

Научная статья

УДК 629.78

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181894>

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ВЫЯВЛЕНИЯ МОМЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ АНАЛИЗЕ ЕГО ДАННЫХ

Наталья Валерьевна Лебедева¹, Сергей Владимирович Соловьёв²

^{1,2}Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва,

Королёв, Московская обл., Россия

¹post@rsce.ru✉

Аннотация. Оперативная оценка состояния пилотируемых космических кораблей (ПКК) является сложным и скоротечным процессом. В статье рассмотрен новый подход, реализующий выявление свойств поведения тенденций в последовательности значений телеметрических параметров (ТМП). Представлены различные виды и варианты тенденций изменений значений ТМП, исходя из опыта управления полетом ПКК. Предложен математический аппарат, позволяющий перейти от абсолютных значений ТМП к многопараметрическому виду. Рассмотрены характерные случаи динамического состояния бортовых систем ПКК. Сформулирован принцип определения основного ТМП, относительно, изменения которого можно выявить нештатное расхождение данных при выполнении динамических операций.

Определены критерии ТМП, позволяющие оценить сходимость состояния к норме при переходном процессе без расширения диапазона оценки данных.

Ключевые слова: пилотируемый космический корабль, оперативная оценка, телеметрическая информация, временные ряды, телеметрический параметр.

Для цитирования: Лебедева Н.В., Соловьёв С.В. Математический подход выявления момента изменения состояния пилотируемого космического корабля при оперативном анализе его данных // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181894>

Original article

METHODOLOGY FOR IDENTIFYING THE MOMENT TIME OF CHANGE IN STATE OF A MANNED SPACECRAFT DURING OPERATIONAL ANALYSIS

Natalia V. Lebedeva¹, Sergey V. Solovyov²

^{1,2}S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia»,
Korolev, Moscow region. Russia

¹post@rsce.ru✉

Abstract. The article considers a technique for identifying trends in changing the value of a parameter during the operational assessment of the state of a manned spacecraft. Flights into space with a person on board must be as safe as possible. The manned spacecraft is operated for six months. During this time, gradual degradation of on-board systems occurs. It is

important to notice trends towards failure in time. The space flight control process of the spacecraft is carried out in real time and includes a prompt assessment of the state of the spacecraft in order to control the process of implementing the flight program.

A mathematical apparatus has been proposed that allows one to move from absolute values of telemetry information to a multi-parameter form. Typical cases of the dynamic state of on-board systems of manned spacecraft are considered. In the process of analyzing the state of the on-board systems of a manned spacecraft, a change in characteristics occurs. Preliminary analysis is necessary to determine statistical characteristics for further use in time series analysis. The solution of a decisive function presupposes the arrival of a moment in time when a “discord” began and a transition occurred from one type of decisive function to another type. The article provides criteria that allow us to determine the period in which a manned spacecraft operates. Division into periods influences the formation of the decisive function. The proposed method allows you to automate the process of operational assessment in terms of identifying the time of change in the behavior of value trends.

Keywords: operational analysis, manned spacecraft, trends, discord, on-board systems

For citation: Lebedeva N.V., Solovyov S.V. Methodology for identifying the moment time of change in state of a manned spacecraft during operational analysis. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181894>

Введение

Процесс управления космическим полетом ПКК осуществляется в режиме реального времени и включает в себя оперативную оценку состояния ПКК с целью

контроля процесса реализации программы полета. Основной информации для этого является телеметрическая информация (ТМИ) получаемая с борта ПКК. Помимо ТМИ внутри оперативной группы управления (ОГУ) циркулирует и другие виды информации, в том числе видео, командно-программная и др. Специалисты ОГУ реализуют функции по оперативной оценке состояния ПКК и выдают различные рекомендации для разработки план полёта ПКК на последующие временные интервалы [1]. Для формирования эвристической модели состояния ПКК используется также сообщения о состоянии экипажа, информация из плана полёта и ТМИ. Во время сеанса связи, характерной длительности от 6 до 20 минут, специалистам ОГУ необходимо оценить состояние бортовых систем (БС) ПКК, включая текущую ориентацию и режимы работы БС, результаты выполнения программы полета проведенной вне зоны радиовидимости и в текущем сеансе связи, закладку управляющих воздействий на следующие интервалы управления. Краткость сеанса связи, а также количество ТМП и режимов работы БС ПКК и динамических процессов на борту ПКК создаёт большие трудности к проведению достоверной и всеобъемлющей оперативной оценке состояния ПКК в реальном масштабе времени. ТМИ поступающая с борта ПКК используется в других функциональных составляющих процесса управления КА: информационно-телеметрического, баллистико-навигационного и командно-программного обеспечения. В настоящее время задача оценки состояния ПКК требует больших трудозатрат от специалистов ОГУ и их высокой квалификации.

Основными приоритетами для оценки состояния ПКК являются обеспечение безопасности экипажа, работоспособность ПКК и безусловной реализации плана полёта в полном объёме.

Типовая программа полета ПКК содержит следующие особенности:

- длительные (от 2-6 месяцев до 10-15 лет) статичные состояния ПКК;
- периодичность в изменении внешних условий (освещенность и т.п.);
- необходимость поддержания постоянной готовности ПКК к спуску;
- наличие нескольких ПКК под контролем одной группы управления;
- взаимовлияние процессов в различных бортовых системах ПКК на состояние

ПКК в целом.

Для обеспечения оперативности процесса управления космическим полетом и достоверности получаемых оценок состояния БС ПКК и ПКК В целом при наличии воздействия помех, априорной неопределенности и потенциально возможных нештатных ситуаций на борту ПКК наиболее действенным направлением совершенствования является автоматизация процесса оперативной оценки состояния ПКК. Рост производительности компьютерной техники позволяет применять новые и разнообразные алгоритмы анализа ТМИ для обработки больших объемов информации в режиме реального времени, в том числе с использованием интеллектуальных процедур. Реализация этого направления требует разработки новых математических подходов, одному из которых и посвящена настоящая работа.

1. Анализ текущего состояния

Время осуществления процедур оперативной оценки является основной критической характеристикой для оперативности процесса управления полетом ПКК. Под оперативностью управления техническим устройством принято понимать вероятность события, заключающегося в том, что время цикла управления не превысит заданное время, что в основном определяется конструктивными и функциональными возможностями КА, а также орбитальными параметрами движения. Анализ составляющих времени цикла управления, на основании современных возможностей различных технических, вычислительных устройств и средств передачи информации показывает, что наибольшее время требуется там, где есть необходимость в человеческом участии. Поэтому определяющим является факт определения специалистом ОГУ появления даже самых малозначительных признаков аномалий или неопределенности в текущем процессе на борту ПКК. Наличие времени позволяет минимизировать последствия аномального состояния на БС ПКК, а иногда и совсем свести их нулю [2, 3]. Существенным фактором в физических процессах на борту ПКК играет так называемая тенденция. Тенденция – это изменение значения телеметрического параметра (ТМП) состояния от предыдущего значения этого ТМП в большую или меньшую сторону на протяжении нескольких последовательных измерений.

Исходя из опыта управления ПКК тенденции изменения значений ТМП разделяются на следующие виды:

- номинальная тенденция – вид и особенности изменения которой определены до начала полёта ПКК;

- ненормальная тенденция – отклонение от номинальной тенденции сверх допустимой величины;
- нехарактерная тенденция – появление тенденции, которую до полёта определяли как нулевую.

Факт обнаружения любого вида тенденций позволяет получить необходимый признак специалисту ОГУ, для выявления аномальности физического процесса на борту. Заблаговременность обнаружения расширяет временные рамки на реагирование. Отсутствие поиска тенденций негативно сказывается на принятии решений и прогнозировании состояния ПКК.

2. Варианты тенденций

Анализ ТМИ БС ПКК позволяет выдвинуть гипотезу, что в полёте при изменении условий номинальные тенденции изменения сохраняются, меняя иногда амплитуду (под воздействием дополнительных воздействий, которые можно выявить и описать), но сохраняя базовые характеристики [4, 5].

Тенденции к выходу за пределы ожидаемых или допустимых диапазонов значений (ненормальные и нехарактерные) контролируемых ТМП по времени, затрачиваемому на их выявление, предлагается подразделять на два типа: быстро развивающиеся и затяжные тенденции. Такое разделение предлагается на основании анализа изменений значений ТМП за длительный срок, несколько лет.

К быстро развивающимся тенденциям (рис 1) предлагается относить изменения значений аналоговых ТМП, выявляемые при изменении значений аналоговых ТМП за малый промежуток времени (в пределах одного витка или до 90 минут). Появление

быстро развивающихся тенденций возможно на любом участке полёта и в любой момент времени сеанса связи.

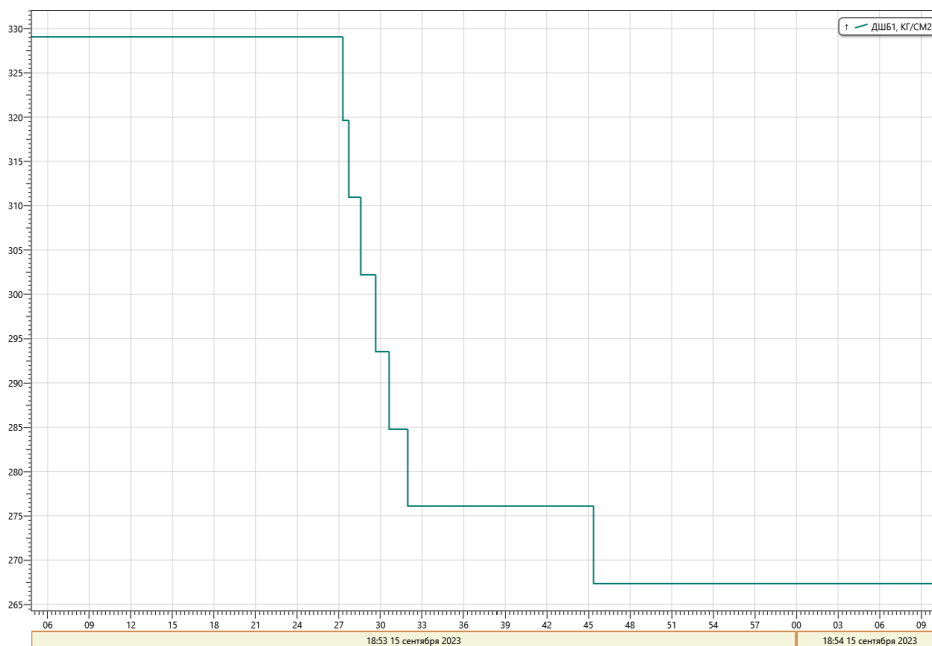
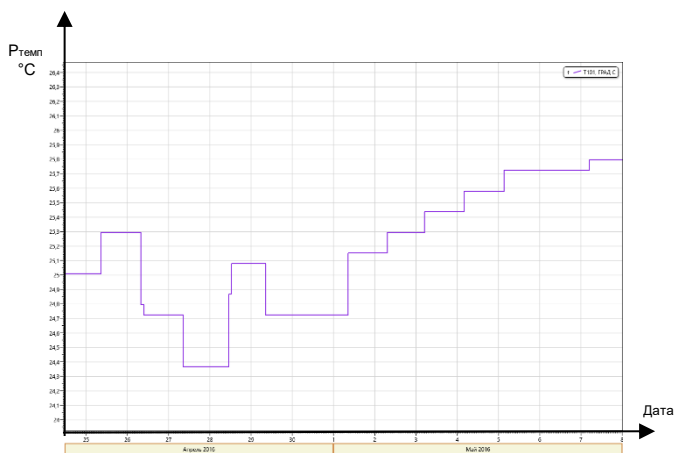
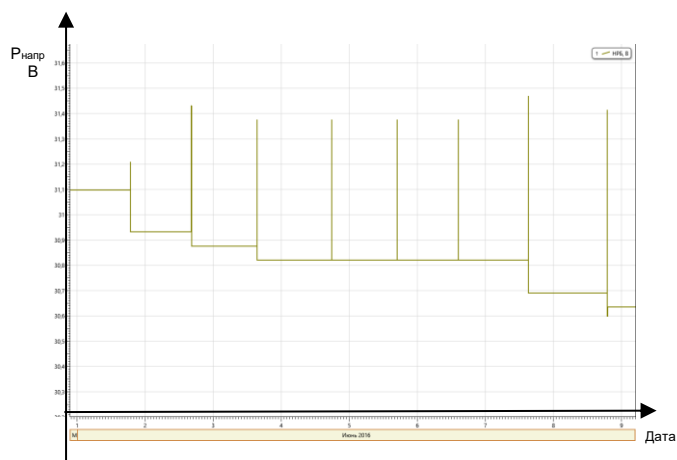


Рисунок 1 Разновидность функции быстро развивающихся тенденций

Изменения значений ТМП на промежутке времени от двух витков и более предлагается относить к затяжным тенденциям к выходу за пределы ожидаемых или допустимых диапазонов. Затяжные тенденции (рис 2), также как и быстро развивающиеся, могут быть выявлены на всех этапах полёта ПКК.



а)



б)

Рисунок 2 Общий вид функций изменения значения ТМП при наличии затяжной тенденций к выходу за пределы ожидаемого или допустимого диапазона а) для ТМП, зависящих от состояния внешней среды, б) для ТМП, независимых от состояния внешней среды

Разбиение тенденций на подобные виды даёт возможность описать принципы анализа отдельно для каждого вида тенденций, с учётом особенностей контролируемых ТМП. Автоматизированный анализ ТМП с целью выявления тенденций предлагается проводить параллельно, т.к. в динамике изменения значений любого ТМП выявлена одинаковая вероятность появления как затяжных, так и быстро развивающихся тенденций.

ТМИ имеет свои особенности, если рассматривать её как временной ряд. Для того, чтобы более подробно описать существующее разнообразие ТМИ, выделим наличие пропусков в связи от воспроизведения данных и отсутствие сеансов связи. Чаще всего для анализа данных используют аппроксимацию на заданный интервал, но такой подход не всегда подходит и требует отдельного изучения [6].

3.

4. Временные ряды. Решающая функция

Для поставленной задачи [7] предлагается использовать модернизированный статистический метод [8-10] обнаружения момента времени изменения свойств случайного процесса («разладки»).

Временной ряд каждого параметра можно описать как:

$$P_1 = \{p_{11}; p_{12}; \dots p_{1i}; p_{1i+h} \dots p_{1z}\}$$

$$P_2 = \{p_{21}; p_{22}; \dots p_{2i}; p_{2i+h} \dots p_{2z}\}$$

...

$$P_k = \{p_{k1}; p_{k2}; \dots p_{ki}; p_{ki+h} \dots p_{kz}\}$$

где p_{ii} – значение первого параметра на время i ;

z – количество значений на исследуемый период, $z \neq const$, а увеличивается при появлении каждого следующего значения;

h - шаг изменения времени $h = const$;

k – количество параметров в исследуемом, образующие временной ряд при исследовании.

Совокупность всех описываемых временных рядов можно представить как:

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} p_{11}; p_{12}; \dots p_{1i}; p_{1i+h} \dots p_{1z} \\ p_{k1}; p_{k2}; \dots p_{ki}; p_{ki+h} \dots p_{kz} \end{pmatrix}$$

Предположим [11, 12], что данные временные ряды можно отобразить на одном графике, т.е. отобразить вектора P_1 и P_2 . Каждый из них лежит в своей плоскости P_i . Соответственно для \tilde{P} в составе которого будет только два параметра P_1 и P_2 можно представить в виде, изображённом на рисунке 3.

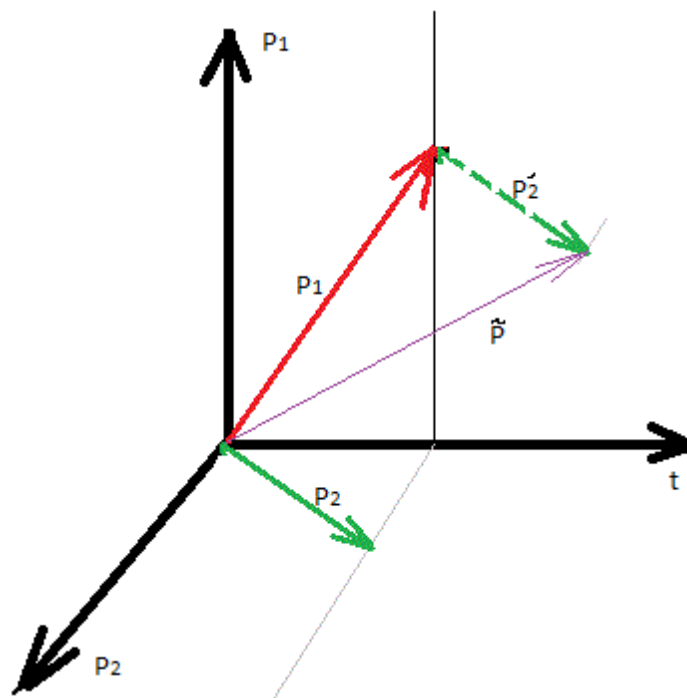


Рисунок 3 Вид совокупности изменения \bar{P}

При использовании данного способа предполагается, что в процессе функционирования БС ПКК в некоторый момент произошло изменение характеристик. Необходимо выполнить предварительный анализ, позволяющий выделить характеристики для дальнейшего использования в анализе временных рядов.

Решение решающей функции предполагает наступление момента времени, когда началась «разладка» и произошёл переход с одного вида решающей функции на другой вид.

5. Периодизация анализа ТМИ

Анализ полёта ПКК позволяет разделить всю оценку состояния БС ПКК на периоды:

- готовность,
- динамическая операция,

- переходный период.

Критерием разделения по готовности/динамической операции/переходному периоду является совокупность двух факторов:

1. Значение дискретного ТМП ($P(\text{Дискр}_i)$) или совокупности дискретных ТМП, характеризующих изменение в состоянии БС.
2. Анализ расхождения между математическим ожиданием ($\Delta M(P_i)$) в течение 15 секунд не превышает погрешность.

Период для БС	P (Дискр _i)	$\Delta M(P_i)$
Готовность	-	Меньше погрешности
Динамическая операция	+	Больше погрешности
Переходный	-	Больше погрешности

Под периодом **готовности** понимается период относительной стабильности изменений значений параметров ($\bar{P}_i \approx const$). Для такого периода достаточным критерием является признак соответствующего дискретного параметра или совокупности параметров и отсутствие избыточного отклонения от математического ожидания. На рисунке 4 представлены, в качестве примера, графики изменения значений параметров двигательной установки до наддува.

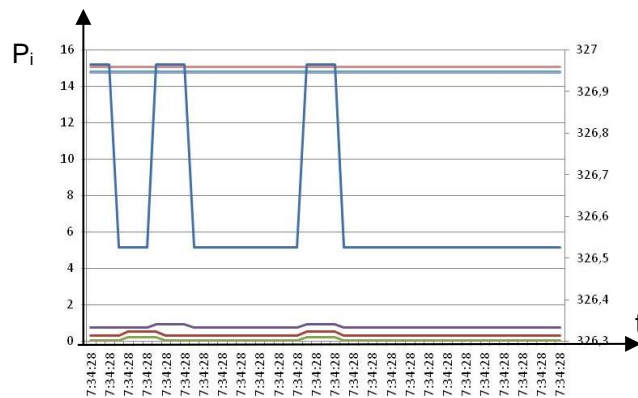


Рисунок 4 Графики изменений значений семи параметров БС ПКК, типичных для периода готовности

Под периодом динамической операции является состояние ПКК в момент выполнения динамической операции или их совокупности, целью которых является управляемое изменение состояния ПКК $\bar{P}_i = f(t)$. Для такого периода достаточным критерием является признак соответствующего дискретного параметра или совокупности параметров и наличие избыточного отклонения от математического ожидания.

В данном периоде имеется номинальная тенденция (рис. 5), характерная для выполнения данной операции, поэтому отклонение от математического ожидания не даёт ценных показателей.

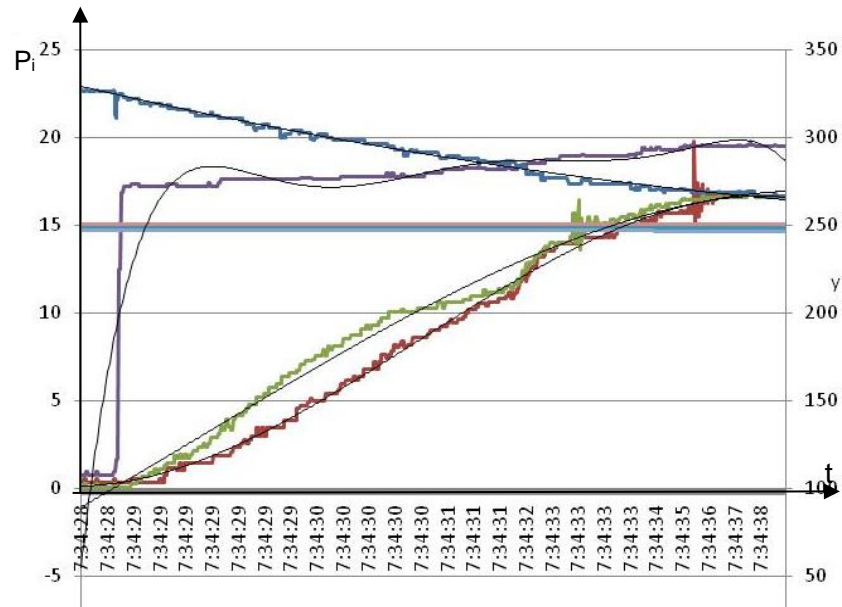


Рисунок 5 Графики изменений значений семи параметров БС ПКК, типичных для периода динамическая операция

Для анализа данных используем функции поведения номинальной тенденции на основании статистических данных и сумму модулей отклонения корреляции с решающим параметром (рис. 6).

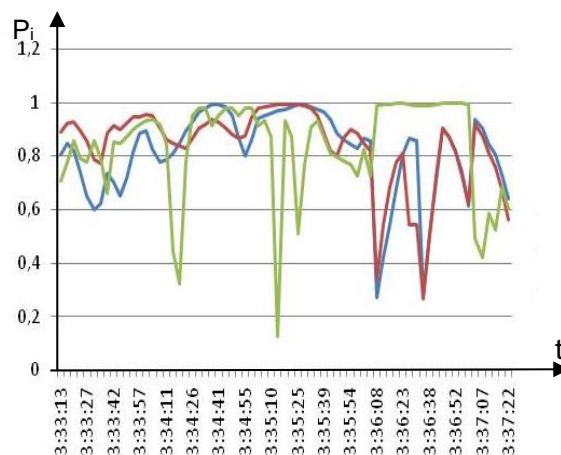


Рисунок 6 Модули корреляции при выполнении динамической операции между решающим параметром и иными параметрами

На рисунке 7 представлен вид изменения значений при наступлении переходного периода. Для такого периода достаточным критерием является изменение признака соответствующего дискретного параметра или совокупности параметров и наличие избыточного отклонения от математического ожидания. Данный период характеризуется постепенной стабилизацией изменений значений параметров с сохранением иного вида номинальных тенденций $\lim_{P_i \rightarrow M_{P_i}} f(\bar{P}_i(t))$.

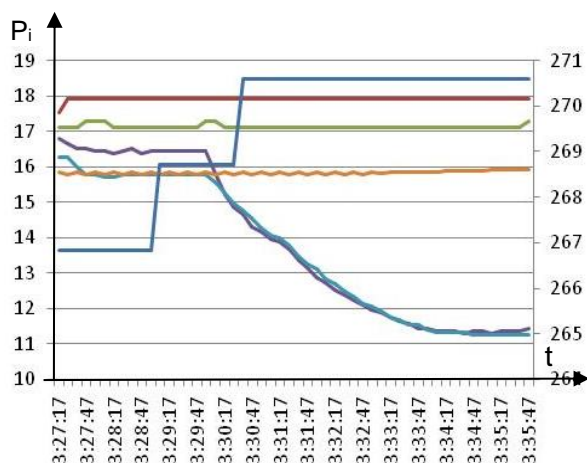


Рисунок 7 Графики изменений значений семи параметров BS ПКК, типичных для переходного периода

Основной целью данного исследование является поиск времени t_a момента «разладки» и начала нехарактерной/неноминальной тенденции.

6. Порядок анализа для каждого периода

Рассмотрим порядок анализа для каждого периода:

1. Готовность. Состояние готовности характеризуется стабильностью значений ТМП и наличием дискретного ТМП, который принимает фиксированное значение. Для контроля в данном состоянии используются следующий метод с учетом анализа временных рядов: мониторинг стабильности математических ожиданий [13, 14]. Решающая функция представляет собой сумму отклонений от математического

ожидания. При превышении отклонения решающая функция прибавляет значение 1 к предыдущему значению решающей функции. Граница суммы отклонений принимается для каждой бортовой системы исходя из статистических данных.

Решающая функция для этого периода:

$$Y_t = \begin{cases} \sum_{i=1}^n |M_{\bar{P}_i} - \bar{P}_i(t)| & \text{если } t < t_a \\ x(t)H + \sum_{i=1}^n |M_{\bar{P}_i} - \bar{P}_i(t)| & \text{если } t \geq t_a \end{cases}$$

Где $\bar{P}_i(t)$ – значение i -го ТМП на время t ; $M_{\bar{P}_i}$ – математическое ожидание P_i ТМП; n – количество учтённых ТМП в решающей функции, в исследовании количество n совпадает с количеством ТМП в системе; $H \in R^n$ – физически возможный вектор направления распространения изменения значений ТМП; $x(t)$ – скалярный процесс с неизвестными характеристиками, моделирующий изменения значений ТМП; t – время; t_a – время «разладки».

2. Динамика. В состоянии динамики наблюдается изменение значения дискретного ТМП и нестабильность математических ожиданий других ТМП. Контроль в данном периоде включает следующие мероприятия с акцентом на анализе временных рядов: анализ изменения формул описывающих характер ТМП, методы анализа временных рядов, такие как сглаживание скользящим средним и экспоненциальное сглаживание, используются для отслеживания нестабильности значений ТМП во времени [15]. Вычисление корреляции между «основным» ТМП и зависимыми. Формирование решающей функции строится на корреляциях ТМП.

Сравнение текущих значений с базовыми данными для выявления аномалий и нештатных ситуаций с применением анализа временных рядов.

Статистика полётов позволяет сформировать функцию, описывающую статистическое поведение параметров, входящих в состав контролируемой БС определённо [16]. Критериями использования различных коэффициентов являются дискретные параметры, которые определяют скорость и плавность изменения параметров.

$$f_{\text{повед}}(t) = \begin{cases} P_{\text{повед } 1}(t) = a_1 t^6 + b_1 t^5 + c_1 t^4 + d_1 t^3 + e_1 t^2 + g_1 t + P_{\text{исх } 1} \\ \dots \\ P_{\text{повед } n}(t) = a_n t^6 + b_n t^5 + c_n t^4 + d_n t^3 + e_n t^2 + g_n t + P_{\text{исх } n} \end{cases}$$

Где $P_{\text{повед } i}(t)$ – функция поведения параметра P_i на интервале проведения динамической операции, выполненная на основании статистических данных; $a_i \dots g_i$ – коэффициенты функции, позволяющие максимально точно описать статистические данные изменения поведения параметра P_i на интервале проведения динамической операции; $P_{\text{исх } i}$ – начальная точка отсчёта поведения параметра P_i , для исследования характерно равенство $P_{\text{исх } i} = P_i(t = 0)$; $f_{\text{повед}}(t)$ – функция, описывающая статистическое поведение параметров входящих в состав контролируемой БС, критерием использования статистических параметров являются дискретные параметры (например, величина импульса для КДУ).

Решающая функция для этого периода:

$$Y_t = \begin{cases} \sum_{i=1}^n |\rho_{P_{\text{реш}} - \bar{P}}| + \sum_{i=1}^n |f_{\text{повед } \bar{P}}(t) - f_i(t)| & \text{если } t < t_a \\ x(t)H + \sum_{i=1}^n |\rho_{P_{\text{реш}} - \bar{P}}| + \sum_{i=1}^n |f_{\text{повед } \bar{P}}(t) - f_i(t)| & \text{если } t \geq t_a \end{cases}$$

Где $P_{\text{реш}}$ – выделенный заранее по статистическим данным параметр, относительно которого возможно структурировать динамику изменения; $|\rho_{P_{\text{реш}}-P_i}|$ – модуль отклонения корреляции между $P_{\text{реш}}$ и другим параметром в этой БС.

3. Переходный период, характеризуется возвращением дискретного параметра к фиксированному значению и продолжающейся нестабильностью ТМП. Для контроля и анализа в данном периоде предлагается применять следующие методы с учетом анализа временных рядов: формирование обобщённого вектора состояния для ТМП, анализ его поведения со статистическим. На основе анализа данных временных рядов предпринимаются меры по коррекции [17, 18] и оптимизации процессов для восстановления стабильности, если это необходимо. Для вычисления решающей функции разделяем ТМП:

- параметры $i=[1; r]$, конечное M_{P_i} математическое ожидание которых известно в некотором диапазоне. Данный диапазон значительно меньше, чем поле допуска параметра при допусковом контроле.

- параметры $k=[1; z]$, конечное математическое ожидание которых неизвестно и предел которого слишком обширен.

Решающая функция для этого периода:

$$Y_t = \begin{cases} \lim_{\bar{P}_i \rightarrow M_{P_i}} d_{\text{в.с.}}(\bar{P}_i) + \sum_{k=1}^z |f_{\text{повед}\bar{P}_i}(t) - f_i(t)| & \text{если } t < t_a \\ x(t)H + \lim_{P_i \rightarrow M_{P_i}} d_{\text{в.с.}}(\bar{P}_i) + \sum_{k=1}^z |f_{\text{повед}\bar{P}_i}(t) - f_i(t)| & \text{если } t \geq t_a \end{cases}$$

Где $d_{в.с.}(\bar{P}_i)$ функция, которая позволяет оценить конечное M_{P_i} в некотором диапазоне. Выделение предела функции позволяет анализировать приближение к статистическим данным. Однако параметры, по которым математическое ожидание неизвестно и предел которого слишком обширен, необходимо оценивать по номинальной тенденции, сформированной по статистическим данным.

При программировании элемента алгоритма был использован принцип - в случае если решающая функция равна нулю - это норма, а значит, нет изменения программы полета и дальше цикл выполняется заново [19, 20]. Если появляется не номинальная тенденция автоматически производится проверка, какой именно параметр выдал данную нештатную ситуацию и по совокупности значений/изменений параметров определяется нештатная ситуация. В случае если она влияет на план полета необходимо выдать рекомендацию и дальше продолжить определение тенденции изменения состояния.

7. Заключение

Решение задачи оперативного анализа возможно при более индивидуальном подходе к совокупности номинальных тенденций. Решение в общем виде предлагается как совокупность решающих функций в зависимости от периода полёта. Вводятся дополнительные критерии, позволяющие однозначно определить наличие какого вида номинальной тенденции имеет место для данного периода.

Предложенный метод позволяет автоматизировать процесс оперативной оценки в части выявления времени изменения поведения тенденций значений ТМИ.

Список источников

1. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: учебное пособие. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. Ч. 2. – 426 с.
2. Соловьёв С.В., Мишурова Н.В. Анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полетом космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1474.html>. DOI: [10.18698/2308-6033-2016-03-1474](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-03-1474)
3. Мальцев Г.Н., Якимов В.Л., Соловьёв С.В., Лебедева Н.В. Первичная обработка телеметрической информации с использованием динамических моделей изменения параметров и парциальной нелинейной фильтрации // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 22-34. DOI: [10.31799/1684-8853-2018-5-22-34](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-22-34)
4. Смерчинская С.О., Яшина Н.П. Агрегирование предпочтений с учетом важности критериев // Труды МАИ. 2015. № 84. <https://trudymai.ru/published.php?ID=63146>
5. Осипов Н.А., Шавин А.С., Тарасов А.Г. Методика идентификации помех, действующих в канале передачи информации робототехнических систем // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81085>
6. Травин А.А., Калашников Е.А., Бакрадзе Л.Г. Совершенствование диагностики механизмов машин с использованием методов неразрушающего контроля // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170352>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-23)

7. Артамонов Н.В., Ивин Е.А., Курбацкий А.Н., Фантащини Д. Введение в анализ временных рядов. - Вологда: ВолНЦ РАН, 2021. – 134 с.
8. Гребенюк Е.А. Обнаружение изменений свойств нестационарных случайных процессов // Автоматика и телемеханика. 2003. № 12. С. 44–59.
9. Гребенюк Е.А. Методы анализа нестационарных временных рядов с неявными изменениями свойств процессов // Автоматика и телемеханика. 2005. № 12. С. 3–30.
10. Гребенюк Е.А. Анализ и оперативная диагностика систем, описываемых нестационарными случайными процессами // Проблемы управления. 2003. № 4. С. 23–29.
11. Семаков С.Л., Семаков И.С. Простейшая прогнозная модель временного ряда и ее реакция на линейное и параболическое входные воздействия // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93446>
12. Семаков С.Л. Об одном подходе к вероятностной оценке безопасности посадки гражданского самолета // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102188>
13. Якимов В.Л., Панкратов А.В. Алгоритм формирования диагностических признаков бортовых динамических систем на основе показателя Херста // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62242>
14. Якимов В.Л., Мальцев Г.Н. Гибридные сетевые структуры и их использование при диагностировании сложных технических систем // Информатика и автоматизация. 2022. № 21 (1). С. 126–160.

15. Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели // Труды СПИИРАН. 2018. № 56. С. 95–121.
16. Пономаренко В.И., Лапшева Е.Е., Прохоров М.Д. Оценка времен задержки по временным рядам кольцевых автоколебательных систем с запаздыванием // Информационно-управляющие системы. 2022. № 6. С. 53-61. DOI: [10.31799/1684-8853-2022-6-53-61](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-6-53-61)
17. Гришин И.Ю. Метод адаптивной рекуррентной фильтрации измерений параметров космических объектов // Искусственный интеллект. 2008. № 4. С. 62–73.
18. 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. DOI: [10.21778/2218-5453-2020-10-31-37](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-10-31-37)
19. Елисеев А.В., Кузнецов Н.К., Елисеев С.В. Частотная энергетическая функция в оценке динамических состояний технических объектов // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158213>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-04)
20. Попов И.П. Расчет механических колебаний в поле комплексных чисел // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119888>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-01](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-01)

References

1. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* (Space flight management), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2010, Ch. 2, 426 p.
2. Solov'ev S.V., Mishurova N.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 3, URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1474.html>. DOI: [10.18698/2308-6033-2016-03-1474](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-03-1474)
3. Mal'tsev G.N., Yakimov V.L., Solov'ev S.V., Lebedeva N.V. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2018, no.5, pp. 22-34. DOI: [10.31799/1684-8853-2018-5-22-34](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-22-34)
4. Smerchinskaya C.O., Yashina N.P. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63146>
5. Osipov N.A., Shavin A.S., Tarasov A.G. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81085>
6. Travin A.A., Kalashnikov E.A., Bakradze L.G. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170352>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-23)
7. Artamonov N.V., Ivin E.A., Kurbatskii A.N., Fantatstsini D. *Vvedenie v analiz vremennykh ryadov* (Introduction to Time Series Analysis), Vologda, VolNTs RAN, 2021, 134 p.
8. Grebenyuk E.A. *Avtomatika i telemekhanika*, 2003, no. 12, pp. 44–59.
9. Grebenyuk E.A. *Avtomatika i telemekhanika*, 2005, no. 12, pp. 3–30.
10. Grebenyuk E.A. *Problemy upravleniya*, 2003, no. 4, pp. 23–29.
11. Semakov S.L., Semakov I.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93446>

12. Semakov S.L. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102188>
13. Yakimov V.L., Pankratov A.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62242>
14. Yakimov V.L., Mal'tsev G.N. *Informatika i avtomatizatsiya*, 2022, no. 21 (1), pp. 126–160.
15. Mal'tsev G.N., Nazarov A.V., Yakimov V.L. *Trudy SPIIRAN*, 2018, no. 56, pp. 95–121.
16. Ponomarenko V.I., Lapsheva E.E., Prokhorov M.D. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2022, no. 6, pp. 53-61. DOI: [10.31799/1684-8853-2022-6-53-61](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-6-53-61)
17. Grishin I.Yu. *Iskusstvennyi intellect*, 2008, no. 4, pp. 62–73.
18. Ptitsyn S.O., Zaitsev D.O., Pavlov D.A., Shmelev V.V. *Voprosy radioelektroniki*, 2020, no. 10, pp. 31-37. DOI: [10.21778/2218-5453-2020-10-31-37](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2020-10-31-37)
19. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158213>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-04)
20. Popov I.P. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119888>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-01](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-01)

Статья поступила в редакцию 08.04.2024

Одобрена после рецензирования 15.04.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 08.04.2024; approved after reviewing on 15.04.2024; accepted for publication on 28.08.2024