Методика диагностирования сложных технических систем на основе нечетких причинно-следственных отношений

Fuzzy cause-effect relations based strategy of complex technical systems diasnosis

Ключевые слова: техническая диагностика – technical diagnostics; техническое состояние – technical state; модель объекта диагностирования – unit under test model; метод парных сравнений – method of paired comparisons; нечеткая причинно-следственная связь – fuzzy cause-effect relations.

В статье предлагается методика диагностирования сложных технических систем. Рассмотрены вопросы получения численных показателей нечетких причинно-следственных связей между неисправностями и их внешними проявлениями.

This paper reports complex technical systems diagnosis strategy. Calculations of numerical factors of fuzzy cause-effect relations between faults and their demonstrations are given.

ИВАНОВ / IVANOV A.
Алексей Олегович
адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет и космических аппаратов, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

Диагностирование – это исследование объекта с целью определения его состояния. Если объектом диагностирования (ОД) является техническая система, то и диагностирование называется техническим. Его целью является определение технического состояния (ТС) объекта [1].

Техническое состояние – совокупность свойств объекта, характеризующая его функциональную пригодность, т.е. позволяющая установить, является ли в данный момент объект исправным или неисправным, работоспособным или неработоспособным, правильно функционирующим или неправильно функционирующим и т.д. [1].

Математическая постановка задачи диагностирования с точки зрения минимизации временных затрат формулируется в следующем виде:

1. Заданы:

а) перечень режимов функционирования объекта и перечень составных частей объекта, с точностью до которых определяются места отказов (глубина диагностирования);

б) множество модельных ТС объекта $F = \{F_i \mid i = \overline{1,n}\}$ при заданной глубине диагностирования;

в) множество выходов ОД $y_j\ (j = \overline{1,l})$, используемых в качестве диагностических признаков.

2. Требуется:

а) определить любой возможный вид ТС при заданной глубине диагностирования, т.е. принять решение $r_i \in R$ о ТС объекта, такое чтобы:

$$\forall F_i \in F, \forall F_r \in F \setminus F_i, \exists r_i \in R, \exists r_r \in R \setminus r_i : F_i \neq \neq F_r \Rightarrow r_i \neq r_r ; \quad (1)$$

условие полной наблюдаемости видов ТС;

б) обеспечить минимальные временные затраты на проведение диагностирования при заданной достоверности результатов диагностирования объекта:

$$T(r_i^*) = \min_{R_i \in R}\{T(r_i)\},\ D(r_i^*) \geq D(r_i). \quad (2)$$

3. Налагаются следующие ограничения:

а) возможность регистрации (измерения) инструментальными средствами диагностических признаков (параметров) $\pi_j\ (j = \overline{1,l})$ и интерпретация их результатов в течение диагностирования объекта;

б) отказы носят единичный характер.

НЕЧЕТКАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Нечеткая диагностическая модель сложной технической системы (СТС), пригодная для проведения функционального диагностирования в условиях неопределенности представляется в следующем виде:

$$M_{CTC} = \langle F, \Pi, B, S, \mathrm{H}, \mu \rangle, \tag{3}$$

где $F = \{F_1, F_2, \ldots, F_n\}$ – множество модельных технических состояний; $\Pi = \{\pi_j\} \big| j = \overline{1, m}$ – множество ДП объекта, однозначно соответствующее множеству выходов объекта B, наблюдаемых в процессе диагностирования;

$B = \{y_j\} \big| j = \overline{1,}$ – нечеткое множество выходных реакций ОД;

$S = \{s_{ij} \big| i = \overline{1, n};\ j = \overline{1, m}\} = \{0,1\}$ – множество результатов проверок j-го ДП. Значение $s_{ij} = 1$ означает, что измеренное значение j-го ДП попадает в конкретный интервал, характеризующий i-е ТС объекта;

$\mathrm{H} = \{y_j, \gamma_{ij}\}, \gamma_{ij} = \mu_H(F_i, y_j) \big| i = \overline{1, n},\ j = \overline{1, m}$ – нечеткое отношение, отражающее причинно-следственную связь между техническими состояниями F_i и j-м диагностическим признаком;

$\mu = \{\mu_{F_i}(B_{\langle m \rangle})\} \big| i = \overline{1, n}$ – множество значений функции принадлежности наблюдаемого состояния объекта одному из видов модельных ТС объекта.

Модель объекта диагностирования представлена в табл. 1 [2].

МАТРИЦА ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ

Для построения вышеописанной модели необходимо определиться с нечетким причинно-следственным отношением Н, а точнее – со значениями γ_{ij}. Решение такого класса задач в большинстве случаев обеспечивается неформальными методами, а эффективность решений в основном зависит от квалификации исследователя, его интуиции, объема имеющейся в его распоряжении информации по рассматриваемой проблеме и возможности ее обработки в полном объеме.

С целью повышения надежности и объективности экспертных оценок предлагается метод взвешенных парных сравнений. Практическим обоснованием эффективности данного метода является тот факт, что при его использовании эксперту предоставляется возможность оперировать не всем множеством допустимых вариантов, а лишь парами альтернатив, что существенно упрощает его задачу и, соответственно, повышает качество экспертной информации [3]. Суть метода парных сравнений элементов заключается в следующем. Если бы значения приоритетов, которые выражают относительную степень влияния каждого отдельного вида ТС объекта на j-й выход были нам известны, например – $\Gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \mathrm{K}, \gamma_n)$, парные сравнения экспертов можно было бы представить матрицей отношений $A = \|a_{ij}\|$, где $a_{ij} = \gamma_i / \gamma_j$. При этом очевидно, что $a_{ij} = 1 / a_{ji}$. Следовательно, матрица парных сравнений в данном случае является положительно определенной, обратносимметричной матрицей, имеющей ранг, равный 1, максимальное собственное число которой равно размерности матрицы, т.е. n. Вектор Г удовлетворяет следующему уравнению $A\Gamma = n\Gamma$, т.е. является собственным вектором матрицы A, соответ-

Таблица 1

Модель объекта диагностирования

ТС	Диагностические признаки			$\mu_F(B_{\langle m \rangle})$
	π_1	…	π_j	
F_1	s_{11}, γ_{11}	…	s_{1j}, γ_{1j}	$\mu_{F_1}(B_{\langle m \rangle})$
F_2	s_{21}, γ_{21}	…	s_{2j}, γ_{2j}	$\mu_{F_2}(B_{\langle m \rangle})$
…	…	…	…	…
F_i	s_{i1}, γ_{i1}	…	s_{ij}, γ_{ij}	$\mu_{F_i}(B_{\langle m \rangle})$
…	…	…	…	…
F_n	s_{n1}, γ_{n1}	…	s_{nj}, γ_{nj}	$\mu_{F_n}(B_{\langle m \rangle})$
$B_{\langle m \rangle}$	y_1	…	y_j	

Таблица 2

Шкала Т. Саати

Относительная важность	Определение	Объяснения
1	Равная важность	Равное влияние на значения ДП
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному модельному ТС над другим в степени влияния на значения ДП
5	Существенное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному модельному ТС над другим в степени влияния на значения ДП
7	Значительное превосходство одного над другим	Модельному ТС в степени влияния на значения ДП дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство одного над другим	Наиболее сильное влияние на значения ДП
2, 4, 6, 8	Соответствующие промежуточные значения	Применяются в компромиссном случае
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении степени влияния на значения ДП одного вида ТС с другим получено одно из вышеуказанных чисел (например – 3), то при сравнении второго ТС с первым получим обратную величину, т.е. 1/3	

ствующим максимальному собственному числу n. На практике элементы вектора Г заранее неизвестны, поэтому для каждого выхода ОД эксперт формирует матрицу отношений M с использованием субъективных суждений, численно оцениваемых по шкале Т. Саати от 1 до 9, приведенной в табл. 2 [3].

В качестве элементов матрицы выступают модельные виды ТС объекта. При этом предполагается, что диагональные элементы равны 1, а для элементов, симметричных относительно диагонали, выполняется следующая зависимость $m_{ij} = 1/m_{ji}$, т.е. если один объект в m раз предпочтительнее другого, второй объект оценивается в $1/m$ раз предпочтительнее первого (слово «предпочтительнее» в данном случае следует понимать как «сильнее влияет на изменение значений на выходе объекта»). Затем решается проблема нахождения компонент вектора Г.

В общем случае задача сводится к поиску вектора приоритетов $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_n\}$, удовлетворяющего уравнению вида $M \cdot \Gamma = N_{\max} \cdot \Gamma$, где $N_{\max}$ – наибольшее собственное значение матрицы M. При проведении сравнений в реальной ситуации вычисленное максимальное собственное число $N_{\max}$ будет отличаться от соответствующего собственного числа для идеальной матрицы. Это различие характеризует так называемую рассогласованность реальной матрицы. И, соответственно, характеризует уровень доверия к полученным результатам. Чем больше это отличие, тем меньше доверие. Таким образом, эта модификация метода парных сравнений содержит внутренние инструменты, позволяющие определить качество обрабатываемых данных и степень доверия к ним. Отклонение $N_{\max}$ от n используется как мера правильности результата.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕКТОРА Г И ИНДЕКСА СОГЛАСОВАННОСТИ МАТРИЦЫ

Для расчета локальных приоритетов необходимо вычислить собственный вектор для матрицы M, а затем нормализовать результат к единице, получая тем самым вектор приоритетов. Вычисление собственных векторов может занять довольно много времени. Имеются несложные пути получения хорошего приближения к приоритетам. Одним из наилучших путей является геометрическое среднее. Полученный таким образом столбец чисел нормализуется делением каждого числа на сумму всех чисел. Описанный выше алгоритм вычисления собственных векторов, соответствующих максимальному собственному числу матрицы M, представлен в табл. 3.

При использовании любого метода аппроксимации существует опасность изменения порядка

Таблица 3

Алгоритм вычисления собственных векторов

	Матрица *M*				Вычисление оценок компонент собственного вектора по строкам	Нормализация для получения оценок вектора приоритетов
	1	2	…	n		
1	m_{11}	m_{12}	$\cdots$	m_{1n}	$b_1 = \sqrt[n]{m_{11}m_{12}A\ m_{1n}}$	$\gamma_1 = b_1 / B$
2	m_{21}	m_{22}	$\cdots$	m_{2n}	$b_2 = \sqrt[n]{m_{21}m_{22}A\ m_{2n}}$	$\gamma_2 = b_2 / B$
…	…	…	…	…	…	…
n	m_{n1}	m_{n2}	$\cdots$	m_{nn}	$b_n = \sqrt[n]{a_{n1}a_{n2}A\ a_{nn}}$	$\gamma_n = b_n / B$
Сумма					$B = b_1 + b_2 + A\ + b_n$	

Таблица 4

Вычисление индекса согласованности

	Матрица				Вектор приоритетов
№	1	2	…	n	
1	m_{11}	m_{12}	…	m_{1n}	ω_1
2	m_{21}	m_{22}	…	m_{2n}	ω_1
…	…	…	…	…	…
n	m_{n1}	m_{n2}	…	m_{nn}	ω_1
	$\sum_{i=1}^{n} m_{i1} \cdot \omega_1 = c_1$	$\sum_{i=1}^{n} m_{i2} \cdot \omega_2 = c_2$	…	$\sum_{i=1}^{n} m_{in} \cdot \omega_n = c_n$	$N_{\max} = \sum_{j=1}^{n} c_j$

ранжирования и получения нежелательных результатов. Подход, основанный на собственном векторе, использует информацию, которая содержится в любой, даже несогласованной матрице, и позволяет получать приоритеты, основанные на имеющейся информации, не производя арифметических преобразований данных.

Весьма полезным побочным продуктом метода является так называемый индекс согласованности ε, который дает информацию о степени нарушения численной (кардинальной) и транзитивной (порядковой) согласованности. Для улучшения согласованности можно рекомендовать поиск дополнительной информации и пересмотр данных, использованных при построении шкалы.

Вместе с матрицей парных сравнений мы имеем меру оценки степени отклонения от согласованности. Когда такие отклонения превышают установленные пределы, тому, кто проводит суждения, следует перепроверить их в матрице. Индекс согласованности в каждой матрице и для всей иерархии может быть приближенно получен вычислениями вручную. Правила вычисления индекса согласованности приведены в табл. 4.

Таким образом, можно получить величину, обозначаемую $N_{\max}$. Для индекса согласованности имеем:

$$\varepsilon = \frac{(N_{\max} - n)}{(n-1)}.$$

Для обратносимметричной матрицы всегда $N_{\max} \geq n$. Полученные векторы

$$\Gamma_j = (\gamma_{1j}, \gamma_{2j}, \ldots, \gamma_{nj}) \big| j = \overline{1, m}$$

можно считать векторами, характеризующими нечеткие причинно-следственные отношения между предпосылками возникновения события (нахождение объекта в одном из модельных ТС) и событием (результатом проверки *j*-го выхода объекта).

ЗАДАЧА СООТНЕСЕНИЯ ВИДА НАБЛЮДАЕМОГО СОСТОЯНИЯ ОД С МОДЕЛЬНЫМИ ТС

В ходе функционального диагностирования соотнесение наблюдаемого на пространстве выходов текущего состояния ОД с модельными ТС объекта проводится по положительным исходам проверок каждого из выходов ОД. Результатом такого соотнесения будет являться степень уверенности $\mu_{F_i}(B_{\langle k \rangle})$ в том, что по результатам наблюдения *k* выходов объекта и на основании причинно-следственных отношений между модельными ТС и значениями на выходах объекта наблюдается *i*-й вид ТС объекта. Одним из возможных способов получения такой степени уверенности в численном виде является вычисление среднего значения элементов γ_{ij} на пересечении строк табл. 2 и столбцов, соответствующих положительным исходам проверок:

$$\mu_{F_i}(B_{\langle k \rangle}) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} \gamma_{ij} \, \big| k \leq m. \tag{4}$$

Далее исходя из критерия максимального значения $\mu_{F_i}(B_{\langle k \rangle})$ определяется класс технического состояния, к которому принадлежит наблюдаемое состояние ОД [2].

Литература

1. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика. – Министерство обороны СССР, 1987.
2. *Полянский В.И.* Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем. – М.: Полиграф сервис, 2010.
3. *Мануйлов Ю.С., Павлов А.Н. и др.* Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010.