УДК 620.179(045)

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 моделирования 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 являются 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 нестабильности на входе определенной ступени преобразования. Поскольку потенциально каждый конструктивный параметр является источником нестабильности, число независимых случайных входных переменных составляет $m + k - 1$ (в том числе $m - 1$ воздействующих величин и k конструктивных параметров).

Анализируя физические причины нестабильности 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

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

Величины $x_i,\ldots,x_т$ 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 $a_1,\ldots, a_k$ – конструктивные параметры данного элемента. Величина z характеризует неточность модели, а также неизвестное или не учтенное 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.

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

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 – $\Delta\tilde{a}_{in}$. 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 воспринимаются 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 $f = 10^{-5}\ldots 1$ 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 $10^{-8}\ldots 10^{8}$ Гц приведена в [4]. Распределение шумов подтверждает принципиальность деления их на осцилляции, флуктуации и дрейф.

Согласно [5] j-й конструктивный параметр описывается переменной

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

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:

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

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

ε(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].

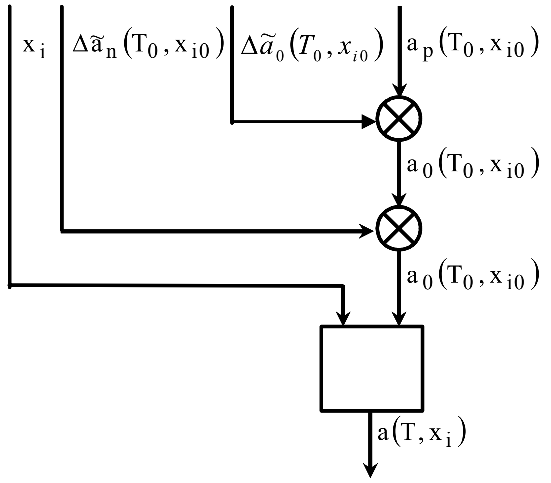

Рис. 1. Составляющие погрешности

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:

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

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 $l_0,\ldots, l_m$ полинома $P(\omega,t)$ определяются из сравнения выражения

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

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

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

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

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.