

Цивоваров Г.А., Дьячков С.А., Задорожный А.А.

## КОНЕЧНОАВТОМАТНЫЕ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Основная цель контроля и диагностики состояния систем воздушных судов (ВС) состоит в оценке состояния различных, в первую очередь, сложных систем бортовых комплексов оборудования (БКО). Решения задач, возникающих при реализации этой цели, существенно связаны с построением математических моделей систем узлов и агрегатов БКО.

Условием построения математических моделей объектов контроля и диагностирования (ОКД) является задание моделей неисправностей. Когда моделью объекта проверки является структурный конечный автомат или двузначная логическая модель, рассматривают логические неисправности, причем чаще ограничиваются неисправностями вида: константа 0 или константа 1, что является частным случаем моделирования состояния ОКД.

Наиболее общим представлением систем БКО является абстрактный автомат. Для него общепринятыми неисправностями являются искажения переходов между состояниями и искажения значений выходов, т.е. деформации ОКД. В многозначных логических моделях, получаемых по системам уравнений или по совокупностям причинно-следственных связей, и в аналоговых моделях неисправности моделируются как изменения значений соответствующих параметров [1].

При выборе моделей неисправностей конкретных систем БКО следует иметь в виду, что для ремонта ОКД существенно иметь однозначное соответствие между моделью неисправности и ее физической интерпретацией.

Для решения этих вопросов введены определения и предположения.

В большей своей части системы БКО являются дискретными (цифро-аналоговыми) системами и представляют собой совокупность взаимосвязанных модулей, которые, как правило, обрабатывают сигналы конечной величины.

Наиболее общей моделью реализации абстрактных автоматов является последовательностная схема, для которой справедливо следующее соотношение:

$$Z = A(X; S). \quad (1)$$

Ее выходные величины  $Z$  в данный момент времени зависят не только от сигналов, поданных на входы  $X$ , но также и от сигналов, подававшихся ранее. История

предшествующих сигналов просуммирована в состоянии  $S$  схемы,  $A$  – векторная функция от векторных аргументов.

Как правило, в практике синтеза и анализа различают два в корне различных типа последовательностных схем: синхронные и асинхронные. Для синхронных схем первичные выходные сигналы  $Z$  и выходные сигналы обратной связи (ОС)  $Y$  можно описать булевыми функциями от первичных входных сигналов  $X$  и входных сигналов обратной связи  $y$ :

$$\begin{aligned} Z_i &= A_i(X; y), \\ Y_i &= B_i(X; y), \\ y_{i+1} &= Y_i. \end{aligned} \quad (2)$$

Эта модель поведения синхронных схем предложена Мили. Другая общая модель для синхронных схем дана Муром:

$$\begin{aligned} Z_i &= A_i(y), \\ Y_i &= B_i(X; y), \\ y_{i+1} &= Y_i. \end{aligned} \quad (3)$$

$A$  и  $B$  – векторные функции от векторных аргументов. В обоих случаях индексы  $i$  и  $i+1$  показывают, что поведение схемы привязано к определенным моментам времени, поскольку упомянутые величины определены только в дискретные моменты времени:  $t = 0, 1, 2, \dots$ . Иначе говоря, первичные выходные сигналы и сигналы ОС в настоящий момент времени  $t$  определены первичными входными сигналами и сигналами ОС в момент  $t$ . Текущий вектор ОС  $Y_t$ , в свою очередь, после некоторой задержки в элементах памяти станет входным вектором обратной связи  $y_{i+1}$  для следующего момента времени  $t+1$ .

Сравнение (2) и (3) показывает, что входной вектор ОС  $Y$  представляет состояние  $S$  схемы, поэтому и на практике  $y$  и  $Y$  часто называют текущим и следующим состоянием схемы. Отметим, что модели предполагают сосредоточение всех внутренних задержек в линиях ОС и мгновенную реакцию комбинационной части схемы на входные сигналы  $X$  и  $y$ . Такая модель правомерна и для схем, реагирующих не мгновенно, при условии, что задержка в цепи ОС больше, чем наихудшее сочетание задержек в комбинационной части. Структурная схема, удовлетворяющая любой синхронной модели, представлена на рисунке 1.

Поведение асинхронных схем не синхронизировано и, следовательно, внешних импульсов синхронизации нет. Предполагается, что каждая линия ОС имеет конечную положительную задержку (рисунок 2).



Рис. 1. Структурная схема синхронной последовательной схемы



Рис. 2. Структурная схема асинхронной последовательной схемы

Для правильной работы асинхронной схемы, в большинстве случаев представляющей функционирование систем БКО, необходимо выполнение следующих условий.

1. Комбинационная логика свободна от помех, и переходные процессы заканчиваются прежде, чем возникнет следующее изменение на входе.
2. Последовательные наборы входных сигналов должны быть смежными (отличаются точно на один бит один от другого).
3. Не должны возникать колебания. Таким образом, приложение любого правильного набора входных сигналов к схеме, находящейся в любом устойчивом состоянии ( $y = Y$ ), должно привести ее также в некоторое устойчивое состояние. Следовательно, это условие обеспечивает существование следующего устойчивого состояния.

4. Возможно возникновение состязания (наличие в данный момент времени двух или более нестабильных линий обратной связи. Линия  $j$  обратной связи неустойчива, если  $u_j \neq Y_j$ ), однако оно не должно быть критичным. Достижимое в конечном итоге устойчивое состояние должно быть одним и тем же, независимо от очередности, с которой возбужденные линии ОС пришли в устойчивое состояние. Физически это означает, что следующее устойчивое состояние инвариантно относительно произвольных вариаций подмножества задержек  $\{\delta_j\}$ . Это условие, следовательно, гарантирует однозначность следующего устойчивого состояния.

Неисправность с общих позиций или, в частности, цифровой схемы – это физический дефект одного или нескольких компонентов модулей, способных вызвать неправильную работу схемы. Неисправности можно подразделить на несколько категорий в соответствии с их физическими причинами. Старение или производственные дефекты могут вызвать постепенное ухудшение работы компонента, приводя к появлению отказов (постоянных ошибок). Критическое взаиморасположение сигналов во времени, помехи и наложение сигналов на фронтах могут привести к перемежающимся неисправностям (сбоям). В этом случае ошибка существует в одни интервалы времени и отсутствует в другие. Многие ошибки, которые вначале носят перемежающийся характер, в конце концов становятся постоянными. Это позволяет сделать заключение о том, что, раз возникнув, неисправность существует постоянно до тех пор, пока не произведен ремонт.

Для того, чтобы гарантировать правильность работы системы, надо располагать возможностью обнаруживать неисправность в тот момент, когда она появилась. Необходимо также располагать возможностью указывать место неисправности с достаточной точностью, чтобы можно было произвести ремонт. Обе задачи решаются при помощи тестов. Тест  $T_k$  есть последовательность входных векторов  $X_1, \dots, X_k$ , которые должны быть приложены к схеме. Длина теста есть целое число  $s$ . Если необходимо несколько тестов, то все они образуют набор тестов, или последовательность тестов. (Последнее название используется в случае, когда тесты должны применяться в определенном порядке). Схема или система, подверженная действию теста, называется объектом.

Существует два класса тестов: обнаруживающие и диагностирующие неисправность. Тест, обнаруживающий неисправность, имеет два возможных исхода:

- 1) объект не содержит ни одной неисправности заданного класса,

2) объект содержит несколько (количество не известно) неисправностей заданного класса.

Рассмотрим тест длиной 1:

$$T_k = \{X_{k1}, Z_{k1}\}.$$

Это выражение означает, что приложение входного вектора  $X_{k1}$  к исправному объекту порождает выходной вектор  $Z_{k1}$ . Теперь предположим, что из-за некоторой неисправности  $f$  выходной вектор переходит в  $W_{k1}$ :

$$W_{k1} \neq Z_{k1}.$$

В этом случае говорят, что тест  $T_k$  обнаруживает неисправность  $f$ , так как можно определить ее наличие или отсутствие, используя  $T_k$ . Если объект представляет собой последовательностную схему, часто оказывается необходимым использовать тесты длиной 1. Здесь, если

$$T_k = \{X_{k1}, \dots, X_{kz}; Z_{k1}, \dots, Z_{kz}\},$$

тест  $T_k$  обнаружит неисправность  $f$  при условии, что последовательность выходных векторов при наличии  $f$  отличается в какой-либо точке от  $Z_{k1}, \dots, Z_{kz}$ .

Все тесты классифицируются на обнаруживающие и диагностические.

Набор тестов, обнаруживающий для некоторого объекта контроля неисправности заданного класса, называют полным тестом для данного объекта.

Таким образом, тесты, обнаруживающие неисправность, определяют только, исправна или неисправна система. Они не определяют тип и место неисправности. Тест, задающий такую информацию, называют диагностическим тестом. Диагностической разрешающей способностью теста называют объем даваемой им информации. Таким образом, тест, обнаруживающий неисправность, является диагностическим тестом с диагностической разрешающей способностью, равной нулю.

Если объект построен на основе дискретных элементов, то может возникнуть необходимость идентифицировать неисправность до уровня отдельного модуля блока или узла.

В другом предельном случае, когда весь ОКД представляет собой сменный конструктивный блок, была бы достаточной нулевая диагностическая разрешающая способность (только тест, обнаруживающий неисправность) и ремонт достигался бы просто заменой целого объекта.

Техническое обслуживание систем БКО отечественных ВС в значительной мере базируется на квалификации и мастерстве обслуживающего персонала с минимальным

набором специальной испытательной аппаратуры. Рост сложности БКО привел к тому, что специальная испытательная аппаратура в этих условиях стала терять свою ключевую роль. Основная тяжесть все больше и больше ложится на диагностические программы, реализуемые в автоматизированных комплексах контроля и диагностирования, позволяющих использовать тесты для проверки аппаратуры систем БКО. Эти комплексы весьма быстро обнаруживают и диагностируют неисправность с очень большой степенью достоверности, что позволяет иметь возможность обрабатывать эту информацию для упреждающего ремонта с минимальными затратами. Тем не менее в последнее время вводятся новые ограничения на затраты времени на техническое обслуживание, которые требуют разработки современных методов диагностики и их реализации в рамках новых организационных структур.

В качестве общей организации контроля и диагностики используется схема, приведенная на рисунке 3.

Тест-программы первоначально составляются формально или интуитивно по информации об ОКД и затем загружаются в тестер, который должен: 1) уметь подавать входные воздействия (стимулы) на объект; 2) уметь наблюдать реакции объекта на эти стимулы; 3) принимать решения, основанные на наблюдаемых реакциях, относительно того, какие стимулы следует использовать на следующем шаге. Тестер часто представляет собой ЭВМ и ряд сопряженных устройств.

Эта модель процесса испытаний является довольно общей. Тогда под понятие ОКД подходит одна из следующих подсистем и систем БКО: система электроснабжения, распределительные устройства, подсистема генерирования и т.п.

Различия между ОКД и тестером начинают стираться, когда большинство функций тестера перемещаются в сам объект, а человек-оператор получает информацию о неисправности в готовом виде (результаты теста).

Таким образом, "мысленный экспериментатор" – это оператор – человек, который пытается изучить поведение "черного ящика", прикладывая последовательности входных стимулов и наблюдая выходные реакции.

Рассмотрим два типа мысленных экспериментов: простые (рисунок 4) и кратные (рисунок 5).

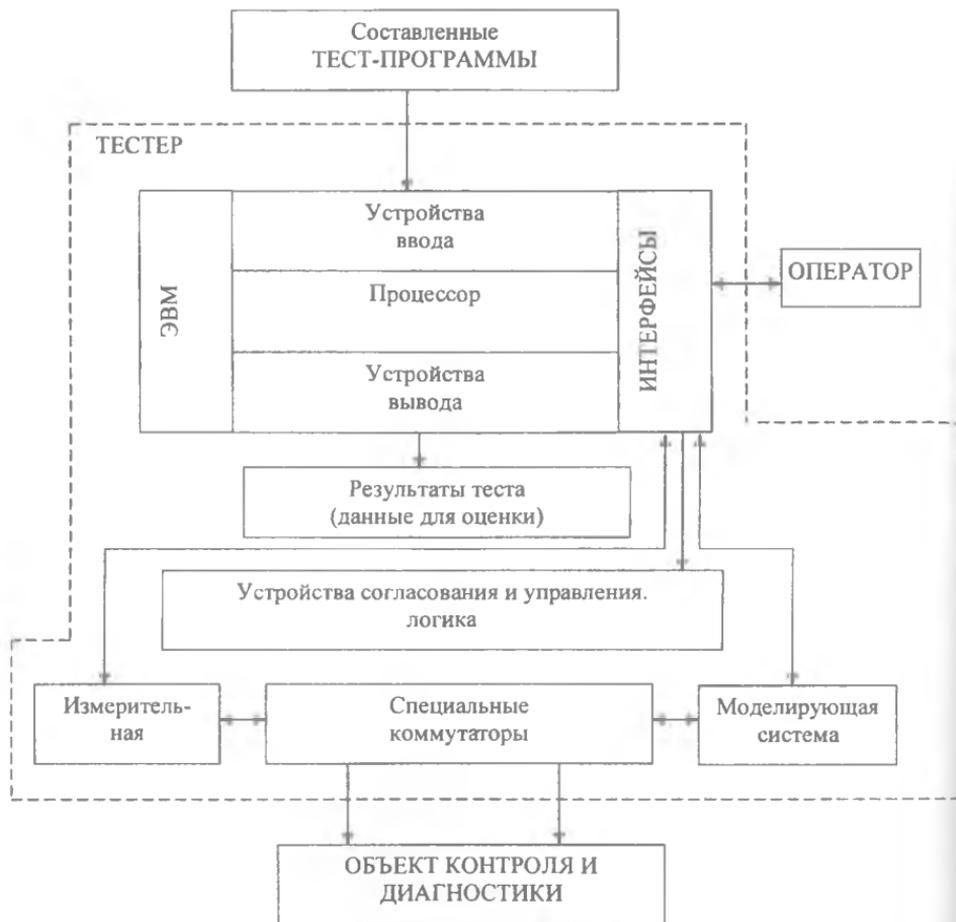


Рис. 3. Общая схема организации контроля и диагностики

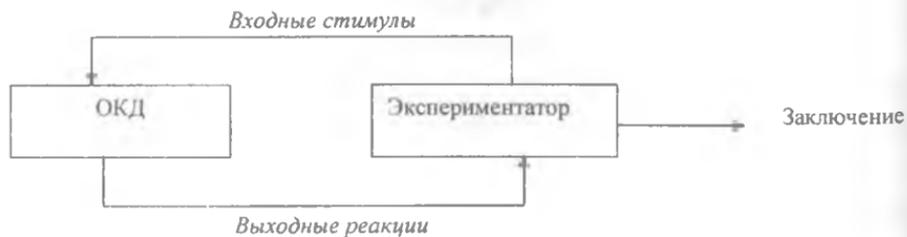


Рис. 4. Простой мысленный эксперимент

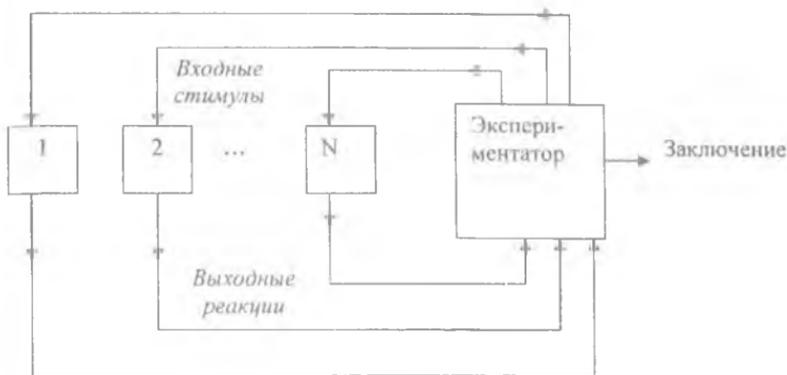


Рис. 5. Кратный мысленный эксперимент

Здесь ОКД воспринимает последовательность входных сигналов (стимулов) экспериментатора и выдает последовательность реакций. Если ОКД детерминирован, то каждая реакция определена соответствующим стимулом и его текущим состоянием. Рассмотрев реакции, экспериментатор либо избирает для приложения к ОКД другую последовательность стимулов, либо выводит некоторое заключение об ОКД, либо делает то и другое одновременно. В дополнение к множеству других ситуаций эксперимента простой эксперимент дает абстрактную модель процесса испытаний.

В случае кратного эксперимента экспериментатор располагает несколькими копиями, которые в начале эксперимента все находятся в одинаковом состоянии. Экспериментатор посылает последовательности входных стимулов копиям и получает от каждой из них соответствующие выходные последовательности, которые могут быть различными. Исходя из полученных реакций, экспериментатор может либо избрать дополнительное приложение стимулов к различным копиям, либо вывести заключение об их общей внутренней структуре. Кратный мысленный эксперимент можно применять в диагностике неисправностей.

Пусть дана бортовая система, в которой может возникнуть одна из  $n$  допустимых неисправностей. Предположим также, что внесение в исправную систему любой неисправности из числа допустимых порождает новую систему. Тогда можно считать, что порожденная таким образом  $n+1$  система – суть машинные копии мысленного эксперимента. Приложение стимулов и наблюдение реакций этого множества из  $n+1$  ОКД побуждает произвести наблюдение этого множества в соответствии с наблюдаемыми реакциями. Все ОКД, показывающие одинаковые реакции, объединяются, образуя класс эквивалентности  $I$ . Совокупность полученных таким образом классов эквивалентности определяет разбиение множества ОКД. Дальнейшее экспериментирование будет служить уточнению первоначального разбиения ОКД. Этот процесс можно графически представить в виде диаграммы теста или диагностического дерева. Следова-

тельно, с точки зрения кратного мысленного эксперимента тест, обнаруживающий неисправность, представляет собой кратный эксперимент, который производит окончательное разбиение ОКД таким образом, что исправный ОКД является единственным членом одной из выделенных групп. Подобным же образом тест, диагностирующий неисправность с максимальным диагностическим разрешением, соответствует такому окончательному разбиению ОКД, когда в каждой группе находится точно по одному ОКД.

Поэтому можно сказать, что идея отождествления неисправных ОКД с каждой допустимой неисправностью объекта позволяет сформулировать ряд идей в диагностике неисправностей в терминах мысленных экспериментов Мура. Эти формулировки служат фундаментальной основой для построения системы контроля и диагностирования сложных БКО современных ВС.

Для получения ответа на вопрос о состоянии ОКД необходимо выполнить тест-процедуру, которая заключается в строгой последовательности подачи  $j$  векторов на вход объекта.

Существуют два вида общих тест-процедур: последовательные и комбинаторные. Для последовательной процедуры  $j$ -й входной вектор теста определяется из реакций, возбужденных предыдущими  $j-1$  векторами. В случае комбинаторной процедуры  $j$ -й входной вектор определяется независимо от предыдущих реакций объекта. Отметим, что любой вид процедуры (последовательная или комбинаторная) можно применять к любому виду схемы объекта (как последовательностной, так и комбинационной).

Для получения тест-процедуры какого-либо типа необходимо определить реакцию объекта на данный входной тест-вектор при наличии данной неисправности. Реализация этого процесса называется моделированием неисправности. Результат моделирования, называемый данными моделирования, заключается в установлении соответствия между признаками неисправности и исходами теста. Данные моделирования можно сильно упростить, если просто записывать тесты, обнаруживающие каждую допустимую неисправность. Таким образом,  $\{(j, T_1, T_2, \dots, T_m)\} \forall f_i$ . В множестве допустимых неисправностей есть упрощенное представление данных моделирования, определяющее, что тесты  $T_1, T_2, \dots, T_m$  обнаруживают неисправность  $f_i$ . Следует иметь в виду, что тест  $T_k$  может быть последовательностью входных и выходных тест-векторов. Кроме того, каждый тест должен начинаться с установки объекта в известное начальное состояние.

Последовательная тест-процедура ОКД представляется графически в виде диагностического дерева: каждая неисправность соответствует одной ветви, а "листья" (окончания ветвей) – местам окончания испытаний. Для оценки значимости теста используются меры качества – присвоение каждому из них цифровых значений относительной значимости теста. У каждой вершины дерева производится оценка нескольких кандидатур тестов и выбирается тест, обладающий наибольшей "значимостью". Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута соответствующая диагностическая разрешающая способность или простое обнаружение неисправности. Такой процесс обеспечивает только локальную оптимизацию. Глобальная оптимизация обычно нецелесообразна почти для всех случаев, кроме простейших объектов.

Тесты, используемые в определенном порядке, дают последовательность результатов тестов. Затем эта последовательность анализируется путем сличения ее с последовательностями, полученными в результате моделирования неисправностей. Совпадение последовательностей указывает на модуль, который необходимо заменить. Для того, чтобы облегчить процесс сличения последовательностей, результатам моделирования придается форма различных словарей неисправностей, которые строятся так, чтобы процесс оказался простым.

#### **Библиографический список**

1. Ахо А., Хон Крофт Дж., Ульман Дж. Построение и анализ вычислительных алгоритмов. – М.: Мир, 1979.