

УДК 004.052

Оптимизация параллельной обработки информации в отказоустойчивой вычислительной системе мобильного объекта с временной избыточностью вычислительного процесса

Захаров Иван Вячеславович — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры математического и программного обеспечения. E-mail: x.vano-z80@yandex.ru

Мусаллам Али — адъюнкт кафедры математического и программного обеспечения. E-mail: alloushi1987@gmail.com

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, Санкт-Петербург

Для цитирования: Захаров И. В., Мусаллам А. Оптимизация параллельной обработки информации в отказоустойчивой вычислительной системе мобильного объекта с временной избыточностью вычислительного процесса // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2024. № 2 (38). С. 30–36. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-238-30-36

Аннотация. Задачи эффективного применения многопроцессорных вычислительных систем (ВС) мобильных объектов требуют рациональной организации вычислительных процессов на борту. В статье рассмотрен параллельный вычислительный процесс с временной избыточностью, предусматривающий периодическое сохранение текущего состояния вычислений с возможностью их восстановления в целях обеспечения отказоустойчивости. Кратко проанализировано ранее известное решение частной оптимизационной задачи выбора периодичности сохранения текущего состояния вычислительного процесса в условиях возможных отказов. Предложен новый усовершенствованный способ решения указанной задачи. Представлены сравнительные результаты ее решения различными способами и сделаны выводы о целесообразности использования предложенных подходов.

Ключевые слова: многопроцессорная вычислительная система, параллельные вычисления, контрольные точки, отказоустойчивость вычислений.

Введение

Актуальным направлением современных технологий является создание мобильных объектов с высокой степенью автономности, управляемых интеллектуальными комплексами управления на базе бортовых вычислительных систем (ВС), функционирующих в режимах реального времени. К таким ВС предъявляются жесткие требования по надежности и производительности, что весьма тесно связано с проблемами обеспечения их от-

казоустойчивости. Важным аспектом реализации данного направления является диспетчеризация вычислительного процесса на основе учета условий функционирования.

Очевидно, что невозможно создать абсолютно надежную аппаратуру, в особенности сложное оборудование, поэтому важна разработка программных средств обеспечения отказоустойчивости. С этой точки зрения существенное значение имеют методы

восстановления, основанные на так называемых контрольных точках (КТ) [1]. Данный подход предполагает следующее. В составе ВС имеется запоминающее устройство, к которому имеют доступ все ВМ системы. Оно предназначается для сохранения промежуточных результатов вычислений и других необходимых для управления вычислительным процессом параметров. К нему возможны обращения со стороны ВМ, которые могут быть назначены для продолжения решения прерванной задачи. Таким образом, механизмы управления ходом вычислений в системе обеспечивают периодическую запись состояния вычислительного процесса в централизованное запоминающее устройство [1, 2].

В то время как традиционные подходы предполагают решение прерванной отказом ВМ задачи на исправном с ее начала, вызывая тем самым существенные временные потери и соответствующее снижение производительности, в данном случае восстановление хода решения будет производиться с крайнего сохранения, то есть последней КТ. При этом потеря времени, то есть время вычислений, обесцененное отказами ВМ, значительно снижается. В наихудшем случае оно будет соответствовать интервалу между соседними сохранениями — интервалу между КТ. Таким образом, в условиях возможных отказов того или иного количества вычислительных модулей (ВМ) системы возможно обеспечить параллельную обработку информации на основе указанного подхода.

Следует, однако, отметить, что сложность организации вычислительного процесса при этом неизбежно возрастает. Ведущая роль здесь отводится программному обеспечению ВС, которое осуществляет формирование КТ, совокупность процедур автоматического восстановления вычислений, а также в значительной степени реализует протоколы межмодульного взаимодействия [1].

Нужно иметь в виду, что увеличение количества КТ позволяет затрачивать меньше времени на завершение вычислений прерванной отказом ВМ задачи, но, с другой стороны, создание каждой КТ вносит временную избыточность в вычислительный процесс. Таким образом, возникает задача оптимизации количества КТ. Очевидно, что решение этой задачи

зависит от оценки опасности отказов ВМ, а также временных затрат на сохранение и восстановление вычислений, а также других параметров ВС и вычислительных процессов. В [3, 4] предложен подход к решению указанной задачи и оценен ожидаемый эффект. Он, по нашему мнению, безусловно, интересен и полезен, однако не лишен некоторых недостатков, имея потенциал к совершенствованию.

Подход к оптимизации количества контрольных точек при отказоустойчивой параллельной обработке информации

Будем считать для определенности, что ВС, которая должна выполнить определенный набор вычислительных задач, однородна и состоит из некоторого числа ВМ. Предположим, что вычислительные задачи взаимонезависимы и имеют одинаковую вычислительную трудоемкость (объем вычислений). В соответствии с установленными правилами диспетчеризации вычислительного процесса каждый ВМ решает в любой момент времени только одну задачу (или вовсе простаивает, будучи исправным, или же находится в состоянии отказа).

В рамках реализации рассматриваемого подхода каждый ВМ записывает на общее запоминающее устройство состояние выполняемой им программы вычислительной задачи (например, промежуточные результаты вычислений, дампы своей памяти, своих регистров и т. п.), то есть создает ее КТ. Периодичность этого действия определена и задается соответствующим алгоритмом.

Выход из строя ВМ вызывает прерывание задачи, решаемой на нем. Те задачи, которые были спланированы на отказавшие ВМ, выполняются на работоспособных ВМ с момента крайней КТ прерванной задачи. В силу высказанного выше допущения об однородности ВС все ВМ могут выполнить любую задачу. Таким образом, за счет наличия временной избыточности возможно обеспечить выполнение набора задач при отказах ВМ.

Общее время выполнения всех задач будет зависеть не только от времени отказов ВМ, но и от количества создаваемых при решении каждой задачи КТ и временных затрат на эти действия. Поскольку увеличение количества КТ уменьшает,

с одной стороны, остаточный объем вычислений при отказах, с другой — само по себе требует временных затрат, встает задача поиска оптимального количества КТ для заданных параметров ВС, вычислительных задач и вероятностно-временных характеристик отказов ВМ.

Итак, авторы [3, 4], в общем, справедливо полагают, что период решения задачи состоит из k интервалов, каждый из которых, кроме последнего, включает интервал τ выполнения задачи и интервал Δ создания КТ. Для определенности считается, что отказы ВМ происходят в один и тот же, но заранее не известный случайный момент времени. Тогда, если отказ одного ВМ происходит в момент времени ξ , общее время решения задачи составит

$$\theta = \xi + T - (i - 1)\tau = \xi + T \left(1 - \frac{1}{k} \left\lfloor \frac{k\xi}{T + k\Delta} \right\rfloor \right), \quad (1)$$

где $T = k\tau$ — время, необходимое для решения задачи без учета отказов;

$i = \lfloor \xi / (\tau + \Delta) \rfloor + 1$ — номер интервала, на котором произошел отказ ВМ;

$\lfloor \dots \rfloor$ — ближайшее целое, меньшее или равное.

Если известна плотность распределения $f(\xi)$ момента времени отказа ВМ, то математическое ожидание $\bar{\theta}$ времени выполнения задачи составит $\bar{\theta} = \int_0^T f(\xi)\theta(k, \xi)d\xi$.

Для оценки $\bar{\theta}$ и решения оптимизационной задачи $\bar{\theta}(k) \rightarrow \min$ авторы [3, 4] поступают следующим образом. Среднее значение общего времени $\bar{\theta}$, затрачиваемого на решение задачи, определяется как

$$\bar{\theta} = (1 - q^2)\bar{\theta}_0 + 2q(1 - q)\bar{\theta}_1, \quad (2)$$

где $\bar{\theta}_1$ — среднее время выполнения задачи при отказе одного из двух ВМ;

$\bar{\theta}_0$ — время выполнения задачи при безотказной работе ВС;

q — вероятность отказа ВМ.

Надо полагать, что здесь авторы рассмотрели два ВМ из состава ВС, не учитывая в оценке $\bar{\theta}$ случай отказа обоих ВМ в предположении, что общее число ВМ достаточно велико и задача будет в любом случае переназначена на исправный модуль. Заметим, что, на наш взгляд, полученная

таким путем оценка $\bar{\theta}$ может оказываться излишне оптимистичной, так как не учитывает полную группу событий. Далее оценка $\bar{\theta}_0$ рассчитывается довольно тривиально, а $\bar{\theta}_1$ авторы рассчитали для равномерного закона распределения момента отказа как [3, 4]

$$\bar{\theta}_1 = \frac{1}{2} \left(3T + (k - 1)\Delta - \frac{T(T + k\Delta)(k - 1)}{k(T + (k - 1)\Delta)} \right). \quad (3)$$

Используя (2), (3) и дифференцируя полученную сумму по k , оптимальное количество КТ возможно найти путем численного решения относительно k уравнения четвертой степени $\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial k} = 0$:

$$\Delta k^2(k^2\Delta^2 + 2k\Delta T - 2k\Delta^2 - 2\Delta T + \Delta^2 + T^2) - qT^2(2k\Delta - \Delta + T) = 0. \quad (4)$$

При этом значение искомого корня уравнения округляется до натурального числа с учетом того, что количество КТ на одну меньше количества интервалов k [4].

Уточнение оценки средних потерь времени вычислительного процесса при отказах

На наш взгляд, вместо соотношения (2) и вытекающих из него результатов более корректно рассуждать следующим образом. Оценим среднее время вычислений, потерянное («обесцененное») в результате отказа ВМ, величиной $\tau/2$, а его ожидаемая величина с учетом риска отказа — $q\tau/2$. Время, затраченное на создание КТ, составит $(k - 1)\Delta$. Таким образом, оценкой математического ожидания избыточного времени решения задачи будет выступать величина

$$\bar{\beta} = \frac{q\tau}{2} + (k - 1)\Delta = \frac{qT}{2k} + (k - 1)\Delta. \quad (5)$$

Приравнивая к нулю производную по k выражения (5), получим

$$-\frac{qT}{2k^2} + \Delta = 0, \quad k = \sqrt{\frac{qT}{2\Delta}} = \sqrt{2\delta}, \quad (6)$$

где $\delta = \Delta/T$ — доля временных затрат на создание одной КТ относительно времени «чистого» решения задачи.

Поскольку $k > 0$, округление будем производить в большую сторону.

По нашему мнению, предложенный способ получает преимущество за счет более корректной оценки средних потерь времени вычислительного процесса при отказах. Кроме того, значительно упрощаются анализ и прикладные расчеты. Укажем, что взгляд на соотношение (6) демонстрирует соответствие ожидаемым теоретическим представлениям и здравому смыслу. Так, количество КТ растет с увеличением опасности отказов и уменьшением временных затрат на их создание. Создание КТ не имеет смысла при нулевой вероятности отказа и при времени создания одной КТ более половины времени непосредственного решения задачи. Ожидаемо размерность (масштаб) единиц времени не играет роли.

Проведем сравнительный анализ исходного и предлагаемого способов нахождения оптимального числа КТ при помощи имитационного моделирования.

Необходимо отметить следующее. Как в случае использования (4), так и (6), k не зависит от количества ВМ и количества задач, что следует

из принятых допущений. Однако достигаемый эффект будет различным и при получении его оценок указанные величины требуются для расчетов на имитационной модели. Для определенности целесообразно принимать количество ВМ M равным числу задач N , а затем исследовать случай, при котором $M > N$ (случай $M < N$ не соответствует поставленной задаче, так как требует увеличения рассматриваемого интервала T).

Суть имитационного моделирования состоит в следующем. Разыгрывается случайное время $\xi \in [0; T]$ возможных с вероятностью q отказов ВМ. Задачи с отказавших ВМ переназначаются на исправные по порядку очередности в силу допущения об их однородности. Достигаемый эффект будем оценивать как выигрыш σ по средней производительности на интервале решения набора задач. (Оценка эффекта по среднему времени вычислительного процесса, как исследовали авторы [3, 4], представляется не вполне корректной, так как в случаях отказов всех ВМ время решения стремится в бесконечность.)

Графики с примером зависимости ожидаемого относительного выигрыша в производительности

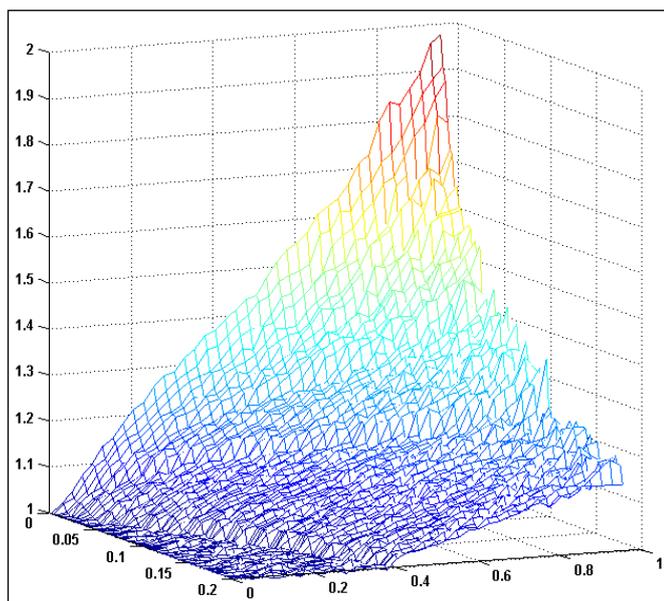


Рис. 1. Зависимость относительного выигрыша в производительности от реализации отказоустойчивого вычислительного процесса с временной избыточностью от вероятности отказа ВМ при $M = N = 8$

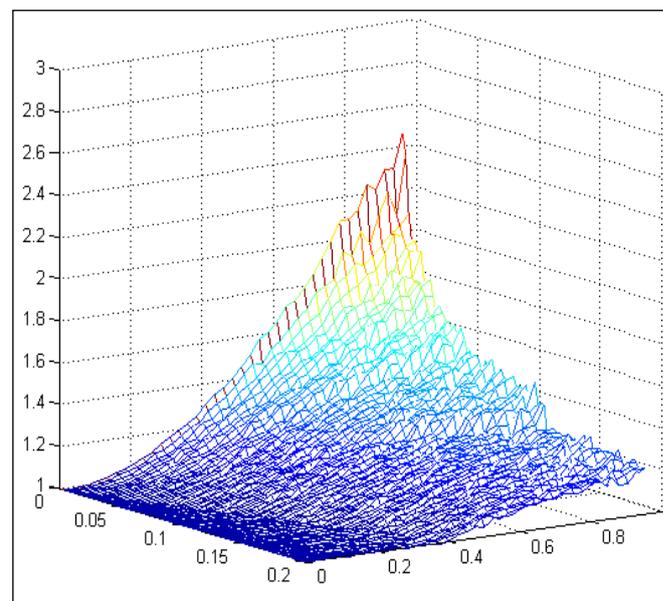


Рис. 2. Зависимость относительного выигрыша в производительности от реализации отказоустойчивого вычислительного процесса с временной избыточностью от вероятности отказа ВМ при $M = 6; N = 3$

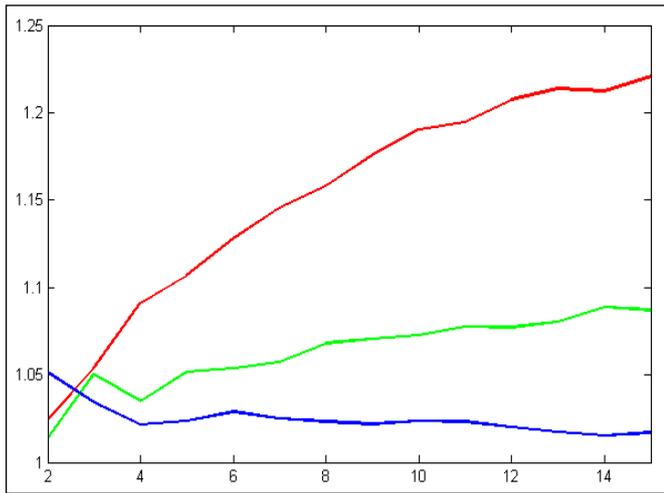


Рис. 3. Зависимость относительного выигрыша в производительности от реализации отказоустойчивого вычислительного процесса с временной избыточностью от количества ВМ в ВС при $q = 0,2$; $\delta = 0,01$

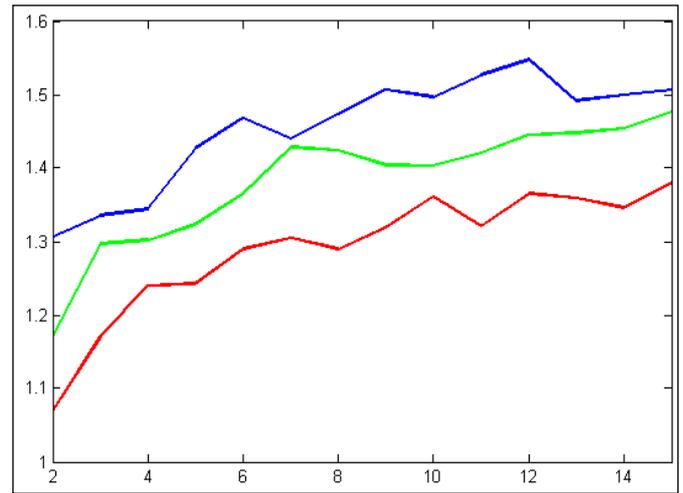


Рис. 4. Зависимость относительного выигрыша в производительности от реализации отказоустойчивого вычислительного процесса с временной избыточностью от количества ВМ в ВС при $q = 0,5$; $\delta = 0,01$

$\sigma(\delta, q)$ при некоторых различных наборах количества ВМ и количества задач для предлагаемого способа оптимизации количества КТ представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости σ от количества ВМ M при $M = N$, а также при случае наличия ВМ в холодном резерве (для определенности двукратного $M = 2N$ и трехкратного $M = 3N$) при различных вероятностях отказа q . На рис. 3 и 4 красная линия соответствует случаю $M = N$, зеленая — $M = 2N$, синяя — $M = 3N$.

Данные примеры показывают возможность существенного снижения потерь производительности для указанных условий и допущений. Отличия в характере поведения графиков для рассмотренных случаев на рис. 3 и 4 можно объяснить целесообразностью увеличения резерва ВМ с увеличением опасности отказов, в то время как наличие значительного резерва при низком риске отказов снижает выигрыш от применения механизма сохранения и восстановления при помощи КТ. Отметим явную тенденцию выхода графиков на «насыщение» с ростом количества ВМ в случаях определенного соотношения параметров (например, как видно из рис. 2, вариант параметров $q = 0,2$; $\delta = 0,01$ не является существенно

выигрышным для $M = 3N$ — трехкратный аппаратный резерв значительно парирует отказы и снижает актуальность реализации механизма КТ). Наблюдаемые немонотонные выбросы значений σ можно объяснить дискретным изменением числа k интервалов и не в полной мере учтенными, по-видимому, особенностями его округления до целого в соотношении (6). Таким образом, целесообразно в дальнейшем рассмотреть вопросы эффективности технологии сохранения и восстановления вычислительных процессов на основе КТ во взаимосвязи с параметрами структур ВС.

Заключение

Анализ предложенного способа оптимизации количества КТ показал целесообразность его использования при разработке алгоритмов управления вычислительным процессом ВС мобильных объектов, функционирующих в условиях опасного деструктивного влияния неблагоприятных факторов различного происхождения.

Результаты моделирования показывают возможность существенного снижения потерь производительности ВС при отказах ее компонентов в сравнении с организацией вычислений без сохранения состояния вычислительного процесса,

а также в сравнении с ранее известным способом расчета оптимальной периодичности создания КТ. Таким образом, следовательно, обеспечивает соответствующее снижение потерь от срывов выполнения вычислительных задач и повышение коэффициента оперативной готовности ВС. Тем не менее обсуждаемые вопросы требуют дальнейшего исследования в рамках развития теоретических подходов и прикладных методик организации отказоустойчивых вычислительных систем [5, 6]. Так, например, целесообразно рассмотреть неоднородные ВМ и неоднородные вы-

числительные задачи, учесть директивные сроки выполнения задач, учесть применение различных дисциплин обслуживания, промоделировать отказы с разнообразными законами распределения и стохастическим потоком задач [7] и т. д. По-видимому, в этих целях будет необходимо использовать более сложные модели ВС и вычислительных процессов. Но решение указанных вопросов создаст предпосылки к совершенствованию алгоритмов оперативного управления ВС, повышая устойчивость вычислительных процессов на борту мобильных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков А. Ю., Данекина А. А. Оптимизация времени создания и объема контрольных точек восстановления параллельных программ. Вестник СибГУТИ. 2010. № 2. С. 87–100.
2. Бондаренко А. А., Якобовский М. В. Обеспечение отказоустойчивости высокопроизводительных вычислений с помощью локальных контрольных точек. Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2014. Т. 3. № 3. С. 20–36.
3. Басыров А. Г., Зыкова С. С., Кошель И. Н. и др. Метод отказоустойчивой параллельной обработки информации в бортовых вычислительных системах летательных аппаратов на основе временной избыточности вычислительного процесса. Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 6. С. 33–39.
4. Зыкова С. С. Модель и алгоритм планирования параллельной обработки информации в отказоустойчивой бортовой вычислительной системе на основе временной избыточности вычислительного процесса. Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 4. С. 28–34.
5. Koren I., Mani Krishna C. Fault-Tolerant Systems. USA, Morgan Kaufmann Publishers, 2020. 416 p.
6. Rathore N. Checkpointing: Fault Tolerance Mechanism. i-manager's Journal on Cloud Computing. January-June, 2017. Vol. 4. No. 1. P. 28–35. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322760706> (дата обращения: 15.05.2024).
7. Захаров И. В., Терехов В. Г., Соколовский А. Н. и др. Реконфигурация бортового комплекса подвижного объекта на основе моделирования вариантов его структурной деградации. Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2022. № 4. С. 39–46.

Дата поступления: 20.05.2024

Решение о публикации: 17.06.2024

Optimization of Parallel Information Processing in a Fault-tolerant Computing System of a Mobile Object with Temporal Redundancy of the Computing Process

Ivan V. Zakharov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mathematical and Software Engineering. PIN code: 7246-7546. E-mail: x.vano-z80@yandex.ru

A. Mousallam — Postgraduate Student at the Department of Mathematics and Software Engineering. E-mail: alloushi1987@gmail.com

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

For citation: Zakharov I. V., Mousallam A. Optimization of parallel information processing in a fault-tolerant computing system of a mobile object with temporal redundancy of the computing process // Intelligent technologies on transport. 2024. No. 2 (38). P. 30–36. (In Russian). DOI: 10.20295/2413-2527-2024-238-30-36

Abstract. *The tasks of effective use of multiprocessor computing systems of mobile objects require rational organization of computing processes on board. The article discusses a parallel computing process with temporal redundancy, which provides for periodic saving of the current state of calculations with the possibility of their restoration in order to ensure fault tolerance. A previously known solution to a specific optimization problem of choosing the frequency of saving the current state of a computing process under conditions of possible failures is briefly analyzed. A new improved method for solving this problem is proposed. Comparative results of its solution in various ways are presented and conclusions are drawn about the advisability of using the proposed approaches.*

Keywords: *multiprocessor computing system, parallel computing, checkpoints, computational fault tolerance.*

REFERENCES

1. Polyakov A. Yu., Danekina A. A. Optimizaciya vremeni sozdaniya i ob"ema kontrol'nyh toчек vosstanovleniya parallel'nyh programm. Vestnik SibGUTI. 2010. № 2. S. 87–100. (In Russian)
2. Bondarenko A. A., Yakobovskij M. V. Obespechenie otkazoustojchivosti vysokoproizvoditel'nyh vychislenij s pomoshch'yu lokal'nyh kontrol'nyh toчек. Vestnik YUUrGU. Seriya "Vychislitel'naya matematika i informatika". 2014. T. 3. № 3. S. 20–36. (In Russian)
3. Basyrov A. G., Zykova S. S., Koshe' I. N. i dr. Metod otkazoustojchivoj parallel'noj obrabotki informacii v bortovyh vychislitel'nyh sistemah letatel'nyh apparatov na osnove vremennoj izbytochnosti vychislitel'nogo processa. Aviakosmicheskoe priborostroenie. 2023. № 6. S. 33–39. (In Russian)
4. Zykova S. S. Model' i algoritm planirovaniya parallel'noj obrabotki informacii v otkazoustojchivoj bortovoj vychislitel'noj sisteme na osnove vremennoj izbytochnosti vychislitel'nogo processa. Intellektual'nye tekhnologii na transporte. 2023. № 4. S. 28–34. (In Russian)
5. Koren I., Mani Krishna C. Fault-Tolerant Systems. USA, Morgan Kaufmann Publishers, 2020. 416 p.
6. Rathore N. Checkpointing: Fault Tolerance Mechanism. i-manager's Journal on Cloud Computing. January-June, 2017. Vol. 4. No. 1. P. 28–35. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/322760706> (дата обращения: 15.05.2024).
7. Zaharov I. V., Terekhov V. G., Sokolovskij A. N. i dr. Rekonfiguraciya bortovogo kompleksa podvizhnogo ob"ekta na osnove modelirovaniya variantov ego strukturnoj degradacii. Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie". 2022. № 4. S. 39–46. (In Russian)

Received: 28.05.2024

Accepted: 17.06.2024