УДК 629. 7. 036

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А.И. Коломенцев, канд. техн. наук, МАИ, г. Москва,

Д.С. Мартиросов, д-р техн. наук, ОАО «НПО Энергомаш им. ак. В.П. Глушко», г. Химки, Россия

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Выявление, локализация и определение вида неисправностей авиационных и ракетных двигателей является необходимой процедурой при анализе нештатных и аварийных ситуаций, возникающих при доводке, товарных поставках и эксплуатации. Эффективность этой процедуры оказывает принципиальное влияние на сокращение количества доводочных испытаний, повышает надежность двигателей, снижает риск невыполнения полетной задачи. В последнее время в связи с развитием вычислительной техники появилась возможность организовать поиск неисправностей методами функциональной диагностики с помощью математических моделей, описывающих рабочие процессы в основных конструктивных элементах двигателей и представляющих собой системы алгебродифференциальных уравнений большой размерности.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Существует достаточно обширная литература [1-4], в которой детально описывается классификация объектов и основных задач функционального диагностирования, видов неисправностей, измеряемых диагностических параметров, алгоритмы поиска неисправностей. В силу многообразия конструкций машин развиваются самые разнообразные методы и средства диагностирования. Однако применение большинства этих методов на практике и в особенности при определении технического состояния двигателей летательных аппаратов встречает значительные затруднения. Это связано, прежде всего, со сложностью протекающих в двигателях физических процессов, сложностью математической формализации описания этих процессов и неисправностей, с ограниченностью количества и номенклатуры измеряемых параметров, с погрешностями измерений и технологией производства. В силу указанных факторов, вообще говоря, отсутствует взаимно однозначное соответствие между диагностическими признаками и состояниями (неисправностями) контролируемого объекта. Поэтому задача диагностики относится к классу так называемых некорректных задач, и полная формализация процесса диагностирования в общем случае невозможна. Тем не менее использование математических моделей рабочих процессов дает возможность определять состояние двигателя с необходимой детализацией, определяющей глубину диагностирования, минимизировать количество и номенклатуру измеряемых контрольных параметров.

Цель исследований. Целью исследований являлась разработка метода функциональной диагностики – метода структурного исключения (автор идеи – Д.С. Мартиросов [4]), позволяющего на основе математических моделей нормально функционирующего двигателя и измеренных на испытании параметров двигателя формализовать процедуру поиска неисправности.

Результаты исследований. В основу метода структурного исключения положены следующие рабочие гипотезы:

1. Неисправность возникает в одном конструктивном элементе и вызывает нарушение взаимосвязи между параметрами, описываемой одним или несколькими уравнениями математической модели нормально функционирующего двигателя.

2. Если из математической модели нормально функционирующего двигателя исключить одно или несколько уравнений, нарушенных в результате неисправности и дополнить её измеренными значениями одного или нескольких параметров (по количеству ис-

ключенных уравнений), то полученная модель может быть эквивалентна математической модели, описывающей ненормально функционирующий двигатель.

Практическая реализация метода структурного исключения опирается на математический аппарат, основные элементы которого описаны ниже.

Математическую модель нормально функционирующего двигателя можно представить в следующем общем виде:

$$F(X, \dot{X}, t) = 0, \qquad (1)$$

где $F = (f_1, f_2, ..., f_m)$ - вектор функциональных связей;

$X = (x_1, x_2, ..., x_n)$ - вектор параметров функционирования;

$\dot{X} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, ..., \dot{x}_n)$ - вектор производных параметров по времени;

t - время,

m - число уравнений;

n - число переменных.

В исходной математической модели (1) число переменных больше числа уравнений, так как исследуемый объект всегда имеет связи с другими объектами или окружающей средой. Избыток неизвестных должен быть устранен, например, с помощью измерения соответствующих параметров, и (1) представить в виде

$$F(X, \dot{X}, X^*, \dot{X}^*, t) = 0 \qquad (2)$$

где $X^* = (x^*_{j_1}, x^*_{j_2}, ..., x^*_{j_k})$ - вектор измеренных параметров функционирования,

k - число измеренных параметров:

$k > n - m$.

Для получения расчетных значений параметров функционирования система уравнений (2) должна быть замкнута тривиальными уравнениями

$$x_{j_q} - x^*_{j_q} = 0, \quad q = 1,2,...,p = n - m. \qquad (3)$$

Рассмотрим представление математической модели, удобное для проведения диагностических процедур. Предположим, что система уравнений (2), дополненная (3), описывает стационарные процессы, и представим её следующим образом:

$$f_i(m_{i1}x_1, m_{i2}x_2, ..., m_{in}x_n) = 0, \; i = 1,2,...,n, \qquad (4)$$

где $m_{ij} = 1$, если j - й параметр содержится в i - м уравнении;

$m_{ij} = 0$, если j - й параметр не содержится в i - м уравнении.

Тогда системе уравнений (1) можно поставить в соответствие (0,1)-матрицу

$$M = \left\| m_{ij} \right\|, \qquad (5)$$

которая отражает структурные свойства исходной системы уравнений и позволяет построить формализованные алгоритмы выбора состава измеряемых параметров для замыкания исходной системы уравнений и разбиения на локально диагностируемые контуры.

Поясним это на следующем примере. Пусть исследуемый объект представляет собой простейший ЖРД с вытеснительной подачей топлива, расчетная схема которого изображена на рис. 1.

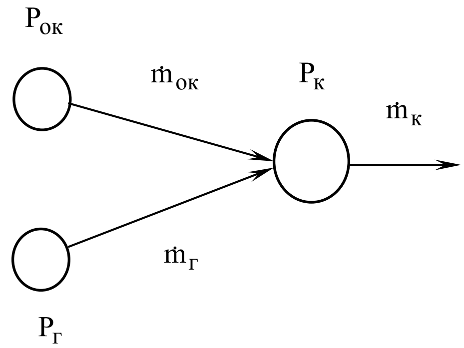

Рис. 1. Расчетная схема двигателя

Система уравнений, описывающая стационарные процессы, имеет вид:

1. $p_{ок} - p_к - \xi_{ок}\dot{m}^2_{ок} = 0$ - тракт окислителя.
2. $p_г - p_к - \xi_г\dot{m}^2_г = 0$ - тракт горючего. (6)
3. $\dot{m}_{ок} + \dot{m}_г - \dot{m}_к = 0$ - баланс расходов в камере.
4. $p_к S_к \beta_к - \dot{m}_к = 0$ - расход через сопло камеры.

Здесь p - давления;

$\dot{m}$ - расходы;

ξ - коэффициенты гидросопротивлений трактов;

$S_{кр}$ - площадь критического сечения камеры;

$\beta_к = \varphi\left(p_к, \dfrac{\dot{m}_{ок}}{\dot{m}_г}\right)$ - коэффициент расхода камеры;

ок - окислитель;

г - горючее;

к - камера.

Число уравнений в системе (6) m = 4, число неизвестных n = 6, и индикаторная матрица (5) исходной системы уравнений

$$M_0 = \begin{array}{c} \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{array} \begin{array}{c} p_{ок}\ p_г\ p_к\ \dot{m}_{ок}\ \dot{m}_г\ \dot{m}_к \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{array} . \qquad (7)$$

Предположим, что известны (измерены) значения давлений в баках $p_{ок}$ и $p_г$. Тогда, удалив из матрицы (7) столбцы, соответствующие измеряемым параметрам, получим квадратную индикаторную матрицу замкнутой системы уравнений (6):

$$M_1 = \begin{array}{c} \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{array} \begin{array}{c} p_к\ \dot{m}_{ок}\ \dot{m}_г\ \dot{m}_к \\ \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \qquad (8)$$

Так как в матрице (8) путем перестановки местами первой и второй строк может быть получена полная трансверсаль (главная диагональ, не содержащая нулей), то измеренные значения $p_{ок}$ и $p_г$ принимаются как замыкающие.

Локализация неисправной (нарушенной) связи возможна, когда, кроме замыкающих параметров измерено, два или более параметров.

Понятно, что параметры функционирования двигателя по-разному чувствительны к той или иной неисправности. Например, в ЖРД давление на входе в насос окислителя менее чувствительно к неисправности возникшей в тракте охлаждения камеры горючим, чем давление на входе в смесительную головку горючего камеры.

Если из матрицы (8) удалить столбец, соответствующий измеряемому параметру x_j^* (исключающий параметр), и последовательно удалять строки, соответствующие связям f_i, а полученные при этом миноры $M_{i_1 j}, M_{i_2 j}, \ldots, M_{i_q j}$ будут структурно не вырождены (т.е. содержат полную трансверсаль), то такой параметр структурно чувствителен к нарушению объединения функциональных связей $F = f_{i_1} \cup f_{i_2} \cup \ldots \cup f_{i_q}$, которое представляет собой локально диагностируемый контур.

Введем в рассмотрение матрицу

$$S = \left\| s_{ij} \right\| , \qquad (9)$$

где $s_{ij} = 1$, если j - й параметр структурно чувствителен к нарушению i - й связи;

$s_{ij} = 0$, если j - й параметр структурно не чувствителен к нарушению i - й связи.

Используя указанный алгоритм для примера (8) в предположении, что в качестве исключающих параметров приняты измеренные значения давления в камере $p_к$ и расход горючего $\dot{m}_г$, получим следующую матрицу структурной чувствительности:

$$S = \begin{array}{c} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{array} \begin{pmatrix} 0\,1\,0\,0 \\ 1\,0\,1\,1 \\ 0\,1\,0\,0 \\ 0\,1\,0\,0 \end{pmatrix} . \qquad (10)$$

Каждый элемент s_{ij} матрицы S (10) определяет структурную чувствительность параметра $p_к^*$ или $\dot{m}_г^*$ к нарушению связи f_j при исключении связи f_i. Локально диагностируемые контуры образуются объединением связей, которым соответствуют равные между собой строки матрицы чувствительности (связи (f_1, f_3, f_4), а также каждой единичной связью (в данном примере - f_2), оставшейся после такого выделения.

Введем вектор диагностических признаков (невязок – отклонений расчетных значений параметров от измеренных):

$$\Delta = (\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_m) , \qquad (11)$$

где $\delta_j = x_j^* - x_j^0$;

x_j^*, x_j^0 - измеренное и расчетное значения параметра соответственно. Параметры, используемые для формирования невязок будем называть контрольными.

Введем также для каждой невязки δ_j логическую величину π_j (логический диагностический признак):

1, если невязка δ_j находится в поле допуска;

$\pi_j = 0$ - в противном случае,

$j = 1,2,..,p$ - число диагностических признаков.

Вектор логических диагностических признаков

$$\Pi = (\pi_1, \pi_2, ..., \pi_p) \qquad (12)$$

будем называть вектором признаков.

Из матрицы чувствительности (9) формируется матрица (таблица) неисправностей.

Если в связи f_i произошло нарушение, то значения реализации (0,1) диагностических признаков $\pi_j, j = 1,2,...p$ противоположны соответствующим элементам i-й строки матрицы чувствительности S, т.е. $\pi_j = \bar{s}_{ij}$. Если $\pi_j = 1$ или, что то же самое, $s_{kj} = 0$, для всех j = 1, 2, ..., p состояние связи f_i не определено.

В нашем примере матрица чувствительности S и матрица неисправностей Z связаны следующим образом:

$$S = \begin{array}{c} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{array} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \longrightarrow Z = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cccc} \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 \end{array} \\ \begin{array}{c} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{array} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{array}$$

Признаки $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ формируются, например, по измеряемым значениям датчика $p_к^*$ и расчетным параметрам $p_к^{(i)}$, получаемым из решения системы уравнений при последовательном исключении i –й связи с помощью исключающего датчика $\dot{m}_г^*$.

Если вектор логических признаков Π совпадает с одной или несколькими строками матрицы неисправностей Z, то нарушена та связь или совокупность связей, номера которых совпадают с номерами строк матрицы Z.

<u>Перспективы дальнейших исследований</u>. Дальнейшее совершенствование метода структурного исключения по существу связано с повышением точности измерения параметров функционирования и точности математического моделирования рабочих процессов. Интегрально эти характеристики могут быть улучшены в результате коррекции математической модели по результатам доводки и (или) контрольно-технологических испытаний двигателя. Для повышения эффективности локализации неисправности процедуры коррекции должны базироваться на процедурах метода диагностирования.

<u>Выводы.</u> Предложенный метод локализации неисправностей основан на использовании структурных свойств объекта диагностирования, отраженных в его математической модели, что совместно с подходящим образом выбранной системой измерения обеспечивает формирование диагностических признаков, локально чувствительных к неисправности произвольного вида.

Литература

1. Биргер И.А. Техническая диагностика.- М.: Машиностроение, 1978.- 240 с.

2. Жуковский А.Е., Кондрусев В.С., Окорочков В.В. Испытания жидкостных ракетных двигателей.- М.: Машиностроение, 1992.- 352 с.

3. Коломенцев А.И., Мартиросов Д.С. Методы функциональной диагностики двигателей летательных аппаратов: Уч. пособие.- М.: Изд-во МАИ.- 2002.– 112 с.

4. Мартиросов Д.С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей и измеряемых параметров методом структурного исключения.- М.: Изд-во МАИ, 1998.- 56 с.

Поступила в редакцию 01.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; д-р техн. наук, профессор Б.И. Кузнецов, Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков.