УДК 27.5.14.4

# ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТНЫХ МОДУЛЕЙ

2007 А. Н. Тихонов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрено построение математических моделей на базе множества стандартных модулей исходных высказываний. На основе введенных правил строятся высказывания или функции, отображающие различные стороны бортовых комплексов оборудования воздушных судов (БКО ВС).

Широкое внедрение авиационной техники (АТ) в различные отрасли мировой экономики требует особого внимания к вопросам обеспечения эффективности и надежности ее эксплуатации. Повсеместно распространенные авиационные технологии по перевозкам пассажиров и грузов позволяют связывать или объединять корпоративные и производственные коммуникации, что дает возможность авиакомпаниям и службам технического обслуживания и ремонта (ТОиР) устранить разрыв между корпоративными и критически важными промышленными системами, производителями уникального оборудования и другой продукции для авиационной техники. Эффективность использования АТ в этих условиях повышения надежности ее функционирования является основной областью применения технической диагностики. Теория, методы и средства повышения надежности ВС как основного элемента транспортной системы используются при разработке и технической реализации диагностических устройств обеспечения ТОиР и создании на их основе диагностических систем управления техническим состоянием ВС [1, 2].

Таким образом, техническую диагностику (теории, методы и средства) как основу повышения надежности и эффективности эксплуатации ВС, можно определить как совокупность идей, связанных с организацией оптимальных процедур контроля, диагностирования и оценки технического состояния систем ВС и включающих постановку проблем и задач, методов и средств их, а также методы и средства технической реализации контроля и диагностирования для оценки текущего состояния и трендов параметров этой оценки.

Основным предметом исследований технической диагностики являются системы проверки технического состояния и диагностические системы управления (рисунок 1).

Анализ этих направлений показывает, что для создания комплексных систем ТОиР требуются исследования всех составляющих классификации.

Работ по диагностическим системам управления сравнительно мало, и поэтому проводить их классификацию преждевременно.

Работы по системам контроля технического состояния удобно разделить на четыре группы: исследование объектов контроля и диагностики; теория, методы и алгоритмы построения программ контроля и диагностики; способы и средства контроля и диагностики; исследование свойств и характеристик систем в целом. Эти группы охватывают основные задачи технической диагностики, возникающие в связи с организацией процессов оценки технического состояния сложных систем ВС и, прежде всего, требуют разработки теории для представления этих систем как объектов контроля и диагностирования, на основе реализации которых формируются параметры этой оценки.

Исследование систем ВС как объектов контроля и диагностики охватывает изучение свойств и характеристик реальных физических объектов и методы построения их математических моделей, которые составляют основу формальных методов построения про-

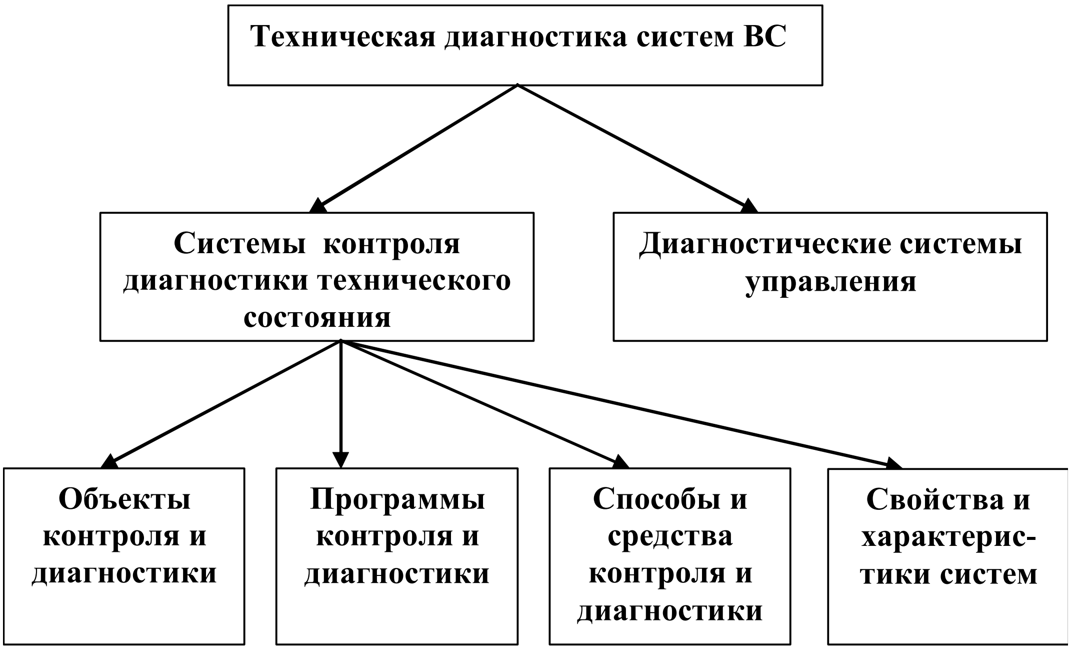


*Рис. 1. Классификация направлений исследования*

грамм контроля технического состояния объектов для оценки их состояния. Выделим следующие группы задач, которые должны решаться в процессе разработки и исследования математических моделей объектов контроля и диагностики: классификация моделей, разработка математических моделей неисправностей, разработка методов и алгоритмов анализа моделей, разработка методов и алгоритмов синтеза структур объектов контроля и диагностики с учетом требований технической диагностики.

Недостаточно исследованными являются задачи построения моделей, учитывающих способ действия дискретного объекта (синхронный или асинхронный), переходные процессы во время изменения значений входных, внутренних и выходных переменных, а также моделей блочного типа, в которых блоки являются конструктивными или функциональными компонентами объекта, что характерно для систем БКО ВС.

Для построения математической модели систем ВС в качестве исходного положения примем, что для представления конкретных систем будем использовать модули – исходные высказывания (высказывания, не разложимые в рамках рассматриваемой с определенных позиций системы на другие более простые высказывания). Таким образом, модели систем ВС строятся из множества стандартных блоков – модулей этой системы.

В зависимости от типа и детализации модели могут быть использованы модули – высказывания или абстрактные символы $A$, $B$, $C$, …, переменными значениями которых являются истинность или ложность, из которых с помощью операции соединения на основе введенных определенных правил строятся более сложные высказывания или функции. Все модули делятся на абстрактные или конкретные. В целом множество всех модулей $A$ состоит из непересекающихся классов модулей $A^a$, $A^a \subset A$, где $a$ – общий индекс, индекс класса модулей

$$A = \bigcup A^a, \qquad (1)$$

$A^a$ – непересекающиеся классы.

Интерпретация этого разбиения состоит в том, что модули, сходные качественно, будут относиться к одному классу, а их свойства выражаются через признаки и связи. В первом случае модулю ставится в соответствие признак $m = m(a)$, причем в качестве значений признака могут выступать целые, действительные числа, векторы и т. д. Одной из составляющих признака служит индекс класса модуля $a$ и другие составляющие, представляющие более специфическую информацию.

Второй тип свойств охватывает связи. Определенному модулю $a$ соответствует число связей $\mathbf{l}(a)$, которое в конкретном случае является неотрицательным числом, равным числу соединений, представляющих сумму входных и выходных связей.

При решении большинства прикладных задач технической диагностики, как правило, используются отображения множества модулей $A$ в себя, которые не будут существенно влиять на информацию, содержащуюся в модулях. При этом множество $K$ отображений $k : A \to A$ образует множество преобразований подобия.

Одновременно, считая модули неделимыми объектами, предполагается их разбиение на более мелкие единицы. Будем определять модули, как правило, в некоторой среде – носителе информации. В этом случае модуль имеет конкретную интерпретацию. Иногда для простейшего случая задание модуля может быть осуществлено в абстрактном виде без учета среды, т. е. модуль обозначается абстрактным символом. В качестве общего многомерного аналога модуля введем универсальные операторы, где всякий модуль есть оператор с $n$ (переменными) входами $x_1, x_2, \ldots, x_n$ и $m$ (переменными) выходами $y_1, y_2, \ldots, y_m$.

Область значений всякого $x_i$ есть некоторое пространство $X_i$, область значений всякого $y_i$ – некоторое пространство $Y_i$. В частности, существует оператор назначения, не имеющий входов. Преобразования подобия воздействуют только на операторы назначения, оставляя все остальные модули без изменения.

Предложенный теоретический подход для моделирования систем ВС предусматривает структурное объединение стандартных блоков – модулей в модели конкретных систем ВС.

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

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

Используя введенные понятия и определения, множество регулярных моделей запишем в виде набора из четырех элементов:

$$b(P) = (A, K, \Sigma, r), \tag{2}$$

где $A$ – множество модулей конкретной системы, $K$ – множество отображений в модулях, $\Sigma$ – множество всех допустимых множеств, $s$ – тип соединения, $r$ – отношение согласования или отношение связи.

Объединив $\Sigma$-структуру и отношение связи $r$ в правило

$$P = (\Sigma, r), \tag{3}$$

получаем набор из трех элементов

$$b(P) = (A, K, P). \tag{4}$$

Поскольку в дальнейшем рассматриваются только регулярные модели заданной мощности $n$, то

$$b_n(P) \subset b(P). \tag{5}$$

В дальнейших построениях тип соединения $\Sigma$ представляет собой объединение множеств $\Sigma_n$, где всякое множество $\Sigma_n$ есть множество графов, заданных на $n$-вершинах.

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

Для решения задач оценки технического состояния систем ВС в работе использованы модели с линейным типом соединения и соединением типа дерева.

**Линейный тип соединения** S 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 $\mathbf{l}_{вх}(a) = 0$ и имеется одна выходная связь $\mathbf{l}'_{вых}(a) = 1$. Признаком такого оператора служит действительное число, присваиваемое им. $A^{(2)}$ состоит из набора арифметических операторов, обладающих одной входной и одной выходной связями ($\mathbf{l}_{вх}(a) = \mathbf{l}_{вых}(a) = 1$), которые являются подмножествами целых чисел, представляющими области определения и значений оператора соответственно. Отношение согласования $r$ 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 рассматриваемого подхода представлений систем ВС для целей оценки их технического состояния используются специальные виды линейного типа соединений.

Для цепочки, порожденной конечными автоматами, модули принадлежат множеству $A$ объектов (рис. 2).

Для них $\mathbf{l}_{вх}(a) = \mathbf{l}_{вых}(a) = 1$, 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 $x$.

Для подцепочки языков конечных автоматов модули те же, что и в предыдущем случае, – отношение согласования $r$ – «равенство», а $\Sigma$ – 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.

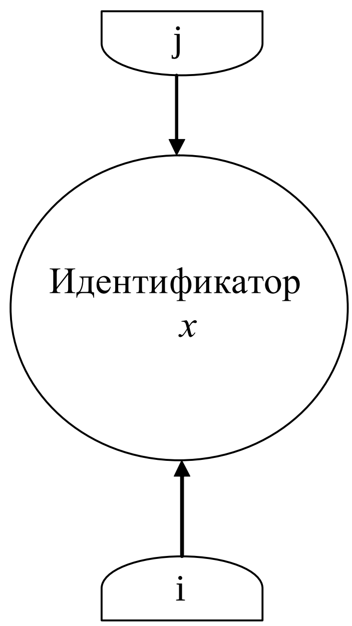


*Рис. 2. Модули цепочки, порождаемой конечным автоматом*

**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:

$$\left.\begin{array}{l}\text{множество } V_T \text{ терминальных символов,}\\ \text{словарь или лексикон;}\\ \text{множество } V_N \text{ синтаксических}\\ \text{переменных или нетерминальных}\\ \text{символов, включающее, в частности,}\\ \text{начальный символ } s\,;\\ \text{множество } R \text{ правил подстановки,}\\ \text{каждое из которых имеет вид } V_N^* \to V^*.\end{array}\right\} \quad (6)$$

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

В лингвистике множества $V$ и $R$ всегда предполагаются конечными, с тем чтобы добиться бесконечного конечными средствами. В рассматриваемых задачах конечность имеет второстепенное значение, однако она должна предполагаться.

Введем следующее применение правил. Для двух цепочек $a$ и $b$, принадлежащих $V^*$, можно записать $a \to b$, если существуют цепочки $a$, $b$, $x$, $y$, такие, что $a = x, a, y$ и $b = x, b, y$ и отношение $a \to b$ принадлежит множеству правил $R$. Дальнейшее ее расширение отношения «$\to$» позволяет утверждать, что $a \to b$, если $a = b$ или если существует некоторое $n$ и цепочки $z_0, z_1, z_2, \ldots, z_n$, такие, что $z_0 = a$, $z_n = b$ и $z_i \to z_{i+1}$ при $i$=0, 1, 2, …, $n$–1. Последовательность $z_0, z_1, \ldots, z_n$ называется выводом $b$.

Цепочками, порождаемыми грамматикой, являются входящие в $V_T^*$ цепочки, которые выводимы из начального символа. Важным классом грамматик непосредственных составляющих являются множества 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, который определяется:

$$\left.\begin{array}{l}\text{множеством } K \text{ состояний,}\\ \text{начальным состоянием } k_0\\ \text{и подмножеством } F \text{ заключительных состояний;}\\ \text{множеством входов } V_T\text{;}\\ \text{множеством } \Gamma \text{ символов и начальным символом } g_0\text{;}\\ \text{отображением } d: K\times(V_T \cup \{e\})\times\Gamma \to\\ \to \text{ конечные подмножества } K\times\Gamma^*.\end{array}\right\}\quad(7)$$

Множества $K$, $V_T$ и $\Gamma$ предполагаются конечными и непустыми, $e$ обозначает пустой вектор. Автомат с магазинной памятью действует следующим образом. Рассмотрим тройку $(p, w, a)$, где $p\in K$ – состояние автомата, $w\in V_T^*$ – входная цепочка и $a\in\Gamma^*$ находится на ленте магазина.

Посредством сдвига $(p, xw, az) \to$ $\to (q, w, ag)$, где $x\in V_T \cup \{e\}$, $q\in K$; $z, \gamma\in\Gamma^*$, осуществляется операция перехода в состояние $q$, замена $z$ на $g$ и обработка входного символа $x$. Эти операции осуществимы, если $d\,(p, xw, z)$ содержит $(q, g)$. Входная цепочка допускается автоматом, если, находясь в начальном состоянии $k_0$ и имея на ленте магазина $g_0$, автомат может за конечное число шагов перейти в состояние $F$.

Подмножества бесконтекстных грамматик образуют правосторонние линейные грамматики, у которых все правила, входящие в $R$, имеют вид $x\to a$ или $x\to ay$, где $a\in V_T$ и $y\in V_N$.

Правосторонние линейные грамматики эквивалентны конечным автоматам. Поэтому в данном случае можно употреблять также понятия автоматных грамматик и соответствующих языков. Конечный автомат задается:

$$\left.\begin{array}{l}\text{множеством } K \text{ состояний}\\ \text{и множеством } K_0 \text{ начальных состояний;}\\ \text{множеством } V_T \text{ входов и множеством}\\ F \text{ заключительных состояний;}\\ \text{отображением } d \text{ из } K\times V_T\\ \text{в подмножества множества } K.\end{array}\right\}\quad(8)$$

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 $w = x_1x_2 \ldots x_n$, $x_k\in V_T$, такие, что

$$\left.\begin{array}{l}k_0 \in K_0,\\ k_i \in \delta(k_{i-1}, x_i),\\ k_n \in F.\end{array}\right\}\qquad(9)$$

При решении задач диагностики систем ВС приходится иметь дело более чем с одной моделью, построенной в заданном пространстве модулей, и поэтому необходимо изучать возможные между ними отображения. При этом используются два вида отображений: гомоморфизмы моделей и аннигиляции модулей.

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

$$b(P) = \langle A, K, \Sigma, r\rangle,\ b'(P) = \langle A', K, \Sigma, r\rangle,\qquad(10)$$

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 $a$ заданного множества $V_0$.

Поскольку полученное в результате $V(c)$ обладает корректным типом соединения в силу монотонности $\Sigma$ и поскольку теперь новые соединения установлены, а все старые остаются истинными в смысле отношения связи $r$, то $V(c) = (a_{i_1}, a_{i_2}, \ldots, a_{i_m})$, причем $a_i$ входит в $V(c)$, если ее индекс класса $a(a_i)\notin V_0$.

Структура $V(c)$ получается из структуры с удалением всех соединений со связями об-разующих, аннигилированных при помощи $w$.

Очевидно, что $V(kc) = k\,V(c)$, и если $c_1$, $c_2$, $c_1 s\,\mathbf{l}_2 \in b(P)$, то

$$V(c_1 s\ c_2) = V(c_1)\,s'\,V(c_2), \tag{11}$$

где $s'$ – оператор соединений, полученный из $s$ устранением всех соединений, входящих и выходящих из модулей, принадлежащих $K^a$, $a \in V$.

Для целей контроля и диагностики состояния системы ВС введем понятие различимости. В зависимости от средств, применяемых, например, к диагностируемой системе, представленной моделями $c$ и $c'$ и $b(P)$, они не обязательно будут восприняты как различные. Здесь $c$ – модель исправной системы, а $c'$ – модель, отображающая неисправности. Последнее может зависеть или не зависеть от способа получения информации о моделях исследователем и от способа обработки этой информации. Это обстоятельство формализуем посредством правила идентификации $R$. Записываем $c \equiv c' \pmod{R}$ или $cR\,c'$, если $c$ и $c'$ идентифицируются при помощи этого правила, указывающего, каким образом исследователь может различать модели. Для того, чтобы некоторое отношение было правилом идентификации, должно выполняться 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 $c = c_1 s c_2$ и $c' = c'_1 s\ c'_2$ 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). В общем случае они обозначаются через $I$, а множество всех ПКС – через $T$:

$$T = b(P)/\,R = \langle A, K, \Sigma, r \rangle \,/\, R. \tag{12}$$

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

На множестве $T$ задается алгебраическая структура.

Множество $T$ вместе с преобразованиями подобия и комбинациями посредством $s$ называется алгеброй изображений, обозначается также через $T$ и может быть представлено пятеркой

$$T = \langle\, b(P), R \,\rangle = \langle G, K, \Sigma, r, R \rangle. \tag{13}$$

Вероятностная мера $P$ на $b(R)$ индуцирует вероятностную меру на $\Gamma$ при помощи соотношения

$$P\,(E) = P\{c \mid\, \in b(R), I\,(c) \in E\,\} \tag{14}$$

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

На практике используются различные правила идентификации. Упомянем некоторые простые правила.

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

Другое правило $R$ появляется тогда, когда регулярные модели имеют нулевую связность. Полагаем $cR\,c'$ тогда и только тогда, когда состав $(c)$ равен составу $(c')$, так называемая 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 $a \equiv (c_1 s c_2) \pmod{R}$. Если, кроме того, $R$ разделяет модули, то $a$ определена однозначно и можно записать

$$a = a_1 s a_2. \tag{15}$$

Таким способом пары модулей могут стягиваться в один модуль, и эту процедуру можно повторять. В качестве следствия имеем следующее. Если $a_1$ и $a_2$ соединены в модели $c$ посредством $s$ и $a_1 s a_2 = a$, то $c$ является $R$–эквивалентом модели $c'$, полученной с заменой моделей модулей $a_1 s a_2$ на $a$.

Таким образом, создается возможность приведения моделей к виду, который позволяет диагностировать состояния узлов и агрегатов, состоящих из множества модулей.

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

В этом случае опорное пространство контроля и диагностирования систем ВС имеет вид: $X = R^3 \times R^1$, 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 равны некоторому действительному числу $-h_{вых} \geq h_{вх}$. Роль индекса $a$ модуля заключается в разделении динамических состояний на различные типы. $G$ 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 $h_{вх} + t$, $h_{вых} + t$. Иногда будут использоваться также некоторые пространственные преобразования, но они не повлияют на показатели связей. Как правило, классы образующих $G^a$ должны быть $S$-инвариантными.

Когда элементарные состояния комбинируются вместе (программа контроля), то необходимо проследить, чтобы они выполнялись в правильном порядке. Это приводит к типу соединения $\Sigma$ – «частичный порядок», и все стрелки в $s$ должны иметь единое направление.

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

Тем самым определяется $R = \langle \Sigma, r \rangle$, 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 располагаем большей свободой выбора.

Рассмотрены три правила.

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 $c \equiv c' \pmod{R_1}$, 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 только означает 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 $c \equiv c' \pmod{R_2}$.

Наконец, если $c = c'$, то запишем $c \equiv c' \pmod{R_3}$; $R_3$ – 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.

Для изучения более сложных и часто встречающихся пространственно-временных моделей удобно ввести макрообразующие.

При этом исходим из определенного репертуара состояний, комбинируем их и выявляем реакцию среды, объединяющей модули системы контроля и модули контролируемой и диагностируемой системы ВС.

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.

В результате имеем дело с фундаментальной проблемой – каким образом возникают подобные деформации. Полный синтез модели с неисправностями требует определения механизма деформации, что необходимо на стадии анализа результатов контроля и диагностирования.

Для этих целей предложен вариант формализации на основе предложенных представлений.

Обозначим через $d$ отображение алгебры ПСКС $T$ на множество $T^D$ ПСКС, которые могут наблюдаться.

Элементы

$$I^D \in T^D \tag{16}$$

будем называть деформированными ПСКС.

Обычно число преобразований $d$ велико и заранее неизвестно, какое именно будет действовать. Символ $D$ используется для обозначения множества всех преобразований.

Рассмотрим природу возникновения деформированных ПСКС. Простейшим является случай $T^D \subset T$, т. е. когда модели относятся к тому же типу, что и идеальные модели алгебры ПСКС. В этом случае будем говорить об автоморфных деформациях, а $d$ отображает алгебру ПСКС в самое себя.

В противном случае при гетероморфных деформациях множество $T^D$ может включать целый ряд различных типов. Может оказаться, что $T^D$ также обладает структурой алгебры ПСКС, хотя и отличной от $I$. Следует подчеркнуть, что даже и в таком случае структуры эти могут резко отличаться и, следовательно, между $I$ и $I^D$ существует принципиальное различие. Довольно часто на практике имеет место случай $T \subset T^D$, при котором идеальные (недеформированные) ПСКС являются частными случаями деформированных. Как правило, $d$ разрушает структуру, и поэтому $T^D$ будет менее структурированной, чем $T$.

В случае, когда $T^D \subset T$, область определения $d$ часто будет расширяться от $T$ до $T^D$, причем область значений будет оставаться равной $T^D$. Можно многократно применять последовательность $d$ и обобщить $D$ до полугруппы преобразований.

Во многих случаях можно расширять область определения преобразований $k$ с $T$ до $T^D$. Все сказанное можно объединить в виде условия, которое в большинстве случаев будет выполняться. Будем предполагать, что $k$ образует группу.

Всегда при контроле и диагностике в основе деформации (нарушения функций исследуемой системы) лежит некий физический механизм, реализуемый в условиях эксплуатации ВС.

При определении вида деформации исследователь сталкивается с большими трудностями, чем те, которые связаны с теоретическими аспектами. При этом необходимо, используя доступные сведения из соответствующей предметной области, обеспечить компромисс: модель должна обеспечить достаточно точную аппроксимацию изучаемых явлений и одновременно допускать возможность аналитического или численного решения.

Сформулируем несколько общих принципов, которые могут оказаться полезными при построении модели деформаций.

Следует попытаться разложить $D$, которое может быть довольно сложным пространством, на простые факторы $D = D_1 \times D_2 \times \ldots$ Произведение может быть конечным, счетным или несчетным. Иногда такое разбиение задается непосредственно, как например в случае, когда деформации сводятся к топологическому преобразованию опорного пространства, за которым следует деформация маски. Некоторую пользу можно извлечь также из того способа, при помощи которого алгебры ПКС построены из элементарных объектов. Если рассматриваются ПКС, модели которых включают $n$ модулей и все они идентифицируемы, то можно воспользоваться представлением

$$I^D = dI = (d_1 a_1, d_2 a_2, \ldots, d_n a_n),$$

$$I = (a_1, a_2, \ldots, a_n), \tag{17}$$

предполагая, что свойства факторов $d_v$ окажутся достаточно удобными. Этот метод можно использовать только в том случае, когда модули однозначно определяются ПКС. Поэтому можно воспользоваться соответствующим разбиением в применении к каноническим моделям, модули которых определены в рассматриваемой алгебре ПКС.

После разделения $D$ на достаточно простые факторы необходимо решить, какую вероятностную меру, связанную с различными видами неисправностей, следует ввести на $D$. При этом существенным моментом является выбор такого способа факторизации деформаций, при котором отдельные факторы $d$ оказываются независимыми друг от друга. Невозможно полностью задать $P$, не располагая эмпирической информацией. Поэтому для того, чтобы получить оценки с удовлетворительной точностью, аксиоматическая модель должна быть в достаточной степени структурирована. Это является критическим моментом для определения $P$, и поэтому требуется такое понимание механизма деформации, которое исключит неадекватное представление данных при последующем анализе. Если действительно удается провести разбиение таким образом, что факторы в вероятностном смысле независимы, остается еще решить задачу определения на них безусловных распределений.

В качестве примера рассмотрены идеальные образующие, порождаемые механизмом типа $L_o x = 0$, где можно рассматривать $L_o$ как разностный оператор, а деформированные образующие определяются выражением $L_o x = e$. Первое, что следует предположить – это независимость значений $e$ (при различных аргументах). Если это не может быть принято в качестве адекватной аппроксимации, то необходимо попытаться устранить зависимость посредством работы не с $x$, а с некоторым ее преобразованием (например, линейным). Другими словами, можно выбирать модель таким образом, чтобы деформации принимали простую вероятностную форму. Отметим в качестве еще одного примера, что при работе с образами-соответствиями и дискретным опорным пространством $X$ можно промоделировать $P$, исходя из предположения о том, что различные точки $X$ отображаются на опорное пространство $T^D$ независимо и что соответствующие распределения различны.

Для того, чтобы сузить выбор безусловных распределений, рассмотрим роль преобразований подобия. Если $D$ выбрано удачно, то можно рассчитывать, что $P$ будет обладать соответствующей инвариантностью. Итак, если $I$ и $I'$ – подобные идеальные ПСКС и $I' = kI$, то в первую очередь следует выяснить, не обладают ли $dI$ и $dI' = dkI$ одним и тем же распределением вероятностей. Можно также использовать другой подход: рассмотреть модель, регулирующую равенство распределений $kdI$ и $dkI$, что приведет к ковариантности по вероятности.

С помощью этих методов можно определить аналитическую форму $P$, а оценки свободных параметров получить эмпирически.

Механизмы деформации классифицируем на основе двух критериев: уровня и типа.

Под уровнем механизма деформации будем подразумевать этап синтеза образов ПСКС, на котором определяется $D$. Высший уровень ПСКС соответствует случаю, когда $D$ задается непосредственно для каждого $I$ независимо от того, каким способом идеальное ПСКС синтезировано из моделей, правил, ограничений, модулей и признаков. Низший уровень соответствует случаю, когда $D$ задается на языке модулей, из которых строится модель в $I$. Промежуточный уровень соответствует случаю задания $D$ на $b(P)$.

Предложенный подход дает теоретическую основу моделирования сложных взаимосвязей компонентов бортовых комплексов оборудования воздушных судов.

**Список литературы**

1. Александровская Д. Н., Круглов В. И. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. – М.: ЛОГОС, 2003.

2. Климов В., Борисов В. Функциональные системы летательных аппаратов. – М.: Московский рабочий, 2003.