

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СЛУЧАЙНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ТУРБОВИНТОВЕНТИЛЯТОРНОМ ДВИГАТЕЛЕ

А.В. Иванов,

Запорожское машиностроительное конструкторское бюро "Прогресс", г. Запорожье, Украина

Современный газотурбинный двигатель представляет собой сложную и чувствительную к отклонениям от расчетных режимов работы систему. Режим работы газотурбинного двигателя определяется как параметрами управляющих воздействий, так и параметрами возмущений, связанных с колебаниями газовоздушного потока на входе в двигатель и вдоль его тракта. Значение данных параметров определяется как регулярной составляющей, так и случайными отклонениями, что делает протекающие в двигателе процессы нестационарными во времени.

Согласно [1] нестационарные во времени процессы можно представить в виде суммы неслучайной функции времени $\varphi(t)$ и стационарной случайной функции $Z(t)$ с нулевым математическим ожиданием

$$X(t) = \varphi(t) + Z(t). \quad (1)$$

Составляющая $\varphi(t)$ является переменной величиной, поэтому математическое ожидание $m_X(t)$ случайной функции $X(t)$ зависит от времени

$$m_X(t) = \varphi(t) + m_Z, \quad (2)$$

где m_Z – математическое ожидание стационарной случайной функции $Z(t)$.

Функцию $\varphi(t)$ представляем в виде степенного полинома n -й степени

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n, \quad (3)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коэффициенты степенного полинома,

t – время.

Для выделения неслучайной функции $\varphi(t)$ из нестационарных случайных процессов применен метод группового учета аргумента (МГУА) [2]. При этом

весь диапазон известных значений процесса разбивался на обучающую последовательность и проверочную. По обучающей последовательности методом наименьших квадратов проводился расчет коэффициентов сглаживающих полиномов при различной степени полинома. Проверочная последовательность использовалась для выбора оптимальной степени сглаживающего полинома.

При выборе оптимальной степени сглаживающего полинома в качестве критерия регулярности использовался коэффициент корреляции [2]

$$K_{qq} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i^* \cdot q_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (q_i^*)^2 \cdot \sum_{i=1}^N q_i^2}} \rightarrow 1, \quad (4)$$

где K_{qq} – коэффициент корреляции;

q_i, q_i^* – полученные по обучающей и проверочной последовательностям значения процесса в i -й точке ($i=1, 2, \dots, N$);

N – число точек.

Как следует из (1), после вычитания из заданных нестационарных процессов неслучайных функций времени (рассчитанных с помощью МГУА) процессы приобретают стационарный характер. Расчеты показывают, что математическое ожидание и корреляционные функции полученных стационарных процессов стремятся к нулю, что свидетельствует о корректности применения алгоритма МГУА в задаче выделения неслучайной составляющей из нестационарных процессов.

На рис. 1 представлены графики законов распределения и корреляционных функций некоторых процессов, протекающих в турбовинтовентиляторном

двигателе на крейсерском участке полета. Данные взяты из бортовой системы регистрации самолета. Дискретность съема данных из системы регистрации составляла 20 Гц.

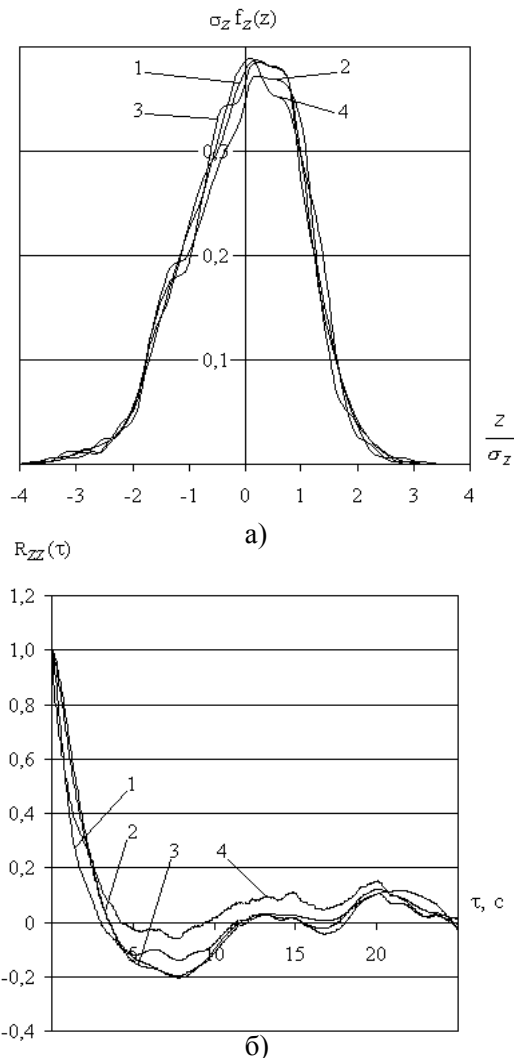


Рис. 1. Графики законов распределения (а) и корреляционных функций (б) для температуры газов за турбиной низкого давления $T_{\text{ТНД}}$ (1), частоты вращения ротора низкого давления $N_{\text{НД}}$ (2), частоты вращения ротора высокого давления $N_{\text{ВД}}$ (3) и давления воздуха за компрессором высокого давления P_K (4).

Расчет корреляционных функций проводился по формуле [1]

$$R_{zz}(\tau_n) = \frac{1}{\sigma_z^2} \frac{1}{N-n} \sum_{k=1}^{N-n} [Z(t_k) - m_z][Z(t_{k+n}) - m_z], \quad (5)$$

где N – общее количество точек процесса;

n – интервал корреляции;

$Z(t_k)$ – значение стационарной случайной функции процесса в k -й точке,

σ_z – среднеквадратическое отклонение процесса.

Дифференциальные законы распределения нормализованы относительно среднеквадратического отклонения σ_z . Большая длина реализации случайных процессов ($N = 5000$) обеспечила достоверность определения законов распределения по критерию согласия Колмогорова с доверительным интервалом $\Delta F = 0,02$ и доверительной вероятностью $p_z = 0,998$ в диапазоне значений амплитуд $z = \pm 3\sigma_z$.

Для оценки взаимного влияния случайных процессов, протекающих в двигателе, произведен расчет взаимных корреляционных функций по формуле

$$R_{z_1 z_2}(\tau_n) = \frac{1}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}} \frac{1}{N-n} \sum_{k=1}^{N-n} [Z_1(t_k) - m_{z_1}] \times [Z_2(t_{k+n}) - m_{z_2}], \quad (6)$$

где N – общее количество точек процесса;

n – интервал корреляции;

$Z_1(t)$, $Z_2(t)$ – значения стационарных случайных функций процессов, участвующих в расчете;

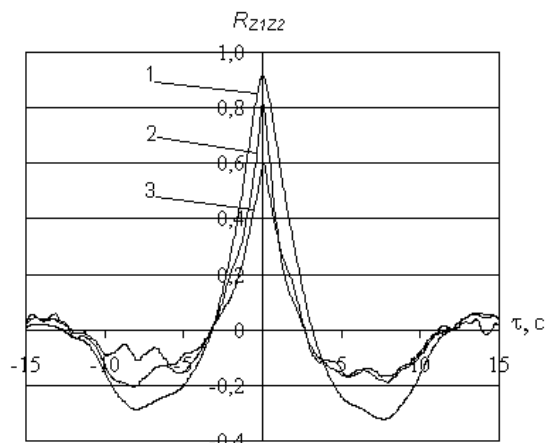
σ_{z_1} , σ_{z_2} – значения среднеквадратических отклонений процессов, участвующих в расчете.

Полученные взаимные корреляционные функции стационарных процессов изображены на рис. 2.

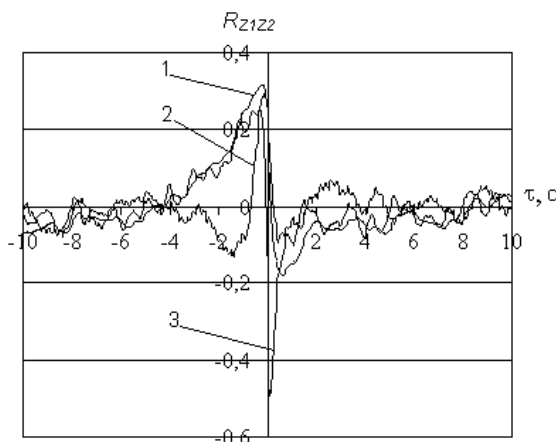
Как видно из графиков, взаимные корреляционные функции, представленные на рис. 2, а, симметричны относительно оси ординат, что говорит об одинаковом взаимном влиянии случайных процессов друг на друга. Величина корреляционной связи между данными процессами сохраняется более 0,5 на интервале времени 1,5 - 2 с.

Корреляционные функции, представленные на рис. 2, б, несимметричны относительно оси ординат, что говорит о разном взаимном влиянии процессов друг на друга. Так, из анализа взаимной корреляционной функции случайных составляющих изменения суммарной степени повышения давления в компрессоре (π_K) и расхода топлива (G_T) видно, что изменение

π_k влияет на изменение G_T на интервале корреляции до 0,5 с, пик корреляционной связи приходится на интервал времени 0,05 - 0,1 с. При этом влияние изменения G_T на изменение π_k проявляется на интервале корреляции до 3,5 с, пик корреляционной связи не явно выражен и приходится на интервал времени 0,3-0,4 с.



а)



б)

Рис. 2. Графики взаимных корреляционных функций случайных составляющих частот вращения роторов высокого и низкого давления (1 а), давления воздуха за компрессором высокого давления и температуры газов за турбиной низкого давления (2 а), давления воздуха на входе в двигатель и давления воздуха за компрессором высокого давления (3 а), суммарной степени повышения давления в компрессоре и температуры газов за турбиной низкого давления (1 б), частот вращения переднего и заднего винтов (2 б), суммарной степени повышения давления в компрессоре и расхода топлива (3 б)

Из анализа полученных материалов следует:

- использование метода группового учета аргумента позволяет выделять с достаточной точностью неслучайную составляющую из нестационарных процессов;
- для исследуемых стационарных процессов полученные законы распределения амплитуд близки к нормальному закону распределения. Корреляционные функции стремятся к нулю, что говорит об их эргодичности;
- применение взаимных корреляционных функций позволяет оценивать степень и характер взаимосвязи между случайными процессами, протекающими в двигателе.

Полученные материалы могут быть использованы при разработке математических моделей, учитывающих случайные возмущения, действующие на двигатель.

Литература

1. Лившиц Н.А., Пугачев В.С. Вероятностный анализ систем автоматического управления. – Ч. 1. – М.: Сов. радио, 1960. – 895 с.
2. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: Сов. радио, 1976. – 280 с.

Поступила в редакцию 23.05.03

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент А.Ф. Коляда, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье; нач. отдела В.А. Седристый, ГП ЗМКБ «Прогресс», г. Запорожье.