

Труды МАИ. 2021. № 121
Trudy MAI, 2021, no. 121

Научная статья

УДК 629.7

DOI: [10.34759/trd-2021-121-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-18)

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ ПАРАМЕТРОВ

Дмитрий Олегович Зайцев^{1✉}, Дмитрий Александрович Павлов²,

Екатерина Алексеевна Нестечук³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3}vka@mil.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается задача организации обработки быстроменяющихся телеметрируемых параметров и контроля по ним технического состояния бортовых систем космических средств, которая является особенно актуальной в условиях ограничений, накладываемых ее выполнением в режиме реального времени, т.е. при ведении «репортажа» о полете ракеты-носителя. Новизна методики заключается в обосновании порядка выбора оцениваемых характеристики бортовых систем с учетом удовлетворения требований по полноте принимаемого решения в условиях временных ограничений. Приведен пример практического

расчёта применения методики и сделаны выводы о целесообразности её применения при анализе технического состояния бортовых систем космических средств.

Ключевые слова: контроль технического состояния, бортовые системы ракет-носителей, показатель полноты контроля, методы оптимизации, быстроменяющиеся параметры, реальный масштаб времени

Для цитирования: Зайцев Д.О., Павлов Д.А., Нестечук Е.А. Методика контроля технического состояния бортовых систем ракет-носителей на основе обработки быстроменяющихся параметров // Труды МАИ. 2021.№ 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-18)

METHODOLOGY FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF ONBOARD LAUNCH VEHICLE SYSTEMS BASED ON THE PROCESSING OF RAPIDLY CHANGING

Dmitry O. Zaitsev^{1✉}, Dmitry A. Pavlov², Ekaterina A. Nestechuk³

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint-Petersburg, Russia

^{1,2,3}yka@mil.ru ✉

Abstract. The article proposes a technique for monitoring the technical condition of on-board systems of space-rocket and technology based on the rapidly changing parameters processing on a time scale close to real. This technique novelty lies in the proposal of a new of quality indicators system, on which base the estimated characteristics of rapidly changing

parameters are being selected for the technical condition monitoring of onboard systems of space rockets at the operational processing stage. The process of initial data preparation for the of diagnostic signs forming based on the rapidly changing parameters processing to analyze technical condition of the onboard systems of space-rocket technology at the operational stage is under consideration.

The task of rapidly changing parameters processing on real-time scale is being set, and both restrictions and goal function are being described. The authors propose a quality indicators system, by which the decision is made on one or another alternative selection. The article presents classification of methods for optimization problems solving, as well as optimization methods, on which basis statistical search method for the set problem solution was selected.

The system of indicators, which includes indicators of accuracy and efficiency of rapidly changing parameters' characteristics processing option, as well as of the technical condition monitoring completeness indicator of onboard systems of space rocket-technology is disclosed.

The article solves the problem of the rapidly changing parameters processing option selection the best by the efficiency indicators with account for accuracy limiting, as well as by the technical condition monitoring completeness indicator of onboard systems of space rocket-technology. A practical example of this technique application in the object domain is presented. Certain characteristics of rapidly changing parameters of the space-rocket technology from documentation, as well as the set of initial data for the set of alternatives forming were employed as a practical example.

The developed technique includes a number of steps. At the first step, the initial data is being formed as a set of all alternatives. At the second step, a set of alternatives, reduced according to the accuracy indicator, is being formed from the one obtained at the previous step. At the third step, a set of alternatives, reduced according to the technical condition monitoring completeness indicator of onboard systems of space rocket-technology, is formed from the one obtained at the previous step. At the fourth step, the best set of characteristics is being formed in terms of completeness indicator, which can be processed on a real-time scale. At the fifth step, a set of diagnostic features from the characteristics of rapidly changing parameters is being combined with the existing set of diagnostic features. A new requirement for the telemetering program and for making changes to the instructions for evaluating the operation of on-board systems of space rockets is being formed at this step

A set of 26250 alternatives is presented as an example. The number of alternatives was obtained as the number of combinations from the ten characteristics of rapidly changing parameters extracted from the documentation on telemetry information processing of the Soyuz-2 launch vehicle, three methods of characteristics processing, five window functions, five options for window function size, five options for window function steps and seven options for processing nodes. This number is being considered for an example, since the Soyuz-2 launch vehicle uses 369 characteristics and much more other variables. A complete set of variables consideration is impractical, since it will lead to the need for about two million alternatives considering.

Inferences on the presented technique applicability in the object area to form diagnostic signs for the technical condition analyzing of onboard systems of rocket and

space technology are drawn. The developed technique application is expedient for improving the algorithms for the technical condition analysis of onboard systems of space-rocket technology at the operational stage.

Keywords: technical condition monitoring, onboard launch vehicle systems, control completeness indicator, optimization methods, rapidly changing parameters, real time scale

For citation: Zaitsev D.O., Pavlov D.A., Nestechuk E.A. Methodology for monitoring the technical condition of onboard launch vehicle systems based on the processing of rapidly changing. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-18](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-18)

Введение

Развитие космической отрасли сопряжено с постоянным конструктивным усложнением технических средств и логики протекающих в них процессов, что влечет повышение требований к качеству их контроля и диагностирования на различных этапах их эксплуатации. Выполнение этих требований вносит существенные трудности в процесс контроля технического состояния (ТС) бортовых систем (БС) ракет космического назначения (РКН) в особенности в масштабе времени, близком к реальному (РМВ). Контроль ТС БС в РМВ осуществляется на оперативном этапе обработки телеметрической информации (ТМИ) РКН [1]. На оперативном этапе обработки ТМИ решаются следующие задачи:

- обеспечение безопасности испытаний и применения ракетно-космической техники (РКТ) путем оперативного определения районов падения частей РКН при аварийной ситуации;
- уточнение целеуказаний радиотехнических средств для принятия решения на управление космическими аппаратами (КА) при отклонении траектории от расчетной

вследствие нештатных ситуаций (НШС) на участке работы двигательных установок ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ);

- доведение информации о полете РКН до Государственной комиссии;
- выдача первоначальных команд управления для КА, которые могут и должны компенсировать НШС на участке работы двигательных установок РН и РБ;
- обеспечение возможности повышения плотности запусков КА средствами выведения за счет получения достоверных и полных результатов на оперативном этапе обработки до очередного запуска, поскольку принятие неверного решения сопровождается колоссальными убытками для всех участников пуска.

Однако существующий подход к контролю технического состояния бортовых систем РН является недостаточным для выявления НШС на оперативном этапе исследования. Это обусловлено тем, что на оперативном этапе обработки ТМИ значение показателя полноты контроля составляет около 0,1 для РН «Союз-2», поэтому исследования, направленные на повышение показателя полноты контроля на оперативном этапе обработки и анализа ТМИ РКН являются актуальными.

Процесс обработки быстроменяющихся параметров в реальном масштабе времени

Полнота контроля является количественной величиной, которая показывает, в какой мере контроль объекта по выбранной совокупности параметров отличается от контроля по всем выходным параметрам [2], т.е. она относится к показателям эффективности решения задач по предназначению РКН, и определяются по формуле

$$V = \frac{H_{(n)}}{H}, \quad (1)$$

где H – исходная неопределенность состояния исследуемого объекта (энтропия); $H_{(n)}$ – снятая неопределенность; n – количество контролируемых характеристик.

Для повышения показателя полноты контроля на оперативном этапе обработки ТМИ РКН существует несколько подходов: аппаратный, аппаратно-программный и программный.

Аппаратный подход подразумевает количественное увеличение аппаратных средств. Это увеличение количества датчиков как на средствах выведения КА, так и на самих КА, а также увеличение количества средств обработки ТМИ РКН. Основным недостатком этого подхода является конструктивное усложнение РКН, что, кроме того, ведет к проблемам, связанным с организацией передачи данных.

Аппаратно-программный подход подразумевает совершенствование бортовых радиотелеметрических систем, а также методов передачи ТМИ. К достоинству данного подхода можно отнести переход от группового телеметрического кадра к пакетной передаче данных непосредственно потребителю. К основному недостатку следует отнести необходимость обработки телеметрируемых параметров (ТМП) конечными потребителями.

Программный подход подразумевает совершенствование методов обработки ТМИ. В рамках данного подхода, свободного от указанных ранее недостатков, предлагается, кроме обработки медленноменяющихся параметров (ММП), дополнительно осуществлять обработку быстроменяющихся параметров (БМП) на оперативном этапе, так как увеличение количества медленноменяющихся параметров

незначительно повышает показатель полноты контроля по сравнению с быстроменяющимися параметрами. Таким образом, предметом представленной статьи является разработка методики обработки БМП на оперативном этапе обработки ТМИ РКН.

Задачи выбора информативных признаков характерны для любых систем обнаружения, классификации или распознавания объектов, процессов и явлений [3-5]. Эти задачи трудно формализуемы, поскольку в их решении существенную роль играют эвристические методы и использование накопленных статистических данных. Это касается ММП, а для обработки и анализа БМП в РМВ (на оперативном этапе) требуется, ко всему прочему, еще учитывать огромное количество ограничений, таких как ограничения вычислительных средств и временные ограничения [6,7,13,19]. Поэтому выбор параметров для обработки на оперативном этапе зависит от содержания решаемых задач. Выбор одного и того же информационного признака исследуемого объекта может иметь высокую эффективность для одних задач и может быть малоэффективным в задачах другого класса [6].

Для решения задачи обработки БМП в реальном масштабе времени [8] рассмотрим множество характеристик БМП. Анализ документации по обработке параметров элементов конструкций РКН показал, что при наличии около 30 БМП у РКН типа «Союз-2» число контролируемых характеристик составляет 369, т.е. можно ввести в рассмотрение множество характеристик БМП – $I = \{i_j \mid j = \overline{1,369}\}$. Однако все характеристики рассматривать в рамках статьи нецелесообразно, поэтому для наглядности рассмотрим только 10 из них, образующих множество $I = \{i_j \mid j = \overline{1,10}\}$:

i_1 – максимальное значение амплитудно-частотного спектра осевой перегрузки первой ступени в диапазоне частот от 1,5 до 64 Гц;

i_2 – максимальное значение амплитудно-частотного спектра боковой перегрузки первой ступени в диапазоне частот от 1,5 до 32 Гц;

i_3 – максимальное значение амплитудно-частотного спектра нормальной перегрузки первой ступени в диапазоне частот от 1,5 до 32 Гц;

i_4 – максимальное значение спектральной плотности виброускорений рулевого двигателя в первой плоскости второй ступени в диапазоне частот от 1,5 до 50 Гц;

i_5 – максимальное значение спектральной плотности виброускорений рулевого двигателя во второй плоскости второй ступени в диапазоне частот от 1,5 до 50 Гц;

i_6 – максимальное значение спектральной плотности виброускорений рулевого двигателя в третьей плоскости второй ступени в диапазоне частот от 1,5 до 50 Гц;

i_7 – максимальное значение спектральной плотности виброускорений маршевого двигателя в первой плоскости второй ступени в диапазоне частот от 20 до 50 Гц;

i_8 – максимальное значение спектральной плотности виброускорений маршевого двигателя во второй плоскости второй ступени в диапазоне частот от 20 до 50 Гц;

i_9 – максимальное значение спектральной плотности виброускорений маршевого двигателя в третьей плоскости второй ступени в диапазоне частот от 20 до 64 Гц;

i_{10} – максимальное значение амплитудно-частотного спектра нормальной перегрузки первой ступени в диапазоне частот от 600 до 2000 Гц.

Помимо рассмотренных характеристик необходимо учесть разнородность ТМИ РКН и возможность распределенной обработки БМП на разных автоматизированных рабочих местах (АРМ) [9]. Для обозначения АРМ введём множество $J = \{j_1, \dots, j_7\}$.

Основные методы обработки высокочастотных сигналов [15] образуют множество $M = \{m_w | w = \overline{1,3}\}$, где m_1 – преобразование Фурье; m_2 – быстрое преобразование Фурье (БПФ); m_3 – вейвлет-преобразование.

Для того, чтобы устранить ограничение необходимости обработки всего сигнала сразу, необходимо к алгоритму обработки применить оконную функцию. Представим основные типы оконных функций в виде множества $G = \{g_e | e = \overline{1,5}\}$, где g_1 – Прямоугольное окно; g_2 – окно Ханнинга; g_3 – окно Кайзера; g_4 – окно Блэкмана; g_5 – окно Flat-top.

Для того, чтобы учесть возможность перекрытия окон, рассмотрим множество возможных шагов оконной функции $S = \{s_d | d = \overline{1,5}\}$, где s_1 – 0,1 с.; s_2 – 0,2 с.; s_3 – 0,3 с.; s_4 – 0,4 с.; s_5 – 0,5 с.

Представим также варианты ширины оконной функции в виде множества $K = \{k_l | l = \overline{1,5}\}$, где k_1 – 1 с.; k_2 – 2 с.; k_3 – 3 с.; k_4 – 4 с.; k_5 – 5 с.

Введем в рассмотрение множество A_j , каждый элемент которого представляет собой алгоритм обработки характеристик БМП i_j , при реализации которого используются один из методов $m_w \in M$, одна из оконных функций $g_e \in G$, с шагом $s_d \in S$ и шириной $k_l \in K$. В результате получим множество $A_j = \{a_{mgskz}^j | z = \overline{1,375}\}$, которое является множеством алгоритмов обработки характеристик БМП i_j .

Множество A_j представляет собой вектор $A_{j[375]}^T$, состоящий из 374 нулей и одной единицы. Все возможные комбинации этих векторов образуют единичную квадратную матрицу $\mathbf{A}_{j[375]}$.

Для матрицы $\mathbf{A}_{j[375]}$ необходимо выбрать алгоритм, удовлетворяющий требованиям по точности и оперативности.

Сначала из элементов $a_{zz}^j (z = \overline{1,375})$ выберем такие, которые удовлетворяют требованиям точности. Для этого рассчитаем показатель точности [8] каждого элемента по формуле

$$P = \frac{1}{\frac{\beta f_s}{N \Delta f_{TP}} + 1}, \quad (2)$$

где f_s – частота дискретизации сигнала; N – число отчетов, которые попали в оконную функцию; β – коэффициент когерентного усиления оконной функции, характеризующий увеличение ширины полосы для выбранного окна. Для прямоугольного окна $\beta=1$, для окна Ханнинга – 0,5, для треугольного окна – 0,5, для окна Блэкмана – 0,36. Δf_{TP} – требуемое разрешение алгоритма, т.е. 10% от частотного интервала контроля лётно-технической характеристики (рис. 1), вычисляется по формуле $\Delta f_{TP} = 0,1(f_2 - f_1)$, где f_1, f_2 – границы полосы частот, на которой оценивается характеристика БМП.

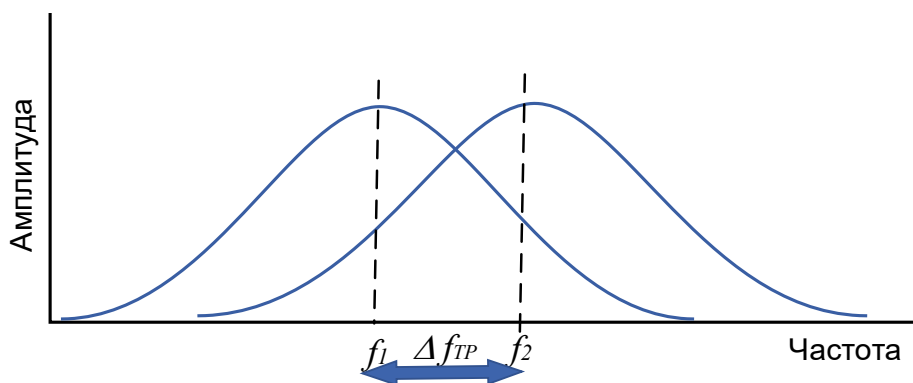


Рис. 1 – Графическая визуализация минимального требуемого разрешения

Значение показателя точности будут одинаковы для элементов $a_{zz}^j (z = \overline{1,375})$, которые не различаются применяемыми методами $m_w \in M$, и шагом оконной функции $s_d \in S$. Т.е. строки матрицы $\mathbf{A}_{j[375]}$ образуют 15 блоков по 25 значений (число сочетаний элементов $m_w \in M$ и $s_d \in S$) показателя точности. Таким образом, заданное значение показателя точности позволяет выбрать несколько блоков элементов $a_{zz}^j (z = \overline{1,375})$, показатель точности которых выше заданного, что позволяет значительно сократить матрицу $\mathbf{A}_{j[375]}$.

Далее из оставшихся элементов $a_{zz}^j (z = \overline{1,375})$ необходимо выбрать тот, в котором используется самый быстрый алгоритм обработки характеристики. Показатель оперативности имеет вид

$$B = O(n) = O\left(\frac{Nk}{S}\right), \quad (3)$$

где $O(n)$ – алгоритмическая сложность выбранного метода обработки БМП. Алгоритмическая сложность зависит от числа N отсчетов, попавших в оконную функцию, ширины (длительности) оконной функции k и шага оконной функции S .

Например, для БПФ $O(n) = \frac{Nk}{S} \log\left(\frac{Nk}{S}\right)$, для вейвлет-преобразования и

преобразования Фурье $O(n) = \left(\frac{Nk}{S}\right)^2$. Число отсчетов зависит от ширины оконной

функции и от частоты опроса БМП бортовой радиотелеметрической системой (БРТМС). Например, для БРТМС «Сириус» и «Скут» частота опроса составляет 8 кГц, т.е. при ширине оконной функции 1с $N=8000$. Таким образом, оперативность

алгоритма зависит от ширины, шага оконной функции и метода обработки, что позволяет выбрать единственный элемент $a_{zz}^j (z = \overline{1,375})$.

Таким образом, выбран алгоритм обработки одной характеристики. Далее, выбирая тем же способом алгоритмы обработки для оставшихся характеристик БМП, получаем набор из 10 характеристик БМП, которые обрабатываются наилучшими по показателю оперативности алгоритмами с учетом требований по показателю точности.

На втором этапе необходимо максимизировать целевую функцию (1) [8]. Другими словами, необходимо из 10 характеристик БМП отобрать такие, при использовании которых показатель полноты будет максимален [10]. Целевая функция (1) будет иметь вид

$$V = \frac{H_{(n)}}{H} \rightarrow 1. \quad (4)$$

Целевая функция в такой постановке отражает повышение полноты контроля как уменьшение общей неопределенности о техническом состоянии, т.е. чем выше показатель полноты, тем большее количество НШС можно выявить и, тем самым, сократить время получения результатов этапа полной послеполетной обработки ТМИ.

Неопределенность, снятая по совокупности контролируемых характеристик [12], имеет следующий вид:

$$H_{(n)} = H - H_o, \quad (5)$$

где H_o – неопределенность, оставшаяся в результате контроля набора характеристик.

Для вычисления H воспользуемся формулой

$$H = -P \log(P) - (1 - P) \log(1 - P),$$

где P – вероятность того, что значения всех характеристик i_j ($j = \overline{1,10}$) попали в полезный интервал, вычисляется по формуле

$$P = 1 - \prod_{j=1}^{10} (1 - p_j),$$

где p_j – вероятность попадания измеренного значения параметра i_j ($j = \overline{1,10}$) в полезный интервал (рис. 2), которая вычисляется по формуле

$$p_j = \frac{\Delta Z_{шт} + \Delta Z_{шт}^-}{D},$$

где $\Delta Z_{шт}$ – интервал значений характеристики, соответствующий штатной работе объекта (см. рис 2). Длина интервала $\Delta Z_{шт}$ – это длина отрезка $|CD|$. $\Delta Z_{шт}^-$ – интервал значений характеристики, соответствующий нештатной работе объекта. Его длина вычисляется как сумма отрезков $\Delta Z_{шт}^- = |BC|$ и $\Delta Z_{шт}^+ = |DE|$. D – весь диапазон шкалы измерения характеристики, т.е. отрезок $|AF|$ на рисунке 2.

Все значения для расчета полезных интервалов берутся из инструкций по оценке поведения параметров конструкции РКН.

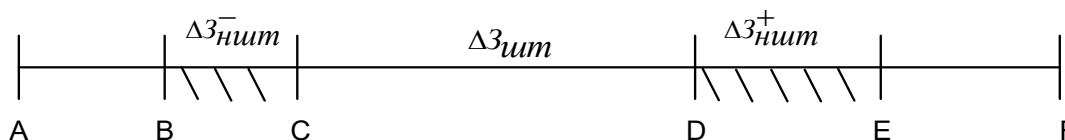


Рис. 2 – Графическая визуализация полезного интервала

Неопределенность H_o , оставшаяся в результате контроля набора характеристик вычисляется по формуле

$$H_o = \prod_{j \in I_n} p_j \left(- \prod_{j \in I_n} p_j \log \left(\prod_{j \in I_H} p_j \right) - \left(1 - \prod_{j \in I_H} p_j \right) \log \left(1 - \prod_{j \in I_H} p_j \right) \right), \quad (6)$$

где I_H – множество неконтролируемых характеристик, I_n – множество контролируемых характеристик. Объединение I_H и I_n образует множество всех характеристик.

Учитывая (6), запишем формулу (5) в виде

$$H_n = H - \prod_{j \in I_n} p_j \left(- \prod_{j \in I_n} p_j \log \left(\prod_{j \in I_H} p_j \right) - \left(1 - \prod_{j \in I_H} p_j \right) \log \left(1 - \prod_{j \in I_H} p_j \right) \right). \quad (7)$$

График зависимости оставшейся неопределённости от количества характеристик представлен на рисунке 3. Для получения графика проведены следующие вычисления: взяты 10 характеристик БМП i_j ($j = \overline{1,10}$), задано значение $p_j=0,97$, после чего по формуле (6) посчитана неопределенность H_o для следующих наборов характеристик:

- при отсутствии контроля характеристик $H_0 = H$, т.е. оставшаяся неопределенность равна исходной неопределённости;
- при контроле 2-х характеристик $H_0 = 0,066$;
- при контроле 4-х характеристик $H_0 = 0,024$;
- при контроле 6 характеристик $H_0 = 0,014$;
- при контроле 8 характеристик $H_0 = 0,010$;
- при контроле всех характеристик $H_0 = 0,007$.

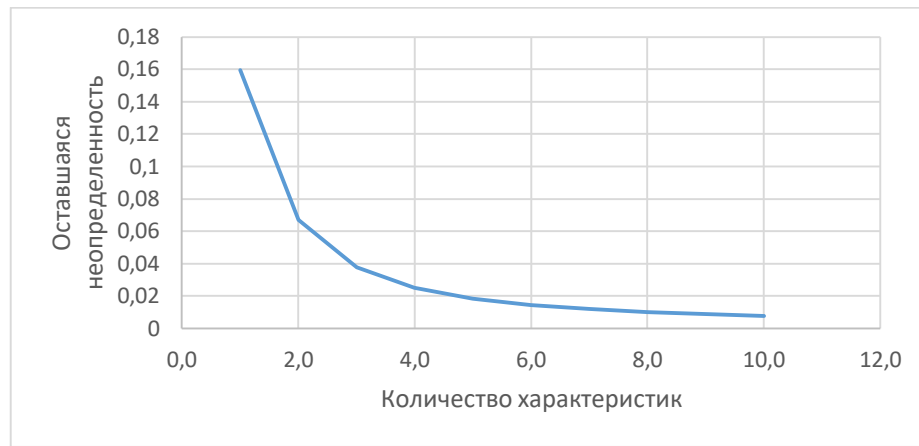


Рис 3 – График зависимости оставшейся неопределённости от количества контролируемых характеристик

С учетом (7) выражение (1) представим в следующем виде:

$$V = 1 - \frac{\prod_{j \in I_n} p_j \left(- \prod_{j \in I_n} p_j \log \left(\prod_{j \in I_H} p_j \right) - \left(1 - \prod_{j \in I_H} p_j \right) \log \left(1 - \prod_{j \in I_H} p_j \right) \right)}{H}. \quad (8)$$

Показатель полноты отражает степень уменьшения исходной неопределенности в результате контроля выбранного набора характеристик. Если контролируются все возможные характеристики, то показатель полноты равен 1, поскольку тогда оставшаяся неопределённость равна 0. В случае, когда не контролируется ни одна характеристика, оставшаяся неопределённость равна исходной неопределенности, и показатель полноты V равен 0. График зависимости полноты от количества контролируемых характеристик представлен на рисунке 4.

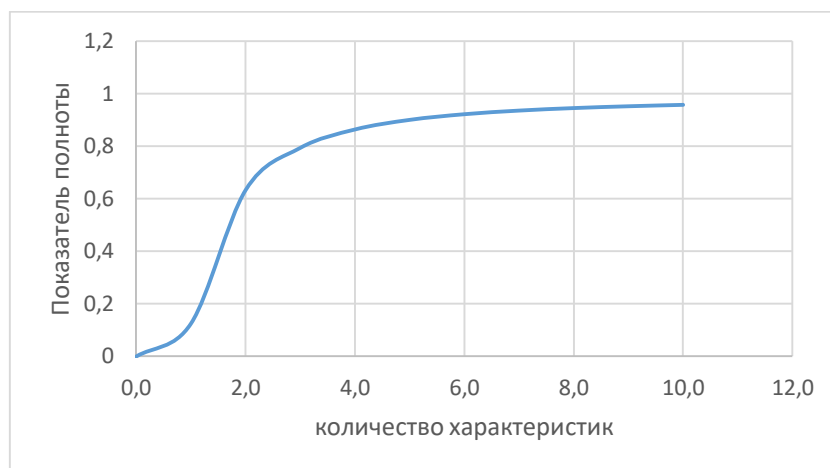


Рис. 4 – График зависимости показателя полноты от количества контролируемых характеристик

На рисунке 4 по оси ординат отложены значения показателя полноты, а по оси абсцисс – количество контролируемых характеристик в наборе. Для получения графика проведены следующие вычисления: взяты 10 характеристик БМП $i_j (j = \overline{1,10})$, задано $p_j=0,97$, после чего по формуле (8) рассчитан показатель полноты V для следующих наборов характеристик:

- при отсутствии контроля $V=0$,
- при контроле 2-х характеристик $V=0,63$;
- при контроле 4-х характеристик $V=0,86$;
- при контроле 6 характеристик $V=0,92$;
- при контроле 8 характеристик $V=0,94$;
- при контроле всех характеристик $V=1$.

С целью анализа возможности решить задачу оптимальным образом рассмотрим существующие методы оптимизации [11]. На рисунке 5 приведена общая классификация оптимизационных задач.



Рис. 5 Классификация оптимизационных задач

Наличие ограничений в задаче позволяет выбрать условные методы оптимизации.

Посредством линейного программирования решается оптимизационная задача, целевая функция и ограничения которой выражены в линейной форме. Чтобы применить метод линейного программирования к рассматриваемой целевой функции, необходима её линеаризация. Для этого упростим выражение (8) и получим выражение

$$V \approx \frac{\prod_{j \in I_n} p_j \prod_{j \in I_H} p_j}{H} + 1,$$

которое позволяет решать задачу значительно быстрее. Однако, к линейной форме целевую функцию свести не удалось, поэтому метод линейного программирования не подходит для решения этой задачи.

В случае, когда качество выбранного решения оптимизационной задачи не удастся описать с помощью целевой функции, применяют величины, численное

значение которых определяется выбором конкретных функций – функционалы. Поиск экстремумов функционалов осуществляется с помощью вариационного исчисления [17]. Для решения задачи в текущей постановке оно неприемлемо, поскольку ограничения и целевая функция не содержат функционалов.

При необходимости определения оптимального управляющего воздействия для перевода динамической системы [16], описываемой системой дифференциальных уравнений в форме Коши, из одного состояния в другое, применяют методы оптимального управления [19]. Для решения настоящей задачи методы оптимального управления не подходят, поскольку в целевой функции и ограничениях не содержится дифференциальные уравнения [14].

Для решения оптимизационных задач, в которых нелинейны и (или) целевая функция, и (или) ограничения, применяют методы нелинейного программирования [17]. Методы этой группы применяют для декомпозиции сложной задачи на повторяющиеся составные компоненты, т.е. при возможности рекурсивного представления целевой функции. Поскольку целевую функцию свести к рекурсивному виду не удалось, а удалось только упростить выражение (8), то применение методов данной группы не целесообразно.

Классификация методов решения оптимизационных задач [10] представлена на рисунке 6.

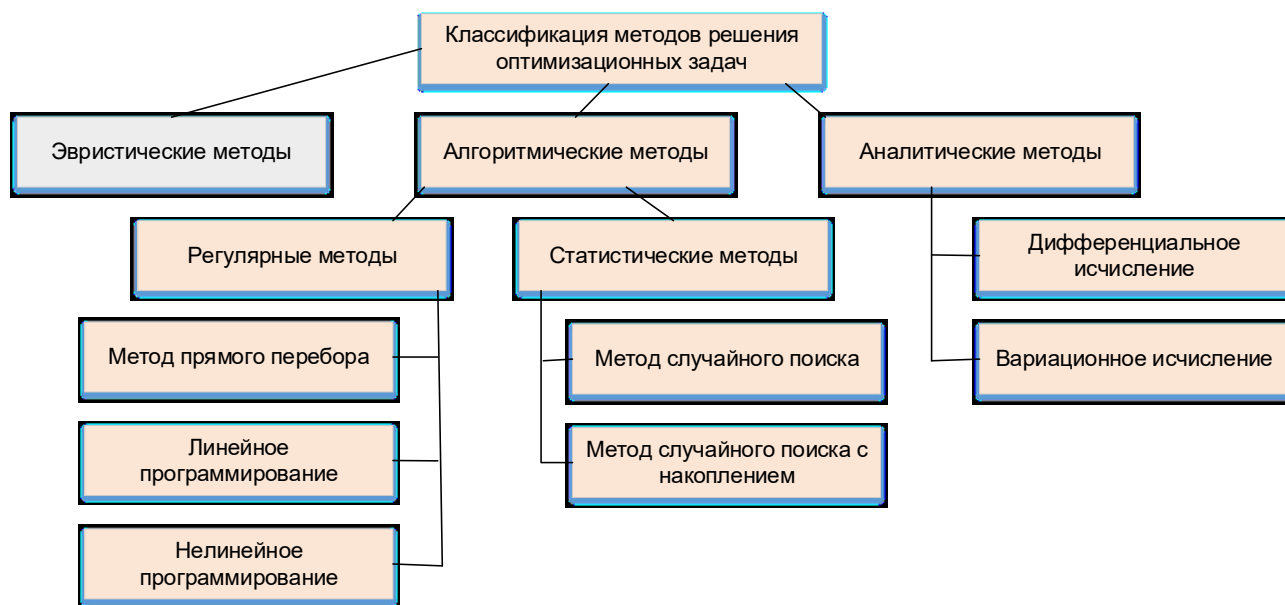


Рис. 6 Классификация методов решения оптимизационных задач.

Эвристические методы применяются для решения задач дискретной оптимизации в случаях, когда получение оптимального решения может оказаться неоправданно трудоёмким, при возникновении серьезных погрешностей в процессе решения, а также в случае невозможности или сверх трудоёмкости проведения формализации задачи. В их основе лежит анализ структуры задачи, предположения о свойствах оптимального решения, часто не имеющие строгого формального обоснования. Недостатком таких методов является сложность определения, насколько решение, полученное применением эвристики, отличается от оптимального, что влечет за собой необходимость оценки эффективности приближенных алгоритмов. Традиционно используются следующие методы: эмпирическое сравнение, анализ наихудшего случая, анализ среднего случая. Другим важным недостатком является сложность выбора репрезентативного выбора исходных данных, что порождает необходимость дополнительных исследований, по этой причине эвристические методы далее не рассматриваются.

Методы оптимизации, входящие в группы аналитических и регулярных методов, рассмотрены ранее, поэтому перейдем к статистическим методам.

Под случайными или статистическими методами понимают методы, использующие элемент случайности либо при сборе информации о целевой функции при пробных шагах, либо для улучшения значений функции при рабочем шаге [9]. Среди достоинств этих методов выделяют простоту реализации, универсальность, возможность введения операций обучения в алгоритм поиска и возможность введения операций прогнозирования оптимальной точки, кроме того, вычислительные затраты в детерминированных методах поиска с ростом размерности растут быстрее, чем в статистических алгоритмах [9].

Таким образом, представленная классификация оптимизационных задач, позволяет сделать выбор наилучшего метода ее решения в рассматриваемой предметной области, которым является метод статистического поиска. В связи с этим, решение поставленной задачи будет сатисфакционным.

Рассмотрим применение методики на практическом примере.

В качестве примера представлен набор из 26250 альтернатив. Количество альтернатив получено как число сочетаний из 10 ранее приведённых характеристик, 3-х методов обработки характеристик, 5 оконных функций, 5 вариантов размеров оконных функций, 5 вариантов шагов оконных функций и 7 вариантов узлов обработки. Это количество рассматривается для примера, поскольку в РН «Союз-2» используется 369 характеристик и значительно больше других переменных. Рассмотрение полного набора переменных приведет к необходимости рассмотрения около 2млн. альтернатив, что нецелесообразно в рамках данной статьи.

Для начала уменьшим множество альтернатив по показателю точности (2), который позволяет задать нижнюю границу показателя точности и ограничить количество вариантов алгоритмов обработки каждой характеристики. Проведя расчеты и выбрав нижнюю границу значения показателя точности 0,95, сократим количество альтернатив до 1825. Фрагмент таблицы с расчетами представлен на рисунке 7.

На рисунке 7 первый столбец соответствует порядковому номеру альтернативы. Под альтернативой понимается характеристика, которая состоит из названия характеристики (столбец 2), диапазона частот (столбец 3) и допускового интервала значений характеристики (столбец 4). Столбец 5 – метод обработки; столбец 6 – номер узла обработки; столбец 7 – тип оконной функции; столбец 8 – размер оконной функции; столбец 9 – шаг оконной функции; столбец 10 – значения показателя точности каждой альтернативы; столбец 11 – значение показателя оперативности для каждой альтернативы. Показатель оперативности измеряется в единицах элементарных операций, т.е. чем меньше необходимо выполнить элементарных операций для расчета, тем предпочтительнее альтернатива.

№ п/п	Характеристика БМП	Диапазон частот, Гц	Нормы виброперегрузки, Гц	Метод обработки	узел обработки	Коэффициент когерентного усиления оконной функции	Размер оконной функции, с	Шаг оконной функции, с	Точность	Оперативность
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
				...						
49	ОП14-5	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	1	0,36	5	0,4	0,9593679	500000
50	ОП14-5	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	1	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
51	ОП14-5	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	1	0,36	1	0,1	0,7727273	392247
				...						
2588	БП14-5	От 1,5 до 32	9,8_29,4	БПФ	2	0,36	5	0,4	0,959645	500000
2589	БП14-5	От 1,5 до 32	9,8_29,4	БПФ	2	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
2590	БП14-5	От 1,5 до 32	9,8_29,4	БПФ	2	0,36	1	0,1	0,7727273	392247
				...						
4122	НП14-5	От 1,5 до 32	9,8_29,4	БПФ	3	0,36	1	0,3	0,7727273	118025
4123	НП14-5	От 1,5 до 32	9,8_29,4	БПФ	3	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
4124	НП14-5	От 1,5 до 32	9,8_29,4	БПФ	3	0,36	1	0,5	0,8252427	67265
				...						
5433	2ВХ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	4	0,36	2	0,2	0,9042553	392247
5434	2ВХ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	4	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
5435	2ВХ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	4	0,36	3	0,3	0,9127273	67265
				...						
7593	2ВУ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	5	0,36	3	0,2	0,9107143	224699
7594	2ВУ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	5	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
7595	2ВУ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	5	0,36	4	0,3	0,9315069	1761647
				...						
9462	2ВЗ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	6	0,36	2	0,5	0,8717949	144164
9463	2ВЗ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	6	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
9464	2ВЗ-КД	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	6	0,36	3	0,1	0,9315069	224699
				...						
13697	2ВУ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	1	0,36	2	0,2	0,9315069	832659
13698	2ВУ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	1	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
13699	2ВУ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	1	0,36	3	0,3	0,9444444	683325
				...						
17656	2ВХ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	2	0,36	4	0,5	0,7727273	67265
17657	2ВХ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	2	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
17658	2ВХ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	2	0,36	5	0,1	0,9593679	832659
				...						
20455	2ВЗ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	3	0,36	3	0,1	0,9315069	1291250
20456	2ВЗ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	3	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
20457	2ВЗ-НШГ	От 1,5 до 64	9,8_29,4	БПФ	3	0,36	4	0,1	0,8717949	1761647
				...						
25877	НП14-5	От 600 до 2000	9,8_29,4	БПФ	7	0,36	4	0,5	0,9315087	307595
25878	НП14-5	От 600 до 2000	9,8_29,4	БПФ	7	0,36	5	0,5	0,9593679	392247
25879	НП14-5	От 600 до 2000	9,8_29,4	БПФ	7	0,36	5	0,1	0,9444444	2240823
				...						

Рис. 7 – Фрагмент таблицы с практическим расчётом показателей точности и оперативности

После сокращения по показателю точности необходимо выбрать для каждой характеристики только один алгоритм обработки из оставшихся альтернатив. Для этого применим показатель оперативности (3). Результаты расчёта показателя оперативности представлены в 11 столбце на рисунке 7. Этот показатель отражает количество необходимых операций для обработки альтернативы, поэтому

выбирается альтернатива с наименьшим значением показателя оперативности. Таким образом, выбирая самые быстрые алгоритмы для каждой характеристики, уменьшаем количество альтернатив до количества характеристик – 10 в нашем случае.

Далее рассчитаем показатель полноты. Методика расчета показателя полноты [2], позволяет выбрать такой набор характеристик, при котором полнота будет не менее заданной при минимальном количестве оцениваемых характеристик [10]. В рассмотренном примере найден минимальный набор характеристик, показатель полноты которого не меньше заданного (не меньше 0,8). Полученный с помощью метода статистического поиска набор включает в себя характеристики $i_j (j \in \{1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9\})$ при использовании которых показатель полноты $V=0,868$. Расчёты показали, что другие наборы характеристик не обеспечивают заданный уровень показателя полноты.

Полученный набор характеристик может быть обработан в масштабе времени, близком к реальному, выбранным способом на выбранных узлах, что позволяет использовать их в качестве диагностических признаков, которыми дополнится множество диагностических признаков, сформированных на основе ММП и сигнальных параметров, для анализа ТС БС РН на оперативном этапе с помощью применяемых методов анализа.

Таким образом, разработана методика обработки БМП в реальном масштабе времени, схема которой представлена на рисунке 8.

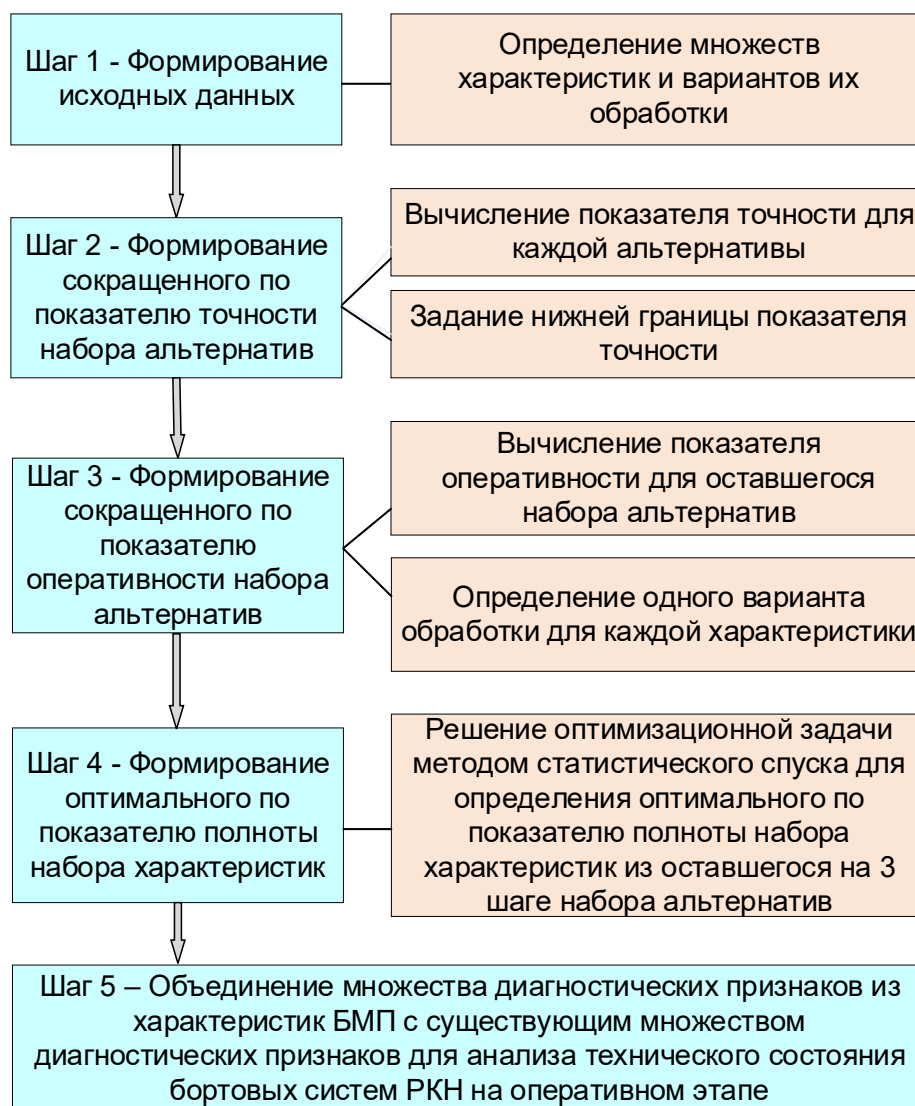


Рис. 8 – Методика обработки БМП в РМВ

Шаг 1. Формирование исходных данных. На этом шаге формируется множество альтернатив решения поставленной задачи. Альтернатива представляет собой одну из характеристик БМП, которую можно обработать одним из методов с применением одной из оконных функций. Каждая оконная функция, в свою очередь, характеризуется своими характеристиками, такими как ширина, шаг и тип окна, что значительно увеличивает множество альтернатив. Таким образом, сформированный набор исходных данных позволяет учесть все необходимые способы обработки БМП в РМВ для выбора наилучшего решения поставленной задачи.

Шаг 2. Формирование сокращенного по показателю точности набора альтернатив. На данном шаге рассчитывается показатель точности для каждой альтернативы, после чего из всего множества альтернатив выбираем те из них, показатель точности которых выше или равен заданному. Таким образом, сокращается набор исходных данных по показателю точности.

Шаг 3. Формирование сокращенного по показателю оперативности набора альтернатив. На данном шаге рассчитывается показатель оперативности для каждой альтернативы. После чего выбираются альтернативы, в которых каждой характеристике соответствует единственный, наилучший по показателю оперативности, алгоритм ее обработки. Таким образом, сформирован набор исходных данных, в котором для каждой характеристики выбран только один алгоритм ее обработки.

Шаг 4. Формирование наилучшего по показателю полноты набора характеристик, который может быть обработан в РМВ. На данном шаге методом перебора сочетаний выбирается минимальное количество характеристик, оценивание которых обеспечит полноту принимаемого решения о ТС БС не менее заданной.

Шаг 5. Объединение множества диагностических признаков из характеристик БМП с существующим множеством диагностических признаков. На этом шаге формируется новое требование к программе телеизмерений и к внесению изменений в инструкции по оценке работы БС РКН.

Заключение:

Таким образом, поставлена и решена задача обработки БМП в РМВ с учетом различных ограничений. Решение задачи сопряжено с подготовкой исходных данных,

учитывающих количество БМП, количество их характеристик, учтены варианты применения различных алгоритмов обработки характеристик. Количество рассматриваемых алгоритмов зависит от исследуемых наборов оконных функций, размеров оконных функций, шагов оконных функций, а также методов цифровой обработки сигналов.

Для решения поставленной задачи разработана методика контроля ТС БС РН на основе обработки БМП, которая позволяет повысить полноту контроля на оперативном этапе обработки ТМИ. Методика позволяет выбрать наилучший по показателю полноты, оперативности и точности набор характеристик БМП, а также подготовить диагностические признаки на основе характеристик БМП и дополнить ими множество диагностических признаков, сформированных на основе ММП. Это позволит повысить полноту контроля ТС БС в масштабе времени близкому к реальному.

Представлена апробация методики на примере. Рассмотрено применение и расчёт показателей. Проведен анализ целевой функции, на основании которого для решения поставленной задачи выбран метод статистического спуска. Разработанную методику целесообразно применять для совершенствования алгоритмов анализа ТС БС РКН на оперативном этапе обработки ТМИ.

Список источников

1. Кравцов А.Н., Самойлов Е.Б., Сучков В.И. Автоматизированные системы специального назначения: учеб. пособие - СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2014. - 156 с.
2. Шмелев В.В., Павлов Д.А., Зайцев Д.О. Методика оценивания полноты автоматизированного контроля технического состояния ракет-носителей «Союз-2» // Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 8. С. 28-36. DOI: [10.25791/aviakosmos.08.2020.1172](https://doi.org/10.25791/aviakosmos.08.2020.1172)
3. Емельянова Ю.Г. и др. Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2010. № 1. С. 45-59.
4. Лоскутов А.И., Вечеркин В.Б., Шестопалова О.Л. Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур // Информационно-управляющие системы. 2012. № 2. С. 74-81.
5. Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky. Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic, Springer, 2008, 478 p.
6. Хименко В.И., Охтилев М.Ю., Ключарев А.А. Анализ информативных признаков в задачах обработки данных аэрокосмического мониторинга // Информационно-управляющие системы. 2007. № 2. С. 2-12.
7. Елисеев А.В., Кузнецов Н.К., Елисеев С.В. Частотная энергетическая функция в оценке динамических состояний технических объектов // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158213>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-04)

8. Птицын С.О., Зайцев Д.О., Павлов Д.А., Шмелев В.В. Модель процесса обработки быстроменяющихся телеметрируемых параметров в реальном масштабе времени // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 10. С. 31-37.
9. Силаков Д.М., Крячко М.А., Поляков А.Ю. Анализ быстроменяющихся параметров в космической телеметрии на основе частотных представлений Л. Коэна // Международный журнал экспериментального образования. 2010. № 3. С. 35-39.
10. Таха Хемди А. Введение в исследование операций. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
11. Москвин Б.В Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2005. – 383 с.
12. Степкин В.С., Шмыголь С.С. Автоматизированная обработка и анализ измерительной информации. - М.: МО СССР, 1980. – 196 с.
13. Попов И.П. Расчет колебаний для разветвленных механических систем в поле комплексных чисел // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=121007>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-01)
14. Красильников П.С., Сторожкина Т.А. Исследование резонансных колебаний математического маятника переменной длины // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26045>
15. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, 708 p.
16. Большаков Р.С. Особенности вибрационных состояний транспортных и технологических машин. Динамические реакции и формы взаимодействия элементов. – Новосибирск: Наука, 2020. – 411 с.

17. Вин Ко Ко, Темнов А.Н. Угловые колебания твердого тела с двухслойной жидкостью вблизи основного резонанса // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159776>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-03](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-03)
18. Harris C.M., Crede C.E. Shock and Vibration Handbook, New York, McGraw, Hill Book Co, 2002, 1457 p.
19. Попов И.П. Резонансы сил и скоростей // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2019. № 4 (47). С. 62-66. DOI: [10.17072/1993-0550-2019-4-62-66](https://doi.org/10.17072/1993-0550-2019-4-62-66)
20. Бардин Б.С., Савин А.А. Исследование орбитальной устойчивости плоских колебаний симметричного намагниченного спутника на круговой орбите // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=65212>

References

1. Kravtsov A.N., Samoilov E.B., Suchkov V.I. *Avtomatizirovannyye sistemy spetsial'nogo naznacheniya* (Automated systems for special purposes), Saint Petersburg, VKA imeni A. F. Mozhaiskogo, 2014, 156 p.
2. Shmelev V.V., Pavlov D.A., Zaitsev D.O. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2020, no. 8, pp. 28-36. DOI: [10.25791/aviakosmos.08.2020.1172](https://doi.org/10.25791/aviakosmos.08.2020.1172)
3. Emel'yanova Yu.G. et al. *Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 2010, no. 1, pp. 45-59.
4. Loskutov A.I., Vecherkin V.B., Shestopalova O.L. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2012, no. 2, pp. 74-81.

5. Uziel Sandler, Lev Tsitolovsky. *Neural Cell Behavior and Fuzzy Logic*, Springer, 2008, 478 p.
6. Khimenko V.I., Okhtilev M.Yu., Klyucharev A.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2007, no. 2, pp. 2-12.
7. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158213>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-04)
8. Ptitsyn S.O., Zaitsev D.O., Pavlov D.A., Shmelev V.V. *Voprosy radioelektroniki*, 2020, no. 10, pp. 31-37.
9. Silakov D.M., Kryachko M.A., Polyakov A.Yu. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, 2010, no. 3, pp. 35-39.
10. Takha Khemdi A. *Vvedenie v issledovanie operatsii* (Introduction to Operations Research), Moscow, Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2005, 912 p.
11. Moskvina B.V. *Teoriya prinyatiya reshenii* (Decision theory), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2005, 383 p.
12. Stepkin V.S., Shmygol' S.S. *Avtomatizirovannaya obrabotka i analiz izmeritel'noi informatsii* (Automated processing and analysis of measurement information), Moscow, MO SSSR, 1980, 196 p.
13. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121007>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-01](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-01)
14. Krasil'nikov P.S., Storozhkina T.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26045>
15. Karnovsky I.A., Lebed E. *Theory of Vibration Protection*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, 708 p.

16. Bol'shakov R.S. *Osobennosti vibratsionnykh sostoyanii transportnykh i tekhnologicheskikh mashin. Dinamicheskie reaktsii i formy vzaimodeistviya elementov* (Features of vibration states of transport and technological machines. Dynamic reactions and forms of interaction of elements), Novosibirsk, Nauka, 2020, 411 p.
17. Vin Ko Ko, Temnov A.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159776>. DOI: 10.34759/trd-2021-119-03
18. Harris S.M., Srede C.E. *Shock and Vibration Handbook*, New York, McGraw, Hill Book So, 2002, 1457 p.
19. Popov I.P. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2019, no. 4 (47), pp. 62-66. DOI: [10.17072/1993-0550-2019-4-62-66](https://doi.org/10.17072/1993-0550-2019-4-62-66)
20. Bardin B.S., Savin A.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=65212>

Статья поступила в редакцию 26.10.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 21.12.2021.

The article was submitted on 26.10.2021; approved after reviewing on 15.11.2021; accepted for publication on 21.12.2021.