

УДК 004.75

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1064-1071

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕЗЕРВИРОВАННОГО МЕЖМАШИННОГО ОБМЕНА С УЧЕТОМ ОРГАНИЗАЦИИ ОЧЕРЕДЕЙ НА ДОСТУП К АГРЕГИРОВАННЫМ КАНАЛАМ

В.А. Богатырев^{a,b}, И.А. Сластихин^a, Д.Д. Жданов^a, А.А. Смолин^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Адрес для переписки: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.07.19, принята к печати 09.09.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Богатырев В.А., Сластихин И.А., Жданов Д.Д., Смолин А.А. Имитационная модель резервированного межмашинного обмена с учетом организации очередей на доступ к агрегированным каналам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 1064–1071. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1064-1071

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования компьютерных систем при организации обмена через резервированные каналы с целью анализа возможностей повышения, надежности и своевременности взаимодействия компьютерных систем в результате резервированных передач через агрегированные каналы с учетом вариантов реализации в компьютерных узлах распределенных отдельных очередей на доступ к каждому каналу или общей очереди на доступ ко всем каналам. **Метод.** Используемый метод основан на построении имитационных моделей рассматриваемых вариантов резервированного обмена через агрегированные каналы. **Основные результаты.** Показана эффективность резервированного обмена с учетом организации в узлах распределенных очередей на доступ к агрегированным каналам. Для первого варианта резервированного обмена в каждом компьютерном узле организованы отдельные очереди на доступ к каждому каналу. Поступающий запрос копируется k раз (в зависимости от критичности к времени ожидания), и каждая копия помещается в одну из очередей. Для второго варианта в каждом компьютерном узле организована одна общая очередь ко всем каналам, в которую заносится каждый поступающий пакет (запрос на его передачу). При выдаче запроса из общей очереди формируется k копий передаваемого пакета, каждая из которых передается через один из n каналов по мере предоставления узлу полномочий доступа к нему. Особенность резервированного обслуживания заключается в формировании для каждого запроса k его копий, выдаваемых на обслуживание в разные каналы. Обслуживание считается успешно завершённым, если за заданное время безошибочно выполняется хотя бы одна из k создаваемых копий запроса (пакета). Показано существование оптимальной кратности резервирования передаваемых копий пакетов, определена область эффективности резервированного межмашинного обмена. **Практическая значимость.** Результаты могут быть использованы при проектировании высоконадежных компьютерных систем, в том числе реального времени.

Ключевые слова

надежность, своевременность, очередь, резервирование передач, агрегированные каналы, критичность к времени ожидания, кратности резервирования, область эффективности, имитационное моделирование

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1064-1071

SIMULATION MODEL OF REDUNDANT MACHINE-TO-MACHINE EXCHANGE WITH ORGANIZATION OF QUEUES FOR ACCESS TO AGGREGATED CHANNELS

V.A. Bogatyrev^{a,b}, I.A. Slastikhin^a, D.D. Zhdanov^a, A.A. Smolin^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Article info

Received 29.07.19, accepted 09.09.19

Article in Russian

For citation: Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A., Zhdanov D.D., Smolin A.A. Simulation model of redundant machine-to-machine exchange with organization of queues for access to aggregated channels. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1064–1071 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1064-1071

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of computer systems in providing exchanges through redundant channels in order to analyze the possibilities of reliability increase and timeliness of computer systems interaction as a result of redundant transfers through aggregated channels, taking into account the implementation options in computer nodes of distributed separate queues for access to each channel, or general queue for access to all channels. **Method.** The method is based on the development of simulation models of the considered options for redundant exchange through aggregated channels. **Main Results.** The redundant exchange efficiency is shown taking into account the organization of distributed queues in the nodes for access to aggregated channels. For the first option of redundant exchange, separate queues are organized at each computer node for access to each channel. The incoming request is copied k times (depending on the criticality to the timeout), and each copy is placed in one of the queues. For the second option, one common queue is organized for all channels in each computer node, and each incoming packet is entered in this queue (a request for its transmission). When a request is issued from the general queue, k copies of the transmitted packet are generated, and each copy is transmitted through one of the n channels as far as the node is granted access rights to it. A specific feature of the reserved service is the formation of k copies for each request, issued for service in different channels. A service is considered to be successfully completed if at least one of the k created copies of the request (package) is correctly executed in the specified time. The existence of the optimal reservation multiplicity of transmitted copies of packets is shown; the efficiency area of the reserved machine-to-machine exchange is determined. **Practical Relevance.** The results can be used in the design of highly reliable computer systems, including real-time ones.

Keywords

reliability, timeliness, queue, transmission reservation, aggregated channels, criticality to timeout, redundancy rate, area efficiency, simulation

Введение

Основополагающей задачей проектирования распределенных компьютерных систем и сетей является обеспечение надежности [1–5], безопасности [6] и своевременности обработки, передачи и хранения данных при взаимодействии узлов через сеть [7–10] при их малом энергопотреблении [11]. Для реализации устойчивого межмашинного обмена в компьютерной системе требуется обеспечить не только структурную надежность и отказоустойчивость сети, но и надежность взаимосвязи узлов при своевременности и безошибочности выполнения запросов межмашинного обмена в условиях сбоев, отказов и внешних деструктивных воздействий [12–14]. Поддержка надежности и своевременности межмашинного обмена особенно остро стоит для систем реального времени.

Надежность и своевременность передач в сети обеспечивается резервированием структуры для реализации многопутевой связанности узлов и управлением трафиков, в том числе на основе балансировки нагрузки и приоритизации запросов [15, 16], устанавливаемой в зависимости от их важности и критичности к задержкам в сети. Балансировка нагрузки эффективно применяется в системах многопутевой маршрутизации.

Снизить средние задержки передач в сети, как показано в работах Е.А. Круга и Г.А. Кабатянского [17, 18], позволяет транспортное кодирование, при котором сообщение разбивается на фрагменты, которые после кодирования передаются по разным путям (маршрутам), при этом в результате вводимой информационной избыточности даже при потере или доставке с ошибками части пакетов (фрагментов) удается восстановить все сообщение без повторов передач. Следует заметить, что восстановление при транспортном кодировании требует определенных затрат вычислительных и временных ресурсов.

В ряде случаев с меньшими издержками снизить задержки в компьютерных системах и сетях удается при резервированном обслуживании запросов, в том числе передаваемых через сеть пакетов. При резервированном обслуживании запросы копируются и выполняются с использованием различных ресурсов системы (компьютерных узлов или каналов связи), при этом запрос считается выполненным, если с заданным показателем качества (например, задержкой в очереди) выполняется хотя бы одна копия запроса.

Для систем, представляемых многоканальными системами массового обслуживания с общей очередью [19, 20], бесконечной длины в работах [21–23], показано, что сократить среднее время ожидания запросов позволяет дисциплина «широковещательное обслуживание с копированием запроса» (Broadcasting with a customer Copying), при которой каждый запрос направляется на резервированное выполнение в свободные узлы (приборы). Вариант дисциплины широковещательного обслуживания, при которой если число занятых приборов в момент поступления запроса меньше некоторого порогового значения, то запрос копируется во все свободные узлы, иначе он обслуживается в одном узле, предложен в [23]. Эффективность резервированного обслуживания с [21–23] оценивается по среднему времени ожидания до обслуживания хотя бы одной копии запроса.

Для компьютерных систем, функционирующих в реальном времени, эффективность определяется не столько средним временем ожидания запросов, сколько вероятностью безошибочного выполнения запросов в директивные сроки (своевременность безошибочного обслуживания). Для повышения устойчивости к отказам и ошибкам вычислительного процесса реального времени, а также для обеспечения своевременности выдачи его результатов, их копии могут распределяться на резервированное обслуживание в очереди несколько узлов [24, 25].

Развитие концепции резервированного обслуживания представляется перспективным для систем межмашинного обмена с агрегированием каналов, в которых надежность и своевременность передач

может поддерживаться при резервированной передаче копий пакетов по разным путям, т.е. при многопутевой резервированной передаче копий пакетов. Многопутевая резервированная передача считается успешной при своевременной и безошибочной доставке адресату хотя бы одной копии по одному из путей передачи.

При многопутевой резервированной передаче под путем понимается набор элементов (узлов), задействованных в обслуживании запросов, работоспособность которых обеспечивает выполнение требуемых функций в системе (например, межмашинный обмен в сети или многоуровневое обслуживание в системе обработки данных кластерной архитектуры), отказ любого из элементов, составляющих путь, приводит к нарушению требуемого функционирования системы. При многопутевой передаче под активными понимаются пути (маршруты), используемые для резервированной передачи заданного числа копий передаваемого пакета. Активные пути в общем случае могут пересекаться. Не все возможные пути в системе могут назначаться как активные.

Эффективность резервированного межмашинного обмена через агрегированные каналы во многом определяется организацией распределенных по компьютерным узлам очередей на доступ к каналам, зависит от дисциплин множественного доступа, от способа формирования и выдачи копий пакетов через агрегированные каналы.

Таким образом, цель данной работы – исследование возможностей повышения, надежности и своевременности взаимодействия компьютерных систем при многопутевой резервированной передаче через агрегированные каналы с учетом организации очередей на доступ к каналам и задания кратности резервирования копий передаваемых пакетов в зависимости от их критичности к задержкам и возможным ошибкам передач.

Следует подчеркнуть, что резервированное многопутевое обслуживание запросов (в том числе на передачу данных через сеть) связано с разрешением технического противоречия, так как, с одной стороны, оно приводит к увеличению загрузки, а значит, к дополнительным ожиданиям копий запросов в очередях, а с другой (в силу стохастичности задержек передачи по разным путям) — к повышению вероятности того, что некоторая копия будет обслужена быстрее остальных. При этом если при межмашинном обмене достаточно своевременности обслуживания хотя бы одной из формируемых копий, то резервирование передач приведет к повышению вероятности своевременного обслуживания запросов и уменьшению среднего времени пребывания запроса в сети. Резервированная передача копий пакетов через сеть в условиях интенсивных битовых ошибок дополнительно усиливает эффект повышения вероятности безошибочности и своевременности многопутевых передач.

Разрешение указанного технического противоречия связано с поиском оптимальной кратности резервирования передач в зависимости от интенсивности потоков запросов, их критичности к задержкам обслуживания и интенсивности битовых ошибок в каналах.

Метод решения задачи исследования основан на применении имитационного моделирования.

Организация взаимодействия вычислительных систем через агрегированные каналы

Характерной особенностью систем межмашинного обмена через агрегированные каналы, являющиеся общим резервированным ресурсом обмена для некоторой совокупности компьютеров, является организация в них распределенных очередей на доступ к каналам, причем полномочия передач через каналы предоставляются на основе множественного доступа, осуществляемого при децентрализованном взаимодействии сетевых адаптеров (СА), связывающих компьютерные узлы с каналами.

Проанализируем два варианта организации очередей запросов на межмашинный обмен с резервированием передач.

1. Вариант А: в каждом компьютерном узле на доступ к n различным каналам организованы отдельные очереди. Поступающий запрос копируется k раз, и каждая копия помещается в одну из n очередей (рис. 1, а). Очереди узлов на доступ к каждому каналу объединяются в единую распределенную по узлам очередь запросов на межмашинный обмен. Полномочия обслуживания запросов (передачи копий пакета) из очереди узла предоставляются на основе децентрализованного протокола множественного доступа.

2. Вариант Б: в каждом компьютерном узле организуется общая очередь на доступ ко всем n каналам. Очереди отдельных узлов объединяются в единую распределенную по узлам очередь. Поступивший запрос заносится в общую очередь узла, формирование нужного числа (k) копий передаваемых пакетов производится по мере предоставления узлу полномочий передачи через каналы (рис. 1, б) на основе множественного доступа.

Вариант А представим совокупностью n одноканальных систем массового обслуживания (СМО), очереди которых распределены по узлам, причем каждая СМО отображает процесс передачи пакетов через отдельные каналы.

Вариант Б представим многоканальной СМО с распределенной очередью между узлами сети и n обслуживающими приборами (каждый из которых соответствует отдельному каналу передачи данных).

Представляет интерес сравнение эффективности представленных вариантов организации резервированного взаимодействия. Исследование основано на имитационном моделировании.

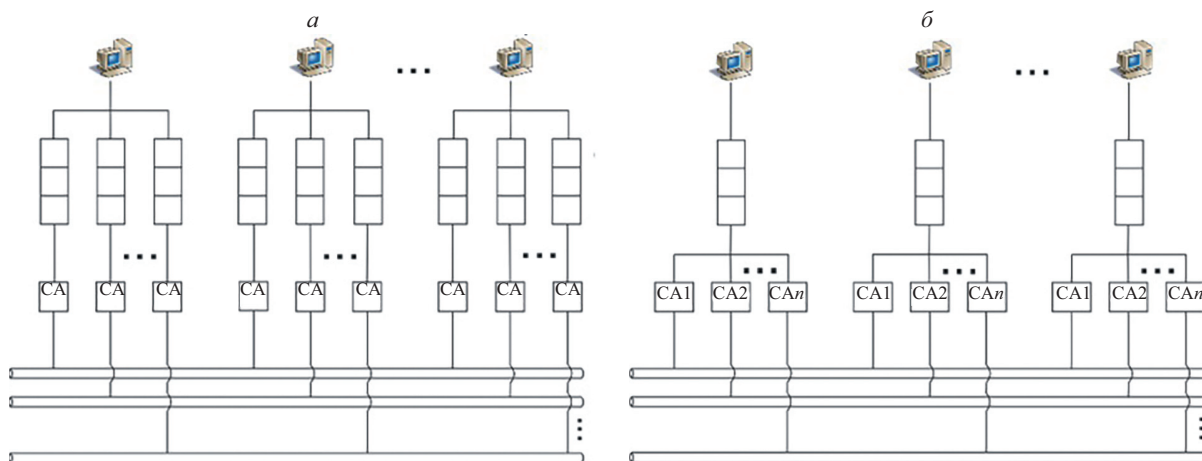


Рис. 1. Организация очередей на доступ к агрегированным каналам: отдельные очереди (а), общая очередь (б)

Построение имитационных моделей

Имитационные модели исследуемых систем межмашинного резервированного обмена построены в среде имитационного моделирования AnyLogic 7, что обусловлено широким международным опытом использования этой среды для моделирования систем массового обслуживания, в том числе при исследовании распределенных компьютерных систем и сетей.

На рис. 2 представлена имитационная модель резервированного взаимодействия системы по варианту А с отдельными очередями на доступ к каналам при агрегировании двух каналов связи.

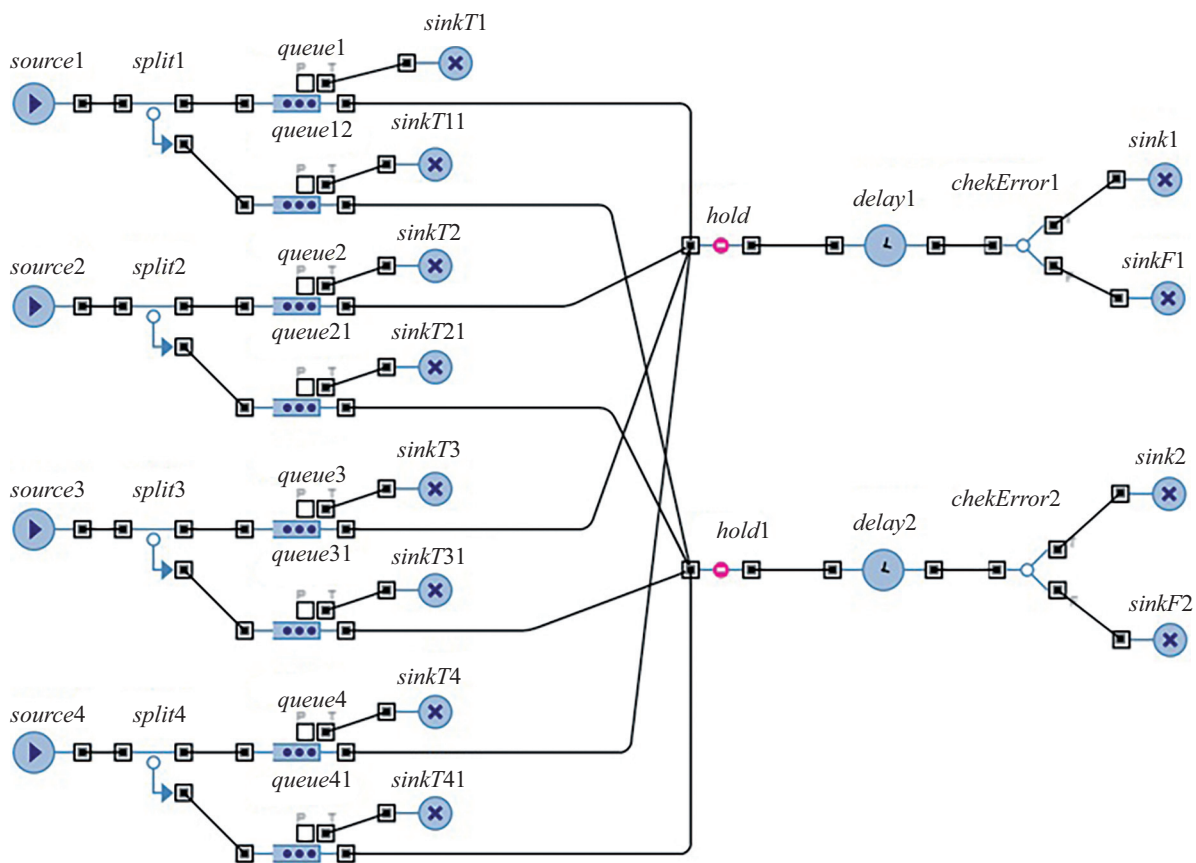


Рис. 2. Имитационная модель системы с отдельными очередями к каналам

Блоки $source_i$ — источники пакетов для i -той станции. Блоки $split_i$ — моделируют копирование поступающих пакетов и распределение копий по соответствующим очередям. Блоки $queue_i$ и $queue_{i1}$ — очереди пакетов i -той станции. За моделирование сетевых адаптеров отвечают выходы блоков $queue_i$ и $queue_{i1}$. Блоки $sink_{Ti}$ и $sink_{Ti1}$ — учитывают пакеты, покинувших очередь по таймауту, для i -той станции. Блоки $delay_1$ и

delay2 — 2 идентичных канала связи. Блоки *hold* и *hold1* — технические блоки, учитывающие занятости каналов. Блоки *chekErrori* — отражают проверку правильности передачи пакетов. Блоки *sinki* — реализуют учет безошибочно доставленных пакетов. Блоки *sinkFi* учитывают доставленные с ошибкой пакеты.

На рис. 3 представлена имитационная модель организации резервированного межмашинного обмена по варианту Б при агрегировании двух каналов.

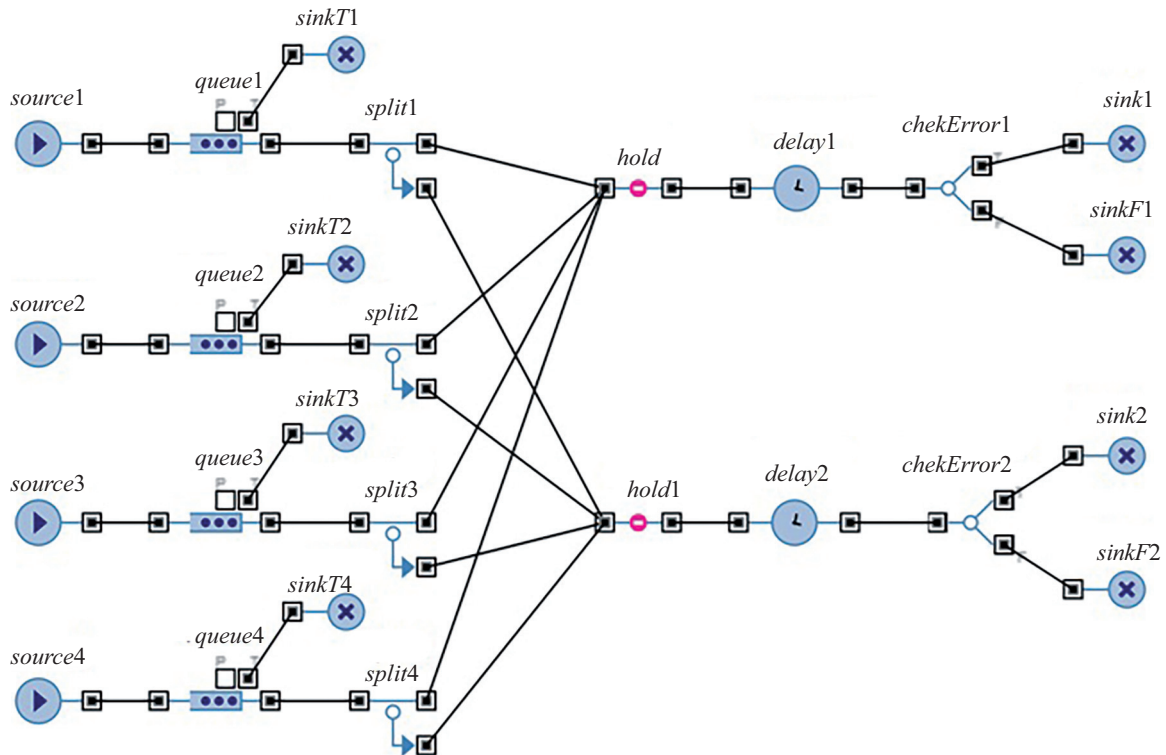


Рис. 3. Имитационная модель системы с общей очередью на доступ к каналам

В имитационной модели по рис. 3 блоки *sourcei* — источники пакетов для *i*-той станции. Блоки *queuei* — очереди пакетов *i*-той станции. Блоки *spliti* — отражают процесс копирования поступающих пакетов. За моделирование сетевых адаптеров отвечают выходы блоков *spliti*. Блоки *sinkTi* — учитывают пакеты, покинувших очередь по таймауту, для *i*-той станции. Блоки *delay1* и *delay2* — 2 идентичных канала связи. Блоки *hold* и *hold1* — технические блоки, учитывающие занятости каналов. Блоки *chekErrori* — выполняют проверку правильности передачи пакетов. Блоки *sinki* — подсчитывают безошибочно доставленные пакетов. Блоки *sinkFi* учитывают пакеты, доставленные с ошибками.

Результаты имитационных экспериментов

Для вариантов А и Б организации резервированных передач проведен ряд имитационных экспериментов для определения зависимости вероятности своевременной доставки $P(<t_0)$ от общей интенсивности входного потока; при максимально допустимой задержке $t_0 = 2,28 \times 10^{-4}$ с; пропускной способности каналов связи $L = 1$ Мбит/с; средней длине пакетов $N = 1024$ бит. Вероятность своевременной доставки $P(<t_0)$ определяется как отношение количества доставленных за некоторое время пакетов к общему числу переданных за это время пакетов. Пакет считается переданным успешно, если вовремя передана хотя бы одна из его копий. Моделирование проведено для случайного и маркерного методов множественного доступа.

Зависимость вероятности своевременной доставки для безошибочных передач от общей интенсивности входного потока пакетов при реализации индивидуальных очередей к каналам при кратностях резервирования передач $k = 1, 2, 3$ представлена кривыми 1–3, а при реализации общей очереди ко всем каналам — кривыми 4–6 на рис. 4, а при случайном методе множественного доступа. Как видно из графика, резервированная передача пакетов позволяет повысить вероятность своевременной доставки даже при отсутствии битовых ошибок в каналах связи. При резервированной передаче с учетом возможности битовых ошибок вероятность своевременной доставки хотя бы одной копии пакета адресату повышается. Установлено, что резервирование передач позволяет снизить среднее время задержки при достаточности доставки хотя бы одной копии передаваемого пакета адресанту. Так, результаты имитационного моделирования по определению средних задержек T доставки первой копии для указанных выше исходных данных приведены на рис. 4, б. Рисунки показывают наличие области эффективности резервированных передач.

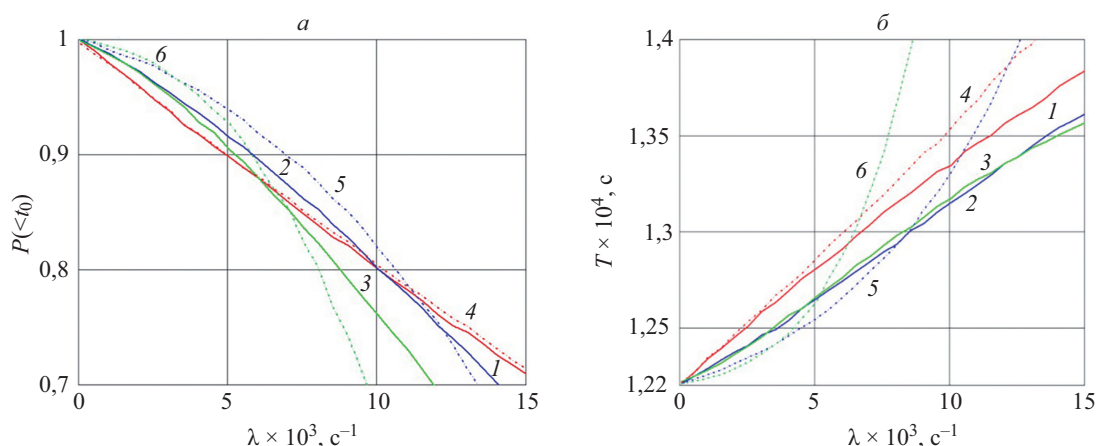


Рис. 4. Вероятность своевременной доставки $P($t_0$)$ (а) и среднее время доставки T (б) хотя бы одной копии пакетов адресату; кривые 1–3 соответствуют индивидуальным очередям к каналам, а кривыми 4–6 — общей очереди ко всем каналам

На рис. 5 приведены зависимости вероятности своевременной доставки от кратности резервированных передач при реализации общей распределенной (рис. 5, а) и индивидуальной очередей к каналам (рис. 5, б). Результаты моделирования при интенсивностях потока запросов $\lambda = 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 \text{ c}^{-1}$ представлены соответственно кривыми 1–6. Результаты получены при указанных выше исходных данных и вероятности битовых ошибок в каналах связи $B = 10^{-5}$.

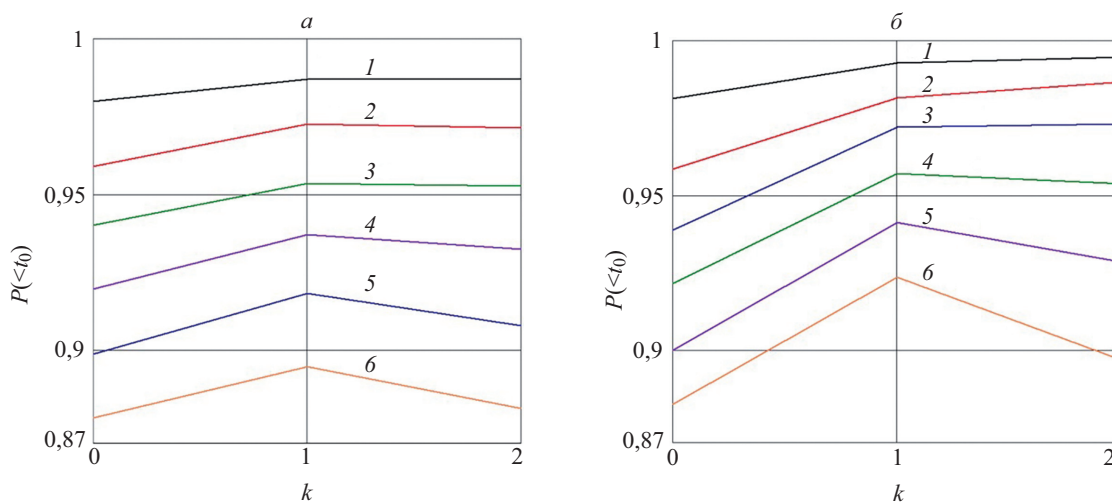


Рис. 5. Зависимость вероятности своевременной доставки от кратности резервирования передач (k) при реализации общей распределенной (а) и индивидуальных очередей к каналам (б); кривые 1–6 соответствуют интенсивностям потока запросов $\lambda = 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 \text{ c}^{-1}$

Из представленных зависимостей видно существование оптимальной кратности резервированных передач. Для приведенных исходных данных оптимальная кратность резервирования $k = 2$.

Результаты моделирования по определению эффективности резервированных передач по комплексному критерию $M = P(t_0 - T)$, где P — вероятность безошибочной доставки пакетов, t_0 — время допустимой задержки при передаче, T — среднее время пребывания пакета в сети от интенсивности входного потока λ представлены на рис. 6. Результаты получены при максимально допустимой задержке в сети $t_0 = 2,28 \times 10^{-4} \text{ c}$; пропускной способности канала связи $L = 1 \text{ Мбит/с}$; средней длины пакетов $N = 1024$; вероятности битовых ошибок в каналах связи $B = 10^{-5}$. Зависимости эффективности резервированных передач при реализации индивидуальных очередей на доступ к каналам при кратностях резервирования передач $k = 1, 2, 3$ представлены кривыми 1–3, а при реализации общей очереди ко всем каналам кратностям резервирования передач $k = 1, 2, 3$ соответствуют кривые 4–6.

Представленные зависимости показывают существование области эффективности резервированных передач критичных к задержкам пакетов при организации общих и индивидуальных очередей на доступ к агрегированным каналам.

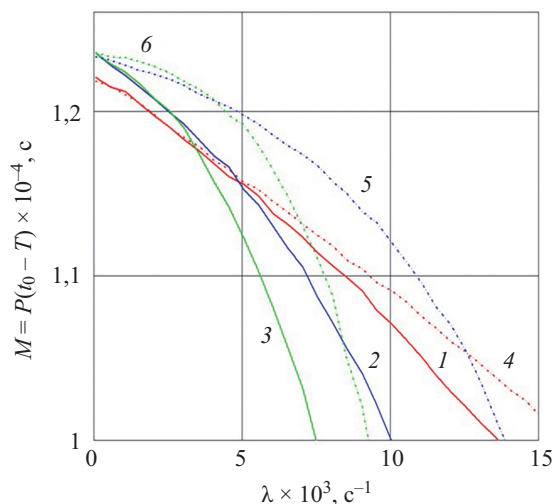


Рис. 6. Зависимость эффективности передачи по комплексному критерию M от интенсивности входного потока пакетов; кривые 1–3 соответствуют индивидуальным очередям к каналам, а кривые 4–6 — общей очереди ко всем каналам

Заключение

В работе выполнено исследование эффективности взаимодействия компьютеров на основе резервированного межмашинного обмена через агрегированные каналы с возможностью формирования в компьютерных узлах распределенных очередей на доступ к каналам, в том числе отдельных очередей на доступ к каждому каналу, или общих очередей на доступ ко всем каналам, с предоставлением полномочий обслуживания очередей на основе множественного доступа к отдельным каналам или группе каналов.

Показано существование области эффективности резервированных передач и оптимальной кратности резервирования копий передаваемых пакетов, критичных к задержкам в сети при организации общих и индивидуальных очередей на доступ к агрегированным каналам. Предложены имитационные модели межмашинного резервированного обмена через агрегированные каналы (в том числе реального времени) при различных вариантах организации очередей на доступ к каналам.

Литература

1. Kopetz H. *Real-time systems: Design principles for distributed embedded applications*. Springer, 2011. 396 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8237-7
2. Sorin D.J. *Fault tolerant computer architecture*. Morgan & Claypool, 2009. 103 p. doi: 10.2200/S00192ED1V01Y200904CAC005
3. Shooman M.L. *Reliability of computer systems and networks: Fault tolerance, analysis, and design*. John Wiley & Sons, 2002. 527 p. doi: 10.1002/047122460X
4. Utkin L.V., Coolen F.P.A. A Robust weighted SVR-based software reliability growth model // *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. V. 176. P. 93–101. doi: 10.1016/j.res.2018.04.007
5. Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
6. Шубинский И.Б. *Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза*. Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2016. 544 с.
7. Zhmylev S., Martynchuk I., Kireev V., Aliev T. Analytical methods of nonstationary processes modeling // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. V. 2344.
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. 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. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
10. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. К оцениванию и сопоставлению очередей классических и фрактальных систем массового обслуживания // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 2. С. 48–55. doi: 10.15217/issn1684-8853.2016.2.48

References

1. Kopetz H. *Real-time systems: Design principles for distributed embedded applications*. Springer, 2011, 396 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8237-7
2. Sorin D.J. *Fault tolerant computer architecture*. Morgan & Claypool, 2009, 103 p. doi: 10.2200/S00192ED1V01Y200904CAC005
3. Shooman M.L. *Reliability of computer systems and networks: Fault tolerance, analysis, and design*. John Wiley & Sons, 2002, 527 p. doi: 10.1002/047122460X
4. Utkin L.V., Coolen F.P.A. A Robust weighted SVR-based software reliability growth model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, vol. 176, pp. 93–101. doi: 10.1016/j.res.2018.04.007
5. Polovko A.M., Gurov S.V. *Fundamental theory of reliability*. St. Petersburg, BHV Publ., 2006, 702 p. (in Russian)
6. Shubinskii I.B. *Reliable fault-tolerant information systems. Synthesis methods*. Ul'yanovsk, Pechatnyj dvor, 2016, 544 p. (in Russian)
7. Zhmylev S., Martynchuk I., Kireev V., Aliev T. Analytical methods of nonstationary processes modeling. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2344.
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. 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. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
10. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. Evaluation and comparison of queues in classical and fractal queuing systems. *Information and Control Systems*, 2016, no. 2, pp. 48–55. (in Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2016.2.48

11. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. К анализу парадигм имитационного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 552–558. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558
12. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 12. С. 30–36.
13. Богатырев В.А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6. С. 21–26.
14. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. 2009. № 6. С. 41–47.
15. Gunnar A., Johansson M. Robust load balancing under traffic uncertainty-tractable models and efficient algorithms // Telecommunication Systems. 2011. V. 48. N 1-2. P. 93–107. doi: 10.1007/s11235-010-9336-9
16. Banner R., Orda A. Multipath routing algorithms for congestion minimization, CCIT Report No. 429. Department of electrical engineering, Technion, Haifa, Israel, 2004. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ee.technion.ac.il/people/ron/Congestion.pdf>, Яз. англ. (дата обращения: 27.09.2019).
17. Kabatiansky G., Krouk E., Semenov S. Error correcting coding and security for data networks. Analysis of the superchannel concept. Wiley, 2005. 288 p. doi: 10.1002/0470867574
18. Krouk E., Semenov S. Application of coding at the network transport level to decrease the message delay // Proc. 3rd International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing. Staffordshire University, UK. 2002. P. 109–112.
19. Kleinrock L. Queueing systems: Volume I. – Theory. New York: Wiley Interscience, 1975. 417 p.
20. Kleinrock L. Queueing systems: Volume II – Computer applications. New York: Wiley Interscience, 1976. 576 p.
21. Dudin A.N., Sun' B. A multiserver MAP/PH/N system with controlled broadcasting by unreliable servers // Automatic Control and Computer Sciences. 2009. N 5. P. 247–256. doi: 10.3103/S0146411609050046
22. Dudin A.N., Sung V. Unreliable multi-server system with controllable broadcasting service // Automation and Remote Control. 2009. V. 70. N 12. P. 2073–2084. doi: 10.1134/S0005117909120145
23. Lee M.H., Dudin A.N., Klimenok V.I. The SM/M/N queueing system with broadcasting service // Mathematical Problems in Engineering. 2006. V. 2006. P. 98171. doi: 10.1155/MPE/2006/98171
24. 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
25. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Модель резервированного обслуживания запросов реального времени в компьютерном кластере // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 5. С. 348–355.
11. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. On the simulation paradigm analysis. *Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 552–558. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-552-558
12. Bogatyrev V.A. An optimum backup execution for the heterogeneous server system. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2007, no. 12, pp. 30–36. (in Russian)
13. 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)
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Association reservation servers in clusters highly reliable computersystem. *Information technologies*, 2009, no. 6. pp. 41–47. (in Russian)
15. Gunnar A., Johansson M. Robust load balancing under traffic uncertainty-tractable models and efficient algorithms. *Telecommunication Systems*, 2011, vol. 48, no. 1-2, pp. 93–107. doi: 10.1007/s11235-010-9336-9
16. Banner R., Orda A. *Multipath routing algorithms for congestion minimization, CCIT Report No. 429. Department of electrical engineering, technion, Haifa, Israel, 2004.* Available at: <http://www.ee.technion.ac.il/people/ron/Congestion.pdf>. (accessed: 27.09.2019).
17. Kabatiansky G., Krouk E., Semenov S. *Error Correcting Coding and Security for Data Networks. Analysis of the Superchannel Concept*. Wiley, 2005, 288 p. doi: 10.1002/0470867574
18. Krouk E., Semenov S. Application of coding at the network transport level to decrease the message delay. *Proc. 3rd Intern. Symp. on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing*. Staffordshire University, UK, 2002, pp. 109–112.
19. Kleinrock L. *Queueing systems: Volume I. – Theory*. New York, Wiley Interscience, 1975, 417 p.
20. Kleinrock L. *Queueing systems: Volume II – Computer applications*. New York, Wiley Interscience, 1976, 576 p.
21. Dudin A.N., Sun' B. A multiserver MAP/PH/N system with controlled broadcasting by unreliable servers. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2009, no. 5, pp. 247–256. doi: 10.3103/S0146411609050046
22. Dudin A.N., Sung V. Unreliable multi-server system with controllable broadcasting service. *Automation and Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 12, pp. 2073–2084. doi: 10.1134/S0005117909120145
23. Lee M.H., Dudin A.N., Klimenok V.I. The SM/M/N queueing system with broadcasting service. *Mathematical Problems in Engineering*, 2006, vol. 2006, pp. 98171. doi: 10.1155/MPE/2006/98171
24. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Redundant service clusters with the destruction of irrelevant queries. *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2017, no. 1(151), pp. 21–28. (in Russian). doi: 10.14489/vkit.2017.01.pp.021-028
25. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. The Model of redundant service requests real-time in a computer cluster. *Information technologies*, 2016, vol. 22, no. 5, pp. 348–355. (in Russian)

Авторы

Богатырев Владимир Анатольевич — доктор технических наук, ординарный 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; Scopus ID: 57206657956, ORCID ID: 0000-0002-0340-484X, Stopgo89@gmail.com

Жданов Дмитрий Дмитриевич — кандидат физико-математических наук, ординарный доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; Scopus ID: 6701328361, ORCID ID: 0000-0001-7346-8155, ddzhdanov@mail.ru

Смолин Артем Александрович — кандидат философских наук, ординарный доцент, директор Центра юзабилити и смешанной реальности, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; Scopus ID: 56732688200, ORCID ID: 0000-0001-7242-6471, smolin@itmo.ru

Authors

Vladimir A. Bogatyrev — D.Sc., 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, Scopus ID: 57206657956, ORCID ID: 0000-0002-0340-484X, Stopgo89@gmail.com

Dmitry D. Zhdanov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6701328361, ORCID ID: 0000-0001-7346-8155, ddzhdanov@mail.ru

Artem A. Smolin — PhD, Associate Professor, Director of Centre of Usability and Mixed Reality, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Scopus ID: 56732688200, ORCID ID: 0000-0001-7242-6471, smolin@itmo.ru