

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ БСКД

Н.С. Кулик, д-р техн. наук,

А.А. Тамаргазин, д-р техн. наук,

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Используемые в настоящее время методы моделирования и оптимизации набора диагностических параметров, покрывающего множество вероятностных дефектов объектов диагностирования, в сочетании с алгебраическими методами распознавания образов открывают широкие возможности для реализации автоматизированных систем диагностического сопровождения современной авиационной техники. Использование в качестве входных параметров диагностических моделей регистрируемых в полете параметров позволило перейти от линейных статических моделей к нелинейным динамическим.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Особое внимание в теоретических и практических исследованиях [1, 2, 3] уделено моделированию рабочего процесса авиационных газотурбинных двигателей. Полученные результаты моделирования были использованы в ряде крупных моторостроительных компаниях (Мотор Сич, SNECMA, General Electric) для реализации оригинальных и эффективных алгоритмов управления и диагностирования силовых установок пассажирских самолетов. Однако при моделировании работы двигателей на наиболее перспективных, с точки зрения диагностирования, переходных режимах работы наблюдаются существенные погрешности, изменяющиеся от полета к полету. Причиной их являются нестационарные погрешности бортовых систем контроля двигателей (БСКД).

Цель исследований. Целью исследования являлась разработка метода учета нестационарных погрешностей в модели "БСКД – двигатель".

Результаты исследований. Наиболее распространенными источниками нестационарности в БСКД яв-

ляются процессы старения и износа ее комплектующих. Эти источники проявляют себя изменчивостью и зависимостью конструктивных параметров измерительных систем от времени и тем самым изменчивостью коэффициентов статической (либо динамической) математической модели.

Нестационарным принято называть элемент, параметры которого являются нестационарными величинами и изменяются случайным образом. Такой параметр можно рассматривать как независимый источник неустойчивости на входе определенной ступени преобразования. Поскольку потенциально каждый конструктивный параметр является источником неустойчивости, число независимых случайных входных переменных составляет $m + k - 1$ (в том числе $m - 1$ воздействующих величин и k конструктивных параметров).

Анализируя физические причины неустойчивости конструктивных параметров, необходимо различать такие составляющие:

1. Неопределенность номинальных значений конструктивных параметров – $\Delta \tilde{a}_{j0}$. Вводя в математическую модель номинальное значение a_{j0} данного параметра, мы основываемся на результатах измерения этого параметра, содержащих погрешность Δa_{j0} . В каждом элементе БСКД присутствует одно постоянное значение этой погрешности (один элемент множества), в результате чего указанная погрешность имеет постоянную величину. Тем не менее эта погрешность должна быть учтена в модели.

2. Зависимость данного параметра от условий среды, например от температуры, – Δa_{jd} . Причина эта учитывается в детерминированной модели путем

принятия i -й величины в качестве воздействующей (влияющей).

Модель элемента БСКД в общем виде можно записать как

$$y = F(x_1, \dots, x_{m-1}, x_m, T, a_1, \dots, a_k, z). \quad (1)$$

Величины $x_i, \dots, x_m$ представляют собой случайные процессы с известными или неизвестными характеристиками; они могут быть измеримыми либо неизмеримыми, управляемыми либо неуправляемыми в зависимости от цели и условий использования данного элемента БСКД. В уравнении (1) T обозначает время эксплуатации ИС. Величины $a_1, \dots, a_k$ – конструктивные параметры данного элемента. Величина z характеризует неточность модели, а также неизвестное или неучтенное влияние окружения. По своей природе z – неизмеримая и неуправляемая величина, и часто принимается $E(z) = 0$. Величина y – выходная величина. Для большинства элементов БСКД можно ограничиться моделью с одной выходной величиной.

Математическую модель образуют оператор F , а также конструктивные параметры a_j , $j = \overline{1, k}$, описывающие связь между входными и выходными величинами. Параметры a_j характеризуют свойства комплектующих, из которых построен конкретный элемент БСКД.

В таком случае зависимость выходной величины от воздействующей x_i характеризует суммарный эффект всех конструктивных параметров, т.е.

$$dy_i = \left[\frac{\partial F(x_1, \dots, x_{m-1}, x_m)}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial F}{\partial a_j} \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right] dx_i,$$

либо

$$\Delta y_i = \int_{x_{i0}}^{x_i} \frac{\partial F}{\partial x_i} dx_i + \int_{x_{i0}}^{x_i} \sum_j \frac{\partial F}{\partial a_j} \frac{\partial a_j}{\partial x_i} dx_i.$$

Фактор $\partial a_j / \partial x_i$ известен из свойств комплектующих, а производная $\partial F / \partial a_j$ определяется моделью (1).

3. Нестабильность параметра a_j во времени – $\Delta \tilde{a}_{jn}$. Эту нестационарность могут вызвать:

а) молекулярные явления (осцилляции). Условно в качестве характерного диапазона частот принимается диапазон $f > 1$ Гц, т.е. те осцилляции, которые не вос-

принимаются наблюдателем и эффективно отфильтровываются электромеханическими измерительными приборами;

б) неучитываемые изменения воздействующих величин (например, изменение атмосферного давления под влиянием скоростного напора) вследствие невключения их в детерминированную модель либо вследствие изменений влияющих величин ниже их порогов измеримости (например, изменение температуры в термостате). В качестве характерного диапазона частот принимается интервал $f = 10^{-5} \dots 1$ Гц. Эти изменения называются флуктуациями;

в) старение и износ материалов. Это дрейф, являющийся главной причиной нестационарности. Частота соответствующих изменений мала ($f < 10^{-5}$ Гц).

Характеристика шумов в диапазоне $10^{-8} \dots 10^8$ Гц приведена в [4]. Распределение шумов подтверждает принципиальность деления их на осцилляции, флуктуации и дрейф.

Согласно [5] j -й конструктивный параметр описывается переменной

$$a = a_0 + \Delta \tilde{a} = a_0 + \Delta \tilde{a}_0 + \Delta \tilde{a}_d + \Delta \tilde{a}_n. \quad (2)$$

На рисунке показаны источники погрешностей, причем символом a_p обозначено истинное значение параметра. Индекс 0 соответствует эталонным условиям, T – время эксплуатации. Величин, воздействующих на j -й параметр, может быть и больше.

4. Нестационарный источник. Член $\Delta \tilde{a}_n$ в выражении (2) отвечает внутреннему, нестационарному источнику погрешности. Обозначим его символом $u(t)$; характеристика этого источника известна, например:

$$u(t) = g(t)\varepsilon(t). \quad (3)$$

Здесь $g(t)$ либо $g(T)$ – известная функция времени,

$\varepsilon(t)$ – стационарный случайный процесс.

Тогда выходная величина $y(t)$ элемента БСКД, содержащего источник $u(t)$, сама является случайным нестационарным процессом.

Источники таких погрешностей образуют довольно широкий класс, включающий в себя источники с характеристиками

$$g(t) = t^m, m = \overline{1, m} \text{ или } g(t) = e^{pt},$$

а также их линейными комбинациями: $c_r t^{m_r} e^{p_r t}$; решение в этих случаях относительно простое [6].

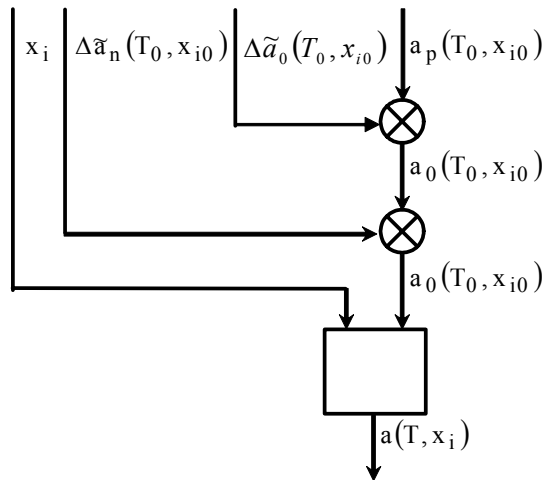


Рис. 1. Составляющие погрешности

Поскольку стационарную величину можно выразить интегралом Фурье

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\Phi(\omega) + \bar{\varepsilon}(t),$$

то (3) можно записать как

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{j\omega t} d\Phi(\omega) + g(t) \bar{\varepsilon}(t).$$

На выходе элемента в соответствии с [6] получается:

$$y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, t) e^{j\omega t} d\Phi(\omega) + y_1(t), \quad (4)$$

где $P(\omega, t)$ – преобразование Фурье ядра $k(t, \tau)$ оператора Вольтерра (операции свертки отвечает умножение преобразований Фурье).

Если $g(t) = t^m$, то в частном решении (4) $P(\omega, t)$ представляет собой полином степени m относительно t . Коэффициенты $l_0, \dots, l_m$ полинома $P(\omega, t)$ определяются из сравнения выражения

$$y(\omega, t) = (l_0 + l_1 t + l_2 t^2 + \dots + l_m t^m) e^{j\omega t}$$

с решением (4). Из этого частного решения по определению легко найти корреляционную функцию

$$K_y(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} P_m^*(\omega, t_1) P_m(\omega, t_2) e^{j\omega(t_2 - t_1)} S_\varepsilon(\omega) d\omega.$$

В случае $g(t) = e^{pt}$ имеем

$$y(\omega, t) = A(\omega) e^{(p+j\omega)t},$$

$$A(j\omega) = (a_0 + a_1(p+j\omega) + \dots + a_n(p+j\omega)^n)^{-1}$$

и

$$y_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(j\omega) e^{(p+j\omega)t} d\Phi(\omega) + y_1(t).$$

Тогда

$$K_y(t_1, t_2) = e^{pt_2 + p^* t_1} \int_{-\infty}^{\infty} |A(j\omega)|^2 e^{j\omega(t_2 - t_1)} S_\varepsilon(\omega) d\omega$$

и

$$S_y(\omega) = |A(j\omega)|^2 S_u(\omega - p).$$

Частное решение стационарно, если p – мнимое число.

Перспективы дальнейших исследований. Рассмотренный метод положен в основу разрабатываемой общей методологии перехода от разработки моделей двигателя к модели "БСКД–двигатель".

Выводы. Предложенный подход позволяет учитывать возникающие в результате старения и износа нестационарные погрешности в БСКД пассажирских самолетов.

Литература

1. Michael J., Kroes, James R. Rardon Aircraft Basic Science (Aviation Technology Series), Paperback.– 7th edition, Glencoe McGraw Hill.– 1993.– 414 p.
2. Larry Reithmaier (Editor) Standard Aircraft Handbook for Mechanics and Technicians, Paperback.– 6th edition, McGraw – Hill.– 1999.– 300 p.
3. Herbert A. Koenig Modern Computational Methods (Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences).– Bk&Disk edition, Taylor & Francis.– 1998.– 416 p.
4. Handbook of Measurement Science / Edited by Sydenham P.H., N.Y., J. Wiley and Sons Ltd., 1982.
5. Petzold B., Richter W. Störspannung analyse im Tieffrequenzbereich Messen // Steuern, Regeln (msr).– 1986.– No 2.
6. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций.– М.: Наука, 1968.– 328 с.

Поступила в редакцию 30.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Терещенко, Научный центр ВВС ВС Украины, г. Киев; д-р техн. наук, декан механико-энергетического факультета В.В. Панин, НАУ, г. Киев.