

И.В. Захаров, В.Г. Терехов, А.Н. Соколовский, Мусаллам Али

СЦЕНАРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ
ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ
ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Аннотация. Решение задач применения бортовых вычислительных комплексов подвижных объектов в условиях влияния неблагоприятных факторов различного происхождения требует гибкого управления режимами работы, следовательно, сравнительного оценивания эффективности вариантов управления. Предлагаемый способ оценки результативности функционирования бортовых вычислительных комплексов подвижных объектов учитывает оперативное управление составом выполняемых задач и параметрами функционирования элементов бортовых вычислительных комплексов на основе анализа ресурса системы, условий функционирования и прогнозирования ее состояния.

Ключевые слова: бортовой вычислительный комплекс, подвижный объект, деградация, прогнозирование, сценарий.

I.V. Zakharov, V.G. Terekhov, A.N. Sokolovskiy, Mousallam Ali

SCENARIO PREDICTION OF DEGRADATION OF INFORMATION
AND COMPUTING RESOURCES OF A MOBILE OBJECT

Abstract. Solving the problems of using on-board computing systems of mobile objects under the influence of unfavorable factors of various origins requires flexible control of operating modes, and, consequently, a comparative assessment of the effectiveness of control options. The proposed method for evaluating the effectiveness of the functioning of on-board computing complexes of mobile objects takes into account the operational management of the composition of the tasks performed and the parameters of the functioning of the on-board computing complexes elements based on the analysis of the system resource, operating conditions and forecasting its condition.

Keywords: onboard computing complex, mobile object, degradation, forecasting, scenario.

Введение

Вопросы методологии проектирования и построения бортовых вычислительных комплексов подвижных объектов (далее – БВК ПО) с перестраиваемой структурой, компенсирующей возмущающие факторы, и управления производительностью деградирующей вычислительной структуры не теряют своей актуальности.

Известные исследования относятся прежде всего к априорным вариантам парирования отказов и сбоев на основе тривиальных схем резервирования – мажоритированию на уровне каналов, задействованию ненагруженного резерва в случае отказов основных элементов для весьма ограниченного множества аномальных ситуаций. Предпочтительность выбираемой конфигурации рассматривается лишь с позиций ее работоспособности применительно к текущему состоянию системы без учета влияния этого выбора на ее дальнейшее функционирование. Новые подходы предполагают формирование конфигурации БВК ПО не только по состоянию ее элементов в текущий момент времени, но и с учетом изменения условий ее функционирования на последующих интервалах на основе сценарного подхода [1].

Захаров Иван Вячеславович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: устойчивость функционирования информационно-вычислительных систем. Автор более 100 опубликованных научных работ. SPIN-код: 7246-7546, AuthorID: 718427. Электронный адрес: x.vano-z80@yandex.ru

Терехов Владимир Геннадиевич

кандидат военных наук, доцент, старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: сетевые технологии, устойчивость функционирования информационно-вычислительных систем и сетей, защита информации в информационно-вычислительных сетях. Автор более 40 опубликованных научных работ. SPIN-код: 3266-6624, AuthorID: 726737. Электронный адрес: vter2@ Rambler.ru

Соколовский Алексей Николаевич

кандидат технических наук, преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: сетевые технологии, устойчивость функционирования информационно-вычислительных систем и сетей, защита информации в информационно-вычислительных сетях. Автор более 30 опубликованных научных работ. Электронный адрес: Sokolovskij@ Rambler.ru

Мусаллам Али

адъюнкт, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: устойчивость функционирования информационно-вычислительных систем. Автор двух опубликованных научных работ. Электронный адрес: alloushi1987@gmail.com

Вместе с тем модели и методы общей теории надежности, теории живучести сложных систем, теории вычислительных систем, теории реконфигурируемых систем проработаны достаточно глубоко, однако основной вопрос – сложность их совместного применения – решен только для ограниченного числа частных случаев, поскольку композиция предлагаемых моделей и методов оказывается крайне трудоемкой. Кроме того, существенный недостаток классических методов теории вычислительных систем применительно к деградирующим структурам заключается в детерминированных подходах к усредненным оценкам характеристик их функционирования, в то время как для БВК рассматриваемого класса существенным аспектом является вероятностная оценка выполнения задач.

Оценка характеристик вычислительных систем в стационарной конфигурации

Пусть структура гетерогенного иерархически-сетевых БВК ПО задается как совокупность элементов БВК и связей между ними. Элементами структуры являются вычислительные узлы, а связи в структуре заданы в виде матрицы смежности. Задан типовой для данного БВК набор задач. Необходимо определить зависимость целевого эффекта применения БВК от времени с учетом его деградации под неблагоприятным воздействием внешних и внутренних факторов.

Задача моделирования включает подзадачи:

- оценка характеристик БВК в стационарной конфигурации;
- оценка целевого эффекта;
- моделирование структурно-параметрической деградации в процессе эксплуатации.

Для оценивания производительности гетерогенного иерархически-сетевых БВК ПО в стационарной конфигурации с учетом разнородности задач по ресурсоемкости и критичности он представляется как сеть массового обслуживания с узлами типа $M/G/1$. Принятые при этом допущения кратко обосновываются следующими соображениями. Вычислительные задачи поступают в БВК ПО от значительного количества абонентов и имеют несколько уровней приоритета, что позволяет считать их суммарный поток простейшим. Для подвижного объекта определенного целевого назначения можно выделить конечное число определенных режимов функционирования, следовательно, ограничить для БВК типовые наборы вычислительных задач и определить их параметры с учетом репликации в соответствующих режимах, связности по данным и управлению, а также возможности использования специализированных модулей для решения общих задач и централизованного решения специализированных задач [2]. Процесс решения задачи представляется в виде ее прохождения последовательности обслуживающих устройств от нулевого уровня структуры (уровня вычислительных модулей) до вершины, последовательно через интерфейсные модули промежуточных уровней [3]. Время решения задачи в БВК определяется суммой времени решения задачи назначенными узлами (модулями), которые складываются из случайного времени ожидания, зависящего от производительности и нагрузки узла, и времени непосредственного выполнения, зависящего от быстродействия модуля и ресурсоемкости задачи. Диспетчеризация обеспечивает равномерное в смысле коэффициента нагрузки распределение задач по вычислительным модулям.

Получив известными методами теории массового обслуживания вероятности решения задач за директивный срок $p_i, i=1..,m$ [3], рассчитаем показатели, позволяющие свернуть быстродействие узлов, объем задач и их директивные сроки:

- вероятность успешного решения набора задач на заданном интервале t^u

$$P = \prod_{i=1}^m p_i^{\beta_i \gamma_i \Lambda t^u};$$

- вычислительная мощность БВК ПО

$$v = \Lambda \sum_{i=1}^m \gamma_i p_i^{\beta_i}; \quad (1)$$

- его вычислительная способность

$$v_0 = \max_{\Lambda} v(\Lambda), \quad (2)$$

где λ_i – интенсивность потока i -го типа задачи; $\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i, 0 < \beta_i \leq 1$ – коэффициент критичности задачи, $\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\Lambda}$.

Пример зависимости вычислительной мощности БВК ПО от интенсивности потока вычислительных задач, выраженной в единицах быстродействия, представлен на Рисунке: показаны графики для режимов однократного, дублированного и мажоритарного просчета задач, обеспечивающих защиту от аппаратных сбоев.

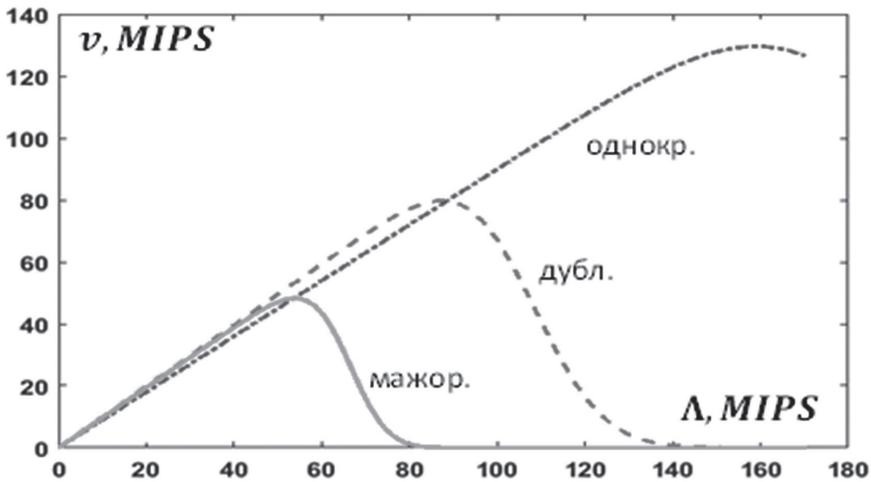


Рисунок. Пример оценки вычислительной мощности БВК
 Источник: график составлен авторами.

Указанный способ при достаточно низкой вычислительной сложности обеспечивает учет иерархически-сетевой структуры БВК ПО, а также вероятностный характер получаемой оценки, который позволяет перейти к вероятностным оценкам качества решения целевой задачи подвижного объекта.

Оценка целевого эффекта

Оценивание целевого эффекта, достигаемого применением БВК ПО, производится следующим образом [4]. Пусть целевые задачи $Z^{(1)} \dots Z^{(M)}$ циклограммы Z работы ПО могут быть реализованы в одном из функциональных режимов БВК с заданным коэффициентом $0 < C_j \leq 1$ ценности функционального режима, а $\Omega_j^{(i)}$ – набор вычислительных задач, решаемых БВК ПО при реализации целевой задачи $Z^{(i)}$ в j -м функциональном режиме.

Показатель результативности выполнения циклограммы Z выражается в виде

$$\hat{L} = C_j \prod_{i: Z^{(i)} \in Z_0} \hat{\delta}_i \cdot \sum_{i: Z^{(i)} \notin Z_0} c_j^{(i)} \hat{\delta}_i,$$

где $\sum_{i: Z^{(i)} \notin Z_0} c_j^{(i)} = 1, \forall j$, $\hat{\delta}_i = \begin{cases} 0, Z^{(i)} \text{ выполнена} \\ 1, Z^{(i)} \text{ не выполнена} \end{cases}$, $Z_0 \subseteq Z$ – множество обесценивающих задач;

$c_j^{(i)}$ – весовой коэффициент важности задачи $Z^{(i)}$; $\sum_{i: Z^{(i)} \notin Z_0} c_j^{(i)} = 1, \forall j$.

Его ожидаемое среднее значение составляет

$$\bar{L} = M[\bar{L}] = C_j \prod_{i: Z^{(i)} \in Z_0} P_j^{(i)} \cdot \sum_{i: Z^{(i)} \notin Z_0} c_j^{(i)} P_j^{(i)},$$

где $P_j^{(i)}$ – вероятность решения задачи $Z^{(i)}$.

Обозначая через $P_i^{\text{бвк}}$ вероятность решения в БВК ПО набора вычислительных задач $\Omega_j^{(i)}$, $\bar{K}_{\text{ПО}}$ – условный (без учета БВК) коэффициент оперативной готовности ПО на интервале решения задач циклограммы, а

$$\bar{P} = \prod_{i: \mathbb{Z}^{(i)} \in \mathbb{Z}_0} P_i^{\text{бвк}} \cdot \sum_{i: \mathbb{Z}^{(i)} \notin \mathbb{Z}_0} c_j^{(i)} P_i^{\text{бвк}},$$

получим

$$\bar{L} = \bar{K}_{\text{но}} \cdot C_j \cdot \bar{P} = \bar{K}_{\text{но}} \cdot J.$$

Величину ΔJ назовем динамическим коэффициентом результативности функционирования БВК ПО в режиме ξ :

$$\Delta J(\xi) = C_\xi \cdot \bar{P}(\xi) = C_\xi \cdot \frac{v(\xi)}{\Lambda_\xi} = C_\xi \cdot v(\xi),$$

где Λ_ξ – интенсивность потока вычислительных задач; $v(\xi) = \Lambda_\xi \cdot \bar{P}(\xi)$ – вычислительная мощность БВК; C_ξ – коэффициент ценности вычислений.

Интегральный коэффициент результативности функционирования ВС ПО определяется как

$$J(t_1; t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta J(\tau) d\tau.$$

Таким образом, выдвинутые показатели находятся в пропорциональной зависимости с показателями результативности выполнения циклограммы целевых задач ПО и производительности БВК ПО. Видно, что при равноценных задачах $c_j^{(i)} \equiv c, \forall i, \forall j$ и неразличимых функциональных режимах $\xi_i = \xi_j, \forall i, \forall j$ показатель ΔJ имеет смысл коэффициента оперативной готовности БВК ПО.

Моделирование структурно-параметрической деградации

В силу неопределенности внешних воздействий принимается сценарный подход, при котором рассматривается множество сформированных, например, экспертными методами, наборов параметров («сценариев») условий функционирования. Сценарии имеют определенный вес и охватывают спектр возможных ситуаций. На основе сценариев строится прогнозирование траекторий деградации БВК ПО с учетом динамики внешней среды и выработанных элементами системы ресурса и формируются соответствующие оценки ее результативности функционирования для данного сценария, что позволяет оценить интегральный полезный эффект на интервале функционирования. Поэтому процесс деградации БВК ПО не может быть достаточно адекватно охарактеризован прогнозируемым временем функционирования, поскольку он имеет не только исправное и неработоспособное, но и промежуточные состояния, соответствующие постепенной деградации как системы в целом, так и ее элементов.

Прогнозирование деградации БВК ПО требует получить зависимости вероятностей пребывания ее элементов в работоспособном состоянии $\bar{p}(t) = p_i(t | g_i, H)$ от времени $t \in [t_0; t_s]$ для некоторой фиксированной конфигурации G и сценария условий функционирования H .

Применительно к иерархически-сетевому БВК ПО данный подход реализуется следующим образом. Деградацию целевого эффекта применения БВК ПО будем оценивать че-

рез математическое ожидание коэффициента интегральной результативности функционирования БВК ПО в момент времени. Тогда, исходя из обоснования показателей производительности БВК ПО (1), (2), необходимо из $\bar{p}(t|H,G)$, полученного путем моделирования физических процессов [3], построить «траекторию» деградации математического ожидания производительности $\bar{v}(t)$ БВК ПО и далее – коэффициента $\Delta\bar{J}(t)$ результативности его функционирования.

В рамках поставленной задачи исчерпывающим описанием деградации структуры системы следует считать законы распределения вероятностей для всех ее возможных состояний в любой момент времени $t > t_0$. Предположим, что известно правило $\varphi: \Theta \rightarrow v$ расчета показателя производительности v БВК ПО исходя из состояния Θ его элементов, а также правило $\psi: \bar{p} \rightarrow F[\hat{v}]$, ставящее в соответствие вероятностям \bar{p} закон распределения случайной величины показателя \hat{v} производительности БВК ПО и его параметры F . Отсюда, имея $\bar{p}(t)$, траекторию деградации математического ожидания $\bar{v}(t)$ случайной величины $\hat{v}(t)$ можно выразить как $\bar{v}[\bar{p}(t)]$.

Поскольку решение данной задачи в общем виде затруднительно (прежде всего, не определено правило ψ), для построения приближенной аналитической зависимости $\bar{v}(t)$ представляется целесообразным использовать особенности иерархически-сетевой структуры БВК ПО, а в качестве показателя производительности принять вычислительную способность (2). Для этого путем, например, имитационного моделирования необходимо получить $P(\xi, v)$ – вероятности решения задач в функциональном режиме (далее – ФР) ξ при значении v показателя вычислительной способности. Зависимость $P(\xi, v)$ можно рассматривать как задаваемую параметрически через $P(\xi, G)$ – вероятность успешного решения задач и $v(G)$ – вычислительную способность БВК в аппаратной конфигурации G . Тогда, поскольку v является дискретной величиной, принимающей конечное число значений, равное числу возможных аппаратных конфигураций, а \bar{v} – непрерывной, то для каждого ФР ξ известными методами, например, наименьших квадратов, аппроксимируется зависимость $P_\xi(v)$, заданная множеством точек $(v_k; P_k)_\xi$. При этом учитывается, что $P(\xi, 0) = 0, P(\xi, G) < 1 \forall \xi, \forall G$. Таким образом, построение зависимости $P(\xi, v)$ можно схематично выразить в виде

$$\{v(G_k); P(\xi_k, G_k)\} \rightarrow \{(v_k; P_k)_\xi\} \rightarrow P(\xi, v), P(\xi, 0) = 0, P(\xi, v) < 1 \forall \xi, \forall v.$$

Заключение

Оценивание «вычислительной мощности» как определяющего показателя БВК дает возможность свернуть параметры задач и быстродействия вычислительного комплекса и отражать структурную деградацию нижних уровней иерархии (отказов вычислительных узлов) на параметрическую деградацию характеристик (производительности вычислительных модулей) верхних уровней системы. Это позволяет перейти к обоснованию показателей качества БВК на более высоком уровне абстракции по сравнению с классическими (быстродействием, пропускной способностью каналов, временем доступа к памяти, вероятностью безотказной работы узлов и др.). При этом обоснованные допущения

позволяют формализовать возможные структуры БВК различных вариантов топологии широкого класса и стратегии управления ресурсами системой. В качестве целевой функции использована оценка интегрального коэффициента результативности функционирования БВК ПО в условиях детерминированных и случайных внутренних и внешних факторов с учетом его структурно-параметрической деградации.

Таким образом, предложенный подход, в отличие от известных, учитывает анализ условий функционирования БВК ПО, прогнозирование деградации с учетом воздействующих факторов и остаточного ресурса и позволяет оценить предельно возможную результативность его функционирования за срок активного существования ПО в целях решения оптимизационных задач управления. Его исследование показало непротиворечивость результатов моделирования и теоретических положений в области анализа многомодульных реконфигурируемых вычислительных систем. Следовательно, его применение представляется целесообразным при решении вопросов синтеза структуры и управления перспективных БВК ПО [5; 6].

Литература

1. Захаров И.В., Терехов В.Г., Соколовский А.Н. Превентивное конфигурирование бортовых вычислительных систем на основе прогнозирования их деградации // *Естественные и технические науки*. 2018. № 9 (123). С. 137–139. EDN YLEYOL.
2. Шульженко А.Д., Нечай А.А. Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки данных дистанционного зондирования земли // *Вестник Российского нового университета*. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2021. № 4. С. 183–195. EDN CIMETS. DOI 10.18137/RNU.V9I87.21.04.P.183
3. Захаров И.В. Модель перестраиваемой бортовой вычислительной системы в условиях возможной деградации // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2017. № 658. С. 144–152. EDN YMQSWW.
4. Забузов В.С., Захаров И.В., Кузнецов В.В. Модель функционирования реконфигурируемой бортовой вычислительной системы космического аппарата в условиях ее структурно-параметрической деградации // *Системы управления, связи и безопасности*. 2018. № 4. С. 176–195. EDN YPVHRJ. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/09-Zakharov.pdf>
5. Захаров И.В., Терехов В.Г., Соколовский А.Н., Зыкова С.С. 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. EDN XQASTT. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.22.04.P.39
6. Zakharov I.V., Shulshakov A.O., Zykova S.S. The choice of structures of heterogeneous information-computer systems based on the apparatus of genetic algorithms. *Intelligent technologies in transport*. 2022. No. 3 (31). Pp. 46–51. EDN IHRHII. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-331-46-51

References

1. Zakharov I.V., Terekhov V.G., Sokolovsky A.N. (2018) Preventive configuration of on-board computing systems based on forecasting their degradation. *Natural and technical sciences*. No. 9 (123). Pp. 137–139. (In Russian).
2. Shulshenko A.D., Nechai A.A. (2021) Methodology for determining the required values of the characteristics of the digital data processing system for remote sensing of the Earth. *Vestnik of the Russian*

New University. Series: Complex systems: Models, analysis and management. No. 4. Pp. 183–195. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.21.04.P.183 (In Russian).

3. Zakharov I.V. (2017) Model of a tunable onboard computer system in conditions of possible degradation. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy.* No. 658. Pp. 144–152. (In Russian).

4. Zabuzov V.S., Zakharov I.V., Kuznetsov V.V. (2018) Model of the reconfigurable on-board spacecraft computer system functioning under its structural-parametric degradation conditions. *Systems of Control, Communication and Security.* No. 4. Pp. 176–195. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/09-Zakharov.pdf> (In Russian).

5. Zakharov I.V., Terekhov V.G., Sokolovsky A.N., Zykova S.S. (2022) Reconfiguration of the on-board complex of a mobile object based on modeling variants of its structural degradation. *Vestnik of the Russian New University. Series: Complex systems: Models, analysis and management.* No. 4. Pp. 39–46. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.22.04.P.39 (In Russian).

6. Zakharov I.V., Shushakov A.O., Zykova S.S. (2022) The choice of structures of heterogeneous information-computer systems based on the apparatus of genetic algorithms. *Intelligent technologies in transport.* No. 3 (31). Pp. 46–51. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-331-46-51