УДК 681.326

В. И. Сеньченков

РЕШАЮЩИЕ ПРАВИЛА В АЛГОРИТМАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

Рассматриваются вопросы формирования решающих правил при построении алгоритмов определения технического состояния системы как комбинационным, так и последовательным методом. Указанные методы адаптированы применительно к задачам контроля функционирования и контроля работоспособности системы, а также поиска отказов. Особое внимание уделяется корректному учету временного сопоставления событий при формировании решающих правил контроля функционирования.

Ключевые слова: *техническое состояние, траектория, решающее правило, контроль функционирования, распознавание, проверка.*

Введение. Основу математической модели контроля и диагностирования системы составляют:

— вектор траекторий выходных переменных, зарегистрированных в контрольных точках (выходной процесс системы),

$$\breve{\mathrm{Y}} = (\breve{y}_1, \breve{y}_2, ..., \breve{y}_\nu)^T; \qquad (1)$$

— вектор контролируемых признаков (наблюдаемое состояние системы)

$$\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \ldots, y_n)^T; \qquad (2)$$

— совокупность изображений

$$\mathbf{E}_i = (e_{i1}, e_{i2}, \ldots, e_{in})^T, \ i = \overline{0, m}, \qquad (3)$$

видов технического состояния системы. Кроме того, в основу модели положена также последовательность логических условий и переходов, относящих наблюдаемое состояние системы к тому или иному виду технического состояния (т.е. алгоритм определения технического состояния).

В работе [1] изложен подход к формированию вектора контролируемых признаков (2) путем представления траекторий выходного процесса (1) измеримыми по Лебегу функциями и их последующей обработки на основе свойств пространства L_2 (пространство измеримых функций, квадратично интегрируемых по Лебегу). Указанный подход позволяет ввести менее жесткие ограничения на траектории по сравнению с предлагаемыми в работах [2—5 и др.], что значительно расширяет возможности варьирования глубины контроля и диагностирования.

Под изображением (3) понимается формальное представление вида технического состояния системы как составной части модели ее контроля и диагностирования. Способы построения изображений на основе обучения и применения минимального множества контролируемых признаков изложены в работах [6, 7]. Координата e_{ij}, $i = \overline{0, m}$, $j = \overline{1, n}$, векторов (3) — есть модельное (типовое) значение j-го контролируемого признака y_j в i-м виде технического состояния системы.

Основу алгоритмов определения технического состояния системы представляют решающие правила, с помощью которых выявляется степень сходства наблюдаемого состояния (2) с изображениями (3). Принципы формирования указанных правил и рассматриваются в настоящей статье. Их построение осуществляется в соответствии с предложенными в работах [1, 6, 7] подходами к обработке траекторий выходных процессов системы и построению изображений видов технического состояния.

Решающее правило реализуется путем выполнения проверок $\pi_j \in \Pi$ контролируемых признаков y_j, $j = \overline{1,n}$. Под проверкой в дальнейшем понимается совокупность действий по сопоставлению значений e_{ij} и y_j, а также установлению их практической неразличимости в заданных условиях или, наоборот, их существенного различия.

В теории контроля и диагностирования рассматриваются два основных метода распознавания технических состояний — комбинационный и последовательный [3, 4]. При комбинационном распознавании решение о текущем техническом состоянии принимается на основе анализа результатов всех проверок из заданного множества П, которые могут быть выполнены в произвольном порядке. При последовательном распознавании соблюдается некоторая очередность выполнения проверок. Решающие правила как при комбинационном, так и при последовательном распознавании следует формировать с учетом специфики конкретных задач — контроля функционирования, контроля работоспособности и поиска отказов. Поэтому в настоящей статье построение данных правил при комбинационном и последовательном распознавании рассматривается отдельно для каждой задачи.

Формирование решающих правил при комбинационном методе распознавания. В моделях процесса контроля функционирования множества наблюдаемых состояний разбиваются на виды технического состояния, соответствующие режимам нормальной работы системы и состоянию неправильного функционирования. Смена режимов работы производится в опорные моменты времени t_i^*, $i = \overline{1,m}$, в течение которых состояния системы изменяются скачком. Соответственно скачком изменяются и траектории выходных процессов или, по крайней мере, некоторые из них. Математически скачки траекторий можно интерпретировать как разрывы первого рода функциональных зависимостей [8]. Между опорными моментами t_i^* и t_{i+1}^* система находится в i-м режиме функционирования. При этом ее состояния изменяются непрерывно или также могут претерпевать скачки. Соответствующим образом изменяются и траектории. Даже при счетном множестве разрывов траектории являются измеримыми по Лебегу функциями, а следовательно, для их дальнейшей обработки и представления конечномерным вектором контролируемых признаков (2) может быть применен подход, предложенный в работе [1].

Пусть на множестве векторов вида (2) и (3) задана структура n-мерного евклидова пространства Y. Тогда в качестве составной части решающего правила необходимо включить проверку соответствия наблюдаемого состояния (2) одному из изображений (3) по общеизвестному критерию минимума метрического различия в n-мерном евклидовом пространстве:

$$\mathbf{Y} \in \mathrm{Y}^i, \text{ если } d(G(\mathbf{Y}), \mathbf{E}_i) = \min_{k=\overline{0,m}} \{d(G(\mathbf{Y}), \mathbf{E}_k)\}, \; i = \overline{0,m}, \tag{4}$$

где Y^i — область в пространстве Y ($\mathrm{Y}^i \subset Y$), соответствующая i-му виду технического состояния системы; $d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(g_j(\mathbf{Y}) - e_{ij}\right)^2}$ — расстояние в пространстве Y между изображением $\mathbf{E}_i$ и G-преобразованным наблюдаемым состоянием $\mathbf{Y}$ (процедура G-преобразования изложена в работах [6, 7]); $\mathbf{E}_0$ — изображение вида технического состояния „неправильное функционирование“; $\mathbf{E}_i$, $i = \overline{1,m}$, $\mathbf{E}_k$, $k = \overline{1,m}$, — изображения режимов правильного функционирования системы.

Если

$$\min_{k=0,m}\left\{d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_k)\right\} = d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_0), \quad (5)$$

принимается решение о неправильном функционировании системы.

В выражениях (4) и (5) не учитывается временна́я расстановка событий. Для ее учета необходимо сопоставить временной интервал $[t_i^*; t_{i+1}^*)$ для i-го режима функционирования с множеством T_{ij}, $i=\overline{1,m}$, $j=\overline{1,\nu}$, моментов времени реального наблюдения j-й траектории в i-м виде технического состояния. Указанные множества должны совпадать с допустимой погрешностью δ^i программной отработки режимов правильного функционирования системы:

$$\bigcap_{j=1}^{\nu}\left(T_{ij}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) \le \delta^i\right), \quad (6)$$

где $\delta^i \in \mathsf{R}^+$, R^+ — множество положительных вещественных чисел; Δ — операция симметрической разности множеств.

Если

$$\exists k \in \left\{i \mid i=\overline{1,m}\right\}:\ T_{kj}\Delta[t_k^*; t_{k+1}^*) > \delta^k, \quad (7)$$

то имеет место отклонение k-го режима функционирования системы от заданного временного интервала его отработки на величину, превышающую допустимое значение.

Если

$$\exists l \in \left\{j \mid j=\overline{1,\nu}\right\}:\ T_{il}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) > \delta^i, \quad (8)$$

то l-я траектория, в результате преобразования которой получен контролируемый признак y_j, $j=\overline{1,n}$, в i-м режиме функционирования отклоняется от заданного временного интервала на величину, превышающую допустимое значение.

При выполнении неравенства (7) или (8) принимается решение о том, что система функционирует неправильно.

Кроме того, величина $d(G(\mathbf{Y}), \mathbf{E}_i)$ не должна превышать среднего расстояния между всеми изображениями режимов правильного функционирования системы:

$$d(G(\mathbf{Y}), \mathbf{E}_i) \le \frac{1}{m}\sum_{\substack{p,f=\overline{1,m}\\ p\ne f}} d(\mathbf{E}_p, \mathbf{E}_f),\ i=\overline{1,m}. \quad (9)$$

Только при выполнении условия (9) наблюдаемое состояние $\mathbf{Y}$ будет находиться в пределах одной из областей $\mathsf{Y}^i \subset \mathsf{Y}$, $i=\overline{1,m}$, в противном случае оно будет в области $\mathsf{Y}^0 \subset \mathsf{Y}$ неправильного функционирования.

Согласно выражениям (4)—(9) решающее правило при контроле функционирования принимает следующий вид:

$$\mathbf{Y}\in\mathsf{Y}^i,\ i=\overline{1,m},\ \text{если}\ \begin{cases} d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_i) = \min\limits_{k=1,m}\left\{d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_k)\right\}; \\ \bigcap\limits_{j=1}^{\nu}\left(T_{ij}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) \le \delta^i\right); \\ d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_i) \le \dfrac{1}{m}\sum\limits_{\substack{p,f=\overline{1,m}\\ p\ne f}} d(\mathbf{E}_p,\mathbf{E}_f); \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}\in \mathsf{Y}^0,\ \text{если}\ \begin{cases} \min\limits_{k=\overline{0,m}}\left\{d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_k)\right\} = d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_0) \\ \qquad\qquad \text{или} \\ \exists k \in \left\{i \mid i=\overline{1,m}\right\}:\ T_{kj}\Delta[t_k^*;t_{k+1}^*) > \delta^k, \\ \qquad\qquad \text{или} \\ \exists l \in \left\{j \mid j=\overline{1,\nu}\right\}:\ T_{il}\Delta[t_i^*;t_{i+1}^*) > \delta^i, \\ \qquad\qquad \text{или} \\ d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_i) > \dfrac{1}{m}\sum\limits_{\substack{p,f=\overline{1,m}\\ p\neq f}} d(\mathbf{E}_p,\mathbf{E}_f). \end{cases} \tag{11}$$

В моделях процессов контроля работоспособности и поиска отказов множество E содержит m+1 изображений видов технического состояния, т.е. $E=\left\{\mathbf{E}_i \mid i=\overline{0,m}\right\}$, где $\mathbf{E}_0$ соответствует работоспособному состоянию, а $\mathbf{E}_i$, $i=\overline{1,m}$, — неработоспособным состояниям, каждое из которых вызвано отказом одного функционального элемента. С точностью до таких элементов и определяется место отказа.

Проверка работоспособности и поиск отказов системы производится по значениям контролируемых признаков, измеренным в фиксированный момент времени. Поэтому в данном случае время перестает быть информативным признаком и должно быть исключено из решающего правила, которое принимает следующий вид:

$$\mathbf{Y}\in \mathsf{Y}^i,\ \text{если}\ d(G(\mathbf{Y}),\ \mathbf{E}_i) = \min_{f=\overline{0,m}}\left\{d(G(\mathbf{Y}),\mathbf{E}_f)\right\},\ i=\overline{0,m}. \tag{12}$$

Оптимизация процесса принятия решений о виде технического состояния системы по какому-либо критерию на основе правил (10)—(12) крайне затруднена. Это связано с тем, что решения принимаются на основе анализа результатов проверок всех контролируемых признаков. От указанного недостатка свободен последовательный метод распознавания.

Формирование решающих правил при последовательном методе распознавания. При последовательном распознавании проверки контролируемых признаков выполняются не одновременно, а в некоторой последовательности, причем для принятия решения о виде технического состояния системы могут быть выполнены не все проверки из заданного множества. Поэтому решающее правило в данном случае необходимо формировать по результатам выполнения каждой отдельной проверки π_j, имеющей некоторое конечное число исходов $\pi^{r_{ij}}$ ($r_{ij}=\overline{1,\omega_j}$, $\omega_j \in \mathsf{N}$, где N — множество натуральных чисел). Под исходом проверки π_j для i-го вида технического состояния системы в дальнейшем понимается событие, при котором измеренное значение j-го контролируемого признака находится в интервале $[y_{ij}^{\text{н}};y_{ij}^{\text{в}}]$, где $y_{ij}^{\text{н}}$ и $y_{ij}^{\text{в}}$, $i=\overline{0,m}$, $j=\overline{1,n}$, — соответственно нижнее и верхнее предельно допустимые значения j-го признака в i-м виде технического состояния.

Решающее правило при контроле правильности функционирования системы последовательным методом строится на основе следующих рассуждений. Пусть проверка имеет j-й исход в i-м виде технического состояния системы. Тогда для идентификации i-го режима ее работы по j-му контролируемому признаку необходимо выполнение двух условий.

Первое условие. Расстояние на числовой оси между значением j-го контролируемого признака y_j и соответствующей координатой e_{ij} изображения $\mathbf{E}_i$ должно быть минимальным по сравнению с этой же координатой e_{fj} всех других изображений, т.е. данные признаки должны иметь наибольшее сходство в геометрическом смысле:

$$\left|y_j - e_{ij}\right| = \min_{f=0,m}\left\{\left|y_j - e_{fj}\right|\right\},\ i = \overline{0,m}. \tag{13}$$

Если

$$\min_{f=0,m}\left\{\left|y_j - e_{fj}\right|\right\} = \left|y_j - e_{0j}\right|, \tag{14}$$

принимается решение о неправильном функционировании системы.

Выполнение равенства (13) означает, что текущее значение j-го контролируемого признака находится в интервале $[y_{ij}^{\text{н}}; y_{ij}^{\text{в}}]$. При этом необходимо выделить два случая взаимного расположения y_j и e_{ij}, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, на числовой оси. В первом из них

$$\min_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\} \le y_j \le \max_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\}, \tag{15}$$

а во втором

$$y_j < \min_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\} \text{ или } y_j > \max_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\}. \tag{16}$$

В последнем случае необходимо установить ограничение на отклонение значения y_j на числовой оси от интервала

$$\max_{\substack{p,f=1,m \\ p\ne f}}\left\{\left|e_{pj} - e_{fj}\right|\right\}. \tag{17}$$

В интервале (17) находятся все величины e_{ij}. Максимальное отклонение не должно превышать половины среднего расстояния между значениями координат e_{ij}, т.е. должно выполняться неравенство

$$\frac{1}{2(m-1)}\max_{\substack{p,f=1,m \\ p\ne f}}\left\{\left|e_{pj} - e_{fj}\right|\right\} \ge \begin{cases} y_j - e_{ij}, & \text{если } y_j > \max\limits_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\}; \\ \left|y_j - e_{ij}\right|, & \text{если } y_j < \min\limits_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\}. \end{cases} \tag{18}$$

Это обеспечивает „попадание“ вектора наблюдаемого состояния **Y** по j-й координате в область Y^i, $i = \overline{1,m}$, соответствующую i-му режиму нормальной работы системы.

Второе условие. Кроме сопоставления контролируемого признака y_j с координатой e_{ij} в геометрическом смысле, в решающем правиле должна быть учтена и временна́я расстановка событий, определяемая выражением (6).

Принимается, что проверка j-го контролируемого признака y_j, $j = \overline{1,n}$, дает положительный результат (отсутствуют его недопустимые отклонения), если выполняются условия (6), (13) и (15) или условия (6), (16) и (18). Выполнение неравенства (7) или (8) свидетельствует о неправильном функционировании системы.

Таким образом, с учетом выражений (6)—(8) и (13)—(18) решающее правило при контроле функционирования принимает следующий вид:

$$\pi_j = \pi^{r_{ij}},\ i = \overline{1,m}, \text{ если } \begin{cases} \min\limits_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\} \le y_j \le \max\limits_{f=1,m}\left\{e_{fj}\right\}; \\ \left|y_j - e_{ij}\right| = \min\limits_{f=1,m}\left\{\left|y_j - e_{fj}\right|\right\}, \\ T_{ij}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) \le \delta^i \end{cases} \tag{19}$$

$$
\text{или} \begin{cases} y_j < \min\limits_{f=\overline{1,m}} \{e_{fj}\} \ \text{ или } \ y_j > \max\limits_{f=\overline{1,m}} \{e_{fj}\}; \\ \dfrac{1}{2(m-1)} \max\limits_{\substack{p,f=\overline{1,m} \\ p\neq f}} \{|e_{pj} - e_{fj}|\} \geq \begin{cases} y_j - e_{ij}, & \text{если } y_j > \max\limits_{k=\overline{1,m}} \{e_{kj}\}; \\ |y_j - e_{ij}|, & \text{если } y_j < \min\limits_{k=\overline{1,m}} \{e_{kj}\}; \end{cases} \\ T_{ij}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) \leq \delta^i; \end{cases} \tag{20}
$$

$$
\pi_j = \pi^{r_{0j}}, \text{ если } \begin{cases} \min\limits_{f=\overline{1,m}} \{e_{fj}\} \leq y_j \leq \max\limits_{f=\overline{1,m}} \{e_{fj}\}, \\ \min\limits_{f=\overline{0,m}} \{|y_j - e_{fj}|\} = |y_j - e_{0j}| \\ \qquad \text{или} \\ \exists k \in \{i \mid i = \overline{1,m}\}:\ T_{kj}\Delta[t_k^*; t_{k+1}^*) > \delta^k, \\ \qquad \text{или} \\ \exists l \in \{j \mid j = \overline{1,\nu}\}:\ T_{il}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) > \delta^i \end{cases} \tag{21}
$$

$$
\text{или} \begin{cases} y_j < \min\limits_{f=\overline{1,m}} \{e_{fj}\} \ \text{ или } \ y_j > \max\limits_{f=\overline{1,m}} \{e_{fj}\}; \\ \dfrac{1}{2(m-1)} \max\limits_{\substack{p,f=\overline{1,m} \\ p\neq f}} \{|e_{pj} - e_{fj}|\} < \begin{cases} y_j - e_{ij}, & \text{если } y_j > \max\limits_{k=\overline{1,m}} \{e_{kj}\}; \\ |y_j - e_{ij}|, & \text{если } y_j < \min\limits_{k=\overline{1,m}} \{e_{kj}\}, \end{cases} \\ \qquad \text{или} \\ \exists k \in \{i \mid i = \overline{1,m}\}:\ T_{kj}\Delta[t_k^*; t_{k+1}^*) > \delta^k, \\ \qquad \text{или} \\ \exists l \in \{j \mid j = \overline{1,\nu}\}:\ T_{il}\Delta[t_i^*; t_{i+1}^*) > \delta^i. \end{cases} \tag{22}
$$

Как указывалось выше, при контроле работоспособности и поиске отказов временна́я расстановка событий в решающем правиле теряет смысл, поэтому оно может быть представлено следующим образом:

$$
\pi_j = \pi^{r_{ij}},\ i = \overline{0,m}, \text{ если } \begin{cases} \min\limits_{f=\overline{0,m}} \{e_{fj}\} \leq y_j \leq \max\limits_{f=\overline{0,m}} \{e_{fj}\}; \\ |y_j - e_{ij}| = \min\limits_{f=\overline{0,m}} \{|y_j - e_{fj}|\} \end{cases} \tag{23}
$$

$$
\text{или} \begin{cases} y_j < \min\limits_{f=\overline{0,m}} \{e_{fj}\} \ \text{ или } \ y_j > \max\limits_{f=\overline{0,m}} \{e_{fj}\}; \\ \dfrac{1}{2(m-1)} \max\limits_{\substack{p,f=\overline{0,m} \\ p\neq f}} \{|e_{pj} - e_{fj}|\} < \begin{cases} y_j - e_{ij}, & \text{если } y_j > \max\limits_{k=\overline{0,m}} \{e_{kj}\}; \\ |y_j - e_{ij}|, & \text{если } y_j < \min\limits_{k=\overline{0,m}} \{e_{kj}\}. \end{cases} \end{cases} \tag{24}
$$

Заключение. Решающие правила (19)—(24) являются основой для построения алгоритмов определения технического состояния системы, которые могут подвергаться оптимизации по различным критериям. Выбор критерия зависит от конкретных целей исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сеньченков В. И.* Формирование множества контролируемых признаков системы на основе метрической теории и функционального анализа //Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 7. С. 3—9.
2. *Генкин М. Д.*, *Соколова А. Г.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
3. *Дмитриев А. К.*, *Мальцев П. А.* Основы теории построения и контроля сложных систем. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 192с.
4. Основы технической диагностики. Кн.1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / *В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян, В. В. Халчев*; Под ред. *П. П. Пархоменко*. М.: Энергия,1976. 464 с.
5. *Гнедов Ю. А.*, *Росенбаули О. Б.*, *Шумов Ю. А.* Проектирование систем контроля ракет. М.: Машиностроение, 1975. 224 с.
6. *Сеньченков В. И.* Процедура обучения при разработке моделей контроля технического состояния сложных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 3—8.
7. *Сеньченков В. И.*, *Абсалямов Д. Р.* Формальное описание отказов и выбор минимального множества контролируемых признаков в технических системах // Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 3. С. 36—41.
8. *Зорич В. А.* Математический анализ. М.: Наука, 1981. Ч. 1. 543 с.

Сведения об авторе

Валентин Иванович Сеньченков — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра специальных технических систем космических комплексов, Санкт-Петербург; E-mail: svi9@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
специальных технических систем
космических комплексов

Поступила в редакцию
27.09.12 г.