

**Диагностические модели технических систем**

# 03, март 2015

**Верещака В. А.<sup>1,\*</sup>, Густомясов А. Н.<sup>1</sup>, Зимин В. В.<sup>1</sup>**

УДК: 62-1

<sup>1</sup>Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>\*</sup>[dm-rk-3@yandex.ru](mailto:dm-rk-3@yandex.ru)

Наиболее важными показателями технических систем (ТС) и их элементов являются надежность и эффективность функционирования. Оба эти свойства закладываются на стадии разработки, а также изготовления и реализуются в период эксплуатации. В процессе последней происходят необратимые изменения в конструкции, обуславливающие ухудшение технического состояния и приводящие, в свою очередь, к постоянным или внезапным отказам ТС.

С целью поддержания установленного уровня надежности и обеспечения эффективности использования ТС применяют техническое диагностирование, в ходе которого обычно решают следующие задачи: определение вида технического состояния; поиск места отказа или неисправности; прогнозирование технического состояния [1, 2].

За последние 10 - 15 лет требования к надежности ТС увеличились в 6 - 7 раз и это важнейшее качество ТС становится одним из основных показателей совершенства ТС, определяющее в конечном счете ее технико-экономическую эффективность.

Системы технического диагностирования рассматриваются многими фирмами как эффективное средство повышения надежности ТС, сокращения затрат на их обслуживание, предотвращения аварий и удлинения межремонтного периода. Проблема создания систем диагностирования ТС является одной из наиболее актуальных на современном этапе развития последних. Ее решению посвящено много работ, затрагивающих самые различные аспекты диагностирования как ТС в целом, так и их составных частей. Существуют различные методы диагностирования, которые, однако, не исключают, а дополняют друг друга.

Формализованные методы определения диагностических признаков (параметров) предусматривают построение и анализ математической модели объекта диагностирования и модели его возможных дефектов. Такие методы дают возможность выбрать признаки (параметры), достаточные или необходимые и достаточные для проведения того или иного вида диагностирования (проверки исправности, работоспособности, функционирования, поиска дефекта).

Диагностические модели устанавливают связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. В общем виде задача получения диагностической модели какой-либо технической системы решается следующим образом.

Запишем зависимость вектора  $f$  диагностических сигналов от вектора  $x$  структурных (диагностируемых) параметров в виде

$$f = F(x, E) \quad (1)$$

где  $E$  - вектор внешних возмущений. При  $E = const$  функция (1) примет вид

$$f = F(x) \quad (2)$$

Диагностическая модель определена, если установлена зависимость вектора структурных параметров от вектора диагностических сигналов

$$x = F^{-1}(f) \quad (3)$$

Решение (3) для уравнения (2) существует при выполнении следующих условий:

- функция  $F$  непрерывна и дифференцируема в области изменения аргумента  $x$ ;
- функциональный определитель системы (2) должен быть отличен от нуля:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial x_m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial x_1} & \frac{\partial F_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial x_m} \end{vmatrix} \neq 0$$

Здесь  $m$ -число структурных параметров.

Условие непрерывности состоит в том, что из  $|x' - x''| \rightarrow 0$  следует  $|f' - f''| \rightarrow 0$ , где  $f' = F(x')$  и  $f'' = F(x'')$ .

Применительно к задаче технического диагностирования это означает, что малые изменения технического состояния объекта диагностирования должны приводить к малым изменениям величины диагностического сигнала. Необходимость дифференцируемости функций  $F_i$  с математической точки зрения является более жестким, чем условие непрерывности. Поскольку в реальных механизмах все процессы происходят с конечной скоростью, то можно считать, что для них условие дифференцируемости функций  $F_i$  выполняется.

В качестве первого приближения можно рассмотреть случай, когда  $F_i$  линейны. Тогда (2) преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} f_1 &= a_{10} + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1m}x_m \\ f_2 &= a_{20} + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2m}x_m \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ f_m &= a_{m0} + a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mm}x_m \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь:  $a_{ij}$  - коэффициент чувствительности значения диагностического сигнала  $f_i$  к изменению структурного параметра  $x_j$ .

$$a_{ij} = \frac{\Delta f_i}{\Delta x_j}, \text{ при } x_k = \text{const} \quad (k \neq j)$$

Система (4) разрешима относительно  $x_j$ , если ее определитель отличен от нуля

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{vmatrix} \neq 0 \quad (5)$$

Следует отметить, что абсолютная величина определителя (5) характеризует общую чувствительность метода диагностирования.

Если условие (5) выполняется, систему (4) можно разрешить относительно структурных параметров:

$$\begin{aligned} x_1 &= b_{10} + b_{11} f_1 + b_{12} f_2 + \dots + b_{1m} f_m \\ x_2 &= b_{20} + b_{21} f_1 + b_{22} f_2 + \dots + b_{2m} f_m \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_m &= b_{m0} + b_{m1} f_1 + b_{m2} f_2 + \dots + b_{mm} f_m \end{aligned} \quad (6)$$

Система (6) представляет собой диагностическую модель, по которой можно определить алгоритм диагностирования и принцип действия системы технической диагностики. Таким образом, в общем случае задача технического диагностирования распадается на ряд подзадач.

1) Применительно к данному техническому объекту выбрать физический вид диагностических сигналов и структурных параметров. Определить способ получения диагностических сигналов.

2) Определить коэффициенты чувствительности  $a_{ij}$  для нескольких мест установки датчика диагностических сигналов. Для определения этих коэффициентов можно воспользоваться, например, методами регрессионного анализа.

3) Определить оптимальное место установки датчика (датчиков) диагностического сигнала (сигналов). Это место определяется условием, при котором абсолютная величина определителя (5) максимальна, а также конструктивными соображениями.

4) Для выбранного оптимального места установки датчика определить значения коэффициентов  $b_{ij}$  системы (6).

Для получения диагностической модели при числе  $m > 1$  можно использовать методы планирования эксперимента [8,9]. Суть этих методов применительно к системам технического диагностирования, заключается в следующем.

Диагностические сигналы (критерии) зависят от структурных параметров (факторов). Чтобы установить эту взаимосвязь (например, в форме (4)), проводят несколько экспериментов, в которых факторы изменяются по определенной согласованной схеме, и при каждом эксперименте определяют "отклик" исследуемой системы (фиксируют значения

критериев). На основе результатов этих экспериментов методами регрессионного анализа можно установить общую взаимосвязь между критериями и факторами (в нашем случае, соответственно, диагностическими сигналами и структурными параметрами).

Число факторов (структурных параметров) обуславливает размерность изучаемого факторного пространства. Выбранные факторы должны отвечать двум основным требованиям

1) Независимость, т.е. возможность установления фактора на другом уровне вне зависимости от уровня других факторов.

2) Совместимость. При эксперименте одновременно изменяется несколько факторов. Совместимость факторов означает, что все их комбинации осуществимы.

Для каждого  $j$ -го фактора устанавливаются следующие значения:  $x_{j(0)}$  - основной (штатный) уровень,  $x_{j(\min)}$ ,  $x_{j(\max)}$  - верхний и нижний уровни  $j$ -го фактора,  $\Delta x_j$  - интервал варьирования. При составлении плана эксперимента используются кодированные значения уровней факторов. При этом основной уровень принимается равным "0", верхний - "+1", нижний - "-1". Кодировка осуществляется по формуле

$$\bar{x}_{j(\max)} = \frac{x_{j(\max)} - x_{j(0)}}{\Delta x_j} = +1 \quad (j = 1 \dots m)$$

$$\bar{x}_{j(\min)} = \frac{x_{j(\min)} - x_{j(0)}}{\Delta x_j} = -1 \quad (j = 1 \dots m)$$

При обычно применяемой двухуровневой системе изменения факторов число всех точек факторного пространства, в которых можно определить критерии, равно  $2m$ , где  $m$  - число факторов. Это так называемый полный факторный эксперимент (ПФЭ). План изменения факторов при ПФЭ (или просто «план ПФЭ») представляется в виде матрицы размером  $N \cdot (m + 1)$ , где  $N = 2m$  - число опытов при ПФЭ.

Данные, полученные при ПФЭ, обладают определенной информационной избыточностью. Поэтому для нахождения коэффициентов в линейных аппроксимирующих полиномах (4) используются так называемые дробные факторные планы (ДФП), которые являются частью полных факторных планов, при этом число опытов меньше числа точек в факторном пространстве [3,4].

Составленный таким образом план (как и план ПФЭ) позволяет получить отдельные оценки линейных эффектов всех факторов с максимально возможной при данном числе опытов точностью, одинаковой для всех эффектов. Коэффициент линейного уравнения регрессии определяется при этом на основе методов линейной алгебры [3,4] по формуле

$$a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{nj} f_{ni} \quad (n = 1 \dots N)$$

Здесь  $f_{ni}$  -  $j$ -й критерий при проведении  $n$ -го опыта.

В случае большого числа факторов или для получения нелинейной регрессионной модели следует воспользоваться стандартными программами регрессионного анализа на ЭВМ.

Экспериментальные методы получения диагностических моделей имеют большую трудоемкость и требуют повторения исследований даже после небольших изменений в конструкции объекта, что вынуждает разработчиков использовать для получения диагностических моделей методы математического моделирования [5-7].

### **Список литературы**

1. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 01.01.1991. М.: Стандартиформ, 2009, 13 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
3. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. М.: Металлургия, 1969, 158 с.
4. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И.. Планирование эксперимента в технике / под ред. Б.П. Креденцера. Киев.: Техника, 1984. 200 с.
5. Густомясов А.Н., Трудоношин В.А. Автоматизированный расчет на ЭВМ гидромашин и гидроприводов. Вестник МГТУ. Приборостроение, № 2. Спец. выпуск "Системы автоматизированного проектирования". 1991. с. 29-37.
6. Густомясов А. Н., Птицын Г. В. Приложение теории и средств многоаспектного моделирования технических объектов к разработке диагностических моделей гидроприводов: Тез. докл. науч. техн. конф. январь 1997 г.; МГТУ им. Н. Э. Баумана, - М., 1997, с. 32.
7. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов.- 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 431с.