УДК 656.7:621.396

Коптев А.Н., Тихонов А.Н., Задорожный А.А.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ОБСЛУЖИВАНИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

При решении большинства прикладных задач технической диагностики, как правило, будут использоваться отображения множества модулей А систем бортового оборудования (СБО) воздушных судов (ВС) в себя, которые не будут существенно влиять на информацию, содержащуюся в модулях. При этом множество К отображений $k : A \to A$ образует множество преобразований подобия.

Модели конкретных систем (МКС) определяются составом модулей с и структурой их соединений, представляющих множество соединений σ.

Для построения допустимых моделей вводится набор заданных правил и ограничений Р, которые будут определять регулярность модели. Множество регулярных моделей, получаемых в рамках Р, обозначим через $b_n(P)$, где n – число модулей модели.

Тогда, используя введенные понятия и определения, множество регулярных моделей записывается в виде следующего набора из четырех элементов:

$$b(P) = (A, K, \Sigma\ \rho), \tag{1}$$

где А – множество модулей конкретной системы; К – множество отображений в модулях; Σ – множество всех допустимых множеств; σ – тип соединения; ρ – отношение согласования или отношение связи.

Объединив Σ-структуру и отношение связи ρ в правило

$$P = (\Sigma, \rho), \tag{2}$$

получаем набор из трех элементов

$$b(P) = (A, K, P). \tag{3}$$

Так как в дальнейшем рассматриваются только регулярные модели заданной мощности n, то

$$b_n(P) \subset b(P). \tag{4}$$

В дальнейших построениях тип соединения Σ представляет собой объединение множеств Σ_n, где всякое множество Σ_n есть множество графов, заданных на n-вершинах.

Таким образом, структура модели системы ВС представляет собой множество σ соединений между всеми или некоторыми связями модулей, входящих в ее состав.

Для решения задач оценки технического состояния систем ВС в работе предложены модели с двумя типами соединений: линейный тип соединения и соединение типа дерева.

Линейный тип соединения Σ состоит из линейных упорядочений, так что регулярная модель, включающая n модулей, является последовательностью арифметических операторов, состоящих из двух классов. $A^{(1)}$ состоит из операторов назначения, у которых отсутствуют входные связи $\ell_{вх}(a)=0$ и имеется одна выходная связь $\ell_{вых}'(a)=1$; признаком такого оператора служит действительное число, присваиваемое им. $A^{(2)}$ состоит из набора арифметических операторов, обладающих одной входной и одной выходной связями $\left(\ell_{вх}(a)=\ell_{вых}(a)=1\right)$, которые являются подмножествами целых чисел, представляющими соответственно области определения и значений оператора. Отношение согласования ρ должно иметь вид включения.

Так как многие задачи идентификации (распознавания состояния системы ВС) и их решения можно выразить в терминах регулярных выражений и конечных автоматов, то в рамках рассматриваемой теории представлений систем ВС для целей оценки их технического состояния используются специальные виды линейного типа соединений.

Цепочки, порожденные конечными автоматами. При этом модули принадлежат множеству А объектов, один из которых изображен на рисунке 1.

Рис. 1. Модули цепочки, порождаемой конечным автоматом

У них $\ell_{вх}(a)=\ell_{вых}(a)=1$, а показатели связи i и j обозначают состояния. Признаком модуля a является x – терминальный символ. Интерпретацией a служит переход из состояния i в состояние j при записи символа x.

Подцепочки языков конечных автоматов. В этом случае модули те же, что и в предыдущем случае, – отношение согласования ρ – "равенство", а Σ – соединение типа линейный порядок. Группа преобразований подобия K задается с помощью группы подстановок и ее расширения на множество A.

При таком определении $b(P)$ превращается в множество подцепочек, имеющих корректные переходы между состояниями, свойственные некоторому конечно-автоматному языку.

Соединения типа дерева. Описание функционирования систем ВС связано с построением выражений в исчислении высказываний, которые реализуются как модели с соединениями древовидного типа. Основными понятиями для построения таких моделей являются:

множество V_T терминальных символов, словарь или лексикон;
множество V_N *синтаксических переменных или*
нетерминальных символов, включающее,в частности, начальный символ σ;
множество R правил подстановки, каждое из которых имеет вид $V_N^* \to V^*$. (5)

Обозначение A^* означает совокупность всех конечных цепочек, образованных из элементов любого множества A. Кроме того, вводится обозначение $V = V_T \cup V_N$.

Цепочками, порождаемыми грамматикой, являются входящие в V_T^* цепочки, которые выводимы из начального символа. Важным классом грамматик непосредственных составляющих являются множество бесконтекстных грамматик. Этот класс предполагает, что все правила, входящие в R, имеют вид $a \to b$, причем $a \in V_N$.

Наиболее общей моделью реализации является автомат с магазинной памятью. Подобный автомат определяется:

множеством K состояний, начальным состоянием k_0 и
подмножеством F заключительных состояний;
множеством V_T входов;
множеством Г символов и начальным символом γ_0;
отображением δ: $K \times (V_T \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \to$
$\to$ *конечные подмножества* $K \times \Gamma^*$. (6)

Множества K, V_T и Γ предполагаются конечными и непустыми, ε обозначает пустой вектор. Автомат с магазинной памятью как общая модель модуля СБО действует следующим образом. Рассмотрим тройку (p, w, α), где $p \in K$ – состояние автомата, $w \in V_T^*$ – входная цепочка и $\alpha \in \Gamma^*$ находится на ленте магазина. Посредством сдвига $(p, xw, \alpha z) \to (q, w, \alpha\gamma)$, где $x \in V_T \cup \{\varepsilon\}$, $q \in K$, $z, \gamma \in \Gamma^*$, осуществляется операция перехода в состояние q, замена z на γ и обработка входного символа x. Эти операции осуществимы, если $\delta(p, xw, z)$ содержит (q, γ). Входная цепочка допускается автоматом, если, находясь в начальном состоянии k_0 и имея на ленте магазина γ_0, автомат может за конечное число шагов перейти в состояние F [1].

Конечный автомат задается:

$$\left.\begin{array}{l} \text{\textit{множеством} K состояний и множеством } \mathrm{K}_0 \text{ начальных состояний;} \\ \text{множеством } \mathrm{V_T} \text{ входов и множеством F заключительных} \\ \text{состояний;} \\ \text{отображением } \delta \text{ из } \mathrm{K} \times \mathrm{V_T} \text{ в подмножества множества } K. \end{array}\right| \tag{7}$$

Автомат этого типа работает следующим образом. Входная цепочка w допускается в том случае, если она является пустым словом или в множестве K существует последовательность $k_0, k_1, \ldots, k_n$ и $w = x_1 x_2 \ldots x_n$, $x_k \in V_T$, такие, что

$$\left.\begin{array}{l} k_0 \in K_0, \\ \mathrm{k_i} \in \delta(k_{i-1}, x_i), \\ \mathrm{k_n} \in F. \end{array}\right| \tag{8}$$

При решении задач диагностики систем ВС приходится иметь дело более чем с одной моделью для них, построенной в заданном пространстве модулей. При этом используются лишь два вида отображений: гомоморфизмы моделей и аннигиляции модулей.

Рассмотрено два пространства конфигураций $b(P)$ и $b'(P)$:

$$b(P) = \langle A, K, \Sigma, \rho \rangle, \quad b'(P) = \langle A', K, \Sigma, \rho \rangle, \tag{9}$$

где отображение $h: A \to A'$ задано как инвариант связи. Оно индуцирует отображение H из $b(P)$ в $b'(P)$ посредством задания $H: c' = (a_1, a_2, \ldots, a_n)$, $a_i = h(a_i)$ и структура (c) = структура (c'). Отметим, что последнее утверждение имеет смысл, поскольку h сохраняет структуру связей образующих неизменной. Индуцированное отображение H представляет собой гомоморфизм моделей. Это отображение индуцирует гомоморфизм из исходных моделей на новые, которые отображают различные виды неисправностей в отдельных модулях систем ВС.

Для исключения определенных модулей модели ВС при диагностике введем оператор аннигиляции v, который будучи применен в некоторой модели $c \in b(P)$ исключает в ней все модули, принадлежащие классу индекса α заданного множества V_0.

Поскольку полученное в результате $V(c)$ обладает корректным типом соединения в силу монотонности Σ и поскольку теперь новые соединения установлены, а все старые остаются истинными в смысле отношения связи ρ, то $V(c) = \left(a_{i_1}, a_{i_2}, \ldots, a_{i_m}\right)$, причем a_i входит в $V(c)$, если ее индекс класса $\alpha(a_i) \notin V$. Структура $V(c)$ получается из структуры c удалением всех соединений со связями образующих, аннигилированных при помощи w.

Очевидно, что $V(kc) = k\,V(c)$, и если $c_1, c_2, c_1 \sigma \ell_2 \in b(P)$, то

$$V(c_1 \sigma c_2) = V(c_1) \sigma' V(c_2), \tag{10}$$

где σ' – оператор соединений, полученный из σ устранением всех соединений, входящих и выходящих из модулей, принадлежащих $K^{\alpha}, \alpha \in V$.

Для оценки состояния СБО в предложенную теорию представлений введено понятие различимости. В зависимости от средств, применяемых, например, к диагностируемой системе, представленной моделями, c, c' и $b(P)$ не обязательно будут восприняты как различные (c – модель исправной системы, а c' – модель, отображающая неисправности). Последнее может зависеть или не зависеть от способа получения информации о моделях специалистом по диагностике и от способа обработки этой информации. Это обстоятельство формализуем посредством правила идентификации R: записываем $c \equiv c' (\operatorname{mod} R)$ или $cR\,c'$, если c и c' идентифицируются при помощи этого правила, указывающего, каким образом специалист может различать модели. Для того, чтобы некоторое отношение было правилом идентификации, введено следующее определение 1.

Отношение R между моделями из $b(P)$ называется правилом идентификации, если:

1. R является отношением эквивалентности.

2. Если $cR\,c'$, то c и c' имеют одни и те же внешние и внутренние показатели связей.

3. Если $cR\,c'$, то $(kc)R(kc')$ для любого $k \in K$.

4. Если $c = c_1\sigma c_2$ и $c' = c_1'\sigma c_2'$ регулярны и $c_1 R\,c_1'$, $c_2 R\,c_2'$, то имеем $cR\,c'$.

Классы эквивалентности $b(P)$ называются представлениями конкретных систем (ПКС) и в общем случае обозначаются через I, а множество всех ПКС – через Т:

$$T = b(P)/R = \langle A, K, \Sigma, \rho \rangle / R. \tag{11}$$

Более детально будем называть элементы из Т идеальными ПКС в противоположность деформированным, т.е. с введенными неисправностями. Класс эквивалентности I, содержащий данную модель c, будем обозначать через $I(c)$.

На множестве Т задается алгебраическая структура.

Множество Т вместе с преобразованиями подобия и комбинациями посредством σ называется алгеброй изображений, обозначается также через Т и может быть представлено пятеркой:

$$T = \langle b(P), R \rangle = \langle G, K, \Sigma, \rho, R \rangle. \tag{12}$$

Вероятностная мера Р на $b(P)$ индуцирует вероятностную меру на Т при помощи соотношения

$$P(E) = P\{c | \in b(P), I(c) \in E\} \tag{13}$$

при $E \subset T$. Для упрощения обозначения используем тот же символ Р для индуцированной меры.

В практике встречаются со многими типами правил идентификации. Упомянем некоторые простые правила.

Тривиальное правило задается при помощи равенства между моделями, а именно $cR\,c'$, тогда и только тогда, когда $c = c'$. В этом случае имеем $T = b(P)$.

Другое правило R появляется, когда регулярные модели имеют нулевую связность. Полагаем $cR\,c'$ тогда и только тогда, когда состав c равен составу c': идентификация по составу.

Рассмотрена алгебра ПКС с многоатомным типом соединения. Для любых двух модулей a_1 и a_2 соответствующие конфигурации $c_1 = \{a_1\}$ и $c_2 = \{a_2\}$ регулярны. Может случиться, что существует модель a, такая, что $a \equiv (c_1\sigma c_2)(\mathrm{mod}\,R)$. Если, кроме того, R разделяет модули, то a определена однозначно и можно записать

$$a = a_1\sigma a_2. \tag{14}$$

Введенные выше модели являются статическими представлениями состояний конкретных систем (ПСКС) и описывают по существу их статику. Однако для контроля и диагностирования сложных систем ВС необходим один важный класс ПСКП, связанный с динамикой состояний, т.е. с пространственно-временными состояниями.

В этом случае опорное пространство контроля и диагностирования систем ВС: $X = R^3 \times R^1$, где R^1 – пространство времени. Эти состояния играют особую роль при контроле и диагностировании. Для моделирования пространственно-временных состояний необходимо ввести модули и их отношения с модулями в моделях ПСКС, которые описывают динамику контролируемой или диагностируемой системы.

Модули, используемые при построении моделей динамики, будут иметь следующие свойства. Как число входящих, так и число исходящих связей модулей не ограничено, и показатели всех внутренних связей конкретного модуля равны некоторому действительному числу h. Аналогично все показатели внешних связей равные некоторому действительному числу $-h_{\text{вых}} \geq h_{\text{вх}}$. Роль индекса α модуля заключается в разделении динамических состояний на различные типы, и G будем называть репертуаром этих состояний. Если два пространства модулей построены одинаково, за исключением того, что одно из них исходит из множества модулей G , а другое – из G', то будем говорить, что второе пространство обладает большей общностью. Второе пространство моделей будет иметь и более сложную структуру.

Преобразования подобия будут включать в себя сдвиги по времени: $h \to h+t$. Воздействия на показатели связей модулей будет сводиться к тому, что они примут значения: $h_{\text{вх}}+t, h_{\text{вых}}+t$. Иногда будут использоваться также некоторые пространственные преобразования, но они не повлияют на показатели связей. Как правило, классы образующих G^{α} должны быть S-инвариантными [1].

Когда элементарные состояния комбинируются вместе (программа контроля), необходимо проследить, чтобы они выполнялись в правильном порядке. Это приводит к типу соединения Σ – "частичный порядок", и все стрелки в σ должны иметь единое направление.

По той же причине будем считать, что отношение связей $\beta_{\text{вых}}\rho\beta_{\text{вх}}$ истинно тогда и только тогда, когда $h_{\text{вх}} \leq h_{\text{вых}}$; стрелка направлена от $\beta_{\text{вых}}$ к $\beta_{\text{вх}}$: прежде чем перейти к следующему, необходимо закончить предыдущее. Отметим, что такое отношение связей S-инвариантно.

Тем самым определяется $R = \langle \Sigma, \rho \rangle$, и вместе с G и S задается множество регулярных моделей $b(P)$.

Чтобы получить алгебру ПСКС, необходимо выбрать правило идентификации R, и в данном случае имеется большая свобода выбора.

Если c и c' – две регулярные пространственно-временные модели, то каждая из них определяет полное состояние: система R^3 переводится из одного состояния в другое. Отметим, что $c \equiv c' (\operatorname{mod} R_1)$, если c и c' имеют одни и те же внешние связи и индуцируют одно и то же полное состояние среды. Это не означает, что два таких состояния идентичны, а означает только то, что их полные результаты одинаковы.

С другой стороны, если c и c' имеют одинаковые внешние связи и показатели связей представляют повсюду одно и то же состояние, то будем говорить, что $c \equiv c' (\operatorname{mod} R_2)$.

Наконец, если $c = c'$, то запишем $c \equiv c' (\operatorname{mod} R_3)$; R_3 – тривиальное правило идентификации по равенству моделей. Эти правила удовлетворяют определению 1 и задают три алгебры ПСКС: $T_k = b(P)/R_k$, $k = 1,2,3$. Очевидно, что $R_1 > R_2 > R_3$ и имеют место соответствующие гомоморфизмы.

Практика оценки результатов контроля и диагностирования связана с рассмотрением двух случаев ПСКС: либо точное соответствие модели этого представления, либо искаженные (деформированные) варианты этой модели, отражающей неисправное состояние конкретной системы в рамках предложенной формализации.

При определении вида деформации испытатель сталкивается с большими трудностями, чем те, которые связаны с теоретическими аспектами. При этом необходимо, используя доступные сведения из соответствующей предметной области, обеспечить достижение естественного компромисса: модель должна обеспечить достаточно точную аппроксимацию изучаемых явлений и допускать в то же время возможность аналитического или численного решения, чтобы иметь достаточные основания для использования в практике.

Библиографический список

1. Гренадер У. Лекции по теории образов. – М.: Мир, 1979.