

УДК 658.5:681:3

С.А. Панычев
**БЕЗЭТАЛОННЫЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В КОНСТРУКТИВЕ
КОНЦЕПЦИИ IMA**

*Южный федеральный университет,
Таганрог, Россия*

Одной из первоочередных задач авиакосмического приборостроения является совершенствование бортовой вычислительной системы в соответствии с концепцией интеграции бортовой аппаратуры IMA. Традиционно отказоустойчивость бортовой вычислительной системы обеспечивается комплексом аппаратно-программных методов обнаружения, локализации и замещения отказавшего элемента одним из способов резервирования. Такой подход предполагает введение в систему аппаратной, временной, информационной или программной избыточности. С целью минимизации аппаратной и информационной избыточности системы диагностики и контроля в статье предложен безэталонный способ контроля работоспособности мультипроцессорного суперкомпьютера крейта. Разработанный алгоритм функционирования автомата контроля обеспечивает самодиагностику и отказоустойчивость бортовой вычислительной системы путем ее мажоритарно-динамической реконфигурации. Интервалы между сеансами контроля определяются теоретически прогнозируемым временем безотказного функционирования бортовой вычислительной системы. Процедура контроля, диагностики и восстановления работоспособности системы состоит из четырех этапов: контроль работоспособного состояния системы; определение характера ошибки, обнаруженной на первом цикле; локализация отказавшего процессора; восстановление системы с помощью адаптивного алгоритма перераспределения задач отказавшего элемента между работоспособными процессорами. Практическая значимость предложенного варианта безэталонного контроля реконфигурируемой бортовой вычислительной системы состоит в повышении живучести авионики в тяжелых условиях эксплуатации, характеризующихся комплексом климатических, механических, электромагнитных, радиационных воздействий при жестких ограничениях по массогабаритным параметрам и энергопотреблению.

Ключевые слова: IMA, крейт, бортовая вычислительная система, автоматический контроль, мажоритарно-динамический метод, самодиагностика, реконфигурируемая система, диагностическая задача, бортовое оборудование, живучесть.

Введение. Современное бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) разрабатывается в соответствии с долгосрочной концепцией интеграции бортовой аппаратуры IMA [1], ставшей результатом развития главенствовавших ранее независимого и федеративного принципов построения БРЭО. Конструктив IMA предусматривает комплектование функциональных компонентов авионики на трех иерархических уровнях:

- унифицированные конструктивно-функциональные модули с встроенными вычислительными средствами ограниченных ресурсов;
- крейты – конструктивно стандартизованные мультипроцессорные бортовые вычислительные системы (БВС);
- бортовая локальная вычислительная сеть, объединяющая ресурсы крейтов сетевым интерфейсом.

Одной из первоочередных задач в отрасли авиакосмического приборостроения является совершенствование отказоустойчивой унифицированной интегрированной БВС, обеспечивающей заданные показатели стойкости и живучести БРЭО и состоящей из элементов [1-7]:

- бортовая информационная сеть сбора и распределения в реальном масштабе времени аналоговой и цифровой информации, поступающей от датчиков контролируемых параметров;
- мультипроцессорный суперкомпьютер в конструктиве крейта, содержащий унифицированные вычислительные модули;
- математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для планирования и диспетчеризации вычислений и динамического распределения вычислительных ресурсов.

Постановка задачи и анализ. Поставим задачу разработки структуры БВС, гарантирующей ее отказоустойчивость в соответствии с концепцией ИМА.

Традиционно отказоустойчивость мультипроцессорной БВС обеспечивается комплексом аппаратно-программных методов обнаружения, локализации и замещения отказавшего элемента одним из способов резервирования, что предполагает введение в систему аппаратной, временной, информационной или программной избыточности [7-9]. Вместе с этим, стандартами ИМА устанавливаются существенные ограничения на массу, габариты и энергопотребление БРЭО, а также фиксируются жесткие требования по высокой производительности процессоров при решении ресурсоемких задач. Кроме того, следует учитывать особенность БВС в аспекте ее надежности, состоящую в том, что выход из строя даже нескольких процессоров, как правило, практически не снижает общую производительность БВС, в то время как единичный сбой в вычислениях может привести к неверному результату.

Таким образом, задача разработки структуры БВС в конструктиве концепции ИМА не может решаться стандартными методами. Необходимы новые структурные и алгоритмические решения, обеспечивающие минимизацию аппаратной и информационной избыточности, что представляется достижимым в случае, когда структура БВС обладает

такими свойствами, как самодиагностируемость, безэталонное обнаружение и локализация отказа, возможность быстрого реконфигурирования, способность парировать сбои и отказы за счет собственных ресурсов [10-19].

Синтез реконфигурируемой самодиагностируемой БВС. Стандартами IMA, в частности, ARNIC 653 и ARNIC 663, установлены ограниченные возможности программного и аппаратного реконфигурирования, поэтому предлагается дополнить крейт встроенным автоматом контроля (АК), выполняющим функции контроля, диагностики и адаптивного перераспределения загрузки отказавшего процессора на работоспособные элементы. Программный модуль АК должен тестировать функциональные контрольные точки по синхронному прерыванию работы БВС. Периодичность работы таймера прерывания определяется прогнозируемым значением средней наработки системы на отказ и соответствует моментам времени, когда расчетное значение вероятности безотказной работы становится ниже требуемого уровня.

Проектируемая БВС с безэталонным способом контроля работоспособности представляет собой мультипроцессорную вычислительную систему из N функционально связанных процессоров. Обобщенная структура БВС приведена на Рисунке 1, где не показаны функциональные связи процессоров и использованы обозначения: I_i, O_i – вход и выход i -го процессора, соответственно ($i = \overline{1, N}$); λ_i – интенсивность потока заданий, поступающих к i -му процессору; W_j – программный модуль решения задач ($j = \overline{1, L}$); L – количество задач; Y_i – результат работы i -го процессора.

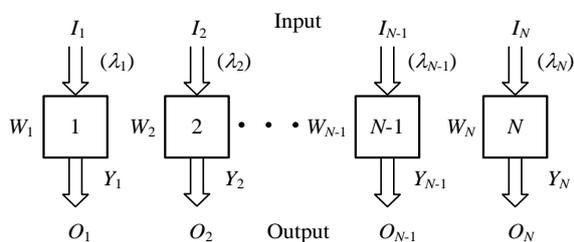


Рисунок 1 – Обобщенная структура БВС

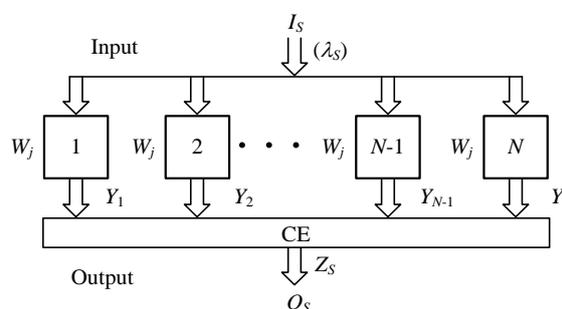


Рисунок 2 – Структура БВС после реконфигурирования

Синтез структуры БВС, выполним при допущениях:

- архитектура системы обладает свойствами магистральности, модульности, микропрограммируемости, регулярности и однородности;
- потоки заданий являются пуассоновские и независимые;

- выполняемые задачи являются информационно однотипными;
- время выполнения заданий имеет экспоненциальное распределение;
- вероятность одновременного возникновения в нескольких процессорах однотипных сбоев или отказов исчезающе мала;
- количество процессоров в системе четное;
- как встроенная система, АК составляет не более 10 % аппаратной части БВС и, следовательно, обладает большей отказоустойчивостью.

Так как БВС состоит из однородных процессоров, то на интервал времени контроля работоспособности она может быть реконфигурирована следующим образом. Все входы I_i объединяются в один вход I_s , на который подается общая задача с интенсивностью λ_s (Рисунок 2). Результаты решений всех процессоров Y_i подаются на входы компаратора СЕ (контролирующего элемента) и в нем сравниваются между собой. На выходе компаратора формируется сигнал Z_s . Если $Z_s = 0$, то все процессоры в БВС работоспособны, и структура системы возвращается к первоначальному виду (Рисунок 1).

Если $Z_s = 1$, то хотя бы один элемент БВС отказал. Однако, такой метод реконфигурирования позволяет только обнаружить наличие отказа. Локализация отказа может быть выполнена, например, методом сканирующего контроля. Для этого необходимо дополнить БВС $(N + 1)$ -м процессором, который является эталоном, то есть работает без отказов. При помощи мультиплексоров эталон последовательно объединяется в пару с каждым i -м процессором ($i = \overline{1, N}$) и решает его задачу. Процесс завершается на том шаге, когда на выходе мультиплексора формируется сигнал $Z_s = 1$. Максимальное число тактов, которое может потребоваться для локализации отказавшего элемента, равно N , что является существенным недостатком метода.

Более эффективные методы контроля и диагностики путем реконфигурирования БВС могут быть основаны на алгоритмах поиска экстремума в условиях неопределенности [20]. К аппаратной реализации хорошо адаптированы методы дихотомии, чисел Фибоначчи и «золотого сечения». К их недостаткам можно отнести низкую разрешающую способность, сложную процедуру формирования групп элементов и сложную коммутирующую часть системы контроля и диагностики.

Синтез БВС с безэталонным способом контроля. Предлагаемая процедура самодиагностики БВС с безэталонным способом контроля лишена указанных недостатков и состоит в следующем. На первом этапе в течение времени t_{cl} выполняется контроль работоспособного состояния системы. Поскольку система образована однородными процессорами, она

может быть реконфигурирована по мажоритарно-динамическому способу к виду, представленному на Рисунке 3,а. В этой конфигурации входы соседних процессоров объединяются попарно. На объединенные входы каждой пары подается задача, выполнявшаяся в момент начала контроля процессором с нечетным номером в паре.

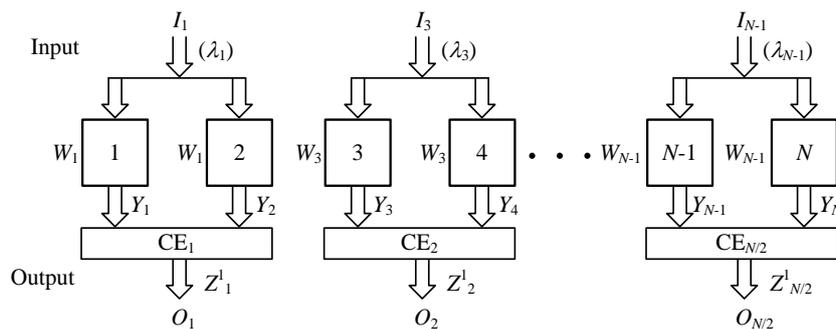
Таким образом, структура БВС на этапе контроля работоспособности имеет $N/2$ входов I_1, I_3, \dots, I_{N-1} , на которые поступают задачи с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_3, \dots, \lambda_{N-1}$, соответственно. Результаты вычислений формализовано представляются в виде

$$Y_{2k-1} = I_{2k-1} * W_{2k-1}, Y_{2k} = I_{2k} * W_{2k}, k = \overline{1, N/2}.$$

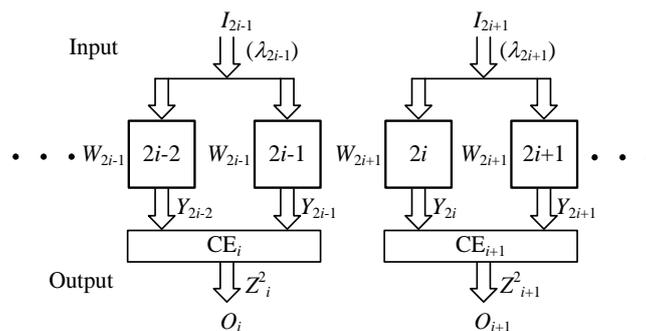
Результаты решений в каждой паре $Y_1 - Y_2, Y_3 - Y_4, \dots, Y_{N-1} - Y_N$ поступают на входы контролирующих (мажорирующих) элементов, где сравниваются между собой. Функции контролирующих органов выполняют компараторы $CE_i, i = \overline{1, N/2}$, на выходах которых формируются парциальные сигналы ошибки $Z_i^1, Z_i^1 \in \{0,1\}, i = \overline{1, N/2}$, которые определяются по правилу

$$Z_1^1 = Y_1 \oplus Y_2, Z_2^1 = Y_3 \oplus Y_4, \dots, Z_{N/2}^1 = Y_{N/2} \oplus Y_N,$$

и сохраняются для использования на следующих этапах диагностики.



а



б

Рисунок 3 – Структура БВС при безэталонном способе реконфигурирования

Индикатором ошибки вычислений в БВС является дизъюнкция всех парциальных сигналов ошибки:

$$Z_S^1 = \bigvee_{i=1}^{N/2} Z_i^1.$$

Если $Z_S^1 = 0$, то принимается, что все процессоры и система в целом находятся в работоспособном состоянии, поскольку вероятность того, что одновременно в обоих процессорах пары возникнут идентичные сбои или отказы, исчезающе мала. В этом случае структура БВС возвращается в первоначальное состояние (Рисунок 1) до следующего сеанса проверки. Если $Z_S^1 = 1$, то считается, что, по крайней мере, в одном процессоре БВС возник сбой или отказ, и требуется продолжение процедуры самодиагностики системы.

Последующие этапы самодиагностики выполняются после реконфигурирования БВС по следующему алгоритму. Очевидно, что в i -й паре процессоров, для которой результаты вычисления на первом этапе не совпадают ($Z_i^1 = 1$), один из элементов в момент контроля находился в состоянии сбоя или отказа. Чтобы сравнить работоспособность отказавшей пары с заведомо работоспособными элементами из предыдущей и последующей пар, перегруппировываются $(i-1)$ -я, i -я и $(i+1)$ -я пары процессоров, соединяясь с ближайшими элементами из отказавшей пары и образуя две новые пары (Рисунок 3,б). На объединенные входы каждой вновь образованной пары по-прежнему подается задача, выполняющаяся процессором с нечетным номером в паре.

На втором этапе в течение времени t_{c2} проверяется характер ошибки, обнаруженной на первом цикле. Если дизъюнктивный индикатор ошибки двух анализируемых пар $Z_S^2 = 0$, то во время первого этапа контроля t_{c1} возник кратковременный сбой, отсутствующий на втором цикле. Значит, все процессоры находятся в работоспособном состоянии, и структура БВС возвращается в штатное состояние (Рисунок 1).

Получение величины $Z_S^2 = 1$ означает, что в системе произошел отказ. В этом случае необходим третий этап самодиагностики, на котором за время t_{c3} выполняется локализация (определение адреса) отказавшего процессора. Для этого анализируются парциальные сигналы ошибки Z_i^2 и Z_{i+1}^2 и определяется номер M пары с зафиксированным отказом ($Z_M^2 = 1$). Номер отказавшего процессора равен $2M - 1$. Таким образом, локализация отказавшего элемента осуществляется за три такта и не зависит от количества процессоров N .

На заключительном этапе производится восстановление системы. С целью минимизации аппаратной избыточности в проектируемой БВС отсутствуют резервные элементы. Задача отказавшего процессора с помощью адаптивного алгоритма перераспределяется между остальными, работоспособными, процессорами. Координирующую функцию выполняет АК, который производит периодическое сравнение величины загрузки всех штатно работающих процессоров и передает задание отказавшего элемента процессору с текущей минимальной загрузкой.

Заключение. Предложенный безэталонный способ контроля работоспособности БВС путем мажоритарно-динамического реконфигурирования на интервале времени, необходимом для контроля и диагностики системы, обеспечивает отказоустойчивость мультипроцессорного суперкомпьютера крейта. Использование АК с алгоритмом самодиагностики позволяет минимизировать аппаратную и информационную избыточность системы диагностики и восстановления работоспособности БВС.

Процедура контроля, диагностики и восстановления работоспособности системы состоит из четырех этапов: контроль работоспособного состояния системы; определение характера ошибки, обнаруженной на первом цикле; локализация отказавшего процессора; восстановление системы с помощью адаптивного алгоритма перераспределения задач отказавшего элемента между работоспособными процессорами.

Предложенный вариант структуры самодиагностируемой БВС способен обеспечить живучесть авионики в тяжелых условиях эксплуатации при жестких ограничениях по массогабаритным параметрам и энергопотреблению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парамонов П.П., Жаринов И.О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2(82). С. 1-17.
2. Бабуров В.И., Пономаренко Б.В. Принципы интегрированной бортовой авионики. СПб.: Агентство «РДК-Принт», 2005. 338 с.
3. Eveleens Rene L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing // Mission Systems Engineering. Educational Notes RTO-EN-SCI-176. 2006. Neuilly-sur-Seine, Nov., France: RTO. Paper 2. pp. 2-1-2-22.

4. Fedosov E.A. IMA Russian Program - Overall presentation // European and Russian Joint Avionics Forum. – Moscow, 2009. 15 p.
5. Савкин Л.В., Ширшаков А.Е., Новичков В.М. Построение реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 6. С. 8-13.
6. Абрамов Н.С., Заднепровский В.Ф., Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов М.В. Перспективная система мониторинга и прогнозирования состояния космического аппарата на основе анализа интегрированной информации // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 6. С. 33-38.
7. Русанов В.Н., Киселев А.Ю., Сильянов Н.В. Самодиагностируемая трехканальная бортовая вычислительная система с резервированием замещением // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 3. С. 23-31.
8. Chow Y.-C., Kohler W. Models for Dynamic Load Balancing in a Heterogeneous Multiple Processor System // IEEE Trans. Comput. Vol. C-28. No. 5. pp. 353-362.
9. Бакулин В.Н., Малков С.Ю., Гончаров В.В. Ковалев В.И. Управление обеспечением стойкости сложных технических систем. М.: Физматлит, 2006.
10. Longden L. The Designing a Single Board Computers for Space Using the Most Advanced Processor and Mitigation Technologies, in Proc. European Space Components Conference/ European Space Agency. Toulouse, France. 2002. pp. 313-316.
11. Shelton C., Koopman P., Nace W. A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems // Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003, Guadelajare. 2003. P. 8.
12. Самойленко А.П., Панычев А.И., Панычев С.А. Метод оценки надежности комплекса радиоэлектронного оборудования летательного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3 (163). С. 102-110.
13. Самойленко А.П., Панычев А.И., Панычев С.А. Синтез системы автоматического контроля работоспособности бортового радиоэлектронного комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 11 (172). С. 166-177.

14. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process, in Proc. 2016 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, May 12–13, 2016, DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7391722.
15. Panychev S., Guzik V., Samoilenko A., Panychev A. The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application // MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists "Space Engineering" DOI: 10.1051/mateconf/201710201030.
16. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. Technologies of aggregation for integral criteria of evaluating the efficiency of on-board computer systems, in Proc. 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC), Vladivostok, Russia, 25-29 Sept. 2017. DOI: 10.1109/RPC.2017.8168089.
17. Guzik V., Samoilenko A., Panychev A., Panychev S. Reconfiguring of structure as self diagnosis tool of on-board computers, in Proc. 15th East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2017 IEEE, Novi Sad, Serbia, Sept 29 - Oct 2, 2017. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110106.
18. Samoilenko A.P., Panychev A.I., Panychev S.A. "Evaluation of telecommunication system reliability via stress testing, in Proc. 2017 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017, DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998330.
19. Гузик В.Ф., Самойленко А.П., Панычев А.И., Панычев С.А. Критерии значимости вариаций в сигналах датчиков встроенной системы допускового контроля электронного оборудования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Электронный научный журнал. 2017. №3 (19). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/10/GuzikSoavtori_3_1_17.pdf (дата обращения: 07.02.2018).
20. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации. М.: Сов. радио, 1980. 272 с.

S.A. Panychev
**WAY OF WITHOUT-ETHALON CONTROL OF ON-BOARD
COMPUTER SYSTEM OPERABILITY ACCORDING TO IMA
CONCEPTION**

*Southern Federal University,
Taganrog, Russia*

One of the primary tasks of aerospace instrumentation is the improvement of the onboard computer system in accordance with the concept of integration of onboard equipment IMA. Traditionally, the fail-safety of the on-board computer system is provided by a set of hardware-software methods for detecting, localizing and replacing a failed element by one of the reservation methods. This approach involves the introduction of hardware, time, information or software redundancy into the system. In order to minimize the hardware and information redundancy of the diagnostic and control system, the article offers a standardless control method of the performance of the crate multiprocessor supercomputer. The developed algorithm of the control automaton provides self-diagnostics and fault tolerance of the on-board computer system by its majority-dynamic reconfiguration. The intervals between monitoring sessions are determined by the theoretically predicted uptime of the on-board computer system. The procedure for monitoring, diagnosing and restoring the system's operability consists of four stages: monitoring the system's operational state; determination of the nature of the error detected in the first cycle; localization of the failed processor; restoration of the system with the help of an adaptive algorithm for reallocation the tasks of the failed element between operable processors. The practical significance of the proposed version of the standardless control method of on-board computer system is to increase the avionics survivability in harsh environments characterized by complex climatic, mechanical, electromagnetic, radiation effects at the severe restrictions on the weight and size parameters and power consumption.

Keywords: IMA, crate, on-board computer system, automatic control, majority-dynamic method, self-diagnostics, reconfigurable system, diagnostic problem, avionics, survivability.

REFERENCES

1. P.P. Paramonov, I.O. Zharinov, "Integrirovannyye bortovyye vychislitel'nyye sistemy: obzor sovremennogo sostoyaniya i analiz perspektiv razvitiya v aviatsionnom priborostroyenii" [Integrated on-board computer systems: a review of the current state and analysis of development prospects in aircraft instrument making], Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2013, No. 2(82), pp. 1-17. (in Russian)
2. V.I. Baburov, B.V. Ponomarenko, "Printsipy integrirovannoi bortovoi avioniki" [Principles of integrated onboard avionics], SPb.: Agentstvo «RDK-Print», 2005, 338 p. (in Russian)

3. Rene L.C. Eveleens, "Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing", Mission Systems Engineering. Educational Notes RTO-EN-SCI-176, 2006, Neuilly-sur-Seine, Nov., France: RTO, Paper 2, pp. 2-1-2-22.
4. E.A. Fedosov, "IMA Russian Program - Overall presentation", in Proc. European and Russian Joint Avionics Forum, Moscow, 2009, 15 p.
5. L.V. Savkin, A.E. Shirshakov, V.M. Novichkov, "Postroenie rekonfiguriruemoi sistemy funktsional'nogo kontrolya i diagnostiki bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskogo apparata" [Construction of a reconfigurable system for functional monitoring and diagnostics of the onboard control system of the spacecraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2015, No. 6, pp. 8-13. (in Russian)
6. N.S. Abramov, V.F. Zadneprovskii, A.A. Talalaev, V.P. Fralenko, M.V. Khachumov, "Perspektivnaya sistema monitoringa i prognozirovaniya sostoyaniya kosmicheskogo apparata na osnove analiza integrirovannoi informatsii" [A promising system for monitoring and forecasting the state of the spacecraft based on the analysis of integrated information], *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2015, No. 6, pp. 33-38. (in Russian)
7. V.N. Rusanov, A.Yu. Kiselev, N.V. Sil'yanov, "Samodiagnostiruemaya trekhkanal'naya bortovaya vychislitel'naya sistema s rezervirovaniem zameshcheniem" [Self-diagnosed three-channel on-board computer system with redundant redundancy], *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2015, No. 3, pp. 23-31. (in Russian)
8. Y.-C. Chow, W. Kohler, "Models for Dynamic Load Balancing in a Heterogeneous Multiple Processor System", *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-28, No. 5, pp. 353-362.
9. V.N. Bakulin, S.Yu. Malkov, V.V. Goncharov, V.I. Kovalev, "Upravlenie obespecheniem stoikosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem" [Control of the durability of complex technical systems], M.: Fizmatlit, 2006. (in Russian)
10. L. Longden, "The Designing a Single Board Computers for Space Using the Most Advanced Processor and Mitigation Technologies", in Proc. European Space Components Conference/ European Space Agency, Toulouse, France. 2002, pp. 313-316.

11. C. Shelton, P. Koopman, W. Nace, “A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems”, in Proc. Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003, Guadelajare, 2003, P. 8.
12. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Metod otsenki nadezhnosti kompleksa radioelektronnogo oborudovaniya letatel'nogo apparata” [Method for assessing the reliability of a complex of radio electronic equipment of an aircraft], Izvestiya SFedU. Tekhnicheskie nauki, 2015, № 3 (163), pp. 102-110. (in Russian)
13. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Sintez sistemy avtomaticheskogo kontrolya rabotosposobnosti bortovogo radioelektronnogo kompleksa” [Synthesis of the automatic control system of the on-board radio electronic complex], Izvestiya SFedU. Tekhnicheskie nauki, 2015, No.11 (172). pp. 166-177. (in Russian)
14. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process”, in Proc. 2016 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, May 12–13, 2016, DOI. 10.1109/SIBCON.2016.7391722.
15. S. Panychev, V. Guzik, A. Samoilenko, A. Panychev, “The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application”, MATEC Web of Conferences 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists "Space Engineering", DOI: 10.1051/matecconf/201710201030.
16. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Technologies of aggregation for integral criteria of evaluating the efficiency of on-board computer systems”, in Proc. 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC), Vladivostok, Russia, 25-29 Sept. 2017, DOI: 10.1109/RPC.2017.8168089.
17. V. Guzik, A. Samoilenko, A. Panychev, S. Panychev, “Reconfiguring of structure as self diagnosis tool of on-board computers”, in Proc. 15th East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2017 IEEE, Novi Sad, Serbia, Sept 29 - Oct 2, 2017, DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110106.

18. A.P. Samoylenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Evaluation of telecommunication system reliability via stress testing”, in Proc. 2017 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017, DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998330.
19. V.F. Guzik, A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Kriterii znachimosti variatsii v signalakh datchikov vstroennoi sistemy dopuskovogo kontrolya elektronnoho oborudovaniya” [Criteria of the significance of variations in the signals of the sensors of the built-in electronic equipment control system], Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. Elektronnyi nauchnyi zhurnal, 2017, No. 3(19). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/10/GuzikSoavtori_3_1_17.pdf. (in Russian).
20. Yu.I. Degtyarev, “Metody optimizatsii”, M.: Sov. radio, 1980. (in Russian).