

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617

УДК 004.7

Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов

Владимир Анатольевич Богатырев¹✉, Станислав Владимирович Богатырев²,
Анатолий Владимирович Богатырев³

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

^{2,3} ООО «Центр разработки облачных хранилищ Ядро», Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация

¹ vladimir.bogatyrev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>

² realloc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>

³ gangleon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>

Аннотация

Введение. Исследованы возможности повышения готовности резервированной компьютерной системы к своевременному выполнению запросов, критичных к задержкам обслуживания. Рассмотрен отказоустойчивый компьютерный кластер, в котором узлы представляют собой дублированные вычислительные системы, объединяющие компьютерные узлы и узлы памяти. Предположено двухэтапное восстановление узлов памяти: физическое, а затем информационное, осуществляемое с использованием ресурсов вычислительных узлов. **Метод.** Предложены обоснования выбора дисциплин восстановления и обслуживания потока функциональных запросов на основе марковских моделей. Предложенные модели позволяют учесть влияние разделения вычислительных ресурсов на совместное выполнение требуемых функций и на информационное восстановление памяти, реализуемое после ее физического восстановления. Выбор дисциплин обслуживания компьютерной системы направлен на достижение компромисса между стремлением увеличить коэффициент готовности и вероятностью своевременного выполнения поступающего потока функциональных запросов. Рассмотрено доказательство выбора вариантов распределения (разделения) сохраненных после отказов вычислительных ресурсов на решение функциональных запросов (требуемых функций) и информационное восстановление памяти. **Основные результаты.** На основе предложенных марковских моделей исследована зависимость готовности системы к своевременному выполнению запросов от вариантов распределения сохраненных в системе вычислительных ресурсов на восстановление информации в памяти и выполнение функциональных задач. Исследование проведено в зависимости от допустимого времени ожидания функциональных запросов и интенсивности трафика. Проанализировано влияние готовности системы к своевременному выполнению запросов балансировки трафика функциональных задач между работоспособными вычислительными узлами. Показано существование оптимальной доли распределения трафика между вычислительными узлами. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы при обосновании выбора дисциплин обслуживания функциональных запросов и восстановления после отказов отказоустойчивых кластерных систем, критичных к задержкам выполнения функциональных запросов.

Ключевые слова

кластер, коэффициент готовности, восстановление, информационное восстановление памяти, марковская модель, дисциплина восстановления, критичность к задержкам обслуживания, вероятность своевременного выполнения запросов, дублированная система, отказоустойчивость

Ссылка для цитирования: Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 608–617. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617

Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures

Vladimir A. Bogatyrev¹, Stanislav V. Bogatyrev², Anatoly V. Bogatyrev³

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

^{2,3} Yadro Cloud Storage Development Center, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation

¹ vladimir.bogatyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>

² realloc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>

³ gangleon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>

Abstract

The possibilities of increasing the readiness of a redundant computer system for the timely execution of requests critical to service delays are being investigated. A fault-tolerant computer cluster is considered in which nodes are duplicated computing systems that combine computer nodes and memory nodes. Two-stage recovery of memory nodes is assumed: first physical, and then informational, carried out using the resources of computing nodes. The novelty of the approach lies in the fact that for systems with a limitation of the allowable service time of functional requests, the impact of recovery disciplines on the readiness of the system with various options for dividing computing resources to restore information after memory failures and to perform the required functions is evaluated. At the same time, the reliability of the computer systems under study is assessed not only by the probability of their readiness to perform functional tasks (by the readiness coefficient), but also by the probability of the system readiness to perform tasks in a timely manner. Justification of the choice of disciplines for the restoration and maintenance of the flow of functional requests is carried out on the basis of Markov models. At the same time, models are proposed that allow taking into account the impact of the division of computing resources on the joint performance of the required functions and on the information recovery of memory, implemented after its physical recovery. The choice of computer system maintenance disciplines based on the proposed Markov model is aimed at achieving a compromise between the desire to increase the availability factor and the probability of timely execution of the incoming flow of functional requests. The justification of the choice of options for the distribution (separation) of computing resources stored after failures to solve functional queries (required functions) and information recovery of memory, implemented after its physical recovery, is carried out. Based on the proposed Markov models, the dependence of the system readiness for timely execution of requests on the distribution options of computing resources stored in the system for restoring information in memory and for performing functional tasks is investigated. The study was conducted depending on the allowable waiting time for functional requests and the intensity of their traffic. The influence on the system readiness for timely execution of traffic balancing requests of functional tasks between functional computing nodes is analyzed, taking into account the options for their possible joint use for information recovery of memory nodes after their physical recovery. The existence of an optimal share of traffic distribution between computing nodes is shown, taking into account the options for dividing their resources to service functional requests and to restore information in memory nodes after their physical recovery. The results obtained can be used to justify the choice of disciplines for servicing functional requests and recovery after failures of fault-tolerant cluster systems critical to delays in the execution of functional requests.

Keywords

cluster, availability factor, recovery, information recovery of memory, Markov model, recovery discipline, criticality to service delays, probability of timely execution of requests, duplicated system, fault tolerance

For citation: Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 608–617 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617

Введение

Надежность и эффективность распределенных компьютерных систем (КС) во многом определяется организацией их резервирования, а также дисциплинами обслуживания запросов и восстановления системы после отказов [1–4]. Обеспечение надежности и отказоустойчивости при восстановлении КС необходимо осуществлять с учетом влияния процедур контроля, реконфигурации и восстановления эффективности выполнения требуемых функций, в том числе надежности, задержки и своевременности вычислений [5–8]. Таким образом, проектирование инфокоммуникационных систем связано с многокритериальностью, обуславливающей необходимость поиска компромиссов по разрешению возникающих технических противоречий распределения ограниченных ресурсов на достижение

высокой готовности системы и на качество (задержки) выполнения требуемых задач [9–12]. В настоящее время необходимость решения подобного класса задач проектирования мотивирует исследователей на интенсивное развитие и внедрение концепции модельно ориентированного оптимального проектирования отказоустойчивых распределенных КС обработки и хранения данных [13–15]. Концепция предусматривает построение моделей для обоснования выбора проектных решений и их структурно параметрической оптимизации [13–18]. При разработке отказоустойчивых кластерных КС представляют интерес модели, ориентированные на поиск оптимальных решений по организации процессов обработки, передачи и хранения данных. Такой поиск должен проводиться с учетом влияния на эффективность КС дисциплин обслуживания и восстановления системы при возникновении и накоплении

отказов. Разрабатываемые модели должны отражать особенности совместного функционирования средств обработки и хранения данных, особенностью которых является необходимость не только физического, но и ее информационного восстановления. Известны модели систем хранения [19–22], построенные на основе RAID-массивов (RAID, Redundant Array of Independent Disks, избыточный массив независимых дисков), которые позволяют учесть характерные для них процессы физического и информационного восстановления дисков при различных вариантах структурно-информационной избыточности. [19–22]. Вместе с тем известные модели надежности RAID-массивов не учитывают возможное торможение выполнения функциональных запросов в КС во время реализации процедур информационного восстановления накопителя.

Оценка эффективности процедур восстановления резервированных КС должна проводиться с учетом их влияния на реализацию вычислительных процессов, в том числе на их замедление и возможность сохранения непрерывности выполнения функциональных задач. Для систем с ограничением допустимого времени обслуживания запросов на решение функциональных запросов важно оценить влияние дисциплин восстановления на вероятность выполнения запросов за установленное предельно допустимое время. Такие требования обуславливают потребность оценки надежности исследуемых КС не только по вероятности готовности к выполнению функциональных задач (по коэффициенту готовности), но и по вероятности готовности к своевременному выполнению задач [23, 24]. Для оценки эффективности рассматриваемых резервированных КС, в том числе реального времени, предложено использовать коэффициент готовности к своевременному выполнению запросов (КГСВЗ) K_c .

Определим K_c как вероятность готовности системы в произвольный момент времени к выполнению функциональных задач с не превышением заданного предельно допустимого времени.

Для рассматриваемых КС, предусматривающих обработку и хранение данных, модели надежности должны учитывать двухэтапное восстановление памяти: физическое и информационное [23, 24]. На втором этапе задействованы ресурсы вычислительных узлов и может происходить динамическая миграция данных и виртуальных машин при репликации данных в узлах памяти дублированных систем, объединяемых в кластер [23–25].

Особый интерес представляет разработка моделей, позволяющих учесть влияние разделения вычислительных ресурсов на совместное выполнение требуемых функций и информационное восстановление памяти, реализуемое после физического. Заметим, что известные модели, отражающие двухэтапность восстановления памяти, такую возможность распределения вычислительных ресурсов не учитывают.

Разделение ресурсов работоспособных вычислительных узлов на поддержку двух указанных задач связано с техническим противоречием. Действительно, преимущественное выделение вычислительных ресурсов на выполнение функциональных задач замед-

ляет процесс информационного восстановления и как следствие приводит к снижению готовности системы. Приоритетность же информационного восстановления может привести к росту задержек решения функциональных задач, что нежелательно, особенно для систем реального времени. Рассматриваемые модели функциональной надежности должны быть направлены на достижение компромисса между стремлением увеличить коэффициент готовности и вероятность своевременного выполнения поступающего потока функциональных запросов. Достижение указанного компромисса особенно важно при поступлении потоков функциональных запросов реального времени, критичных к допустимым задержкам обслуживания запросов.

Цель работы — повышение готовности резервированной КС к своевременному выполнению запросов, критичных к задержкам обслуживания, при обосновании распределения (разделения) сохраненных после отказов вычислительных ресурсов на решение функциональных запросов (требуемых функций) и информационное восстановление памяти, проводимое после ее физического восстановления.

Кластер дублированных компьютерных систем

Рассмотрим отказоустойчивый вычислительный кластер, в котором узлы представляют собой дублированные КС. Комплектация кластера (рис. 1) на основе дублированных систем, объединяющих пару вычислительных узлов (В) и пару узлов памяти (М), направлена на повышение надежности кластерных узлов и кластерной системы в целом. Использование в узлах кластера двухвходовой памяти может повысить их отказоустойчивость, так как обеспечит возможность работы любого вычислителя с любым узлом памяти. Такое решение при репликации данных в двух узлах памяти дублированной КС позволит сохранить непрерывность вычислительного процесса при сохранении после отказов минимум одного вычислителя и одного узла памяти.

В рассматриваемых дублированных кластерных узлах (дублированных КС) при отказе узла памяти выполним его двухэтапное восстановление. На первом этапе осуществим физическое восстановление узла памяти,

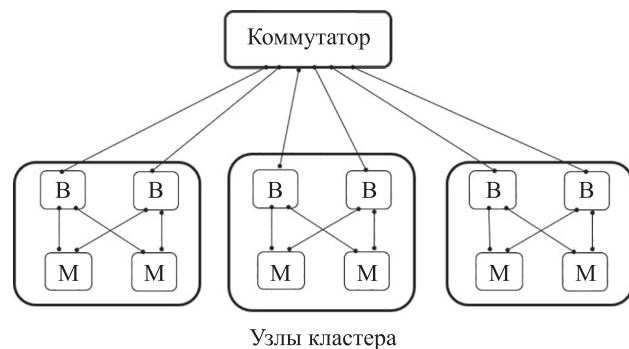


Рис. 1. Структура кластера, комплектуемого из дублированных узлов

Fig. 1. The structure of a cluster made up of duplicated nodes

а на втором — восстановление информации в физически восстановленной памяти. Для информационного восстановления используем часть ресурсов одного из вычислительных узлов. Восстановление информации, требуемой для выполнения функциональных запросов, проведем из сохранившего работоспособность узла памяти дублированной КС. Если репликация данных выполнена только в двух узлах памяти дублированного узла, то возможности восстановления памяти (и дублированной системы в целом) ограничены недопустимостью отказов двух узлов памяти дублированной системы.

При построении модели будем считать, что информация, необходимая для восстановления функционирования памяти после ее физического восстановления, в системе имеется. Такое предположение допустимо, если для решения функциональных задач не требуются результаты предыдущих вычислений, накопленных в узлах памяти, или если для этого достаточны данные, сохраненные во внутренней памяти вычислительных узлов. Снизить отрицательное влияние потери данных после отказов двух узлов позволяет периодическое проведение резервного копирования на внешний носитель. Используя результаты резервного копирования, возможно восстановить потерянные данные в два этапа: в узлы памяти заносятся данные, сохраненные при резервном копировании, и проводится восстановление данных, накопленных в период от резервного копирования до отказа двух узлов памяти. Для восстановления данных могут быть использованы данные с внутренней памяти вычислительных узлов и данные, сохраненные при их передачах через сеть. Таким образом, при отказе двух узлов памяти и потери накопленных в них данных восстановление актуальных данных возможно, но оно сопряжено с определенными временными затратами.

Марковская модель с учетом совмещения информационного восстановления памяти и решения функциональных задач

Отличие предлагаемой модели дублированных КС заключается в том, что в ней учитывается возможность совместного использования вычислительных узлов для обслуживания поступающих в систему запросов и информационного восстановления памяти, реализуемого после ее физического восстановления.

При построении марковской модели надежности рассмотрим дисциплину обслуживания, при которой приоритет восстановления предоставлен памяти для снижения риска (вероятности) перехода в состояния потери всех (двух) реплик данных, хранимых в разных узлах памяти. Потеря функциональности дублированной КС в результате утраты накопленных данных происходит, когда каждый узел памяти отказал, либо физически восстановлен, но информация, требуемая для решения поставленных задач, не загружена.

Диаграмма состояний и переходов предлагаемой марковской модели дублированной КС представлена на рис. 2. При кодировании состояний системы верхняя строка отображает работоспособность узлов вычислителей, а нижняя — узлов памяти. Состояние работоспо-

собности обозначено «1», отказа «0». Для узлов памяти дополнительно введено состояние «F» — узел физически восстановлен, но данные, требуемые для обслуживания запросов, не загружены (физически восстановленная память информационно не восстановлена). На схеме модели обозначены интенсивности отказов вычислительного узла и памяти λ_1, λ_2 , а интенсивности их физического восстановления — μ_1, μ_{21} . Интенсивность информационного восстановления памяти обозначена μ_{22} , а снижение интенсивности по результатам резервного копирования — $b\mu_{22}$. Вероятности состояний 1, 2, ..., 13 дублированной системы обозначены — $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{13}$.

К работоспособным состояниям системы, при которых она способна обслуживать поток поступающих запросов, относятся состояния «0», «1», «2», «3», «6», «9». Причем для состояний «0», «1», «3» возможно разделение поступающего в систему потока запросов (нагрузки) между двумя вычислительными узлами. При этом для состояния «1» может быть разделение вычислительных ресурсов двух узлов на выполнение запросов и на информационное восстановление физически восстановленной памяти.

Выделим следующие варианты распределения вычислительных ресурсов для состояния «1»:

A1: ресурсы одного вычислителя выделены на восстановление информации, а второго — на выполнение функциональных задач;

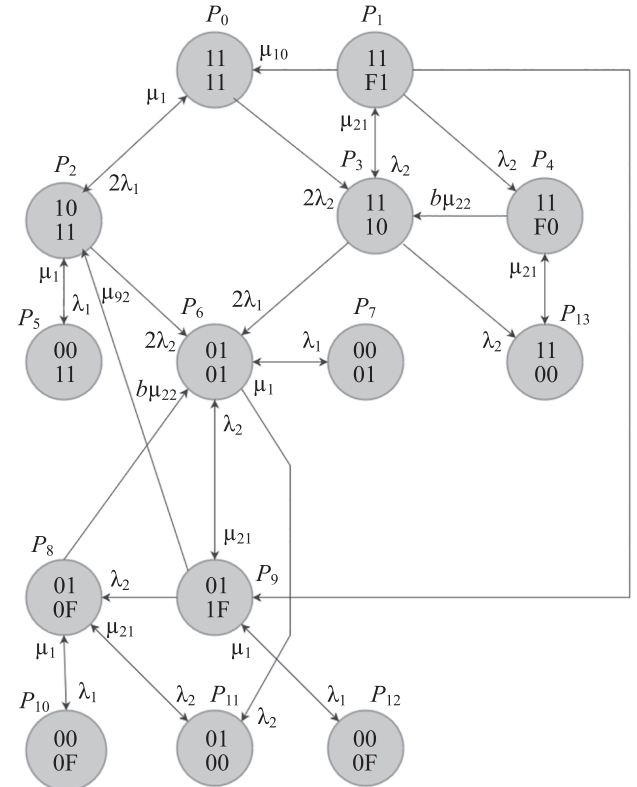


Рис. 2. Марковская модель дублированной компьютерной системы с двухэтапным восстановлением узлов памяти
 Fig. 2. Markov model of a duplicated computing system with two-stage recovery of memory nodes

A2: доля β_1 ресурсов одного вычислителя направлена на восстановление информации, а доля $(1-\beta_1)$ — на выполнение функциональных задач. Ресурсы второго вычислителя полностью выделяются на выполнение функциональных задач.

Для состояния «9» возможны два варианта распределения ресурсов единственного работоспособного вычислительного узла:

V1: ресурсы вычислителя полностью задействованы в информационном восстановлении физически восстановленного узла памяти;

V2: на информационное восстановление выделена доля β_2 ресурсов работоспособного вычислителя.

При $\beta_2 = 1$ вариант V2 сводится к варианту V1. Выделим следующие комбинации вариантов организации восстановления рассматриваемой системы: (A1, V1), (A1, V2), (A2, V1), (A2, V2).

Выделение всех ресурсов вычислительных узлов на выполнение функциональных задач не рассмотрено, так как это может увеличить риски потери информации в двух узлах памяти.

Составим по известным правилам [26] из диаграммы состояний и переходов систему алгебраических (или дифференциальных для нестационарного режима) уравнений [26]. Решим систему уравнений (в любой системе компьютерной математики) и найдем вероятности всех состояний $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{13}$.

Коэффициент готовности дублированной КС считаем как сумму всех работоспособных состояний, т. е. состояний, при которых возможно выполнение функциональных задач [26].

$$K = \sum_{i \in W} P_i,$$

где W — множество работоспособных состояний дублированной системы (для комбинаций восстановления системы, включающей варианты V1 $W = \{0, 1, 2, 3, 6\}$, V2 — $W = \{0, 2, 3, 6, 9\}$).

Коэффициент K_c определим по вероятности готовности системы к осуществлению функциональных задач при условии, что они будут выполнены с не превышением заданного предельно допустимого времени

$$K_c = \sum_{j=1}^z \sum_{i \in W_j} R_j P_i = \sum_{j=1}^z \left(R_j \sum_{i \in W_j} P_i \right),$$

где z — число выделяемых градаций состояний системы по ресурсам, задействованным при выполнении функциональных запросов; W_j — множество работоспособных состояний системы, относящихся к j -й градации, характеризуемой вероятностью своевременного выполнения запросов R_j ; P_i — вероятность i -го состояния системы, относящегося к множеству работоспособных состояний W_j .

Для рассматриваемой дублированной КС выделим множества состояний $W_2 = \{0, 3\}$ и $W_1 = \{2, 6\}$, для которых поток запросов может быть распределен на выполнение в два или только в один вычислительный узел. Для состояний «1» и «9» при оценке вероятности своевременного выполнения запросов учтем доли ре-

сурсов, выделенные на информационное восстановление и на выполнение функциональных запросов.

Определим КГСВЗ для рассматриваемых дублированных КС:

$$K_c = R_2 \sum_{i \in W_2} P_i + R_1 \sum_{i \in W_1} P_i + R_{2\beta} P_1 + R_{1\beta} P_9,$$

где R_2 — вероятность выполнения функциональных запросов за время меньше предельно допустимого, если поток запросов распределяется на два вычислительных узла; R_1 — поток обслуживается одним вычислительным узлом; $R_{2\beta}, R_{1\beta}$ — вероятности выполнения функциональных запросов за допустимое время для состояний «1» и «9» с учетом долей вычислительных ресурсов, выделяемых на информационное восстановление памяти.

Вероятности R_1 и R_2 выполнения функциональных запросов за время меньше t_0 при интенсивности входного потока функциональных запросов Λ имеют вид

$$R_1 = 1 - \Lambda v \exp(t_0(\Lambda - v^{-1})),$$

$$R_2 = 1 - 0,5\Lambda v \exp(t_0(0,5\Lambda - v^{-1})),$$

где v — среднее время выполнения функционального запроса.

Для варианта восстановления V2 для состояния «9» интенсивность перехода в состояние «2» $\mu_{92} = \beta_2 \mu_{22}$. Вычислим вероятность своевременного обслуживания запросов в состоянии «9»:

$$R_{1\beta} = 1 - \Lambda \frac{v}{1 - \beta_2} \exp\left(t_0 \left(\Lambda - \frac{1 - \beta_2}{v} \right)\right).$$

Для комбинаций дисциплин, включающих вариант обслуживания V1, вероятность $R_{1\beta} = 0$.

Для варианта восстановления A1 ресурсы одного вычислителя выделим на решение функциональных задач, а второго — на восстановление информации в памяти. В этом случае $R_{2\beta} = R_1$, а $\mu_{10} = \mu_{22}$.

Для варианта восстановления A2 ресурсы одного вычислителя распределяются только на восстановление информации, а ресурсы второго в долях β_1 и $(1 - \beta_1)$ на восстановление информации и решение функциональных задач. В этом случае $\mu_{10} = \beta_1 \mu_{22}$.

Наличие двух вычислительных узлов с разными долями, предоставляемых для решения функциональных ресурсов, вызывает потребность рационального (оптимального) распределения потока запросов между этими узлами.

При доле α потока запросов, распределяемой в выделенный только для выполнения запросов узел, вероятность своевременного выполнения запросов в нем имеет вид

$$R_{21\beta} = 1 - \alpha \Lambda v \exp\left(t_0 \left(\Lambda - \frac{1}{v} \right)\right).$$

Получим вероятность своевременного обслуживания запросов для используемого узла, информационного восстановления памяти и выполнения функциональных запросов:

$$R_{22\beta} = 1 - (1 - \alpha)\Lambda \frac{v}{1 - \beta_1} \exp\left(t_0 \left(\Lambda(1 - \alpha) - \frac{1 - \beta_1}{v}\right)\right).$$

Рассчитаем математическое ожидание вероятности выполнения функциональных запросов с учетом использования для этого вычислительных ресурсов двух узлов:

$$R_{2\beta} = \alpha R_{21\beta} + (1 - \alpha)R_{22\beta}.$$

Оценка коэффициента готовности к своевременному выполнению запросов

На основе предложенной марковской модели оценим влияния вариантов дисциплин восстановления на эффективность функционирования дублированной КС с возможным совмещением информационного восстановления памяти и решения требуемых функциональных задач.

Выполним расчеты для следующих параметров $\lambda_1 = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_1 = \mu_{21} = 1 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_{22} = 0,1 \text{ ч}^{-1}$, $b = 1$.

Рассмотрим простейшее сочетание дисциплин (A1, B1), при котором для состояний «1» и «9» разделение ресурсов вычислителей на выполнение функциональных запросов и на информационное восстановление памяти не реализуется.

Для комбинации дисциплин восстановления (A1, B1) зависимость КГСВЗ K_c от интенсивности Λ потока запросов на выполнение функциональных задач представлена на рис. 3. Из графиков видно существенность влияния t_0 на K_c .

Иследуем влияние разделения ресурсов вычислителя на выполнение запросов и на информационное восстановление памяти при рассмотрении дисциплины (A2, B1). Для этой дисциплины в состоянии «1» один вычислитель полностью задействован в выполнении функциональных запросов, а ресурсы второго разделены в долях β_1 и $(1 - \beta_1)$ на информационное восста-

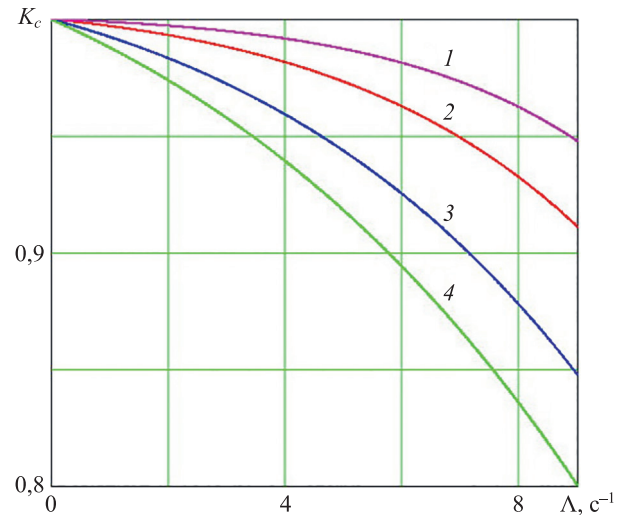


Рис. 3. Зависимости K_c от интенсивности Λ потока запросов на выполнение функциональных задач для дисциплины восстановления (A1, B1) при t_0 равным: 0,15 с (кривая 1); 0,2 с (кривая 2); 0,3 с (кривая 3); 0,4 с (кривая 4)

Fig. 3. Dependences of K_c vs. the intensity Λ of the flow of requests for the execution of functional tasks for the restoration discipline (A1, B1) at t_0 equal to: 0.15 s (curve 1); 0.2 s (curve 2); 0.3 s (curve 3); 0.4 s (curve 4)

новление памяти и на выполнение функциональных запросов.

В зависимости от назначенных долей β_1 и $(1 - \beta_1)$ для дисциплины (A2, B1) представляет интерес анализ влияния на коэффициент K_c долей потока функциональных запросов α и $(1 - \alpha)$, направляемых на выполнение в первый и второй вычислительные узлы.

Зависимость K_c от интенсивности потока запросов Λ на выполнение функциональных задач при $t_0 = 0,32 \text{ с}$, $v = 0,1 \text{ с}$ представлена на рис. 4. На рис. 4, а кривые 1–6 соответствуют долям потока запросов $\alpha = 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 1$. Расчет выполнен при $\beta_1 = 0,9$. На рис. 4, б кривая 1 показывает зависимость K_c от интенсивности

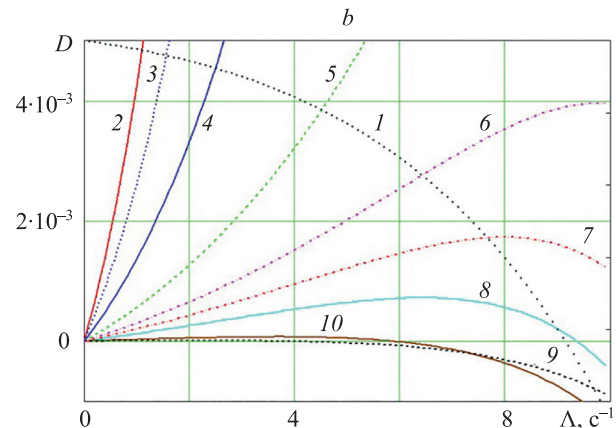
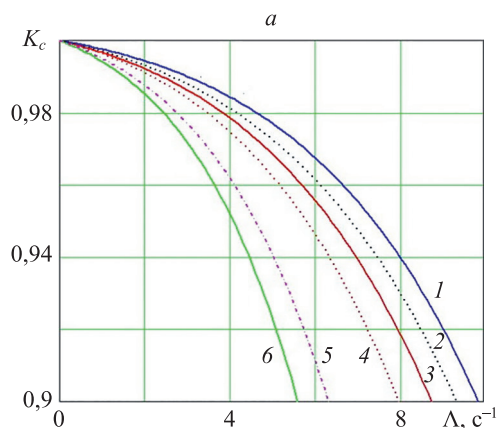


Рис. 4. Зависимости K_c и D от Λ для дисциплины (A2, B1) при $\beta_1 = 0,9$: кривые 1–6 соответствуют $\alpha = 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 1$ (а); кривая 1 соответствует K_c при $\alpha = 1$, кривые 2–10 разностям D коэффициентов K_c дисциплин A2 и B1 при $\alpha = 0,01, 0,2, 0,4, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8, 0,9$ и $0,95$ (б)

Fig. 4. Dependences of K_c and D vs. Λ for discipline (A2, B1) at $\beta_1 = 0,9$: a — curves 1–6 correspond to $\alpha = 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 1$ (a); curve 1 corresponds to K_c at $\alpha = 1$, curves 2–10 to the differences in D coefficients of K_c disciplines A2 and B1 at $\alpha = 0,01, 0,2, 0,4, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8, 0,9$ and $0,95$ (b)

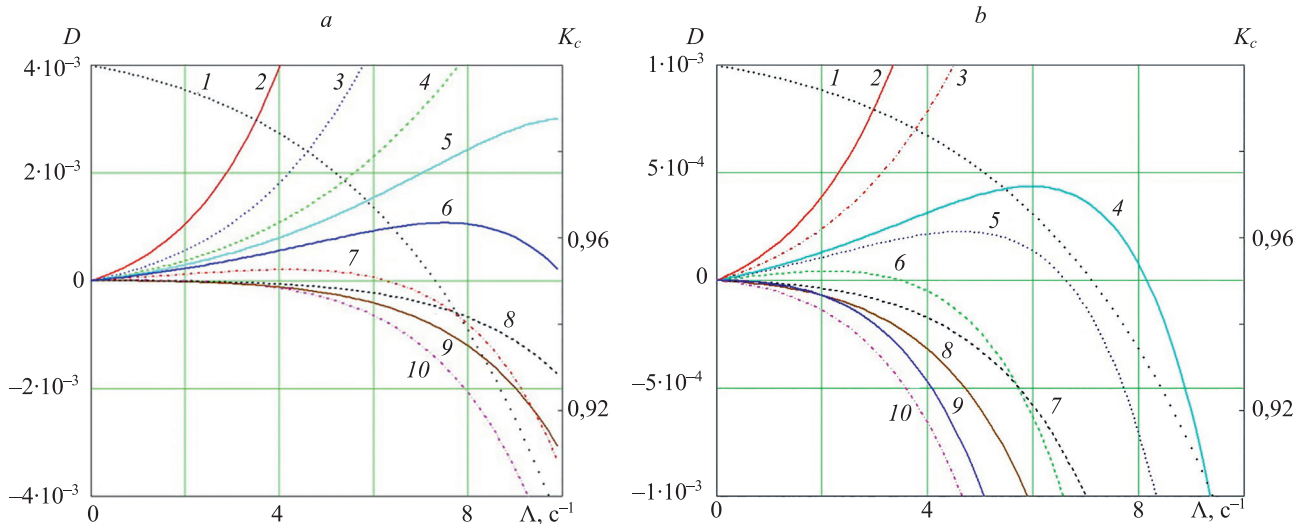


Рис. 5. Зависимости D от Λ для дисциплины (A2, B1) при $\beta_1 = 0,5$ (a) и $\beta_1 = 0,2$ (b): для $\beta_1 = 0,5$ кривыми 2–10 показаны разницы D при $\alpha = 0,01, 0,2, 0,3, 0,35, 0,4, 0,5, 0,7, 0,9$ и $0,95$ (a); для $\beta_1 = 0,2$ кривыми 2–10 — разницы D при $\alpha = 0,01, 0,1, 0,18, 0,2, 0,26, 0,4, 0,7, 0,9$ и $0,95$ (b)

Fig. 5. Dependences of D vs. Λ for discipline (A2, B1) at $\beta_1 = 0.5$ (a) and $\beta_1 = 0.2$ (b): for $\beta_1 = 0.5$, curves 2–10 show differences in D at $\alpha = 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9$ and 0.95 (a); for $\beta_1 = 0.2$ curves 2–10 — D differences at $\alpha = 0.01, 0.1, 0.18, 0.2, 0.26, 0.4, 0.7, 0.9$ and 0.95 (b)

Λ при $\alpha = 1$ (когда весь трафик распределяется в вычислитель, полностью выделенный на выполнения запросов). Кривыми 2–10 представлены расчеты разницы D коэффициентов K_c при распределении на вычислитель, не задействованный в информационном восстановлении памяти, соответственно, на поступающий трафик в долях $\alpha = 0,01, 0,2, 0,4, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8, 0,9$ и $0,95$.

Зависимости K_c от интенсивности потока запросов Λ на выполнение функциональных задач при $\beta_1 = 0,5$ и $\beta_1 = 0,2$ показаны на рис. 5, a, b, где кривые 1 представляют зависимости K_c от интенсивности Λ при $\alpha = 1$ для случаев $\beta_1 = 0,5$ и $\beta_1 = 0,2$ соответственно. На рис. 5, a для $\beta_1 = 0,5$ кривыми 2–10 показаны разницы D ,

при $\alpha = 0,01, 0,2, 0,3, 0,35, 0,4, 0,5, 0,7, 0,9$ и $0,95$. На рис. 5, b для $\beta_1 = 0,2$ кривыми 2–10 — разницы D , при $\alpha = 0,01, 0,1, 0,18, 0,2, 0,26, 0,4, 0,7, 0,9$ и $0,95$.

Анализ полученных графиков зависимостей показал реальное влияние распределения трафика между работоспособными узлами на КГСВЗ при совмещении использования вычислительных узлов на обслуживание функциональных запросов и восстановление памяти. Результаты расчетов позволили предположить существование оптимального распределения трафика на вычислительные узлы в зависимости от степени совмещения их использования при информационном

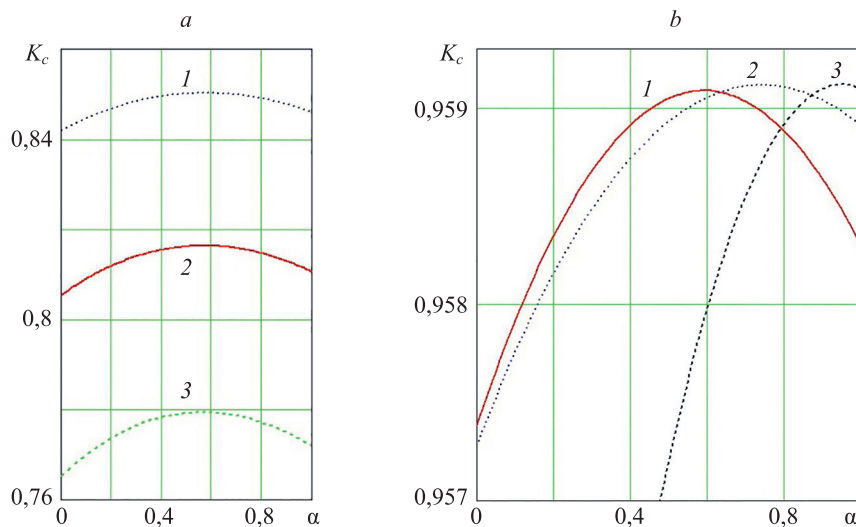


Рис. 6. Зависимости K_c от долей распределения трафика между вычислительными узлами: при $\beta_1 = 0,2$ кривые 1–3 соответствуют $\Lambda = 6, 7, 8 s^{-1}$ (a); при $\Lambda = 2 s^{-1}$ кривые 1–3 соответствуют $\beta_1 = 0,2, 0,5, 0,9$ (b)

Fig. 6. Dependences of K_c vs. the shares of traffic distribution between computing nodes: at $\beta_1 = 0.2$, curves 1–3 correspond to $\Lambda = 6, 7, 8 s^{-1}$ (a); at $\Lambda = 2 s^{-1}$ curves 1–3 correspond to $\beta_1 = 0.2, 0.5, 0.9$ (b)

восстановлении памяти и решении функциональных задач.

Зависимости K_c от α при $t_0 = 0,1$ с представлена на рис. 6. При $\beta_1 = 0,2$ кривыми 1–3 на рис. 6, а представлены расчеты при $\Lambda = 6, 7, 8$ с⁻¹. На рис. 6, б при $\Lambda = 2$ с⁻¹ кривые 1–3 соответствуют $\beta_1 = 0,2, 0,5, 0,9$. Представленные графики подтверждают существование оптимальной доли распределения трафика функциональных задач между вычислительными узлами, один из которых выполняет только запросы, а второй — в том числе, реализует занесение данных в физически восстановленный узел памяти.

Заключение

Для отказоустойчивых компьютерных кластеров с построением узлов на основе дублированных вычислительных систем проанализированы возможности повышения готовности узлов кластера к своевременному выполнению запросов, критичных к задержкам обслуживания.

Литература

1. Shubinsky I.B., Rozenberg I.N., Papic L. Adaptive fault tolerance in real-time information systems // *Reliability: Theory & Applications*. 2017. V. 12. N 1(44). P. 18–25.
2. Krasnobaev V., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova K. Fault tolerance computer system structures functioning in residue classes // *Proc. of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. V. 11. 2021. P. 471–474. <https://doi.org/10.1109/idaacs53288.2021.9660919>
3. Tatarnikova T.M., Sikarev I.A., Bogdanov P.Y., Timochkina T.V. Botnet attack detection approach in IoT networks // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022. V. 56. N 8. P. 838–846. <https://doi.org/10.3103/S0146411622080259>
4. Bukhsh M., Abdullah S., Rahman A., Asghar M.N., Arshad H., Alabdulatif A. An energy-aware, highly available, and fault-tolerant method for reliable IoT systems // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 145363–14538. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121033>
5. Wu B.-H., Alexander R.N., Liu S., Zhang Z. Quantum computing with multidimensional continuous-variable cluster states in a scalable photonic platform // *Physical Review Research*. 2020. V. 2. N 2. P. 023138. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023138>
6. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2000. V. 34. N 6. P. 51–57.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1864. N 1. P. 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012094>
8. Dinh T.D., Vishnevsky V., Pham V.D., Le D.T., Kirichek R., Koucheryavy A. Determination of subscribers coordinates using flying network for emergencies // *Proc. of the 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT)*. 2022. P. 1309–1318. <https://doi.org/10.23919/icact53585.2022.9728777>
9. Alsweity M., Muthanna A., Elgendy I.A., Koucheryavy A. Traffic management algorithm for V2X-based flying fog system // *Lecture Notes in Computer Science*. 2021. V. 13144. P. 32–41. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92507-9_4
10. Stepanov N., Turlikov A., Begishev V., Koucheryavy Y., Moltchanov D.A. Accuracy assessment of user micromobility models for thz cellular systems // *mmNets 2021: Proc. of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems, Part of ACM MobiCom 2021*. V. 5. 2021. P. 37–42. <https://doi.org/10.1145/3477081.3481676>

Предложены марковские модели дублированных узлов кластера, на основе которых исследованы зависимости готовности системы к своевременному выполнению запросов от вариантов распределения ресурсов, сохранивших работоспособность вычислительных узлов на восстановление информации в памяти и на выполнение функциональных задач. Исследование проведено в зависимости от допустимого времени ожидания функциональных запросов и интенсивности их трафика. Проанализировано влияние на готовность системы к своевременному выполнению запросов балансировки трафика функциональных задач между работоспособными вычислительными узлами при их возможном использовании для информационного восстановления узлов памяти.

Показано существование оптимальной доли распределения трафика функциональных запросов между вычислительными узлами, в зависимости от вариантов разделения их ресурсов на обслуживание функциональных запросов и на восстановление информации в узлах памяти после их физического восстановления.

References

1. Shubinsky I.B., Rozenberg I.N., Papic L. Adaptive fault tolerance in real-time information systems. *Reliability: Theory & Applications*, 2017, vol. 12, no. 1(44), pp. 18–25.
2. Krasnobaev V., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova K. Fault tolerance computer system structures functioning in residue classes. *Proc. of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. V. 11, 2021, pp. 471–474. <https://doi.org/10.1109/idaacs53288.2021.9660919>
3. Tatarnikova T.M., Sikarev I.A., Bogdanov P.Y., Timochkina T.V. Botnet attack detection approach in IoT networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2022, vol. 56, no. 8, pp. 838–846. <https://doi.org/10.3103/S0146411622080259>
4. Bukhsh M., Abdullah S., Rahman A., Asghar M.N., Arshad H., Alabdulatif A. An energy-aware, highly available, and fault-tolerant method for reliable IoT systems. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 145363–14538. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121033>
5. Wu B.-H., Alexander R.N., Liu S., Zhang Z. Quantum computing with multidimensional continuous-variable cluster states in a scalable photonic platform. *Physical Review Research*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 023138. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023138>
6. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2000, vol. 34, no. 6, pp. 51–57.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012094>
8. Dinh T.D., Vishnevsky V., Pham V.D., Le D.T., Kirichek R., Koucheryavy A. Determination of subscribers coordinates using flying network for emergencies. *Proc. of the 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT)*, 2022, pp. 1309–1318. <https://doi.org/10.23919/icact53585.2022.9728777>
9. Alsweity M., Muthanna A., Elgendy I.A., Koucheryavy A. Traffic management algorithm for V2X-based flying fog system. *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 13144, pp. 32–41. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92507-9_4
10. Stepanov N., Turlikov A., Begishev V., Koucheryavy Y., Moltchanov D.A. Accuracy assessment of user micromobility models for thz cellular systems. *mmNets 2021: Proc. of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems, Part of ACM MobiCom 2021*. V. 5, 2021, pp. 37–42. <https://doi.org/10.1145/3477081.3481676>

11. Tatarnikova A.A., Turlikov A.M., Pupylin D.A. The spectral analysis of data obtained from accelerometers for musculoskeletal diseases diagnosis // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018. P. 8604404. <https://doi.org/10.1109/weconf.2018.8604404>
12. Markoval E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Ivanova D., Koucheryavy Y., Samouylov K. Priority-based coexistence of eMBB and URLLC traffic in industrial 5G NR deployments // *Proc. of the 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icumt51630.2020.9222433>
13. Gurjanov A.V., Korobeynikov A.G., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Edge, fog and cloud computing in the cyber-physical systems networks // *Proc. of the III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021)*. 2021. P. 103–108. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip3/2021-2899-103-108>
14. Korobeynikov A.G., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Cyber-physical and human control of technological process and equipment sensitive to failures // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 839. P. 42081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042081>
15. Astakhova T., Verzun N., Kolbanov M., Shamin A. A model for estimating energy consumption seen when nodes of ubiquitous sensor networks communicate information to each other // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. V. 2344.
16. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Load management in computer networks as a tool to ensure the quality of service delivery // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2021. P. 9470535. <https://doi.org/10.1109/weconf51603.2021.9470535>
17. Biryaltsev E.V., Galimov M.R., Demidov D.E., Elizarov A.M. The platform approach to research and development using high-performance computing // *Program Systems: Theory and Applications*. 2019. V. 10. N 2(41). P. 93–119. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2019-10-2-93-119>
18. Kazimirov A.N. Model-oriented design of a wireless sensor network // *Proc. of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. 2020. P. 391–398. <https://doi.org/10.1109/glosic50886.2020.9267874>
19. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy // *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 20–25.
20. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with the Dual disk redundancy and data striping // *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 40–49.
21. Uspenskaya N.N. Estimation of availability factor for the data storage systems based on redundant disk arrays with the backup // *High-Performance and Fault-Tolerant Computing technologies and systems: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. 2016. P. 20–23.
22. Sharipov M.I. Simplified reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy on basis of the Markov birth-death chain // *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 15–19.
23. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices // *Proc. of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
24. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability of computer systems during physical and informational recovery of duplicated memory // *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. V. 3057. P. 274–279.
25. Bogatyrev V.A., Derkach A.N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing // *Computers*. 2020. V. 9. N 2. P. 42. <https://doi.org/10.3390/computers9020042>
26. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
11. Tatarnikova A.A., Turlikov A.M., Pupylin D.A. The spectral analysis of data obtained from accelerometers for musculoskeletal diseases diagnosis. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 8604404. <https://doi.org/10.1109/weconf.2018.8604404>
12. Markoval E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Ivanova D., Koucheryavy Y., Samouylov K. Priority-based coexistence of eMBB and URLLC traffic in industrial 5G NR deployments. *Proc. of the 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icumt51630.2020.9222433>
13. Gurjanov A.V., Korobeynikov A.G., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Edge, fog and cloud computing in the cyber-physical systems networks. *Proc. of the III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021)*, 2021, pp. 103–108. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip3/2021-2899-103-108>
14. Korobeynikov A.G., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Cyber-physical and human control of technological process and equipment sensitive to failures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 839, pp. 42081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042081>
15. Astakhova T., Verzun N., Kolbanov M., Shamin A. A model for estimating energy consumption seen when nodes of ubiquitous sensor networks communicate information to each other. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2344.
16. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Load management in computer networks as a tool to ensure the quality of service delivery. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2021, pp. 9470535. <https://doi.org/10.1109/weconf51603.2021.9470535>
17. Biryaltsev E.V., Galimov M.R., Demidov D.E., Elizarov A.M. The platform approach to research and development using high-performance computing. *Program Systems: Theory and Applications*, 2019, vol. 10, no. 2(41), pp. 93–119. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2019-10-2-93-119>
18. Kazimirov A.N. Model-oriented design of a wireless sensor network. *Proc. of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 2020, pp. 391–398. <https://doi.org/10.1109/glosic50886.2020.9267874>
19. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy. *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, pp. 20–25.
20. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with the Dual disk redundancy and data striping. *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, pp. 40–49.
21. Uspenskaya N.N. Estimation of availability factor for the data storage systems based on redundant disk arrays with the backup. *High-Performance and Fault-Tolerant Computing technologies and systems: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*, 2016, pp. 20–23.
22. Sharipov M.I. Simplified reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy on basis of the Markov birth-death chain. *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, pp. 15–19.
23. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices. *Proc. of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
24. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability of computer systems during physical and informational recovery of duplicated memory. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, vol. 3057, pp. 274–279.
25. Bogatyrev V.A., Derkach A.N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing. *Computers*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 42. <https://doi.org/10.3390/computers9020042>
26. Polovko A.M., Gurov S.V. *Fundamental Theory of Reliability*. St.Petersburg, BHV Publ., 2006, 702 p. (in Russian)

Авторы

Богатырев Владимир Анатольевич — доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, [sc 7006571069](https://orcid.org/0000-0003-0213-0223), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Богатырев Станислав Владимирович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер-консультант, ООО «Центр разработки облачных хранилищ Ядро», Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация, [sc 57183002200](https://orcid.org/0000-0003-0836-8515), <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>, realloc@gmail.com

Богатырев Анатолий Владимирович — кандидат технических наук, инженер-консультант, ООО «Центр разработки облачных хранилищ Ядро», Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация, [sc 56549712700](https://orcid.org/0000-0001-5447-7275), <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>, gangleon@gmail.com

Authors

Vladimir A. Bogatyrev — D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, 197101, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 190000, Russian Federation, [sc 7006571069](https://orcid.org/0000-0003-0213-0223), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Stanislav V. Bogatyrev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Consulting Engineer, Yadro Cloud Storage Development Center, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation, [sc 57183002200](https://orcid.org/0000-0003-0836-8515), <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>, realloc@gmail.com

Anatoly V. Bogatyrev — PhD, Consulting Engineer, Yadro Cloud Storage Development Center, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation, [sc 56549712700](https://orcid.org/0000-0001-5447-7275), <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>, gangleon@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 03.03.2023
Одобрена после рецензирования 11.03.2023
Принята к печати 23.05.2023*

*Received 03.03.2023
Approved after reviewing 11.03.2023
Accepted 23.05.2023*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»