Таким образом, полученная с использованием метода статистического анализа эмпирическая зависимость позволяет не только предварительно оценить массу гипотетического двигателя, но и анализировать степень влияния на его вес каждого из рассматриваемых параметров. Кроме того, имеется возможность решения обратной задачи: зная массу двигателя и ряд его параметров, можно определить значения недостающих параметров.

Литература

1. *Коровкин В. Д., Литвинов Ю. Л., Цховребов М. М.* Поэлементный метод расчета размеров и массы ГТД на первом этапе машинного проектирования авиационных двигателей. Авиационные двигатели. № 5…6. М.: ЦИАМ, 1977 г. 50 с.
2. *Коровкин В. Д., Цховребов М. М.* Труды V научных чтений по космонавтике, посвященных памяти выдающихся советских ученых – пионеров освоения космического пространства. М., 1983 г. 148 с.
3. *Databaseородич Л. И., Герасимович Л. И., Кеда Н. П., Мелешко И. Н.* Справочное пособие по приближенным методам решения задач высшей математики. Мн., Высш. шк., 1986 г. 150 с.
4. Техническая информация // ЦАГИ. № 23–24. 1978 г. 55 с.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Д. И. Шипица, Б. М. Вервейко, С. Г. Дубовский

В настоящее время все чаще возникает необходимость оценки качества функционирования динамических систем случайной структуры (ДССС) с целью совершенствования их структуры, характеристик, оптимизации условий работы [1].

Для исследования качества таких систем могут использоваться метод статистических испытаний, метод весовых функций, метод частотных характеристик и т. д. Однако наиболее приемлемым является метод, изложенный в [1, 2]. Метод основан на представлении функционирования ДССС непрерывным случайным марковским процессом.

Состояние l ДССС в общем виде описывается векторным уравнением [1]

$$\dot{Y}^{(l)} = D^{(l)}(t)\varphi^{(l)}(\vec{Y},t) + H^{(l)}(\vec{Y},t)V(t), \tag{1}$$

где $D^{(l)}(t)$ – матрица порядка mxm с компонентами $d_{kr}^{(l)}(t)$; $\varphi^{(l)}(\vec{Y},t)$ – векторная нелинейная функция с компонентами $\varphi_1^{(l)}...\varphi_m^{(l)}$; $H(\vec{Y},t)$ –

матрица mxm с компонентами $h_{ij}^{(l)}$, где $(i, j = 1, m)$; $V(t)$– вектор гауссового белого шума с компонентами $V_1(t),...,V_m(t)$.

Анализ качества ДССС выполняется на основе решений обобщенного уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова [1]

$$\frac{\partial \omega_1(\vec{Y},t)}{\partial t} = -div\pi(\vec{Y},t) - \upsilon(\vec{Y},t) + u(\vec{Y},t) + (f(t) + r(t))\omega_1(\vec{Y},t), \quad (2)$$

где $\omega_1(\vec{Y},t)$ – первая функция плотности вероятности непоглощенных реализаций многомерного случайного процесса $\vec{Y}$; $\pi(\vec{Y},t)$ – поток плотности вероятности; $\upsilon(\vec{Y},t), u(\vec{Y},t)$ – функции поглощения и восстановления реализаций соответственно; $f(t), r(t)$ – потоки поглощения и восстановления реализаций соответственно.

Поглощение (восстановление) реализаций может происходить либо на границе, либо в области [2]. Вид функции поглощения (восстановления) зависит от физической сущности процесса функционирования ДССС.

Состояния ДССС, как правило, описываются системой дифференциальных уравнений, поэтому решение уравнения (2) получают приближенными методами: методом гауссовой аппроксимации, методом ортогонального разложения, методом характеристической функции, методом функциональной аппроксимации функции плотности вероятности (ФПВ) [1]. Так как ФПВ произвольного вида имеет бесконечное множество характеристик (моментов), то при применении приближенного метода принимают допущение о виде ФПВ распределения фазовых координат, а затем находят ее характеристики [1].

Для получения решения уравнения (2) применим гауссову аппроксимацию ФПВ. Это позволит ограничиться определением начальных моментов первого порядка и центральных моментов второго порядка [1, 2].

$$\dot{m}_k^{(l)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (\pi^{(l)}(\vec{Y},t) grad X_k) d\vec{Y} -$$

$$-\sum_{r=1}^{N} \Big(\int_{-\infty}^{+\infty} Y_k \upsilon_{lr}(\vec{Y},t) d\vec{Y} - \frac{P_r(t)}{P_l(t)} \int_{-\infty}^{+\infty} Y_k u_{rl}(\vec{Y},t) d\vec{Y} -$$

$$-\left[f_{lr}(t) - \frac{P_r(t)}{P_l(t)} r_{rl}(t) \right] m_k^{(l)} \Big), \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_{kp}^{(l)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (\pi^{(l)}(\vec{Y},t) grad(Y_k^o Y_p^o)) d\vec{Y} -$$

$$-\sum_{r=1}^{m} \int_{-\infty}^{+\infty} (Y_k^o Y_p^o) \upsilon_{lr}(\vec{Y},t) d\vec{Y} - \frac{P_r(t)}{P_l(t)} \int_{-\infty}^{+\infty} (Y_k^o Y_p^o) u_{rl}(\vec{Y},t) d\vec{Y} -$$

$$-\left[f_{lr}(t) - \frac{P_r(t)}{P_l(t)} r_{rl}(t) \right] \theta_{kp}^{(l)}. \qquad (4)$$

Качество функционирования ДССС будем характеризовать вероятностью ее нахождения в каждом из состояний [1, 2]

$$\dot{P}_l = -P_l \sum_{r=1}^{m} f_{lr}(t) + \sum_{r=1}^{m} P_r r_{rl}(t). \qquad (5)$$

Выходными данными такой математической модели являются вероятностные характеристики фазовых координат (3), (4), описывающих функционирование ДССС и вероятности ее нахождения в каждом из состояний (5). Они используются для вычисления показателей качества функционирования ДССС.

Рассмотрим анализ качества функционирования ДССС на примере авиационного комплекса (АК) на этапе ближнего наведения (БН). На этом этапе АК имеет два состояния. Функционирование АК на этапе БН может описываться системой уравнений (1). Переход из одного состояния в другое осуществляется в случайные моменты времени под воздействием случайных факторов: метеоусловий, противодействия противника, ошибок измерителей, уровня профессиональной подготовки экипажа, ошибок юстировки системы ближнего наведения и т. д.

В первом состоянии ближнее наведение осуществляется с помощью оптико-электронной системы (ОЭС). Во втором – с использованием визуальных средств. АК позволяет решение задачи ближнего наведения (БН) в любом из состояний, но при строго определенных условиях для каждого. Переход во второе состояние осуществляется при невозможности решения задачи БН с помощью ОЭС. Условием возможности решения задачи БН с помощью ОЭС является условие нахождения ориентира в пределах $\pm\delta/2$ мгновенного угла поля зрения оптической системы. При выходе изображения ориентира на одну из поглощающих границ $+\delta/2$ или $-\delta/2$ мгновенного угла поля зрения происходит срыв автосопровождения и АК переходит во второе состояние. Случай характеризуется неавтономным сосредоточенным переключением состояний [3].

Общий вид функции поглощения зададим как [3]

$$\vartheta^{(1,2)}(\vec{y},t)=\delta(y-\Gamma^{(1,2)}(t))(\vec{n}^{(1,2)}(\vec{y},t)\pi^{(1)}(\vec{y},t)), \tag{6}$$

где $\Gamma^{(1,2)}(\vec{y},t)$ – уравнение поглощающей границы; $\vec{n}^{(1,2)}$ – вектор нормали к границе; $\pi^{(1)}(\vec{y},t)$ – вектор плотности потока вероятности.

Во втором состоянии БН выполняется визуально, но не исключается восстановление первого состояния (может произойти повторный захват ориентира ОЭС).

Захват ориентира представляет собой инерционный процесс. Для учета инерционности автомата захвата целесообразно рассматривать процесс восстановления с неавтономным распределенным переключением состояния [3], т. е. когда процесс восстановления второго состояния происходит в какой-то области W. В нашем случае эта область ограничена полем захвата ОЭС ±α/2 и $\alpha>\delta$.

Функция восстановления первого состояния имеет вид [3]

$$u^{(2,1)}(\vec{y},t)=\begin{cases} C(\vec{y})\omega_1^{(2)}(\vec{y},t), & \text{при} \quad \vec{y}\in W; \\ 0, & \text{при} \quad \vec{y}\notin W, \end{cases} \tag{7}$$

где $C(\vec{y})$ – коэффициент, зависящий от значения фазовых координат, учитывающий физическую сущность функционирования АК; $\omega_1^{(l)}(\vec{y},t)$ – первая ФПВ распределения фазовых координат в l состоянии.

Применяя метод гауссовой аппроксимации и предварительно линеаризуя уравнения (1), получаем замкнутую систему уравнений (1)–(5) оценки вероятностных характеристик функционирования АК на этапе БН. Для оценки качества функционирования АК необходимо определить критерий качества и дополнить систему уравнений аналитическим выражением для показателя качества

$$\begin{aligned} W_{БН}&=\frac{1}{2}P_1\left[\Phi\left(\frac{\Delta\varphi_0^*-m_{\Delta\varphi}^{(1)}}{\sqrt{2\theta_{\Delta\varphi}^{(1)}}}\right)-\Phi\left(\frac{-\Delta\varphi_0^*-m_{\Delta\varphi}^{(1)}}{\sqrt{2\theta_{\Delta\varphi}^{(1)}}}\right)\right]+\\ &+\frac{1}{2}P_2\left[\Phi\left(\frac{\Delta\varphi_0^*-m_{\Delta\varphi}^{(2)}}{\sqrt{2\theta_{\Delta\varphi}^{(2)}}}\right)-\Phi\left(\frac{-\Delta\varphi_0^*-m_{\Delta\varphi}^{(2)}}{\sqrt{2\theta_{\Delta\varphi}^{(2)}}}\right)\right], \end{aligned} \tag{8}$$

где $m_{\Delta\varphi}^{(1,2)}$ и $\theta_{\Delta\varphi}^{(1,2)}$ – математические ожидания и дисперсии ошибки в конце этапа БН для 1-го и 2-го состояний, вычисленные соответственно по формулам (3), (4); P_1, P_2 – вероятности состояний АК на этапе БН, вычисленные по формулам (5); $\Delta\varphi_0^*$ – критическое значение конечной ошибки БН, величина которой определяется из требований выполнения последующего этапа.

Такой подход к оценке качества функционирования АК повышает их достоверность, позволяет учесть широкий спектр свойств самой ДССС, условия функционирования и решить задачу оптимального выбора структуры комплекса, обеспечивающую самое эффективное БН в сложившихся условиях. Такой алгоритм может быть реализован на борту АК в качестве подсистемы поддержки принятия решения.

Методика применима для анализа качества физических процессов, технических систем народнохозяйственного значения, биологических, экономических, социальных систем.

Литература

1. *Казаков И. Е.* Статистическая динамика систем переменной структуры. М.: Наука, 1977. 416 с.
2. *Артемьев В. М.* Теория динамических систем со случайными изменениями структуры. Мн.: Вышейш. шк., 1979. 152 с.
3. *Косачев В. М., Ерошенков Н. К.* Аналитическое моделирование стохастических систем. Мн.: Навука і тэхніка, 1993. 264 с.