



УДК 004.75

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В.А. Богатырев<sup>a</sup>, Н.С. Кармановский<sup>a</sup>, Н.А. Попцова<sup>a</sup>, С.А. Паршутина<sup>a</sup>,  
Д.А. Воронина<sup>a</sup>, С.В. Богатырев<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Самсунг, Сеул, 100742, Республика Корея

Адрес для переписки: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 26.05.16, принята к печати 14.07.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Попцова Н.А., Паршутина С.А., Воронина Д.А., Богатырев С.В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 831–838. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы вопросы эффективности многопутевой передачи копий запросов через сеть и их резервированного обслуживания без применения трудоемкого аналитического моделирования. Создана модель и средства поддержки проектирования высоконадежных распределенных систем на основе имитационного моделирования. **Методология исследования.** Формируется и анализируется эффективность множества вариантов организации обслуживания и доставки через сеть к серверам запросов. В том числе рассматриваются варианты, предусматривающие резервированное обслуживание и доставку через сеть к серверам копий запросов. Выбор вариантов организации распределения и обслуживания запросов осуществляется с учетом критичности запросов к времени их пребывания в системе. При этом запрос считается успешно выполненным, если хотя бы одна из его копий будет безошибочно доставлена в работоспособный сервер, готовый к обслуживанию поступающего через сеть запроса, если при этом она будет выполнена в установленный срок. Анализ эффективности вариантов резервированной передачи и обслуживания запросов выполняется на основе модели, построенной в среде имитационного моделирования AnyLogic 7. **Основные результаты.** Имитационные эксперименты, проведенные на основе предложенных моделей, показали эффективность резервированной передачи копий запросов (пакетов) к серверам кластера по нескольким путям с резервированным обслуживанием копий запросов группой серверов кластера. Показано, что такое решение позволяет увеличить вероятность безошибочного выполнения хотя бы одной копии запроса за требуемое время. Выполнена оценка эффективности уничтожения неактуальных копий запросов, находящихся в очередях узлов сети и кластера. Проанализированы варианты реализации в сети многопутевой передачи копий запросов к серверам кластера по непересекающимся путям, возможно, различным по числу входящих в их состав узлов. **Практическая значимость.** Предложенные имитационные модели могут быть использованы при выборе оптимальных проектных решений по организации резервированной передачи и обслуживания запросов, критичных к времени пребывания в инфокоммуникационной системе.

### Ключевые слова

имитационное моделирование, надежность, резервирование, системы массового обслуживания, распределения запросов, многопутевая передача.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы с магистрантами и аспирантами кафедры вычислительной техники.

## SIMULATION MODEL FOR DESIGN SUPPORT OF INFOCOMM REDUNDANT SYSTEMS

V.A. Bogatyrev<sup>a</sup>, N.S. Karmanovsky<sup>a</sup>, N.A. Poptcova<sup>a</sup>, S.A. Parshutina<sup>a</sup>, D.A. Voronina<sup>a</sup>, S.V. Bogatyrev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 100742, Republic of Korea

<sup>b</sup> Samsung, Seoul, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

### Article info

Received 26.05.16, accepted 14.07.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838

Article in Russian

**For citation:** Bogatyrev V.A., Karmanovsky N.S., Poptcova N.A., Parshutin S.A., Voronina D.A., Bogatyrev S.V. Simulation model for design support of infocomm redundant systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 831–838. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838

#### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with the effectiveness of multipath transfer of request copies through the network and their redundant service without the use of laborious analytical modeling. The model and support tools for the design of highly reliable distributed systems based on simulation modeling have been created. **Method.** The effectiveness of many variants of service organization and delivery through the network to the query servers is formed and analyzed. Options for providing redundant service and delivery via the network to the servers of request copies are also considered. The choice of variants for the distribution and service of requests is carried out taking into account the criticality of queries to the time of their stay in the system. The request is considered successful if at least one of its copies is accurately delivered to the working server, ready to service the request received through a network, if it is fulfilled in the set time. Efficiency analysis of the redundant transmission and service of requests is based on the model built in AnyLogic 7 simulation environment. **Main Results.** Simulation experiments based on the proposed models have shown the effectiveness of redundant transmission of copies of queries (packets) to the servers in the cluster through multiple paths with redundant service of request copies by a group of servers in the cluster. It is shown that this solution allows increasing the probability of exact execution of at least one copy of the request within the required time. We have carried out efficiency evaluation of destruction of outdated request copies in the queues of network nodes and the cluster. We have analyzed options for network implementation of multipath transfer of request copies to the servers in the cluster over disjoint paths, possibly different according to the number of their constituent nodes. **Practical Relevance.** The proposed simulation models can be used when selecting the optimal design solutions for the redundant transmission and maintenance of requests time-critical for stay in information and communication system.

#### Keywords

simulation, reliability, redundancy, queuing systems, request distribution, multipath transfer

#### Acknowledgements

The work is carried out within the framework of scientific research with master's students and postgraduates of the Department of computing.

### Введение

Надежность, безопасность и эффективность процессов обработки и передачи данных в инфокоммуникационных системах и сетях в существенной мере зависят от безошибочности и своевременности передачи через резервированные каналы запросов и их дальнейшего обслуживания объединяемыми в кластеры [1–7] серверами. Особенно критичны надежность и своевременность доставки и обработки запросов (данных) для систем реального времени.

Для распределенных систем с многопутевой маршрутизацией и резервированием каналов [8–11] увеличение вероятности безошибочной доставки пакетов за ограниченное время может достигаться при резервированной передаче копий пакетов по нескольким каналам. Для такого подхода при требовании доставки хотя бы одной копии своевременность и безошибочность доставки пакетов адресату возможна без использования протоколов подтверждений и повторных передач. Однако резервированная передача копий пакетов приводит к увеличению суммарной интенсивности передач, а поэтому может вызвать увеличение задержек доставки копии. В то же время из-за стохастичности независимой передачи копий пакетов по разным каналам вероятность своевременной доставки хотя бы одной передаваемой копии может возрасти, что при определенных условиях может привести к уменьшению среднего времени ожидания (пребывания) запросов в системе. Эффективность резервированного обслуживания запросов реального времени определяется совокупностью показателей, в том числе средним временем пребывания запросов в сети, а также вероятностями безошибочного выполнения запросов, потери пакетов и своевременного обслуживания запросов [12, 13].

Таким образом, выбор проектных решений по организации резервированных инфокоммуникационных систем и сетей должен основываться на моделировании для многокритериальной оценки эффективности с целью оптимального выбора структуры и организации передачи и обработки данных.

Эффективность инфокоммуникационных систем, процессы в которых отображаются моделями массового обслуживания, во многом определяется дисциплиной обслуживания при передаче и обработке и распределении запросов [14–16].

Для многоканальных систем обслуживания с общей очередью из [17] известна модель, показывающая эффективность дисциплин: если запрос поступает в момент незанятости всех обслуживающих приборов (серверов, каналов передачи данных), то создаются его копии, обслуживаемые в нескольких приборах (узлах). При поступлении запроса при занятости приборов обслуживания он без копирования помещается в общую очередь многоканальной системы массового обслуживания.

Аналитическая модель кластера, представляемого группой  $n$  одноканальных систем обслуживания с локальными очередями, если копии каждого запроса независимо от состояния локальных очередей направляются на резервированное выполнение в  $k$  из  $n$  узлов, предложена и исследована в [18–21]. При этом показано, что независимое обслуживание  $k$  копий запросов в различных узлах позволяет увеличить вероятность не только безошибочного выполнения запросов, но и, при определенных условиях, вероятность своевременного выполнения запроса (хотя бы одной из  $k$  его копий, создаваемых для резервиро-

ванного обслуживания). Резервированное выполнение копий запросов, заносимых в очереди разных узлов, может привести к тому, что к моменту получения безошибочных результатов в каком-либо одном или нескольких узлах в остальных узлах потерявшие свою актуальность копии будут еще находиться в очередях. В работе [21] на основе аналитического моделирования показано, что существенно снизить непроизводительную загрузку узлов кластера, возникающую из-за резервированного выполнения запросов, и соответственно увеличить вероятность своевременного и безошибочного обслуживания запросов удастся при уничтожении просроченных запросов, находящихся в очередях к моменту предельно допустимой задержки.

Эффективность инфокоммуникационных систем зависит не только от кратности и дисциплины (организации) резервированного обслуживания запросов внутри кластера [22, 23], но и в значительной мере от организации распределения запросов через сеть, в том числе при использовании многопутевой резервированной передачи через нее копий запросов [10, 11].

Исследование интегрированной эффективности многопутевой передачи копий запросов через сеть и их резервированного обслуживания в кластере на основе аналитического моделирования достаточно трудоемко, что обуславливает целесообразность имитационного моделирования исследуемых систем.

### Объект и цели исследования

В качестве объекта исследования рассматривается группа из  $n$  серверов, объединяемых в кластер с целью резервированного обслуживания копий запросов, поступающих через многоуровневую сеть (рис. 1). Резервированное обслуживание и доставка через сеть к серверам копий запросов реализуется для обеспечения безошибочного и своевременного обслуживания хотя бы одной из создаваемых резервных копий запросов. Рассмотрены случаи, когда в распределенной системе поддерживается резервированная передача пакетов по  $k$  из  $m$  возможным путей на один сервер (узел) кластера, либо на  $k$  из  $n$  серверов кластера. Запрос считается успешно выполненным, если хотя бы одна из  $k$  его копий будет безошибочно доставлена в сервер, готовый к ее обслуживанию, и при этом хотя бы один из принятых к обслуживанию запросов будет безошибочно выполнен в установленный срок. Для уменьшения непроизводительной загрузки узлов сети и серверов в анализируемой системе предусмотрена возможность уничтожения неактуальных просроченных копий запросов, находящихся в очередях, если хотя бы по одной из сформированных для резервированного обслуживания копий результат вычислений уже получен.

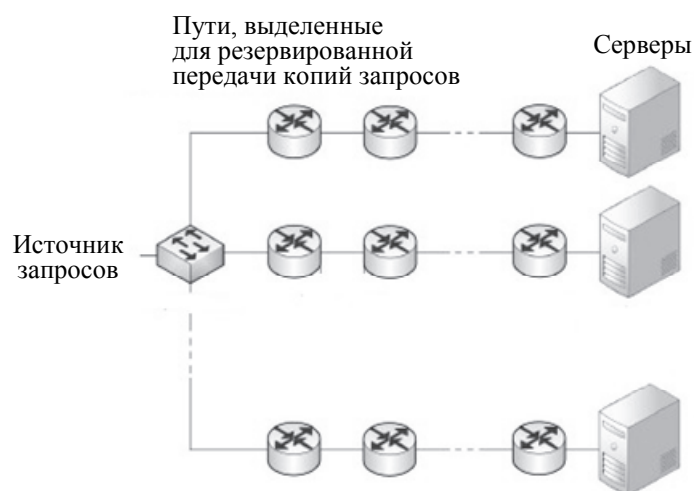


Рис. 1. Структура распределенной системы с резервированной передачей и обслуживанием копий запросов

Целью работы является создание имитационных моделей и средств поддержки проектирования высоконадежных распределенных систем. Создаваемые модели предназначены для анализа эффективности и выбора вариантов проектных решений по построению сетей с резервированной передачей и обслуживанием запросов.

Разрабатываемые имитационные модели исследуемой распределенной системы строятся в среде имитационного моделирования AnyLogic 7. Исследования направлены на оценку эффективности и целесообразности резервированной доставки через сеть копий запросов и их резервированного обслуживания в узлах кластера. При построении модели считается, что в сети реализуется доставка копий запросов к серверам кластера по непересекающимся путям, возможно, различным по числу узлов, задействованных при передаче копий запросов. При этом исследуется влияние на эффективность резервированного обслуживания запросов уничтожения их неактуальных копий, находящихся в очередях узлов сети и кластера.

### Построение имитационной модели

Схема имитационной модели резервированной передачи от одного источника запросов по  $k$  путям хотя бы к одному из  $k$  серверов кластера приведена на рис. 2.

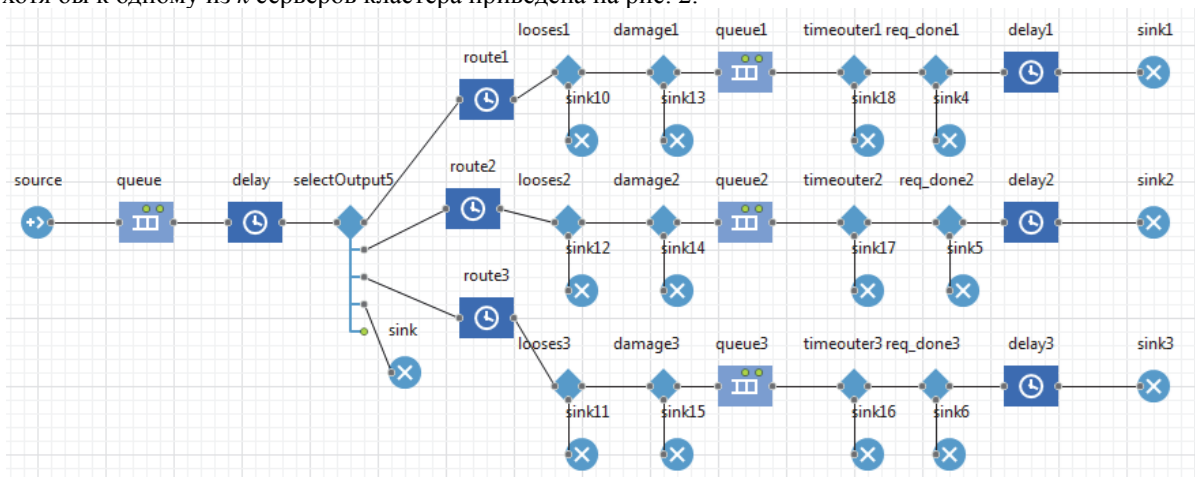


Рис. 2. Схема имитационной модели резервированной передачи

Модель состоит из трех объектов:

- источник запросов, включающий распределяющий механизм отправки запросов на заранее известные пути;
- пути передачи запросов, с возможностью настройки параметров искажения и потери запросов в пути;
- серверы обработки запросов, с возможностью настройки параметров отбрасывания (уничтожения) пакетов по тайм-ауту и уничтожения неактуальных пакетов, если их копии уже безошибочно обработаны другими серверами.

Источник запросов представляет собой совокупность следующих элементов (рис. 3), связанных между собой:

- генератор запросов (source);
- буфер для сгенерированных запросов (queue);
- элемент задержки выдачи запроса на передачу по заданному пути (delay);
- распределитель запросов и их копии по путям (selectOutput5).

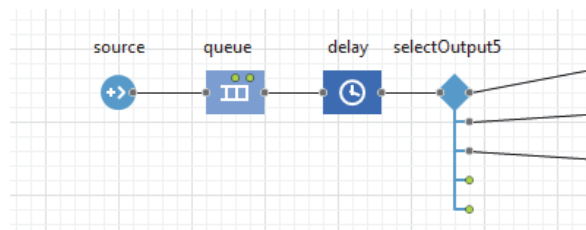


Рис. 3. Источник запросов в модели

В параметрах элементов источника запросов задаются:

- интенсивность поступления запросов;
- кратность резервирования передач;
- алгоритм присваивания номеров запросам и их копиям;
- алгоритм определения пути, по которому будет отправлен запрос или его копии.

Путь представляет собой совокупность следующих элементов (рис. 4, а), связанных между собой:

- элемент формирования задержки в пути (route $N$ , где  $N$  номер пути);
- элемент «потери» (looses $N$ , где  $N$  номер пути);
- элемент «битовая ошибка» (damage $N$ , где  $N$  номер пути).

В параметрах элементов каждого пути задаются:

- формула определения времени задержки в зависимости от размера пакета и скорости передачи данных;
- вероятность потери запроса в пути;
- вероятность безошибочной передачи пакета  $B$  из  $N$  бит через  $h$  узлов при вероятности битовых  $b$  вычисляется по формуле:  $B=(1-b)^{Nh}$ .

Сервер обработки запросов представляет собой совокупность следующих объектов (рис. 4, б), связанных между собой:

- буфер для запросов ( $queueN$ , где  $N$  номер сервера);
- элемент «тайм-ауты» ( $timeouterN$ , где  $N$  номер сервера);
- элемент «уже обработанные запросы» ( $req\_doneN$ , где  $N$  номер сервера);
- элемент задержки выдачи запроса для передачи ( $delayN$ , где  $N$  номер сервера);
- элемент уничтожения запроса ( $sinkN$ , где  $N$  номер сервера).

В параметрах элементов каждого сервера задаются:

- емкость (вместимость) буфера для запросов;
- алгоритм отбрасывания неактуальных запросов и копий запросов по тайм-ауту;
- алгоритм отбрасывания запросов и копий запросов, если запрос или его копия были уже обработаны в других серверах;
- время обработки запроса на сервере.

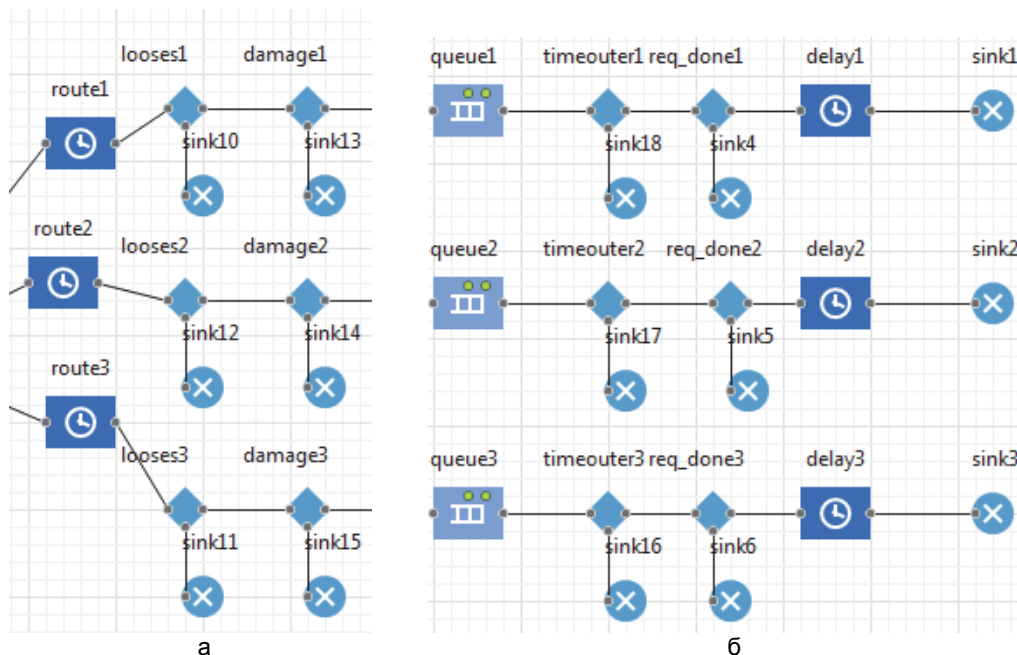


Рис. 4. Схема путей (а); схема серверов (б)

### Оценка эффективности резервированных передач и резервированного обслуживания копий запросов в кластере

С помощью предложенной модели исследовалась зависимость вероятности своевременной и безошибочной доставки через сеть и обслуживания запросов в кластере от кратности их резервирования. При моделировании варьировались вероятности потерь пакетов в каналах и возникновения битовых ошибок при различных ограничениях на допустимое время пребывания запросов в системе.

При экспериментах заданы: длины пакетов от 1024 до 4096 бит; интенсивность генерации запросов – 1000 запросов в секунду; скорость передачи данных в каналах – 10 Мбит/с, время обслуживания запроса в сервере от 0,01 до 5 с. Входной поток запросов и время обслуживания заданы по экспоненциальному закону.

На рис. 5 представлена зависимость вероятности своевременной и безошибочной доставки через сеть и обслуживания запросов в кластере от кратности резервирования их копий для каналов с различной вероятностью битовых ошибок (рис. 5, а) и с различным значением предельно допустимого времени пребывания запросов в системе (рис. 5, б). Из рис. 5 видно, что при увеличении кратности резервирования запросов при их многопутевой передаче через сеть и обслуживании в кластере до определенного предела возрастает вероятность своевременного и безошибочного обслуживания хотя бы одной из создаваемых при резервировании копии запроса. Рис. 5 подтверждает, что существует граница кратности резервирования, выше которой резервированная передача и обслуживание запросов неэффективна. Так (рис. 5, а), при вероятности битовых ошибок  $b=0,00001$  оптимальной является кратность резервирования  $k=2$ , а при  $b=0,0001$  оптимальна кратность резервирования  $k=3$ . При предельно допустимом времени пребывания запросов в системе (тайм-ауте) 2,5 и 3,5 с – оптимальна кратность резервирования запросов  $k=1,5$ . Дробное значение оптимальной кратности резервирования свидетельствует о целесообразности применения

смешанной стратегии резервирования, когда часть запросов резервируются с кратностью  $k=2$ , а часть – с кратностью  $k=1$ .

Проведенные исследования подтверждают целесообразность резервированной multipath передачи запросов к кластеру через сеть и их резервированного обслуживания несколькими серверами кластера.

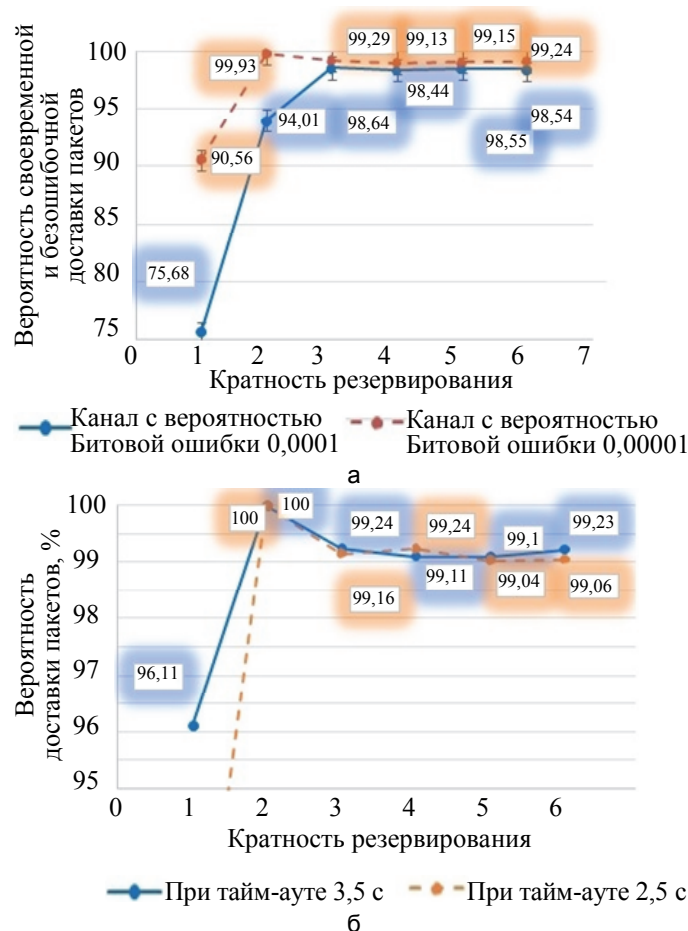


Рис. 5. Зависимости вероятности своевременной и безошибочной доставки и обслуживания запросов от кратности резервирования передаваемых копий пакетов при различной вероятности битовых ошибок (а) и при различных значениях тайм-аутов (б)

### Заключение

Таким образом, предложена имитационная модель, позволяющая оценить эффективность резервированной передачи копий запросов по нескольким путям и их резервированного независимого обслуживания группой серверов кластера.

Эффективность резервированного обслуживания определена в зависимости от:

- вероятности потери пакетов в сети, вероятности битовых ошибок;
- предельно допустимого времени пребывания запросов в системе;
- дисциплины уничтожения в очередях неактуальных запросов (просроченных запросов и запросов, находящихся в очередях после получения результатов обслуживания одной из его резервных копий).

Проведенные исследования показали эффективность резервированной передачи копий запросов (пакетов) к серверам кластера по нескольким путям с резервированным независимым обслуживанием копий запросов группой серверов кластера. Это позволяет увеличить вероятность безошибочного выполнения хотя бы одной копии запроса в установленные сроки.

Существуют границы целесообразности резервирования при передаче и обслуживании копий запросов. Эти границы зависят от вероятностей битовых ошибок, ограничений на время пребывания запросов и дисциплины уничтожения неактуальных копий запросов.

Предложенные модели могут использоваться в системах поддержки проектирования инфокоммуникационных систем при обосновании выбора и оптимизации проектных решений по созданию отказоустойчивых резервированных распределенных вычислительных систем реального времени, критичных к времени обслуживания запросов.



Литература

References

1. 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
2. Aliev T.I., Rebezova M.I., Russ A.A. Statistical methods for monitoring travel agencies // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015. V. 49. N 6. P. 321–327. doi: 10.3103/S0146411615060024
3. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Функциональная надежность вычислительных систем с перераспределением запросов // *Известия вузов. Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 10. С. 53–56.
4. Aleksanin S.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Perezyabov O.A., Zharinov O.O. Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. N 17. P. 7494–7501.
5. Гатчин Ю.А., Жаринов И.О., Коробейников А.Г. Математические модели оценки инфраструктуры системы защиты информации на предприятии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 2 (78). С. 92–95.
6. Богатырев В.А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2006. № 10. С. 18–21.
7. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Омелян А.В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей // *Омский научный вестник*. 2016. № 4 (148). С. 147–151.
8. Богатырев В.А. Отказоустойчивость и сохранение эффективности функционирования многомагистральных распределенных вычислительных систем // *Информационные технологии*. 1999. № 9. С. 44–48.
9. Богатырев В.А. Комбинаторный метод оценки отказоустойчивости многомагистрального канала // *Методы менеджмента качества*. 2000. № 4. С. 30–35.
10. Богатырев В.А., Паршутина С.А. Модели многопутевой отказоустойчивой маршрутизации при распределении запросов через сеть // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015. № 12. С. 23–28.
11. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Redundant distribution of requests through the network by transferring them over multiple paths // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. V. 601. P. 199–207. doi: 10.1007/978-3-319-30843-2\_21
12. Bogatyrev V.A. Exchange of duplicated computing complexes in fault tolerant systems // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2011. V. 46. N 5. P. 268–276. doi: 10.3103/S014641161105004X
13. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оптимизация кластера с ограниченной доступностью кластерных групп // *Научно-технический вестник СПбГУ*. 2011. № 1 (71). С. 63–67.
14. Богатырев В.А. Мультипроцессорные системы с динамическим перераспределением запросов через общую магистраль // *Известия вузов. Приборостроение*. 1985. № 3. С. 33–38.
15. Богатырев В.А. К распределению функциональных ресурсов в отказоустойчивых многомашиных вычислительных системах // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2001. № 12. С. 1–5.
16. Богатырев В.А. Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях // *Электронное моделирование*. 1997. № 3. С. 21–29.
17. 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
18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of a real-time redundant computational process in cluster architecture systems // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015. V. 49. N 1. P. 46–56. doi: 10.3103/S0146411615010022
19. Богатырев В.А. Богатырев А.В. Модель резервированного обслуживания запросов реального времени в компьютерном кластере // *Информационные технологии*. 2016. Т. 22. № 5.
1. Aranoskiy S.V., Aleksandrova S.A., Lovlin S.U. Identification method for the electromechanical system with the variable friction 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
2. Aliev T.I., Rebezova M.I., Russ A.A. Statistical methods for monitoring travel agencies. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 321–327. doi: 10.3103/S0146411615060024
3. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Functional reliability of computing systems with redistribution of inquiries. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2012, vol. 55, no. 10, pp. 53–56. (In Russian)
4. Aleksanin S.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Perezyabov O.A., Zharinov O.O. Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol. 10, no. 17, pp. 7494–7501.
5. Gatchin Yu.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G. Mathematical estimation models of information security system infrastructure at the enterprise. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 2 (78), pp. 92–95. (In Russian)
6. Bogatyrev V.A. Reliability estimation and optimal redundancy in computer cluster systems. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 10, pp. 18–21.
7. Verzun N.A., Kolbanev M.O., Omelyan A.V. Controlled multiple access in wireless network of smart things. *Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 147–151.
8. Bogatyrev V.A. Otkazoustoichivost' i sokhranenie effektivnosti funktsionirovaniya mnogomagistral'nykh raspredelennykh vychislitel'nykh system [Resiliency and preserve the functioning of mainline distributed computing systems]. *Informacionnye Tehnologii*, 1999, no. 9, pp. 44–48.
9. Bogatyrev V.A. Kombinatornyi metod otsenki otkazoustoichivosti mnogomagistral'nogo kanala. *Methods of Quality Management*, 2000, no. 4, pp. 30–35.
10. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Multipath fault-tolerant routing models for distributing queries through the network. *Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 12, pp. 23–28.
11. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Redundant distribution of requests through the network by transferring them over multiple paths. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 601, pp. 199–207. doi: 10.1007/978-3-319-30843-2\_21
12. Bogatyrev V.A. Exchange of duplicated computing complexes in fault tolerant systems. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2011, vol. 46, no. 5, pp. 268–276. doi: 10.3103/S014641161105004X
13. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Clusters optimization with the limited availability of clusters groups. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 1 (71), pp. 63–67.
14. Bogatyrev V.A. Multiprotsessornye sistemy s dinameskim pereraspredeleniem zaprosov cherez obshchuyu magistral' [Multiprocessor systems with dynamic reallocation requests through a common backbone]. *Izv. vuzov SSSR. Priborostroenie*, 1985, no. 3, pp. 33–38.
15. Bogatyrev V.A. K raspredeleniyu funktsional'nykh resursov v otkazoustoichivyykh mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistemakh [The distribution of functional resources in the fault-tolerant multicomputer systems]. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2001, no. 12, pp. 1–5.
16. Bogatyrev V.A. Nadezhnost' variantov razmeshcheniya funktsional'nykh resursov v odnorodnykh vychislitel'n. *Engineering Simulation*, 1997, no. 3, pp. 21–29.
17. Dudin A.N., Sun' B. A multiserver MAP/PH/N system with controlled broadcasting by unreliable servers. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, no. 5, pp. 247–256. doi: 10.3103/S0146411609050046
18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of a real-

- C. 348–355.
20. 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.
  21. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Оптимизация резервированного распределения запросов в кластерных системах реального времени // Информационные технологии. 2015. Т. 21. №7. С. 495–502.
  22. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Golubev I.Yu. Optimization and the process of task distribution between computer system clusters // Automatic Control and Computer Sciences. 2012. V. 46. N 3. P. 103–111. doi: 10.3103/S0146411612030029
  23. 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.
  - time redundant computational process in cluster architecture systems. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 46–56. doi: 10.3103/S0146411615010022
  19. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. The model of redundant service requests real-time in a computer cluster. *Informacionnye Tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 5, pp. 348–355.
  20. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. The reliability of the cluster real-time systems with fragmentation and redundant service requests. *Informacionnye Tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 6, pp. 409–416.
  21. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Optimization of redundant routing requests in a clustered real-time systems. *Informacionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 7, pp. 495–502. (In Russian)
  22. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Golubev I.Yu. Optimization and the process of task distribution between computer system clusters. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 103–111. doi: 10.3103/S0146411612030029
  23. 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(85), pp. 77–82.

### Авторы

**Богатырев Владимир Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

**Кармановский Николай Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, karmanov50@mail.ru

**Попцова Наталья Александровна** – магистрант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, popcovanatalia@yandex.ru

**Паршутина Светлана Александровна** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, svetlana.parshutina@gmail.com

**Воронина Дарья Андреевна** – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, daria-1904@yandex.ru

**Богатырев Станислав Владимирович** – старший инженер, Самсунг, Сеул, 100742, Республика Корея, realloc@gmail.com

### Authors

**Vladimir A. Bogatyrev** – D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

**Nikolai S. Karmanovsky** – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, karmanov50@mail.ru

**Natalia A. Poptcova** – magister’s student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, popcovanatalia@yandex.ru

**Svetlana A. Parshutina** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, svetlana.parshutina@gmail.com

**Daria A. Voronina** – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, daria-1904@yandex.ru

**Stanislav V. Bogatyrev** – senior engineer, Samsung, Seoul, 100742, Republic of Korea, realloc@gmail.com