

Труды МАИ. 2024. № 139
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья

УДК 681.5.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183468>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WVXLBK>

ДИНАМИЧЕСКИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Анатолий Михайлович Барановский¹, Анатолий Сергеевич Мусиенко²✉

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru✉

Аннотация. Техническое состояние (ТС) бортовых систем управления (СУ) летательных аппаратов (ЛА) контролируется при подготовке к применению и в ходе функционирования. Ошибки решений о текущем ТС могут быть вызваны рядом факторов, в том числе отказами средств контроля и диагностирования, неопределенностью измерений, методическими ошибками назначения допусков, неустойчивостью процессов контроля и диагностирования к значительным вариациям параметров бортовых систем, характеристик шумов, естественных и преднамеренных воздействий. В статье рассматривается задача обеспечения методической устойчивости процессов автономного контроля и диагностирования СУ ЛА.

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке моделей, методов и программ контроля СУ ЛА, обеспечивающих устойчивый контроль и поиск дефектов СУ сложных объектов.

Ключевые слова: система управления, модель, контроль технического состояния, диагностирование, устойчивость контроля

Для цитирования: Барановский А.М., Мусиенко А.С. Динамические диагностические модели и метод обеспечения устойчивости контроля технического состояния бортовых систем управления летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024.

№ 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183468>

Original article

DYNAMIC DIAGNOSTIC MODELS AND METHOD FOR ENSURING THE STABILITY OF MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF ON-BOARD CONTROL SYSTEMS OF AIRCRAFT

Anatoly M. Baranovsky¹, Anatoly S. Musienko²✉

Mozhaisky Military Space Academy,

Saint Petersburg, Russia

²yka@mil.ru✉

Abstract. This article considers the problem of searching for single defects in on-board systems (OS), specifically in space rocket control systems (SRCS). Single defects manifest

themselves as OS failures. A new search algorithm is proposed that reduces the number of search steps due to a combined strategy of partitioning the initial set of possible defects.

The proposed strategy includes the principle of half-partition and sequential enumeration of possible defects. It differs from known strategies such as full enumeration, half-partition and mixed strategy in that it allows not only to detect the presence of a defect, but also to identify specific chains that communicate with each other, with a minimum number of testing steps.

The obtained results of the study can be used in the development of devices for monitoring ground and onboard systems, which ensure monitoring and search for defects during the preparation of the launch vehicle for launch. External and internal factors can cause changes in the technical condition of electrical circuits during operation. Defects are especially dangerous and do not allow for the safe operation of products.

The aim of the study is to reduce the number of testing steps to detect the absence of accidents and failures in the event of a failure in the operation of an on-board system.

To achieve this goal, it is proposed to use an original heuristic algorithm for forming sets of tested chains. This algorithm allows forming a terminal minimal set of pairs of chains, assumed to have a failure. This approach reduces the number of necessary pairwise checks at the stage of sequential enumeration of tested systems.

In conclusion, the proposed strategy for searching for single defects is the best one, since it requires fewer elementary checks for monitoring and failure. The implementation of such a strategy is relatively simple with modern monitoring tools based on computing

devices and switching devices. The assumption of a single failure is acceptable for normal operating conditions, but in case of deviations, a repeated cycle of checks is necessary.

Keywords: control system, model, technical condition monitoring, diagnostics, control stability

For citation: Baranovsky A.M., Musienko A.S. Dynamic diagnostic models and method for ensuring the stability of monitoring the technical condition of on-board control systems of aircraft. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183468>

Введение

Обобщенная структурная схема контроля и управления состоянием бортовых систем (БС) ЛА, состоящая из трех контуров, выглядит следующим образом (рис.1). Структурная схема включает: СИО – система исполнительных органов; ОУ – объект управления; ЧЭ – чувствительные элементы; БУ – блок управления (БЦВМ); СУТС – система управления техническим состоянием; ЭУТС – элементы управления ТС; СК – система контроля; УС – устройства согласования; И – измерители; П – преобразователи; ГТ – генераторы тестов; А – анализатор ТС; ПУ – программное устройство.

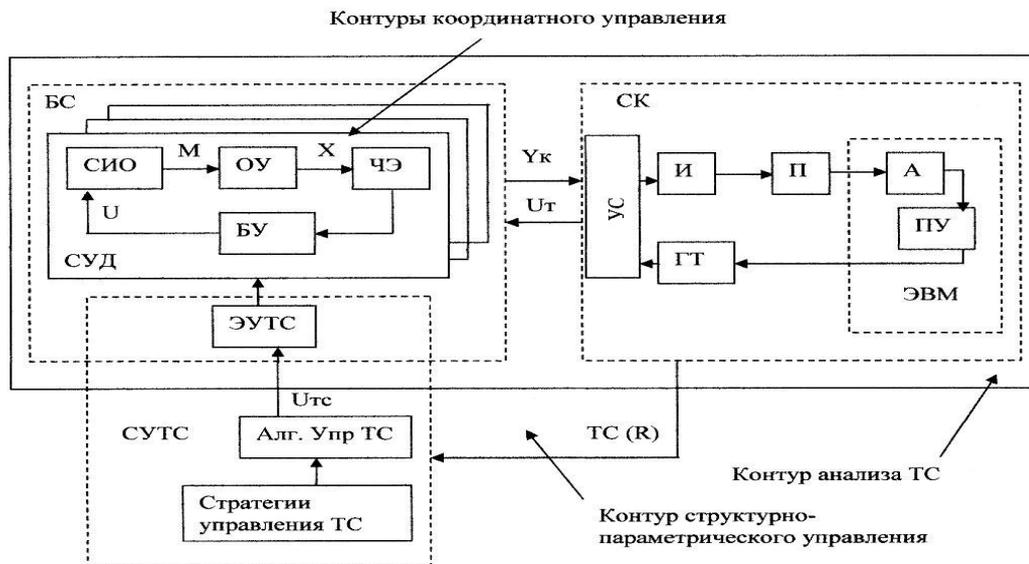


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема контроля и управления техническим состоянием СУ ЛА.

Бортовые системы предназначены для координатного управления ЛА в целом, например, угловым движением ЛА или процессами в ЛА (терморегулирование и т.п.). СК выполняет функции реагирующего органа по отношению к ТС БС, а СУТС – регулирующего органа процесса поддержания ТС БС. При этом под координатным управлением понимается управление в пространстве состояний (например, на фазовой плоскости с координатами угла стабилизации и угловой скорости). Контур анализа ТС обеспечивает получения данных о виде ТС БС. Контур структурно-параметрического управления обеспечивает восстановление работоспособности БС или реализует управление процессом постепенной деградации работоспособности за счет включения ресурсов парирования дефектов СУ.

Контроль и диагностирование (КД) СУ – типичная задача из класса обратных: по результатам наблюдений признаков необходимо определить вид технического состояния, соответствующий наблюдаемым признакам [1,3,4,7]. Следовательно, как и всякая классическая обратная задача, задача КД решается не всегда корректно. Решение о текущем ТС СУ не всегда соответствует истинному состоянию не только из-за погрешностей измерений или оценивания признаков, ошибочного выбора и методических погрешностей назначения допусков на признаки, но и по причине некорректности постановки обратной задачи в пространстве диагностических признаков. Для исключения этого при разработке устойчивых алгоритмов КД область корректности постановки задачи КД в пространстве диагностических признаков должна быть заранее исследована и определена.

В настоящее время не существует целостной и апробированной теории устойчивости КД, не определены показатели и критерии устойчивости. Наибольшее распространение получили такие характеристики КД как достоверность и оперативность. В качестве показателя степени охвата СУ контролем выдвигается показатель полноты [3, 6]. Интегральным показателем качества процессов КД является достоверность – степень соответствия результатов контроля истинному техническому состоянию СУ [3,7,8]. Однако достоверность КД может быть определена на различных множествах ТС. Если во множество ТС, на котором определяется достоверность, включить ТС на которых СКД теряет работоспособность (задача КД становится некорректной как обратная), то в этом случае показатель достоверности не будет объективно отражать свойства процессов

КД и в целом качество СКД. Неустойчивость собственных движений СКД приводит в первую очередь к ложным заключениям о наличии отказов СУ, что свою очередь приводит к нерациональному управлению ТС СУ – ускоренному расходу имеющихся резервов. Наиболее опасным последствием такой ситуации являются необнаруженные отказы СУ, приводящие к авариям и катастрофам.

Сущность проблемы отражает рис.2.

Повышение устойчивости процессов КД приводит к снижению как уровня ложных отказов, так и снижает вероятность не обнаружения отказов, которые могут приводить к авариям и катастрофам.



Рисунок 2 - Графическое представление проблемы повышения устойчивости систем контроля и диагностирования СУ.

Таким образом, для совершенствования теоретических основ построения СКД с системных позиций необходимо ввести системное свойство – устойчивость СКД, определить показатели и критерии устойчивости СКД.

Понятие устойчивости контроля и постановка общей задачи обеспечения устойчивости контроля и диагностирования СУ

В теории автоматического управления введено понятие «эвентуальная устойчивость», под которой понимается потенциальная (возможная) устойчивость [2]. Аналогичный смысл вкладывается в статье в понятие устойчивости КД при решении задач оценивания технических состояний систем управления.

Физический смысл понятия эвентуальной¹ [2] устойчивости СКД в пространстве двух параметров (например, параметров передаточных функций конструктивных блоков СУ) представлен на рисунке 3.

Процесс КД устойчив на множестве ТС и условий функционирования $R_y \in \mathfrak{R}^N$, если для всякого $\varepsilon > 0$ все траектории в пространстве диагностических признаков начинающиеся в начальном техническом состоянии $ТС_n$ (или в его окрестности) при $t=0$ не выходят из ε -окрестности текущего ТС при $t > t_d$ (t_d – время диагностирования).

¹ Эвентуальная – возможная при определенных обстоятельствах (потенциальная).

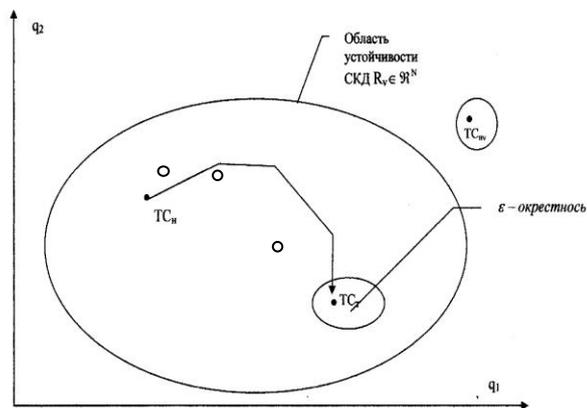


Рисунок 3 - Графическое представление области устойчивости систем контроля и диагностики.

Если система находится в техническом состоянии TC_{ny} (за пределами области устойчивости), то процесс КД не дает достоверной информации о ТС системы.

Математическая постановка задачи обеспечения эвентуальной устойчивости контроля СУ может быть сформулирована следующим образом.

Пусть произвольная СУ (Σ), состоящая из некоторого числа подсистем (Σ_j), $j \in \overline{1, n}$ ($n \in N$), каждая из которых содержит σ_k^j , $k \in \overline{1, \ell_j}$, ($\ell_j \in N$) элементов, функционирует на временном интервале $T^{(\Sigma)} = [t, v]$, $t < v < \infty$ под действием некоторой стратегии управления U [6].

Известны модели подсистем (Σ_j):

$$\Sigma_j = \langle T, U, X, Y, X_0, Q, \eta, \chi, F, \Phi, H \rangle, \quad (1)$$

где T - множество моментов времени t , в которые наблюдается подсистема; U , Y - множества входных $U_{\langle \gamma \rangle}$ и выходных $Y_{\langle \downarrow \rangle}$ сигналов подсистем СУ соответственно;

\mathbf{X} - вектор состояния подсистем Σ_j ; \mathbf{X}_0 - вектор начальных состояний; \mathbf{Q} - вектор параметров СУ, отклонения которых порождает виды технических состояний; $\boldsymbol{\eta}$ – вектор случайных возмущений СУ; $\boldsymbol{\chi}$ - вектор шумов измерений; \mathbf{F} - оператор переходов, $\mathbf{F}: \mathbf{T} \times \mathbf{X} \times \mathbf{U} \times \mathbf{Q} \times \boldsymbol{\eta} \rightarrow \mathbf{X}$; Φ - оператор выходов, $\Phi: \mathbf{T} \times \mathbf{X} \times \mathbf{U} \times \mathbf{Q} \times \boldsymbol{\chi} \rightarrow \mathbf{Y}$, \mathbf{H} - оператор управления $\mathbf{H}: \mathbf{T} \times \mathbf{Y} \times \mathbf{Q} \rightarrow \mathbf{U}$.

Введем \mathbf{Q}_0 - базовый (номинальный или полученный на предыдущем цикле контроля) вектор параметров элементов системы Σ и \mathbf{S} - множество рассматриваемых видов технических состояний в пространстве параметров $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^m$ элементов СУ, изменяющих операторы \mathbf{F} , Φ , \mathbf{H} , то есть порождающих виды технических состояний.

Необходимо определить условия обеспечения устойчивости и пути повышения устойчивости КД технического состояния описанных динамических систем.

Условия устойчивости КД

Рассмотренная математическая модель позволяет описать возможные вариации ТС. Вариации технических состояний вызываются отклонениями параметров \mathbf{Q} СУ. Наличие отклонений $\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0$ вызывает дополнительные движения СУ: дополнительные вариации вектора состояний

$$\Delta \mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t, \mathbf{Q}) - \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Q}_0, \mathbf{U}, \boldsymbol{\eta}, t),$$

и, соответственно, дополнительные координатные движения СУ

$$\Delta y(t) = Y(t, Q) - F(X, Q_0, U, \eta, t),$$

на основе которых вырабатываются дополнительные управляющие воздействия.

Обобщенно представим

$$\Delta \Psi_{\langle \lambda \rangle}(t) = \Delta \Psi_{\langle \lambda \rangle}(t, Q) - \Delta \Psi_{\langle \lambda \rangle}(Q_0, t), \quad (2)$$

где $\Psi_{\langle \lambda \rangle}$ - обобщенный вектор наблюдаемых движений вектора состояния и наблюдения;

λ - число наблюдаемых движений.

Дополнительные координатные движения СУ могут быть зафиксированы штатными чувствительными элементами (ЧЭ), системой телеметрии или дополнительными средствами контроля (например, испытательными комплексами при подготовке ЛА к применению). На основе полученных измерений формируются данные для решения диагностической задачи. Несмотря на большое количество методов контроля и диагностирования, все они в основном сводятся к решению логических или трансцендентных уравнений [4,5, 9], общий вид которых представлен (2).

Введем $\Psi_q = \frac{\partial \Psi}{\partial Q}$ - матрицу чувствительности, то есть матрицу частных производных от функций вектора дополнительных движений по составляющим вектора параметров СУ. Тогда наблюдаемые дополнительные движения можно связать с отклонениями параметров СУ в окрестности Q_0

$$\Delta\Psi_{\langle\lambda\rangle} = \Delta\Psi_q \Delta Q, \quad (3)$$

Матрица чувствительности размерностью ($\lambda \times m$) состоит из векторов чувствительности $\Psi_{\lambda_1}, \Psi_{\lambda_2}, \dots, \Psi_{\lambda_m}$, где m - число оцениваемых параметров СУ.

Решением матричного уравнения (3) является вектор

$$\Delta Q_{\langle m \rangle} = \Psi_q^{-1} * \Delta\Psi_{\langle \lambda \rangle},$$

при условии, что ранг матрицы Ψ_q больше или равен m : $\text{Rank } \Psi_q \geq m$, а определитель не равен нулю: $\det \Psi_q \neq 0$.

В этом случае решается задача идентификации (оценивания) отклонений параметров системы относительно номинальных, по которым можно судить о работоспособности конструктивных блоков СУ.

Таким образом, условия устойчивости СКД при оценивании технических состояний через решение уравнений идентификации (3) будут следующими:

- линейная независимость векторов чувствительности

$$\Psi_{\lambda_1}, \Psi_{\lambda_2}, \dots, \Psi_{\lambda_m},$$

- сохранение чувствительности матрицы $\Psi_q = \frac{\partial \Psi}{\partial Q}$ в области потенциальной устойчивости СКД;

- ранг матрицы чувствительности больше (или равен) числа m оцениваемых параметров СУ.

Пути обеспечения устойчивости контроля и диагностирования СУ

Сформулируем основные пути повышения устойчивости контроля и диагностирования бортовых СУ, вытекающие из рассмотрения математической модели (1) и возможных вариаций ТС (2). Такими путями являются:

1) целенаправленное изменение структуры матрицы Ψ_q в условиях активного тестирования за счет отключения (включения) контуров СУ путем:

- внесения изменений в оператор H ;
- вариаций операторов Φ, φ ;

2) уменьшение влияния возмущений и шумов за счет применения специальных режимов тестирования и наблюдения, приводящих к взаимной компенсации возмущений и шумов на интервале наблюдения [3,4,5,10].

Для обобщения реализации путей обеспечения устойчивости СКД динамическую модель диагностического процесса (Σ_j) представим четверкой моделей:

$$:\{D^{(N)} \cdot (\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}, \Omega^{(\Sigma_j)}); \mu^{(\Sigma_j)} \varepsilon(N, \delta, a \lg(\Sigma), a \lg(\Sigma_j)); \\ \{\Omega^{(\Sigma_j)}(\tau); \Delta m([t; \mathcal{G}])\}$$

где $\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}$ – разбиение множества (Σ_j) , образующее его покрытие;

$\Omega^{(\Sigma_j)}$ – множество допустимых текущих состояний системы (Σ_j) ,

$G(\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}, \Omega^{(\Sigma_j)})$ - взаимно-однозначное отображение функционирования элементов разбиения $\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}$ на функционирование системы;

$D^{(N)} \cdot (\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}), G(\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}, \Omega^{(\Sigma_j)})$ – множество, определяющее класс всех согласованных моделей, отвечающих разбиению $\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}$;

$\Delta m([t, \mathcal{G}]) = \{ \tau_i : i \in \overline{1, m}; t < \tau_i < \tau_{i+1} \leq \mathcal{G} \}$ – множество временных участков интервала функционирования системы, разбитого на $m \in N$ частей;

$\mu^{(\Sigma_j)}_{\varepsilon}(N, \delta, \text{alg}(\Sigma), \text{alg}(\Sigma_j)) = \{ [D^{(N)} \cdot (\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}, \Omega^{(\Sigma_j)}) ; \rho(\varphi^{(\Sigma_j)}, \Omega^{(\Sigma_j)}); \Omega^{(\Sigma_j)} ;$

$\Delta^{\delta} m([t, \nu])] ; W(\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}, r^{(\Sigma_j)}(\rho^{(\Sigma_j)}), \varepsilon) ;$

$r^{(\Sigma_j)}(\rho(\varphi^{(\Sigma_j)}(\tau), \Omega^{(\Sigma_j)}), Q(\sigma^{(i)})) \}$, - стратегия поиска дефекта, в которой $\rho(\varphi^{(\Sigma_j)}, \Omega^{(\Sigma_j)})$ – функция, определяющая условие принадлежности элемента множеству $\Omega^{(\Sigma_j)}$;

$W(\Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)}, r^{(\Sigma_j)}(\rho^{(\Sigma_j)}), \varepsilon) \mapsto \Gamma^{(N)}_{(\Sigma_j)} \Gamma^{(N)}_{(\Sigma^*_j)}$ – оператор

отображения в сужение разбиения (Σ_j) , содержащее $Q(\sigma^{(i)})$ - вектор искомых (проверяемых) параметров;

$r^{(\Sigma_j)}(\bullet)$ – отображение обладающее неподвижной точкой относительно $Q(\sigma^{(i)})$

$\tau \in \Delta^{\delta} m([t, \nu]) = \{ \tau_i : i \in \overline{1, m}; m \in N : \max_{i \in \overline{1, m}} (\tau_{i+1} - \tau_i) \leq \delta \}; \varepsilon \in [0, \infty)$ -

параметр (точности).

Графическое представление диагностического процесса иллюстрирует рисунок 4. Развитие диагностического процесса определяется стратегией контроля и

диагностирования (КД), которая формируется на основе текущих оценок технического состояния СУ. Стратегия определяет структурные вариации СУ через разбиения $\Gamma^{(N)}(\Sigma_j^*)$ и дополнительное управление генератора тестов (ГТ) U_T . Динамика СУ определяется ее моделью (1). Вектор наблюдений Y позволяет организовать дополнительные обратные связи через ГТ и моделировать диагностический процесс (ДП) с помощью модели ДП. На основе моделирования уточняются оценки ТС, которые в свою очередь являются управляющими параметрами стратегии. Цикличность процессов при обеспечении условий устойчивости вновь образованной динамической системы (ДС) $ДС = \langle СУ - СКД \rangle$ (включающей СКД и объект контроля и диагностирования – СУ) позволяет последовательно сужать множество элементов СУ, подозреваемых в появлении структурно-параметрических нарушений СУ, вызывающих наблюдаемые дополнительные приращения векторов X и Y .

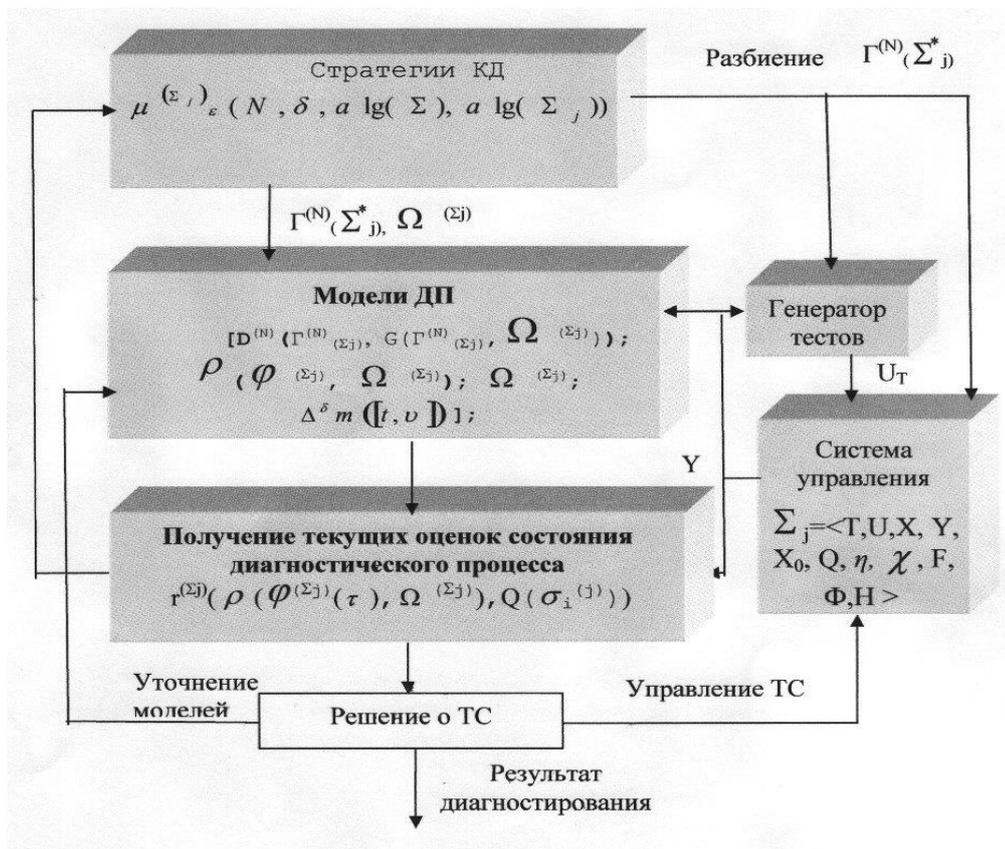


Рисунок 4 - Схема процесса функционально-тестового контроля и диагностирования

СУ

Функциональные разбиения СУ

При организации функционального контроля и диагностирования СУ возникает необходимость вариаций структуры системы для повышения устойчивости процедур анализа технического состояния. Такие преднамеренные изменения структуры и (или) параметров модели СУ могут осуществляться в ограниченных пределах. Ограничения накладываются исходя из требований к качеству функционирования СУ. Предельными (крайними) случаями ограничений являются:

- отсутствие каких-либо требований к качеству целевого функционирования СУ (тестовый контроль и диагностирование);

- максимальные требования к качеству целевого функционирования СУ, не допускающие малейших отклонений от исходной модели СУ (только пассивное наблюдение за поведением СУ).

Между этими предельными ситуациями существует диапазон, в котором допустимы изменения структуры (параметров модели) не приводящие к потере качества управления в соответствующих пределах. Примерами таких ситуаций могут служить вариации структуры системы управления угловым движением (СУУД) ЛА, в пределах которых обеспечивается точность угловой стабилизации ЛА (или быстродействие и точность программных поворотов). Могут быть отключены отдельные каналы измерений, изменены законы управления, обработки данных и т.п.

В связи с этим необходимо ввести понятие функционального разбиения СУ, обеспечивающего целевое функционирование системы - с одной стороны и решение задач контроля (диагностирования) – с другой.

Рассмотрим систему стабилизации (Σ) для которой известна математическая модель вида:

$$\begin{aligned}
 &F^{(\Sigma)}(X^{(\Sigma)}, \dot{X}^{(\Sigma)} U^{(\Sigma)}, Q^{(\Sigma)}, \tau) = 0, \\
 &\text{где } X^{(\Sigma)} \in E_{X^{(\Sigma)}} \subset R^{\dim(\Sigma)}, \quad \dot{X}^{(\Sigma)} \triangleq \frac{d}{d\tau} [z^{(\Sigma)}] \in E_{X^{(\Sigma_j)}} \subset R^{\dim(\Sigma)}, \\
 &Q^{(\Sigma)} \in E_{Q^{(\Sigma)}} \in R^{\dim Q^{(\Sigma)}}, \\
 &\tau \in T = [t, \vartheta], t \prec \vartheta \prec \infty, \quad U^{(\Sigma)} : E_{(\cdot)} \times E_{(\cdot)} \times [t, \sigma] \rightarrow E_{U^{(\Sigma)}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

В (3): $X^{(\Sigma)}$ – вектор состояния (Σ), $U^{(\Sigma)}$ – стратегия управления (Σ), $Q^{(\Sigma)}$ – параметры конструктивных элементов (Σ), τ -время.

Отображение $F^{(\Sigma)} : E_{X^{(\Sigma)}} \times E_{\dot{X}^{(\Sigma)}} \times E_{v^{(\Sigma)}} \times T \rightarrow E_{F^{(\Sigma)}}$ непрерывно и непрерывно

дифференцируемо по совокупности переменных.

В ходе функционирования (Σ) наблюдению доступен вектор

$$Y^{(\Sigma)} = H^{(\Sigma)}(z^{(\Sigma)}, Q^{(\Sigma)}, U^{(\Sigma)}, \tau),$$

где $Y^{(\Sigma)} \in E_{Y^{(\Sigma)}} \subset R^{\dim Y^{(\Sigma)}}$, $H^{(\Sigma)} : E_{z^{(\Sigma)}} \times E_{Q^{(\Sigma)}} \times E_{U^{(\Sigma)}} \times [\tau, \vartheta] \rightarrow E_{Y^{(\Sigma)}}$. 5)

Необходимо оценить параметры $Q^{(\Sigma)}$, обеспечивая выполнение установленных ограничений.

Открытым вопросом в решении данной задачи остаётся стратегия разбиения (Σ) для получения (6), обеспечивающего быструю сходимость процесса идентификации вектора конструктивных параметров $Q_{\langle \lambda \rangle}^{(\Sigma)}$. Введём определения.

Определение 1. Разбиением множества (Σ) называется семейство Γ_{Σ}

$$j = \overline{1, N} \ (N \in N) \text{ состоящих из элементов } \Gamma_{\pi}^{(j)}, \pi = \overline{1, n_j} \ (n_j \in N), \text{ если}$$

$$\text{подмножеств } (\Sigma_j), \bigcup_{\sigma \in \Gamma_{\Sigma}} \sigma = \Sigma$$

$$Q \cap S = \emptyset \ (s \in \Gamma_{\Sigma}, \sigma \in \Gamma_{\Sigma}, s \neq \sigma).$$

Семейство Γ_{Σ} образует покрытые множества

$$(\Sigma^*) \subset (\Sigma), \text{ если } (\Sigma^*) \subset \bigcup_{\sigma \in \Gamma_{\Sigma}} \sigma$$

Пусть $\Gamma_{\Sigma}^{(N)} : \overline{1, N} \rightarrow \Gamma_{\Sigma}$, $\forall j \in \overline{1, N} \ \Sigma_j \subset \Gamma_{\Sigma}$ и определена математическая модель (3,4).

Разбиение $\Gamma_{\Sigma}^{(N)}$ включает пересекающиеся подмножества, среди которых имеются подмножества обеспечивающие нормальное функционирование (Σ) в

вышеопределенном смысле, и подмножества используемые для тестирования (Σ) при решении задач поиска неисправных элементов (Σ).

Определение 2. Функциональным разбиением (Σ), обеспечивающим решение задач идентификации $Q^{(\Sigma)}$, называется разбиение

$$\begin{aligned} \Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})} : \overline{1, N^{\Phi}} &\rightarrow \Gamma_{\Sigma}^{(N)}, i = \overline{1, l}, j = \overline{1, N^{\Phi}} \left(N^{\Phi} \in N \right) \\ \Delta Z_{ij} &\leq \varepsilon \\ \text{rank } G_{ij} &\geq \lambda. \end{aligned}$$

Определение 3. Оптимальным функциональным разбиением (Σ) называется разбиение

$$\begin{aligned} \Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})} : \overline{1, N^{\Phi}} &\rightarrow \Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})}, \text{ если } C \left(\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})} \right) = \min C \left(\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})} \right) \\ &\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})} \in \Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})}, \\ &\pi = \overline{1, \varphi}, \varphi \in N \end{aligned} \quad (6)$$

где $C \left(\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})} \right)$ - затраты (временные, ресурсные и т.п.), связанные с тестированием и принятием решения о техническом состоянии (Σ).

Процесс получения оптимального разбиения $\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})}$ может быть подчинен следующей методике:

1. Формирование устойчивых структур (Σ_j), $j = \overline{1, N^{\Phi}}$ на множестве элементов (Σ).

2. Моделирование процессов тестирования (Σ_j) с целью проверки выполнения ограничений и получения оценок затрат.
3. Выбор $\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})}$ на множестве $\Gamma_Z^{(N^{\Phi})}$ в соответствии с (6).

Подбор приемлемых параметров генератора также осуществляется на предварительном этапе. Он может быть проведен в рамках описанной выше методики формирования $\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})}$.

В целом процесс идентификации в соответствии с предлагаемым методом состоит из трех основных этапов:

1. Теоретическое исследование (Σ), формирование $\Gamma_{\Sigma}^{(N^{\Phi})}$ и выбор параметров генератора.
2. Тестирование СУС (ДС).
3. Получение оценки $\hat{Q}^{(\Sigma)}$.

Пример устойчивого оценивания технического состояния СУ ЛА

Ниже представлен частный пример решения этапа оценивания вектора параметров $Q(\sigma_i^{(j)})$ методом параметрической идентификации для системы угловой стабилизации (СУС) летательного аппарата (ЛА) с применением в качестве генератора тестовых сигналов нелинейного звена с петлей гистерезиса (выходной сигнал $\pm c$) в цепи обратной связи системы [4,5,11,12]. Уравнения идентификации составлены на основе описания динамики СУ ЛА методом припасовывания [5, 14].

K_y - передаточная функция усилителя; K_{oc} - передаточная функция обратной связи по управлению; $\frac{K_n}{p}$ - передаточная функция исполнительного органа.

Графики относительных ошибок идентификации параметров СУС от шага (n) поиска решений уравнений идентификации, составленных на основе наблюдений дополнительных движений СУС в режиме информационных колебаний относительно оси стабилизации, методом наискорейшего спуска представлены на рисунке 6.

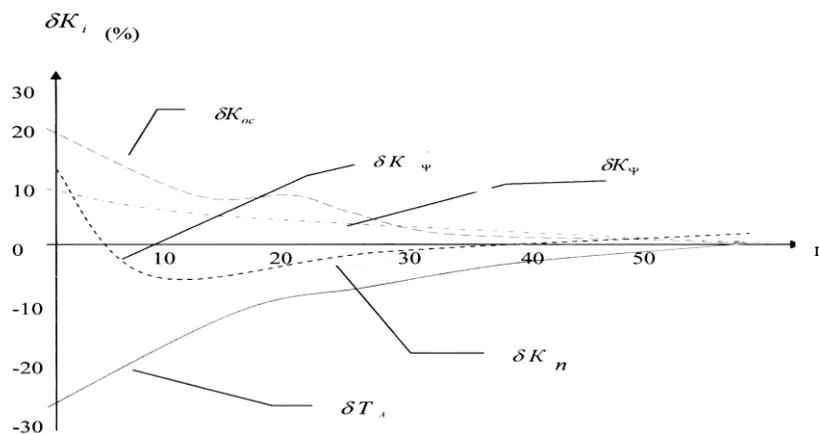


Рисунок 6 - Графики отклонений оценок параметров СУС от номера шага поиска корней уравнения идентификации методом наискорейшего спуска.

Из графиков следует, что даже при грубом начальном приближении (априорных данных о параметрах) – ошибке в диапазоне (- 30; +20)% - оценки параметров СУС сходятся к истинным (с погрешностью менее 1%) уже на 50 шаге вычислительного процесса. Сходимость оценок параметров СУС к истинным

обеспечивает сходимость диагностического процесса (рисунок 1) к истинному техническому состоянию, то есть обеспечивает устойчивость контроля и диагностирования СУС выбранным набором моделей, методов и средств решения задачи.

Заключение.

Рассмотренный общий подход обеспечения устойчивости контроля на основе построения динамических диагностических моделей применим не только для динамических объектов контроля. Предложенная концепция решения задачи может быть применена для контроля статических объектов (например, контроля связей между составными частями СУ) [13].

В приведенном примере устойчивость процесса оценивания технического состояния СУС обеспечивается соответствующей стратегией разбиений СУС на априори устойчивые конфигурации управления динамикой (вектором состояния) и выбором параметров нелинейного генератора тестовых управляющих воздействий. Эти же меры в конечном результате приводят к устойчивости оценивания технического состояния СУС при неопределенности характеристик шумов и возмущений, так как в процессе динамического тестирования обеспечивается специальный режим функционирования СУС – автоколебания относительно программных траекторий. Параметры возможных колебаний определяются аналитически при формировании разбиений СУ и их теоретическом исследовании. В процессе наблюдения параметров колебаний на заданном количестве периодов достигается взаимокompенсация и усреднение влияния возмущений, что

обеспечивает нечувствительность предложенного метода к виду и параметрам распределений шумов и возмущений, к деградации метрологических характеристик средств измерений, отражающих случайные составляющие (неопределенность) процесса и результатов наблюдений (параметр ε в диагностической модели).

Список источников

1. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. ГОСТ Р 27.102-2021. - М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 45 с.
2. Воронцов В.А. Федоров Е.А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=58817>
3. Дорожко И.В., Копейка А.Л., Осипов Н.А. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 671. С. 303-313.
4. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ В 20.911-89. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 12 с.
5. Клюев В.В. и др. Технические средства диагностирования: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 671 с.

6. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 485 с.
7. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного государственного технического университета, 2010. – 218 с.
8. Гусеница Я.Н., Дорожко И.В., Кочанов И.А., Петухов А.Б. Научно-методический подход к оцениванию готовности сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90383>
9. Дорожко И.В., Мусиенко А.С. Модель мониторинга технического состояния сложных устройств с применением искусственного интеллекта // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>
10. Дорожко И.В., Кочанов И.А., Осипов Н.А., Бутырин А.В. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 652. С. 137–146.
11. Копейка Е.А., Вербин А.В. Методический подход вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)

12. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
13. Привалов А.Е., Дорожко И.В., Захарова Е.А., Копейка А.Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=101526>
14. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. - СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
15. Барановский А.М. Диагностирование коротких замыканий электрических цепей // НТК «Проблемные вопросы проектирования и эксплуатации бортовых и наземных систем управления объектов ракетно–космической техники РВСН: тезисы докладов. - СПб: МО РФ, 1999. С. 89.
16. Захарова Е.А., Барановский А.М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом показателей качества диагностирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 124–132.
17. Осипов Н.А., Мусиенко А.С. Повышение обоснованности выборочного контроля бортовой системы при эксплуатации космических средств // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180675>
18. Копкин Е.В., Чикуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по

критерию ценности получаемой информации // Труды СПИИРАН. 2015. № 4(41). С. 106-130.

19. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168196>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)

20. Тарасов А.Г., Миляев И.К., Мусиенко А.С. Модель оценки коэффициента готовности электрических кабельных систем космических средств, учитывающая особенности определения технического состояния // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175923>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

References

1. *Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"ekta. Terminy i opredeleniya. GOST R 27.102-2021.* (Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and definitions: GOST R 27.102-2021). Moscow: FGBU «RST» Publ., 2021, 45 p.

2. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. Development of a prototype of an intelligent system for operational monitoring and technical condition of the main onboard systems of the spacecraft. *Trudy MAI.* 2015. No. 82. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58817>

3. Dorozhko I.V., Kopeika A.L., Osipov N.A. A simulation model for estimating the readiness coefficient of complex technical complexes taking into account indicators for

monitoring and diagnosing the technical condition. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 671, pp. 303-313. (In Russ.).

4. *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya. GOST V 20.911 89.* (Technical diagnostics. Terms and definitions. GOST V 20.911 89.). Moscow: Istandarty Publ., 1990, 12 p.

5. Klyuev V.V. et al. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya* (Technical diagnostic tools: reference). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 671 p.

6. Bochkarev S.V., Tsaplin A.I. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem* (Diagnostics and reliability of automated systems). Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2008. 485 p.

7. Gumenyuk V.M. *Nadezhnost' i diagnostika elektrotekhnicheskikh sistem* (Reliability and diagnostics of electrical systems). Vladivostok: Dal'nevostochnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2010. 218 p.

8. Gusenitsa Ya.N., Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Petukhov A.B. Scientific and methodological approach to assessing the readiness of complex technical complexes taking into account metrological support. *Trudy MAI*. 2018. No. 98. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90383>

9. Dorozhko I.V., Musienko A.S. A model for monitoring the technical condition of complex devices using artificial intelligence. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181885>

10. Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Osipov N.A., Butyrin A.V. Complex model of reliability and diagnostics of complex technical systems. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*. 2016. No. 652. P. 137–146. (In Russ.).
11. Kopeika E.A., Verbin A.V. Methodological approach to the probability of trouble-free operation of complex technical systems, taking into account the characteristics of the control system based on the Bayesian network of trust. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171411>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-22)
12. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. The influence of control characteristics on system reliability indicators. *Trudy MAI*. 2016. No. 85. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67501>
13. Privalov A.E., Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Kopeika A.L. Simulation model for estimating the availability coefficient of complex technical systems taking into account the characteristics of the diagnostic process. *Trudy MAI*. 2018. No. 103. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101526>
14. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of reliability theory). Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2006. 702 p.
15. Baranovskii A.M. Diagnostics of short circuits of electrical circuits. *NTK «Problemye voprosy proektirovaniya i ekspluatatsii bortovykh i nazemnykh sistem upravleniya ob"ektov raketno–kosmicheskoi tekhniki RVSN: tezisy dokladov*. Saint Petersburg: MO RF Publ., 1999. P. 89.

16. Zakharova E.A., Baranovskii A.M. A model for assessing the readiness of complex technical systems taking into account diagnostic quality indicators. *Trudy Voennokosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*. 2019. No. 669. P. 124–132. (In Russ.).
17. Osipov N.A., Musienko A.S. Increasing the validity of selective control of the on-board system during the operation of space assets. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.).
URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180675>
18. Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleinik V.V., Lazutin O.G. Algorithm for constructing a flexible program for diagnosing a technical object according to the criterion of the value of the information received. *Trudy SPIIRAN*. 2015. No. 4(41). P. 106-130. (In Russ.).
19. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaichenko P.Yu. A model for evaluating the effectiveness of management of multi-satellite orbital systems. *Trudy MAI*. 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168196>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-24)
20. Tarasov A.G., Milyaev I.K., Musienko A.S. A model for estimating the availability coefficient of electric cable systems of space assets, taking into account the peculiarities of determining the technical condition. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175923>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-17)

Статья поступила в редакцию 29.08.2024

Одобрена после рецензирования 08.09.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 29.08.2024; approved after reviewing on 08.09.2024; accepted for publication on 25.12.2024