УДК 681.513.6

В.Н. Казак

ОЦЕНИВАТЕЛЬ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена задача синтеза робастного оценивателя, предназначенного для использования одного класса адаптивных систем управления.

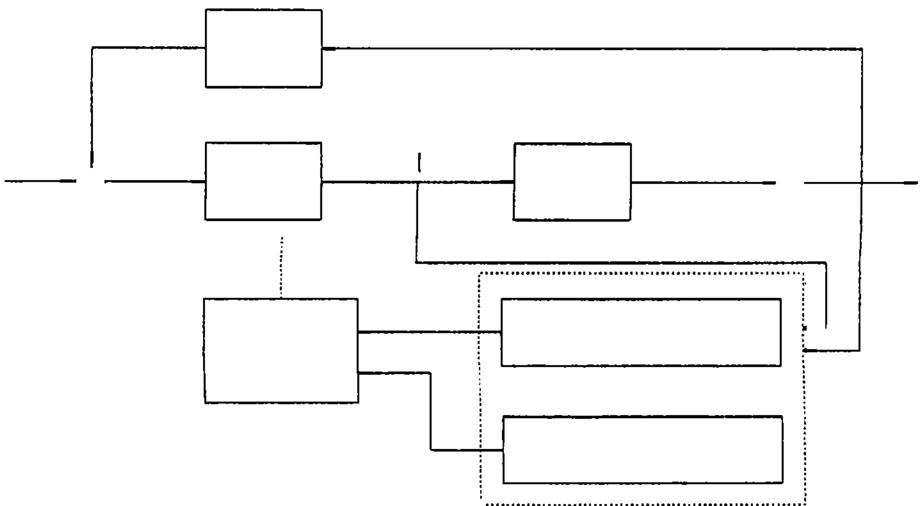
Реконфигурация – один из эффективных путей повышения надежности и качества функционирования системы управления летательным аппаратом (ЛА) при отказах ее составных элементов, узлов и агрегатов. Успешное решение задачи реконфигурации системы управления на базе оставшихся исправными составляющих элементов системы предполагает наличие в ее структуре так называемого [3] робастного оценивателя, имеющего следующее назначение:

– оценивать (наблюдать) вектор параметров, характеризующих нормативную модель динамики полета;

– предопределять процедуру предстоящей коррекции нормативной модели динамики системы управления;

– доставлять информацию, необходимую для определения функции, ограничивающей величину рассогласования между выходными реакциями объекта и его корректируемой нормативной модели.

Возможная структура реконфигурируемой системы управления представлена на рисунке, где введены следующие обозначения:



Структурная схема реконфигурируемой модели системы управления

– модель динамики (дискретная передаточная функция) объекта, которую в случае структурной неопределенности можно представить в виде

$$W(z) = W_{н}\left(z,\hat{\theta}\right)\left[1 + \delta_{м}(z)\right], \qquad (1)$$

где $W_н(z,\theta) = \dfrac{B(z)}{A(z)}$ – номинальная модель динамики объекта; $A(z)$ и $B(z)$ – полиномы вида:

$$B(z) = b_0 z^{-(n_1-m_1)} + b_1 z^{-(n_1-m_1+1)} + \ldots + b_{m_1} z^{-n_1};$$

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \ldots + a_{n_1} z^{-n_1}, \qquad n_1 \geq m_1,$$

$\theta = (a_1, a_2, \ldots, a_{n_1}, b_0, b_1, \ldots, b_{m_1})^T$ – вектор основных параметров нормативной модели (в рассматриваемом случае – известное ограниченное множество параметров); $\delta_н(z)$ – часть модели динамики, с помощью которой можно учитывать коррекцию нормативной модели, вызванную ее структурной неопределенностью;

$K(z)$ – модель динамики корректора (компенсатора);

$g(n)$ – аддитивное возмущение на выходе объекта;

$r(n)$ – программный канал в системе управления;

$u(n)$ – управляющий сигнал в системе управления;

$\varepsilon(n)$ – сигнал рассогласования в системе;

– сигнал выходной реакции объекта.

Для заданного временного индекса n задачей робастного оценивателя является формирование по полученному вектору оценок параметров θ новой номинальной модели $W_н(z,\theta)$, нахождение соответствующей граничной функции $\Delta^n_н(e^{j\omega T},\theta)$ в частотной области, показывающей, насколько приемлема текущая номинальная модель.

Прежде чем перейти к задаче синтеза робастного оценивателя, предназначенного для использования в реконфигурируемой системе управления, сделаем следующее допущение: ошибка моделирования, связанная как со структурированной, так и с неструктурированной неопределенностью и скоростью ее изменения, не превышает заранее заданных значений, значит:

$$\forall\omega;$$

Кроме того, для рассматриваемого класса ЛА импульсная реакция на возмущение ограничена:

$$|W_н[n]| \leq \sum_{i=0}^{I} W_i n^{(r_i)} P_i^n, \tag{2}$$

где $W_н[n]$ принимается казуальной; $W_i > 0$; $0 < P_i < 1$; r_i – положительное целое, известное для $i = 1, 2, \ldots, I$;

Считаем, что N-точечное дискретное преобразование Фурье для аддитивного возмущения $G_N(\omega_k)$ ограничено следующим условием:

$$\left|G_N^n(\omega_k)\right| \leq \overline{G}_N^n(\omega_k), \qquad k = 0,1,\ldots,N-1, \qquad \forall n,$$

где $\omega_k = (k$ / ; ; $\omega_з = 2\pi/T$ – частота дискретизации.

Входной сигнал $U[n]$, действующий на объект, ограничен заранее известным его максимальным значением, т.е.

$$|U[n]| \le U_{\max}, \qquad \forall n.$$

Для заданного временного индекса n задачей робастного оценивателя является определение оценки вектора параметров $\hat{Q}$ в ограниченном пространстве Q^* и нахождение ограничивающей функции $\Delta_{\text{н}}^{*}\left(e^{j\omega T},\theta\right)$, приближающей к заданной $\Delta_{\text{н}}\left(e^{j\omega T}\right)$.

При нулевых начальных условиях для структурной схемы (см. рисунок) можно записать:

$$Y[n] = W_{\text{н}}[n]U[n] + G[n]. \tag{3}$$

Обозначим дискретное преобразование Фурье для $W[n]$ через $W\left(e^{j\omega T}\right)$ и дискретные преобразования Фурье для N точек $U[n]$ и $Y[n]$ соответственно через $U_N^n\left(e^{j\omega T}\right)$ и $Y_N^n\left(e^{j\omega T}\right)$. Тогда с учетом формулы (1) можно из выражения (3) узнать, что для некоторого временного индекса n

$$Y_N^n(\omega_k) = W_{\text{н}}\left(e^{j\omega T}\right)U_N^n(\omega_k) + E_N^n(\omega_k) + G_N^n(\omega_k), \quad k = 0, 1, \ldots, N-1, \tag{4}$$

где $E_N^n(\omega_k)$ – ошибка в частотной области с индексом n из-за использования набора данных конечной длины;

$$E_N^n(\omega_k) = \sum_{p=1}^{\infty} W[p] e^{-j\frac{\omega_k T}{N}} \left[U_N^{n-p}(\omega_k) - U_N^n(\omega_k)\right], \quad k = 0, 1, \ldots, N-1. \tag{5}$$

При заданном конечном числе M величина $E_N^n(\omega_k)$ ограничена для каждой k следующим образом:

$$E_N^n(\omega_k) \le \bar{E}_N^n(\omega_k), \qquad k = 0, 1, \ldots, N-1,$$

при

$$\bar{E}_N^n(\omega_k) = \sum_{i=0}^{M-1} |W[i]| \left|U_N^{n-i}(\omega_k) - U_N^n(\omega_k)\right| + 2U_{\max} \sum_{i=M}^{\infty} i |W_{\text{н}}[i]|, \quad k = 0, 1, \ldots, N-1, \tag{6}$$

откуда в соответствии с допущением (2) найдем $U_{\max}$.

В работе [1] получено выражение в замкнутой форме для членов (5), (6), соответствующих бесконечному суммированию:

$$\bar{E}_N^n(\omega_k) \le \sum_{i=1}^{M-1} \left|W_1 P_1^i\right| \left|U_N^{n-i}(\omega_k) - U_N^n(\omega_k)\right| + 2U_{\max} W_1 P_1^M \left[\frac{M}{1-P_1} + \frac{P_1}{(1-P_1)^2}\right]; \tag{7}$$

$$k = 0, 1, \ldots, N-1, \qquad 0 < p_1 < 1.$$

Ограничивающая функция для выражения (7) может быть вычислена в реальном масштабе времени с использованием текущего n-точечного дискретного преобразования Фурье для входного воздействия $U[n]$. Подбором числа M можно свести второе слагаемое выражения (7) к сколь угодно малой величине.

Используя уравнения (4)–(7), можно найти оценку в частотной области для $W(z)$ [3]:

$$W_{f,N}^n(\omega_k) = \frac{Y_N^n(\omega_k)}{U_N^n(\omega_k)}, \qquad k = 0, 1, \ldots, N-1, \tag{8}$$

и соответствующую ошибку:

$$E_{f,N}^n(\omega_k) = W_{f,N}^n(\omega_k) - W_{\text{н}}\left(e^{j\omega_k T}\right), \qquad k = 0, 1, \ldots, N-1.$$

С учетом сделанных допущений и выражения (4) можно записать:

$$E_{f,N}^{n}(\omega_k) = \frac{\overline{E}_{f,N}^{n}(\omega_k) + G_N^{n}(\omega_k)}{U_N^{n}(\omega_k)}$$

и далее:

$$\left|E_{f,N}^{n}(\omega_k)\right| < \frac{\overline{E}_{f,N}^{n}(\omega_k) + \overline{G}_N(\omega_k)}{\left|U_N^{n}(\omega_k)\right|}, \qquad k = 0, 1, \ldots, N-1,$$

где величина $\overline{E}_{f,N}^{n}(\omega_k)$ задается с помощью выражения (6).

Из формулы (8) видно, что $W_{f,N}^{n}(\omega_k)$ является множеством N комплексных чисел, вычисляемых с помощью N точечных дискретных преобразований Фурье для $Y[n]$ и $U[n]$ [3].

Далее можно рассмотреть прямую форму описания процедуры получения комбинаций оценок и соответствующих функций, ограничивающих ошибки для различных методов описания объекта. Модель объекта $G(z)$ может быть описана через вектор первичных параметров $\theta_{0п}$ или через вектор вторичных параметров $\theta_{вт}$. Первичными параметрами будем считать величины, характеризующие свойства элемента. Их значения обеспечиваются непосредственно при изготовлении элемента, и исследователю они заранее известны. Вторичные параметры определяются первичными по известным функциональным зависимостям между ними. При традиционном описании модели объекта именно вторичные параметры, являющиеся обобщенными, вводятся в математические модели объекта. В статье используются математические модели объекта, полученные путем матричного описания электронных и электротехнических схем через их первичные параметры [1]:

$$W(z, \theta_{0п}) = \frac{B_п(x)}{A_п(z)},$$

где

$$B_п(z) = b_{0п} z^{(m_1 - n_1)} + b_{1п} z^{(m_1 - n_1 - 1)} + \ldots + b_{m_1 п} z^{-n_1};$$

$$A_п(z) = 1 - a_{1п} z^{-1} - \ldots - a_{n_1 п} z^{-n_1};$$

$$\theta_{0п} = \left[a_{1п} \ldots a_{n_1 п} b_{0п} b_{n_1 п} \ldots b_{m_1 п}\right]^T, \quad n_1 > m_1.$$

В отказных ситуациях будут изменять свои номинальные значения первичные элементы:

$$a_{iп} \neq \text{const}; \quad b_{jп} \neq \text{const}, \quad i = 1, \ldots, n_1, \quad j = 0, 1, \ldots, m_1.$$

Тогда с учетом формулы (1) можно записать:

$$W_к\left(e^{j\omega_k T}\right) = \overline{W}\left(e^{j\omega_k T}, \hat{\theta}_п\right)\left[1 + \delta_{вп}\left(e^{j\omega_k T}, \hat{\theta}_п\right)\right], \quad k = 0, 1, \ldots, N-1. \tag{9}$$

После перегруппировки выражения (9) можно записать:

$$\delta\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}_п\right)=\frac{W_н\left(e^{j\omega_k T}\right)-W\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}_п\right)}{W\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}_п\right)}.$$

Затем, используя уравнение (7), можно найти ограничивающую функцию:

$$\left|\delta_{su}\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}\right)\right|\le\Delta^{n}_{su}\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}\right);$$

$$\Delta^{n}_{su}\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}\right)=\frac{\left|W\left(e^{j\omega T},\hat{\theta}\right)-W^{n}_{HN}(\omega_k)+\bar{E}_{HN}(\omega_k)\right|}{\left|W\left(e^{j\omega_k T},\hat{\theta}\right)\right|},\qquad k=0,1,\ldots,N-1.$$

Используя принципы планирования эксперимента в задачах самоорганизации математических моделей [2] и имея жесткие ограничения на показатель качества применения одного класса ЛА, можно решить задачу структурной идентификации объектов с последующей реконфигурацией управления.

Список литературы

1. *Казак В.Н.* Математическая модель функционирования динамических систем с учетом влияния отказов ее элементов //Надежность и качество эксплуатационных характеристик летательных аппаратов: Сб. трудов 10-й научн.-техн. конференции по качеству.–М.: МО, 1987. – С. 81–84.

2. *Кикоть В.С.* Планирование эксперимента в задачах самоорганизации математических моделей //Автоматика. – 1984. – №1. – С. 32–39.

3. *Lamair R., Valavani E., Athanas M., Stein G.* A frequency-domain estimator for use in adaptive control systems //Automatica. – 1991. – V. 27. – №1. – P. 33–38.

Стаття надійшла до редакції 22 жовтня 1998 року.

Василь Миколайович Казак (1940) закінчив Київське вище інженерно-авіаційне військове училище в 1972 році. Професор Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор 60 наукових праць. Основні напрями наукової роботи: дослідження можливостей адаптації керування літальними апаратами до відмовних ситуацій, що виникають у польоті; дослідження шляхів активізації суб'єктивної готовності людини, колективу до активної творчої діяльності.

Vasily N. Kazak (b. 1940) graduated from Kyiv Higher engineer-aviation military school (1972). Professor of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of 60 publications, specializes in the field of investigation of the adaptation possibilities of airplane control to failure situations which happen in flight, investigation of the ways of activation of a personal readiness of a man, collective to active creative work.