше системы с пятью каналами связи и с пятью клиентами. Модель построена на основе общей шины EtherBus, представляющей собой разделяемую среду, и модели StandardHost,

представляющей собой клиентов и серверы моделируемой системы. На рис. 3 приведена построенная модель исследуемой системы в среде OMNeT++.

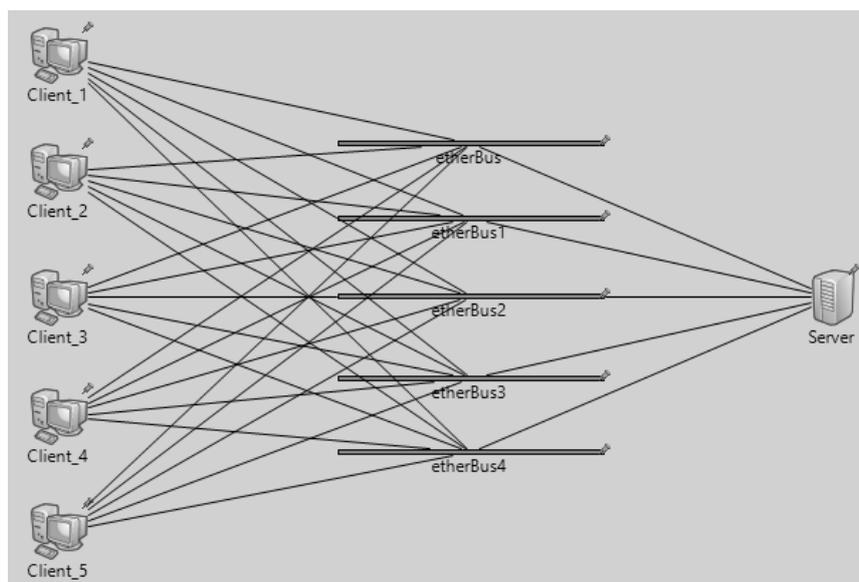


Рис. 3. Имитационная модель сети с возможностью резервирования передач в среде OMNeT++

Разработанная модель позволяет задавать параметры в конфигурационных файлах и файлах инициализации процесса моделирования для изучения различных вариантов резервирования передач.

#### Исследование работы компьютерной сети при агрегировании каналов связи с резервированием передач и разделением каналов между узлами сети

Перед проведением имитационных экспериментов необходимо ввести критерий оценки эффективности использования того или иного способа резервированной передачи пакетов. Критерий  $M = P(t_0 - T)$  [19] отражает среднее время безошибочной и своевременной передачи пакетов от клиента к серверу, где  $P$  – вероятность своевременной и безошибочной доставки пакета, определенной имитационно,  $t_0$  – ограничение времени на своевременную доставку, приемлемое для заданной системы,  $T$  – среднее время пребывания пакета в системе.

При резервированной передаче с разделением каналов между узлами каждый канал связи используется более чем одним узлом. Проведем имитационные эксперименты с разными значениями коэффициента резервирования и заданными параметрами  $L = 10$  Мбит/с (скорость классического Ethernet) – пропускная способность общей шины и каналов связи, соединяющих клиентов с шиной,  $t_0 = 0,00025$  с – запас времени на доставку,  $B = 0,0001$  – вероятность битовой ошибки в канале,  $\lambda = 1000$  1/с – интенсивность поступления пакетов, длина пакетов для всего процесса моделирования принята 100 Б.

На рис. 4 представлены зависимости значения  $M$  от кратности резервирования передач  $K$  при интенсивности поступления пакетов 1000 и 2000 1/с. Из графиков видно, что выбранный критерий эффективности  $M$  принимает большие значения при меньшей интенсивности, что говорит о наличии коллизий и увеличении попыток передач при большей интенсивности, что влечет за собой рост времени нахождения пакетов в системе. Таким образом, в такой сетевой конфигурации более эффективна передача пакетов с меньшей интенсивностью.

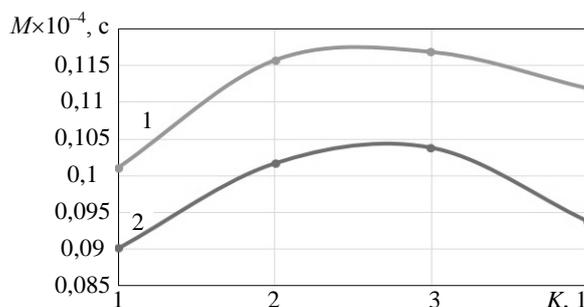


Рис. 4. Зависимость эффективности  $M$  от кратности резервирования  $K$ : при интенсивности 1000 пакетов в секунду (1); при интенсивности 2000 пакетов в секунду (2)

На рис. 5 отображена зависимость  $M$  от интенсивности поступления пакетов при различном коэффициенте резервирования передач. Видно, что увеличение  $K$  эффективно не на всей области допустимых значений интенсивности. Видна область, в которой на одной сетевой конфигурации более эффективна передача с большим коэффициентом резервирования. Так, на графике точка с интенсивностью 4000 пакетов в секунду является переломной, после которой использование  $K=1$  более эффективно. Полученный результат объясняется увеличением количества передач при повышении коэффициента резервирования, что при использовании алгоритма, основанного на множественном доступе, приводит к большей пропускной способности каналов связи и увеличению количества коллизий, а следовательно числа передач, и снижению общей эффективности передач.

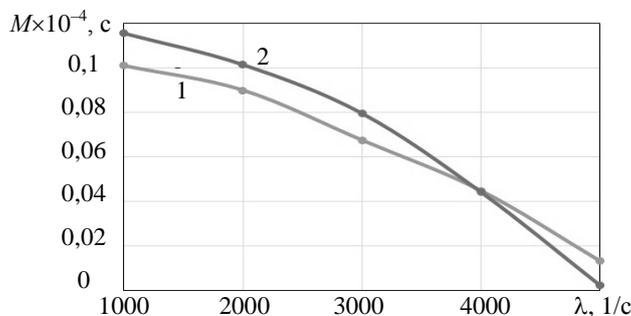


Рис. 5. Зависимость эффективности  $M$  от интенсивности поступления пакетов  $\lambda$ : при  $K = 1$  (1); при  $K = 2$  (2)

### Заключение

Разработана имитационная модель компьютерной сети со случайным доступом и возможностью увеличения резервирования передач в среде OMNeT++. Проведены имитационные эксперименты по оценке эффективности передач с различной интенсивностью и с варьированием коэффициента резервирования. Выявлены области применения эффективного резервирования передач при агрегировании каналов связи в сетях со случайным доступом, основанных на алгоритме CSMA/CD.

### Литература

1. Aysan H. *Fault-Tolerance Strategies and Probabilistic Guarantees for Real-Time Systems*. Vasteras, Sweden, Malardalen University, 2012. 190 p.
2. Cheng S.T., Chen C.M., Tripathic S.K. Fault-tolerance model for multiprocessor real-time systems // *Journal of Computer and System Sciences*. 2000. V. 61. N 3. P. 457–477. doi: 10.1006/jcss.2000.1704
3. Kopetz H. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer, 2011. 396 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8237-7
4. Shooman M.L. *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*. John Wiley & Sons, 2002. 552 p.
5. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М., 2016. 544 с.
6. Верзун Н.А., Колбанев М.О., Татарникова Т.М. Технологическая платформа четвертой промышленной революции // *Геополитика и безопасность*. 2016. № 2(34). С. 73–78.
7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
8. Aliev T.I. The synthesis of service discipline in systems with limits // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. V. 601. P. 151–156. doi: 10.1007/978-3-319-30843-2\_16
9. Жмылёв С.А., Алиев Т.И. Системы массового обслуживания с полимодальными потоками // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 3(115). С. 473–478. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-473-478
10. 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.
11. Lee M.H., Dudin A.N., Klimenok V.I. The SM/V/N queueing system with broadcasting service // *Mathematical Problem in Engineering*. 2006. V. 2006. Art. 98171. doi:

### References

1. Aysan H. *Fault-Tolerance Strategies and Probabilistic Guarantees for Real-Time Systems*. Vasteras, Sweden, Malardalen University, 2012, 190 p.
2. Cheng S.T., Chen C.M., Tripathic S.K. Fault-tolerance model for multiprocessor real-time systems. *Journal of Computer and System Sciences*, 2000, vol. 61, no. 3, pp. 457–477. doi: 10.1006/jcss.2000.1704
3. Kopetz H. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer, 2011, 396 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8237-7
4. Shooman M.L. *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*. John Wiley & Sons, 2002, 552 p.
5. Shubinskii I.B. *Reliable Fault-Tolerant Information Systems. Synthesis Methods*. Moscow, 2016, 544 p. (in Russian)
6. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Tatarnikova T.M. The technological platform of the fourth industrial revolution. *Geopolitics and Security*, 2016, no. 2, pp. 73–78. (in Russian)
7. Kleinrock L. *Queueing Systems*. NY, Wiley Interscience, 1975.
8. Aliev T.I. The synthesis of service discipline in systems with limits. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 601, pp. 151–156. doi: 10.1007/978-3-319-30843-2\_16
9. Zhmylev S.A., Aliev T.I. Queue systems with polymodal query flows. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 473–478 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-473-478
10. Aliev T.I., Muravyeva-Vitkovskaya L.A. Priority-based strategies of traffic management in multiservice computer networks. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 44–48. (in Russian)
11. Lee M.H., Dudin A.N., Klimenok V.I. The SM/V/N queueing system with broadcasting service. *Mathematical Problem in Engineering*, 2006, vol. 2006, art. 98171. doi: 10.1155/MPE/2006/98171
12. Dudin A.N., Sun' B. A multiserver MAP/PH/N system with

- 10.1155/MPE/2006/98171
12. Dudin A.N., Sun' B. A multiserver MAP/PH/N system with controlled broadcasting by unreliable servers // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2009. V. 43. N 5. P. 247–256. doi: 10.3103/S0146411609050046
  13. Korobeinikov A.G., Fedosovsky M.E., Maltseva N.K., Baranova O.V., Zharinov I.O., Gurjanov A.V., Zharinov O.O. Use of information technologies in design and production activities of instrument-making plants // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. N 44. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i44/104708
  14. Грищенко А.Ю., Коробейников А.Г., Дукельский К.В. Метод численной оценки технической интероперабельности // *Кибернетика и программирование*. 2017. № 3. С. 23–38. doi: 10.25136/2306-4196.2017.3.23540
  15. Абрамян Г.В. Структура и функции информационной системы мониторинга и управления рисками развития малого и среднего бизнеса северо-западного федерального округ // *Аудит и финансовый анализ*. 2017. № 5-6. С. 611–617.
  16. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeinikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems // *Modern Applied Science*. 2015. V. 9. N 5. P. 197–210. doi: 10.5539/mas.v9n5p197
  17. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Резервированное обслуживание в кластерах с уничтожением неактуальных запросов // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2017. № 1(151). С. 21–28. doi: 10.14489/vkit.2017.01.pp.021-028
  18. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Эффективность резервирования и фрагментации пакетов при передаче по агрегированным каналам // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 2. С. 165–170. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-165-170
  19. Богатырев В.А., Сластихин И.А. Резервирование передач через агрегированные каналы, разделяемые на группы // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 6(106). С. 1137–1140. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1137-1140
  20. Богатырев В.А. Отказоустойчивость и сохранение эффективности функционирования многомагистральных распределенных вычислительных систем // *Информационные технологии*. 1999. № 9. С. 44–48.
  21. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций. СПб: РГГМУ, 2012. 134 с.
  22. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Ускоренные аналитико-статистические методы имитации технических систем с распределенной структурой // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 3. С. 521–528. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-521-528
  23. Татарникова Т.М., Елизаров М.А. Имитационная модель виртуального канала // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 6. С. 1120–1127
  24. Богатырев С.В., Богатырев В.А. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // *Информационные технологии*. 2009. № 6. С. 41–47.
  25. Богатырев В.А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2006. № 6. С. 21–26
  26. Богатырев В.А., Богатырев А.В., Голубев И.Ю., Богатырев С.В. Оптимизация распределения запросов между кластерами отказоустойчивой вычислительной системы // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 3(85). С. 77–82.
  27. INET Framework for OMNeT++. Manual [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://omnetpp.org/doc/inet-api-current/inet-manual-draft.pdf> (дата обращения: 10.03.2018).
  28. Хабаров С.П. Моделирование Ethernet сетей в среде OMNeT++ INET framework // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 3. С. 462–472. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-462-4
  - controlled broadcasting by unreliable servers. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, no. 5, pp. 247–256. doi: 10.3103/S0146411609050046
  13. Korobeinikov A.G., Fedosovsky M.E., Maltseva N.K., Baranova O.V., Zharinov I.O., Gurjanov A.V., Zharinov O.O. Use of information technologies in design and production activities of instrument-making plants. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, no. 44. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i44/104708
  14. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G., Dukel'skii K.V. Use of the method of numerical estimation for the technical interoperability. *Cybernetics and Programming*, 2017, no. 3, pp. 23–38. (in Russian) doi: 10.25136/2306-4196.2017.3.23540
  15. Abramyan G.V. Structure and functions of the information system for monitoring and managing the risks of the development of small and medium-sized businesses in the North-West Federal District. *Audit and Financial Analysis*, 2017, no. 5-6, pp. 611–617. (in Russian)
  16. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeinikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 197–210. doi: 10.5539/mas.v9n5p197
  17. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Redundant service clusters with the destruction of irrelevant queries. *Herald of Computer and Information Technologies*, 2017, no. 1, pp. 21–28. (in Russian) doi: 10.14489/vkit.2017.01.pp.021-028
  18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Effectiveness of redundancy and packet fragmentation in transmission via aggregated channels. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 165–170. (in Russian) doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-165-170
  19. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. Redundancy of transmissions over the aggregated channels divided into groups. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1137–1140. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1137-1140
  20. Bogatyrev V.A. Resiliency and preserve the functioning of mainline distributed computing systems. *Informacionnye Tehnologii*, 1999, no. 9, pp. 44–48. (in Russian)
  21. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Modelling of Systems and Telecommunication Networks*. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2012, 134 p. (in Russian)
  22. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Shortcut analytical-statistical modeling methods for technical systems with distributed structure. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 521–528. (in Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-521-528
  23. Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. Virtual channel simulation model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1120–1127. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
  24. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Association reservation servers in clusters highly reliable computer system. *Informacionnye Tehnologii*, 2009, no. 6, pp. 41–47. (in Russian)
  25. Bogatyrev V.A. The combinatorial stochastic method of reliability evaluation and fault tolerance for networks with cluster architecture. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 6, pp. 21–26. (in Russian)
  26. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Golubev I.Yu., Bogatyrev S.V. Queries distribution optimization between clusters of fault-tolerant computing system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 3, pp. 77–82. (in Russian)
  27. INET Framework for OMNeT++. Manual. 2016. URL: <https://omnetpp.org/doc/inet-api-current/inet-manual-draft.pdf> (accessed: 10.03.2018).
  28. Khabarov S.P. Modeling of Ethernet networks in OMNeT++ INET framework medium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 462–472. (in Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-462-472

### Авторы

**Носков Илья Игоревич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5489-4092, noskovii@mail.ru

**Богатырев Владимир Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, Scopus ID: 7006571069, ORCID ID: 0000-0003-0213-0223, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

**Сластихин Иван Александрович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0340-484X, Stopgo89@gmail.com

### Authors

**Iliya I. Noskov** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5489-4092, noskovii@mail.ru

**Vladimir A. Bogatyrev** – D.Sc, Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, Scopus ID: 7006571069, ORCID ID: 0000-0003-0213-0223, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

**Ivan A. Slastikhin** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0340-484X, Stopgo89@gmail.com