ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ДИНАМИКЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.Д. Бабишин, Е.В. Юркевич, Л.Н. Крюкова (Москва)

С целью обеспечения стабильности параметров уникальных программно-технических средств (ПТС), входящих в состав бортовой системы космического аппарата (БС КА) в данной статье рассматриваются возможности минимизации времени и стоимости их испытаний на внешние воздействия.

В настоящее время стабилизация параметров БС КА основана на использовании локальных функций [1]. При строгом рассмотрении такой подход имеет ограничения в возможности достижения оптимальности в минимизации разброса значений контролируемых параметров. Существующие методы обеспечения стабильности значений параметров испытуемого средства [2] часто не удовлетворяют требованиям разработчика, так как работа этих средств, как правило, описывается при сильных допущениях и без учета времени развития реакции на внешние воздействия, что в целом приводит к существенному ухудшению точности оценки параметров ПТС. Таким образом, необходимы новые инструменты оперативной поддержки решений. Одним из них является предлагаемая имитационная модель обеспечения стабильности параметров БС на основе прямых методов оптимального управления [2].

Постановка задачи оперативной стабилизации параметров программно-технического средства, созданного в единственном экземпляре

На этапе наземных испытаний техническое состояние испытуемого ПТС будем характеризовать результатами мониторинга соблюдения требований к его параметрам и стабильности их значений, указанным в техническом задании на разработку данного средства. Выделим два этапа обработки результатов такого мониторинга:

– на первом этапе решается прямая задача – оценка результатов разработки испытуемого средства, т.е. устанавливается соответствие значений контролируемых параметров требованиям технического задания на его разработку при проведении наземных испытаний;

– на втором этапе решается обратная задача – формирование предложений по совершенствованию конструкторско-технологических и системных решений испытуемого средства, обеспечивающих значения контролируемых параметров и их стабильность при внешних воздействиях согласно требованиям Технического задания на этапе летных испытаний. На практике решения, предлагаемые на втором этапе, могут корректироваться.

В настоящее время отсутствуют механизмы априорного статистического анализа технического состояния ПТС в составе БС КА. Разработка предложений по совершенствованию конструкторско-технологических решений испытуемого средства представляет собой многомерную задачу. В силу неединственности путей обеспечения стабильности параметров ПТС, входящих в БС, для решения поставленной задачи в настоящее время требуется проведение большого числа испытаний.

Практика согласования фактических значений параметров $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ множества X ПТС с требованиями технического задания показывает, что оба этапа обработки результатов мониторинга, как правило, реализуются в виде решения некорректно поставленных задач, что затрудняет интерпретацию получаемых результатов. К настоящему времени разработано большое число общих и частных методов решения некорректных задач. Например, регуляризация получаемых решений, предложенная А.Н. Тихоновым [2], модификации этого метода на основе обобщенного суммирования рядов Фурье, разработанные В.К. Детковым [2,3] и др.

Соответствие значений параметров БС КА требованиям Технического задания на разработку испытуемого средства оценивается на основе данных телеметрического контроля. Характеристикой, ограничивающей выполнение условий такого соответствия, является порог устойчивости предельных параметров $\{x_1, x_2, \ldots x_k\}$ множества X при внешних воздействиях (нагрузках) $\{u_1, u_2, \ldots, u_k\}$, которые рассматриваются как параметры режимов процесса функционирования данной системы в виде стационарного случайного процесса $u(t)$. В качестве параметров работы системы используются предельные значения этих параметров (сопротивляемость) $x_i(t)$, выраженные через предельные значения нагрузок $x_u(t)$ или $u_i(t)$. Нормальными условиями эксплуатации, оговоренными в технической документации, для этих систем являются допустимые диапазоны режимов нагрузки $u(t)$. В общем случае значения нагрузки $\hat{u}(t)$ и предельные значения управляемых параметров $\hat{x}_i(t)$ – случайные величины. Для соблюдения вероятностных законов стационарный случайный процесс $x_i(t)$ представляется в виде простой случайной функции-последовательности некоррелированных максимумов $\{x_i\}$. Следовательно, для данной случайной функции задаются законы распределения, которые, как правило, получены по результатам заводских испытаний или телеметрического контроля. Исходной информацией для решения данной задачи являются заданные значения функции надежности $R(\hat{n} > n)$ и функции $F_{\hat{u}}(X)$ – условная функция распределения внешнего воздействия $\hat{U}$, где n – число испытаний (дискретное время) согласно [5] .

Задача испытаний состоит в том, что необходимо найти предельные значения параметров $\{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots \hat{x}_i \ldots \hat{x}_m\}$ при заданных значениях функции надежности $R(\hat{n} > n)$ и заданной функции $F_{\hat{u}}(X)$ – условной функции распределения внешнего воздействия $\hat{U}$.

Для 1-го параметра системы выражение для функции надежности системы согласно [3,5]

$$R_{\hat{n}}(n) = \sum_{l=1}^{m} \left[F_{\hat{u}}(x)\right]^n \times \partial F(X) \tag{1}$$

где, $F_{\hat{u}}(X)$ - условная функция распределения внешнего воздействия относительно гипотезы о том, что предельное (допустимое значение воздействия принадлежит элементарному отрезку $x_i < \hat{x}_i < x_i + \Delta\tilde{o}$;

$\hat{x}_i$ –случайная величина предельных значений управляемого параметра, необратимые изменения которой в процессе испытаний не учитываются;

$\hat{u}$ – случайная величина нагрузки;

$\hat{n}$ – случайная дискретная величина, равная числу испытаний (дискретное время) до отказа;

$\partial F_{\tilde{o}}(X) = \varphi(\tilde{o}) \times \Delta\tilde{o}$ – функция распределения предельных значений управляемого параметра, обоснования и исчерпывающая характеристика допустимого предела величин внешнего воздействия, приводящее устройство к отказу;

$\varphi_{\hat{x}}(\hat{x}_i)$ – есть плотность функции распределения случайной величины $\hat{x}$ управляемого параметра $\hat{x}_i$ системы;

Δx – длина интервала разбиения предельного значения управляемого параметра $\hat{x}_i$.

m – число интервалов разбиений предельного значения управляемого параметра $\hat{x}_i$.

Таким образом? постановка задачи управления надежностью заключается в следующем.

При известной функции надежности системы $R(\hat{n} > n)$ и законе распределения нагрузки системы $F_{\hat{u}}(\tilde{O})$ для 1-го управляемого параметра $\hat{x}_i(t)$ а также длине интервала Δx разбиения случайной величины $\hat{x}$ управляемого параметра $\hat{x}_i(t)$ определить по количеству испытаний $n_{\hat{i}\hat{i}\tilde{o}}$ оптимальную плотность распределения управляемых параметров $\varphi_{\hat{x}}(\hat{x}_i)$ при сохранении требуемой точности оценки параметров ПТС.

Построение имитационной модели управления обеспечением стабильности параметров уникального программно технического средства БС КА

Задача заключается в определении плотности распределения управляемого параметра $\varphi_{\hat{x}}(\hat{x})$, которая определяется методом Зейделя по формуле (1) согласно [3].

Для этого:

1. Значения управляемого параметра $\widehat{x_i}$ разбиваются на l =1, 2,…….m интервалов, для которых минимальный интервал времени (корреляции) $\Delta\tau_{êîð}$ означает, что значения максимумов случайной функции нагрузок, разделенные любым большим интервалом, можно считать практически некоррелированными.

2. Уравнение (1) представляется в виде компактной матричной (операторной) форме записи

$$A \times \varphi = r \tag{2}$$

где вектор $\varphi = \partial F_{\hat{X}}(X)$

A – оператор, или переходная функция, $\grave{A} = \left[F_{\hat{U}}(X)\right]^n$

φ – векторная плотность распределения параметра, т.е. функция, подлежащая определению,

$r \in R_{\hat{n}}(n)$ – вектор правой части уравнения (2) – функция надежности системы.

Эффективным методом решения системы линейных алгебраических уравнений вида (2) является метод Зейделя.

Алгоритм решения данной задачи (2) имеет следующий вид:

$$\varphi_k^{n+1} = D^{-1} \times B \times \varphi^n \times \alpha_k + D^{-1} \times C,\ k = 1,\ldots,n, \tag{3}$$

где φ_k^{n+1} – искомый вектор приближения на текущем $(n+1)$-м шаге итерации;

φ^n – то же на предыдущем шаге итерации;

$$D = \begin{vmatrix} \Phi_1 & 0 & 0 & \ldots.0 \\ \Phi_2 & \Phi_2 & 0 & \ldots0 \\ . & . & . & \ldots. \\ \Phi_{m1} & \Phi_{m2} & \Phi_{m3} & \ldots\Phi_m \end{vmatrix}$$ – нижняя треугольная матрица;

$$A = -\begin{vmatrix} 0 & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \ldots\Phi_{1m} \\ 0 & 0 & \Phi_{23} & \ldots\Phi_{2m} \\ . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & \ldots0 \end{vmatrix}$$ – верхняя треугольная матрица,

которые получаются из исходной матрицы $\Phi = A^T \times A$;

α_κ – коэффициент стабильности;

$C = A^T \times r$,

где A^T транспортирования матрица оператора A.

3. **Текущая** базовая погрешность $\mathring{a}_k$ определяется по формуле согласно [3]:

$$\varepsilon_k = \frac{\sqrt{\sum_{l=1}^{m} \left(\varphi_l^* - \varphi_k\right)^2 \times \Delta x}}{\sqrt{\sum_{l=1}^{m} \varphi_l^{*2} \times \Delta x}};$$

где $-\varphi_l^*(\tilde{\delta})$ эталонные значения плотности функции распределения проектного значения управляемых параметров, которые подчиняются нормальному закону при условии, что нагрузка согласно теории надежности, действующая на объект управления, подчиняется экстремальному закону распределения вероятности, согласно [6]

$l = 1,2.....m$; $k = 1,2......n$;

Δx – длина интервала разбиения предельного значения управляемого параметра;

n – число испытаний (дискретное время),

m – число интервалов разбиений предельного значения управляемого параметра $\hat{x}_i$,

$\varphi_{lk}(\tilde{\delta})$ – текущие значения кривой плотности функции распределения управляемого параметра системы на l =1, 2,…….m интервале разбиения параметра $\hat{x}_i$, получаемые в результате решения задачи по формуле (3).

Минимальная базовая погрешность (требуемая) $\varepsilon_{k_{\grave{a}\grave{a}\c{c}}\ \grave{i}\grave{e}\acute{i}}$ задается заказчиком.

Для получения оптимального количества итераций $n_{\hat{i}\eth\grave{o}}$. и оптимального значения проектного значения плотности функции распределения сопротивляемости φ_α^n по формуле (3) вводится целевой функционал $J[n_{\hat{i}\ddot{i}\grave{o}}(\tilde{\delta})]$ на основе прямого метода оптимального управления между характеристиками комплекса испытаний и показателями надежности в виде согласно [5]

$$P_{\hat{n}}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\hat{u}}^{n-1}(x) R_{\hat{u}}(x) dF_{\hat{x}}(x) = J(n_{\hat{i}\ddot{i}\grave{o}}(\tilde{\delta}) \tag{4}$$

где $R_u(x)$ – функция надежности в виде:

$$R_{\hat{u}}(x) = 1 - F_{\hat{u}}(x)$$

Выражение (4) записывается по аналогии с выражением (2) в виде:

$$P_{\hat{n}}(n) = \sum_{k=1}^{m} \left[F_{\hat{u}}^{n-1}(x)(1 - F_{\hat{u}}(x))\right] \times \varphi(x) \times \Delta\tilde{o}, \quad . \tag{5}$$

Выражение (5) записывается в операторном виде:

$$\text{Đ}_{\hat{n}}(n) = B \times \varphi_{\hat{x}}(x)$$

Для решения полученной задачи оптимального управления надежностью предлагается прямой градиентный метод [2].

Таким образом, обобщенная устойчивая имитационная модель прямой задачи оптимального управления надежностью записывается в следующем виде:

$$J(n_{\hat{i}\ddot{i}\grave{o}}) = P_n(n_{\hat{i}\ddot{i}\grave{o}}) = \hat{A}\varphi_x(\hat{x}) = \sum_{k=1}^{m} [F_{\hat{u}}^{n-1}(\tilde{\delta})(1 - F_{\hat{u}}(\hat{x}))] \times \partial F(\hat{x}) \to \min \tag{6}$$

при следующих ограничениях:

$$\grave{A}\varphi_{\hat{x}}(\hat{x}) = R(n_{\hat{i}\ddot{i}\grave{o}}) = \sum_{k=1}^{m} [F_{\hat{u}}(\hat{x})]^n \times \partial F(\hat{x})$$

$$[n_x(x)] = \frac{t}{\Delta\tau} = 1,2,3\ldots n_{opt} \text{ при: } t_0 \le t \le T; \Delta\tau > 0; x(t_0) = x_0,\ x(t_0) = x_0,\ x(t_1) = x_1$$

где: $J[n_x(\hat{x})]$ – целевой функционал управляющих функций;

$x(t) = \{\hat{x}_1, \ldots, \hat{x}_m\}$ и $n(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_m) = \{n_1, \ldots, n_n\}$ – соответственно вектор-функции состояния объекта и управления с целевым функционалом $J[n_{\hat{i}\ddot{i}\grave{o}}(\tilde{\delta})]$ и управляющими функциями $n(\hat{x}_1, \ldots, \hat{x}_m)$,

$B\ \grave{e}\ \grave{A}$ соответственно интегральные операторы для уравнений целевого функционала и уравнения ограничений для заданной надежности.

Решение данной задачи заключается в определении оптимального количества испытаний (итераций) $n_{\text{ïîò}}\left(\hat{x}_1,...\hat{x}_m\right)$, при которых функционал $J\left[n_{\text{ïîò}}\ (\tilde{\delta})\right]$ уравнения (6) достигает минимальных значений (решение задачи в статье не рассматривается).

Заключение

Предложенная имитационная модель позволяет при решении задачи прямым методом оптимального управления определить оптимальное число наземных испытаний и стоимость их проведения, повысить оперативность принятия решения по управлению техническим состоянием функционирования БС при проведении наземных испытаний.

Литература

1. **Yurkevich E.V., Kryukova L.N.** Problems with regulating the functional reliability of means of measurement and control in industrial processes // Measurement Techniques. 2013. Vol.56. №1. P. 25–30.
2. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука.1986.
3. **Бурба А.А., Бабишин В.Д., Давыдов А.Н., Дедков В.К., Дорошенко М.А.** Устройство формирования управляющих воздействий для обеспечения устойчивой работы сложных технических систем. Патент на изобретение №2475828 от 20.02.2013.
4. **Бабишин В.Д., Дорошенко М.А., Маклаков В.В.** Модифицированный метод регуляризации решения некорректных задач при управлении сложными техническими системами // Двойные технологии. №3. 2013.
5. **Северцев Н.А., Дедков В.К.** Системный анализ и моделирование безопасности. М.: Высшая школа, 2006.
6. **Бабишин В.Д. Маклаков В.В. Дорошенко М.А.** Теоретические рекомендации по определению закона распределения характеристик сложных систем в условиях динамического нагружения // Двойные технологии. №4. 2013. С. 2–5.