

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)**

Кафедра телевидения и управления
(ТУ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ТУ, профессор

_____ И.Н. Пустынский

« _____ » _____ 2012 г.

**ДИАГНОСТИКА БЫТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ**

Учебное пособие

Учебное пособие предназначено для студентов дневного и вечернего отделений, обучающихся по специальностям «Сервис» - 100101, «Бытовая радиоэлектронная аппаратура» - 210303

РАЗРАБОТАЛ

_____ Ю.Р. Кирпиченко

« _____ » _____ 2012 г.

2012

Кирпиченко Ю.Р. Диагностика бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 136 с.

В данном учебном пособии изложены способы построения алгоритмов поиска неисправностей, методы оптимизации безусловных алгоритмов диагностирования. Рассмотрены принципы организации систем тестового и функционального диагностирования, особенности диагностирования радиоэлектронных устройств. Описаны средства диагностирования аналоговых и цифровых устройств.

© Кирпиченко Ю.Р., 2012

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Предмет и задачи технической диагностики	4
1.1. Основные понятия и определения.....	4
1.2. Основные направления конструирования радиоэлектронной аппаратуры	12
1.3. Тенденции развития средств контроля и диагностирования	14
1.4. Техническая диагностика и прогнозирование	17
1.5. Связь технической диагностики с надежностью и качеством	21
2. Диагностические модели	25
2.1. Обобщенная модель объектов диагностирования	25
2.2. Аналитические модели	29
2.3. Графоаналитические модели	30
2.4. Таблица функций неисправностей	35
2.5. Функционально-логические модели.....	43
3. Принципы организации систем тестового и функционального диагностирования	48
3.1. Системы диагностирования технического состояния	48
3.2. Функциональные схемы систем тестового и функционального диагностирования	50
3.3. Структура системы диагностирования	53
3.4. Выделение неисправного сменного блока.....	55
4. Способы построения алгоритмов поиска неисправностей.....	59
4.1. Способ последовательного функционального анализа.....	59
4.2. Способ половинного разбиения	60
4.3. Способ "время-вероятность"	62
4.4. Инженерный способ	63
4.5. Способ ветвей и границ.....	68
4.6. Способ на основе иерархического принципа	75
4.7. Интегральные методы диагностики.....	76
4.7.1. Метод диагностики на основе анализа отклика системы по базису гармонических функций	76
4.7.2. Метод диагностики на основе "белого шума"	80
5. Методы оптимизации безусловных алгоритмов диагностирования.....	82
5.1. Таблица покрытий	82
5.2. Правила упрощения таблицы покрытий.....	84
5.3. Функции предпочтения при обработке таблиц покрытий	87
6. Средства диагностирования аналоговых устройств	90
6.1 Средства определения работоспособности по совокупности параметров.....	90
6.2. Средства определения работоспособности по динамическим характеристикам.....	92
6.3. Средства поиска дефектов.....	95
6.4. Средства поиска дефектов в сложной ЭРЭА.....	96
7. Средства диагностирования цифровых схем и микропроцессорных систем.....	99
7.1. Анализатор логических состояний.....	99
7.2. Анализаторы логических временных диаграмм	102
7.3. Анализатор потока цифровых данных	103
7.4. Сигнатурный анализатор	105
7.4.1. Сущность сигнатурного анализа	105
7.4.2. Принцип формирования сигнатуры	106
7.4.3. Структурная схема сигнатурного анализатора	109

7.4.4. Методика контроля и диагностики устройств, содержащих микропроцессор.	111
7.5 Тестеры для цифровых устройств	113
7.6. Измерительные пробники	114
8. Особенности диагностирования радиоэлектронных устройств	115
8.1. Диагностические параметры	115
8.2. Выбор параметров для контроля и диагностики	117
8.3. Радиоэлектронное устройство как объект диагностирования	121
8.4. Особенности учета обрывов и перегрузок в РЭУ при построении структурных моделей	124
8.5. Трудности и ошибки, возникающие при диагностировании радиоэлектронных устройств	131
Рекомендуемая литература	135

1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

1.1. Основные понятия и определения

Диагноз в переводе с греческого "диагнозис" означает распознавание, определение. В медицине, например, это – определение состояния человека, а в технике – определение состояния объекта технической природы. Объект, состояние которого определяется, называют обычно *объектом диагностирования*. Диагноз представляет собой процесс исследования объекта диагностирования. Завершение этого исследования является получение результатов диагноза, т. е. заключение о состоянии объекта диагностирования.

Техническая диагностика – отрасль научно-технических знаний, сущность которой составляет теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы.

Под *дефектом* следует понимать любое несоответствие свойств объекта заданным, требуемым или ожидаемым его свойствам. Термин "дефект" связан с термином неисправность, но не является его синонимом, так как в состоянии неисправности объект может иметь множество дефектов.

Дефекты подразделяются на:

- явные (для выявления которых в нормативной документации предусмотрены соответствующие правила, методы, средства);
- скрытые (для выявления которых соответствующие правила, методы, средства не предусмотрены:
 - а) значительные (влияющие на эффективность использования БРЭА);
 - б) критические (при наличии которых использование изделий по назначению невозможно или нецелесообразно, при достижении дефектом критического уровня наступит отказ);
 - в) устранимые (устранение которых технически возможно и экономически целесообразно).

Обнаружение дефекта есть установления факта его наличия или отсутствия в объекте.

Поиск дефекта заключается в указании с определенной точностью его местоположения в объекте.

Каковы же причины возникновения дефектов?

Отличительной особенностью современной БРЭА это сложность аппаратуры как БРЭА в целом, так и ее отдельных элементов, разнообразие условий и режимов применения.

В "жизни" любого объекта технической природы можно выделить три основных этапа: этап производства, когда объект создается, *этап эксплуатации*, когда объект применяется по назначению, подвергается профилактическим проверкам, проверкам перед применением или после применения, ремонту и т. п. и *этап хранения* или *пребывания в резерве*.

На первом из названных этапов в процессе изготовления БРЭА используются комплектующие элементы, прошедшие к моменту их использования свой жизненный цикл.

На всех этапах жизни любой объект технической природы подвергается воздействию внешних факторов, результатом которых являются деградиационные процессы, ухудшающие параметры и приводящие, в конце концов, к отказу аппаратуры, т. е. к выходу одного или нескольких параметров за пределы допуска или к полному прекращению функционирования.

Под воздействием внешних условий и внутренних процессов деградации меняется техническое состояние аппаратуры.

По совокупности отрицательные воздействия можно разделить на две группы: *климатические* и *механические*.

Климатические воздействия подразделяют на воздействия температуры, влажности, солнечной радиации.

Механические воздействия – это удары, вибрации, ускорения и звуковые давления. Изменение температуры окружающей среды влияет на параметры элементов

БРЭА:

- изменяется коэффициент усиления транзисторов;
- изменяются обратные токи $p-n$ переходов;
- изменяется величина тока утечки;
- изменяется емкость конденсаторов и их электрическая прочность;
- изменяются величины сопротивления резисторов и потеря на перемагничивание;
- коробятся изоляционные материалы и прокладки, снижается термомеханическая прочность терморезистивных пластмасс и т. д.

Воздействие температур может приводить как к внезапно возникающим, так и постепенным изменениям, которые часто оказываются необратимыми.

Для иллюстрации влияния температурных воздействий на рис. 1.1 и рис. 1.2 показаны зависимости интенсивности отказов конденсаторов (рис. 1.1) и углеродистых резисторов (рис. 1.2) от температуры и относительной величины нагрузки.

Электрические нагрузки в случае недопустимого их изменения в процессе эксплуатации приводят к нарушению температурного режима, электрическим пробоям, отказам при включении-выключении аппаратуры.

Влажность и атмосферные осадки ускоряют процесс коррозии, в результате чего ухудшаются прочностные характеристики, нарушаются контакты, ухудшаются изоляционные свойства вследствие чего возрастают потери в контурах, катушках, дросселях, трансформаторах.

Механические воздействия приводят к преждевременному изнашиванию элементов БРЭА, нарушению первоначальной настройки регулируемых радиоэлементов, возникновению микрофонного эффекта в транзисторах.

На рис. 1.3 схематично показано изменение параметров БРЭА в процессе эксплуатации.

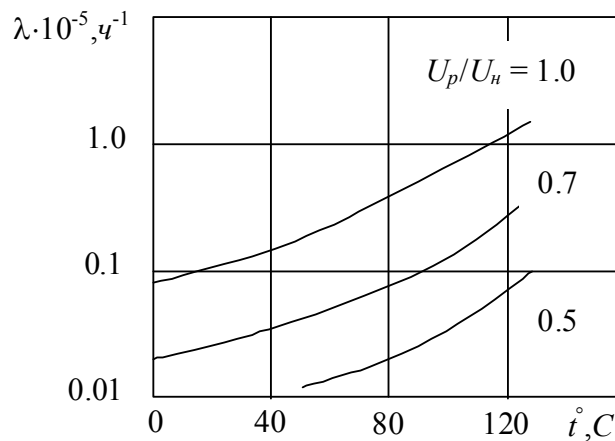


Рис. 1.1. Зависимость интенсивности отказов конденсаторов от температуры окружающей среды

Комплекующие элементы, как правило, проходят входной контроль, в ходе которого происходит их отбраковка по параметрам. Однако, к сожалению не всегда удается обнаружить скрытые производственные дефекты. Кроме того, неизбежны конструкторские и технологические ошибки. По этим причинам в начальный период эксплуатации частота отказов очень велика (рис. 1.4) и многие компании используют испытания на принудительный отказ, то есть работу компонентов или оборудования в целом при повышенных температурах для ускорения появления ранних отказов. В результате ранние дефекты

устраняются до того, как оборудование выйдет с завода изготовителя, и интенсивность его отказов у потребителя будет соответствовать нижней части кривой.

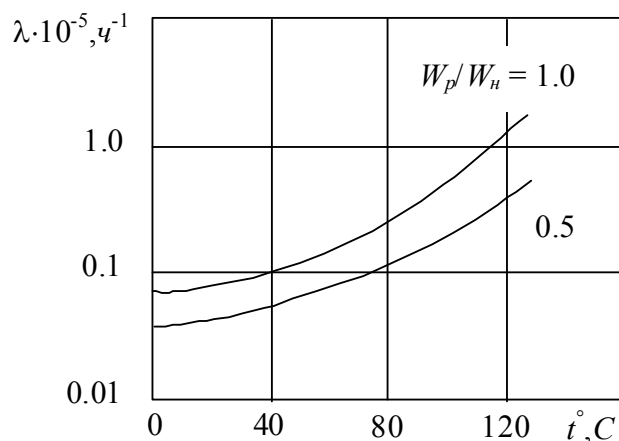


Рис. 1.2. Зависимость интенсивности отказов углеродистых резисторов от температуры окружающей среды

Отказы в период нормальной работы связаны с "уходом" характеристики в результате деградации компонентов, излишней нагрузкой аппаратуры в результате неправильного использования.

Основное назначение технической диагностики состоит в повышении надежности объектов на этапе их эксплуатации, а также предотвращение производственного брака на этапе изготовления объектов и их составных частей.

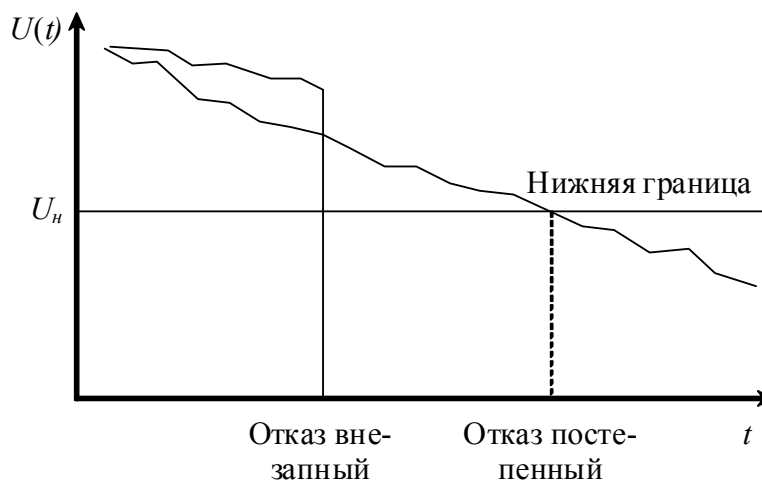


Рис. 1.3. Изменения параметров РЭА в процессе эксплуатации

Требования, которым должен удовлетворять изготовленный (новый) или эксплуатируемый объект, определяется соответствующей нормативно-технической документацией.

Объект, удовлетворяющий всем требованиям нормативно-технической документации, является *исправным* или, говорят, что он находится в *исправном техническом состоянии*.

На этапе производства, например, проверка исправности позволяет узнать, содержит ли созданный объект дефектные компоненты (детали, элементы, блоки, узлы и т. п.), а их монтаж ошибки.

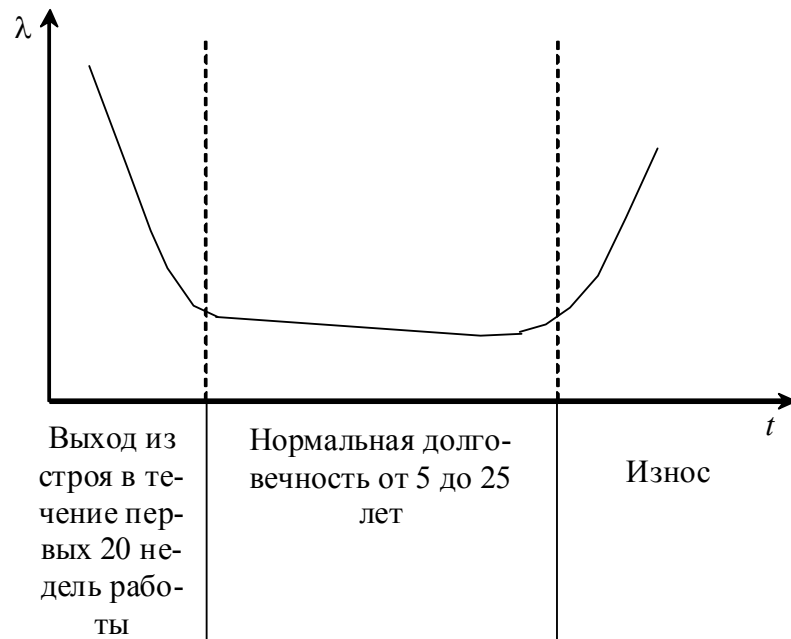


Рис. 1.4. Кривая интенсивности отказов

В условиях ремонта проверка исправности позволяет убедиться, действительно ли устранены при ремонте все имеющиеся в объекте неисправности, а в условиях хранения — не возникли ли какие-либо неисправности за время хранения объекта.

Для условий эксплуатации практически важным является понятие *работоспособного* технического состояния объекта.

Объект работоспособен, если он может выполнять все заданные ему функции с сохранением значений заданных параметров (признаков) в заданных пределах.

Убеждаться в работоспособности объекта необходимо, например, при его профилактике, после транспортирования и хранения. Проверка работоспособности может быть менее полной, чем проверка исправности, т. е. может оставлять обнаруженными неисправности, не препятствующие применению объекта по назначению. Например, резервированный объект может быть работоспособен несмотря на наличие неисправностей в резервных компонентах или связях.

Рассмотрим другой пример работоспособного, но неисправного объекта (рис. 1.5).

Пусть коэффициент усиления одного каскада $K_i = 4$, а нижние (K_{in}) и верхние (K_{ib}) его допустимые значения равны соответственно $K_{in} = 3.5$, $K_{ib} = 4.5$, суммарный коэффициент усиления $K_\Sigma = 60$, а нижние и верхнее его значения $K_{\Sigma n} = 50$ и $K_{\Sigma b} = 70$.

Пусть в определенный момент $K_1 = K_2 = K_3 = 4$. Тогда $K_\Sigma = 64$ и усилитель находится в работоспособном состоянии. В результате повреждения коэффициент усиления второго каскада вышел за пределы допуска и стал равным $K_2 = 2.5$.

В результате работы АРУ $K_1 = K_3 = 4.5$ и $K_\Sigma = 50.6$. То есть суммарный коэффициент усиления находится в пределах допуска. Следовательно, усилитель работоспособен. Однако имеет место неисправность второго каскада усиления. Кроме того, два других каскада работают в максимально напряженных режимах, что способствует развитию в них деградиционных процессов.

Для этапа применения по назначению существенным является понятие технического состояния *правильно функционирующего объекта*.

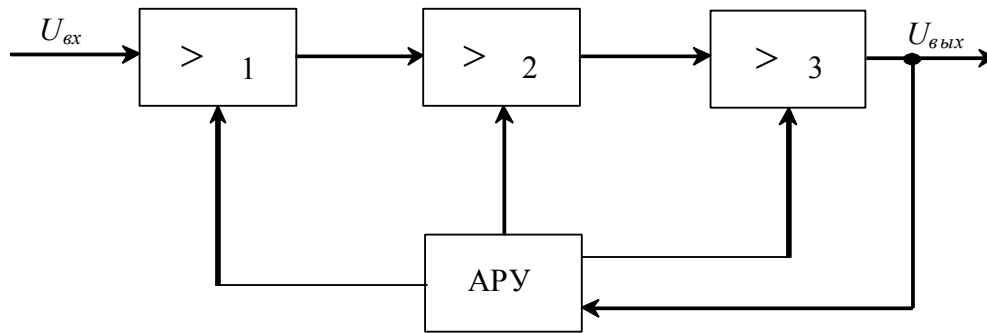


Рис. 1.5. Структурная схема трехкаскадного усилителя с АРУ

Правильно функционирующим является объект, значения параметров (признаков) которого в текущий момент реального времени применения объекта по назначению находятся в требуемых пределах (в этот момент времени объект не отказал, т. е. правильно выполняет конкретную заданную функцию).

Проверка правильности функционирования, вообще говоря, менее полна, чем проверка работоспособности, так как позволяет убедиться только в том, что объект правильно функционирует в данном режиме в данный момент времени.

Иными словами, в правильно функционирующем объекте могут быть неисправности, которые не позволяют ему правильно работать в других режимах. Работоспособный объект будет правильно функционировать во всех режимах и в течение всего времени его работы.

Таким образом, исправный объект всегда работоспособен и функционирует правильно, а неправильно функционирующий объект всегда неработоспособен и неисправен. Правильно функционирующий объект может быть неработоспособным, и значит, неисправным. Работоспособный объект также может быть неисправным.

На рис. 1.6 показан граф перехода объекта из одного рассмотренного выше состояния в другое.

Одной из важнейших задач диагноза состояния объекта является *поиск неисправностей*, т. е. указание мест и, возможно, причин возникновения имеющихся в объекте неисправностей. Поиск неисправностей необходим для выявления и замены дефектных компонент или связей объекта, для устранения ошибок монтажа и т. п.

После устранения неисправности объект становится исправным, работоспособным или правильно функционирующим. Поиск неисправностей является существенной составляющей деятельности служб наладки на этапе производства и ремонтных служб на этапах эксплуатации или хранения объектов.

Исправное и все неисправные состояния объекта образуют множество E его технических состояний. Задачи проверки исправности, проверки работоспособности, проверки правильности функционирования и поиска неисправностей представляют собой частные случаи общей задачи диагноза технического состояния объекта.

На рис. 1.7 множество технических состояний объекта диагноза условно ограничено замкнутой кривой, причем исправное состояние обозначено малым кружком, а неисправные состояния – крестиками.

Результатами проверки исправности (рис. 1.7а), проверки работоспособности (рис. 1.7б) и проверки правильности функционирования (рис. 1.7в) является получения двух подмножеств технических состояний. Одно из них (левое) содержит либо только исправное состояние (при проверке исправности), либо кроме исправного состояния также те неисправные состояния, находясь в которых объект остается работоспособным или правильно функционирующим. Второе подмножество содержит либо все неисправные состояния (при проверке исправности), либо такие, пребывание в которых делает объект неработоспособным или неправильно функционирующим.

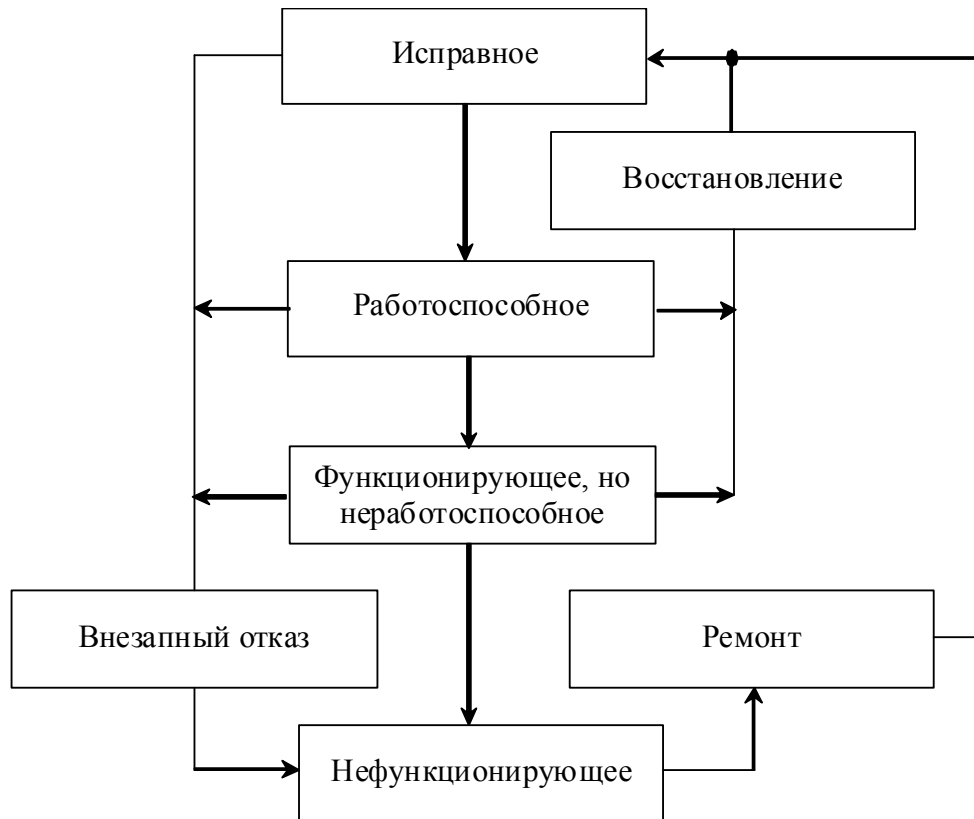


Рис. 1.6. Граф перехода РЭА из одного состояния в другое

Результатами поиска неисправностей (рис. 1.7г, д, е) являются разбиения на классы не различаемых между собой неисправных состояний вторых подмножеств. Число классов и, следовательно, число входящих в них неисправных состояний (мощности классов) определяют достигаемую при поиске степень детализации мест и состава имеющихся (или подозреваемых на наличие) в объекте неисправностей. Эту степень детализации принято называть *глубиной поиска* или *глубиной диагноза*.

Заметим, что при проверке правильности функционирования и при поиске неисправностей, нарушающих правильное функционирование объекта, разбиения относятся к определенному (настоящему) моменту времени и поэтому могут быть разными для разных моментов времени и разных режимов работы объекта.

Таким образом, *задачами диагностирования являются задачи проверки исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта, а также задачи поиска дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования.*

Диагностирование технического состояния любого объекта осуществляется теми или иными *средствами диагностирования* (рис. 1.8).

Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой образуют *систему диагностирования*.

Различают системы *тестового* и *функционального* диагностирования. В системах тестового диагностирования на объект подаются специально организуемые тестовые воздействия. В системах функционального диагностирования, которые работают в процессе применения объекта по назначению, подача тестовых воздействий, как правило, исключается; на объект поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его алгоритмом функционирования.

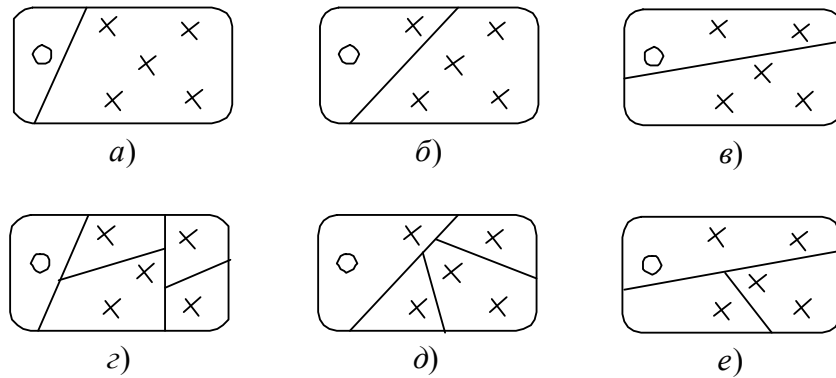


Рис. 1.7. Представление задач диагноза через разбиение множества технических состояний объекта

В противном случае требуется имитация условий функционирования объекта (в частности, имитация рабочих воздействий).

Системы тестового диагностирования необходимы для проверки исправности и работоспособности, а также поиска дефектов, нарушающих исправность и работоспособность объекта, и работают тогда, когда объект не применяется по прямому назначению.

Использование систем тестового диагностирования при работающем объекте также возможно, но при этом тестовые воздействия могут быть только такими, которые не мешают нормальному функционированию объекта.

Системы функционального диагностирования необходимы для проверки правильности функционирования и для поиска дефектов, нарушающих правильное функционирование объекта.

В системах обоих видов средства диагностирования воспринимают ответы объекта на входные (тестовые или рабочие) воздействия и выдают результат диагностирования, т. е. ставят диагноз:

- 1) объект исправен или неисправен;
- 2) работоспособен или неработоспособен;
- 3) функционирует правильно или неправильно;
- 4) имеет такой-то дефект;
- 5) в объекте повреждена такая-то его составная часть;
- 6) и т. д.

Система диагностирования в процессе определения технического состояния объекта реализует некоторый *алгоритм* (тестового или функционального) *диагностирования*.

Алгоритм диагностирования в общем случае состоит из определенной совокупности, так называемых *элементарных проверок* объекта, а также правил, устанавливающих последовательность реализации элементарных проверок и правил анализа результатов последних.

Каждая элементарная проверка определяется своим тестовым или рабочим воздействием, подаваемым или поступающим на объект и составом контрольных точек, с которых снимаются ответы объекта на это воздействие.

Результатом элементарной проверки являются конкретные значения ответных сигналов объекта в соответствующих контрольных точках.

Диагноз ставится в общем случае по совокупности полученных результатов элементарных проверок.

Построение алгоритмов диагностирования заключается в выборе такой совокупности элементарных проверок, по результатам которых в задачах обнаружения дефектов можно отличить исправное или работоспособное состояние, или состояние правильного функционирования объекта от его неисправных состояний, а также в задачах поиска дефектов различать неисправные состояния (или группы неисправных состояний).



Рис. 1.8. Классификация средств диагностирования

В задачах тестового диагностирования составы контрольных точек объекта часто определены предварительно и они одинаковы для всех элементарных проверок. В таких случаях выбирают только входные воздействия элементарных проверок – *это задача построения тестов*.

В задачах функционального диагностирования, наоборот, входные воздействия элементарных проверок определены заранее рабочим алгоритмом функционирования объекта и выбору подлежат только составы контрольных точек

При организации проверки правильности функционирования или поиска дефектов, нарушающих правильное функционирование аналоговых объектов, на основе допускового способа контроля параметров задача построения алгоритмов диагностирования сводится к выбору состава контрольных точек.

Для решения одной и той же задачи диагностирования (например, проверки исправности) можно построить несколько алгоритмов, различающихся либо составом элементарных проверок, либо последовательностью их реализации, либо, наконец, тем и другим вместе и поэтому, возможно, требующих разных затрат на их реализацию.

Отсюда интерес к разработке методов построения *оптимальных алгоритмов*, требующих минимальных затрат на их реализацию. Во многих случаях это сопряжено с трудностями вычислений и поэтому зачастую удовлетворяются *оптимизированными алгоритмами* диагностирования, затраты на реализацию которых как-то уменьшены, но не обязательно минимальны.

Для построения алгоритмов диагностирования формализованными методами необходимы данные, которые можно получить путем анализа *моделей объектов*. Кроме того модели объектов используются для формализованного анализа заданных (в том числе построенных интуитивно, вручную) алгоритмов диагностирования на полноту обнаружения, на глубину поиска дефектов.

Формализованной моделью объекта (или процесса) является его описание в аналитической, графической, табличной или другой форме. Для простых объектов диагностирования удобно пользоваться так называемыми *явными моделями*, содержащими наряду с описанием объекта описание каждой из его неисправных модификаций. *Неявная модель* объекта диагностирования предполагает наличие только одного описания, например исправного объекта, формализованных моделей дефектов и правил получения по заданному описанию и по моделям дефектов описаний всех неисправных модификаций объекта.

Модели бывают *функциональные* и *структурные*. Функциональные модели позволяют решать задачи проверки работоспособности и правильности функционирования объекта (они отражают только выполняемые объектом функции, определенные относительно рабочих входов и рабочих выходов объекта). Структурные модели обеспечивают возможность проверки исправности (в общем случае) и поиска дефектов с глубиной большей, чем объект в целом.

Наконец, модели объектов диагностирования могут быть *детерминированными* и *вероятностными*. К вероятностному представлению чаще всего прибегают при невозможности или неумении описать детерминировано поведение объекта.

1.2. Основные направления конструирования радиоэлектронной аппаратуры

Развитие современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) базируется на достижениях микроэлектроники, обеспечивающей при крупносерийном выпуске микроэлектронных интегральных схем (ИС) резкое снижение стоимости, габаритных размеров, массы узлов и блоков аппаратуры и повышение надежности. Возможность широкого внедрения унификации и стандартизации позволяет повысить качество аппаратуры при одновременном сокращении времени и затрат на ее проектирование, изготовление и испытания. Процесс развития РЭА обусловлен требованиями постоянного усложнения выполняемых функциональных задач и расширением областей применения. При этом функциональная сложность изделий за последнее десятилетие увеличивается примерно в десять раз. Постоянно растут степень интеграции и аппаратурная сложность, оцениваемые числом схемных и активных элементов в электронном изделии.

Этапы развития РЭА принято характеризовать сменой поколений, основным отличительным признаком которых является элементная база и метод конструирования. В первом поколении – электронная лампа, крупногабаритные навесные электрорадиоэлементы и блочный метод; во втором – транзистор, миниатюрные элементы и модульный метод; в третьем – ИС с небольшой степенью интеграции (до 100-1000 элементов на корпус) и функционально-узловой метод; в четвертом – большие (БИС) и сверхбольшие (СБИС) интегральные схемы с числом элементов от десятков до сотен тысяч, функциональные компоненты и функционально-узловой метод с применением микросборок. Практически начиная с аппаратуры второго поколения в конструировании РЭА находит широкое применение и развитие модульный метод с применением планарной технологии печатного монтажа, что позволяет увеличить надежность, улучшить эксплуатационные характеристики и технологию изготовления функциональных узлов и модулей аппаратуры.

Анализ современного состояния РЭА различного назначения, а также перспектив её развития показывает, что особенно важными являются следующие направления конструирования:

- традиционное конструирование и компоновка с применением ИС и микросборок в корпусах на печатных платах;
- развивающееся конструирование печатных плат повышенной интеграции с применением технологии монтажа на поверхность;
- компоновка микроэлектронных модулей с использованием бескорпусных микросборок, БИС и СБИС на крупноформатных, в том числе металлических, подложках.

Наиболее эффективный путь развития и совершенствования РЭА связан с комплексной микроминиатюризацией, основной задачей которой является уменьшение массы, объема, потребляемой мощности, стоимости, интенсивности отказов на единицу выполняемых функций. Комплексная микроминиатюризация в широком смысле должна обеспечивать системный подход к применению в РЭА всех средств микроэлектроники, отображающий внедрение новых принципов создания аппаратуры на микросхемах сверхвысокой степени интеграции и разработок математического и аппаратурного обеспечения для автоматизированных систем проектирования, конструирования, изготовления и контроля.

В настоящее время уже реально ставится задача создания автоматизированных предприятий по проектированию и производству РЭА на базе применения общей сети, включающей в себя системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматического монтажа печатных плат, автоматизированных систем контроля, испытаний и в конечном итоге – управления производством.

Возможность автоматизации конструирования и унификации изделий РЭА основывается на функционально-узловом методе компоновки, при котором все элементы размещаются на одной плоскости печатной платы. Существенным шагом в этом направлении явилось внедрение координатной сетки, соотнесенной со сторонами печатной платы. Улучшению компоновки плат способствует принятая прямоугольная форма корпусов ИС и БИС. Стандартный шаг расположения выводов ИС, совпадающий с шагом координатной сетки печатных плат, также способствует автоматизации их проектирования и компоновки. Аналогичные принципы конструирования реализуются при проектировании и компоновке микросборок с бескорпусными микросхемами и компонентами.

Для дальнейшего анализа особенностей измерения электрических сигналов в элементах печатных плат рассмотрим способы установки элементов на плату и основные соотношения их размеров.

При проектировании печатных плат обычно выбирается стандартный шаг координатной сетки 2.5; 1.25 или 0.625 мм. В соответствии с ГОСТ 17467-79 корпуса ИС делятся на пять типов, которые, в свою очередь, по габаритным и присоединительным размерам подразделяются на типоразмеры, каждому из которых присваивается свой шифр. Для всех типов прямоугольных корпусов ИС шаг позиций внешних выводов или выводных площадок также выбирается из ряда размеров 2.5; 1.25 или 0.625 мм.

Число внешних выводов в корпусах ИС и БИС колеблется обычно в пределах от 8 до 48 и более.

Для металлокерамических и металлокерамических прямоугоньных корпусов ИС и БИС планарные внешние выводы имеют шаг 1.25 мм, а размеры поперечного сечения выводов в зависимости от типоразмера корпуса изменяются в пределах от $a \times b = 0.47 \times 0.23$ мм до $a \times b = 0.59 \times 0.37$ мм. Для пластмассовых корпусов ИС и БИС с шагом внешних выводов 2.5 мм размеры поперечного сечения выводов лежат в пределах от $a \times b = 1.2 \times 0.21$ мм до $a \times b = 1.5 \times 0.36$ мм. Ширина печатных проводников на платах может изменяться в значительно более широком диапазоне, но, как правило, не менее 0.25-0.3 мм. Микросхемы с пластмассовыми корпусами устанавливаются на платы с металлизированными отверстиями. При этом зазор между платой и основанием корпуса ИС обеспечивается конструкцией вывода, ширина которого на участке, впаиваемом в отверстие, ступенчато уменьшается до размера $C = 0.5 \div 0.6$ мм.

Микросхемы в планарных корпусах с отформованными выводами можно устанавливать на плату вплотную, на прокладку или с некоторым зазором – примерно $0.3 \div 0.7$ мм. Смещение свободных концов выводов с горизонтальной плоскости для их совмещения с контактными площадками допускается в пределах ± 0.2 мм. Дополнительное крепление корпусов ИС на плате обеспечивается за счет покрытия лаком. Для повышения устойчивости микросхем и узлов к климатическим воздействиям платы с микросхемами покрывают, как правило, защитными лаками УР-231 и ЭП-730. Оптимальная толщина покрытия

лаком УР-231 составляет $35 \div 55$ мкм, лаком ЭП-730 – $35 \div 100$ мкм. Платы с микросхемами рекомендуется покрывать лаком в три слоя с промежуточной сушкой.

Таким образом, в смонтированной плате после лакировки отсутствует возможность непосредственного контакта с печатными проводниками и внешними выводами установленных на плате элементов. Это существенно усложняет возможности непосредственного контроля электрического режима элементов внутри платы, при высокой функциональной сложности которых на внешние краевые разъемы удастся вывести относительно небольшое число сигналов с внутренних контрольных точек. Доступ к ним сопряжен с необходимостью нарушения защитного лакового покрытия, что может приводить к дополнительным дефектам и снижению влагостойкости. Кроме того, при контроле лакированных плат практически исключается применение высокопроизводительных многозондовых контактирующих устройств для параллельного съема сигналов с внутренних контрольных точек.

Аналогичная ситуация имеет место в многослойных печатных платах, в которых число слоев печатного монтажа может достигать 10-12 и более. Здесь доступ к внутренним слоям монтажа резко ограничен даже при отсутствии внешнего лакового покрытия.

Повышение плотности компоновки печатных узлов в 4-6 раз обеспечивает новый метод монтажа на поверхность, основанный на использовании компонентов в миниатюрных плоских безвыводных корпусах. В платах с повышенной плотностью упаковки, выполненных методами технологии монтажа на поверхность, шаг размещения выводов элементов обычно уменьшается до 0.63 мм, а ширина печатных дорожек – до $0.1 \div 0.125$ мм. При таких размерах применение для контроля плат групповых многозондовых контактирующих устройств затруднено и требуется введение дополнительных тестовых площадок для съема сигналов в контрольных точках платы.

Близкие к рассмотрению требования возникают при конструировании гибридных ИС и микросборок с бескорпусными ИС и компонентами. Разработка полупроводниковых микросхем в корпусах сопровождается обычно разработкой их аналогов в бескорпусном варианте, которые образуют элементную базу гибридных микросхем. Большинство бескорпусных элементов имеют обычно прямоугольную форму, а соединительные детали бескорпусных элементов характеризуются большим разнообразием форм и размеров. Наряду с гибкими проволочными выводами используются выводы, выполненные из металлической фольги, а также жесткие шариковые, столбиковые и балочные выводы. Это обуславливает большое разнообразие вариантов установки бескорпусного изделия в микросборке.

В отличие от полупроводниковых микросхем, в которых практически не допускается восстановление дефектных кристаллов, в гибридных ИС и микросборках точная локализация дефектных элементов позволяет путем их замены восстановить работоспособность отказавшей схемы. Это можно осуществлять, как правило, перед проведением окончательных операций по корпусированию и герметизации схемы. Такая возможность, способствующая увеличению процента выхода годных изделий, делает особенно актуальной разработку методов и контрольно-диагностических средств для обнаружения и точной локализации отказавших элементов в гибридных схемах и микросборках так же, как и в платах печатного монтажа.

1.3. Тенденции развития средств контроля и диагностирования

Основные этапы существования современной радиоэлектронной аппаратуры, включающие в себя ее разработку, промышленное производство, эксплуатационное обслуживание и ремонт, характеризуются все возрастающей трудоемкостью операций, связанных с проведением измерений, контроля и диагностирования. Это обусловлено прежде всего устойчивой тенденцией постоянного роста функциональной сложности и степени интеграции радиоэлектронных изделий (РЭИ), обусловившей также необходимость уве-

личения степени автоматизации испытаний и разработки все более сложных и дорогостоящих контрольно-диагностических испытательных программ.

В среднем не менее 25% трудоемкости изготовления РЭА приходится на операции контроля, поиска дефектов и их устранение в печатных узлах, являющихся основной производственной единицей. Рост степени интеграции и плотности монтажа элементов на основе применения больших и сверхбольших интегральных схем, а также применение многослойных печатных плат и технологии монтажа на поверхность еще более ограничивают доступ к внутренним элементам контролируемых изделий и возможность получения информации о режиме работы отдельных компонентов РЭИ. С увеличением плотности монтажа на работу электронных узлов все большее влияние оказывают емкостные и электромагнитные связи между элементами монтажа, которые могут приводить к неустойчивому функционированию аппаратуры. Кроме того, увеличивается количество дефектов, снижающих число годных плат печатного монтажа (ППМ).

Зависимость числа годных ППМ, а также числа неисправностей на одну плату от плотности монтажа характеризуется количеством компонентов на плате. Данные, полученные на основе результатов промышленной статистики при производстве электронной аппаратуры в некоторых зарубежных фирмах, показывают, что увеличение числа компонентов на плате в 2 раза (со 150 до 300) приводит примерно к пятикратному снижению числа годных ППМ.

Наибольший процент неисправностей готовых печатных узлов составляют неисправности, возникающие в процессе изготовления. Основную группу при этом составляют следующие неисправности: короткие замыкания (КЗ) между проводниками печатной платы из-за брызг припоя, загрязнение флюсами, дефекта припоя, а также вследствие пробоев входов ИС и БИС статическим электричеством; обрывы вследствие протравливания проводников, недостаточного пропаивания, плохой металлизации отверстий и неудовлетворительного закрепления элементов. Вторую группу составляют неисправности, возникающие при установке и монтаже компонентов: не установленные компоненты и проводники, компоненты неправильного типа, перевернутые компоненты, деформированные проводники и выводы компонентов, неправильное присоединение проводов. К третьей группе относятся неисправности компонентов, их взаимное влияние и повышенная чувствительность к воздействиям окружающей среды (температуры, влажности, давления и т. д.).

По данным статистики наиболее типичными неисправностями являются короткие замыкания (35 ÷ 70%), неисправные компоненты (2 ÷ 20%), отсутствующие и перевернутые компоненты (2 ÷ 10%), обрывы проводников (1 ÷ 3%), неудовлетворительные рабочие характеристики узла (2 ÷ 4%). Неисправности, обусловленные взаимным влиянием активных компонентов, составляют в среднем от 3 до 15%. Наибольшее число неисправностей имеют узлы с гибридными микросхемами, затем с цифровыми и аналоговыми.

Общее направление развития контрольно-измерительной и испытательной аппаратуры для РЭИ основывается на принципе обнаружения неисправностей на возможно более ранней стадии технологического процесса и максимальной степени автоматизации контрольно-диагностических испытаний. Это обусловлено прежде всего экономическими факторами, поскольку стоимость обнаружения и устранения неисправностей в готовом изделии или на заключительных стадиях производственного цикла резко возрастает. Например, стоимость обнаружения и устранения неисправности в электронном модуле при выпуске из производства примерно в 10 раз выше, чем на начальных стадиях производственного цикла. Эта стоимость возрастает еще примерно в 10 раз на стадии эксплуатации.

Поэтому эффективность применяемых и разрабатываемых средств измерений для контроля параметров электронной аппаратуры определяется во многих случаях не столько их метрологическими характеристиками, сколько полнотой реализации задач диагностики, обеспечивающих быстрое и точное обнаружение и устранение неисправностей. В этой связи проверка выполнения контролируемым изделием заданных функций не является

определяющей и, как правило, сопряжена с меньшей трудоемкостью и стоимостью, чем необходимые для локализации неисправностей детальные проверки параметров соединений и изоляции ППМ, правильности прохождения сигналов в отдельных цепях и элементах, проверки их взаимного электромагнитного влияния и т. д.

В целом методы контроля и испытаний РЭИ принято разделять на функциональные и внутрисхемные. При функциональных испытаниях проверяются выходные параметры готовых узлов и блоков, поэтому трудно обеспечить большую глубину контроля и высокую точность локализации отказавших элементов из-за ограниченных возможностей съема информации с отдельных внутренних элементов РЭИ. Необходимость точного диагностирования неисправностей при функциональных испытаниях требует резкого усложнения тестовых испытательных программ. Стоимость диагностики при этом обусловлена высокой стоимостью программирования также и потому, что программы автоматизированных функциональных испытаний являются индивидуальными для каждого функционального узла или блока. Так, программирование тестера, выявляющего короткие замыкания в печатных узлах с эффективностью $35 \div 65 \%$, занимает $2 \div 6$ часов. Внутрисхемные анализаторы выявляют $50 \div 92 \%$ дефектов, но их программирование занимает $1 \div 4$ суток. Внутрисхемный тестер выявляет $85 \div 96 \%$ дефектов, однако конструирование его зондового адаптера может занять много времени, а для программирования требуется более шести недель. Наконец, высокопроизводительный тестер для функциональной проверки плат выявляет около 98% дефектов, но его программирование может занять девять месяцев.

В среднем стоимость программирования для внутрисхемных испытаний обычно в $5 \div 10$ раз ниже, чем для функциональных испытаний. Тем не менее на практике обычно применяется сочетание обоих видов испытаний, поскольку функциональные испытательные тестеры обеспечивают высокую скорость и производительность контроля при браковке контролируемых РЭИ по принципу "Годен - Брак". Бракованные узлы проверяют внутрисхемными тестерами для идентификации неисправностей, связанных с технологическим процессом или качеством компонентов. Конечная задача внутрисхемного контроля сводится к диагностированию неисправностей для обеспечения точной локализации дефектов с целью их дальнейшего устранения и восстановления работоспособности (регенерации) отказавшего РЭИ и, при необходимости, корректировки технологической операции, вызывающей дефекты. После устранения неисправностей внутрисхемный контроль платы повторяется и при его положительных результатах проводится окончательная проверка рабочих характеристик с помощью функционального тестера. Такая организация испытаний РЭИ повышает число годных изделий в среднем на $45 \div 75 \%$. Таким образом, обнаружение неисправностей при внутрисхемных испытаниях значительно уменьшает затраты времени на выполнение диагностических операций и позволяет с большей отдачей использовать высококвалифицированных технических специалистов по диагностике для проведения более сложных системных испытаний. Одновременно повышаются производительность и эффективность функциональных испытательных устройств.

Повышение производительности внутрисхемного контроля зависит от скорости съема и обработки информации о параметрах диагностических сигналов элементов, расположенных на поле контролируемой печатной платы. Наиболее высокую производительность внутрисхемного контроля имеют автоматические тестеры с много зондовыми контактными устройствами типа "ложе из гвоздей", обеспечивающие возможность параллельного съема электрических сигналов в многочисленных точках, расположенных на поле контролируемой платы. Минимальный шаг установки зондов составляет обычно 2.5 мм, а число зондов в контактирующей матрице может достигать нескольких тысяч, что существенно усложняет ее конструкцию, требует увеличения прижимного усилия до 10H и более. Уменьшение шага расположения зондов до 1.25 мм еще более усложняет конструкцию, технологию изготовления и применения контактирующих устройств. Практически это значение шага является предельным, поэтому переход к прогрессивной техноло-

гии монтажа на поверхность с повышенной плотностью упаковки элементов и шагом размещения выводов 0.63 мм резко ограничивает возможность применения групповых многозондовых контактирующих устройств. В платах с особенно высокой плотностью монтажа для обеспечения контролепригодности приходится вводить специальные тестовые площадки для съема сигнала в контрольных точках схемы, что приводит к нежелательному уменьшению полезной площади поля печатной платы. Применение зондовых контактирующих устройств также резко ограничивается при двухсторонней установке навесных элементов на печатной плате, после нанесения изоляционных защитных покрытий на поверхность платы, а также при использовании многослойного печатного монтажа, контактирование с внутренними слоями которого невозможно.

Кроме рассмотренных ограничений, методы внутрисхемного контроля и испытаний, базирующиеся на измерениях электрических напряжений и параметров цепей, даже при обеспечении контакта с контролируруемыми элементами не позволяют локализовать все виды дефектов. Прежде всего это касается локализации наиболее широко распространенных дефектов типа "короткого замыкания" в гальванически связанных цепях или узлах, находящихся под общим потенциалом. К ним относятся в первую очередь шины печатных плат и другие цепи с большими коэффициентами разветвления, которые наиболее часто встречаются в микропроцессорных системах с шинной организацией структуры. В таких системах эквипотенциальные линии шины могут объединять десятки элементов схемы. При малом сопротивлении линии все ее точки находятся под одинаковым потенциалом, поэтому измерение электрического напряжения не может обеспечить локализации дефектов, например коротких замыканий в отдельных ветвях линии. Традиционно поиск таких дефектов осуществляется путем поочередного отпаивания подключенных к шине элементов или перерезания соответствующих ветвей узла до тех пор, пока не исчезнет повышенная проводимость линии, обусловленная короткозамкнутой ветвью. Применение такого способа весьма неудобно, трудоемко и сопряжено с вероятностью внесения дополнительных дефектов, снижающих качество и надежность диагностируемых изделий. Кроме того, автоматизация диагностирования и локализации неисправностей в таких цепях с точностью до отдельной ветви узла или элемента в глубине ветви практически исключается при использовании только контактных методов измерений. Это ставит очень серьезные проблемы при разработке эффективных методов диагностирования неисправностей современных микропроцессорных РЭИ, для которых, как было показано, характерна большая функциональная сложность и плотность монтажа с высокой вероятностью возникновения дефектов типа "монтажное ИЛИ", обусловленных короткими замыканиями в гальванически связанных цепях.

1.4. Техническая диагностика и прогнозирование

Чтобы более четко увидеть область, охватываемую технической диагностикой, рассмотрим три типа задач по определению состояния технических объектов.

К первому типу относятся задачи по определению состояния, в котором находится объект в настоящий момент времени. Это - *задачи диагностирования*. Задачи второго типа – предсказание технического состояния, в котором окажется объект в некоторый будущий момент времени. Это – *задачи прогнозирования*. К третьему типу относятся задачи определения технического состояния, в котором находился объект в некоторый момент времени в прошлом. По аналогии можно говорить, что это *задачи генеза*.

Задачи первого типа формально следует отнести к технической диагностике, а второго типа – к *технической прогностике* (к техническому прогнозированию). Тогда отрасль знания, которая должна заниматься решением задач третьего типа, естественно назвать *технической генетикой*.

Задачи технической генетики возникают, например, в связи с расследованием аварий и их причин, когда техническое состояние объекта в рассматриваемое время отличается от состояния, в котором он был в прошлом, в результате появления первопричины,

вызвавшей аварию. Эти задачи решаются путем определения возможных или вероятных предысторий, ведущих в настоящее состояние объекта. К задачам технической прогностики относятся, например, задачи, связанные с определением срока службы объекта или с назначением периодичности его профилактических проверок и ремонтов. Эти задачи решаются путем определения возможных или вероятных эволюций состояния объекта, начинающихся в настоящий момент времени.

Таким образом, знание состояния объекта в настоящий момент времени является обязательным как для генеза, так и для прогноза. Поэтому техническая диагностика представляет собой основу технической генетики и технической прогностики, и естественно, что последние развиваются в тесной связи с первой.

Решение задач прогнозирования весьма важно, в частности, для организации *технического обслуживания объектов по состоянию* (вместо обслуживания по срокам или по ресурсу).

Непосредственное перенесение методов решения задач диагностирования на задачи прогнозирования невозможно из-за различия моделей, с которыми приходится работать:

- при диагностировании моделью обычно является описание объекта;
- при прогнозировании необходима модель процесса эволюции технических характеристик объекта во времени.

В результате диагностирования каждый раз определяется не более чем одна "точка" указанного процесса эволюции для текущего момента (интервала) времени.

Тем не менее хорошо организованное диагностическое обеспечение объекта с хранением всех предшествующих результатов диагностирования может дать полезную и объективную информацию, представляющую собой предысторию (динамику) развития процесса изменения технических характеристик объекта в прошлом, что может быть использовано для систематической коррекции прогноза и повышение его достоверности.

В период эксплуатации весьма важным является индивидуальное прогнозирование технического состояния каждого конкретного экземпляра объекта, которое позволяет обслуживать объекты по их состоянию.

При индивидуальном прогнозировании необходима априорная информация индивидуальная для каждого экземпляра объекта. Если эту информацию получать в процессе эксплуатации, то она будет учитывать не только конкретные условия применения данного экземпляра объекта по назначению, условия его обслуживания, хранения и транспортирования, но также специфические особенности экземпляра, зависящие, в частности, от конкретных условий изготовления объекта и его составных частей.

Теоретически задача прогнозирования ставится следующим образом. На техническое состояние объекта S_j влияют факторы (вектор \bar{X} на рис. 1.9), определяющие необратимые процессы деградации физико-химических свойств аппаратуры объекта (старение, износ и др.), а также случайные внешние и внутренние помехи (вектор \bar{Y}). Для измерения выбрана совокупность $\{\xi_l, l = 1, 2, \dots, n\}$ параметров объекта (вектор $\bar{\xi}$), относительно которых предполагается, что они существенно зависят от \bar{X} и позволяют (при определенных средствах прогнозирования, реализующих алгоритм прогнозирования) предсказать будущее техническое состояние e объекта. Эти параметры называют *прогнозирующими*. На значения прогнозирующих параметров в общем случае накладываются помехи \bar{Y} . При измерении параметров возможны погрешности измерения (вектор \bar{Z}), вследствие чего вместо вектора $\bar{\xi}$ истинных значений получается вектор $\bar{\xi}^* \neq \bar{\xi}$. На результаты прогнозирования, возможно, влияют погрешности прогнозирования (вектор \bar{W}). Таким образом, будущее техническое состояние e объекта зависит от нескольких случайных векторных аргументов:

$$e = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W}). \quad (1.1)$$

Зависимость (1.1) по существу является *моделью процесса прогнозирования*.

Вероятностный характер этой модели определяется тем, что аргументы $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ и \bar{W} являются случайными функциями. Получить зависимость (1.1) в явной аналитической форме для сколько-нибудь сложных объектов практически невозможно. В связи с этим используют различные приемы упрощения как самой модели, так и процедур ее обработки. К этим приемам относится расчленение общей задачи прогнозирования на две самостоятельные задачи – задачу измерения прогнозирующих параметров, когда работают с моделью вида

$$\bar{\xi}_l^* = \varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}), \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (1.2)$$

и задачу получения *прогноза* (результата прогнозирования) по модели вида

$$e = \psi(\bar{\xi}^*, \bar{W}). \quad (1.3)$$

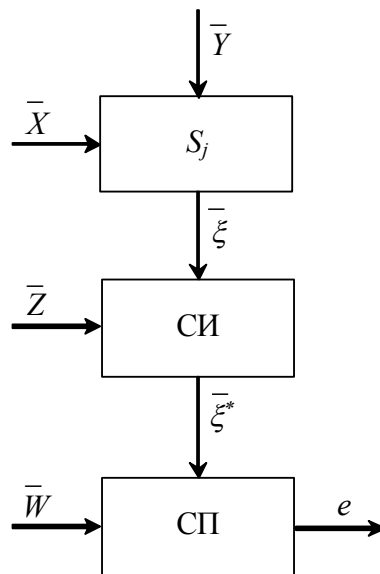


Рис 1.9. Схема системы прогнозирования, содержащая экземпляр S_j объекта, средства измерения СИ и средства прогнозирования

Однако и при таком расчленении трудности разработки практически эффективных методов прогнозирования для сложных объектов остаются значительными.

Наиболее простой была бы явная аналитическая модель вида

$$e = f_x(\bar{X}), \quad (1.4)$$

в которой отсутствует зависимость будущего технического состояния от случайных помех и погрешностей. Стремясь к "идеальной" модели (1.4), применяют различные способы математической обработки моделей вида (1.2) и (1.3) с целью уменьшения зависимости окончательных результатов измерения прогнозирующих параметров и прогноза от случайных функций \bar{Y}, \bar{Z} и \bar{W} . Эти способы заключаются главным образом в сглаживании случайных процессов применением операторов сглаживания, таких, как операторы математического ожидания, текущего среднего, экспоненциального сглаживания, и некоторых других. Для применения операторов сглаживания необходимо знать характеристики сглаживаемых случайных процессов, например вероятности появления величин \bar{Y}, \bar{Z} и

\bar{W} , интервалов сглаживания и др., что сопряжено с получением и обработки больших объемов априорной информации, что практически не всегда возможно.

Аналитическое представление модели (1.3) затруднено даже в том случае, когда известны значения прогнозирующих параметров $\bar{\xi}^*$ в прошлые периоды времени, заданы диапазоны их допустимых значений и можно пренебречь погрешностями \bar{W} . Задача выбора описания процесса изменения во времени рабочей точки (конец вектора $\bar{\xi}^*$) в области допустимых значений прогнозирующих параметров, т. е. выбора модели процесса эволюции технического состояния объекта прогнозирования, остается всегда. Относительно просто прогноз может быть получен градиентным или операторным методами, когда процесс эволюции может быть описан линейной или так называемой центральной детерминированной моделью, что, однако, не всегда допустимо в реальных практических ситуациях.

Задача достоверного и устойчивого измерения значений прогнозирующих (как и любых других) параметров, т. е. выбора и обработки модели (1.2), является типичной для теории и практики измерения. Специфическими для технического прогнозирования является задача построения и обработки модели (1.3) с целью получения прогноза, а также задачи выбора прогнозирующих параметров. Для решения задачи выбора совокупностей прогнозирующих параметров не существует формализованных методов. Даже для простых объектов прогнозирующие параметры выбираются интуитивно на основе знания функциональных, структурных, физико-химических и других свойств конкретных объектов с учетом условий эксплуатации и т. п.

Выбор и измерение прогнозирующих параметров не является необходимым, так как при прогнозировании в конечном итоге интересует зависимость (1.4), где \bar{X} представляет факторы, определяющие необратимые изменения в объекте прогнозирования. Однако установить функциональную связь в явном виде между техническим состоянием e и фактором \bar{X} в общем случае не представляется возможным. Более того, измерение значений вектора \bar{X} весьма затруднено, если вообще возможно. Поэтому связь (1.4) устанавливают опосредованно через зависимость (1.2) путем измерения прогнозирующих параметров, относительно которых предполагается, что их значения изменяются во времени из-за воздействия факторов \bar{X} , и затем через зависимость (1.3), экстраполируя значения прогнозирующих параметров на будущие периоды времени.

Таким образом, практическая реализация теоретически строгих постановок задач прогнозирования технического состояния сложных объектов встречается с трудностями и ограничениями. Этим, по-видимому, объясняется слабое и медленное внедрение методов и средств прогнозирования в практику.

Априорные данные о технических характеристиках объекта можно получать от средств функционального и тестового диагностирования. Тем самым при достаточно "хороших" средствах функционального и тестового диагностирования и при условии организации накопления и обработки выдаваемой ими информации имеется возможность в любой период времени жизненного цикла конкретного экземпляра объекта иметь не только абсолютные фактические значения интенсивностей отказов и прогнозирующих параметров, но также динамику их изменения, например, в виде кривых.

При наличии таких кривых можно эмпирически выбрать критерий годности и назначить его предельное значение, по достижении которого дальнейшее использование данного экземпляра объекта либо невозможно, либо не оправданно по технико-экономическим соображениям. Удачный выбор критерия годности позволяет использовать его значение также для управления периодичностью тестового диагностирования (т. е. профилактики и ремонта) объекта. Это и будет реализацией индивидуального прогнозирования технического состояния объекта и тем самым обслуживания его по состоянию.

Простейшими критериями годности могут быть, например, абсолютные значения или скорости изменения абсолютных значений интенсивностей отказов, или некоторых (прогнозирующих) параметров.

Конечно, наиболее трудными являются вопросы обоснованного назначения предельного значения критериев годности, а также выбора прогнозирующих параметров. Теоретически обоснованные ответы на эти вопросы удается получить далеко не всегда и только для очень простых объектов. В большинстве случаев, однако, могут оказаться приемлемыми методы экспертных оценок.

1.5. Связь технической диагностики с надежностью и качеством

Качество продукции есть совокупность ее свойств, обуславливающих пригодность продукции удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Среди показателей качества продукции важное место занимают показатели ее *надежности* (безотказности, долговечности, сохраняемости, ремонтпригодности). Наличие или появление дефектов, что возможно на любой стадии жизни продукции (объектов), отрицательно сказывается на ее качестве и надежности.

В проблеме надежности можно выделить аспекты, определяемые принципами, методами и средствами обеспечения и поддержания тех или иных показателей надежности.

Физический аспект, являющийся основным для неделимых объектов, охватывает выбор, совершенствование и создание новых материалов, поиск и реализацию новых физических принципов работы, новых видов энергии и способов ее преобразования, задания щадящих условий применения объектов, совершенствование технологии производства и конструкции и т. п.

Аппаратурный аспект охватывает принципы и методы организации и использования аппаратурной (материальной) избыточности. Это — мажорирование (в частности, дублирование и троирование), распределенное резервирование, статическое и динамическое резервирование, ненагруженный и нагруженный резерв, и т. п.

Информационный аспект надежности включает в себя принципы и методы получения и использования избыточной информации, поступающей на объект, а также передаваемой, перерабатываемой, хранимой и выдаваемой объектом. Это, например, применение избыточных кодов, исправляющих ошибки, и многократное (в частности, двукратное) повторение во времени операций передачи и обработки информации. К информационному аспекту следует отнести также вопросы, связанные с организацией надежного (в частности, нечувствительного к ошибкам) матобеспечения вычислительных машин.

Целью мероприятий, выполняемых в рамках физического аспекта надежности, является создание таких объектов, которые как можно меньше подвержены появлению в них дефектов как при производстве, так и при их эксплуатации. Однако избежать возникновения дефектов в более или менее сложных объектах, особенно при длительной их эксплуатации, нельзя.

Мероприятия аппаратурного и информационного аспектов надежности направлены на то, чтобы возникающие в объектах дефекты не приводили к их неправильной работе. Такие мероприятия "маскируют" дефекты — из-за аппаратурной и информационной избыточности дефекты не проявляются и, значит, не обнаруживаются. Пока не обнаруженных дефектов "мало", объект может функционировать правильно, однако по мере накопления дефектов защитные свойства, которыми обладал объект первоначально благодаря введенной в него избыточности, постепенно теряются. Может наступить такая ситуация, при которой любой "новый" дефект основной и резервной аппаратуры, в том числе любое "новое" искажение основной или резервной информации, будет вызывать отказ (неправильную работу) объекта. В указанной ситуации безотказность (т. е. один из основных показателей надежности) резервированного объекта может оказаться даже ниже, чем его безотказность при безызыточной реализации.

Таким образом, необходимо своевременно обнаруживать, осуществлять поиск и устранять дефекты в объектах, для которых существенна правильная их работа с заданными или требуемыми показателями надежности. Для неремонтируемых как безызбыточных, так и резервированных объектов достаточно обеспечить обнаружение их так называемых существенных дефектов, т. е. дефектов, нарушающих правильную работу объектов. Для ремонтируемых объектов необходимо осуществлять также поиск дефектов, т. е. точное или хотя бы приближенное указание поврежденной области аппаратуры объекта и, возможно, характера дефекта. Для ремонтируемых резервированных объектов необходимы обнаружение и поиск как существенных, так и "несущественных" дефектов, с тем чтобы исключить процесс накопления дефектов и потери защитных функций резерва.

Для многих видов технических объектов наибольшее время тратится на поиск их дефектов. Формализация и автоматизация процессов поиска дефектов позволяет резко сократить эти затраты и тем самым существенно улучшить такой важный для многих объектов показатель надежности, как коэффициент готовности, а также другие показатели технического обслуживания и ремонта.

Совокупность принципов, методов и средств обнаружения и поиска дефектов или, иными словами, организация *диагностического обеспечения* объектов при их изготовлении и эксплуатации составляет основу *диагностического аспекта* надежности. В рамках диагностического аспекта должны решаться задачи определения технического состояния объектов, т. е. организации проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования и поиска дефектов объектов в процессе их производства и эксплуатации.

При обеспечении надежности сложных объектов многие из указанных аспектов, как правило, взаимосвязаны. Так, при информационном и диагностическом аспектах почти всегда требуются дополнительные аппаратурные и энергетические затраты, а введение аппаратурной избыточности обычно сопровождается появлением новых каналов передачи информации и дополнительным потреблением энергии. Характерным примером объектов с совместным использованием всех указанных аспектов надежности являются современные вычислительные системы, нечувствительные к отказом.

Диагностическое обеспечение, как и все другие мероприятия по повышению надежности, должно закладываться на стадии проектирования объекта, обеспечиваться на стадии производства и поддерживаться на стадии эксплуатации. Ответственность за диагностическое обеспечение несет разработчик объекта, однако это требование далеко не всегда выполняется, в результате чего объекты оказываются плохо приспособленными к диагностированию их технического состояния, а изготовители и эксплуатационники вынуждены заниматься разработкой и созданием малоэффективных средств "приставной диагностики", не всегда обеспечивающих полноту обнаружения дефектов и должную глубину их поиска.

Идеальные полнота обнаружения и глубина поиска дефектов сложных объектов не всегда достижимы (либо принципиально из-за невозможности получения необходимой информации, либо по технико-экономическим соображениям). Однако особенно нежелательна бесконтрольная неполнота обнаружения дефектов, когда неизвестно, какие возможные (или хотя бы вероятные) дефекты не обнаруживаются. Поэтому, когда отсутствуют или не применяются формализованные методы построения алгоритмов диагностирования, необходимо максимально стремиться к формальной проверке степени полноты обнаружения и глубины поиска, обеспечиваемой предложенными неформальными решениями задач диагностирования. Радикальным и эффективным средством такой формальной проверки является моделирование поведения объекта как в исправном состоянии, так и при наличии в нем рассматриваемых дефектов (такое моделирование называют *диагностическим*). Предпочтение следует отдавать моделированию на вычислительных машинах. Для машинного моделирования требуются формальные модели исправного объекта и модели его дефектов, а также соответствующее матобеспечение.

Неполнота обнаружения дефектов при проверке исправности (после изготовления или ремонта объекта) или при проверке работоспособности (при профилактике) эквивалентна фактическому снижению показателей безотказности (в частности, вероятности безотказной работы), долговечности (ресурса) и сохраняемости объекта. Если указанная неполнота учитывается при расчетах показателей надежности, то полученные значения последних будут реальными (в пределах достоверности исходных данных и точности используемых методов расчета). Принципиальная ошибка допускается тогда, когда незнанием степени полноты обнаружения дефектов пренебрегают, считая ее идеальной. В последнем случае ошибка будет состоять в завышении показателей надежности, что, конечно, нежелательно или даже недопустимо. Кроме того, следствием неполноты обнаружения дефектов (при любой проверке – исправности, работоспособности или правильности функционирования) может быть своевременно не обнаруженная неправильная работа объекта в процессе его применения по назначению, что, в свою очередь, может привести к серьезным последствиям.

Для реализации диагностического обеспечения в общем случае требуется ввести аппаратную и информационную избыточность, а также дополнительно затратить энергию. По этому разработчик, желающий иметь хорошее диагностическое обеспечение для проектируемого объекта, должен сознавать, что для этого потребуются затраты, которые должны определяться технико-экономическими соображениями или даже расчетами, но которые начнут окупаться немедленно – в процессе изготовления объекта и при его наладке. В первую очередь разработчику надлежит рассмотреть все стадии и этапы жизни объекта и для каждого такого этапа решить вопрос о необходимости решения той или иной задачи диагностирования, выбрать или назначить требуемую полноту обнаружения и глубину поиска возможных (вероятных, допустимых) дефектов объекта. За этим должна следовать разработка и создание соответствующих систем диагностирования.

Главными показателями качества систем диагностирования являются гарантируемые ими полнота обнаружения и глубина поиска дефектов. К числу "показателей качества систем диагностирования можно отнести затраты на аппаратуру, время, энергию, а также показатели надежности средств диагностирования, в том числе достоверность диагноза. Не исключены ситуации, когда указанные затраты выступают в качестве обязательных ограничений. В таких ситуациях возможно вынужденное снижение, как желаемой полноты обнаружения, так и желаемой глубины поиска дефектов.

Общепризнанным является наличие принципиальной связи и взаимного влияния показателей надежности объектов, с одной стороны, и характеристик их систем диагностирования, с другой. Однако требуется разработка конкретных инженерных методов количественных расчетов, позволяющих получать исходные данные для проектирования систем диагностирования, исходя из заданных требований по надежности, допустимых на диагностирование, а также условий применения и технического обслуживания объектов. Задача создания таких методов особенно осложнена тем обстоятельством, что и вычисляемые показатели надежности и другие условия и ограничения, влияющие на организацию процессов диагностирования, по своей природе существенно отличны от исходных данных, необходимых для проектирования систем диагностирования и весьма опосредованно связаны с характеристиками последних.

Например, состав дефектов, подлежащих тестовому обнаружению и поиску, связан с текущим значением вероятности пребывания объекта в исправном или работоспособном состоянии, с периодичностью тестового диагностирования, с допустимым временем восстановления объекта и т. п. Время реализации проверяющего теста или теста поиска дефектов, т. е. быстродействие средств диагностирования, зависит от допустимых затрат, от конструктивных особенностей объекта и также от времени восстановления. Аналогичные зависимости имеют место для систем и средств функционального диагностирования. На глубину поиска дефектов влияют не только конструктивное исполнение объекта, его структура и заданное время восстановления, но и состав запасных частей для ремонта.

Для правильной организации проектирования систем диагностирования такие основные исходные данные, как состав обнаруживаемых дефектов и глубина их поиска, должны быть заданы не "в среднем", а в виде совершенно конкретных перечней дефектов и сменных составных частей объекта.

Внедрение в практику проектирования указанных выше методов количественных расчетов в определенной мере дело будущего. В настоящее время целесообразно согласовывать показатели надежности объектов и характеристики их систем диагностирования путем итеративного рассмотрения ряда вариантов. При этом полезными и эффективными являются машинные системы моделирования надежности, которые обеспечивают возможность учета характеристик диагностического обеспечения моделируемых объектов.

2. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Оптимальные решения задач технической диагностики сложных объектов могут быть получены только в результате анализа множества N состояний, в которых эти объекты могут находиться в период эксплуатации. В свою очередь, анализ может быть выполнен теоретически в период разработки нового объекта или экспериментально в период эксплуатации готового объекта.

Однако в ряде случаев выполнение эксперимента затруднено или просто технически невыполнимо. В связи с этим требуются специальные методы для теоретического анализа множества возможных состояний сложных технических объектов. Подобные методы основываются на исследовании аналитических описаний или графоаналитических представлений основных свойств технических объектов как объектов диагностирования, которые могут быть названы их диагностическими моделями. В качестве диагностических моделей могут рассматриваться дифференциальные уравнения, логические соотношения, диаграммы прохождения сигналов и др.

Выбор того или иного типа модели для представления конкретного объекта зависит от целого ряда таких факторов, как условия эксплуатации, возможное конструктивное выполнение, тип комплектующих элементов и т.п.

Исследование диагностической модели предусматривает:

- формулировку условий работоспособности, т. е. условий разделения множества N на два подмножества: работоспособных N_1 и неработоспособных N_2 состояний;
- получение критерия для оценки степени работоспособности объекта диагностирования (различение состояний в подмножестве N_1);
- установление признаков возникших неисправностей (различение состояний в подмножестве N_2).

Рассмотрим более подробно методы построения моделей, которые можно разделить на аналитические, графоаналитические, и функционально-логические модели.

Информация, заложенная в моделях и используемая при построении и реализации алгоритмов диагностирования и физических моделей, может быть представлена в табличной форме.

Сначала дадим краткую характеристику диагностическим моделям, а затем рассмотрим более подробно некоторые из них.

Аналитические модели позволяют решать оптимизационные задачи и получать соотношения между состояниями объекта, диагностическими параметрами и показателями качества в аналитическом виде. К методам построения аналитических моделей относят метод малого параметра, функция чувствительности, аналитическое описание процессов прохождения сигналов.

Графоаналитические модели – это диаграммы прохождения сигналов – своеобразные карты, иллюстрирующие процессы, протекающие в аналоговых объектах и позволяющие вскрывать неочевидные, но важные для решения диагностических задач связи и влияния. К графоаналитическим моделям относятся теоретико-множественные описания объектов на базе теории множеств и теории графов, как одного из способов наглядного теоретико-множественного представления объектов.

Функционально-логические модели – это модели, построенные на основе логического анализа функциональных схем изделий, учитывающие их особенности, а также работу в режиме диагностирования.

2.1. Обобщенная модель объектов диагностирования

Формализация методов построения алгоритмов диагностирования технического состояния некоторого объекта предполагает наличие формального описания объекта и его поведения в исправном и неисправных состояниях.

Такое формальное описание (в аналитической, табличной, векторной, графической и другой форме) будем называть математической моделью объекта диагностирования.

Радиоэлектронные системы как объекты моделирования обладают функциональным разнообразием, конструктивной сложностью и сложностью решаемых ими задач, высокой стоимостью отказов и высокой степенью автономности, другими словами, РЭС являются сложными системами.

Классификация моделей, как рациональных описаний (представлений), наиболее тесно связана с самими структурами объекта. В этом смысле объекты диагностирования можно разделить на классы (рис.2.1).

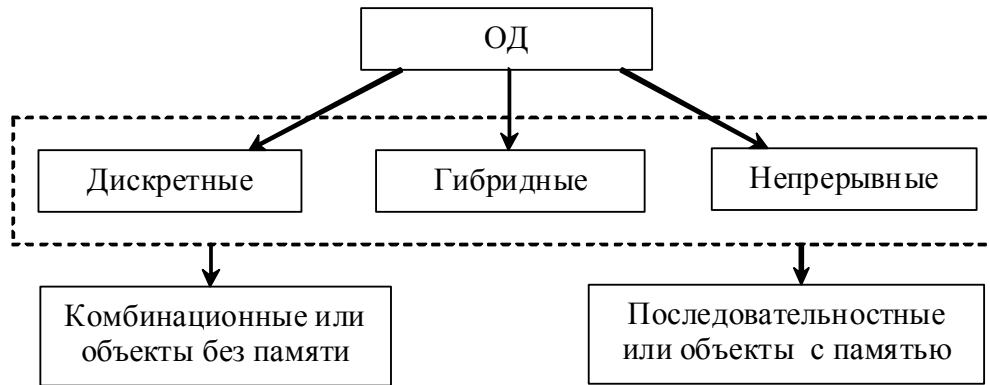


Рис. 2.1. Классификация объектов диагностирования

Непрерывные модели ОД представляют объект и протекающие процессы в непрерывно меняющемся времени, которое является аргументом определенных функций. Эти модели в большей части алгебраические или дифференциальные линейные и нелинейные уравнения, включая передаточные функции.

Объекты называют *комбинационными* или объектами без памяти, если значения их выходных координат однозначно определяются только значениями их входных координат.

Объекты называют *последовательностными* или объектами с памятью, если у них наблюдается зависимость значений выходных координат не только от значений входных, но и от времени.

Примеры: Резисторная цепь – непрерывный объект без памяти. Аналоговая система регулирования с обратными связями – непрерывный объект с памятью. Диодный дешифратор двоичных сигналов – дискретный комбинационный объект. Двоичный счетчик – дискретный объект с памятью. Аналого-цифровой преобразователь – гибридный объект.

В дальнейшем мы будем пользоваться понятиями *входные* и *внутренние переменные* – входные и внутренние координаты, *выходные функции* – выходные координаты.

Исправный или неисправный объект может быть представлен как динамическая система, состояние которой в каждый момент времени t определяется значениями входных, внутренних и выходных координат (параметров).

Входные переменные и выходные функции могут быть сопоставлены как основным, так и дополнительным входам и соответственно выходам объекта.

Обозначим символом X n -мерный вектор, компонентами которого являются значения n входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n .

Аналогично Y является m -мерным вектором значений m внутренних переменных y_1, y_2, \dots, y_m , а Z – k -мерным вектором значений k выходных функций z_1, z_2, \dots, z_k .

Запись

$$Z = \Psi(X, Y_{нач}, t) \quad (2.1)$$

будем рассматривать как некоторую аналитическую, векторную, графическую, табличную или другую форму представления системы передаточных функций исправного объекта диагностирования, отражающих зависимость реализуемых объектом выходных функций Z от его входных переменных X , начального значения $Y_{нач}$ внутренних переменных и от времени t . Система (2.1) является математической моделью исправного объекта.

Выделим для рассмотрения конечное множество возможных неисправностей объекта.

Принято различать *одиночные* и *кратные* неисправности.

Под *одиночной неисправностью* понимается неисправность, принимаемая в качестве элементарной, т. е. такой, которая не может быть представлена совокупностью нескольких других, более "мелких" неисправностей.

Кратная неисправность является совокупностью одновременно существующих двух или большего числа одиночных неисправностей.

Символом S обозначим множество всех рассматриваемых (не обязательно всех возможных) одиночных и кратных неисправностей объекта, а символом O – множество его одиночных неисправностей. Очевидно, что $O \in S$.

Будем говорить, что при наличии в объекте неисправности $S_i \in S, I = 1, 2, \dots, |S|$ или ($o_i \in O, i = 1, 2, \dots, |O|$) он находится в i -неисправном состоянии или является i -неисправным. Объект диагностирования, находящийся в i -неисправном состоянии, реализует систему передаточных функций

$$Z_i = \Psi^i(X, Y_{нач}^i, t), \quad (2.2)$$

представленных в той же форме, что и в формуле (2.1).

Заметим, что начальные значения $Y_{нач}$ внутренних переменных i -неисправного объекта может не совпадать с их начальным значением $Y_{нач}$ в исправном объекте. Система (2.2) для фиксированного i является математической моделью i -неисправного объекта.

Условимся запись фактически реализуемых объектом диагностирования передаточных функций снабжать знаком *

$$Z^* = \Psi^*(X, Y_{нач}^*, t).$$

Система (2.1) и совокупность систем (2.2) для всех $S_i \in S$ образуют *явную модель* объекта диагностирования. Будем такую модель обозначать записью $(\Psi, \{\Psi^i\})$.

Часто, как отмечалось выше, в явном виде задается только модель исправного объекта, т. е. зависимость (2.1), а поведение объекта в i -неисправных состояниях представляется косвенно через множество S возможных неисправностей. В этом случае неявную модель объекта диагностирования образуют: зависимость (2.1), множество S возможных неисправностей объекта (представленных их математическими моделями) и, наконец, способ вычисления зависимостей (2.2) по зависимости (2.1) для любой неисправности s_i . Такую неявную модель объекта диагностирования будем обозначать записью

$$(\Psi, S, \Psi \xrightarrow{S_i} \Psi^i).$$

Если математические модели неисправностей известны для всех $s_i \in S$, то преобразованием $\Psi \xrightarrow{S_i} \Psi^i$ можно получить все зависимости (2.2) и тем самым от модели $(\Psi, S, \Psi \xrightarrow{S_i} \Psi^i)$ перейти к явной модели $(\Psi, \{\Psi^i\})$. Если же математические модели некоторых или даже всех неисправностей из множества S неизвестны, то зависимости (2.2) могут быть получены в результате физического эксперимента непосредственно над объектом диагностирования при наличии в нем соответствующих неисправностей. Модификацией этого подхода является использование при эксперименте не самого объекта, а некоторой его физической модели.

При построении неявной модели объекта диагностирования математическими моделями физических неисправностей чаще всего являются определенные "искажения" за-

зависимости (2.1), например изменение в последней значений коэффициентов, фиксации константами некоторых входных переменных, исключение имеющихся или добавление новых членов и т. д. При этом получение зависимостей (2.2) заключается в осуществлении соответствующих "искажений" зависимости (2.1). Естественно требовать, чтобы эти искажения правильно отображали физические неисправности объекта, т. е. чтобы получаемые зависимости (2.2) действительно представляли соответствующие i -неисправные объекты, причем для всех рассматриваемых неисправностей из множества S .

Указанное требование, однако, не всегда выполнимо, если зависимость (2.1) является система передаточных функций исправного объекта, составленных относительно его основных входов и основных выходов. Поэтому во многих случаях зависимость (2.1) задается в виде, учитывающем внутреннее строение объекта, и тем самым позволяет более точно представлять его физические неисправности. Например, при рассмотрении дискретных объектов диагностирования используется прием "расщепления" тех входных переменных, для которых представляемые ими сигналы распространяются в объекте по нескольким физическим каналам. В других случаях применяется неявная модель объекта диагностирования, в которой заданное описание (обозначим его символом $\tilde{\Psi}$) объекта содержит дополнительные фиктивные аргументы. Заданием значений этих аргументов можно получить модели как исправного, так и всех i -неисправных объектов.

Основным понятием, используемым при решении задач построения и реализации алгоритмов диагностирования, является элементарная проверка объекта. Рассмотрим вопросы задания моделей объектов диагностирования в терминах элементарных проверок объекта и их результатов. Обозначим символом Π множество всех допустимых элементарных проверок $\pi_j, j = 1, 2, \dots, |\Pi|$ объекта, т. е. таких его проверок, которые физически осуществимы в конкретных условиях проведения процесса диагностирования. Каждая элементарная проверка, по определению, характеризуется значением воздействия, подаваемого (поступающего) на объект при реализации элементарной проверки, и ответом объекта на это воздействие. Значение α_j воздействия в элементарной проверке $\pi_j \in \Pi$ определяется составом входных переменных и последовательностью во времени t их значений X_j , а также начальным значением $Y_{нач}$ внутренних переменных. Ответ объекта в элементарной проверке π_j характеризуется составом $\{\gamma\}_j$ контрольных точек и значением (результатом элементарной проверки) R_j^i , зависящим от технического состояния объекта (отсутствие индекса i соответствует исправному объекту).

Таким образом, результат R_j^i элементарной проверки представляется в общем случае последовательностью $|\{\gamma\}_j|$ -мерных векторов и является функцией значения α_j воздействия:

$$R_j^i = \Psi^i(\alpha_j, \{\gamma\}_j).$$

Вместо этой записи условимся применять более короткую

$$R_j = \Psi(\pi_j) \quad (2.3)$$

для исправного объекта и

$$R_j^i = \Psi^i(\pi_j) \quad (2.4)$$

для i -неисправных объектов.

Описанию фактического поведения объекта соответствует запись

$$R_j^* = \Psi^*(\pi_j). \quad (2.5)$$

Связь между моделями типа (2.1), (2.2) и типа (2.3), (2.4) заключается в том, что последние могут быть получены путем подстановки в правые части (2.1) и (2.2) значений $X_j, Y_{нач}, t$ (для каждой элементарной проверки $\pi_j \in \Pi$) и последующего вычисления значений тех компонент векторов Z и Z^i , которые сопоставлены контрольным точкам из множества $\{\gamma\}_j$.

Явную модель объекта диагностирования, когда зависимости (2.4) заданы для всех $s_i \in S$, будем обозначать, как и прежде, записью $(\Psi, \{\Psi^i\})$. Неявная модель объекта диагностирования в данном случае предполагает заданной модель Ψ исправного объекта, множество S неисправностей, а также множество Π допустимых элементарных проверок и поэтому представляется записью $(\Psi, S, \Pi, \Psi \xrightarrow{S_i, \Pi} \Psi^i)$.

2.2. Аналитические модели

Аналитическими моделями являются различные функции, связывающие между собой внешние измеряемые параметры и внутренние параметры элементов системы вида

$$U_{\text{вых}} = f[A(t), U_{\text{вх}}(t)]$$

Аналитические модели, как правило, содержат дифференциальные уравнения, граничные и начальные условия к ним, алгебраические зависимости, полученные из общих физических закономерностей.

Одним из распространенных описаний РЭУ является передаточная функция в операторной форме, которая имеет вещественные и комплексные полюса. Переходная характеристика такого устройства представляется уравнением, которое является суммой колебательных и апериодических составляющих.

Еще одним видом диагностической модели может служить функция чувствительности, характеризующая чувствительность измеряемых параметров к изменению параметров элементов схемы. Функция чувствительности может быть использована при вычислении допусков на изменение параметров.

При построении математической модели допустимая степень упрощения модели определяется условиями функционирования системы.

Иногда полезно начать исследование с более простых моделей, не удовлетворяющих полностью условиям функционирования системы, но удобных как "нулевое" приближение. С помощью этих моделей, благодаря их простоте и наглядности, можно достаточно полно исследовать некоторые общие закономерности процессов, в частности развитие неисправности. Простые модели удобны также для проверки более сложных вариантов математических моделей (ММ) (с помощью предельных переходов).

Модели объектов диагностирования могут формироваться в два этапа:

- вначале создается ММ процессов в отдельных элементах, узлах и т.д. системы;
- затем, учитывая частные ММ и структуры связей между ними, разрабатывается

ММ системы.

Очевидно, что совокупность ММ, входящих в систему элементов, еще не является ММ системы.

Для формирования замкнутой системы уравнений к уравнениям элементов необходимо добавить уравнения связей между параметрами входящими в ММ элементов.

В схеме все элементы связаны между собой. Для точек связывающих между собой элементы соблюдаются законы сохранения. В этом случае применяется аппарат теории цепей.

На схеме системы, элементы которой являются элементами с сосредоточенными параметрами, можно выделить узлы, связывающие между собой отдельные элементы, и замкнутые контуры.

Законы сохранения в этом случае определяются двумя правилами Кирхгофа для узлов и контуров электрической цепи.

Основными достоинствами аналитических моделей – глубина и полнота описания объектов диагностирования.

К недостаткам можно отнести:

- невысокую точность описания свойств многих ОД из-за сложности реальных процессов и отсутствия для них достаточно точных аналитических зависимостей;

- трудоемкость нахождения решений, описывающих более или менее сложные процессы;
- сложность и отсутствие инженерной наглядности.

2.3. Графоаналитические модели

Графоаналитические модели являются одной широко применяемых форм диагностических моделей.

Если объект диагностирования может быть описан, например, системой линейных алгебраических уравнений, то эту систему можно представить диаграммой прохождения сигналов (ДПС). Диаграмма прохождения сигналов – это собственно карта, иллюстрирующая процессы, протекающие в техническом объекте, и представляет собой схему, состоящую из узлов соединенных направленными ветвями. Узлы диаграммы соответствуют переменным, а ветви – операторам, характеризующим коэффициенты при переменных.

В ряде случаев диаграммы прохождения сигналов позволяют вскрыть не вполне очевидные, но важные для решения задач диагностики свойства объекта. Кроме того, диаграмма прохождения сигналов часто может быть построена без составления уравнений, только на основании рассмотрения структуры объекта.

Отвлекаясь от физической сущности связей и переменных, имеющихся в объекте, можно, пользуясь достаточно простыми правилами, преобразовать диаграмму прохождения сигналов и найти все возможные решения уравнений.

Кратко остановимся на основных свойствах ДПС. Узлы (точки, выражающие переменные величины) бывают трёх типов: источники, простые каскадные узлы и стоки.

Источники – это такие узлы, которые имеют только исходящие ветви, а стоки – только входящие ветви. Источники соответствуют независимым переменным, а стоки – зависимым. Простые каскадные узлы имеют как входящие, так и выходящие ветви.

Каждой ветви, т.е. линии, соединяющей два узла, соответствует свой оператор, обозначаемый T_{ij} , где i означает узел, откуда начинается ветвь, j – узел, где ветвь заканчивается. Направление ветви указывается стрелкой.

Каждому узлу соответствует своя переменная (сигнал). Сигнал каждого узла x_k равен сумме входящих сигналов:

$$x_k = \sum x_j T_{jk}, \quad (j = 1, 2, 3, \dots).$$

При этом каждый входящий сигнал равен произведению оператора входящей ветви на сигнал узла, из которого ветвь выходит.

Для примера рассмотрим диаграмму прохождения сигналов, которая соответствует системе уравнений

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 T_{01} + x_1 T_{11} + x_2 T_{21}, \\ x_2 &= x_1 T_{12}. \end{aligned}$$

Рассматривая диаграмму прохождения сигналов можно заметить, что существуют ветви различных типов:

- ветвь, у которой оператор имеет индексы, расположенные в порядке возрастания (T_{01} , T_{12}), называется прямой;
- ветвь, у которой оператор имеет индекс, расположенный в порядке убывания (T_{21}) – обратной.

Несколько последовательно соединенных ветвей представляют собой путь от одного узла к другому.

Замкнутый путь представляет собой контур обратной связи, который может быть образован одной (T_{11}) или несколькими ветвями.

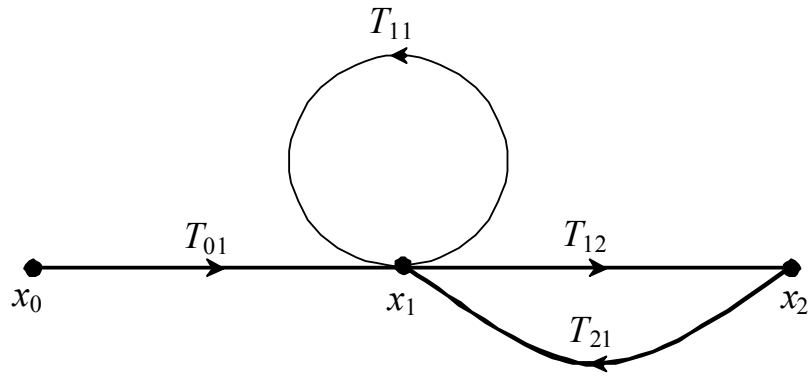


Рис. 2.2. Диаграмма прохождения сигналов

Пример 2.1: Построим диаграмму прохождения сигналов для электрической цепи рис. 2.3.

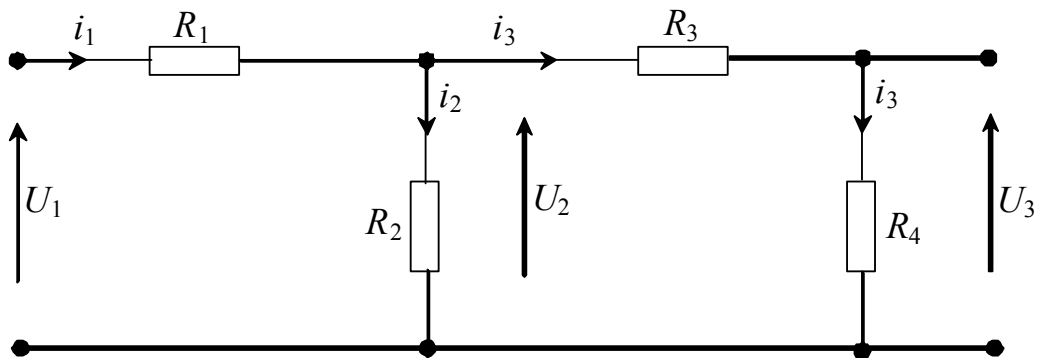


Рис. 2.3. Электрическая цепь, выполненная на сопротивлениях

Эта цепь описывается системой уравнений:

$$i_1 = (U_1 - U_2) / R_1; U_2 = i_2 R_2; i_2 = i_1 - i_3; U_3 = i_3 R_4; i_3 = U_2 / (R_3 + R_4).$$

Используя уравнения, строим диаграмму прохождения сигналов

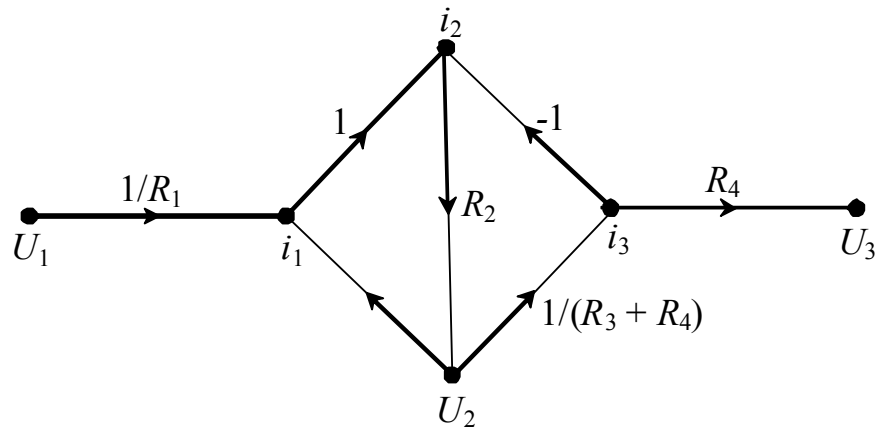
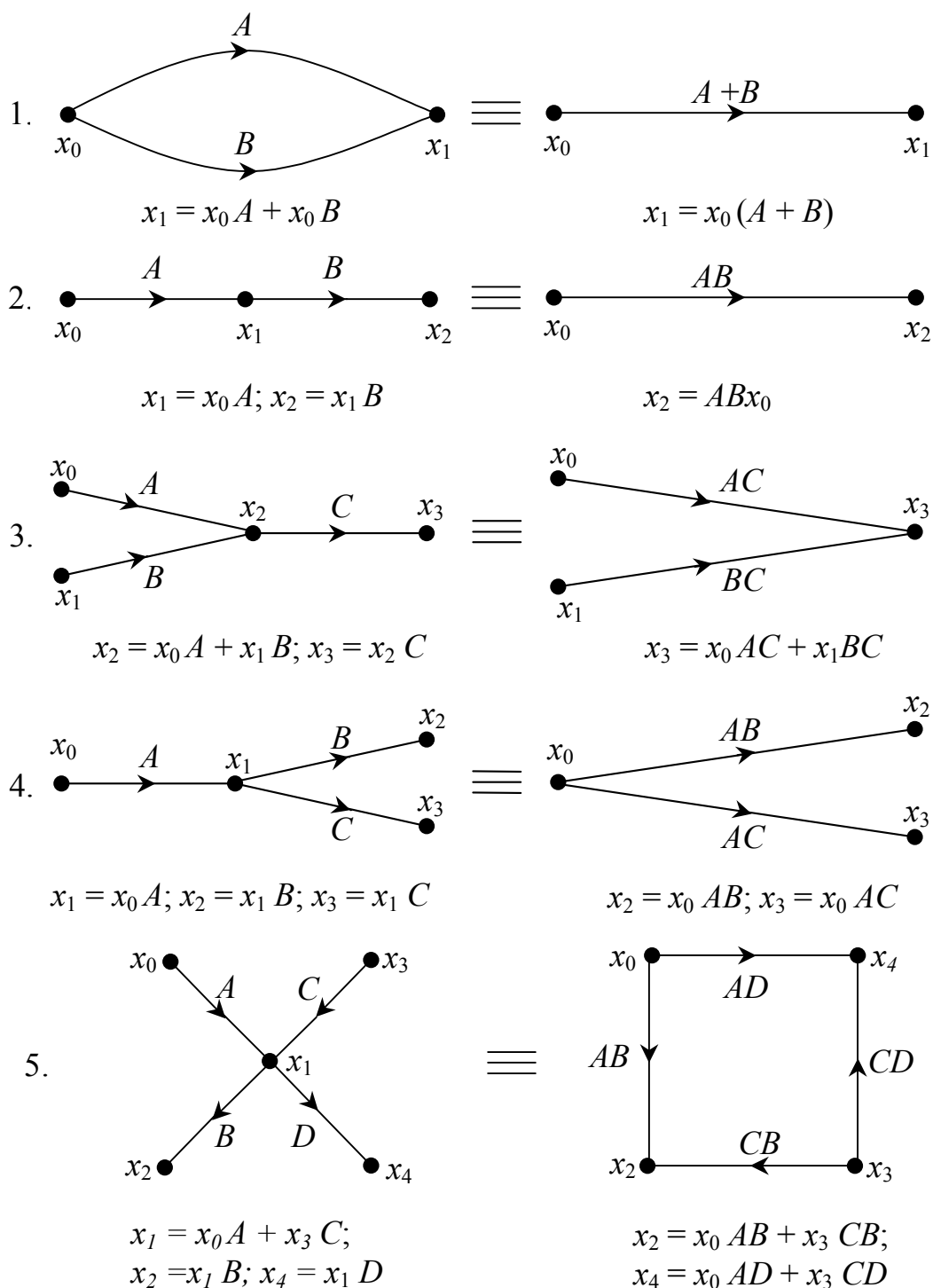


Рис. 2.4. Диаграмма прохождения сигналов для цепи, изображенной на рис. 2.3.

Полученная диаграмма содержит два контура обратной связи $i_1 \ i_2 \ U_2 \ i_1$ и $i_2 \ U_2 \ i_3 \ i_2$. Диаграмму прохождения сигналов можно упростить, пользуясь следующими правилами:



Эти преобразования позволяют заменить параллельные и последовательные пути отдельными ветвями и соответствуют исключению зависимых переменных из уравнений.

Рассмотрим ещё два основных правила преобразования ДПС, которые значительно упрощают решение задачи анализа технических объектов.

Одно из них называется инверсией пути или контура. Его применение позволяет уменьшить число контуров обратной связи и произвести взаимную замену зависимых и независимых переменных.

Для примера рассмотрим инверсию, сохраняющую узлы разомкнутого контура и контура связи.

При инвертировании ветви нужно изменить её направление на обратное и перенести концы всех ветвей, направленных первоначально к тому же узлу, что и выбранная ветвь, в конечный узел инвертированной ветви. Передача инвертированной ветви равна

обратной величине первоначальной передачи ветви; передача остальных ветвей изменяется таким образом, что общая передача от источника к стоку остается неизменной. Чтобы инвертировать путь, нужно инвертировать все ветви, входящие в этот путь.

Пусть требуется осуществить инверсию диаграммы, приведенной на рис. 2.5а.

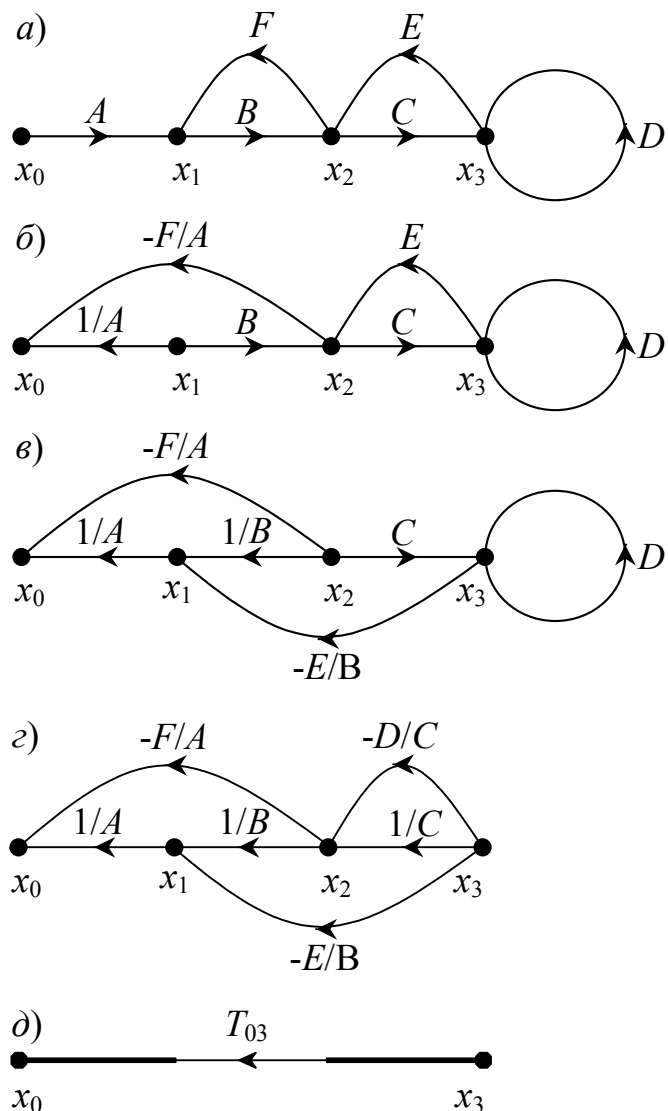


Рис. 2.5. Инвертирование пути от x_0 к x_3

Решение начнем с инвертирования ветви A , т. е. с узла x_1 . Результат инвертирования приведен на рис. 2.5б. Затем последовательно инвертируем ветви B (рис. 2.5в) и C (рис. 2.5г). После чего, последовательно применяя правила 1, 4, 1, 2, 1 преобразования диаграммы прохождения сигналов, получим диаграмму, которая записана одной ветвью (рис. 2.5д). Оператор этой ветви будет равен:

$$T_{03} = \left[\left(\frac{1}{C} - \frac{D}{C} \right) \frac{1}{B} - \frac{E}{B} \right] \frac{1}{A} - \left(\frac{1}{C} - \frac{D}{C} \right) \frac{F}{A}$$

Таким образом, инверсия в данном случае позволила устранить контуры обратной связи.

Другое правило – правило "исключающихся контуров", или правило Мэзона, позволяет свести к минимуму число математических операций, применяющихся для решения диаграммы прохождения сигналов. Математически правило Мэзона выражается формулой

$$T_{ij} = \sum_k p_k \frac{\Delta_k}{\Delta},$$

где T_{ij} – функция передачи от i -го узла j -му узлу; p_k – k -й прямой путь прохождения сигнала; Δ_k – минор определителя системы, соответствующий k -му пути; Δ – определитель системы.

При этом определитель системы может быть вычислен как единица минус сумма передач всех замкнутых контуров, плюс сумма произведений пар не касающихся контуров (контуров не имеющих общих узлов), минус сумма произведений троек не касающихся контуров, плюс и т. д.

В большинстве практических случаев оказывается, что произведения контуров второго и более высокого порядка мало влияют на величину функции передачи и поэтому могут не учитываться.

Минор Δ_k может быть получен из определителя Δ системы исключением членов, содержащих узлы, принадлежащие k -му пути.

Следует особо отметить, что определитель характеризует не какой-либо отдельный путь, а является характеристикой диаграммы прохождения сигналов в целом, т. е. системы уравнений, описывающей рассматриваемый объект.

Применение правила Мэсона позволяет непосредственно из рассмотрения диаграммы прохождения сигналов найти зависимости между любыми двумя переменными в системе уравнений.

Ориентированные графы могут быть построены и непосредственно по функциональной схеме РЭА. Любая функциональная (принципиальная) схема РЭА может быть представлена логической структурой формирования и прохождения сигналов, в которых заложена потребительская информация и информация о состоянии РЭА. Таким образом, первичным видом диагностической модели является структурная схема, она же логическая модель.

В виде ориентированного графа, дуги (ребра) которого снабжены стрелками, может быть представлена радиоэлектронная схема любой сложности. Ориентированный граф обозначают символом $G(X, V)$, где $X(x_1, \dots, x_n)$ и $V(v_1, \dots, v_m)$ – соответственно множества вершин и дуг. С понятием ориентированный граф связан термин "отображение" (рис. 2.6). Отображение показывает, каким образом вершина x_i отображается в других вершинах. Граф (рис. 2.6) имеет отображение следующего вида:

$$\Gamma x_1 = \{x_2, x_3\}, \Gamma x_2 = \{x_4, x_5\}, \Gamma x_3 = \{x_5\}, \Gamma x_4 = \{x_5\}, \Gamma x_5 = \emptyset.$$

Последнее равенство указывает на отсутствие отображения.

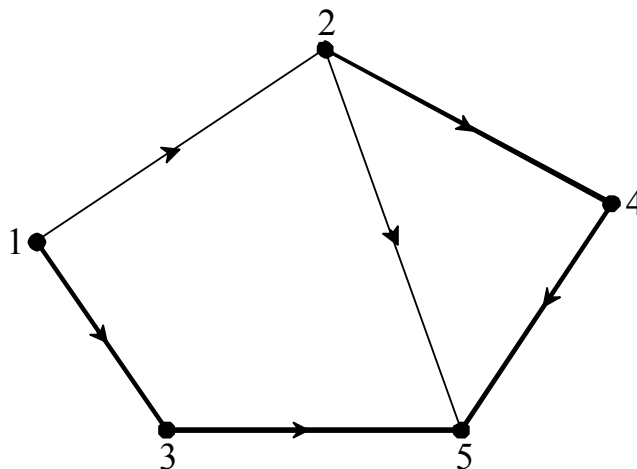


Рис. 2.6. Структура ориентированного графа

Возвращаясь к графическому представлению сложных схем, отметим, что отображение ориентированного графа $G(x, \Gamma)$ позволяет наглядно проследить взаимное влияние предыдущих выходов на последующие и определить взаимное влияние параметров.

Применение отображения функциональных схем в ориентированные графы позволяет также представить схему, как и любой граф, в виде матрицы, так называемой "матрицы смежности".

Матрица смежности графа G , состоящей из n вершин, - это квадратичная матрица $A = |a_{ij}|$ с n строками и n столбцами; ее общий элемент $a_{ij} = 1$, когда между вершинами x_i и x_j есть связь, и $a_{ij} = 0$, когда вершины x_i и x_j - не соединены дугами. Для графа на рис. 2.6 матрица смежности определяется выражением

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Строка матрицы смежности, состоящая только из нулей, свидетельствует о том, что в эту вершину отображаются все стальные.

При рассмотрении некоторых задач диагностического анализа используется особый вид графа, который называется "деревом". Особенность этого графа состоит в том, что в нем нет контуров и в вершину x_1 (корень) не заходит не одна дуга, а в каждую другую вершину заходит только одна дуга. Вершины графа, в которую дуги не заходят, называются висячими. "Дерево" является своеобразной формой описания логических возможностей схем, представляемых данным графом, и находит применение для составления различных диагностических программ.

2.4. Таблица функций неисправностей

Явную математическую модель объекта диагностирования $(\Psi, \{\Psi^i\})$, т. е. совокупность функций (2.3) и (2.4), можно представить в табличной форме.

Обозначим множество технических состояний объекта символом E . Пусть $e \in E$ обозначает исправное состояние объекта, а $e_i \in E$ - его i -неисправное состояние. Каждому i -неисправному состоянию соответствует неисправность s_i из множества S и наоборот.

Построим прямоугольную таблицу, строками которой поставим в соответствие допустимые элементарные проверки π_j из множества Π , а столбцам - технические состояния объекта из множества E или, что то же, функции Ψ и Ψ^i , $i = 1, 2, \dots, |S|$, реализуемые объектом, находящимся в исправном e или i -неисправном e_i состоянии. Будем в дальнейшем значение индекса $i = 0$ относить к столбцу исправного состояния e . В клетке (j, i) таблицы, находящейся на пересечении строки π_j и столбца e_i , проставим результат R_j^i элементарной проверки π_j объекта, находящегося в техническом состоянии e_i . Множество всех результатов $R_j^i, j = 1, 2, \dots, |\Pi|; i = 0, 1, 2, \dots, |S|$ обозначим символом R . Очевидно, $|R| = (|S| + 1)$. Построенную таблицу 2.1 будем называть *таблицей функций неисправностей* объекта диагностирования.

Заметим сразу, что непосредственное использование таблицы функций неисправностей как формы представления информации при построении и реализации алгоритмов диагностирования часто невозможно по причине высокой размерности таблицы. Однако как универсальная математическая модель объекта диагностирования таблица функций неисправностей очень наглядна и удобна при обсуждении и классификации принципов, а

также основных процедур построения и реализации алгоритмов диагностирования, даже если эти принципы и процедуры первоначально формулируются на языках, отличных от языка таблиц функций неисправностей.

Задание таблицы функций неисправностей эквивалентно заданию системы функций (2.3) и (2.4). Действительно, столбец e_0 таблицы задает поведение исправного объекта, т. е. функцию (2.3), а остальные ее столбцы – поведение объекта, находящегося в соответствующих неисправных состояниях, т. е. функции (2.4).

Таблица 2.1

R		E				
		e	\dots	e_i	\dots	$e_{ S }$
Π	π_1	R_1		R_1^i		$R_1^{ S }$
	\vdots					
	π_j	R_j		R_j^i		$R_j^{ S }$
	\vdots					
	$\pi_{ \Pi }$	$R_{ \Pi }$		$R_{ \Pi }^i$		$R_{ \Pi }^{ S }$

Для определенности примем здесь, что множество Π обладает *свойством обнаружения* любой неисправности из множества S , т. е. для любой неисправности $s_i \in S$ найдется хотя бы одна элементарная проверка $\pi_j \in \Pi$ – такая, что $R_j \neq R_j^i$, а также *свойством различения* всех неисправностей из множества S , т. е. для каждой пары неисправностей $s_i, s_k \in S, i \neq k$, найдется хотя бы одна элементарная проверка $\pi_j \in \Pi$ такая, что $R_j^i \neq R_j^k$.

Наличие у множества Π свойства обнаружения неисправностей эквивалентно тому, что столбец e таблицы функций неисправностей отличается от каждого из остальных ее столбцов $e_i, i = 1, 2, \dots, |S|$, а свойства различения – тому, что все столбцы таблицы, представляющие неисправные состояния, попарно различны.

Как всякая математическая модель объекта диагностирования, таблица функций неисправностей нужна для двух применений: для построения алгоритмов диагностирования при построении систем диагностирования и для построения физической модели объекта при реализации этих систем.

Изложим основные операции процесса построения алгоритма диагностирования по таблице функций неисправностей.

Будем предполагать, что множество S неисправностей объекта содержит либо все неисправности (при рассмотрении задач проверки исправности и поиска всех неисправностей), либо только те из них, которые нарушают работоспособность объекта (в задачах проверки работоспособности и поиска неисправностей, делающих объект неработоспособным), либо, наконец, только неисправности, нарушающие правильное функционирование объекта (при проверке правильности функционирования и при поиске неисправностей, нарушающих функционирование объекта). Это условие распространяется на множество E технических состояний объекта.

Задание на построение алгоритма диагностирования наряду с указанием множества E возможных технических состояний объекта (или множества S его неисправностей)

должно содержать сведения о требуемой глубине диагностирования. Независимо от назначения алгоритма диагностирования (для проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования или для поиска неисправностей) требуемую глубину диагностирования можно задать через фиксированное разбиение множества E на λ непересекающихся подмножеств E_v , $v = 1, 2, \dots, \lambda$,

$$\bigcup_{v=1}^{\lambda} E_v = E, \quad E_v \cap E_{\mu} = \emptyset \text{ при } v \neq \mu.$$

Тогда проверке исправности, работоспособности или правильности функционирования соответствует минимальная глубина диагностирования, при которой $\lambda = 2$, причем $E_1 = \{e\}$ и $E_2 = \{e_i / i = 1, 2, \dots, |S|\}$. При поиске неисправностей с максимальной глубиной диагностирования (т. е. с точностью до каждого одного технического состояния) $\lambda = |S| + 1$, $E_1 = \{e\}$, $E_v = \{e_i\}$, $i = 1, 2, \dots, |S|$, $v = i + 1$. Промежуточные значения глубины диагностирования характеризуются условием $2 < \lambda < |S| + 1$.

Способ задания глубины диагностирования разбиением множества E технических состояний объекта на подмножества E_v является достаточно универсальным, но он неудобен практически тогда, когда отсутствует соответствие такого разбиения разбиению объекта на конструктивные составные части. Значительно удобнее требуемую глубину диагностирования задавать через разбиение множества конструктивных компонент объекта на непересекающиеся подмножества. Например, широко известно требование проведения диагностирования с глубиной до сменного блока (узла, компоненты) объекта. Рассмотрим особенности такого способа задания глубины диагностирования.

Пусть объект разбит на N сменных блоков. Сопоставим l -му ($l = 1, 2, \dots, N$) сменному блоку подмножество E_l технических состояний, каждое из которых определяется неисправностями только этого блока. Если предположить, что в объекте может быть неисправным только один (любой) блок, то объединение N подмножеств E_l вместе с исправным состоянием e объекта образует множество E всех возможных технических состояний. Поэтому получаем: $\lambda = N + 1$, $E_1 = \{e\}$, $E_v = E_l$. Этот случай соответствует рассмотрению одиночных неисправностей объекта, если в качестве последних принять неисправности каждого сменного блока.

Иначе дело обстоит тогда, когда нельзя исключить возможность одновременного существования неисправностей в двух или большем числе сменных блоков (кратных неисправностей). При этом, кроме указанного выше формирования подмножеств E_l для каждого одного сменного блока необходимо каждой группе из двух, трех и т. д. сменных блоков сопоставить подмножества технических состояний, определяемых одновременным существованием неисправностей во всех блоках (и только в них) рассматриваемой группы. При этом будет получено $2^N - 1$ непересекающихся подмножеств технических состояний объекта, т. е. (с учетом исправного состояния e) $\lambda = 2^N$.

Итак, пусть имеется таблица функций неисправностей и задана тем или иным способом требуемая глубина диагностирования. Условимся, что в таблице нет незаполненных клеток.

Основу любого алгоритма диагностирования составляет совокупность (множество) T входящих в него элементарных проверок. Для того чтобы обеспечить требуемую глубину диагностирования, эта совокупность должна различать каждую пару технических состояний, принадлежащих разным подмножествам E_v и E_{μ} $v \neq \mu$, хотя может не различать любую пару технических состояний, принадлежащих одному и тому же подмножеству E_v . Первое условие означает, что для каждой пары технических состояний e_i и e_k , принадлежащих разным подмножествам E_v и E_{μ} , среди элементарных проверок совокупности T найдется хотя бы одна элементарная проверка t_j , результаты R_j^i и R_j^k которой различны,

т. е. $R_j^i \neq R_j^k$. Совокупность T элементарных проверок алгоритма диагностирования будем называть *полной*, если она обеспечивает проведение диагностирования либо с заданной глубиной, либо с глубиной, обеспечиваемой множеством Π всех допустимых элементарных проверок. Совокупность T называется *неизбыточной*, если удаление из нее любой одной элементарной проверки ведет к уменьшению глубины диагностирования.

По одной и той же таблице функций неисправностей и при заданном разбиении множества E на подмножества E_ν можно построить в общем случае несколько полных неизбыточных совокупностей T . Эти совокупности могут различаться как составом, так и числом входящих в них элементарных проверок. Полные неизбыточные совокупности T с наименьшим числом элементарных проверок называются *минимальными*.

Построение по таблице функций неисправностей всех полных неизбыточных (а значит, и минимальных) совокупностей T можно осуществить, выполнив следующие две операции:

- просмотром (перебором) всех возможных неупорядоченных пар столбцов таблицы функций неисправностей выделить пары e_i, e_k технических состояний, принадлежащих разным подмножествам E_ν, E_μ и для каждой такой пары просмотром (перебором) всех строк таблицы определить подмножества Π_{ik} элементарных проверок π_j , результаты R_j^i и R_j^k которых для технических состояний e_i и e_k , различны;

- просмотром (перебором) всех подмножеств Π_{ik} , полученных в результате выполнения операции 1, найти все такие совокупности T элементарных проверок, чтобы в каждой из них для каждого подмножества Π_{ik} нашлась хотя бы одна элементарная проверка t_j , принадлежащая этому подмножеству Π_{ik} .

Блок-схема алгоритма А1 выполнения операции 1 приведена на рис. 2.7. Исходными данными являются таблица функций неисправностей и разбиение множества E на подмножества E_ν . Номера столбцов таблицы отмечаются индексами $i = 0, 1, \dots, |S| - 1, k = i + 1, i + 2, \dots, |S|$, а номера ее строк – индексом $j = 1, 2, \dots, |\Pi|$.

Формальный способ выполнения операции 2 состоит в следующем. Обозначим символом U множество всех подмножеств Π_{ik} , полученных в результате выполнения операции 1. Пусть l – порядковый номер некоторого подмножества Π_{ik} как элемента $(\Pi_{ik})_l$ множества $U, l = 1, 2, \dots, |U|$. Возьмем два первых подмножества $(\Pi_{ik})_1$ и $(\Pi_{ik})_2$ и образуем все возможные пары входящих в них элементарных проверок. Среди этих пар произведем следующие упрощения: каждую пару вида (π_j, π_j) заменим одной элементарной проверкой (π_j) ; при наличии одной элементарной проверки (π_j) и пар вида (π_j, π_g) удалим последние. Полученное после таких упрощений множество пар и, возможно, одиночных элементарных проверок обозначим символом Π_1 . Затем возьмем множество $(\Pi_{ik})_3$ и построенное множество Π_1 и образуем все возможные пары их элементов. После выполнения среди этих пар упрощений, аналогичных указанным выше, получаем множество Π_2 и т. д. Подмножество $(\Pi_{ik})_l$ и множество Π_{l-1} дают множество Π_l . Каждый элемент множества $\Pi_{|U|}$ является полной неизбыточной совокупностью T элементарных проверок.

Блок-схема алгоритма А2 выполнения операции 2 изображена на рис. 2.8. Исходными данными является множество U подмножеств Π_{ik} . Индексом $l = 1, 2, \dots, |U|$ отмечен порядковый номер подмножества Π_{ik} . Знак \emptyset означает пустое множество.

Остановимся теперь на применении таблицы функций неисправностей при построении физической модели объекта в средствах диагностирования.

Определение совокупности $T \subseteq \Pi$ элементарных проверок, входящих в алгоритм диагностирования, соответствует выделению определенной совокупности строк таблицы функций неисправностей. Для алгоритмов проверки исправности, работоспособности или правильности функционирования объекта эта совокупность строк такова, что столбец e образуемой ими подтаблицы функций неисправностей отличается от любого другого ее столбца. Аналогично при поиске неисправностей с максимальной глубиной все столбцы такой подтаблицы функций неисправностей попарно различны.

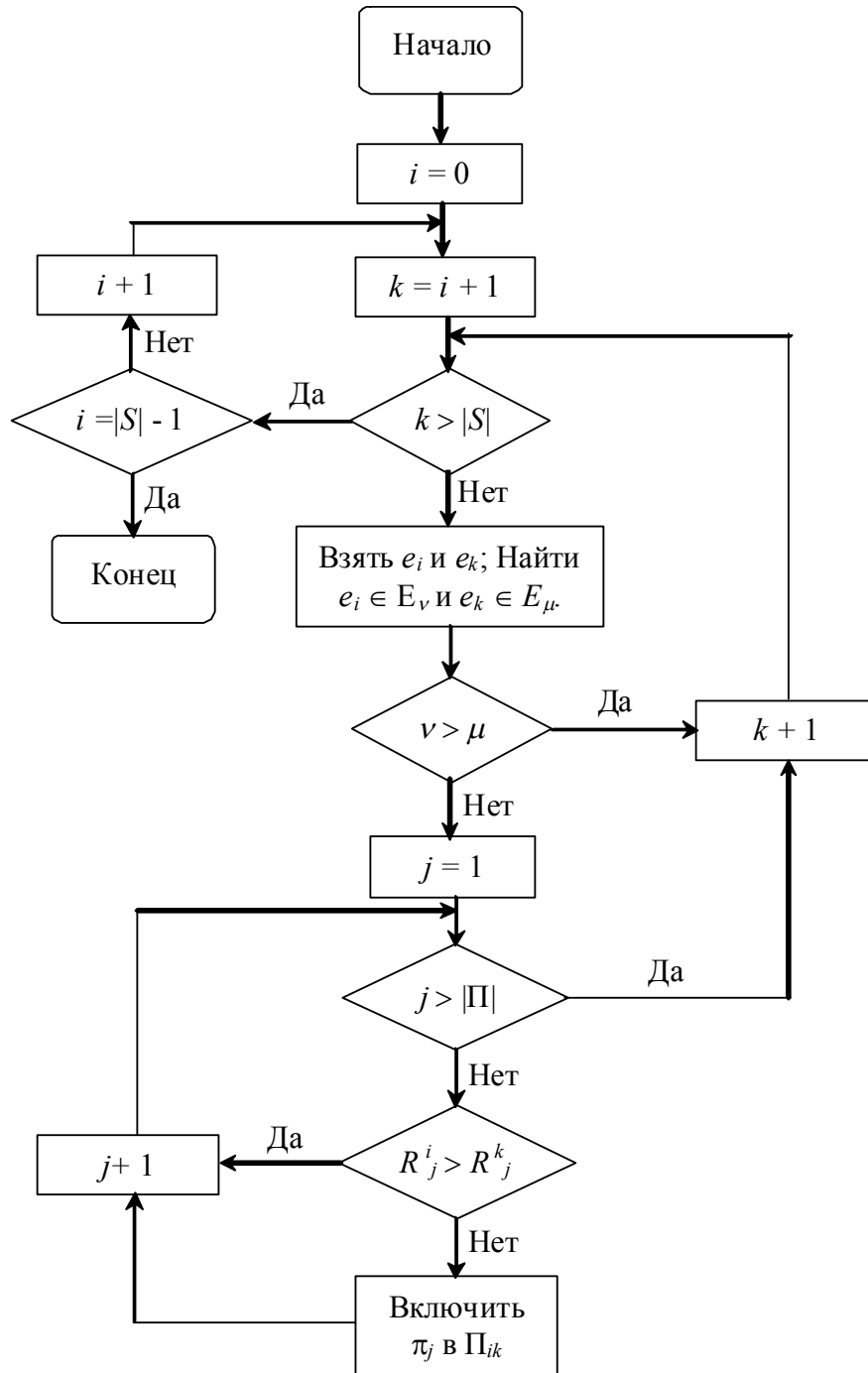


Рис. 2.7. Блок-схема алгоритма А1

Подтаблицу, образованную совокупностью T строк, будем называть T -таблицей функций неисправностей, чтобы отличать ее от исходной таблицы функций неисправностей, которую можно называть Π -таблицей.

Нетрудно видеть, что T -таблица функций неисправностей является заданием функций $R_j = \Psi(t_j)$ и $R_j^i = \Psi^i(t_j)$, определяющих физическую модель объекта в средствах диагностирования. При представлении физической модели объекта T -таблицей функций неисправностей процесс расшифровки фактических результатов R_j^* элементарных проверок можно представить следующим образом. Каждая реализованная элементарная проверка $t_j \in T$ выделяет соответствующую строку T таблицы, а ее фактический результат R_j^* делит множество столбцов таблицы на два подмножества. Те столбцы e_i , $i = 0, 1, \dots, |S|$, для которых

$R_j^i \neq R_j^*$, "вычеркиваются" из таблицы. Оставшиеся столбцы, для которых $R_j^i = R_j^*$, представляют подмножество технических состояний объекта. Завершению процесса диагностирования соответствует момент, когда в таблице останется единственный "невычеркнутый" столбец. Заметим, что "вычеркивание" столбца e означает, что объект диагностирования неисправен.

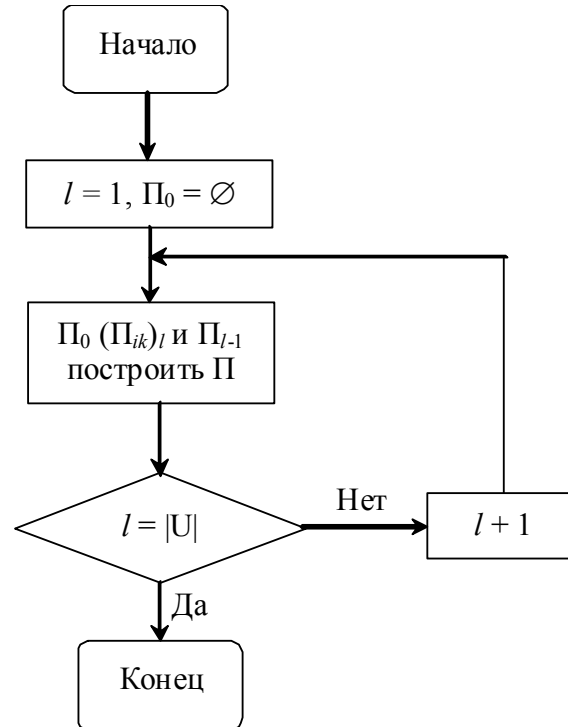


Рис. 2.8. Блок-схема алгоритма А2

Следовательно, чем меньше число строк T -таблицы функций неисправностей, тем (при прочих равных условиях) проще реализация соответствующего ей алгоритма диагностирования (во всяком случае, в системах тестового диагностирования) и представляемой ею физической модели объекта. Поэтому при проектировании систем диагностирования часто стремятся строить алгоритмы диагностирования с как можно меньшим числом входящих в них элементарных проверок.

Чем больше разнообразие (а значит, число) элементарных проверок в множестве Π , тем шире возможности получения алгоритмов диагностирования с малым числом элементарных проверок. Однако, вообще говоря, чем больше строк (а также столбцов) содержит Π -таблица функций неисправностей, тем больше требуется операций по ее обработке для построения экономных алгоритмов диагностирования. Отсюда можно сделать неформальный вывод о том, что чем больше усилий будет затрачено при построении алгоритма диагностирования, тем будет проще последующая техническая реализация системы диагностирования.

В частности, никаких усилий не требуется на построение так называемого тривиального алгоритма диагностирования, содержащего все элементарные проверки множества Π , но при этом физическая модель должна быть представлена Π -таблицей функций неисправностей и поэтому будет максимально сложной, а время и другие затраты на реализацию алгоритма диагностирования будут наибольшими.

Другая крайняя, всегда желательная, но часто недостижимая ситуация заключается в получении всех избыточных алгоритмов диагностирования с целью последующего выбора из них в каком-то смысле наилучшего (например, минимального) алгоритма. Этого можно достичь, в частности, применением алгоритмов А1 и А2, представляющих со-

бой, по существу, полный перебор всех возможных решений и поэтому требующих максимального объема операций по обработке П-таблицы функций неисправностей. Между этими двумя крайними ситуациями лежит ряд промежуточных, различающихся объемами вычислений и соответственно размерами затрат на реализацию систем диагностирования.

Чаще всего причиной вынужденного отказа от получения минимальных алгоритмов диагностирования являются большие размеры П-таблицы функций неисправностей. Размеры таблицы определяются как числом ее строк и столбцов, так и размерностью результатов $R_j, R_j^i \in R$ элементарных проверок. Рассмотрим пути уменьшения размеров П-таблицы функций неисправностей, т. е. объемов той информации, которая задается в качестве исходной для построения алгоритмов диагностирования, не имея в виду такие тривиальные возможности, как удаление повторяющихся строк и столбцов таблицы.

Начнем с уменьшения числа строк путем укрупнения элементарных проверок. Элементарная проверка выше была определена как некоторый, в значительной степени произвольный, эксперимент над объектом диагностирования. Если в качестве элементарной проверки принять такой эксперимент, реализация которого дает достаточное для целей диагностирования описание поведения объекта (в исправном и всех его неисправных состояниях), то множество П становится одноэлементным (таблица функций неисправностей содержит одну строку). Такое предельно возможное сокращение числа строк П-таблицы будет сопровождаться увеличением размерности результатов элементарной проверки, так как описание поведения объекта будет максимально сложным. При этом теряет смысл задача минимизации алгоритмов диагностирования, ибо существует единственный тривиальный алгоритм диагностирования. В этих условиях физическая модель и алгоритм диагностирования будут достаточно сложными. Тем не менее, в ряде случаев представление математической модели объекта диагностирования в виде однострочной таблицы функций неисправностей может иметь практическое значение. Это имеет место, например, в том случае, когда нецелесообразно или невозможно расчленить эксперимент над объектом на ряд элементарных проверок.

Другой путь сокращения числа строк П-таблицы функций неисправностей состоит в исключении части элементарных проверок из числа всех допустимых. Примером может служить задание только тех элементарных проверок, воздействия которых могут встретиться в процессе выполнения объектом его рабочего алгоритма функционирования. Это множество элементарных проверок может оказаться достаточным для решения задач проверки исправности, работоспособности или правильности функционирования, чего нельзя сказать относительно задач поиска неисправностей объекта.

Идеальным было бы исключение из множества П всех тех элементарных проверок, которые заведомо не войдут в минимальные алгоритмы диагностирования. Однако простые способы нахождения таких "ненужных" строк П-таблицы функций неисправностей т. е. способы, не требующие сложных процедур анализа состава и свойств всех элементарных проверок множества П, неизвестны.

Общим требованием при сокращении числа строк таблицы функций неисправностей является контроль за тем, чтобы у выбранного множества П элементарных проверок сохранялось свойство полноты. Следует также помнить, что сокращение числа строк П-таблицы, вообще говоря, может привести к увеличению числа элементарных проверок, входящих в алгоритм диагностирования.

Сокращение числа столбцов таблицы функций неисправностей соответствует уменьшению числа рассматриваемых технических состояний объекта диагностирования. В ряде случаев такое уменьшение может быть определено условиями решаемой задачи. Например, задача диагностирования технического состояния объекта в условиях его эксплуатации в ряде случаев может решаться при рассмотрении только множества O одиночных неисправностей, когда вероятности появления кратных неисправностей принимаются равным нулю.

Принципиально возможно и всегда желательно исключение "ненужных" столбцов таблицы, отсутствие которых не снижает точности результатов (глубины) диагностирования. Нахождение всех таких столбцов, к сожалению, является сложной задачей, решение которой требует специальных исследований и известно только для ряда частных случаев, при которых учитываются как свойства структуры объекта диагностирования, так и классы возможных неисправностей.

В общем случае при уменьшении числа столбцов таблицы функций неисправностей следует иметь в виду, что алгоритмы диагностирования, построенные относительно некоторого подмножества возможных технических состояний объекта, не всегда позволяют определить исключенные из рассмотрения технические состояния. Более того, необоснованное исключение столбцов таблицы может привести к получению ложных результатов диагностирования. Например, при реализации алгоритма проверки исправности, построенного в предположении наличия только одной неисправной компоненты, можно получить ложный сигнал исправности объекта при фактическом наличии в нем нескольких неисправных компонент.

Теперь остановимся на вопросе сокращения размерности результатов R_j , $R_j^i \in R$ элементарных проверок. Результат элементарной проверки π_j , как отмечалось выше, представляет собой последовательность $|\{\gamma\}_j|$ -мерных векторов значений сигналов в контрольных точках объекта. Значит, сокращение размерности результатов элементарной проверки возможно путем уменьшения размерности вектора значений указанных сигналов, а также путем уменьшения числа векторов в их последовательности.

Максимальное сокращение размерности результатов элементарных проверок П-таблицы функций неисправностей дает следующий прием. В каждой строке j таблицы все результаты элементарной проверки π_j , удовлетворяющие условию $R_j^i = R_j$, $i = 1, 2, \dots, |S|$, принимаются равными единице. Остальные результаты этой элементарной проверки, для которых имеет место неравенство $R_j^i \neq R_j$, принимаются равными нулю, независимо от того, различны они между собой или одинаковы. При этом результат любой элементарной проверки (безотносительно к физической природе воздействий и ответов, а также к составу и значениям входных сигналов и сигналов в контрольных точках) может трактоваться только как положительный ($R_j^i = 1$) или как отрицательный ($R_j^i = 0$).

Упрощенную таким образом таблицу функций неисправностей будем называть двоичной математической моделью объекта диагностирования. Заметим, что в этой модели столбец e , соответствующий исправному состоянию объекта, содержит только положительные результаты элементарных проверок.

В общем случае сокращение размерности результатов элементарных проверок сопровождается уменьшением числа различных результатов последних. Это снижает возможности различения технических состояний объекта и, как следствие, может потребовать увеличения числа элементарных проверок, входящих в алгоритм диагностирования. С другой стороны, сокращение размерности результатов элементарных проверок ведет к упрощению реализации операций передачи, измерения, сравнения и анализа этих результатов в системах диагностирования.

Конечно, всегда желательно сокращение размерности результатов элементарных проверок за счет исключения несущественных компонент векторов значений сигналов в контрольных точках и несущественных векторов этих значений, т. е. таких компонент и векторов, исключение которых не изменяет состава и числа различных результатов элементарных проверок в П-таблице.

Заметим, что "укрупнение" элементарных проверок увеличивает размерность их результатов. Максимум эта размерность, как указывалось, достигает в однострочной таблице функций неисправностей.

Итак, эффективных путей сокращения размеров таблицы функций неисправностей практически нет. Таблица остается громоздкой и поэтому требует больших объемов вычислений в процессе ее обработки. В этом состоит основная причина поиска и разработки

различных более экономных способов представления и обработки информации, необходимой для построения и реализации алгоритмов диагностирования и физических моделей объектов диагностирования. Естественно, что во многих случаях "платой" за эту экономию является отказ от получения точных (оптимальных или минимальных) решений.

Как указывалось, П-таблица функций неисправностей является табличной формой задания явной математической модели объекта диагностирования $(\psi, \{\psi_i\})$. Информацию, содержащую в П-таблице, можно получать по частям, что соответствует работе с неявной математической моделью объекта диагностирования $(\psi, S, \Pi, \Psi \xrightarrow{s_i, \Pi} \Psi^i)$.

2.5. Функционально-логические модели

При диагностировании технического состояния непрерывных объектов широкое распространение получили допусковые способы контроля.

Результаты контроля параметров во многих случаях при этом приводятся к оценкам вида "в норме – не в норме", "в допуске – не в допуске". Поэтому для описания поведения непрерывных объектов, диагноз технического состояния которых проводится допусковыми способами, естественно применять математические модели логического типа, а для анализа последних – различные логические методы.

Исходные формы представления объекта диагностирования, по которым строятся математические модели логического типа, могут быть разными. Характерными формами являются структурные, функциональные или принципиальные схемы исправного объекта, а также системы алгебраических, дифференциальных и других уравнений.

Иногда для построения моделей логического типа достаточно знания причинно-следственных связей между координатами или параметрами объекта диагностирования.

Простота математических моделей логического типа является их преимуществом. Однако вследствие этой простоты на языке таких моделей некоторые задачи диагностирования технического состояния непрерывных объектов не имеют решения. Например, при помощи логической модели место неисправности может быть указано лишь с глубиной, не превышающей части объекта, объединяющей в себе все элементы замкнутого контура обратной связи.

Решение такого рода задач требует привлечения более сложных математических моделей, описывающих поведение объекта более точно, чем логическая модель.

При решении задач диагностирования технического состояния сложных непрерывных объектов следует в первую очередь использовать модели логического типа и только при необходимости привлекать более сложные математические модели, стремясь использовать их не для объекта в целом, а только для некоторых его составных частей.

Рассмотрим формальную процедуру построения логической модели. Пусть непрерывный объект диагностирования состоит из N связанных между собой блоков. Состав блоков, связи между ними и внешние связи представляют структуру объекта. Один и тот же объект может быть представлен разными его структурами, различающимися между собой в первую очередь составом и числом блоков.

С точки зрения диагностирования технического состояния объекта при его разбиении следует учитывать такие показатели, как:

- сменность блоков;
- удобство измерения выходных параметров блоков;
- конструктивные соображения и т. п.

Будем считать, что структура объекта задана и представлена структурной схемой.

Каждый входной и выходной сигнал характеризуется, как правило, одним или несколькими физическими параметрами. Каждый из этих параметров можно представить отдельным входом (выходом) блока. Например, если блок P_i (рис. 2.9) имеет два входных сигнала x_i и y_i и один выходной сигнал z_i , каждый из которых характеризуется двумя фи-

зическими параметрами, то в функциональной схеме блок P_i будет иметь четыре входа и два выхода.

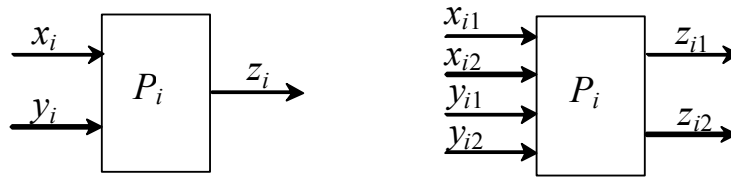


Рис. 2.9. Иллюстрация "расщепления" входов и выходов блока

Таким образом, некоторые связи структурной схемы окажутся на функциональной схеме "расщепленными".

Если некоторый выход z_i блока P_i являющийся входом y_k блока P_k , "расщепляется" на несколько выходов, то вход y_k "расщепляется" на такое же число входов.

Выполнив "расщепление" входов и выходов всех блоков и соединив между собой соответствующие друг другу "расщепленные" входы и выходы блоков, получим функциональную схему объекта диагностирования.

Следует отметить, что при построении функциональной схемы объекта указанное выше "расщепление" входов и выходов блоков структуры не является обязательным, т. е. может не выполняться совсем или выполняться частично. То есть в функциональной схеме могут быть входы и выходы, сигналы которых характеризуются несколькими физическими параметрами.

Если входные и выходные параметры блока не выходят за пределы допустимых значений, то допустимо логическое высказывание "значение входа (выхода) допустимо" или значение "истинно". В противном случае – "значение входа (выхода) не допустимо", "ложно". Тогда входные и выходные переменные можно считать двоичными логическими переменными.

Для получения логической модели объекта каждый блок P_i функциональной схемы заменяется k_i блоками, каждый из которых имеет один выход и существенные для данного выхода входы.

Обозначим блоки логической модели объекта символами Q_1, Q_2, \dots, Q_h , где

$$h = \sum_{i=1}^N k_i .$$

В общем случае каждому исходному блоку в функциональной схеме соответствует подмножество блоков логической модели из множества $\{Q_1, \dots, Q_h\}$. В частном случае, когда все блоки имеют по одному выходу, каждый из которых характеризуется одним физическим параметром, логическая модель может совпадать с функциональной схемой объекта.

Логическую модель называют правильной, если:

- для любой пары ее блоков Q_i и Q_j , у которых выход z_i одного из блоков является входом y_j другого, выполняется условие: области допустимых значений входа y_i и выхода z_i и области их недопустимых значений соответственно совпадают;

для любой пары ее блоков Q_i и Q_j , имеющих вход y_i и y_j , которые характеризуются одним и тем же параметром, выполняется условие: области допустимых значений и соответственно области недопустимых значений этих входов совпадают.

Для правильной логической модели символы внутренних входов можно заменить на символы связанных с ними выходов. На этом завершается построение логической модели.

Количество блоков в такой модели, как правило увеличивается по сравнению с исходной функциональной схемой, но ценность этой модели состоит в следующем:

- каждый выходной сигнал z_i отождествляется с результатом элементарной проверки;
- функциональная диагностическая модель может быть представлена ориентированным графом, вершины которого – блоки функционально-диагностической модели – соединены дугами, представляющими связи между блоками, входными и выходными полюсами;
- ориентированные графы на базе функционально-диагностической модели являются графоаналитическими моделями и в рамках теории подчиняются преобразованиям и упрощениям, т. е. в конечном счете оптимизации алгоритмов диагностирования;
- логическая функционально-логическая модель лежит в основе построения матрицы состояний, важного инструмента анализа объекта диагностирования и синтеза систем технического диагностирования;
- логическая функционально-диагностическая модель дает наглядное представление о точках и характере возникновения отказа, а также его проявления.

Рассмотрим пример преобразования функциональной схемы, изображенной на рис. 2.10, в логическую модель с "расщепленными" входами и выходами. Пусть входная переменная x_4 и выходная z_5 характеризуются одним параметром, а остальные входные и выходные переменные – двумя. Тогда после преобразования в соответствии с рассмотренными выше правилами получим логическую модель, изображенную на рис. 2.11.

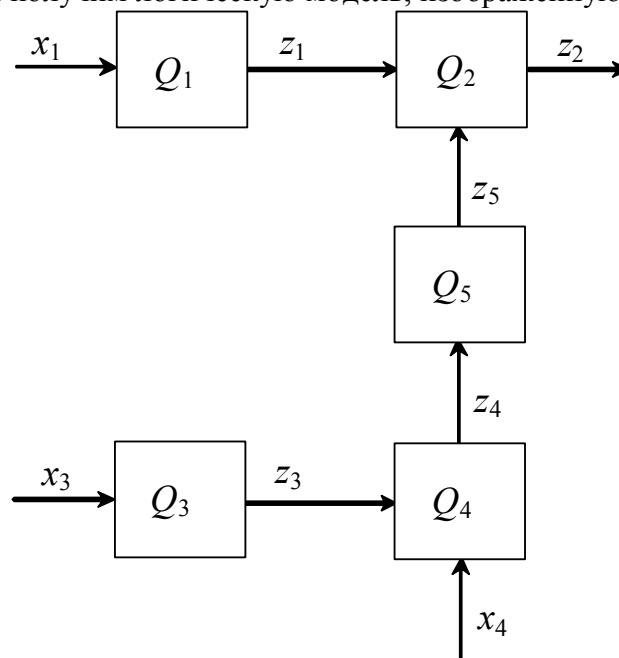


Рис. 2.10. Логическая модель объекта диагностирования

При построении логической модели "расщепление" входов и выходов не является обязательным условием. Однако при использовании в качестве модели схему, изображенную на рис. 2.10, мы можем определить неисправный блок, но не можем сказать какой из выходных параметров этого блока не в допуске

Рассмотрим характер возможных неисправностей. Введем понятие функции условий работы F_i блока Q_i , F_i – это булева функция входных переменных блока Q_i .

Предположим, что объект однорежимный, а минимальные формы функций условий работы всех блоков модели состоят из одного члена, являющегося конъюнкцией внешних и внутренних переменных, т. е. имеют вид

$$F_i = x_{i1}x_{i2} \cdots x_{in}y_{i1}y_{i2} \cdots y_{im} \quad (2.6)$$

Все возможные неисправности блока Q_i можно разбить на два класса:

- неисправности, которые приводят к появлению неправильного значения выхода $z_i = 0$ вместо ожидаемого правильного $z_i = 1$ (обозначим такую неисправность как $1 \rightarrow 0$);
- неисправности, которые переводят правильное значение $z_i = 0$ в неправильное $z_i = 1$ (обозначим $0 \rightarrow 1$).

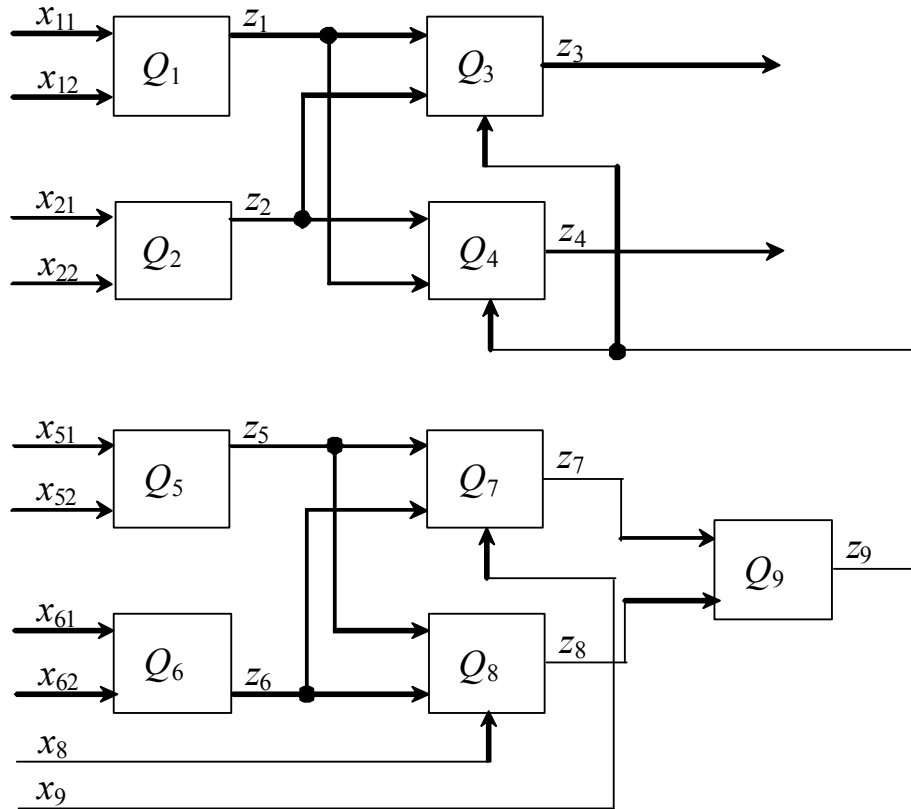


Рис. 2.11. Логическая модель с "расщепленными" входами и выходами

Для большинства реальных непрерывных объектов физически могут иметь место неисправности только типа $1 \rightarrow 0$. Исключение из рассмотрения $0 \rightarrow 1$ соответствует предположению, что никакая неисправность блока при недопустимом значении хотя бы одного входного параметра, когда согласно формуле (2.1) $F_i = 0$, не приводит к появлению допустимого значения выходного параметра. Если такое возможно, то для обработки логической модели следует пользоваться методами обработки моделей дискретных объектов диагностирования.

Фактически значение выхода z_i блока Q_i зависит от того, исправен этот блок или неисправен, а также от значения функции F_i .

Составим логическое выражение: "блок Q_i исправен" и обозначим это состояние как $Q_i = 1$; в противном случае $Q_i = 0$. Рассмотрим возможные сочетания двоичных переменных F_i и Q_i и соответствующее этому сочетанию z_i (таблица 2.2)

Формально из таблицы следует, что z_i является конъюнкцией переменных F_i и Q_i :

$$z_i = Q_i F_i \quad (2.7)$$

Физически это соответствует тому, что выход z_i блока Q_i будет допустим только в том случае, если все его входы допустимы (при этом $F_i = 1$, $Q_i = 1$).

Таблица 2.2

F_i	Q_i	z_i
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	0

При принятых условиях (объект однорежимный, условия работы всех блоков определяются (2.6), возможные неисправности только типа $1 \rightarrow 0$) задачи правильности функционирования, работоспособности и исправности объекта не различаются между собой. Не различаются и задачи поиска неисправностей.

Пользуясь функциональной моделью, можно задать все множество возможных состояний объекта. При этом мощность множества состояний $\{S_i\}$ определяется числом возможных состояний функциональных элементов модели.

Для заполнения таблицы функции неисправностей необходимо выполнить анализ логической модели. Обратимся к рис.2.10 и выпишем функции условий работы блоков модели: $F_1 = x_1$; $F_2 = z_1 z_5$; $F_3 = x_3$; $F_4 = x_4 z_3$; $F_5 = z_4$.

Составим равенства типа $z_i = Q_i F_i$:

$$z_1 = Q_1 x_1; z_2 = Q_2 z_1 z_5; z_3 = Q_3 x_3; z_4 = Q_4 x_4 z_3; z_5 = Q_5 z_4 \quad (2.8)$$

Единственным воздействием будет $x_1 = x_3 = x_4 = 1$. Заполнение клеток таблицы 2.3 можно вести либо по столбцам, либо по строкам.

При построении по столбцам задаются техническим состоянием объекта, подставляя в уравнение (2.8) соответствующие значения.

Первый столбец вычисляется при условии $Q_i = 1$ для всех i .

Второй столбец: условие $Q_1 = 0$; остальные равны единице.

Получаем: $z_1 = 0$, т. к. $Q_1 = 0$;

$z_2 = 0$, т. к. $z_1 = 0$;

$z_3 = 1$, т. к. $Q_3 = 1$, $x_3 = 1$;

$z_4 = 1$, т. к. $Q_4 = 1$, $x_4 = 1$, $z_3 = 1$;

$z_5 = 1$, т. к. $Q_5 = 1$, $z_4 = 1$.

Таблица 2.3

R							
		e	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
Π	z_1	1	0	1	1	1	1
	z_2	1	0	0	0	0	0
	z_3	1	1	1	0	1	1
	z_4	1	1	1	0	0	1
	z_5	1	1	1	0	0	0

Заполнение по строкам сводится к определению зависимости выходов блоков модели от всех переменных Q_i из уравнения (2.8):

Первая строка: $z_1 = Q_1 x_1$.

Вторая строка: $z_2 = Q_2 z_1 z_5 = Q_2 Q_1 x_1 z_5 = (Q_5 z_4) Q_1 Q_2 x_1 = Q_1 Q_2 x_1 Q_5 z_4 = (Q_4 x_4 z_3) Q_1 Q_2 Q_4 Q_5 x_1 = Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 x_1 x_3$.

И т. д.

3. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕСТОВОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.1. Системы диагностирования технического состояния

На рис. 3.1 представлены обобщенные функциональные схемы систем тестового и функционального диагностирования технического состояния. Системы содержат объект диагностирования (ОД) и средства диагностирования (СД). Условимся, что при рассмотрении задач проверки исправности, проверки работоспособности или проверки правильности функционирования объекта можно говорить не о системе, объекте и средствах диагностирования, а о системе, объекте проверки, и при рассмотрении задач поиска неисправностей – о системе, объекте и средствах поиска.

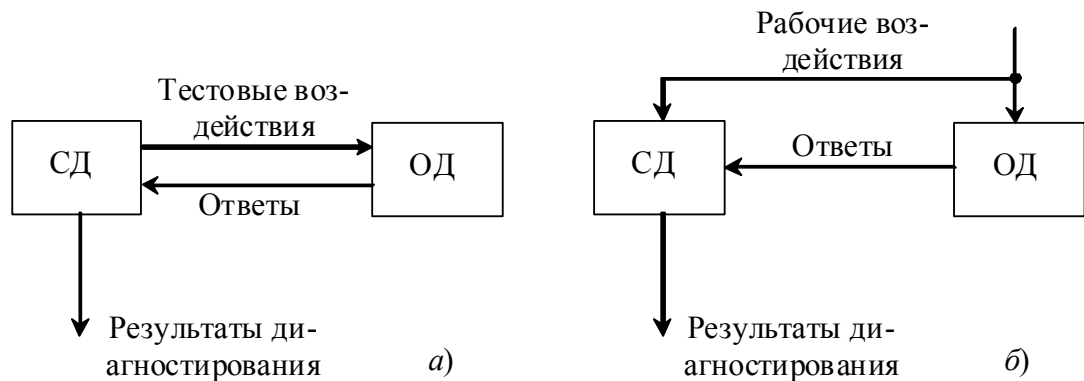


Рис. 3.1. Обобщенные функциональные схемы систем диагностирования технического состояния:

а – система тестового диагностирования;
б – система функционального диагностирования.

Как видно из рис. 3.1*а*, в системах тестового диагностирования воздействия на объект поступают от средств диагностирования. Поэтому как состав, так и последовательность подачи этих воздействий можно выбирать исходя из условий эффективной организации процесса диагностирования. Более того, каждое очередное воздействие в процессе диагностирования может назначаться в зависимости от ответов на предыдущие воздействия. Воздействия в системах тестового диагностирования будем называть *тестовыми*.

Тестовые воздействия могут подаваться как в периоды времени, когда объект не используется по прямому назначению, так и в процессе выполнения им его рабочего алгоритма функционирования. Во втором случае, однако, тестовыми воздействиями могут быть только такие сигналы, которые не мешают нормальной работе объекта.

Тестовые воздействия могут подаваться как на *основные входы объекта*, т. е. на его входы, необходимые для применения объекта по назначению, так и на *дополнительные входы*, организованные специально для целей диагностирования.

В системах функционального диагностирования (рис. 3.1*б*) воздействия, поступающие на основные входы объекта, заданы его рабочим алгоритмом функционирования и поэтому, как правило, не могут выбираться исходя из условий организации процесса диагностирования. Эти воздействия будем называть *рабочими*.

Указанная на рис. 3.1*б* подача рабочих воздействий на средства диагноза часто имеет место в системах функционального диагностирования, хотя и не является обязательной.

Отметим, что системы функционального диагностирования могут использоваться также в режимах имитации функционирования объекта. При этом, естественно, должна

быть обеспечена имитация рабочих воздействий. Такое использование систем функционального диагностирования целесообразно при наладке или ремонте объекта.

Ответы объекта (на тестовые или на рабочие воздействия) в обоих видах систем диагностирования поступают (рис. 3.1) на средства диагностирования. Ответы могут снижаться как с *основных выходов* объекта, т. е. с выходов, необходимых для применения объекта по назначению, так и с *дополнительных выходов*, организованных специально для целей диагноза. Эти основные и дополнительные выходы часто называют *контрольными точками*.

Как отмечалось, элементарные проверки объекта характеризуются воздействиями, подаваемыми или поступающими на объект, и его ответам на соответствующие воздействия; результатами элементарных проверок являются значениями ответов.

Обратимся теперь к средствам диагностирования систем, приведенных на рис. 3.1. Средства диагностирования реализуют некоторый алгоритм диагностирования, задающий состав и очередность реализации, а также способ анализа результатов элементарных проверок объекта.

Реализация элементарных проверок заключается в выработке и подаче на объект входных сигналов (воздействий) и в приеме и измерении соответствующих выходных сигналов (ответов). Указанные операции общеприняты и не нуждаются в каких-либо специальных пояснениях. Естественно, что для реализации этих операций средства диагностирования должны содержать, вообще говоря, *источники воздействий* (в системах тестового диагностирования), *измерительные устройства* и *устройства связи* источников воздействий и измерительных устройств с объектом.

Целью анализа результатов элементарных проверок является получение *результатов диагностирования*, т. е. определение технических состояний, в одном из которых фактически находится объект.

Как было сказано выше, результаты элементарных проверок представлены в виде значений сигналов в контрольных точках. Результаты же диагностирования должны быть представлены в иной форме, более удобной для практического их использования. Например, при проверке исправности результатом диагностирования должен быть один из ответов: "объект исправен" или "объект неисправен", а при поиске неисправностей – "в объекте неисправна такая-то конкретная компонента (узел, блок, деталь)". Другими словами, требуется расшифровка (анализ, преобразование) результатов элементарных проверок, полученных в процессе реализации алгоритма диагностирования.

В простейшем случае такая расшифровка может представлять обычное сравнение физических значений сигналов в контрольных точках с заданными эталонными значениями этих сигналов. В других случаях операции расшифровки являются более сложными. Заметим, что при недостаточном уровне автоматизации процесса диагностирования, в частности при использовании ручных средств диагностирования, функция расшифровки результатов элементарных проверок возлагаются на человека.

Так или иначе, для выполнения операций анализа результатов элементарных проверок средства диагностирования должны располагать определенной информацией о поведении исправного (работоспособного, правильно функционирующего) объекта, а также, возможно, о его поведении в неисправных состояниях. Аппаратуру средств диагностирования, хранящую информацию о поведении объекта, или другой носитель этой информации будем называть *физической моделью объекта*. Наглядным примером физической модели объекта является эталонный, заведомо исправный его экземпляр. Однако во многих случаях такая физическая модель информационно избыточна и зачастую трудно реализуема. В широко распространенных системах централизованного контроля, являющихся системами проверки правильности функционирования, физическая модель объекта представляет собой аппаратуру для задания допустимых значений (уставок) контролируемых параметров, а также средства коммутации и подключения этой аппаратуры к устройствам сравнения допустимых значений параметров с фактическими.

Средства, осуществляющие сопоставление информации об объекте, хранящейся в физической модели последнего, с фактическими результатами элементарных проверок и вырабатывающие сигнал "результаты диагностирования", назовем *блоком расшифровки результатов*. Как и физическая модель объекта, блок расшифровки результатов может быть реализован различными способами и средствами в зависимости от задач и характеристик конкретных систем диагностирования.

Наконец, средства диагностирования должны иметь тот или иной носитель алгоритма диагностирования. Носителем жестких или редко изменяемых алгоритмов диагностирования обычно является аппаратура, конструктивно объединенная с остальной аппаратурой средств диагностирования. Для задания сменных алгоритмов диагностирования часто применяются стандартные программносители.

Итак, по завершении процесса определения технического состояния объекта средства диагностирования вырабатывают сигнал "результаты диагностирования". Знание технического состояния объекта может быть использовано для различных целей, в том числе, например, для выбора и применения другого алгоритма диагностирования, позволяющего более точно определить техническое состояние объекта, или же для организации других специальных воздействий на объект.

3.2. Функциональные схемы систем тестового и функционального диагностирования

Рассмотрим теперь более детально функциональные схемы систем тестового и функционального диагностирования.

Будем считать, что алгоритм диагностирования, реализуемый в той или иной системе диагностирования, задан и содержит множество $T \in \Pi$ элементарных проверок.

Функциональная схема системы тестового диагностирования показана на рис. 3.2.

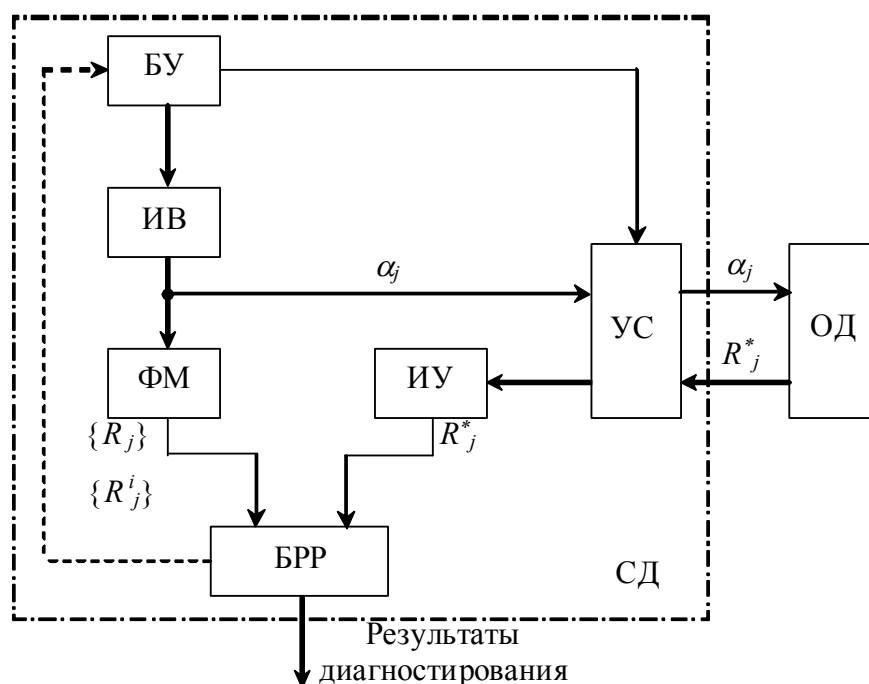


Рис. 3.2. Функциональная схема системы тестового диагностирования

По командам блока управления (БУ), хранящего алгоритм диагностирования, источник воздействий (ИВ) вырабатывает воздействия α_j элементарных проверок $t_j \in T$ и в соответствии с алгоритмом диагностирования в определенной последовательности подает их через устройство связи (УС) на объект диагностирования (ОД), а также, возможно, на

физическую модель (ФМ) объекта. В общем случае устройство связи УС может коммутировать каналы связи по сигналам блока управления.

Если, например, система рис. 3.2 решает задачу проверки исправности объекта, то реализация физической модели сводится к представлению функции

$$R_j = \Psi(t_j) \quad (3.1)$$

для всех $t_j \in T$. Для этого случая на рис. 3.2 рядом с выходом физической модели указано множество сигналов $\{R_j\}$.

При поиске неисправностей объекта возможны разные варианты процесса тестового диагностирования. Если до реализации процесса неизвестно, исправен объект или неисправен, то в физической модели должны быть представлены как зависимость (3.1), так и зависимости

$$R_j^i = \Psi^i(t_j) \quad (3.2)$$

для всех $s_i \in S$ и всех $t_j \in T$, т. е. множество всех выходных сигналов физической модели образуют множества $\{R_j\}$ и $\{R_j^i\}$.

Часто процесс тестового диагностирования организуют в два этапа: сначала реализуют алгоритм проверки исправности объекта и только в случае получения результата проверки "объект неисправен" переходят к реализации алгоритма поиска неисправностей. При наличии предварительной информации о том, что объект неисправен, для решения задачи поиска неисправностей достаточно, чтобы физическая модель реализовала только зависимости (3.2), т. е. выдавала множество сигналов $\{R_j^i\}$.

Таким образом, физическая модель объекта выдает информацию о возможных технических состояниях объекта в виде возможных результатов $\{R_j\}$, $\{R_j^i\}$ элементарных проверок из множества T . Эта информация поступает в блок расшифровки результатов (БРР).

Ответами объекта диагностирования на воздействия α_j являются фактические результаты R_j^* элементарных проверок $t_j \in T$. Эти результаты через устройство связи (УС) поступают на измерительное устройство (ИУ) и затем с выхода последнего (в некоторой, возможно, преобразованной форме) – на вход блока расшифровки результатов. Показанная на рис. 3.2 пунктиром обратная связь между блоком расшифровки результатов и блоком управления выполняется тогда, когда реализуемый в системе алгоритм диагностирования представляет собой условную последовательность элементарных проверок. В этом случае очередная элементарная проверка из множества T назначается в зависимости от фактических результатов R_j^* предшествующих ей элементарных проверок.

В блоке расшифровки результатов производится сопоставление возможных $\{R_j\}$, $\{R_j^i\}$ и фактических R_j^* результатов элементарных проверок, назначаются очередные элементарные проверки и формируются результаты диагностирования.

Функциональная схема системы функционального диагностирования показана на рис. 3.3. Характерной особенностью таких систем, как уже отмечалось, является отсутствие в средствах диагностирования источника (тестовых) воздействий. Напомним, что теперь в процессе диагностирования объект применяется по своему назначению или находится в режиме имитации такого применения: α_j являются рабочими и поступают на основные входы объекта.

С объекта снимаются, во-первых, сигналы управления средствами диагностирования (на рис. 3.3 они обозначены символом y_i) и, во-вторых, сигналы R_j^* ответов объекта на воздействие α_j . Сигналы y_j нужны тогда, когда имеется необходимость управления физической моделью ФМ и блоком управления БУ в зависимости от режима работы объекта. Блок управления по сигналам y_j , а также, возможно, по сигналам обратной связи от блока расшифровки результатов БРР осуществляет коммутацию каналов в устройстве связи УС. Если на систему функционального диагностирования возложены также функции защиты объекта, то БРР выдает команды на управление объектом.

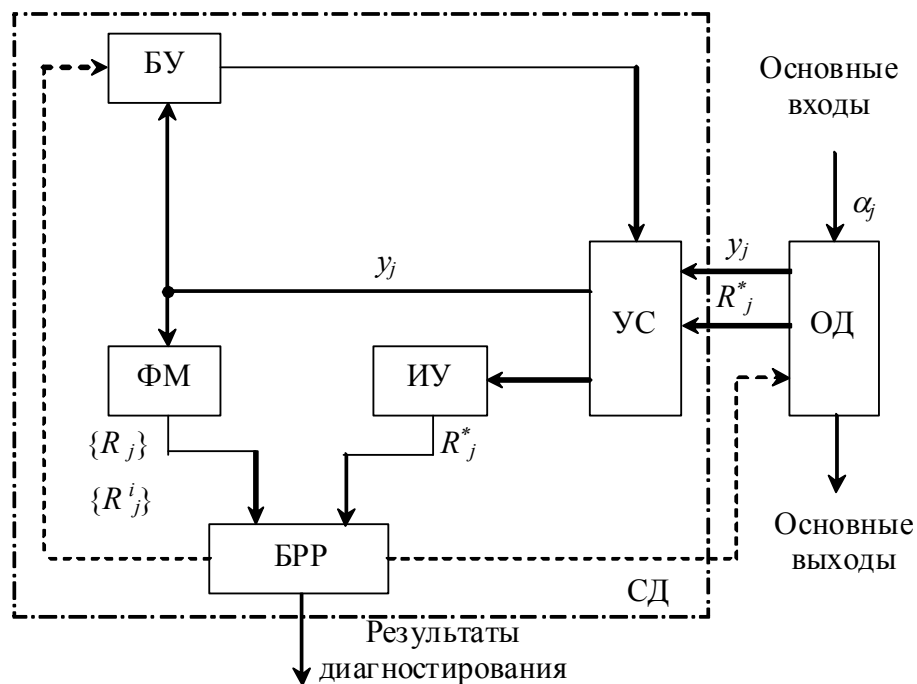


Рис. 3.3. Функциональная схема системы функционального диагностирования

Как и в системах тестового диагностирования, блок расшифровки результатов БРР производит сопоставление фактических результатов R_j^* элементарных проверок с возможными результатами $\{R_j\}$, $\{R_j^i\}$, выдаваемыми физической моделью. Когда система решает задачу проверки правильности функционирования объекта, достаточно, чтобы физическая модель хранила и выдавала только множество $\{R_j\}$ результатов. При поиске неисправностей необходимо знание также результатов $\{R_j^i\}$.

Примером систем функционального диагностирования являются широко распространенные системы централизованного контроля, в которых о техническом состоянии объекта судят по результатам сравнения фактических значений параметров объекта с их верхними и нижними допустимыми значениями. В этом случае физической моделью объекта диагностирования является аппаратура хранения и выдачи указанных допустимых значений контролируемых параметров.

Отметим, что выше были рассмотрены общие условия проведения процессов диагностирования. На практике не всегда требуется или не всегда возможно проведение диагностирования с глубиной до каждой одной неисправности $s_i \in S$ объекта (например, часто нет необходимости различать неисправности одной и той же сменной компоненты объекта). Иногда полезно обеспечить возможность формировать результаты тестового диагностирования по ходу процесса и тем самым прекращать его, не дожидаясь реализации всех элементарных проверок из множества T .

В системах функционального диагностирования не всегда можно конструктивно четко отделить аппаратуру, принадлежащую объекту диагностирования, от аппаратуры средств диагностирования. Более того, встроенные средства функционального диагностирования могут использоваться для целей тестового диагностирования, а структура функционирующего объекта диагностирования может отличаться от его структуры при тестовом диагностировании и т. п.

Представленные на рис. 3.2 и 3.3 функциональные схемы систем диагностирования могут претерпеть те или иные изменения в зависимости от того, какими являются эти системы – автоматическими, автоматизированными или ручными, какие применяются в них

средства диагностирования – универсальные (управляемые по сменной программе) или специализированные, программные или аппаратурные и т. п.

3.3. Структура системы диагностирования

Пусть задан сложный объект диагностирования. Выделим в нем такие составные части, с точностью до которых желательно проводить допусковым способом поиск дефектов при функционировании. В качестве таких частей могут быть системы, подсистемы, функциональные устройства, агрегаты, блоки, сменные узлы и т. п. Будем их все называть *сменными блоками*, подразумевая при этом, что в каждом конкретном случае сменный блок может состоять как из одного, так и из нескольких конструктивных съёмных узлов. При разбиении объекта на сменные блоки целесообразно стремиться в один блок включать все элементы, входящие в контур обратной связи. При этом существенно упрощается задача поиска дефектов с глубиной до сменных блоков, так как неисправности последних при отсутствии обратных связей всегда различимы между собой.

На рис. 3.4 схематично представлена структура системы функционального диагностирования технического состояния сложного объекта. Сменные блоки обозначены символами $P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$. Связи, существующие между блоками, на рисунке не приведены. Каждый сменный блок P_i объекта имеет в общем случае свои встроенные средства диагностирования (СД), образующие с ним локальную систему функционального диагностирования (ЛСФД). Некоторые параметры локальных систем, характеризующие работу сменного блока или его средств диагностирования, поступают непрерывно или по вызову на общие средства диагностирования (ОСД) общей системы функционального диагностирования (ОСФД) объекта в целом.

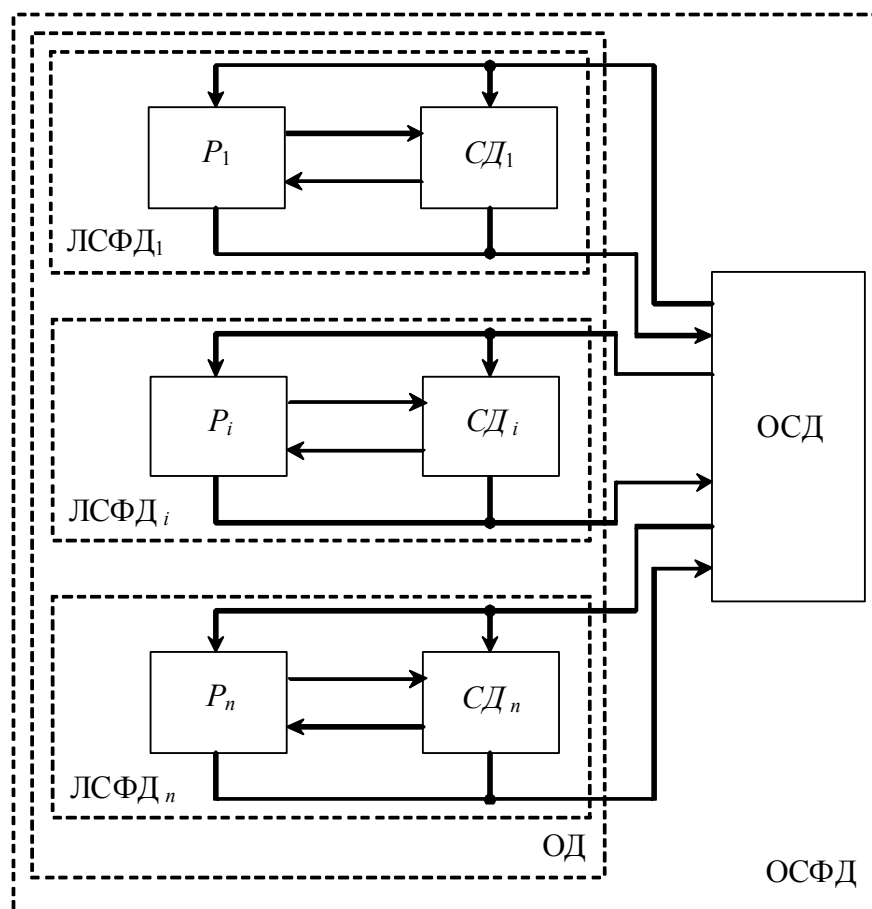


Рис. 3.4. Структура системы функционального диагностирования

Представленная на рис. 3.4 общая схема организации системы функционального диагностирования применима как для непрерывных, так и для дискретных объектов. Различие состоит в принципе построения локальных систем функционального диагностирования. Для непрерывных объектов средства ЛСФД представляют собой устройства задания предельных допустимых значений (уставок) контролируемых параметров и сравнения этих значений с фактическими.

Для дискретных объектов средства ЛСФД реализуются в виде средств внутреннего контроля (СВК). Ниже мы рассмотрим принципы организации системы функционального диагностирования применительно к непрерывным объектам.

Можно выделить два подхода к вопросу построения средств функционального диагностирования непрерывных объектов. Различие этих подходов состоит в характере распределения функций между средствами диагностирования локальных систем и средствами общей системы.

В первом случае встроенные в каждый сменный блок локальные средства диагностирования производят сравнение контролируемых параметров с допустимыми значениями и формируют обобщенный результат в виде "годен – не годен". В ОСД поступают эти обобщенные сведения о техническом состоянии сменных блоков. При возникновении дефектов в задачи ОСД входят определение неисправного сменного блока, указание места дефекта оператору и, возможно, выбор запасного режима работы объекта.

Во втором случае каждый сменный блок снабжается лишь элементами, необходимыми для нормализации контролируемых параметров. Значение параметров в виде аналоговых сигналов поступают на ОСД, где производится аналого-цифровое преобразование параметров, сравнение их значений с допустимыми значениями, выработка обобщенных сигналов о техническом состоянии объекта, а также указанные выше операции по поиску и указанию мест дефектов, по изменению режимов работы.

Системы функционального диагностирования, соответствующие первому подходу, имеют более развитые ЛСФД по сравнению с системами, соответствующими второму подходу. Однако во втором случае ОСД сложнее, чем в первом.

Опишем подробнее первый подход организации систем функционального диагностирования, не касаясь описания схем и устройств (коммутаторов, аналого-цифровых преобразователей, устройств сравнения и т. п.), применяемых для построения СД и ОСД.

Рассмотрим некоторый сменный блок P_i (рис. 3.5), имеющий входы y_{i1}, \dots, y_{iii} и выходы z_{i1}, \dots, z_{iii} .

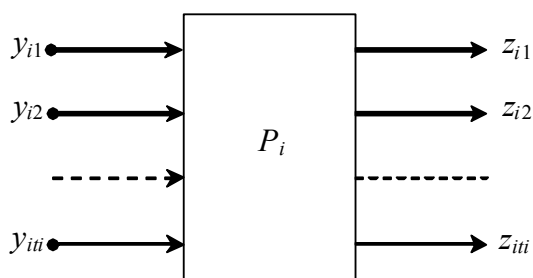


Рис. 3.5. Сменный блок объекта

Пусть в минимальную совокупность выходов, характеризующую правильное функционирование блока в одном из режимов работы объекта, входят выходы $z_i^1, z_i^2, \dots, z_i^{r_i}$, где $\{z_i^1, \dots, z_i^{r_i}\} \subseteq \{z_{i1}, \dots, z_{iii}\}$. Определим для каждого из выходных параметров $z_i^1, \dots, z_i^{r_i}$ области их допустимых значений для данного режима работы объекта. Сравнение текущих значений выбранных параметров с их допустимыми значениями производится с помощью устройств сравнения $УС_1, \dots, УС_{r_i}$ (рис. 3.6). Допустимые значе-

ния (верхний предел «>» и нижний предел «<») параметров формируются в устройстве задания уставок $УЗУ_i$ для блока P_i . Изменение значений уставок (настройка) в зависимости от режима работы объекта происходит по командам управления, поступающим из ОСД.

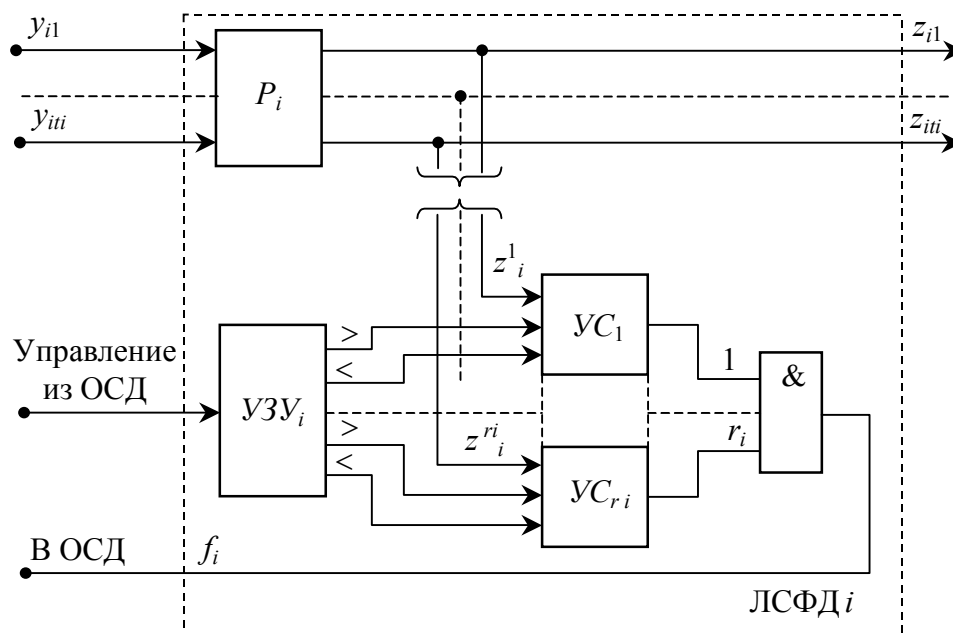


Рис. 3.6. Структура подсистемы функционального диагностирования сменного блока

Сигнал, равный единице, на выходе некоторого устройства сравнения свидетельствует о том, что соответствующий выходной параметр находится в области допустимых значений. Выходы устройств сравнения, принадлежащих одному блоку P_i , объединяются в схему совпадения, выход f_i которой идет на ОСД.

В задачи ОСД входят управление работой устройств задания уставок в зависимости от режима работы объекта, а также анализ сигналов f_i о техническом состоянии сменных блоков, поступающих из ЛСФД $_i$. В результате обработки этих сигналов ОСД выдают обобщенный сигнал о техническом состоянии объекта и в случае наличия дефекта должны указывать неисправный сменный блок.

3.4. Выделение неисправного сменного блока

При возникновении дефекта в каком-либо сменном блоке P_i на выходах блока появятся недопустимые сигналы. Последние являются входными сигналами сменных блоков, с которыми связаны выходы блока P_i . В результате может оказаться, что недопустимые выходные сигналы появятся на выходах других сменных блоков. В случае, если каждый сменный блок имеет свою ЛСФД, сигналы, равные нулю, появятся на выходах схем совпадения нескольких блоков. В связи с этим возникает задача выявления первоисточника возникновения недопустимых сигналов, т. е. задача выявления сменного блока (или группы сменных блоков, охваченных обратными связями), в котором недопустимые выходные сигналы появились за счет имеющегося в нем дефекта, а не за счет поступления на его вход недопустимых входных сигналов. Решение этой задачи возлагается на общие средства диагностирования ОСД.

Обозначим j -ю группу блоков, охваченных обратными связями, символом $P_{\Sigma j}$. Назовем блок P_j (группу $P_{\Sigma j}$ блоков) *предшественником* блока P_i , если выходы P_j ($P_{\Sigma j}$) связаны со входами P_i , при этом P_i является *последователем* P_j ($P_{\Sigma j}$). Объединим при помощи логического элемента И выходы устройств сравнения всех блоков входящих в группу $P_{\Sigma j}$, и обозначим выход этого элемента символом $f_{\Sigma j}$.

Пусть предшественниками блока P_i (группы P_{Σ_j} блоков) являются блоки (или группы блоков, охваченных обратными связями) P_{i1}, \dots, P_{il_i} . Из физических соображений следует, что блок P_i (хотя бы один блок из группы P_{Σ_j} блоков) или его СД $_i$ гарантировано неисправны, если соответствующая функция f_i (функция f_{Σ_i}) равна нулю и, кроме того, каждая из функций f_{i1}, \dots, f_{il_i} , соответствующих предшественникам блока P_i (группы P_{Σ_j} блоков), равна единице. Аналитически эти условия можно представить в виде логической функции φ_i (φ_{Σ_i}) неисправности блока P_i (группы P_{Σ_j} блоков):

$$\varphi_i = \overline{f_i} f_{i1} \dots f_{il_i}$$

$$(\varphi_{\Sigma_i} = \overline{f_{\Sigma_i}} f_{i1} \dots f_{il_i}).$$

Для получения общего сигнала φ неисправности объекта достаточно функции φ_i (φ_{Σ_i}) подать на логический элемент ИЛИ.

Пример 3.1. Построим по описанным принципам ОСД для объекта, блок-схема которого показана на рис. 3.7.

Каждый блок P_i , $i = 1, 2, \dots, 8$, имеет локальные средства диагностирования, реализующие функции f_1, \dots, f_8 . Блоки P_3 и P_4 охвачены обратной связью и поэтому образуют группу $P_{3,4}$ блоков. Блоки P_1 и P_2 предшественников не имеют. Предшественником группы $P_{3,4}$ блоков является блок P_1 , блока P_5 – блоки P_1 и P_2 , блока P_6 – блок P_2 и группа $P_{3,4}$ блоков, блока P_7 – блоки P_5 и P_6 , блока P_8 – блок P_6 .

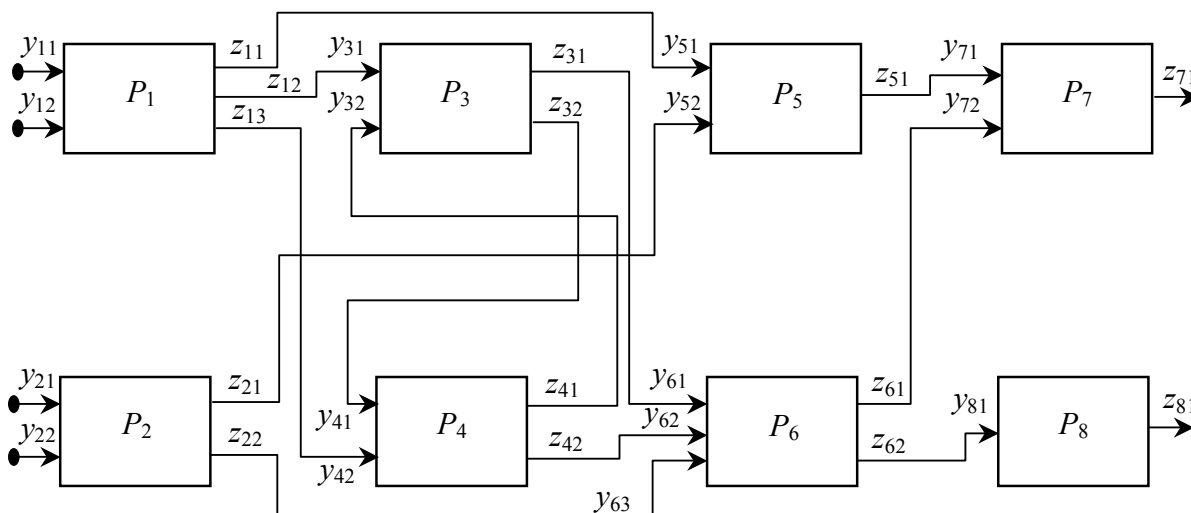


Рис. 3.7. Блок-схема объекта диагностирования

На рис. 3.8 представлена блок-схема ОСД. Блоки Q_i (Q_{Σ_i}) на блок-схеме реализуют следующие функции: φ_i (φ_{Σ_i}) от входных функций f_i (f_{Σ_i}) собственных устройств сравнения и f_{i1}, \dots, f_{il_i} устройств сравнения блоков предшественников

$$\varphi_1 = \overline{f_1}; \quad \varphi_2 = \overline{f_2}; \quad \varphi_{3,4} = \overline{f_{3,4}} f_1 = \overline{f_3 f_4} f_1; \quad \varphi_5 = \overline{f_5} f_1 f_2;$$

$$\varphi_6 = \overline{f_6} f_2 f_{3,4}; \quad \varphi_7 = \overline{f_7} f_5 f_6; \quad \varphi_8 = \overline{f_8} f_6.$$

На выходах φ_i (φ_{Σ_i}) включены сигнальные лампы. Лампа L_i (L_{Σ_i}) включается при φ_i (φ_{Σ_i}) = 1. Общий сигнал φ неисправности объекта формируется схемой ИЛИ, на входы которой поданы функции $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_{3,4}, \varphi_5, \dots, \varphi_8$.

Рассмотрим работу устройства рис. 3.8 в случае, если неисправен один сменный блок (например, блок P_6 рис. 3.7). неисправность блока P_6 приведет к тому, что какой-нибудь из его выходных параметров (z_{61} или z_{62}) или оба вместе выйдут из областей допустимых значений. В результате на выходе f_6 ЛСФД $_6$ появится сигнал равный нулю. По-

сколько блок P_6 связан с блоками P_7 и P_8 , то на входах этих блоков (или какого-нибудь одного из них) появятся недопустимые входные сигналы. Это приведет к тому, что выходные параметры сменных блоков P_7 или P_8 или обоих вместе также выйдут из областей допустимых значений. Таким образом, в зависимости от того, какие выходные параметры блока P_6 вышли из областей допустимых значений, на выходах ЛСФД 7 , ЛСФД 8 блоков P_7 и P_8 могут установиться сигналы, равные нулю или единице. Обозначим это символом x , который в данном случае будет означать: "значение сигнала равно нулю или единице".

Таким образом, с выходов ЛСФД $_{1-8}$ на ОСД поступят следующие значения сигналов: $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 1, f_6 = 0, f_7 = x, f_8 = x$. Подставляя эти значения в выражения для φ_i ($\varphi_{\Sigma i}$), получаем: $\varphi_1 = 0; \varphi_2 = 0; \varphi_{3,4} = 0; \varphi_5 = 0; \varphi_6 = 1; \varphi_7 = 0; \varphi_8 = 0$. В результате загорится единственная лампа L_6 , сигнализирующая о неисправности блока P_6 .

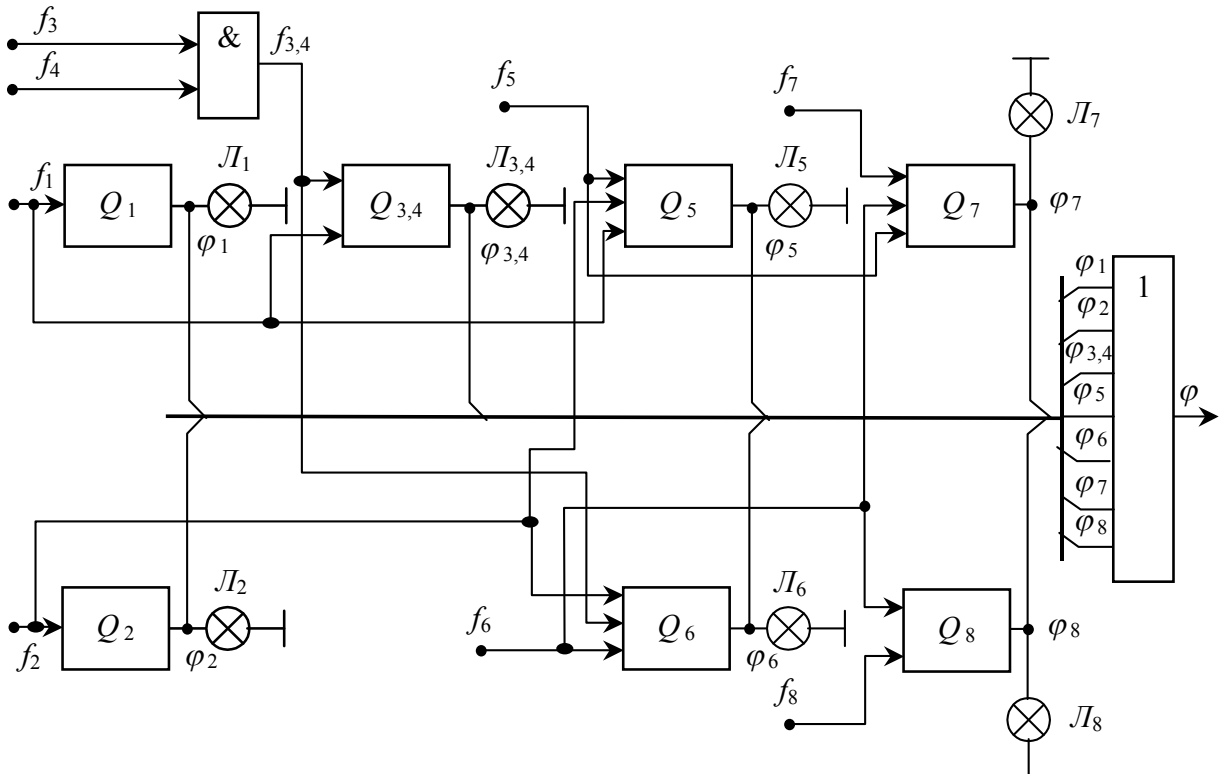


Рис. 3.8. Блок-схема средств диагностирования

В случае, если неисправны несколько сменных блоков (например, блоки P_2 и P_6), устройство всегда укажет на неисправность хотя бы одного из них. При неисправности блока P_2 и P_6 значения сигналов на выходах ЛСФД $_{1-8}$ будут следующие: $f_1 = f_3 = f_4 = 1, f_2 = f_6 = 0, f_5 = x, f_7 = x, f_8 = x$. Подставляя эти значения в выражения для φ_i ($\varphi_{\Sigma i}$), получаем: $\varphi_1 = 0; \varphi_2 = 1; \varphi_{3,4} = 0; \varphi_5 = 0; \varphi_6 = 0; \varphi_7 = 0; \varphi_8 = 0$.

В результате загорится лампа L_2 (рис. 3.8), сигнализирующая о неисправности блока P_2 . После замены неисправного блока P_2 на исправный поиск дефектов будет продолжен (загорится лампа L_6).

Если ОСФД имеют в своем составе ЭВМ, то задачу определения дефектов сменных блоков можно возложить на ЭВМ. Для этого необходимо логику работы рассмотренного устройства записать в виде алгоритма и запрограммировать последний на ЭВМ.

Для описанной ОСФД возможны как параллельная аппаратная реализация, так и последовательная. В последнем случае потребуются установка коммутаторов для опроса выходов f_i ЛСФД $_i$, а также введение в схему блоков Q_i запоминающих элементов на входах f_i .

Произведем сравнительную оценку систем функционального диагностирования, построенных в соответствии с первым и вторым подходами.

Системы, соответствующие первому подходу, обладают следующими достоинствами:

- децентрализацией средств диагностирования за счет встраивания средств ЛСФД в каждый сменный блок;
- существенным упрощением структуры ОСФД;
- уменьшением требований к быстродействию ОСД, поскольку диагностирование технического состояния объекта производится независимо ЛСФД каждого сменного блока.

Преимущества систем функционального диагностирования, соответствующих второму подходу, следующие:

- меньший объем средств диагностирования за счет централизации операций сравнения;
- дополнительные возможности унификации средств диагностирования.

4. СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

4.1. Способ последовательного функционального анализа

При построении алгоритма способом последовательного функционального анализа предварительно определяются, исходя из назначения РЭА, основные функции, характеризующие исправность диагностируемой аппаратуры, например:

- приема и преобразования сигналов заданной частоты;
- электрического питания;
- управления;
- генерирование колебаний.

Как правило, для всех физических параметров РЭА известны допустимые пределы их изменения. Следовательно, контроль работоспособности будет состоять из контроля параметров, от которых зависят основные функции. Если какая-либо основная функция не выполняется, то возникает задача поиска неисправности. В этом случае параметр, значение которого вышло за границы допусков, следует считать функцией некоторых других параметров, которые являются физическими параметрами более мелких устройств, или смежных конструктивных элементов бытовой РЭА. Продолжая аналогичные рассуждения, составляется схема контроля работоспособности и поиска неисправностей.

Рассмотрим составление алгоритма поиска неисправностей до каскада на примере канала звукового сопровождения телевизора типа УПИМЦТ. Функциональная схема канала приведена на рис. 4.1.

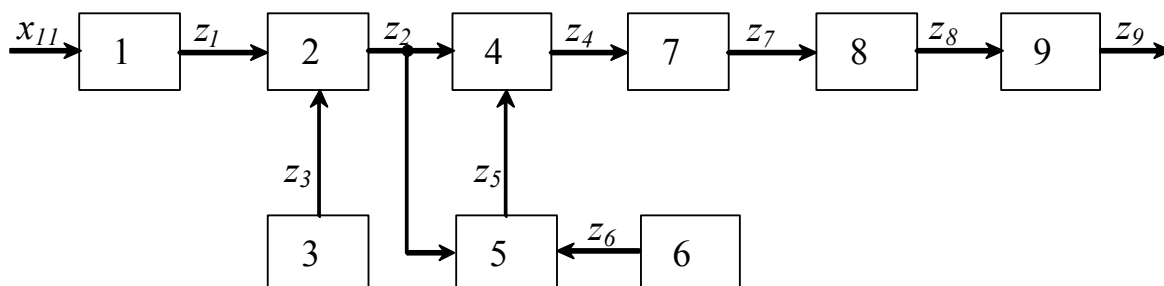


Рис. 4.1. Функциональная модель канала звукового сопровождения телевизора типа УПИМЦТ

Основной функцией этого канала является усиление и преобразование сигналов звукового сопровождения. Эта функция выполняется, если при входном сигнале с фиксированными параметрами на выходе будет наблюдаться вполне определенный сигнал. В процессе контроля этого сигнала принимается решение об исправности или неисправности канала. Последовательно контролируя сигналы на выходе каждого каскада, можно определить неисправный каскад. Получающуюся при этом схему поиска называют деревом функций (рис. 4.2), а решения представляют обычно в виде матрицы:

Обозначение по схеме	Решение
P_0	Канал звука исправен
P_1	Неисправен УЗЧ
P_2	Неисправен РГ
P_3	Неисправен фильтр
P_4	Неисправна ИМС
P_5	Неисправна схема РГ

P_6	Неисправна ИМС
P_7	Неисправен контур 6.5 МГц
P_8	Неисправен контур частотного дискриминатора

Способ последовательного функционального анализа построения алгоритма контроля работоспособности и поиска неисправности прост, нагляден, требует минимум информации от диагностируемой аппаратуры. Однако полученный с использованием этого способа алгоритм поиска неисправностей неоптимален ни по времени, ни по средним затратам.

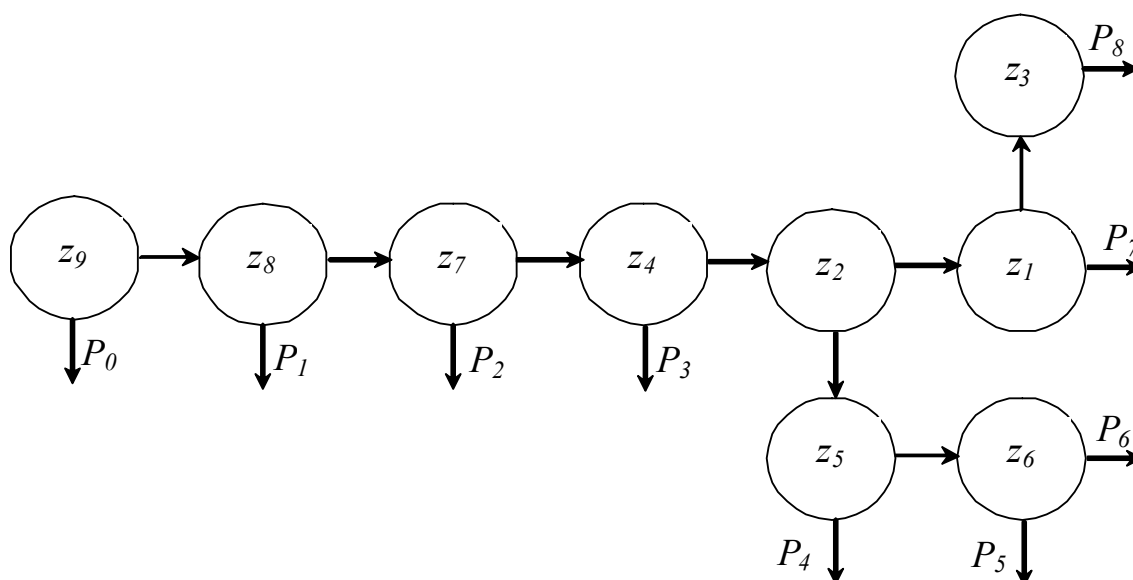


Рис. 4.2. Схема поиска неисправностей

4.2. Способ половинного разбиения

Способ половинного разбиения используется часто при разработке алгоритмов поиска неисправностей в бытовой РЭА с последовательно соединенными элементами. Рассмотрим два случая.

1. Диагностируемая аппаратура состоит из N последовательно соединенных функциональных элементов, неработоспособна из-за отказа i -го элемента ($i = 1, 2, \dots, n$). Вероятности состояний $P(S_i)$ одинаковы для всех функциональных элементов, стоимости контроля выходных параметров z_i также одинаковы. При этих условиях первым следует контролировать параметр, несущий максимум информации о состоянии диагностируемой аппаратуры, неопределенность состояния которой до контроля оценивается величиной энтропии

$$H_0 = - \sum_{i=1}^N P(S_i) \log_2 P(S_i) = \log_2 N.$$

Таким образом, целесообразно контролировать такой параметр z_k , который разбивает объект диагностики пополам, т.е. чтобы $H(z_k) = H_0/2$ при положительном и отрицательном результатах контроля. Каждый последующий параметр для контроля выбирается аналогично, т.е. делят пополам образующую систему после выполнения предыдущей проверки в зависимости от результатов ее исхода.

Пример 4.1. Для устройства, функциональная схема которого приведена на рис.4.3, способом половинного разбиения построить алгоритм поиска неисправностей.

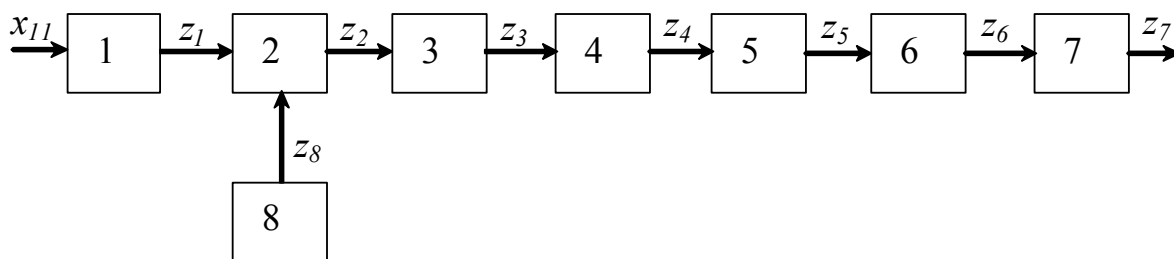


Рис. 4.3. Функциональная схема устройства

Решение. Так как диагностируемое устройство состоит из четного числа функциональных элементов, первым контролируется параметр z_3 , который разбивает диагностируемый объект пополам. При положительном исходе (z_3 в допустимых пределах) принимают, что функциональные элементы 1, 2, 3 и 8 исправны, а неисправность находится в функциональном элементе 4, 5, 6 или 7. При этом следующим будет контролироваться параметр z_5 и т.д. При отрицательном исходе параметра z_3 следующим контролируется параметр z_2 и т.д. В результате получим схему поиска неисправностей в диагностируемом устройстве (рис. 4.4).

2. Вероятности состояний $P(S_i)$ для функциональных элементов неодинаковы, тогда необходимо контролировать такой параметр z_k , который делит объект диагностики на части, вероятности состояния которых близки к 0.5. При этом неопределенность состояния диагностируемого объекта при контроле параметра z_k будет

$$H(z_k) = -[P_k \log_2 P_k + (1 - P_k) \log_2 (1 - P_k)],$$

где $P_k = \sum_{i=1}^k P(S_i)$; $i = 1, 2, \dots$

Величина $H(z_k)$, будет максимальна, если разность $P_k - 0.5$ минимальна.

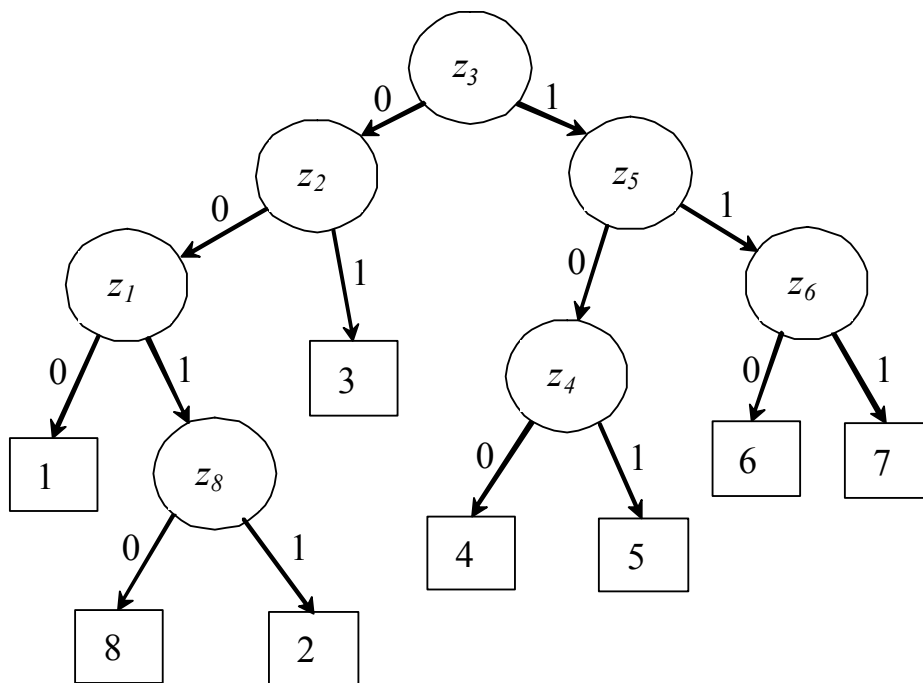


Рис. 4.4. Схема поиска неисправностей в устройстве

После контроля параметра z_k диагностируемый объект будет разделен на две части: первая содержит k , а вторая $N - k$ элементов. При выборе очередного параметра для кон-

троля необходимо вероятности состояний в каждой из этих частей пронормировать, т.е. пересчитать по формулам

$$P'(S_i) = \frac{P(S_i)}{\sum_{i=1}^{\kappa} P(S_i)}; \quad i = 1, 2, \dots, \kappa.$$

$$P''(S_i) = \frac{P(S_i)}{\sum_{i=\kappa+1}^N P(S_i)}; \quad i = \kappa + 1, \kappa + 2, \dots, N.$$

При этом

$$\sum_{i=1}^{\kappa} P'(S_i) = 1 \text{ и } \sum_{i=\kappa+1}^N P''(S_i) = 1.$$

Тогда вторым параметром выбирается z_i , который делит одну из частей на две, вероятности состояний которых

$$\sum_{i=1}^N P'(S_i) = 0.5.$$

Такое деление продолжается до тех пор, пока состояние диагностируемого объекта не будет определено с заданной глубиной.

Способ половинного разбиения применим и для случаев, когда в диагностируемой аппаратуре неисправно несколько элементов.

4.3. Способ "время-вероятность"

Этот способ находит применение для РЭА, в которой функциональные элементы соединены произвольно и имеют разные вероятности $P(S_i)$ состояний и различные стоимости проведения контроля $C(z_i)$. Эффективность способа оценивается средним временем поиска неисправного элемента или средним временем контроля одного параметра.

Для определения неисправного элемента выбирают набор параметров, обеспечивающих поиск до заданной глубины. Последовательность контроля параметров устанавливается в порядке уменьшения величин:

$$\frac{P(S_1)}{t_1} > \frac{P(S_2)}{t_2} > \dots > \frac{P(S_N)}{t_N}$$

Алгоритм, построенный по такому способу, обладает минимальным средним временем поиска любого неисправного элемента.

Пример 4.2. Для функциональной модели, приведенной на рис. 4.3, даны:

1. $P(S_1) = 0.1$; $P(S_2) = 0.25$; $P(S_3) = 0.05$; $P(S_4) = 0.08$; $P(S_5) = 0.1$; $P(S_6) = 0.15$; $P(S_7) = 0.17$; $P(S_8) = 0.1$.

2. $t_1 = t_4 = 2$ мин; $t_2 = t_6 = t_8 = 0.5$ мин; $t_3 = t_5 = t_7 = 1$ мин.

Решение. Рассчитываются отношения:

$$P(S_1)/t_1 = 0.1/2 = 0.05; \quad P(S_2)/t_2 = 0.25/0.5 = 0.5;$$

$$P(S_3)/t_3 = 0.05/1 = 0.05; \quad P(S_4)/t_4 = 0.08/0.2 = 0.04;$$

$$P(S_5)/t_5 = 0.1/1 = 0.1; \quad P(S_6)/t_6 = 0.15/0.5 = 0.3;$$

$$P(S_7)/t_7 = 0.17/1 = 0.17; \quad P(S_8)/t_8 = 0.1/0.5 = 0.2;$$

Располагая в порядке уменьшения величины $P(S_i)/t_i$, получим следующую последовательность контроля параметров:

$$z_2 \rightarrow z_6 \rightarrow z_8 \rightarrow z_7 \rightarrow z_5 \rightarrow z_1 \rightarrow z_3 \rightarrow z_4.$$

4.4. Инженерный способ

Этот способ построения алгоритмов диагностирования основан на вычислении некоторых функций предпочтения. При этом исходными данными являются функциональная модель диагностируемого объекта и таблица неисправностей.

Функция предпочтения выбирается в соответствии с решаемой задачей диагностики и исходными данными. При этом рассматриваются три случая определения параметров:

- для оценки работоспособности;
- для поиска неисправностей;
- для оценки работоспособности и поиска неисправностей.

Последовательность контролируемых параметров выбирается по экстремальным значениям выбранной функции предпочтения. Равенство некоторого ij -го матричного элемента (состояние элемента описывается символом 0 или 1) нулю означает, что отказ i -го функционального элемента влияет на выходной параметр j -го функционального элемента. Таким образом, чем больше нулей в строке z_j матрицы состояний, тем большую информацию несет данный параметр о состоянии диагностируемого объекта. Отсюда функция предпочтения при оценке работоспособности диагностируемого объекта

$$W_1 = \max_{i \in N} W_1(z_i); \quad W_1(z_i) = \sum_{j=1}^N S_0(ij), \quad (4.1)$$

где $S_0(ij) = 1$, если состояние ij -го матричного элемента описывается нулем и $S_0(ij) = 0$, если состояние матричного элемента описывается единицей.

Первым для контроля берут параметр z_i , у которого функция $W_1(z_i)$ имеет максимальное значение. В результате контроля данного параметра матрица состояний делится на две части. В одну часть входят состояния, для которых результаты контроля выбранного параметра имеют положительное, а в другую – отрицательное решение. Так как при оценке работоспособности объекта не требуется определять отдельные состояния, а нужно фиксировать только факт исправности или отказа, то в дальнейшем нужно контролировать только первую часть матрицы состояний. Для нее аналогичным образом нужно вычислить значения функции предпочтения $W_1(z_i)$ и выбрать для контроля параметр по максимуму.

Если для диагностируемого объекта известны вероятности состояний $P(S_i)$, то функция предпочтения

$$W_2 = \max_{i \in N} W_2(z_i); \quad W_2(z_i) = \sum_{j=1}^N P(S_j) S_0(ij). \quad (4.2)$$

Если для диагностируемого объекта известны вероятности состояний $P(S_i)$ и стоимости контроля параметров $C(z_i)$, то функция предпочтения

$$W_3(z_i) = \frac{\sum P(S_i) S_0(ij)}{C(z_i)}. \quad (4.3)$$

Для данных функций предпочтения алгоритм оценки работоспособности остается таким же.

Пример 4.3. Пусть объект диагностирования представлен функциональной моделью (рис. 4.5) и матрицей состояний (таблица 4.1). Требуется оценить работоспособность диагностируемого объекта.

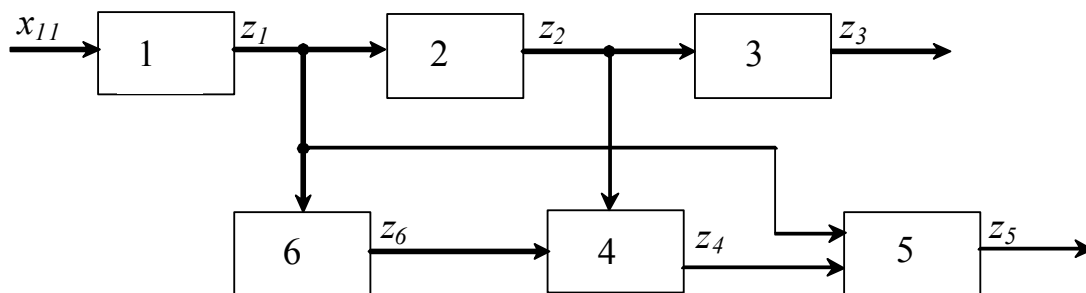


Рис. 4.5. Функциональная модель объекта диагностирования

Таблица 4.1

z_i	S_i					
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
z_1	0	1	1	1	1	1
z_2	0	0	1	1	1	1
z_3	0	0	0	1	1	1
z_4	0	0	1	0	1	0
z_5	0	0	1	0	0	0
z_6	0	1	1	1	1	0

Решение. Вычислим для каждого параметра z_i таблицы 4.1 функцию предпочтения W_i по формуле (4.1). Вычисленные значения W_i занесем в таблицу 4.2. По максимальному значению функции W_i выбираем для контроля параметр z_5 . В результате контроля z_5 матрица неисправностей делится на две части: в одну часть входит функциональный элемент 3, для которого результат контроля положителен; в другую часть входят функциональные элементы 1, 2, 4, 5 и 6, для которых результат контроля отрицателен, что означает неисправность одного из этих элементов.

Таблица 4.2

z_i	S_i						W_i
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	
z_1	0	1	1	1	1	1	1
z_2	0	0	1	1	1	1	2
z_3	0	0	0	1	1	1	3
z_4	0	0	1	0	1	0	4
z_5	0	0	1	0	0	0	5
z_6	0	1	1	1	1	0	2

Таким образом, для оценки работоспособности данного объекта диагностирования необходимо контролировать параметры z_3, z_5 .

Рассмотрим составление алгоритма поиска неисправностей без оценки работоспособности диагностируемой аппаратуры. Максимальное количество информации дает контроль параметра, который делит все возможные состояния на две равные части. Тогда функция предпочтения

$$W_4(z_i) = \min_{i \in N} \left| \sum_{j=1}^N S_0(ij) - \sum_{j=1}^N S_1(ij) \right|, \quad (4.4)$$

где $S_1(ij) = 1$, если состояние матричного элемента описывается единицей, и $S_1(ij) = 0$, если состояние элемента описывается нулем.

В результате контроля параметра z_3 таблица 4.4 делится на две части: в первую часть входят функциональные элементы 4, 5, 6 и 7, для которых результат контроля z_3 положителен, в другую часть входят функциональные элементы 1, 2, 3 и 8, для которых результат контроля отрицателен. При поиске неисправностей контролю подлежат обе части матрицы, поэтому каждую из них представим в виде таблицы: первую часть в виде таблицы 4.5, а вторую – в виде таблицы 4.6. Для каждой из полученных таблиц определим значения функции предпочтения W_4 .

По минимуму W_4 в таблице 4.5 выбираем для контроля параметр z_5 , а в таблице 4.6 – параметр z_1 .

Таблица 4.5

z_i	S_i				W_4
	S_4	S_5	S_6	S_7	
z_4	0	1	1	1	2
z_5	0	0	1	1	0
z_6	0	0	0	1	2
z_7	0	0	0	0	4

Таблица 4.6

z_i	S_i				W_4
	S_1	S_2	S_3	S_8	
z_1	0	1	1	1	2
z_2	0	0	1	0	2
z_3	0	0	0	0	4
z_8	1	1	1	0	2

В результате контроля параметра z_5 таблица 4.5 разбивается на две части: в одну часть входят элементы 6 и 7, для которых результат контроля z_5 положителен, а в другую часть – элементы 4 и 5, для которых результат контроля z_5 отрицателен. Полученные части матрицы представим в виде таблицы. 4.7 и 4.8 и найдем для этих таблиц значения функции W_4 .

Таблица 4.7

z_i	S_i		W_4
	S_6	S_7	
z_6	0	1	0
z_7	0	0	2

Таблица 4.8

z_i	S_i		W_4
	S_4	S_5	
z_4	0	1	0
z_5	0		2

По минимальному значению функции W_4 в таблице 4.7 выбираем для контроля параметр z_6 , а в таблице 4.8 – параметр z_4 . Тогда при положительном результате контроля z_6

принимая, что неисправен функциональный элемент 7, а при отрицательном – неисправен функциональный элемент 6. При положительном результате контроля параметра z_4 принимаем, что неисправен функциональный элемент 5, а при отрицательном – неисправен элемент 4.

Таблица 4.9

z_i	S_i			W_4
	S_2	S_3	S_8	
z_2	0	1	0	1
z_3	0	0	0	3
z_8	1	1	0	1

0
1

↓
↓

2

3

В результате контроля параметра z_1 таблица 4.6 разбивается на две части: одна часть, состоящая из функциональных элементов 2, 3 и 8, соответствует положительному результату контроля z_1 (таблица 4.9); вторая часть, состоящая из одного функционального элемента 1, соответствует отрицательному результату контроля и означает, что неисправен функциональный элемент 1.

Для таблицы 4.9 находим значения W_4 и по минимуму W_4 выбираем для контроля параметр z_2 . Контроль параметра z_2 требует деления таблицы 4.9 на две части: одна часть, соответствующая положительному результату контроля параметра z_2 , указывает на неисправность функционального элемента 3; другая часть, соответствующая отрицательному результату контроля параметра z_2 , включает функциональные элементы 2 и 8. Представим эту часть матрицы в виде таблицы 4.10, определим для этой таблицы значения функции предпочтения W_4 и по минимуму функции W_4 выберем для контроля параметр z_8 .

Таблица 4.10

z_i	S_i		W_4
	S_2	S_8	
z_2	0	0	2
z_8	1	0	0

1
0

↓
↓

2

8

При этом, если результат контроля параметра z_8 положителен, то принимаем, что неисправен функциональный элемент 2, а если отрицателен, то принимаем, что неисправен функциональный элемент 8.

Таким образом, на основе инженерного способа, используя функцию предпочтения (4.4), получим алгоритм контроля параметров z_i при поиске неисправностей в диагностируемом устройстве. Схема поиска неисправностей в диагностируемом устройстве показана на рис. 4.6.

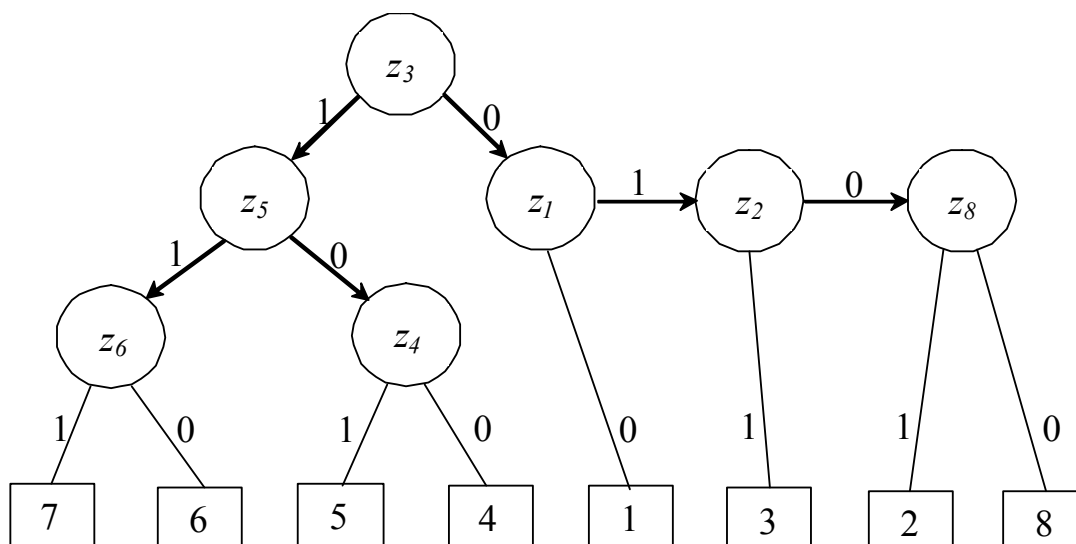


Рис.4.6. Схема поиска неисправностей в диагностируемом устройстве

При совместном контроле работоспособности диагностируемого объекта и поиска в нем неисправностей для создания алгоритма оценки работоспособности следует пользоваться функциями предпочтения

$$\begin{aligned}
 W_1(z_i) &= \max_i \sum_{j=1}^N S_0(ij); \quad i = 1, 2, \dots, N; \\
 W_2(z_i) &= \max_i \sum_{j=1}^N P(S_j) S_0(ij); \\
 W_3(z_i) &= \max_i \frac{\sum_{j=1}^N P(S_j) S_0(ij)}{C(z_i)}.
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Для поиска неисправностей следует пользоваться функциями

$$\begin{aligned}
 W_4(z_i) &= \min_i \left| \sum_{j=1}^N S_0(ij) - \sum_{j=1}^N S_1(ij) \right|; \\
 W_5(z_i) &= \min_i \left| \sum_{j=1}^N P(S_j) S_0(ij) - \sum_{j=1}^N P(S_j) S_1(ij) \right|; \\
 W_6(z_i) &= \min_i C(z_i) \left| \sum_{j=1}^N P(S_j) S_0(ij) - \sum_{j=1}^N P(S_j) S_1(ij) \right|.
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Алгоритм, построенный на основе инженерного способа, будет не всегда оптимальным, но этот способ применим для объектов различных структур.

4.5. Способ ветвей и границ

Способ построения алгоритма поиска неисправностей методом ветвей и границ используется для синтеза алгоритмов поиска неисправностей в РЭА, функциональная модель которой представляет собой произвольную структуру. Он позволяет определить наи-

лучшую последовательность поиска среди возможных. Для этого область возможных решений разбивается на все меньшие и меньшие подмножества, для каждого из которых вычисляется нижняя граница минимизируемой функции. Подмножества, у которых значения нижней границы превышают некоторое заданное значение, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет найдено точное решение, при котором значение минимизируемой функции не превышает значений нижней границы для любого подмножества.

При построении алгоритма поиска неисправностей указанным методом используются следующие исходные данные:

1. функциональная модель диагностируемого объекта;
2. таблица неисправностей с вероятностями различных состояний и стоимостями контроля выходных параметров функциональных элементов.

В общем случае очевидно, что в диагностируемом объекте, состоящем из N функциональных элементов с произвольными связями между ними, достаточно контролировать $m \leq N$ параметров. При этом некоторая последовательность контроля этих m параметров будет обладать минимальной средней стоимостью при поиске любого неисправного элемента объекта диагностирования.

Средняя стоимость произвольной программы поиска неисправностей

$$C = \sum_{i=1}^N C_i \sum_{\kappa=1}^i P(S_{\kappa}), \text{ или } C = \sum_{i=1}^N P(S_i) \sum_{\kappa=1}^i C_{\kappa}, \quad (4.9)$$

где C_i стоимость контроля i -го параметра; $\sum_{\kappa=1}^i P(S_{\kappa})$ - сумма вероятностей состояний, которые рассматриваются при контроле i -го параметра.

Диагностирование начинается с контроля любого i -го параметра, которое разбивает все множество возможных состояний S на два подмножества: $S_0(z_i)$ и $S_1(z_i)$, соответствующие отрицательному и положительному результатам контроля параметра z_i соответственно.

Последовательность контроля остальных параметров из приведенных подмножеств неизвестна, и определить значение средней стоимости алгоритма поиска невозможно. Поэтому значения средней стоимости заменяются их нижними границами $C_n(S_0)$ и $C_n(S_1)$ при контроле соответствующих параметров в подмножествах $S_0(z_i)$ и $S_1(z_i)$. Тогда нижняя граница средней стоимости всей программы поиска, которая начинается с контроля первого параметра, определяется как

$$C_n = C_i \sum_{i \in N} P(S_i) + C_n(S_0) + C_n(S_1). \quad (4.10)$$

Вычислив нижние границы стоимостей $C_n(S_0)$ и $C_n(S_1)$ для всех возможных алгоритмов поиска, выбирают первым такой параметр, контроль которого дает минимальную среднюю стоимость нижней границы алгоритма поиска.

Затем для подмножеств $S_0(z_i)$ и $S_1(z_i)$, образованных в результате контроля первого параметра z_i , вычисляют нижние границы стоимостей для всех возможных пар контролируемых параметров между первым и оставшимися для каждого подмножества.

Пусть для подмножества $S_0(z_i)$ контролируется параметр z_{κ} , а для подмножества $S_1(z_i)$ - параметр z_j . Тогда средняя стоимость нижней границы программы поиска, начинающейся с контроля i -го параметра, будет

$$C_n = C_i \sum_{i \in N} P(S_i) + C_n(z_{\kappa}, S_0) + C_n(z_j, S_1) \quad (4.11)$$

Вторым выбирается такой параметр, при контроле которого обеспечивается минимальная средняя стоимость нижней границы из всех возможных алгоритмов поиска.

Аналогичным образом выбирают третий и последующие параметры, пока получаемые при контроле подмножества будут содержать более двух состояний диагностируемого объекта.

Таким образом, алгоритм поиска неисправностей, построенный на основании выбора последовательности контролируемых параметров, дающих в среднем минимальную стоимость нижней границы, также будут обладать минимальной средней стоимостью поиска любого неисправного элемента диагностируемого объекта.

При построении алгоритма способом ветвей и границ процесс выбора последовательности контролируемых параметров обычно изображают графически в виде дерева решений. Каждая вершина этого дерева связывается с контролем некоторого параметра и нижней границей стоимости алгоритма поиска. Последовательность контролируемых параметров записывается внутри вершины, а значение стоимости нижней границы – около вершины. Вершины одного и того же ряда соответствуют одному шагу, причем в каждом ряду вершины располагаются в порядке убывания значения стоимости нижней границы слева направо. Ветви, идущие от одной вершины к другой, показывают направление движения к тому допустимому решению, которое вытекает из предыдущего. В дереве решений имеются вершины с ответвлениями и так называемые висячие вершины, из которых не исходит ни одной ветви. Последние дают или окончательное решение, не обязательно с наилучшей последовательностью контроля параметров, или решения, которые заведомо не приведут к оптимальному значению средней стоимости поиска.

Наиболее важной и существенной задачей при построении алгоритма поиска неисправностей способом ветвей и границ является вычисление стоимости нижней границы на каждом шаге контроля. Процесс вычисления значений стоимостей нижних границ при создании жестких или гибких алгоритмов несколько различается.

Пример 4.5. Построим гибкий алгоритм поиска неисправностей способом ветвей и границ для объекта диагностирования, заданного функциональной моделью (рис. 4.7), матрицей неисправностей и вероятностями состояний $P(S_i)$ (таблица 4.11). Стоимости контроля всех параметров одинаковы и равны C .

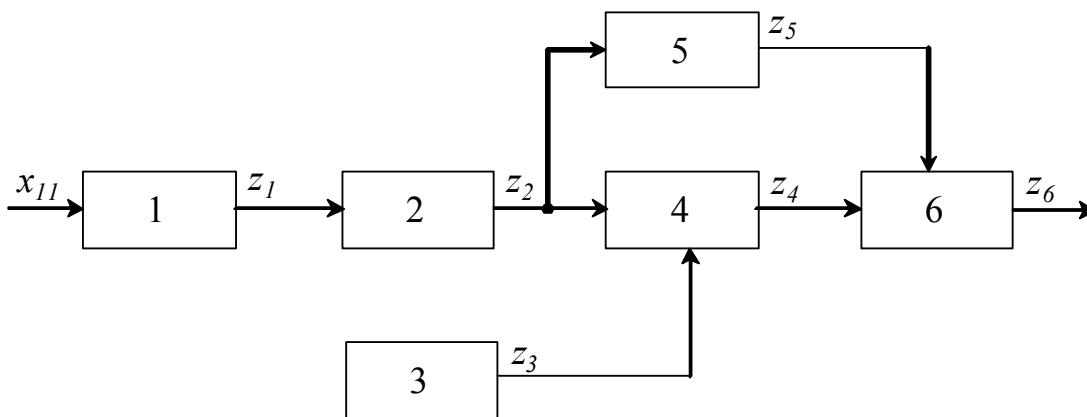


Рис. 4.7. Функциональная модель диагностируемого объекта

Для вычисления значений стоимости нижней границы подмножеств $S_0(z_i)$ и $S_1(z_i)$ необходимо выполнить следующие операции:

- расположить по возрастанию значения вероятностей диагностируемого объекта для каждого подмножества $S_0(z_i)$ и $S_1(z_i)$;
- просуммировать две наименьшие вероятности последовательности и построить новую последовательность, в которой две наименьшие вероятности заменены их суммой.

Таблица 4.11

S_i	z_i						$P(S_i)$
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	
S_1	0	0	1	0	0	0	0.2
S_2	1	0	1	0	0	0	0.05
S_3	1	1	0	0	1	0	0.24
S_4	1	1	1	0	1	0	0.15
S_5	1	1	1	1	0	0	0.06
S_6	1	1	1	1	1	0	0.3

Процесс построения последовательностей и суммирование вероятностей заканчиваются, когда в последовательности остается одно значение вероятности. Тогда значения стоимостей нижних границ для подмножеств $S_0(z_i)$ и $S_1(z_i)$ при контроле параметра z_i будут

$$C_n(S_0) = C \sum_{\lambda=1}^{l-1} P_{\lambda}^* ; \quad C_n(S_1) = C \sum_{\nu=1}^{N-l-1} P_{\nu}^* , \quad (4.12)$$

где P_{λ}^* и P_{ν}^* - сумма двух наименьших вероятностей состояний λ -й последовательности подмножества $S_0(z_i)$ и ν -й последовательности подмножества $S_1(z_i)$ соответственно; l - количество состояний, соответствующих отрицательному результату контроля параметра z_i .

Следовательно, нижняя граница средней стоимости всего алгоритма поиска, начинающегося с контроля параметра z_i , будет

$$C(z_i) = C \left[\sum_{i \in N} P(S_i) + \sum_{\lambda=1}^{l-1} P_{\lambda}^* + \sum_{\nu=1}^{N-l-1} P_{\nu}^* \right]. \quad (4.13)$$

Пусть первым контролируется параметр z_1 . Тогда множество возможных состояний разбивается на два подмножества: $S_0(z_1)$ и $S_1(z_1)$. Для подмножества $S_0(z_1)$ последовательность значений вероятностей будет состоять из одного значения $P(S_1) = 0.2$, а для подмножества $S_1(z_1)$ составим первую последовательность: $P(S_2) = 0.05$; $P(S_5) = 0.06$; $P(S_4) = 0.15$; $P(S_3) = 0.24$; $P(S_6) = 0.3$. Затем определим сумму двух наименьших вероятностей: $P_1^* = 0.05 + 0.06 = 0.11$.

Составим вторую последовательность: $P_1^* = 0.11$; $P(S_4) = 0.15$; $P(S_3) = 0.24$; $P(S_6) = 0.3$. Затем определим $P_2^* = 0.11 + 0.15 = 0.26$.

Составим третью последовательность: $P(S_3) = 0.24$; $P_2^* = 0.26$; $P(S_6) = 0.3$. Затем определим $P_3^* = 0.24 + 0.26 = 0.5$.

И наконец, составим четвертую последовательность: $P(S_6) = 0.3$; $P_3^* = 0.5$ и определим $P_4^* = 0.3 + 0.5 = 0.8$.

При этом нижняя граница средней стоимости

$$C_n(z_1) = C \left[\sum_{i=1}^N P(S_i) + \sum_{\lambda=1}^0 P_{\lambda}^* + \sum_{\nu=1}^{6-1-1} P_{\nu}^* \right] = C(1 + 0 + 1.67) = 2.67C .$$

Следует указать, что если подмножество $S_0(z_i)$ содержит одно состояние, нижняя граница стоимости $C_n(S_0) = 0$, а если $S_1(z_i)$ содержит одно состояние, то $C_n(S_1) = 0$.

Разделение множества возможных состояний на два подмножества $S_0(z_1)$ и $S_1(z_1)$ при контроле параметра z_1 показано в таблице 4.11.

При контроле параметра z_2 множество возможных состояний разбивается на два подмножества: $S_0(z_2)$ и $S_1(z_2)$ (таблица 4.12).

Таблица 4.12

S_i	z_i					$P(S_i)$	
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5		
S_1	0	0	1	0	0	0.2	$S_0(z_2)$
S_2	1	0	1	0	0	0.05	
S_3	1	1	0	0	1	0.24	$S_1(z_2)$
S_4	1	1	1	0	1	0.15	
S_5	1	1	1	1	0	0.06	
S_6	1	1	1	1	1	0.3	

Для подмножества $S_0(z_2)$ последовательность значений вероятностей будет состоять из двух значений: $P(S_2) = 0.05$; $P(S_1) = 0.2$, и тогда $P_1^* = 0.05 + 0.2 = 0.25$.

Для подмножества $S_1(z_2)$ первая последовательность будет иметь вид $P(S_5) = 0.06$; $P(S_4) = 0.15$; $P(S_3) = 0.24$; $P(S_6) = 0.3$, и тогда $P_1^* = 0.21$; $P_2^* = 0.45$; $P_3^* = 0.75$.

Следовательно, нижняя граница средней стоимости при контроле параметра z_2 будет равна

$$C_H(z_2) = C \left[\sum_{i=1}^N P(S_i) + \sum_{\lambda=1}^1 P_{\lambda}^* + \sum_{\nu=1}^{6-2-1} P_{\nu}^* \right] = C(1 + 0.25 + 1.41) = 2.66C.$$

Поступая аналогичным образом при контроле параметров z_3 , z_4 и z_5 , получим нижние границы стоимости при контроле соответствующих параметров: $C_H(z_3) = 2.59C$; $C_H(z_4) = 2.6C$; $C_H(z_5) = 2.5C$.

Из результатов вычислений нижних границ средней стоимости следует, что минимальной стоимостью будет обладать алгоритм поиска, начинающийся с контроля параметра z_5 .

Построим матрицу (таблица 4.13) состояний подмножеств $S_0(z_5)$ и $S_1(z_5)$.

Таблица 4.13

S_i	z_i					$P(S_i)$
	z_5	z_1	z_2	z_3	z_4	
S_1	0	0	0	1	0	0.2
S_2	0	1	0	1	0	0.05
S_5	0	1	1	1	1	0.06
S_3	1	1	1	0	0	0.24
S_4	1	1	1	1	0	0.15
S_6	1	1	1	1	1	0.3

Анализируя таблицу 4.13, видим, что в случае отрицательного исхода при контроле параметра z_5 следующими можно контролировать параметры z_1 , z_2 , z_4 . Параметр z_3 контролировать не имеет смысла, так как подмножество $S_0(z_5)$ не разбивается при ее контроле на более мелкие подмножества. При положительном исходе можно контролировать параметры z_3 , z_4 .

Таким образом, необходимо вычислить значения стоимостей нижних границ алгоритма поиска при контроле таких наборов параметров: z_5, z_1, z_3 ; z_5, z_1, z_4 ; z_5, z_2, z_3 ; z_5, z_2, z_4 . Для этого воспользуемся формулой

$$C_H(z_i, z_k, z_j) = C \sum_{i \in N} P(S_i) + C_H[z_k, S_0(z_i)] + C_H[z_j, S_1(z_i)],$$

где

$$C_H[z_k, S_0(z_i)] = C \sum_{S_k \in S_i^0} P(S_k) + C_H(S_k^{00}) + C_H(S_k^{01});$$

$$C_H[z_j, S_1(z_i)] = C \sum_{S_j \in S_i^1} P(S_j) + C_H(S_j^{10}) + C_H(S_j^{11}),$$

где $\sum_{S_k \in S_i^0} P(S_k)$ и $\sum_{S_j \in S_i^1} P(S_j)$ - суммы вероятностей $P(S)$ диагностируемого объекта, которые различаются контролем параметров z_k и z_j в подмножествах S_i^0 и S_i^1 соответственно.

Вычислим значения стоимостей нижних границ при контроле параметров z_5, z_1, z_3 . Контроль параметра z_1 позволяет различать состояния S_1, S_2, S_5 , следовательно,

$$\sum_{S_k \in S_i^0} P(S_k) = P(S_1) + P(S_2) + P(S_5) = 0.2 + 0.05 + 0.06 = 0.31.$$

Также при контроле параметра z_1 выделяется из подмножества $S_0(z_5)$ только одно состояние S_1^{00} , тогда $C_H(S_1^{00}) = 0$, а значение $C_H(S_1^{01})$ вычисляется аналогичным образом, как и $C_H(S_i^0)$:

$$C_H(S_1^{01}) = C \sum_v^k P_v^* = C[P(S_2) + P(S_5)] = C(0.05 + 0.06) = 0.11C.$$

При контроле параметра z_3 различаются состояния S_3, S_4, S_6 , следовательно,

$$\sum_{S_j \in S_i^1} P(S_j) = P(S_3) + P(S_4) + P(S_6) = 0.24 + 0.15 + 0.3 = 0.69.$$

Кроме того, при отрицательном исходе из подмножества $S_1(z_5)$ выделяется только одно состояние, а при положительном – два, следовательно,

$$C_H(S_j^{10}) = C_H(S_3^{10}) = 0;$$

$$C_H(S_j^{11}) = C \sum_v^k P_v^* = C[P(S_4) + P(S_6)] = C(0.15 + 0.3) = 0.45C.$$

Тогда значение стоимости нижней границы при контроле параметров z_5, z_1, z_3 будет равно

$$C_H(z_5, z_1, z_3) = C(1 + 0.31 + 0.11 + 0.69 + 0.45) = 2.56C.$$

При контроле других последовательностей параметров вычисления осуществляются аналогично. Приведем результаты этих вычислений:

$$C_H(z_5, z_1, z_4) = 2.5C;$$

$$C_H(z_5, z_2, z_4) = 2.64C;$$

$$C_H(z_5, z_2, z_3) = 2.7C.$$

Анализ результатов вычислений стоимостей нижних границ показывает, что минимальной стоимостью будет обладать последовательность параметров z_5, z_1, z_4 .

Преобразуем таблицу неисправностей в соответствии с результатами контроля последовательности параметров z_5, z_1, z_4 (таблица 4.14).

Из таблицы видно, что при отрицательном исходе контроля параметров z_5 и z_1 выделяется состояние S_1 , а при отрицательном исходе контроля z_5 и положительном z_1 необходимо следующим контролировать параметр z_2 (контроль параметра z_3 не позволяет разделить подмножество S^{01} на более мелкие).

Таблица 4.14

S_i	z_i					$P(S_i)$	
	z_5	z_1	z_4	z_2	z_3		
S_1	0	0	0	0	1	0.2	$S^{00}(z_5, z_1)$
S_2	0	1	0	0	1	0.05	$S^{01}(z_5, z_1)$
S_3	0	1	1	1	1	0.24	
S_4	1	1	0	1	0	0.15	$S^{10}(z_5, z_4)$
S_5	1	1	0	1	1	0.06	
S_6	1	1	1	1	1	0.3	$S^{11}(z_5, z_4)$

При положительном исходе контроля параметров z_5 и z_4 выделяется состояние S_6 , а при положительном исходе контроля параметра z_5 и отрицательном z_4 необходимо контролировать параметр z_3 . Поскольку других вариантов нет, на этом заканчивается построение алгоритма поиска неисправностей, обладающего минимальной средней стоимостью (рис.4.8).

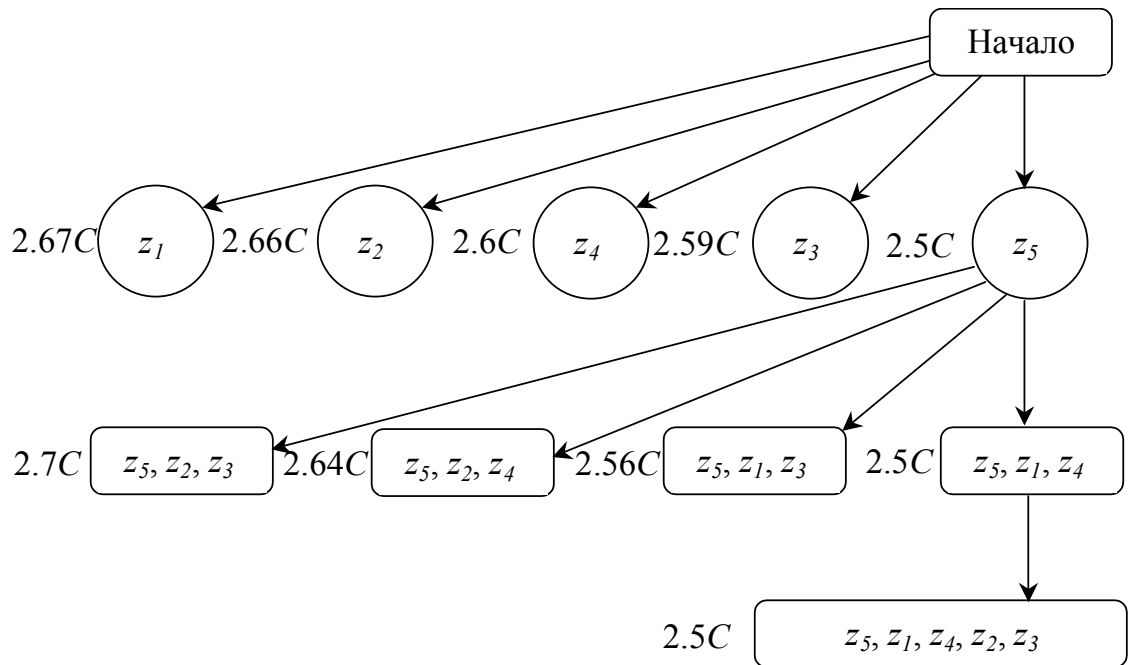


Рис. 4.8. Схема алгоритма поиска неисправностей

Таким образом, последовательность контролируемых параметров z_5, z_1, z_4, z_2, z_4 дает среднюю стоимость $C_{cp} = 2.5C$.

Отметим, что при построении алгоритма поиска неисправностей этим методом значение средней стоимости нижней границы на последующих шагах всегда не меньше значения средней стоимости нижней границы на предыдущих шагах: $C_H(z_i, z_k, z_j) \geq C_H(z_i)$. Это условие используют для контроля правильности выполнения вычислений.

Приведенный вычислительный пример показывает, что применение способа ветвей и границ для построения алгоритмов поиска неисправностей в РЭА связано с большим объемом вычислений, которое значительно возрастает при увеличении числа функциональных элементов в диагностируемой аппаратуре. Поэтому реализация этого метода связана с применением вычислительных машин.

При неравных стоимостях контроля параметров стоимость нижней границы алгоритма поиска, начиная с контроля параметра z_i , вычисляется по формуле

$$C_H(z_i, S) = C_i \sum_{S_i \in S_k} P(S_i) + \sum_{\lambda=1}^{l-1} P_{\lambda}^* C_{l-\lambda}^* + \sum_{v=1}^{\kappa-l-1} P_v^* C_{\kappa-l-\lambda}^* \quad (4.14)$$

где κ – количество различных состояний диагностируемого объекта при контроле параметра z_i ; l – число различных состояний при отрицательном исходе контроля параметра z_i ; C^* – значение стоимости контроля в упорядоченной последовательности стоимостей $C_1^* < C_2^* < \dots < C_{\lambda}^* < \dots < C_l^*$.

4.6. Способ на основе иерархического принципа

Построение алгоритмов диагностирования по иерархическому принципу целесообразно использовать для бытовой РЭА со встроенными устройствами контроля. При данном способе N первичных функциональных элементов диагностируемого объекта разбиваются на κ групп по N_1 элементов в каждой группе. Выходные параметры первичных функциональных элементов объединяются в одной точке с измерительным устройством и индикатором неисправности. Таких индикаторов будет κ штук. Последние еще разбиваются на r групп по N_2 штук. Выходы N_2 индикаторов снова объединяются в одной точке с одним индикатором. Таких индикаторов будет r штук и т.д. В результате приходим к одному индикатору неисправности.

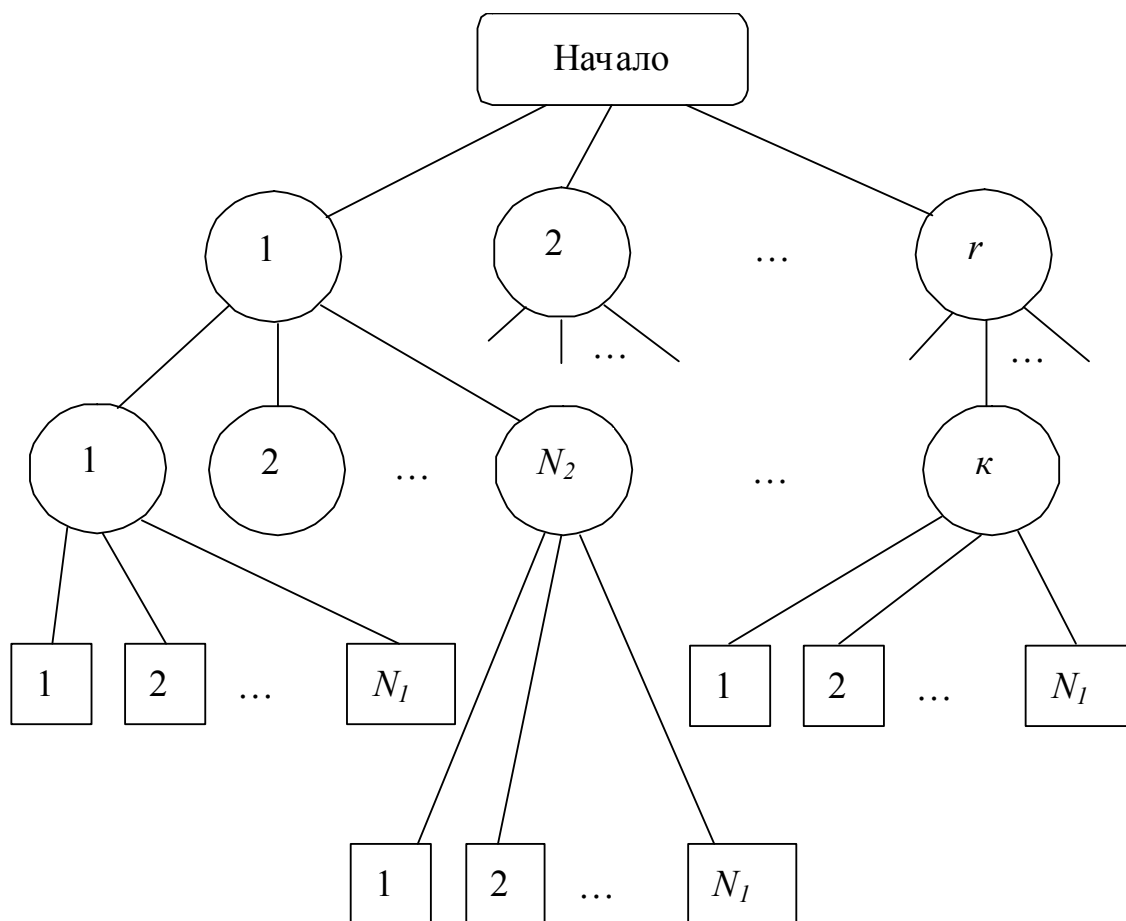


Рис. 4.9. Схема поиска неисправностей по иерархическому принципу

В такой системе при выходе из строя функционального элемента объекта диагностики индикатор покажет неисправность диагностируемого объекта. Для обнаружения неисправного функционального элемента просматриваются показания индикаторов первой степени и при обнаружении индикатора указывающего на неисправность, просматрива-

ются индикаторы следующей ступени, соединенные только с этим индикатором. Проверка продолжается в указанной последовательности до тех пор, пока не будет обнаружен неисправный первичный функциональный элемент (рис. 4.9). Поиск неисправного первичного функционального элемента по приведенной схеме позволяет значительно сократить время поиска по сравнению с поиском среди N элементов.

При одинаковой вероятности отказов функциональных элементов, одинаковом времени просмотра индикаторов неисправности и вероятности пропуска неисправного элемента, равной нулю ($P(N) = 0$), оптимальной по времени является бинарная схема поиска неисправности. При вероятности пропуска неисправного элемента $P(N) \neq 0$ и таких же предположениях минимальное среднее время поиска неисправностей можно определить как

$$t_{cp} \min = \frac{\ln N}{\ln z} \left[\frac{1}{2} + \left(\frac{P(N)}{1-P(N)} + \frac{1}{2} \right) z \right] \quad (4.15)$$

где $z = N^{\frac{1}{e}}$.

При $P(N) \rightarrow 0$ $t_{cp} \min = [(z+1)/\ln z](\ln N/2)$ и достигает минимума при $z = 4$.

Отсюда количество ступеней иерархии $e = \ln N / \ln z$.

4.7. Интегральные методы диагностики

Из всех методов диагностирования бытовой РЭА наиболее эффективными являются интегральные методы, которые используют информацию, получаемую в динамических режимах работы аппаратуры. Они составляют большую группу методов, характеризующихся общими способами получения диагностической информации, использования исходной информации и общими способами получения решения о техническом состоянии диагностируемой аппаратуры.

Интегральные методы диагностики основаны на использовании информации, получаемой на основе сравнения измеренных значений параметров диагностируемой аппаратуры с параметрами ее идеальной (эталонной) модели.

4.7.1. Метод диагностики на основе анализа отклика системы по базису гармонических функций

Известно, что динамические свойства любой радиотехнической системы можно описать ее откликом $h(t)$, т.е. функцией веса. Если функцию $h(t)$ разложить в ряд Фурье и установить аналитическую зависимость между коэффициентами ряда для отклика $h(t)$ и параметрами диагностируемой аппаратуры, то на этой основе можно проводить диагностирование.

Известно, что передаточная функция системы есть преобразование по Лапласу ее отклика. Производя с передаточной функцией аналогичные преобразования, можно определить коэффициенты a_n и b_n ряда Фурье.

Весовая функция $h(t)$ в общем случае зависит от всех параметров диагностируемого объекта

$$h(t) = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Пусть $h(t) = 0$ при $t \geq t_0$. Продолжим ее четным образом. Тогда четную периодическую функцию $h(t)$ можно разложить в ряд Фурье по косинусам:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi}{t_0} t, \quad (4.16)$$

где

$$a_n = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} h(t) \cos \frac{n\pi}{t_0} t dt.$$

Между откликом диагностируемого объекта и действительной частью передаточной функции $Re(\omega)$ существует следующая зависимость:

$$Re(\omega) = \int_0^{\infty} h(t) \cos \omega t dt.$$

Учитывая (4.16), можно записать

$$Re(\omega, \{x\}) = \int_0^{\infty} h(t) \cos \omega t dt. \quad (4.17)$$

Сравнивая (4.16) и (4.17) видим, что для фиксированных частот они отличаются только множителем $2/t_0$.

Отсюда получаем формулы, выражающие коэффициенты Фурье через фиксированные значения вещественной частотной передаточной функции диагностируемой системы:

$$a_n = \frac{2}{t_0} Re[\omega_n, \{x\}], \quad (4.18)$$

где $\omega_1 = \pi/t_0$; $\omega_2 = 2\pi/t_0$.

Тогда будем иметь

$$h(t) = \frac{2}{t_0} \sum Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \cos \frac{n\pi}{t_0} t. \quad (4.19)$$

Известно, что для всякой ограниченной и кусочно-непрерывной функции, каковыми являются временные характеристики диагностируемой аппаратуры, ряд Фурье сходится в среднем к функции

$$\int [h(t) - S_n(t)]^2 dt = 0 \text{ при } n \rightarrow \infty,$$

где $S_n(t)$ - сумма членов ряда.

Из сходимости следует, что можно определить отклик системы, пользуясь дискретными значениями действительной части частотной передаточной функции $H(\omega)$. С увеличением числа членов ряда точность аппроксимации $h(t)$ рядом (4.19) увеличивается, но при этом увеличивается и объем вычислений, так как растет число гармоник, которые нужно учитывать.

Для получения переходной характеристики достаточно проинтегрировать ряд (4.19.) от 0 до t_0 . Тогда

$$H(t) = \frac{2}{t_0} \sum_{n=0}^{\infty} Re\left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t\right). \quad (4.20)$$

Или учитывая равенство (4.18),

$$H(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{n\pi}{t_0} t\right).$$

На основании выражения (4.20.) составляют систему уравнений, которая используется для нахождения уходов соответствующих параметров диагностируемого объекта:

$$\begin{aligned}
 H(t_1) &= \frac{2}{t_0} \sum \operatorname{Re} \left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{t_0} t_1 \right); \\
 H(t_2) &= \frac{2}{t_0} \sum \operatorname{Re} \left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{t_0} t_2 \right); \\
 &\dots\dots\dots \\
 H(t_k) &= \frac{2}{t_0} \sum \operatorname{Re} \left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{t_0} t_k \right),
 \end{aligned}$$

где $H(t_1), \dots, H(t_k)$ – значения переходной характеристики для системы с номинальными параметрами, измеренными через интервалы $\Delta t = \pi/\omega_0$; $\omega_0 = 2\pi/t_0$.

Так как коэффициенты Фурье являются функциями всех параметров диагностируемой аппаратуры, можно определить текущие значения контролируемых параметров $\{x\}$ решением системы алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{2}{t_0} \operatorname{Re}(0, \{x\}); \\
 a_1 &= \frac{2}{t_0} \operatorname{Re} \left(\frac{\pi}{t_0}, \{x\} \right); \\
 &\dots \\
 a_n &= \frac{2}{t_0} \operatorname{Re} \left(\frac{n\pi}{t_0}, \{x\} \right),
 \end{aligned}$$

где a_0, a_1, \dots, a_n – текущие значения коэффициентов Фурье, снимаемых с анализатора, на вход которого подано напряжение, соответствующее отклику диагностируемого объекта; $\operatorname{Re}(n\pi/t_0, \{x\})$ – вещественная часть частотной передаточной функции.

Пример 4.6. Определить диагностируемые параметры по экспериментально определенным коэффициентам разложения отклика для видеоусилителя, описываемого функцией:

$$W(P) = \frac{\kappa}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1},$$

где $\{x\} = \kappa; T_1; T_2$ – диагностируемые параметры (вторичные).

Решение. Определим вещественную и мнимую части передаточной функции видеоусилителя:

$$\begin{aligned}
 W(j\omega) &= \frac{\kappa}{1 + j\omega T_1 - \omega^2 T_2^2} = \frac{\kappa(1 - \omega^2 T_2^2) - j\omega T_1}{(1 - \omega^2 T_2^2)^2 + \omega^2 T_1^2}; \\
 \operatorname{Re}(n\Omega, \{x\}) &= \frac{\kappa(1 - n^2 \Omega^2 T_2^2)}{(1 - n^2 \Omega^2 T_2^2)^2 + n^2 \Omega^2 T_1^2}; \\
 \operatorname{Im}(n\Omega, \{x\}) &= \frac{\kappa j n \Omega T_1}{(1 - n^2 \Omega^2 T_2^2) + n^2 \Omega^2 T_1^2}; \\
 \omega &= n\Omega.
 \end{aligned}$$

Для определения текущих значений диагностируемых параметров, используя действительную часть передаточной функции, составим систему уравнений:

$$a_1 = \frac{2}{t_0} \operatorname{Re} \left(\frac{\pi}{t_0}, \{\kappa, T_1, T_2\} \right); \quad (4.21)$$

$$a_2 = \frac{2}{t_0} \operatorname{Re} \left(\frac{2\pi}{t_0}, \{\kappa, T_1, T_2\} \right); \quad (4.21)$$

$$a_3 = \frac{2}{t_0} \operatorname{Re} \left(\frac{3\pi}{t_0}, \{\kappa, T_1, T_2\} \right), \quad (4.21)$$

где a_1, a_2, a_3 – значения коэффициентов с выхода анализатора.

Используя мнимую часть передаточной функции, получим другую систему уравнений:

$$b_1 = \frac{2}{t_0} \operatorname{Im} \left(\frac{\pi}{t_0}, \{\kappa, T_1, T_2\} \right); \quad (4.22)$$

$$b_2 = \frac{2}{t_0} \operatorname{Im} \left(\frac{2\pi}{t_0}, \{\kappa, T_1, T_2\} \right); \quad (4.22)$$

$$b_3 = \frac{2}{t_0} \operatorname{Im} \left(\frac{3\pi}{t_0}, \{\kappa, T_1, T_2\} \right). \quad (4.22)$$

Решим систему уравнений (4.21) относительно коэффициентов a_1 и a_2 , а систему уравнений (4.22) – относительно b_1 и b_2 :

$$a_1 = \frac{2}{t_0} \frac{\kappa(1 - \Omega^2 T_2^2)}{(1 - \Omega^2 T_2^2)^2 + \Omega^2 T_1^2};$$

$$a_2 = \frac{2}{t_0} \frac{\kappa(1 - 4\Omega^2 T_2^2)}{(1 - 4\Omega^2 T_2^2)^2 + 4\Omega^2 T_1^2};$$

$$b_1 = \frac{2}{t_0} \frac{\kappa\Omega T_1}{(1 - \Omega^2 T_2^2)^2 + \Omega^2 T_1^2};$$

$$b_2 = \frac{2}{t_0} \frac{\kappa 2\Omega T_1}{(1 - 4\Omega^2 T_2^2)^2 + 4\Omega^2 T_1^2}.$$

В дальнейшем для упрощения вычислений используем относительные коэффициенты разложения:

$$B_1 = b_1/a_1, B_2 = b_2/a_2, \dots, B_n = b_n/a_n.$$

Используя текущие значения относительных коэффициентов, составим систему уравнений

$$B_1 = \frac{\Omega T_1}{1 - \Omega^2 T_2^2}; \quad B_2 = \frac{2\Omega T_1}{1 - 4\Omega^2 T_2^2}.$$

Систему уравнений приведем к виду

$$B_1 = T_1 \Omega + T_2^2 \Omega^2 B_1;$$

$$B_2 = 2T_1 \Omega + 4T_2^2 \Omega^2 B_2.$$

Решая систему относительно T_1 и T_2 , получим

$$T_1 = \frac{3B_1B_2}{2\Omega(2B_2 - B_1)}; \quad T_2^2 = \frac{B_2 - 2B_1}{2\Omega^2(2B_2 - B_1)}.$$

Для определения коэффициента усиления κ видеоусилителя воспользуемся уравнением

$$b_1 = \frac{2}{t_0} \frac{\kappa\Omega T_1}{(1 - \Omega^2 T_2^2)^2 + \Omega^2 T_1^2}.$$

Отсюда

$$\kappa = \frac{b_1 t_0 \left[(1 - \Omega^2 T_2^2)^2 + \Omega^2 T_1^2 \right]}{2\Omega T_1}.$$

Полученные значения параметров сравниваются с их номинальными значениями. Параметр, вышедший из допуска, и определяет место неисправности.

4.7.2. Метод диагностики на основе "белого шума"

Интегральный метод диагностики на основе "белого шума" позволяет определить отклик диагностируемой системы во время ее нормальной работы, т.е. без отключения. Известно, что для "белого шума" автокорреляционная функция равна нулю при всех значениях τ , кроме точки $\tau = 0$, где случайная функция умножается сама на себя:

$$R_{11}(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_{u1}(t) U_{u1}(t \pm \tau) dt,$$

где $U_{u1}(t)$ – напряжение "белого шума" на входе диагностируемой системы.

Связь между напряжениями входа и выхода диагностируемой системы через отклик $h(t)$ определяется уравнением

$$U_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} U_1(t - \tau) h(\tau) d\tau. \quad (4.23)$$

Известно, что взаимная корреляционная функция входа и выхода системы выражается через автокорреляционную функцию

$$R_{12}(\tau) = \int R_{11}(\tau - t) h(t) dt.$$

После замены местами аргументов τ и t получим

$$R_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{11}(t - \tau) h(\tau) d\tau. \quad (4.24)$$

Если на вход системы подать стимулирующее напряжение

$$\delta(t) = U_1(t),$$

то уравнение (4.23) сильно упрощается и напряжение на выходе системы становится равным отклику диагностируемой аппаратуры:

$$U_2(t) = h(t). \quad (4.25)$$

Из сравнения выражений (4.23), (4.24) и (4.25) следует, что при подаче на вход диагностируемой аппаратуры сигнала в виде "белого шума", корреляционная функция которого является дельта-функцией $R_{11}(t) = \delta(t)$, взаимно корреляционная функция входа и выхода будет равна отклику системы:

$$R_{12}(t) = h(t). \quad (4.26)$$

Равенство (4.26) позволяет синтезировать схему (рис. 4.10), которая с помощью коррелятора может определять отклик системы по напряжению "белого шума" на ее входе.

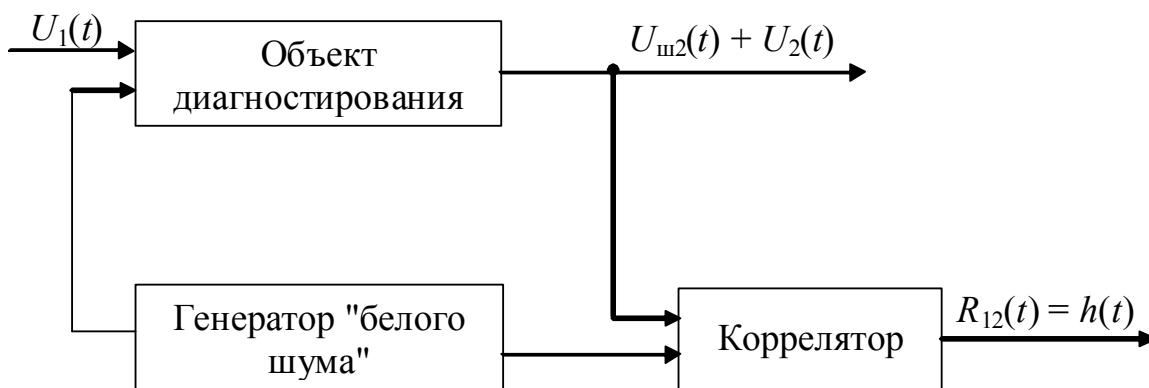


Рис. 4.10. Схема для определения отклика диагностируемой аппаратуры

Если на вход диагностируемой аппаратуры кроме "белого шума" подать напряжение $U_{c1}(t)$, то на ее выходе получим суммарный сигнал

$$U_2(t) = U_{ш2}(t) + U_{c2}(t),$$

где $U_{c2}(t)$ – напряжение, которое появляется на выходе контролируемой аппаратуры после прохождения через нее сигнала $U_{c1}(t)$; $U_{ш2}(t)$ – напряжение на выходе аппаратуры.

Взаимно корреляционная функция от напряжений $U_{c1}(t)$ и $U_{c2}(t)$ равна нулю, так как напряжение $U_{c1}(t)$ на вход коррелятора не подается.

Для автоматического получения взаимно корреляционной функции $R_{12}(t)$, а следовательно, и отклика $h(t)$ следует использовать схему, позволяющую определить отклик диагностируемой аппаратуры при любом виде внешнего сигнала $U_{c1}(t)$ на ее входе.

По полученной функции веса $h(t)$ диагностируемой аппаратуры (см. рис. 4.10) можно определить текущие параметры диагностируемого объекта, воспользовавшись одним из изложенных выше методов.

5. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ БЕЗУСЛОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

5.1. Таблица покрытий

Основу любого безусловного алгоритма диагностирования составляет совокупность (число и состав) входящих в него проверок.

Удобным и наглядным средством выбора минимальных и минимизированных совокупностей элементарных проверок является известный из теории дискретных устройств аппарат таблиц покрытий.

Рассмотрим особенности этого аппарата и возможности его использования для построения безусловных алгоритмов диагностирования.

Вспомним формальную постановку задачи построения алгоритмов диагностирования.

Задано множество E технических состояний объекта диагностирования. Элементами множества E являются исправные состояния e и неисправные e_i . Число неисправных состояний определяется числом возможных или рассматриваемых (заданных) дефектов объекта. Требуемая глубина диагностирования λ задана разбиением множества E на λ непересекающихся подмножеств $E_v, v = 1, 2, \dots, \lambda$. Это значит, что искомый алгоритм диагностирования должен обеспечить различение каждой пары (e_i, e_k) различимых технических состояний e_i и e_k , принадлежащих разным подмножествам E_v и $E_\mu, v \neq \mu$. Различение пар состояний, принадлежащих одному и тому же подмножеству E_v , не требуется.

Задано также множество Π допустимых элементарных проверок π_j объекта диагностирования.

Требуемая глубина диагностирования заведомо достижима, если множество Π обладает свойством обнаружения и различения заданных дефектов объекта.

Образуем множество U всех пар $u_l = (e_i, e_k), l = 1, 2, \dots, |U|$, технических состояний объекта, принадлежащих различным подмножествам E_v и E_μ , где $(v, \mu) \in \{1, 2, \dots, \lambda\}, v \neq \mu$, и построим прямоугольную таблицу 5.1, столбцы которой соответствуют элементам множества U , а строки элементам множества Π . В клетке (π_j, u_l) таблицы проставим значения двоичной переменной a_{jl} , определяемые по правилу:

$$a_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } R_j^i \neq R_j^k \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Множество элементов a_{jl} будем обозначать символом A . Условимся для улучшения условий обозрения построенной таблицы не проставлять в ее клетках "0".

Построенную таким образом таблицу называют *таблицей покрытий*. Если $a_{jl} = 1$, то говорят, что строка π_j покрывает столбец u_l .

По условию различимости пар технических состояний объекта в каждой строке и в каждом столбце таблицы покрытий содержится хотя бы одна "1".

Таблица 5.1

A		U				
		u_1	...	u_2	...	$u_{ U }$
Π	π_1	a_{11}		a_{1l}		$a_{1 U }$
	\vdots					
	π_j	a_{j1}		a_{jl}		$a_{j U }$
	\vdots					
	$\pi_{ \Pi }$	$a_{ \Pi 1}$		$a_{ \Pi l}$		$a_{ \Pi U }$

Возьмем столбец u_l таблицы покрытий, найдем все ее строки, для которых $a_{jl} = 1$, и объединим их в подмножество, обозначив последнее символом Π_l , а его элементы символами π_{hl} , $h = 1, 2, \dots, |\Pi_l|$.

Элементами подмножества Π_l являются те элементарные проверки π_j , которые различают состояния e_i и e_k .

Высказыванию "элементарная проверка π_j различает состояния e_i и e_k " поставим в соответствие двоичную переменную, обозначив ее так же, как соответствующий элемент подмножества Π_l , символом π_{hl} . Тогда, очевидно, условие, состоящее в том, что для различения состояний e_i и e_k достаточно любой одной элементарной проверки $\pi_{hl} \in \Pi_l$, можно представить элементарной дизъюнкцией двоичных переменных π_{hl} :

$$\bigvee_{h=1}^{|\pi_l|} \pi_{hl} = \left(\pi_{1l} \vee \pi_{2l} \vee \dots \vee \pi_{|\Pi_l|l} \right)_l. \quad (5.1)$$

Пусть получены подмножества Π_l для всех $l = 1, 2, \dots, |U|$ или все дизъюнкции вида (5.1).

Тогда условие различения каждой пары состояний $u_l \in U$, $l = 1, 2, \dots, |U|$, хотя бы одной элементарной проверкой можно записать в виде конъюнкции $|U|$ дизъюнкций вида (5.1):

$$\bigwedge_{l=1}^{|U|} \bigvee_{h=1}^{|\Pi_l|} \pi_{hl} = \bigwedge_{l=1}^{|U|} \left(\pi_{1l} \vee \pi_{2l} \vee \dots \vee \pi_{|\Pi_l|l} \right)_l. \quad (5.2)$$

Выражение (5.2) является логическим произведением логических сумм двоичных переменных π_{hl} и поэтому может быть названо формой ПС (иногда ПΣ). Форма ПС является аналитическим представлением таблицы покрытий.

Между таблицей покрытий, не имеющей пустых строк и столбцов, т. е. строк и столбцов, содержащих только значения "0", и формой ПС, представленной в виде (5.2), имеется взаимно однозначное соответствие в том смысле, что по одной из них можно построить другую. Для сокращения записи в форме ПС, выписанной по таблице покрытий, можно производить упрощения вида $X * X = X$ и $X(XVY) = X$, где X , Y – отдельные переменные π_{hl} или их дизъюнкции.

Если раскрыть все скобки в исходной или сокращенной форме ПС, то будет получено выражение, представляющее собой логическую сумму логических произведений двоичных переменных π_{hl} и называемое поэтому формой СП (ΣΠ). В процессе преобразования формы ПС в форму СП целесообразно производить упрощения вида $X * X = X$, $XVX = X$ и $XVX * Y = X$, где X и Y – отдельные переменные π_{hl} или их конъюнкции.

По построению каждая конъюнкция формы СП содержит хотя бы по одной переменной из каждой дизъюнкции формы ПС, т.е. каждая конъюнкция формы СП представляет своими переменными избыточную совокупность элементарных проверок $\pi_j \in \Pi$, среди которых для каждой пары состояний из U найдется хотя бы одна элементарная проверка, различающая эту пару. Любую такую совокупность будем называть *покрытием таблицы покрытий*.

Очевидно, минимальным (по числу элементарных проверок) покрытиями соответствуют те же конъюнкции формы СП, которые содержат наименьшее число двоичных переменных π_j .

Таким образом, по таблице покрытий можно построить форму ПС, преобразовать ее в форму СП и получить все избыточные, в том числе минимальные покрытия, представляющие собой *проверяющие* (при $\lambda = 2$) или *различающие* (при $\lambda > 2$) совокупности элементарных проверок.

Каждая такая совокупность, если она содержит r элементарных проверок, порождает $r!$ безусловных алгоритмов диагностирования (с безусловной или условной останов-

кой), различающихся между собой последовательностью реализации элементарных проверок.

Пример 5.1. Рассмотрим процесс построения таблицы покрытий. Пусть имеется таблица неисправностей объекта диагностирования (Табл. 5.2) и пусть решается задача проверки исправности.

Таблица 5.2

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
z_1	0	1	1	1	1
z_2	0	0	0	1	1
z_3	1	1	0	1	1
z_4	1	1	0	0	1
z_5	0	0	0	0	0

Это определяет требуемую глубину диагностирования и соответствует разбиению множества E на два подмножества ($\lambda = 2$), $E_1 = \{e\}$ и $E_2 = \{e/i = 1, 2, \dots, 5\}$.

Множество U образуют пары $u_i (e, e_i)$ при $e \in E_1, e_i \in E_2$. Очевидно, что всех таких пар будет 5.

Построение таблицы покрытий как мы уже отмечали, состоит в сравнении (по-строчном) пар столбцов e и e_i таблицы функций неисправностей. По условию $a_{jl} = 1$, когда $R_j \neq R_j^i$. В данном случае $R_j = 1$ для всех $j = 1, 2, \dots, |\Pi|$. Поэтому в клетке (z_j, u_i) таблицы покрытий ставится "1" тогда, когда $R_j^i = 0$. Построенная таблица покрытий представлена таблицей 5.3

Таблица 5.3

A		U				
		u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
Π	z_1	1				
	z_2	1	1	1		
	z_3			1		
	z_4			1	1	
	z_5	1	1	1	1	1

При поиске неисправностей таблица покрытий будет иметь вид

Таблица 5.4

A		U									
		u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}
Π	z_1	1	1	1	1						
	z_2			1	1		1	1	1	1	
	z_3		1			1			1	1	
	z_4		1	1		1	1			1	1
	z_4										

5.2. Правила упрощения таблицы покрытий

1. Наличие пустой строки j в таблице покрытий означает, что элементарная проверка π_j не различает ни одной пары технических состояний из множества U . Такая

строка может быть удалена из таблицы. Если таблица содержит пустую строку j , то ни одна дизъюнкция исходной формы ПС не содержит символа π_j .

2. Наличие пустого столбца l в таблице покрытий означает, что пара u_l технических состояний не различается ни одной элементарной проверкой из множества Π . *Пустой столбец может быть удален из таблицы.* При необходимости неразличимая пара u_l должна быть зафиксирована с тем, чтобы в последующем расширить множество Π элементарных проверок и устранить неразличимость технических состояний. Если таблица содержит пустой столбец l , то в исходной форме ПС нет дизъюнкции представляющей этот столбец.

3. Стоки и столбцы таблицы покрытий называются *сплошными*, если они содержат только значения "1". Наличие сплошной строки j означает, что элементарная проверка π_j различает все пары состояний из множества U . Любая сплошная строка j образует минимальное покрытие, содержащее единственную элементарную проверку π_j . Если таблица имеет сплошную строку j , то каждая дизъюнкция исходной формы ПС содержит символ π_j .

4. Наличие сплошного столбца l означает, что технические состояния пары u_l различаются каждой элементарной проверкой из множества Π . *Сплошной столбец может быть удален из таблицы.* Если таблица содержит сплошной столбец l , то в исходной форме ПС представляющая его дизъюнкция содержит все символы $\pi_j, j = 1, 2, \dots, |\Pi|$. Удаление сплошного столбца эквивалентно замене на "1" представляющей его дизъюнкции в исходной форме ПС.

5. Выделим столбцы таблицы, содержащие по одному значению "1". Будем говорить, что соответствующие строки образуют ядро, и называть их строками ядра (относительно соответствующих им столбцов, содержащих по одному значению "1"). Наличие строки j ядра относительно столбца l означает, что состояния пары u_l различаются только одной элементарной проверкой π_j . Следовательно, элементарная проверка π_j должна войти в каждое покрытие. Из совокупности столбцов, покрываемых строкой j ядра относительно столбца l , могут быть удалены все, кроме столбца l . Если таблица содержит строку j ядра относительно столбца l , то в исходной форме ПС дизъюнкция, представляющая столбец l , содержит единственный символ π_j . Указанное удаление столбцов, покрываемых такой строкой j , эквивалентно замене на "1" всех дизъюнкций, содержащих символ π_j , кроме одной, представляющей столбец l .

6. Наличие одинаковых (повторяющихся) строк, например двух строк j и k , означает, что элементарные проверки π_j и π_k различают одни и те же пары технических состояний объекта. Все повторяющиеся строки таблицы могут быть заменены любой одной из них. При необходимости в обозначении этой строки-представителя отражаются все заменяемые ею строки, чтобы не потерять варианты покрытий, равноценных по числу элементарных проверок, но различающихся по их составу. Если таблица содержит повторяющиеся строки j и k , то в исходной форме ПС каждая дизъюнкция, содержащая символ π_j содержит также символ π_k и наоборот. Удаление повторяющейся строки, например j , эквивалентно удалению символов π_j в форме ПС.

7. Обозначим символом U_j подмножество столбцов, покрываемых строкой j (столбцов, содержащих значение "1" в строке j). Возьмем две строки j и k . Если выполняется условие $U_j \subset U_k$, то строка j называется поглощаемой относительно строки k . Можно говорить также, что строка j поглощается строкой k или строка k поглощает строку j . Другими словами, для такой пары строк найдется хотя бы один столбец, имеющий значение "1" в строке k и значение "0" в строке j , и не найдется ни одного столбца имеющего значение "0" в строке k и значение "1" в строке j . Наличие строки j , поглощаемой строкой k , означает, что элементарная проверка π_k различает все те пары технических состояний, которые различаются элементарной проверкой π_j , и, сверх того, не различаемую проверкой π_j . Следовательно, если покрытие содержит некоторую поглощающую строку, то поглощае-

Существует достаточно много методов получения оптимальных покрытий. Критерием оптимальности, как правило, служат либо длина, либо цена покрытий. Следует отметить, что с их помощью можно получить покрытия и для непростых таблиц покрытий. Однако полезность предварительного упрощения заданной таблицы состоит в уменьшении ее размеров.

Таблица 5.6

A		U			
		u_5	u_6	u_7	u_8
П	z_5	1			
	z_6		1	1	1
	z_7		1	1	1
	z_8		1	1	1

Недостатком построения алгоритмов диагностирования по таблице покрытий является необходимость построения последней. Это нежелательно потому, что в таблице покрытий может быть значительно больше столбцов, чем в таблице функций неисправностей, по которой строится таблица покрытий.

Таблица 5.7

A		U	
		u_5	u_6
П	z_5	1	
	z_6		1

Так как таблица покрытий является не более чем результатом обработки таблицы функций неисправностей, при построении алгоритмов диагностирования этап построения таблицы покрытий можно исключить.

Методы построения оптимальных по длине или цене покрытий достаточно громоздки по затратам памяти и по объемам вычислений.

5.3. Функции предпочтения при обработке таблиц покрытий

Существует ряд методов построения оптимизированных по длине, а также по цене покрытий. Эти методы, как правило, просты, но платой за эту простоту является отсутствие гарантий получения оптимальных решений.

Методы построения оптимизированных алгоритмов диагностирования представляют собой многошаговые процедуры с оптимизацией частичных решений на каждом шаге в соответствии со значением некоторой функции предпочтения. Функция предпочтения назначается или выбирается исходя из тех или иных "разумных" соображений и с учетом простоты вычисления ее значений.

Рассмотрим некоторые функции предпочтения при обработке таблиц покрытий. Пусть функцией предпочтения I_1 является номер j -той строки таблицы покрытий, а экстремальным ее значением, по которому выбирается лучшая строка, - минимальный на данном шаге номер строки:

$$I_1 = \min_j j.$$

Никаких убедительных обоснований по I_1 привести нельзя, т.к. выбор строки с наименьшим номером эквивалентен выбору произвольной строки таблицы, поскольку нумерация строк произвольная. Тем не менее функция предпочтения I_1 применяется, в частности, когда нет возможности перебрать и сравнить между собой все или хотя бы значительную часть строк.

Методы построения оптимизированных покрытий могут давать избыточные решения. Исключение избыточности из полученного решения часто требует выполнения специальных операций. Избыточность покрытия можно определить, например, поочередным удалением из него строк по одной. После каждого удаления строки следует проверять, осталось ли покрытие полным.

Очень часто употребляемой функцией предпочтения I_2 при построении минимизированных покрытий является число n_j единиц в строке j . Лучшей строкой является та, которая дает максимальное значение I_2 (максимальная строка):

$$I_2 = \max_j n_j.$$

Пример 5.2. Обратимся к таблице 5.8 и подсчитаем число единиц в каждой ее строке. Максимальной является строка 4, имеющая 5 единиц. Включаем строку 4 в искомое покрытие и вычеркиваем покрываемые ею столбцы 1, 2, 4, 5 и 7.

Максимальной теперь является строка 5, покрывающая два столбца 6 и 8.

Оставшийся непокрытым столбец 3 покрывается строками 1 и 6. Таким образом, получаем два полных покрытия (1, 4, 5) и (4, 5, 6).

Таблица 5.8

A		U								C
		1	2	3	4	5	6	7	8	
П	1	1	1	1	1					2
	2	1				1	1			3
	3		1					1	1	2
	4	1	1		1	1		1		2
	5				1		1		1	3
	6			1		1		1		1

Строки ядра, если они есть, обязательно входят в любое покрытие. Эти строки могут содержать небольшое число единиц и, в таком случае, будут выбираться на последних шагах процедуры, использующей функцию предпочтения I_2 , что способствует получению избыточных покрытий.

Этим недостатком не обладает функция предпочтения I_3 , известная под названием "*минимальный столбец – максимальная строка*". Согласно этой функции на каждом шаге сначала находится один из столбцов l с наименьшим числом m_l единиц (минимальный столбец), а затем среди строк, содержащих единицы в минимальном столбце, выбирается и включается в искомое покрытие строка j_l с максимальным числом n_{j_l} единиц:

$$I_3 = \max_{jl} n_{j_l}.$$

Ясно, что при этом все строки ядра будут выбраны на первых шагах процедуры.

При построении полных покрытий, оптимизированных по цене, можно пользоваться функцией предпочтения I_4 , согласно которой сначала выделяются строки с минимальной ценой c_j , а затем из них выбирается строка j_c с наибольшим числом n_{j_c} единиц:

$$I_4 = \max_{j_c} n_{j_c}.$$

Пример 5.3. Построим покрытие табл. 5.8 с использованием функции предпочтения I_4 .

Таблица 5.8 имеет единственную строку 6 с минимальной ценой 1. Эта же строка по условию является максимальной и включается в покрытие.

По таблице, получаемой из табл. 5.8 вычеркиванием строки 6 и покрываемых ею столбцов 3, 5 и 7, находим, что минимальную цену 2 имеют строки 1, 3 и 4. Среди них максимальными являются строки 1 и 4. Выбираем строку 1.

Лучшей строкой является 3 с ценой 2.

Строки 2 и 5 являются равноценными и покрывают последний непокрытый столбец 6. Значит, получены покрытия (1, 2, 3, 6) и (1, 3, 5, 6) с ценой 8.

Рассмотренная функция предпочтения I_4 – "минимальная цена – максимальная строка" обладает тем недостатком, что не связывает цену строки с числом покрываемых ею столбцов. Поэтому в покрытие могут входить строки, покрывающие мало столбцов, хотя и имеющие низкие цены. В этом кроется повышенная опасность получения избыточных покрытий. В частности, оба полученных в примере покрытия избыточны: из первого можно удалить строку 6, а из второго – строку 3. Поэтому можно сначала выбирать максимальные строки, а затем среди них брать ту, которая имеет минимальную цену. Впрочем, при этом возникает другая крайность – в покрытие могут попадать "дорогие" строки.

Можно, однако, иначе связать между собой цены строк и числа покрываемых ими столбцов. Воспользуемся известным житейским правилом, состоящим в том, что не всегда целесообразно покупать дешевый вариант товара, имеющий более низкое качество. Введем функцию предпочтения I_5 , являющуюся отношением цены c_j строки j к числу n_j покрываемых ею столбцов. Лучшей на каждом шаге строкой следует считать ту, которая дает минимальное значение I_5 :

$$I_5 = \min_j \frac{c_j}{n_j}.$$

Пример 5.4. Построим оптимизированное по цене покрытие табл. 5.8, пользуясь функцией предпочтения I_5 .

Лучшей является строка 6 табл. 5.8, для которой $I_5 = 1/3$.

Для таблицы, получаемой вычеркиванием строки 6 и покрываемых ею столбцов 3, 5 и 7, лучшими являются строки 1 и 4. Выбираем строку 1.

После удаления строки 1 и столбцов 1, 2 и 4 оказывается лучшей строка 5, покрывающая оставшиеся столбцы 6 и 8. Таким образом, полное покрытие образуют строки 1, 5 и 6, цена его равна 6.

6. СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

6.1 Средства определения работоспособности по совокупности параметров

Работоспособность ЭРЭА часто характеризуется совокупностью диагностических параметров. В этом случае технические средства диагностирования должны оценивать степень изменения диагностических параметров и фиксировать выход их за допустимые пределы. Таким образом, практически технические средства диагностирования решают задачу допускового контроля совокупности параметров, характеризующих работоспособность объекта. Состав технических устройств определения работоспособности, их структура определяется в большей степени спецификой ЭРЭА и особенностями ее функционирования.

На рис. 6.1 приведена схема средств определения работоспособности ЭРЭА по совокупности диагностических параметров. Оцениваемые диагностические показатели преобразуются первичными преобразователями $ПП_1 - ПП_n$ и нормализаторами $H_1 - H_n$ в напряжение постоянного тока 1 - 10 В. Нормированные напряжения поступают в блок сравнения $БС$, где сравниваются с установленными допусками. В случае отклонения параметра за допустимые пределы блоком сигнализации $С$ осуществляется соответствующая сигнализация. Кроме того, наличие много шкального измерительного прибора $И$ позволяет осуществить выборочное измерение текущего значения любого параметра. Блок сравнения строится на однопороговых компараторах.

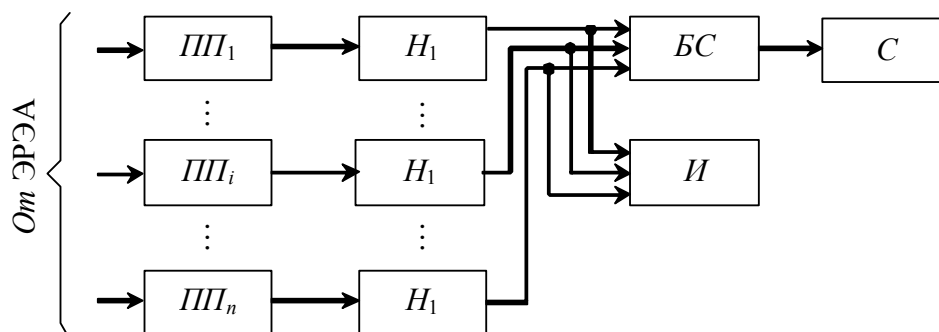


Рис. 6.1. Схема средств определения работоспособности ЭРЭА по совокупности диагностических параметров

Технические средства определения работоспособности могут содержать индикаторы телевизионного типа. Схема средств, приведенная на рис. 6.2, обеспечивает непрерывный допусковый контроль параметров индикацией ухода любого из них за установленные пределы, а также отображение информации о текущих значениях параметров виде гистограмм на экране видеоконтрольного устройства с указанием границ допустимых значений, которые устанавливаются 5, 10, 15, 20 % номинального значения.

Диагностические параметры (напряжение постоянного и переменного тока и импульсное напряжение) преобразуются первичными преобразователями D в напряжение постоянного тока и с помощью многоходового коммутатора K подключаются к блоку нормализации $БН$, приводящему их к единым допусковым границам. Это позволяет упростить схемы сравнения и формирования эталонных значений параметров, а также форму представления информации оператору. Включенный на выходе $БН$ аналого-цифровой преобразователь АЦП формирует прямоугольные импульсы строгой частоты постоянной амплитуды, длительность которых соответствует входному напряжению. Одновременно с этими импульсами формируются импульсы, длительности которых соответствуют верхнему и нижнему допустимым пределам изменения. Длительность импульсов одинакова

для всех диагностических параметров.

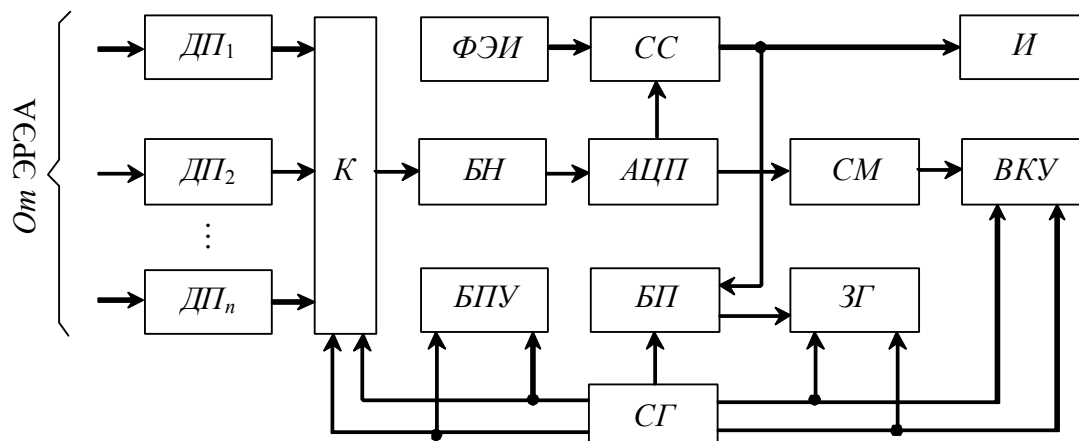


Рис. 6.2. Схема средств допускового контроля с индикацией на видеоконтрольном устройстве

В результате сравнения в схеме сравнения *СС* импульсов, соответствующих текущим значениям параметров, с импульсами предельных значений формируется последовательность импульсов разности, наличие и временное положение которых соответствуют параметрам, выходящим за пределы допуска. Эти импульсы поступают на вход блока оперативной памяти *БП*, где записываются в соответствующую ячейку памяти и затем используются для формирования сигнала номера параметра, соответствующего определенному дефекту, формируемого знакогенератором *ЗГ*, для указания оператору на экране видеоконтрольного устройства. Одновременно последовательность импульсов строчной частоты (длительность каждого из которых соответствует величине контролируемого параметра) через смеситель *СМ* (где дополняется импульсами, несущими информацию о принадлежности параметров) поступает на вход видеоконтрольного устройства для предъявления оператору. На экране видеоконтрольного устройства *ВКУ* формируется гистограмма текущих значений параметров с указанием их принадлежности, допусковые границы и номера параметров, вышедших за поле допуска. Возможность применения подобных средств определяется номенклатурой первичных преобразователей.

В некоторых случаях на практике оказывается необходимым сведение множества оцениваемых диагностических параметров к одному обобщенному. На рис. 6.3 приведена схема средств определения работоспособности ЭРЭА по обобщенному параметру.

Текущие x_i и эталонные x_{i0} значения контролируемых параметров, преобразованные датчиком D_i в напряжение постоянного тока, поступают на делитель $D_{ли}$, где нормализуются. Безразмерные нормированные величины α_i поступают в блоки логарифмирования $БЛ_i$, а затем в блоки умножения $БУ_i$, где величина $\ln \alpha_i$ умножается на коэффициент веса β_i . Поскольку величина $\beta_i = 0 - 1$, то блоки $БИ_i$ представляют собой делители напряжения. Сигналы с выходов $БУ_i$ поступают в сумматор *С*, откуда суммарный сигнал подается в блок потенционирования *БП*. На выходе *БП* формируется величина

$$Q = \prod_{i=1}^n \alpha_i^{\beta_i}, 0 \leq Q \leq 1,$$

которая представляет собой средневзвешенный геометрический показатель, используемый как обобщенный показатель работоспособности.

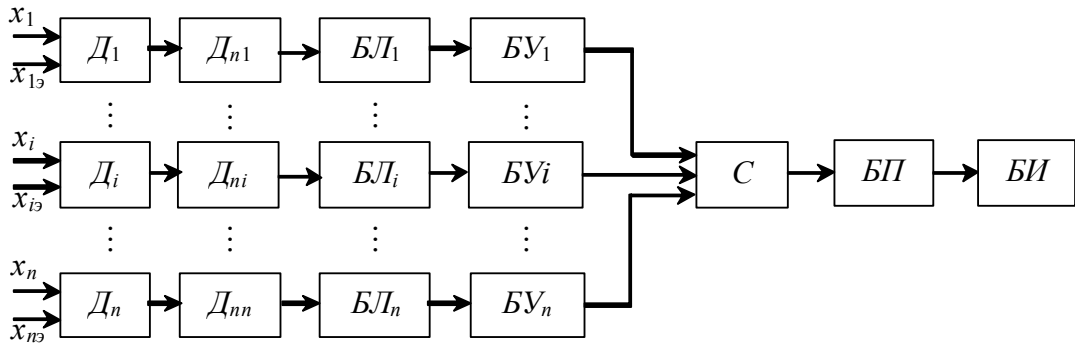


Рис. 6.3. Схема средств определения работоспособности ЭРЭА по обобщенному параметру

С выхода *БП* величина Q поступает в блок индикации *БИ*, который осуществляет световую индикацию значения обобщенного показателя работоспособности. Средство предназначено для оценки работоспособности различных электронных приборов и является достаточно универсальным.

На рис. 6.4 приведена схема средств определения работоспособности, реализующая зависимость

$$S = 1 - \frac{1}{\Delta N} \left[\sum_{i=1}^N (y_{i0} - y_i) \right]. \quad (6.1)$$

В схему включены:

- блок программный и запоминания *БПЗ*, в котором хранятся номинальные значения характеристика y_{i0} для всех N точек измерения ($i = 1, N$), которые выбираются в зависимости от номера испытаний i ;
- блоки вычисления *БВ₁* и *БВ₂*, осуществляющие операции вычитания в соответствии с (6.1);

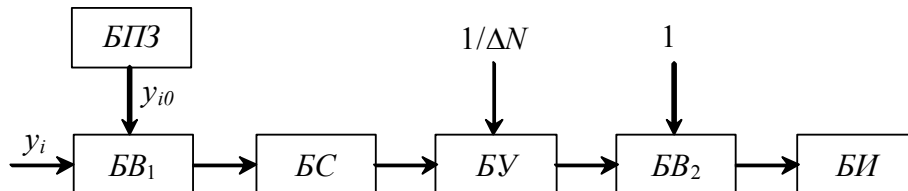


Рис. 6.4. Схема средств определения работоспособности

- блок суммирования *БС*, выполняющий сложение всех разностей типа $(y_{i0} - y_i)$;
- блок умножения *БУ*, на выходе которого появляется результат перемножения величины $1/\Delta N$ на сумму разностей в соответствии с (6.1);
- блок индикации *БИ*, фиксирующий значение степени работоспособности ОД или его неработоспособность.

6.2. Средства определения работоспособности по динамическим характеристикам

Работоспособность ЭРЭА определяют, сравнивая ее динамические характеристики с желаемыми. Технические средства определения работоспособности при этом строятся по разным принципам в зависимости от формулировки условий работоспособности. Если условия работоспособности формулируются как ограничение на изменение показателей формы временной характеристики, то, как правило, осуществляют тестовое диагностирование, используя в качестве тестового воздействия единичное импульсное или ступенчатое напряжение.

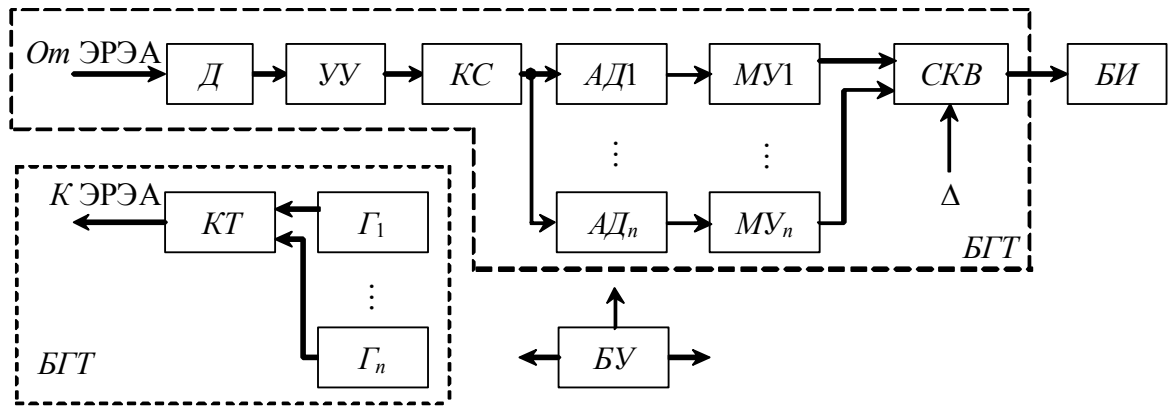


Рис. 6.6. Схема средств определения работоспособности ЭРЭА по амплитудно-частотной характеристике

Формируемые в блоке генераторов тестов *БГТ* синусоидальные сигналы в требуемом диапазоне частот с помощью генераторов $\Gamma_1 - \Gamma_n$ через коммутатор тестов *КТ* подаются на ЭРЭА. Сигналы реакции на каждую из фиксированных частот $f_i - f_n$ поступают в блок измерений и вычислений *БИВ*, где после предварительного преобразования в детекторе *Д* и управляемом усилителе *УУ* через коммутатор сигналов *КС* подаются для дальнейшей обработки в свой канал, включающий амплитудный детектор *АД* и масштабный усилитель *МУ*. Преобразованные сигналы поступают на схему контроля и вычислений *СКВ*, где осуществляется сравнение амплитудно-частотной характеристики АЧХ объекта с требуемой и выдается отклонение измеренных значений АЧХ от требуемых в процентах на каждой из фиксированных частот. Возможна выдача результата в виде "Да" (АЧХ входит в требуемую область), "Нет" (АЧХ не входит в требуемую область). Результат оценки поступает на блок индикации *БИ*. Необходимые команды вырабатываются в блоке управления *БУ*.

Схема предназначена для определения работоспособности телевизионных трактов в условиях производства и обслуживания. Амплитудно-частотная характеристика оценивается на 10 частотах, а поле допуска изменяется в пределах 0 — 25 %. Диагностирование осуществляется за 60 мс при допустимой погрешности измерения 2 %.

На рис. 6.7 приведена схема средств определения работоспособности ЭРЭА по амплитудно-частотной и фазочастотной характеристикам.

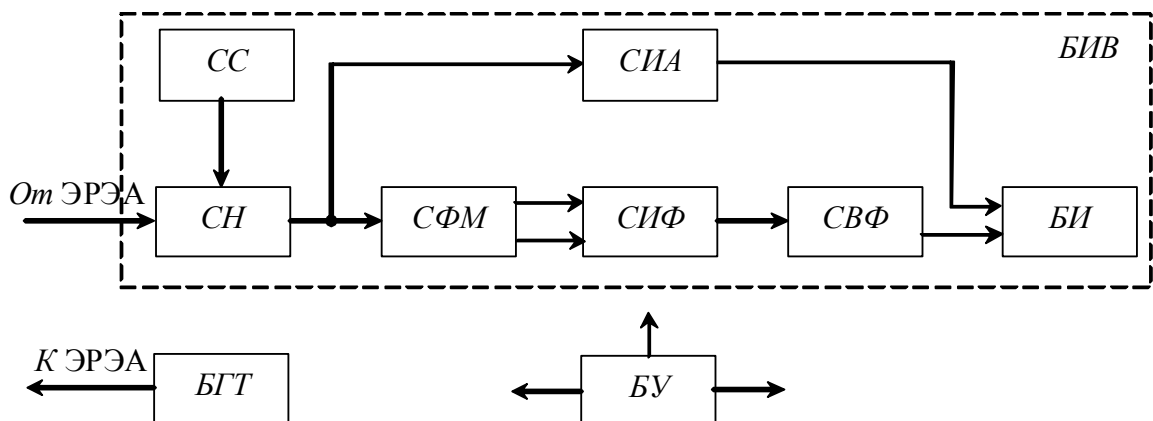


Рис. 6.7. Схема средств определения работоспособности ЭРЭА по частотным характеристикам

В блоке генераторов тестов *БГТ* формируются синусоидальные напряжения требуемого диапазона частот. Сигнал реакции ЭРЭА на подаваемый тест нормируется в блоке измерений и вычислений *БИВ* к установленному уровню в схеме нормирования *СН* и поступает на схему измерения фазы *СИФ* через схему формирования меандра *СФМ*,

управляющую вычислением фазы φ сигнала реакции. В *СИФ* осуществляется измерение и запоминание фазы сигнала реакции ЭРЭА в диапазоне $0 - \pm 90^\circ$. Расширение диапазона измерения фазы до $\pm 90^\circ - \pm 180^\circ$ осуществляется с помощью схемы вычисления фазы *СВФ*. Измеренные значения амплитуды и фазы подаются на блок индикации. Для повышения достоверности получаемой информации введена схема самоконтроля *СС*. Блок управления *БУ* формирует необходимые команды.

Частотная характеристика оценивается в трех диапазонах частот 0,01 - 0,1 Гц, 0,1 - 10 Гц, 10 - 100 Гц, а фаза выходного напряжения ЭРЭА - в пределах $0 - 180^\circ$. Допустимая погрешность измерения не превышает 1 %.

6.3. Средства поиска дефектов

Поиск дефектов может выполняться при условии, когда известно, что в ЭРЭА возник дефект, или в том случае, когда неизвестно, есть ли в ЭРЭА дефект. В первом случае осуществляется собственно поиск дефекта; при этом технические средства диагностирования должны помочь определить, какой именно дефект возник. Во втором случае, который называется проверкой исправности, технические средства диагностирования должны ответить на вопрос, есть ли в ЭРЭА дефект и если есть, то какой именно.

Технические средства диагностирования и в том, и в другом случае могут предназначаться для анализа выходного сигнала ЭРЭА или последовательной оценки множества сигналов, возникающих в специально выбранных для проверки местах ЭРЭА (контрольных точках). Для анализа выходного сигнала необходима информация о связи возникающих дефектов с изменением формы и величины выходного сигнала. Для последовательной проверки сигналов в контрольных точках необходимо обеспечить выполнение техническими средствами жестких или гибких алгоритмов, определяющих последовательность выполнения проверок.

Поиск дефектов в ЭРЭА осуществляется проверкой признаков наличия дефектов. Признаками наличия дефектов являются увеличение или уменьшение выходных параметров, выход параметров и характеристик за допустимые пределы, появление логических сигналов о срабатывании или несрабатывании элементов. Наличие дефектов определяется проверкой условий

$$x_i^> = \begin{cases} 1 \text{ при } f_i > f_i^1; \\ 0 \text{ при } f_i < f_i^2; \end{cases} \quad x_i^< = \begin{cases} 1 \text{ при } f_i < f_i^1; \\ 0 \text{ при } f_i > f_i^2. \end{cases}$$

где $x_i^>$, $x_i^<$ - признаки i -го дефекта; f_i , f_i^1 , f_i^2 - текущее и эталонные значения диагностических показателей.

Техническая реализация операции формирования признаков наличия дефектов может быть различной (рис. 6.8). На рис. 6.8,а показана схема сравнения *СС*. Здесь Y_i - вектор ответных реакций; Y_{i0} - вектор эталонных сигналов; S_i - вектор, характеризующий состояние ЭРЭА (дефект). Подобная схема используется в тех случаях, когда входное воздействие X_i не изменяется.

В тех случаях, когда можно осуществить тестовое воздействие, схема изменяется (рис. 6.8,б). При этом тестовое воздействие T вырабатывается генератором тестовых воздействий *ГТВ*; эталонные значения Y_{i0} выходных сигналов Y_i вырабатываются формирователем эталонов $\Phi Э$ по команде специального программного устройства *ПУ*. На рис. 6.8,в приведена схема обнаружения дефекта путем сравнения реакции ЭРЭА и эквивалентной модели $ЭМ$ на один и тот же входной сигнал X_i с помощью схемы сравнения *СС*. На рис. 6.8,г приведена схема обнаружения дефекта путем подсчета с помощью счетного устройства *СУ* числа операций, выполняемых ЭРЭА над входным воздействием x_l . При этом эталонная последовательность F_{i0} , поступающая с $\Phi Э$, сравнивается в *СС* с текущим значением F_i .

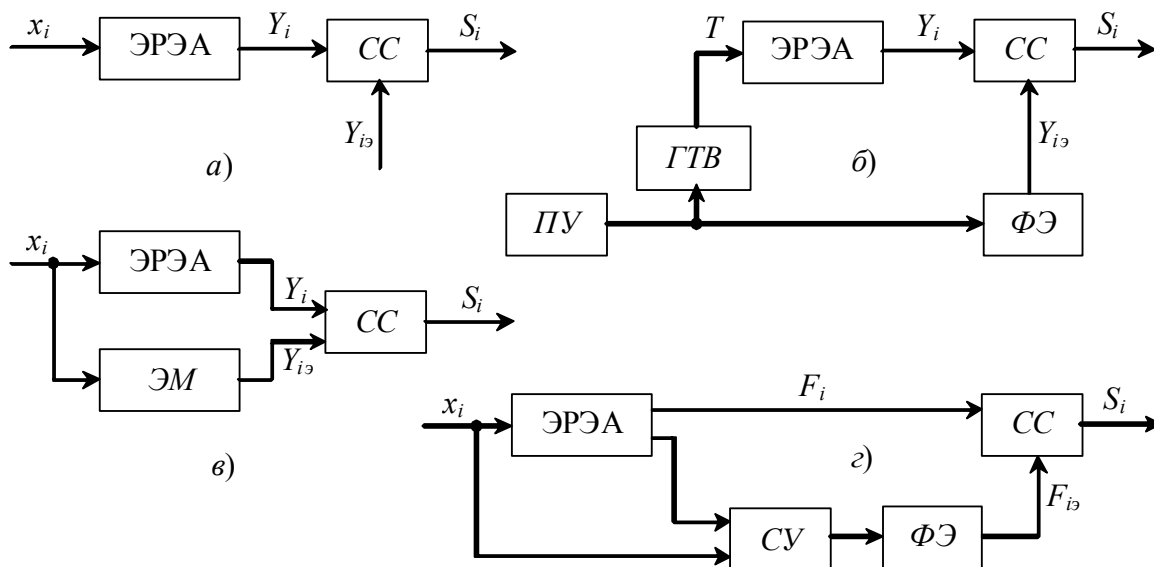


Рис. 6.8. Схема формирования признаков наличия дефектов

Для поиска возникшего дефекта ЭРЭА разделяют на отдельные части (функциональные элементы), объем которых зависит от заданной глубины поиска дефекта. В результате осуществления поиска устанавливают, в каком функциональном элементе возник дефект. Наличие дефекта в функциональном элементе соответствует отсутствию требуемого сигнала на его выходе.

Технические средства для поиска функционального элемента в ЭРЭА, в котором возник дефект, строятся на логических элементах. Схемы технических средств различаются по структуре и числу логических элементов в зависимости от принятого алгоритма поиска и используемого математического описания. Наиболее целесообразную схему выбирают в результате сравнения возможных вариантов.

6.4. Средства поиска дефектов в сложной ЭРЭА

Поиск дефектов в сложной ЭРЭА может выполняться по жесткой или гибкой программе. В первом случае последовательность проверок при поиске дефекта не зависит от результата, получаемого при выполнении каждой проверки. Во втором случае последовательность проверок полностью определяется результатами каждой проверки. При гибкой программе технические средства поиска усложняются, но зато при этом повышается их эффективность (сокращение времени поиска, использование объекта в аварийной ситуации и пр.). Применение жесткой программы может несколько упростить технические средства, но при этом снижается эффективность поиска.

По принципу действия технические средства поиска дефектов разделяются на средства, построенные по потенциальному типу (непрерывные), и средства, построенные по импульсному типу (дискретные). ТСД, построенные по потенциальному типу, осуществляют непрерывное диагностирование, а информация о состоянии отдельных элементов может представляться как в форме дискретных посылок (0 - 1 и т.д.), так и непрерывными величинами (уровень напряжения, тока и т.п.). В технических средствах поиска импульсного типа поиск дефектов осуществляется дискретными посылками-запросами. Таким образом, информация о состоянии элемента получается только в момент запроса или вслед за ним.

Для ЭРЭА, осуществляющей обработку периодически повторяющихся сигналов или состояние которой может определяться распределением потенциалов в контрольных точках в определенные моменты времени, диагностическая модель может быть представлена бинарной матрицей. Строки матрицы соответствуют возможным состояниям s_i ;

$i = \overline{0, n}$, а столбцы – проверкам $\pi_j, j = \overline{1, m}$:

При отсутствии в ЭРЭА дефектов ее состояние будет оцениваться вектором $\overline{S}_0 = (1, 1, \dots, 1)$. Множество всех других состояний $s_i, i = \overline{1, n}$ соответствует наличию дефектов. Для установления, какой именно дефект возник, необходимо запомнить все векторы S_i и, сравнивая их с текущим вектором, определить состояние ЭРЭА.

Таблица 6.1

	π_1	π_2	...	π_m
s_0	1	1	...	1
s_1	1	1	...	0
s_2	1		...	0
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
s_n	1	1		0

Технические средства, реализующие процедуру поиска дефекта (рис. 6.9), содержат аналоговый коммутатор K , эталонную модель $ЭМ$, блок диагностирования $БД$, индикаторное видеоустройство $ИУ$.

Исходная информация от ЭРЭА в виде значений напряжений в контрольных точках u_i подается из ЭРЭА на коммутатор K , который передает ее на соответствующие входы модели $ЭМ$. После сравнения абсолютного значения u_i с номинальным u_{ni} и хранящимися допустимыми значениями Δu_i в модели $ЭМ$ формируется результат проверки в виде параллельного двоичного кода с числом разрядов, равным числу контрольных точек. Результат проверки π_j определяется следующим образом:

$$\pi_j = \begin{cases} 1, & \text{если } |u_i - u_{ni}| \leq \Delta u_i; \\ 0, & \text{если } |u_i - u_{ni}| > \Delta u_i. \end{cases}$$

При отсутствии дефектов в этом случае во всех m разрядах будут единицы. С выхода модели $ЭМ$ код состояния поступает в блок $БД$, построенный, как правило, на базе микропроцессора $МП$.

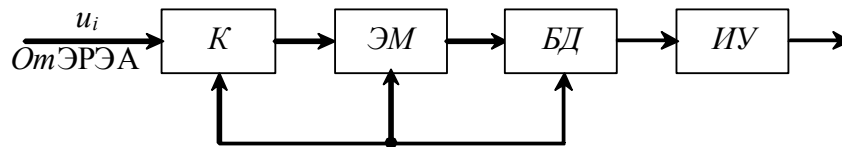


Рис. 6.9. Схема технических средств поиска дефектов

На рис. 6.10 приведена схема средств поиска дефектов в ЭРЭА по жесткой программе. По команде о начале поиска запускается генератор импульсов $ГИ$, который генерирует импульсы определенной амплитуды и частоты. В качестве $ГИ$ используется мультивибратор. Импульсы с выхода $ГИ$ поступают в счетчик импульсов $СЧИ$. Необходимое число импульсов определяется числом контрольных точек. С выхода $СЧИ$ импульсы поступают в регистр P , который выполняет функции запоминающего устройства и позволяет хранить поступающий с $СЧИ$ числовой код, а также выдавать сигналы на соответствующие входы дешифратора $ДШ$. Состоянием регистра P и дешифратора $ДШ$ определяется момент и порядок подключения контрольных точек. Дешифратор $ДШ$ переключает схему в соответствии с заданной жесткой программой поиска. Число выходов $ДШ$ равно

$$n_{\text{вых}} = 2^{n_{\text{вх}}}, \text{ где } n_{\text{вх}} - \text{число входов.}$$

В том случае, когда контролируемое напряжение необходимо сравнить по величине с эталонным, по соответствующей линии $ДШ$ выдается сигнал на ключ, подключающий к определенному сравнивающему устройству контролируемое напряжение.

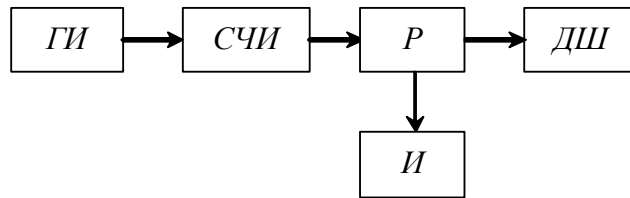


Рис. 6.10. Схема средств поиска дефектов по жесткой программе

Сигнал на одном из выходов *ДШ* означает наличие дефекта в контролируемом элементе. Сигнал о наличии дефекта служит для останова *ГИ*. В момент останова *ГИ* в регистр *Р* фиксируется число, соответствующее номеру отказавшего элемента. Это число в двоичном коде поступает в индикатор *И*, в качестве которого может быть использовано табло или мнемосхема.

7. Средства диагностирования цифровых схем и микропроцессорных систем

7.1. Анализатор логических состояний

Приборы этого типа, называемые также синхронными анализаторами, должны отвечать ряду требований. Основные из них сводятся к следующему:

- анализируемые данные должны поступать и отображаться в двоичном коде, т. е. в виде комбинаций битов;
- наличие достаточно большого числа параллельных входов, позволяющих одновременно контролировать целое слово;
- управление данными, поступающими в анализатор и циркулирующими в испытуемом устройстве, должно производиться одними и теми же синхроимпульсами. Интервал времени, необходимый для фиксации данных в анализаторе, должен быть очень малым;
- подключение анализатора к испытуемой схеме не должно влиять на ее параметры, а также требовать изменения режима или программы работы;
- конструкция входного устройства анализатора должна обеспечивать рациональное подключение прибора к испытуемому устройству;
- дисплей анализатора должен позволять легко воспринимать и интерпретировать отображаемую информацию.

В соответствии со вторым требованием выпускаются 8-, 12-, 16-, 32-, 48- и 64-канальные анализаторы логических состояний.

На рис. 7.1 представлена структурная схема 16-канального анализатора. Работой прибора управляют синхронизирующие сигналы (тактовые импульсы), которые подаются на вход тактовых импульсов от испытуемого устройства (возможно и управление сигналами внутреннего тактового генератора).

После включения анализатора на входы 1 и 2 логического элемента I_1 с выхода 2 формирователя управляющего сигнала и с выхода делителя частоты подается единица (разрешающий потенциал), в результате чего появляется разрешающий потенциал на входе 1 логического элемента I_2 .

С помощью клавиатуры экспериментатор набирает заданное слово, соответствующее нормальному логическому состоянию испытуемой схемы. С ним необходимо сравнить слово, поступающее на входы анализатора. Биты набранного слова подводятся к входам 1 компаратора слов.

Анализируемое слово подается в форме 16 параллельных битов на входы прибора (с 0-го по 15-й), которыми служат первые входы компараторов. Ко вторым входам компараторов подводится пороговое напряжение. Его значение определяет порог, различающий логический нуль и логическую единицу, характерные для испытуемой схемы (в числовом примере, приведенном в начале параграфа, этот порог 2,4 В). С выходов 16 компараторов биты слова подаются на входы 2 компаратора слов, где сравниваются с набранным словом, а также на входы D регистров памяти (с 0-го по 15-й).

Если слово, поступившее на входы анализатора, не совпадает со словом, набранным клавиатурой, то каждый новый тактовый импульс, проходящий через открытый логический элемент I_2 на входы C регистров памяти, записывает в каждый из них «свой» бит входного слова (в 16 регистрах памяти фиксируется слово в параллельной форме) и сдвигает бит, записанный предыдущим тактовым импульсом, в соседнюю ячейку регистра. Такое положение будет повторяться при каждом новом тактовом импульсе до тех пор, пока слова, подведенные к входам 1 и 2 компаратора слов, не окажутся одинаковыми.

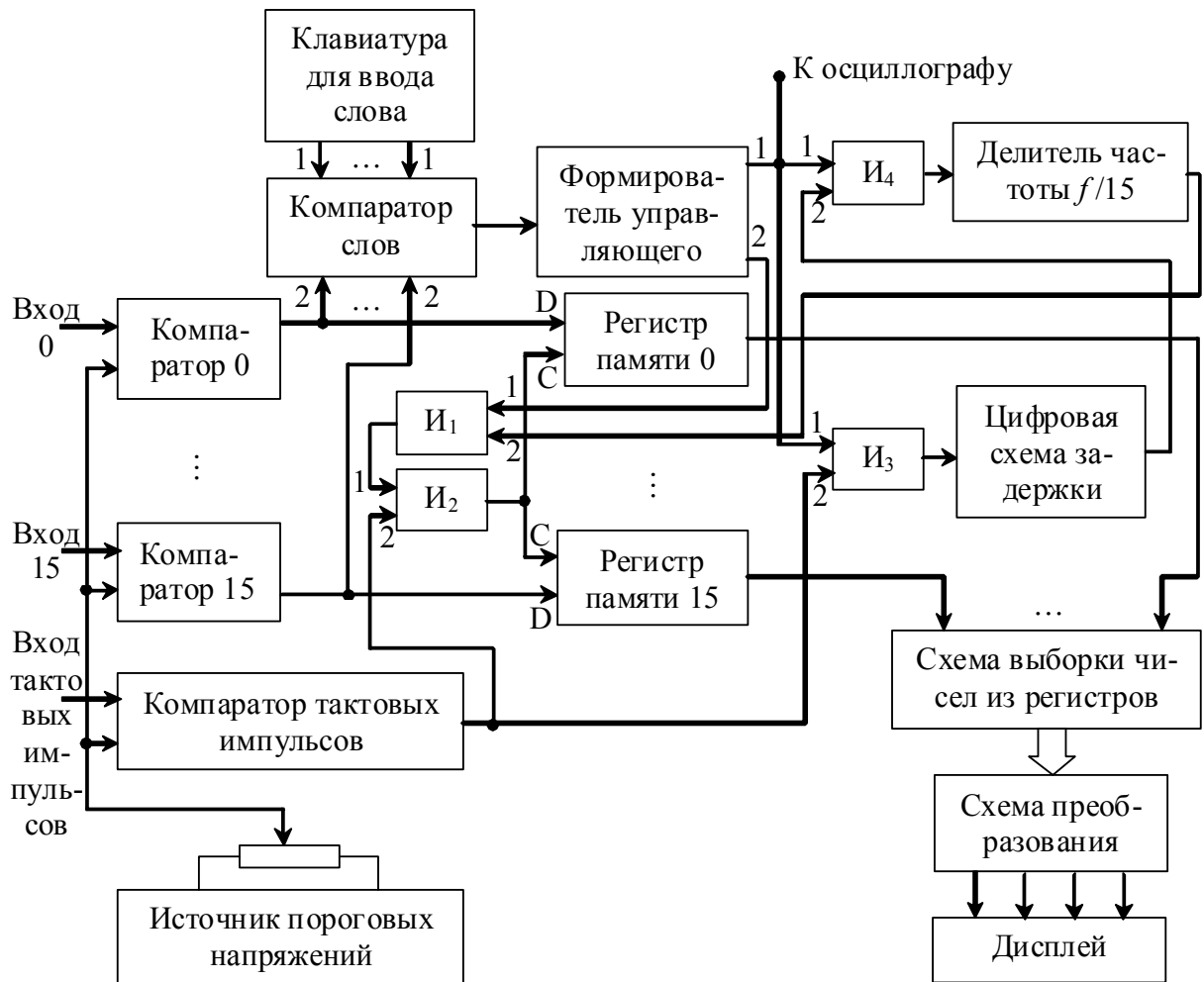


Рис. 7.1. Структурная схема логического анализатора

Когда входное слово совпадает с набранным, на выходе компаратора слов появляется импульс. Он запускает формирователь управляющего сигнала, вырабатывающий стробирующий импульс, который с выхода 1 формирователя подается на входы 1 логических элементов I_3 , I_4 . Это создает возможность прохождения тактовых импульсов через элемент I_3 на вход цифровой схемы регулируемой задержки, а также импульсов с ее выхода через элемент I_4 в делитель частоты.

При выключенной схеме задержки по истечении 15 тактовых импульсов (с момента совпадения слов) на выходе делителя частоты ($f/15$) появляется сигнал, запирающий логический элемент I_1 , а следовательно, и логический элемент I_2 , в результате чего прекращается запись чисел в регистры памяти. К этому моменту в регистрах зафиксировано слово, имеющееся в данный момент на входах прибора (оно расположено в последних от входа ячейках регистров), и еще 15 слов, записанных 15 тактовыми импульсами, поступившими после момента возникновения импульса на выходе компаратора слов (момента совпадения слов). Если входное слово в течение 16 тактов не менялось, то во всех ячейках данного регистра должен быть записан один и тот же бит, а во всей совокупности регистров - 16 одинаковых слов.

Запомненные в регистрах слова извлекаются схемой выборки чисел и передаются через схему преобразования, содержащую генератор символов, на дисплей. Последний отображает кадр из 16 слов в виде таблицы битов. Для облегчения восприятия таблицы последовательности слов (логических состояний) столбцы группируются в блоки по три бита в строке (если требуется представление в восьмеричном формате) или по четыре бита в строке (когда желательно представление в шестнадцатеричном или двоично-десятичном формате) рис. 7.2. Строки также обычно разбивают на группы, т. е. делают просветы между группами строк. Это упрощает считывание битов данной строки.

Рассмотренный режим работы анализатора логических состояний называют режимом НАЧАЛО. В этом режиме на дисплее отображается кадр из 16 слов, начинающийся с набранного слова. Оно представлено верхней строкой таблицы, а расположенные ниже

000 010 100 000	0000 1010 0000
000 000 100 000	0000 0010 0000
000 011 000 000	0000 1100 0000
000 001 000 000	0000 0100 0000
000 010 000 000	0000 1000 0000
000 000 000 000	0000 0000 0000
000 010 010 000	0000 1001 0000
000 000 010 000	0000 0001 0000
000 011 100 000	0000 1110 0000
000 001 100 000	0000 0110 0000
000 010 100 000	0000 1010 0000
000 000 100 000	0000 0010 0000
000 011 000 000	0000 1100 0000
000 001 000 000	0000 0100 0000
000 010 000 000	0000 1000 0000
000 000 000 000	0000 0000 0000

Рис. 7.2. Картина, наблюдаемая на табличном дисплее

строки соответствуют словам, записанным в регистрах после момента совпадения входного и набранного слов.

Во втором режиме анализа, называемом режимом КОНЕЦ, до момента совпадения входного слова с набранным схема работает так же, как и в первом режиме. Когда на выходе компаратора слов появляется импульс, формирователь управляющего сигнала немедленно выдает с выхода 2 сигнал логического нуля, запирающий логический элемент I_1 а следовательно, и логический элемент I_2 . Это создает «запрет» для ввода чисел в регистры памяти. Тогда в первых ячейках регистра оказывается записанным входное слово, совпавшее с набранным, а в последующей ячейках - 15 слов, появляющихся в течение 15 тактов, предшествовавших моменту совпадения входного слова с набранным. Следовательно, набранное слово завершает последовательность из 16 слов.

Таким образом, при втором режиме работы анализатора дисплей отображает кадр из 16 слов, заканчивающийся набранным словом. Подобный режим позволяет исследовать логические состояния испытуемой системы до момента наступления ожидаемого события - совпадения входного и набранного слов.

Возможен и третий режим работы анализатора - при включенной цифровой схеме регулируемой задержки. В этом режиме дисплей отображает кадр, состоящий из 16 слов, но первое слово кадра задержано относительно момента совпадения входного и набранного слов на число тактов (число слов), которое задано положениями регуляторов цифровой схемы задержки (рис. 7.1).

До сих пор при описании работы анализатора предполагалось, что у него табличный дисплей. В равной мере может быть использована и карта состояний. При этом схема преобразователя содержит два 8-разрядных ЦАП. На первый из них схема выборки чисел из регистров подает число, которое представляет 8 младших разрядов слова, записанного в регистрах. Образующееся на выходе первого ЦАП напряжение, пропорциональное числу, подводится к горизонтально отклоняющим пластинам ЭЛТ. Число, соответствующее 8 старшим разрядам слова, записанного в регистрах, поступает на второй ЦАП. Пропорциональное этому числу, напряжение подается с выхода второго ЦАП на вертикально отклоняющие пластины трубки. Переход от табличного отображения к карте состояний достигается изменением положения переключателя вида дисплея.

При поверхностной оценке описанной процедуры может показаться, что тестировать микропроцессорную систему анализатором логических состояний просто. Однако реальная процедура прослеживания последовательно меняющихся состояний сложна и продолжительна, а для интерпретации результатов анализа требуется специалист высокой квалификации, хорошо знающий тестируемую систему. Поэтому логические анализаторы более эффективны для испытаний обычных цифровых устройств, чем для контроля и диагностики (особенно глубокой) микропроцессорных систем. Эти анализаторы применяются преимущественно в лабораторной практике, реже в производстве и совсем редко в условиях эксплуатации.

7.2. Анализаторы логических временных диаграмм

Рассмотренные анализаторы логических состояний позволяют констатировать факт (а иногда и место) возникновения неисправности в тестируемой цифровой схеме. Однако после того как установлено наличие ошибки, требуется определить ее характер и причину. Часто ошибки проявляются в виде кратковременных импульсных помех, одновременного прихода сигналов, перемещающихся нарушений синхронизации, неправильных команд. В таких ситуациях эффективно применение анализатора логических временных диаграмм, который также называют асинхронным. Он очень удобен при контроле стандартных интерфейсов для отображения последовательностей, посылаемых по шинам управления, данных, передаваемых через устройства ввода - вывода, сигналов «рукопожатия».

Так как при временном анализе приходится исследовать сигналы и процессы, длительность которых намного меньше длительности, занимаемой словом данных, то рабочая частота анализатора логических временных диаграмм должна быть значительно выше, чем у анализатора логических состояний для тех же самых полей данных.

У большинства анализаторов логических временных диаграмм предусмотрена возможность работы в двух основных режимах: синхронном и асинхронном. Последний режим - высокоскоростной. Максимальное быстродействие определяется назначением анализатора. Выпускаются приборы, характеризующиеся быстродействием 20, 50, 100 и 500 МГц.

Важным достоинством анализаторов логических временных диаграмм, которым не обладают анализаторы логических состояний, является возможность обнаружения ложных сигналов, представляющих собой импульсные помехи малой длительности. Их действие может нарушить нормальное функционирование системы, а в синхронном режиме их практически невозможно обнаружить. В ряде анализаторов логических временных диаграмм предусмотрены специальные триггерные схемы, фиксирующие ложные импульсы (это позволит обнаруживать их даже при длительности 5 нс). Схема расширяет короткие импульсы почти до длительности, равной интервалу дискретизации, что гарантирует регистрацию ложных импульсов.

Для облегчения анализа временных диаграмм дисплей, отображающий их, снабжен специальным указателем (курсором). Он представляет собой прямую вертикальную линию. Ее можно перемещать вдоль экрана, устанавливая в характерных точках диаграммы.

С помощью этого курсора удобно определять сдвиг по оси времени одной точки временной диаграммы относительно другой, У некоторых анализаторов имеются два таких курсора, что позволяет измерять прямым путем (без вычислений) интервал времени, разделяющий точки, с которыми совмещены курсоры.

Встречаются различные варианты конструкций логических анализаторов. Одни приборы выпускаются со встроенной ЭЛТ, другие для воспроизведения временных диаграмм требуют применения осциллографа или отдельного блока с ЭЛТ. Имеются логические анализаторы, позволяющие отображать данные, как в виде таблиц логических состояний, так и в виде временных диаграмм (рис. 7.3).

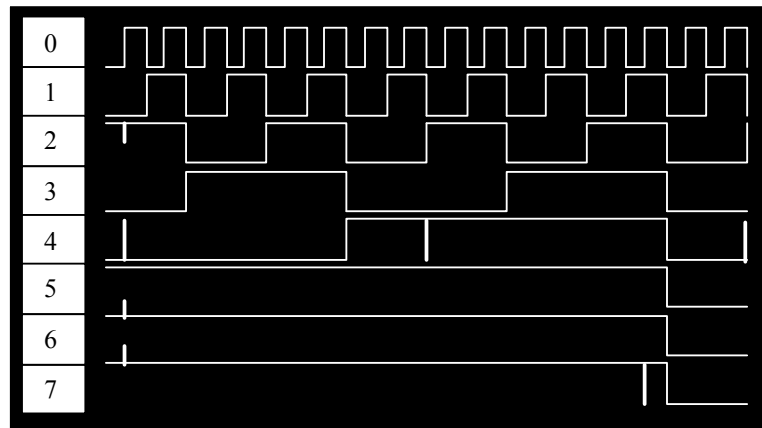


Рис. 7.3. Логические временные диаграммы

Применение в логическом анализаторе цветной ЭЛТ способствует повышению производительности труда испытателей. Отображение временных диаграмм зеленым цветом, помех желтым и курсоров красным позволяет при поиске неисправностей точнее считывать информацию с дисплея, уменьшить число ошибок.

7.3. Анализатор потока цифровых данных

Рассмотренный ранее анализатор логических состояний (рис. 7.1) хорошо выполняет свои функции при контроле работы относительно простых цифровых устройств, но недостаточно эффективен, когда требуется анализировать потоки данных, циркулирующие по шинам тестируемой микропроцессорной системы. Эту задачу решает специально разработанный прибор, получивший название анализатора потока цифровых данных. Он представляет собой усовершенствованный логический анализатор со встроенной микропроцессорной системой, который позволяет наблюдать на экране дисплея и анализировать логические состояния на шинах адреса, данных, управления тестируемой системы при разработке и отладке как ее аппаратных, так и программных средств. Следует подчеркнуть, что программы, выполняемые контролируемой микропроцессорной системой (микро-ЭВМ), для проверки которых служит анализатор, могут включать различные ветвления, циклы, подпрограммы.

Система запуска прибора построена так, что пользователь может выбрать начало захвата данных в определенной точке программы, анализировать ход основной ее части, сопоставлять получаемые результаты с ожидаемыми. Предусмотрены режимы последовательного запуска, выборочного сбора данных, перезапуска, а также подсчета числа состояний.

На рис. 7.4 приведена структурная схема 32-канального анализатора потока цифровых данных. Его работа заключается в следующем.

Исследуемый поток данных подается в форме параллельных битов на первые входы аналоговых компараторов, ко вторым входам которых подводится пороговое напряжение (число используемых компараторов зависит от длины анализируемого слова состояния). Компараторы служат для согласования логических уровней тестируемого устройства и анализатора. С выхода аналоговых компараторов биты слова поступают в цифровые компараторы, с помощью которых из потока данных выделяется требуемая для просмотра область. Условия просмотра задаются кодовыми комбинациями, предварительно введенными в цифровые компараторы. Эти комбинации представляют собой цифровые коды состояний, через которые проходит анализируемая программа. Они сопоставляются со словами, подаваемыми на входы прибора. Различают два вида слов состояний, определяющих условия просмотра: состояния запуска и выборочные состояния. К первым относят слова, которые появляются на входах прибора в определенном порядке и задают траекторию (трассу) потока данных. Вторые - это слова, выделяемые из потока данных (вся остальная информация исключается как ненужная) и записываемые в ЗУ собранных данных.

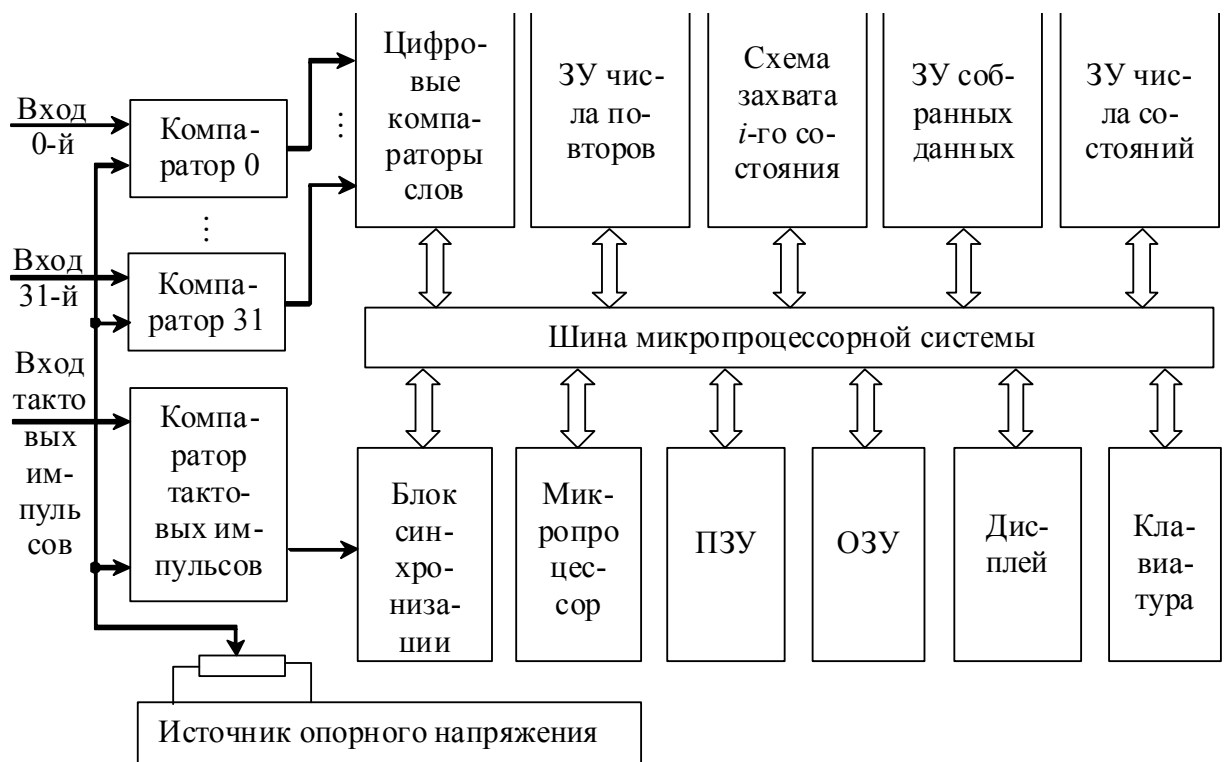


Рис. 7.4. Структурная схема 32-канального анализатора потока цифровых данных

Сигналы, образующиеся на выходах цифровых компараторов при каждом совпадении анализируемого слова состояния с ожидаемым (в процессе анализа это многократно повторяется), вводятся в ЗУ числа повторов и схему захвата i -го состояния. Когда число повторов станет равным заданному, указанные устройства вырабатывают сигнал, изменяющий адрес ячейки ЗУ собранных данных, в которую записывается слово состояния (считывается оно по сигналам, поступающим из микропроцессорной системы). Число записываемых слов состояния фиксируется в ЗУ числа состояний. Так как слова следуют с определенным временным шагом, то подсчет числа состояний равнозначен измерению интервала времени между запоминаемыми состояниями. Это позволяет измерить время исполнения циклов или обслуживания прерываний.

По командам микропроцессора, управляющего работой анализатора, в ОЗУ вводится информация, которая должна быть отображена на экране дисплея. Ее можно пред-

ставить в двоичном, восьмеричном и шестнадцатеричном форматах - для кодов, соответствующих условиям просмотра и воспроизводимым словам, а также в мнемоническом виде (команд ассемблера микропроцессора) - для кодов воспроизводимых слов.

Разработан также логический анализатор, дающий возможность фиксировать количественные показатели программ при работе в реальном масштабе времени

7.4. Сигнатурный анализатор

7.4.1. Сущность сигнатурного анализа

Сигнатурный анализ сводится к сопоставлению реальной сигнатуры конкретного узла, отображаемой дисплеем анализатора, с образцовой сигнатурой этого узла, указанной на схеме (рис. 7.5) или в таблице руководства по обслуживанию испытуемого устройства.

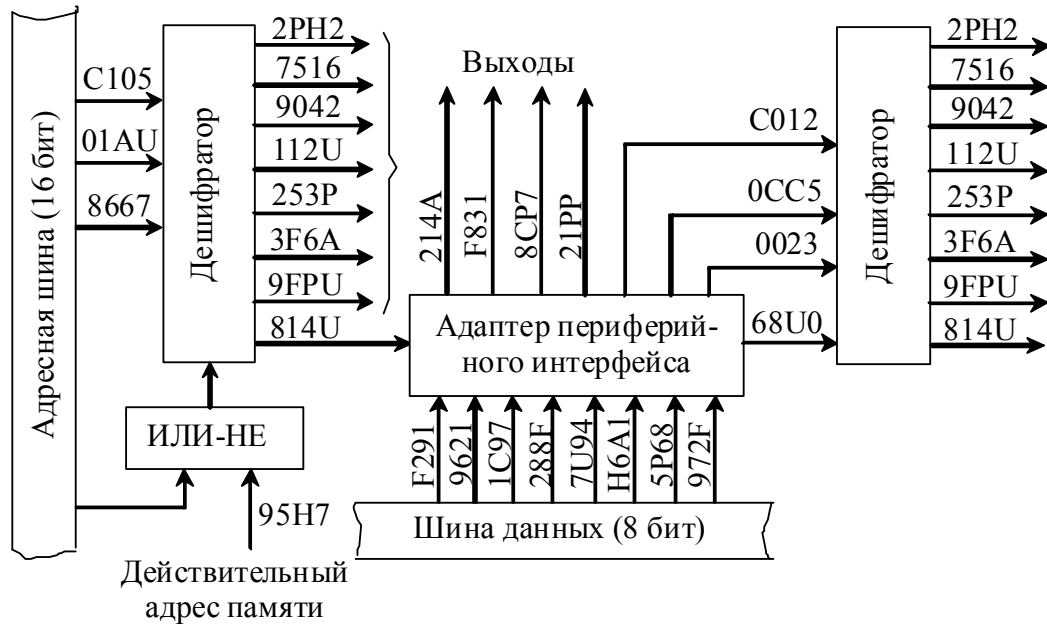


Рис. 7.5. Пример схемы с указанными сигнатурами

Несовпадение сигнатур свидетельствует о неисправности, ненормальном функционировании устройства. Например, если на дисплее анализатора высвечена сигнатура F865, а на схеме в точке, соответствующей выходу данного узла (к которой подключен анализатор), записана сигнатура A953, то наличие неисправности очевидно. Для выяснения причины появления неправильной сигнатуры прибор подключают с помощью пробника (щупа, зонда) к различным точкам схемы с обозначенными для них сигнатурами и фиксируют совпадения и несовпадения в каждой точке. Таким способом удастся локализовать неисправный узел: на его выходе фактическая и образцовая сигнатуры различны, в то время как на выходе предшествующего узла, соединенном со входом данного узла, фактическая и образцовая сигнатуры одинаковы.

Процедура сигнатурного анализа внешне схожа с процедурой обнаружения неисправностей в аналоговых устройствах. На принципиальных схемах последних в характерных точках указаны эпюры напряжений сигналов и числовые значения напряжений. С ними сопоставляют осциллограммы, наблюдаемые на экране электронно-лучевого осциллографа, а также результаты измерения напряжений электронным вольтметром и в итоге сопоставления делают заключение о нормальной работе или неисправности испытуемого устройства.

Для программируемых цифровых устройств система контроля, основанная на сопоставлении осциллограмм, к сожалению, не может быть использована, поскольку все

двоичные последовательности на экране осциллографа практически неразличимы. Тем более она не осуществима по отношению к устройствам, содержащим микропроцессоры, по той причине, что нет однозначного соответствия между характеристиками устройства и его конкретными узлами. Поэтому для подобных устройств сигнатурный анализ является способом контроля и диагностики, эффективность которого трудно переоценить.

7.4.2. Принцип формирования сигнатуры

Чтобы провести сигнатурный анализ цифровых систем с микропроцессорами, необходим испытательный сигнал, представляющий собой двоичную последовательность, т. е. последовательность коротких прямоугольных импульсов, амплитуды которых могут принимать только два, резко отличающихся одно от другого значения, записываемые в виде битов 0 и 1.

Последовательность нулей и единиц, называемую данными, вырабатывает по специальной программе микропроцессор, расположенный внутри испытываемого прибора (устройства). Из этой последовательности формируется испытательный сигнал, называемый тест-последовательностью. Она имеет определенную длину, которая зависит от общего числа бит, заключенных в последовательности. Так как биту соответствует импульс строго фиксированной длительности, то требуемую длину последовательности устанавливают с помощью стробирующего импульса (временных ворот), варьируя его длительность.

Принцип получения сигнатуры из тест-последовательности с помощью сигнатурного анализатора поясняет рис. 7.6. Сигнатура формируется в схеме, которая содержит 16-разрядный сдвигающий регистр (16 триггеров), четыре последовательно включенных сумматора по модулю 2 и цепи обратной связи, соединяющие вторые (нижние по схеме) входы первого, второго, третьего и четвертого сумматоров (нумерация - справа налево) с выходами седьмого, девятого, двенадцатого и шестнадцатого триггеров соответственно. У сдвигающего регистра два входа: через основной вход, обозначенный буквой D (от англ. Data - данные), в регистр вводятся биты двоичной последовательности, на второй вход, который отмечен буквой С (от англ. Clock— тактирование), поступают тактовые (синхронизирующие) импульсы, продвигающие биты по регистру.

Первый вход первого сумматора по модулю 2 служит входом схемы, на который подается двоичная тест-последовательность. Она может быть любой длины, но в конце цикла обработки анализируется только 16-битовое число, зафиксированное в регистре. Это число, выраженное в шестнадцатеричном коде, и представляет сигнатуру данной тест-последовательности. Так как число знаков сигнатуры намного меньше числа бит тест-последовательности, то говорят, что сигнатурный анализатор осуществляет «сжатие» информации.

Следует подчеркнуть, что шестнадцатеричный код, применяемый в сигнатурных анализаторах, частично видоизменен по сравнению с обычным кодом 0123456789ABCDEF и записывается так: 0123456789ACFHPU. Легко заметить, что изменение коснулось только буквенной части: все буквы, кроме А, либо заменены другими, либо расположены в ином порядке.

В «сигнатурном» шестнадцатеричном коде буквы С и F соответствуют числам 11 и 12 (десятичной системы счисления), а числа 13, 14 и 15 обозначены буквами H, P и U. Такой выбор знаков шестнадцатеричного кода связан с применением индикаторов, отображающих цифру или букву в виде набора отрезков линий - сегментов. Наибольшее число сегментов - семь и поэтому эти индикаторы называют семисегментными. Видоизмененный код облегчает считывание букв сигнатуры, позволяет избежать ошибок. Если бы использовались буквенные знаки обычного кода, то при отображении их семисегментными

вый (синхронизирующий) импульс, поступающий на вход С регистра, вводит в триггер T_1 первый бит последовательности, подаваемой на вход D. Второй тактовый импульс сдвигает первый бит на одну ячейку влево - из триггера T_1 в триггер T_2 и вводит в триггер T_1 второй бит последовательности. Каждый очередной тактовый импульс сдвигает содержимое регистра влево еще на одну ячейку и вводит в триггер T_1 очередной бит последовательности. Эта процедура заканчивается тогда, когда в триггер T_1 регистра войдет 20-й (для рассматриваемого примера) бит тест-последовательности, прошедшей через цепочку сумматоров по модулю 2. Оставшийся в регистре код, представленный в шестнадцатеричном формате, дает сигнатуру обработанной двоичной последовательности (в нашем примере F86H). Ее отображает дисплей сигнатурного анализатора (рис. 7.6).

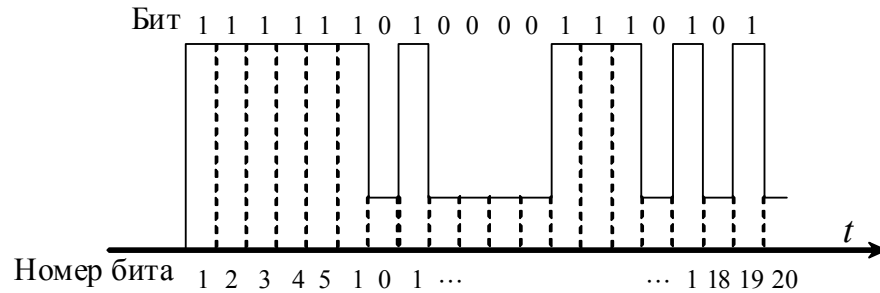


Рис. 7.7. Тест-последовательность

Нахождение множества сигнатур по изложенной методике трудоемко и требует большой затраты времени, особенно для последовательностей большой длины (очевидно, что чем длиннее последовательность, тем больше разнообразных сигнатур формируется из нее). Поэтому целесообразно сформулировать правило, согласно которому данной последовательности битов ставится в соответствие определенная сигнатура. Формализация процедуры позволяет решить задачу получения сигнатур программным путем с помощью ЭВМ.

Установим соответствие между двоичной последовательностью на выходе общего сумматора по модулю два и двоичной последовательностью на его входе. Пусть входная последовательность содержит n битов: $a_1 a_2 \dots a_{n-1} a_n$ (где a - либо 0, либо 1). Ей соответствует выходная последовательность, которая также состоит из n битов: $b_1 b_2 \dots b_{n-1} b_n$ (аналогично b - либо 0, либо 1). Первые семь битов обеих последовательностей одинаковы, т. е. $b_1 = a_1, b_2 = a_2, b_3 = a_3, b_4 = a_4, b_5 = a_5, b_6 = a_6, b_7 = a_7$. Начиная с восьмого, характер i -го бита (0 или 1) определяется согласно формуле ($8 \leq i \leq n$):

$$b_i = \begin{cases} a_i & \text{при } b_{i-16} \oplus b_{i-12} \oplus b_{i-9} \oplus b_{i-7} = 0, \\ \bar{a}_i & \text{при } b_{i-16} \oplus b_{i-12} \oplus b_{i-9} \oplus b_{i-7} = 1, \end{cases} \quad (7.1)$$

где \bar{a}_i - бит, противоположный биту a_i знак \oplus - суммирование по модулю 2.

Если в индексе бита b_{i-k} , стоящего в правой части (7.1), получается отрицательное число ($i < k$) или нуль ($i = k$), то этот бит отбрасывается. Например, требуется определить бит b_{10} . Тогда $i = 10$ и, следовательно, $i - 16 = -6, i - 12 = -2, i - 9 = 1; i - 7 = 3$. Формула для искомого бита принимает вид

$$b_{10} = \begin{cases} a_{10} & \text{при } b_1 \oplus b_3 = 0, \\ \bar{a}_{10} & \text{при } b_1 \oplus b_3 = 1, \end{cases}$$

Несложно определить, что

$$b_8 = \begin{cases} a_8 & \text{при } b_1 = 0, \\ \bar{a}_8 & \text{при } b_1 = 1; \end{cases} \quad b_9 = \begin{cases} a_9 & \text{при } b_2 = 0, \\ \bar{a}_9 & \text{при } b_2 = 1. \end{cases}$$

Чтобы получить двоичный код сигнатуры, необходимо в последовательности $b_1b_2\dots b_{n-1}b_n$ «отсечь» первые $n - 16$ битов. Оставшиеся 16 битов и представляют сигнатуру в двоичном формате.

Пример 7.1. Сначала воспользуемся последовательностью $a_1a_2\dots a_{19}a_{20}$, из которой была сформирована сигнатура, изображенная на рис. 7.6. Вычисления согласно (7.1) дают последовательность $b_1b_2\dots b_{19}b_{20}$. Запишем обе последовательности:

Но- мер i бита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a_i	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0		
b_i	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1
						F			8				6			H				

После «отсечения» первых четырех битов $b_1b_2b_3b_4$, (что показано штриховой линией) остающаяся последовательность $b_5b_6\dots b_{19}b_{20}$ представляет собой двоичный код сигнатуры. Перевод в шестнадцатеричный формат дает сигнатуру F86H.

Пример 7.2. Выберем другую входную последовательность длиной $n = 20$ бит. После вычисления выходной последовательности будем иметь:

a_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
b_i	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
						P			7				3			3				

Пример 7.3. Укоротим предыдущую входную последовательность на один бит ($n = 19$) и вычислим соответствующую ей выходную последовательность. Чтобы получить двоичный код, в этом случае отсекают три бита $b_1b_2b_3$ (так как $n - 16 = 3$). Тогда:

a_i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b_i	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
						U			3				9			9			

Из сопоставления результатов, полученных в примерах 7.2 и 7.3, видно, как сильно различаются сигнатуры двух последовательностей, отличающихся одна от другой лишь на один бит.

7.4.3. Структурная схема сигнатурного анализатора

В приведенной на рис. 7.8 схеме анализатора выполняются три основные операции: формирование тест-последовательности, формирование сигнатуры и отображение последней.

Первая операция протекает следующим образом. Из испытуемого устройства через согласующую (переходную) колодку трехканального пробника в анализатор поступают управляющие сигналы. Используются сигналы трех видов: тактовые (синхронизирующие) импульсы (рис. 7.9а), запуска (ПУСК, рис. 7.9б) и останова (СТОП, рис. 7.9в). Фронт сигнала ПУСК подготавливает сдвигающий регистр формирователя сигнатур к приему тест-последовательности и задает фронт временных ворот, а фронт сигнала СТОП - их срез

(рис. 7.9з). Таким образом, интервал времени, разделяющий фронты сигналов ПУСК и СТОП, определяет продолжительность временных ворот.

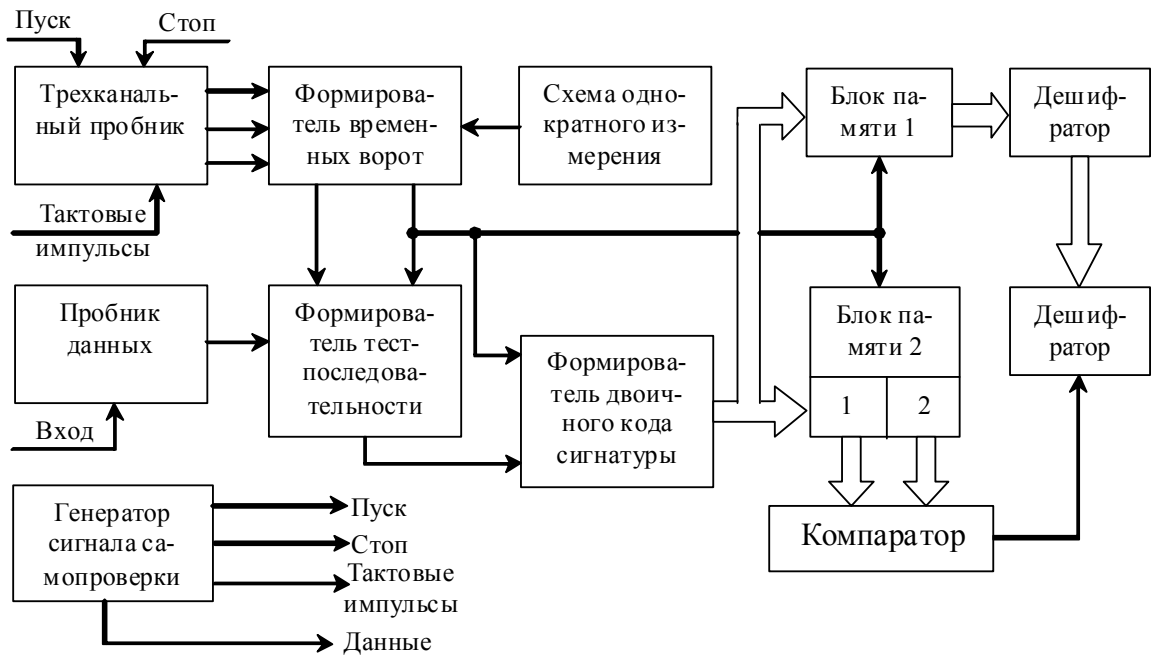


Рис. 7.8. Структурная схема сигнатурного анализатора

Полученный стробирующий импульс (временные ворота) и тактовые импульсы подаются на формирователь тест-последовательности, в которой через пробник данных также поступает последовательность данных из испытуемого устройства.

В моменты совпадения фронтов тактовых импульсов (рис. 7.9а) с битами данных (рис. 7.9д) образуются биты тест-последовательности (рис. 7.9е), причем на ее структуру не влияют никакие изменения данных в интервалах между фронтами тактовых импульсов. Первый бит тест-последовательности возникает при первом совпадении фронта тактового импульса с данными после отпираания временных ворот (рис. 7.9а, б, г, д, е) а ее последний бит появляется в момент последнего совпадения перед запираением ворот (рис. 7.9а, в, г, д, е). Из изложенного следует, что длину тест-последовательности (число бит в ней) можно регулировать, изменяя интервал времени между сигналами ПУСК и СТОП. Существенно заметить, что моменты появления фронтов этих сигналов можно задавать с помощью органов управления расположенных на передней панели анализатора.

Тактовые импульсы, поступающие в сигнатурный анализатор из испытуемого устройства, синхронизируют работу всех узлов анализатора. Особо следует подчеркнуть, что эти импульсы служат тактовыми и для сдвигающего регистра (они подаются на вход С формирователя двоичного кода сигнатуры).

Образованная тест-последовательность подводится к входу D формирователя двоичного кода сигнатуры, на вход С которого поступают тактовые импульсы через формирователь временных ворот (рис. 7.8). Процедура получения сигнатуры уже была рассмотрена (рис. 7.6).

Сформированное двоичное число, определяющее сигнатуру, поступает в два блока памяти. Блок 1 хранит число в течение цикла измерения. Оно передается (без разрушения информации) на отображающее устройство через дешифратор, преобразующий двоичное 16-разрядное число в четырехзначный шестнадцатеричный код, - сигнатуру. В блоке памяти 2 хранятся результаты формирования сигнатур, полученные за два цикла измерения, следующие один за другим. Числа, соответствующие двум сигнатурам, поступают на два входа компаратора, осуществляющего сравнение чисел. При идентичных сигнатурах в

подблоках I и II блока памяти 2 реакция компаратора отсутствует, если же сигнатуры не совпадают, то светится надпись «нестабильная сигнатура». Это позволяет обнаружить случайные сбои в работе испытуемого устройства.

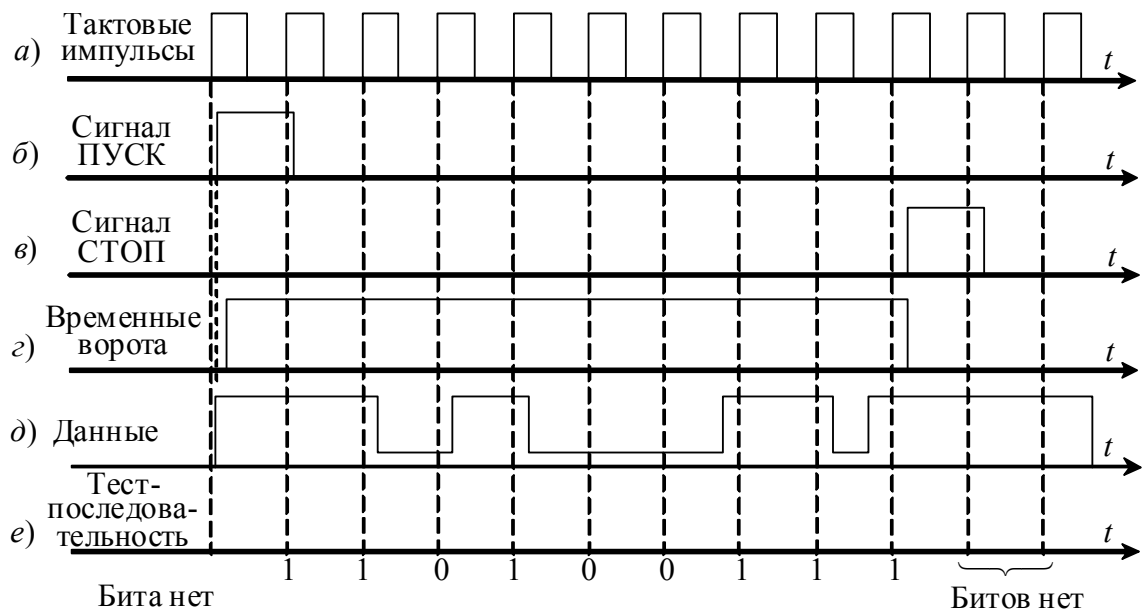


Рис. 7.9. Диаграммы, поясняющие процесс формирования тест-последовательности

Предусмотрен также режим однократного измерения, при котором сигнатура формируется за время действия одного стробирующего импульса (временных ворот). Это достигается с помощью схемы однократного измерения. Чтобы повторить процедуру формирования, нужно вручную сбросить показание, отображаемое дисплеем.

В анализаторе содержится внутренний генератор, вырабатывающий сигналы, необходимые для самопроверки нормального функционирования анализатора. Как видно из рис. 7.8, на выходе генератора получаются четыре сигнала: первые три соответствуют сигналам, подаваемым на входы трехканального пробника, а четвертый — сигналу, подаваемому на вход пробника данных. Этот же генератор используется в качестве источника сигнала для испытания относительно простых (по логике работы) цифровых схем.

7.4.4. Методика контроля и диагностики устройств, содержащих микропроцессор.

Возможность применения сигнатурного анализа для контроля и диагностики цифрового устройства создается на стадии проектирования этого устройства. Приборы, схема и конструкция которых допускают подключение сигнатурного анализатора, называют сервиспригодными (это общее название устройств, в которых приняты конструктивные меры, упрощающие обслуживание в процессе эксплуатации). По отношению к системам с микропроцессорами сервиспригодность предполагает, что на этапе сигнатурного анализа можно осуществить следующее:

- выделить ядро системы;
- разорвать цепь местной обратной связи;
- привести в определенное начальное состояние контролируемые схемы;
- располагать стабильными тест-последовательностями на интервале, равном дли-

тельности временных ворот;

- иметь документацию, указывающую образцовые сигнатуры для конкретных точек и сечений схемы.

Ядром микропроцессорной системы, называют сочетание микропроцессора и генератора тактовых сигналов. Для проверки ядра необходимо обособить, выделить его и разорвать цепи обратных связей, идущих к ядру. Такими цепями являются шина данных и канал прерывания. Затем выясняют, имеются ли неисправности в ядре. Если анализатор диагностирует неисправность, то локализуют ее источник, используя сигнатурную карту.

Возможны два режима сигнатурного анализа микропроцессорных систем: автоматический и программно-управляемый. Используя первый режим, создают свободный ритм работы микропроцессора, при котором он циклически проходит все поле адресов. Для этого на отключенные входы шины данных подается команда INCREMENT, которая вызывает приращение на единицу содержимого счетчика команд. После этого микропроцессор вновь обращается к входу шины данных, и поскольку сохраняется та же команда, то число в счетчике команд снова увеличивается на единицу и т. д. Сигналы ПУСК и СТОП получают от адресной шины, используя линию старшего разряда адреса, а тактовыми сигналами служат тактовые импульсы на входе микропроцессора. Их функцию могут выполнять также сигналы микропроцессора ВЫДАЧА или СИНХРОНИЗАЦИЯ.

В программно-управляемом режиме сигнатурного анализа используется стимулирующая программа, хранящаяся в ПЗУ. Согласно этой программе генерируются сигналы пуска и останова, а также записываются повторяющиеся потоки информации через шину данных для контроля узлов, соединенных с процессором. Хотя осуществление программно-управляемого режима, в отличие от автоматического, требует использования примерно одной двадцатой части объема ПЗУ, этот режим весьма эффективен, так как дает возможность шире вести контроль, охватить большую часть схем испытуемого устройства. Сочетание обоих режимов позволяет сделать контроль еще более полным.

Приведение контролируемых схем в начальное состояние — очень важная операция (ее часто называют инициализацией). Если она не выполнена, то нельзя гарантировать получение одинаковых сигнатур при повторных испытаниях одного и того же исправного изделия.

Полная процедура контроля и диагностики микропроцессорной системы предполагает проведение большого числа разнообразных операций. Представление о применимости логических и сигнатурных анализаторов дает табл. 7.1. Анализ ее приводит к заключению, что, хотя полезны и оба вида приборов, чаще встречаются диагностические ситуации, в которых наиболее эффективен сигнатурный анализ.

Таблица 7.1

Вид анализатора	Диагностируемые устройства		Уровень диагностики			Условия применения		
	Обычные цифровые	Микропроцессорные системы	Прибор	Узел	Компонент	Лаборатория	Производство	Эксплуатация
Логический	●	▲	●	▲	■	●	▲	■
Сигнатурный	●	●	▲	●	●	▲	●	●

▲ - возможно; ■ - не применяется; ● - применение наиболее эффективно.

Однако, как следует из описания структурной схемы и работы сигнатурного анали-

затора, возможность использования сигнатурного анализа необходимо предусматривать еще на стадии проектирования устройства, содержащего микропроцессор. Иначе говоря, сигнатурный анализ применим для проверки и диагностики тех устройств, которые заранее к нему подготовлены и в аппаратурном, и в программном плане. Это, естественно, осложняет решение задачи контроля. Некоторые устройства вообще не удается приспособить к сигнатурному анализу из-за малой емкости памяти, отводимой для программы, и ограниченного числа узлов аппаратуры. К тому же следует иметь в виду, что многие изделия с микропроцессорами для отыскания неисправностей, в которых эффективен сигнатурный анализ, были разработаны и изготовлены еще до того, как он получил распространение.

Преодолению указанных трудностей, расширению круга объектов, для которых возможно применение сигнатурного анализа, в определенной мере способствуют приборы, разработанные в последние годы.

7.5 Тестеры для цифровых устройств

При эксплуатации и ремонте цифровых средств измерения, а также аппаратуры, содержащей сложные цифровые устройства и встроенные микропроцессорные системы, применяют специальные тестеры — портативные многофункциональные приборы. Имеется несколько их разновидностей.

В одном из таких приборов объединены анализатор логических состояний и сигнатурный анализатор. Это позволило, с одной стороны, ускорить диагностическую процедуру, и с другой, исключить необходимость в схемных дополнениях, специально предусматриваемых для контроля и диагностики эксплуатируемого устройства.

Другой вариант тестера представляет собой сочетание сигнатурного и логического анализаторов (иногда анализатора потока цифровых данных) с мультиметром. Помимо проведения диагностики тестируемого устройства подобный тестер позволяет измерять цифровыми методами ряд параметров сигналов в процессе отыскания неисправности: частоту, интервал времени, сопротивление резистора, напряжение постоянного и переменного тока, разностные напряжения, пиковые значения напряжений, уровни логического нуля и логической единицы.

Еще один вариант тестера — испытатель микропроцессоров, в составе которого имеются специальный генератор тест-последовательностей и сигнатурный анализатор. Этот прибор позволяет проводить сигнатурный анализ ряда устройств, в конструкции которых заранее не предусматривалась такая возможность. Испытатель микропроцессоров вырабатывает тест-последовательность, состоящую из нулей и единиц, которая подается на контролируруемую плату. Из полученной выходной последовательности битов образуется сигнатура. Особенность подобных микропроцессорных тестеров заключается в том, что каждая модель прибора рассчитана на работу с микропроцессором определенного типа. Для осуществления контроля устройства, содержащего микропроцессор, последний снимают с испытуемой платы и устанавливают в разъем, имеющийся на передней панели тестера, а кабель, выходящий из прибора, подключают к плате, точнее, к гнезду, из которого был извлечен микропроцессор. Во внутренней памяти испытателя микропроцессоров хранится набор тестовых программ, дающих возможность проверить микропроцессор контролируемого устройства (его систему команд, прерывания), ОЗУ, ПЗУ и т. п.

Имеется также тестер, содержащий сигнатурный анализатор, с помощью которого можно диагностировать системы с микропроцессорами различных типов, устанавливая соответствующие сменные модули. Он автоматически сопоставляет контролируемую сигнатуру с образцовой. Для хранения набора образцовых сигнатур в тестере используется

перепрограммируемое ПЗУ (ППЗУ). Если реальная сигнатура в контролируемой точке не совпадает с образцовой сигнатурой данной точки, то прибор выдает сигнал. Таким образом, отпадает необходимость сопоставления полученной сигнатуры с образцовой, содержащейся в таблице или указанной на схеме контролируемого, диагностируемого устройства. Проводя контроль, пользователь вставляет в тестер модуль ППЗУ, соответствующий испытываемому микропроцессору, и переходит от одной контролируемой точки схемы к другой в определенном порядке.

Этот прибор называют сигнатурным верификатором или сигнатурным контрольным (верификация — от англ. verification — проверка, проверка, контроль — установление достоверности опытным путем, сравнением с образцом).

7.6. Измерительные пробники

Эти устройства, называемые также зондами или щупами, выполняют важные функции при логическом анализе. Их конструкции разнообразны.

Одну группу составляют индивидуальные пробники, используемые как самостоятельные устройства для контроля логического уровня в одной точке испытываемой схемы. Такие пробники, называемые логическими, по своему внешнему виду напоминают карандаш с наконечником, из которого выходит металлическая игла.

Логический пробник служит для обнаружения и индикации логического уровня в точке схемы, к которой прижата игла наконечника. Для индикации уровня используется свечение наконечника, причем оно тусклое, пока пробник находится вне испытываемой схемы. Если потенциал точки, которой касается игла, высокий, т. е. логическая единица, то наблюдается яркое свечение наконечника. При логическом нуле (низкий потенциал) свечение отсутствует. Если же значение потенциала выше значения, соответствующего верхней границе интервала логического нуля, и ниже значения, обозначающего нижнее значение интервала логической единицы («плохой» уровень), то свечение получается тусклым. Пульсирующий потенциал отображается мерцанием, низкочастотными вспышками.

Логический пробник считают эффективным средством для обнаружения очень коротких, а также редко повторяющихся импульсов, которые трудно наблюдать с помощью осциллографа. Он реагирует на импульсы положительной полярности, длительность которых больше или равна 10 нс, а при импульсах отрицательной полярности свечение сразу прекращается. С помощью логического пробника удастся отыскать такую неисправность, как обрыв цепи (в этом случае наблюдается тусклое свечение наконечника).

В многоканальных логических анализаторах измерительные пробники служат для подключения к объекту тестирования. Возможны различные конструктивные решения. Например, у одних анализаторов каждый пробник выведен с передней панели прибора индивидуально. Для других анализаторов характерны переходные колодки, объединяющие зонды в группы, например 8-канальные переходные колодки с ответвляющимися от них пробниками. Встречаются и приборы, у которых входное устройство представляет собой комплект из четырех колодок: три колодки служат для подключения к шестнадцати каналам данных и двум каналам признаков, а четвертая содержит пробник, предназначенный для подачи в прибор синхронизирующих сигналов.

8. ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

8.1. Диагностические параметры

Все сигналы, формирующиеся в устройстве, напряжения источников питания, другие физические явления, сопровождающие его действие, являются диагностическими параметрами.

Процессы, происходящие в РЭС, могут наблюдаться во многих точках или участках схемы в форме закономерных изменений или постоянного тока, напряжения, электромагнитного или другого физического поля. Практически все точки схем, в которых существует возможность произвести измерения характеристик процессов действия, являются точками диагностирования, а измеряемые характеристики – диагностическими параметрами.

Число диагностических параметров, характеризующих электрорадиоэлектронную аппаратуру, изменяется в широких пределах в зависимости от аппаратуры, задач диагностирования и требуемой достоверности диагностирования и возрастает с увеличением глубины диагностирования и достоверности диагноза. Для современной электрорадиоэлектронной аппаратуры число оцениваемых диагностических показателей может достигнуть нескольких сотен.

Контролируемые параметры описываются следующими свойствами:

- номинальным значением и полем допусков (границами);
- зависимостью значений параметров от внешних условий;
- требуемой точностью измерений;
- функциональными зависимостями (формулы для вычислений значений параметров по результатам измерений косвенных величин).

Каждый вид бытовой РЭА характеризуется определенным множеством параметров. При этом среди множества параметров имеется подмножество параметров (y_1, y_2, \dots, y_n) , которые определяют работоспособность бытовой РЭА в целом. Такие параметры называются *определяющими*. Часто определяющие параметры непосредственно измерить невозможно. Поэтому для их определения измеряют *вспомогательные* параметры (x_1, x_2, \dots, x_n) , которые связаны с ними вполне определенными зависимостями:

$$y_k = f_k(x_{ki}),$$

где $k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots$

По степени обобщения информации о техническом состоянии диагностируемой аппаратуры параметры подразделяются на *первичные*, *вторичные* и *промежуточные*.

Первичные параметры имеют самую низкую степень обобщения и являются параметрами элементов диагностируемой аппаратуры.

Вторичные параметры имеют самую высокую степень обобщения информации о структуре и работоспособности диагностируемой аппаратуры и являются параметрами выходных функций объектов диагностирования. Обычно это определяющие параметры.

Промежуточные параметры позволяют осуществлять связь между вторичными и первичными параметрами.

Многие радиоэлектронные изделия имеют *одномерные* диагностические параметры. Например, соответствие номинальному значению напряжения на выходах источника питания при нормальной нагрузке свидетельствует о его нормальной работе.

Существуют устройства, имеющие *многомерные* диагностические параметры. Например, последовательность импульсов, наблюдаемая с помощью осциллографа на выходе электронного прибора, имеет несколько *частных параметров*: форма, амплитуда, длительность импульса, частота следования импульсов, стабильность. В таком случае совокупность всех частных параметров является *комплексным* или *обобщенным* выходным па-

раметром. Этот обобщенный или комплексный выходной параметр принимается за диагностический параметр.

Различают параметры, появляющиеся при внешних воздействиях на технические изделия, и параметры, формирующиеся внутри РЭС в соответствии с принципами ее работы. Кроме того, существуют и различия между параметрами, возникающими при рабочих воздействиях и параметрами, которые появляются при искусственных (тестовых) воздействиях.

Параметры, не требующие внешних воздействий, и параметры, появляющиеся при рабочих воздействиях, представляют собой естественные результаты и одновременно свидетельства его действия.

Сигналы, возникающие при тестовых воздействиях, отличаются от откликов на рабочие стимуляции и служат только для проверки устройств. Искусственные (тестовые) воздействия применяются в случаях, когда проверка РЭУ в рабочих режимах затруднена или невозможна. Для создания тестовых воздействий могут использоваться различные методы: формирование специфических сигналов, изменение режимов использования РЭУ, изменение режимов электропитания, физическое разделение устройства и проверка по частям, пробные замещения и т.д.

Обычно в качестве диагностических параметров выбираются физические величины, значения которых можно измерить или сравнить с эталонами.

В отдельных случаях удается составить заключение о состоянии устройства и выявить неисправный участок только на основе анализа комплексного выходного параметра системы. В большинстве ситуаций истинная причина отказа маскируется, а локализация неисправности прямым усмотрением практически невозможна.

Наряду с параметрами, легко поддающимися измерению, в аппаратуре и механизмах возникают при работе различные явления, сопутствующие действию. Существуют признаки, слабо связанные с определенными участками системы. К ним относятся тепловые, зрительные, звуковые, обонятельные и осязательные явления, ощущаемые оператором.

Они не подкреплены показаниями средств диагностирования хотя бы потому, что неизвестно, куда следовало бы подключить входные устройства средств диагностирования, или как количественно их оценить. Нередко эти явления действуют комбинированно. На практике они играют значительную роль.

Проверка значений определенных параметров позволяют составить мнение о работоспособности только тех элементов, которые участвуют в их формировании. Если проверяемый параметр формируется лишь некоторыми цепями проверяемого блока, то невозможно на основании проверки этого параметра составить представление о состоянии всего блока.

Отклонение любого выходного (и в то же время диагностического) параметра от нормы с выходом за пределы поля допуска есть сигнал о нарушении работоспособности или симптом отказа или повреждения.

В некоторых случаях отказ или повреждение РЭУ не сразу приводит к тому, что выходные параметры оказываются за пределами поля допуска. Это бывает при автоматизации различных регулировок в РЭУ. В частности, повышение потребления тока от источников питания в течении некоторого времени может компенсироваться стабилизатором, схемы АПЧ могут компенсировать уход параметров резонансных элементов.

Но всякая автоматическая компенсация физических разрушений и нарушений характеристик влечет за собой перенапряжения или увеличение нагрузки. Это, в свою очередь, вносит изменения в совокупность пассивных параметров, т.е. признаков, не поддающихся непосредственному измерению (ухудшение теплового режима элементов, изменение характера звучания рабочих тонов, появление запахов перегрева, искрения и дыма, нарушения цвета и формы деталей, обугливание их).

По методам съема и обработки информации различают диагностические показате-

ли:

- 1) выраженные электрическими величинами и не требующие дополнительных преобразований;
- 2) выраженные электрическими величинами и требующие дополнительного преобразования;
- 3) выраженные неэлектрическими величинами и требующие предварительного преобразования;
- 4) оцениваемые визуально.

К первой группе относят: напряжение и ток (постоянные и переменные); амплитуду импульсов тока и напряжения; частоту переменного синусоидального напряжения; частоту следования импульсов тока и напряжения; временные интервалы, характеризующие длительность импульсов тока и напряжения; емкость, сопротивление, индуктивность элементов электро и радиотехнических цепей и т.д.

Ко второй группе относят: токи малые и большие; напряжение тока высокой частоты; выходную мощность радиопередающих устройств; коэффициент шума; чувствительность приемных устройств; коэффициент модуляции; длительность и частоту следования радиоимпульсов; характеристики волноводных трактов и т.д.

К третьей группе относят: частоту вращения механических элементов, угловые и линейные перемещения механических элементов; количество и скорость расхода жидкости; температуру; давление жидкости и газа.

К четвертой группе относят показатели, автоматический контроль которых на современном уровне развития технически нецелесообразен, например яркость свечения электронно-лучевых трубок; различные параметры, проверяемые световыми индикаторами.

Подавляющее число диагностических параметров электрорадиоэлектронной аппаратуры относится к первой группе и представляет собой напряжение переменного и постоянного тока.

Параметры РЭА являются случайными величинами, так как зависят от многих факторов, имеющих случайный характер, например неточностей производства, старения аппаратуры, изменения условий эксплуатации и др.

Количество контролируемых параметров определяется задачами контроля и диагностики.

Работоспособность бытовой РЭА, как правило, характеризуется несколькими определяющими параметрами (вторичными и промежуточными), по которым оцениваются ее возможности выполнять заданные функции. Для выявления определяющих параметров часто необходимо выполнить значительные теоретические исследования диагностируемой аппаратуры.

При поиске отказов необходима детальная информация о состоянии узлов, блоков, каскадов и элементов, что требует контроля большего числа параметров, чем при контроле работоспособности.

8.2. Выбор параметров для контроля и диагностики

Выбор диагностических параметров и других способов проверки состояния РЭУ, например пробных замен, относится к наиболее ответственным видам работы. Важно не только знание видов и допустимых значений параметров, но точек, в которых они определяются.

Вопросам выбора контролируемых параметров посвящено много работ. Однако эти вопросы разработаны еще не достаточно полно. Наиболее часто используется метод статистической оптимизации по критерию максимальной вероятности отказа параметра из совокупности выбираемых для контроля параметров диагностируемого объекта. Этот метод позволяет оптимизировать количество контролируемых параметров и установить очередность их контроля. В соответствии с методом проводится анализ работы диагности-

руемой аппаратуры, на основе которого устанавливаются входные и выходные сигналы и намечается исходное количество параметров. Затем выполняется расчет и анализ надежности элементов, каскадов, узлов и всего объекта диагностирования и вероятности их отказов. Далее составляется физическая модель. При этом элементы и узлы объединяются в группы и выделяются отдельные узлы, состояние которых характеризуется одним параметром определенной степени обобщения. Если состояние какого-либо узла характеризуется несколькими параметрами, то он условно делится на несколько групп элементов и каскадов по числу характеризующих параметров. Очередность контроля параметров устанавливается начиная с максимального значения вероятности отказа в порядке убывания.

Последовательность контроля параметров диагностируемой аппаратуры имеет особенно большое значение при разработке автоматизированных диагностических устройств и систем. При этом она определяет объем программы контроля, сложность программно-управляющих и коммутирующих устройств, устройств поиска неисправностей и т.д.

При поиске отказов каждая целесообразная поверка дает определенную информацию, указывающую на возможные причины неисправности, и ограничивает область, в которой должна проводиться следующая проверка. При этом каждую очередную проверку следует проводить с учетом:

- взаимосвязи узлов и блоков, которые могут явиться возможными причинами отказов;
- вероятностей возможных причин неисправности;
- относительного количества времени, необходимо для проведения последующей проверки.

Конструкция бытовой РЭА, ее устройства, блоки и узлы должны обеспечивать качественное проведение автоматизированного и автоматического контроля. Для этого все блоки и узлы ее должны монтироваться так, чтобы каждый из них выполнял строго определенные функции, имея минимум функциональных связей, позволяющих сократить количество контрольных точек и проверяемых параметров. Аппаратура должна иметь простые виды регулировок и минимальное их количество, а также необходимые контрольные выводы, разъемы для проверки параметров и поиска неисправностей, обеспечивающие удобное и надежное подключение аппаратуры контроля.

Допусками называют максимально допустимые отклонения параметров от номинальных значений, при которых не нарушается работоспособность бытовой РЭА. Значение контролируемого параметра

$$y = y_n \pm \delta, \quad (8.1)$$

где y_n – номинальное значение параметра; δ - допустимое отклонение параметра от номинального значения (допуск).

Известно, что безотказность бытовой РЭА можно рассматривать как произведение надежности p_1 , характеризующей отсутствие внезапных отказов, и надежности p_2 , характеризующей нахождение выходных параметров в пределах допусков:

$$p = p_1 p_2$$

Таким образом, одним из путей повышения безотказной работы бытовой РЭА является обоснованный выбор допусков параметров с учетом всех факторов.

Допуски на параметры бытовой РЭА подразделяются на производственные и эксплуатационные.

Производственными допусками называют пределы изменения параметров при производстве РЭА, ограниченные максимально допустимыми отклонениями их от номиналов, обеспечивающими работоспособность РЭА при эксплуатации. Эти допуски определяют точность процесса производства, технологию сборки, правила регулировки и точность контрольно-измерительной аппаратуры.

Введение производственных допусков вызывается производственными погрешностями, под которыми понимают различного рода отклонения параметров от номинальных значений, указанных в технической документации. Производственные погрешности яв-

ляются следствием нестабильности технологических процессов изготовления радиокомпонентов, процессов сборки, монтажа, настройки и т. д. Кроме того, на параметры влияют различного рода дестабилизирующие факторы, в результате воздействия которых погрешности параметров возникают случайно и характеристики параметров могут быть заданы только статистически. На практике для большинства технологических процессов производственные погрешности параметров элементов (блоков, узлов) имеют нормальный закон распределения. При этом погрешности параметров, возникающие в результате действия дестабилизирующих факторов (температуры, влажности и т. д.), также подчинены этому закону. Поэтому нормальное распределение можно считать основным при расчете производственных допусков.

Производственные допуски параметров всегда должны быть больше их производственных погрешностей.

Эксплуатационными допусками называют пределы изменения параметров в процессе эксплуатации, ограниченные максимально допустимыми отклонениями их от номиналов, при которых сохраняется работоспособность РЭА. От эксплуатационных допусков существенно зависит правило регулировки, техническое обслуживание, точность контрольно-измерительной аппаратуры.

Эксплуатационные допуски на выходные параметры бытовой РЭА складываются из суммы трех допусков: производственного, температурного и допуска на старение, т.е. являются суммой трех случайных величин:

$$\delta = \sqrt{\delta_{np}^2 + \delta_t^2 + \delta_{cm}^2},$$

где δ_{np} , δ_t и δ_{cm} – половина поля допусков соответственно производственного, температурного и на старение выходного параметра.

Температурный допуск характеризует пределы изменения параметра при заданном перепаде температур. Изменение параметра под воздействием температуры можно представить в виде

$$y_t = y_0 [1 + \alpha_t (t_2 - t_1)],$$

где y_0 - значение параметра при $t = (20 \pm 5)^\circ C$; α_t - температурный коэффициент данного параметра, характеризующий относительное изменение его при нагревании элемента на $1^\circ C$; t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры.

Допуском на старение называют пределы изменения параметров от старения за определенный интервал времени эксплуатации, при котором сохраняется работоспособность бытовой РЭА. В общем виде изменение параметра от старения элементов аппаратуры

$$y_{cm} = y_0 (1 + C_{cm} T_c),$$

где $C_{cm} = \Delta y / y$ - коэффициент старения; Δy – изменение параметра за один час; y – значение параметра в момент изготовления РЭА; T_c – полное время существования аппаратуры, включая хранение и предполагаемый срок ее работы.

В реальных условиях распределение отклонений параметров в результате изменения температуры и старения можно считать нормальным. Тогда эксплуатационные допуски на параметры

$$\delta = \pm 3 \sigma,$$

где σ - среднеквадратическое отклонение параметра y ; δ - половина поля допуска.

Эксплуатационные допуски выходных параметров бытовой РЭА выбирают из условий работоспособности, т.е. условий выполнения аппаратурой возложенных на нее функций. При этом необходимо заметить, что выбор допусков является сложной задачей. Это объясняется тем, что при эксплуатации бытовой РЭА на ее параметры действуют различного рода дестабилизирующие факторы и старение, в результате чего возникают отклонения их от номинальных значений. Следует учитывать, что разброс параметров в

конце срока службы в несколько раз превышает разброс параметров в начале ее эксплуатации.

Увеличение значения допуска δ ведет к снижению качества функционирования бытовой РЭА, а уменьшение этого параметра приводит к увеличению трудозатрат на более частые регулировки в моменты контроля, к увеличению количества отказов, а также к повышению требований к точностным характеристикам контрольно-измерительной аппаратуры при заданной достоверности контроля.

Для обеспечения работоспособности бытовой РЭА от проверки до проверки необходимо, чтобы отклонения параметров в течение этого времени не выходили за границы допусков. Отсюда вытекает основное требование к регулированию параметров: математические ожидания параметров элементов, блоков, узлов бытовой РЭА должны располагаться как можно ближе к середине поля допусков.

В процессе эксплуатации бытовой РЭА наблюдаются уходы параметров от номинальных значений по разным законам (линейному, экспоненциальному и др.). При настройке узлов бытовой РЭА, т.е. при регулировке параметров необходимо учитывать законы их ухода за время между проверками и устанавливать значение параметра так, чтобы за время между проверками оно не отклонялось от номинального больше чем на половину своего ухода.

Допуски на определяющие параметры бытовой РЭА определяются основными функциями, которые выполняет эта аппаратура. В общем виде определяющий параметр связан со вспомогательными зависимостью

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (8.2)$$

Тогда для нахождения параметра y достаточно измерить n вспомогательных параметров и вычислить значение функции F .

С учетом выражения (8.1) запишем равенство (8.2) в виде

$$y_n + \Delta y = F(x_{n1} + \Delta x_1, x_{n2} + \Delta x_2, \dots, x_{nn} + \Delta x_n). \quad (8.3)$$

Учитывая, что в реальных радиотехнических системах $\Delta y \ll y_n$ и $\Delta x \ll x_n$, и разлагая в ряд Тейлора выражение (8.3) в окрестности номинальных значений, а также пренебрегая членами второго порядка малости, получим

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn})}{\partial x_i} \Delta x_i. \quad (8.4)$$

В выражении (8.4) значения частных производных являются коэффициентами влияния вспомогательных параметров на определяющий параметр (иногда их называют весовыми коэффициентами).

Если вспомогательные параметры одинаково влияют на определяющий параметр, тогда из равенства (8.4) получим

$$\Delta y = n \frac{\partial(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn})}{\partial x_i} \Delta x_i.$$

Обозначим коэффициент влияния i -го вспомогательного параметра на определяющий параметр через v_i , т.е.

$$v_i = \frac{\partial(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nn})}{\partial x_i}.$$

Тогда будем иметь $\Delta y = n v_i \Delta x_i$. Отсюда допуск на вспомогательный параметр можно определить из выражения

$$\Delta x_{i\max} = \frac{\delta}{n v_i},$$

где v_i – весовые коэффициенты вспомогательных параметров (при известной схеме РЭА определяют с помощью экспериментов или расчетов); δ - значение допуска на определяющий параметр.

Таким образом, допуски на определяющие параметры определяются функциями, которые выполняет бытовая РЭА, а допуски на вспомогательные параметры устанавливаются по допускам определяющих параметров.

8.3. Радиоэлектронное устройство как объект диагностирования

Изучение и специальная подготовка радиоэлектронных схем существенно упрощают объективное планирование задач проверки работоспособности и поиска неисправностей в радиоэлектронных устройствах.

Структуры РЭУ зависят от характера выполняемых ими задач, способов преобразования сигналов, питания и управление действием. Для персонала, осуществляющего обслуживание и ремонт радиоэлектронных средств (РЭС), все устройства, входящие в их состав, одинаково важны. При любой неисправности в схеме РЭУ оно переходит в неисправное состояние. Поэтому при построение моделей РЭС для использования их для поиска неисправностей должны быть учтены все элементы.

Структурные и функциональные схемы РЭС вычерчиваются, как правило, без схем питания, что снижает объем получаемой информации при их изучении. Первый этап изучения любого образца техники должен включать в свой состав установление назначения, общих принципов действия и связей всех элементов на уровне входящих в нее функциональных узлов и блоков. Специальное внимание при изучении устройств и особенно блоков должно быть обращено на то, что конструкторы не всегда соблюдают принцип функциональной близости.

Изображения схем ряда электронных устройств иногда отличаются от логических схем взаимодействия их составных частей. Например, принято изображать электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) в дисплеях и других устройствах, как показано на рис. 8.1

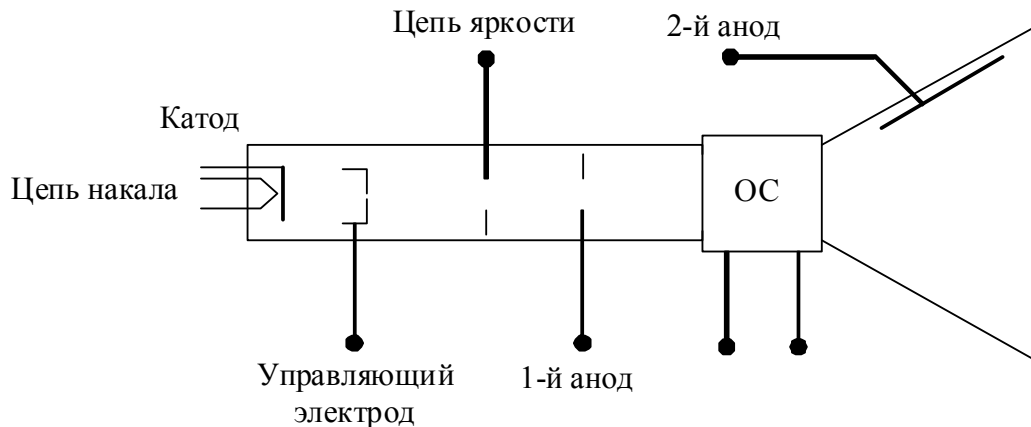


Рис. 8.1. Стандартное изображение кинескопа с магнитным отклонением луча

Если же сопоставлять условия появления на экране различных составных частей изображения, то оказывается, что логика взаимодействия цепей ЭЛТ и устройств, обеспечивающих ее работу, соответствует рис.8.2. Баллон трубки предшествует всем другим схемам и цепям поскольку при любом качестве всех других цепей неисправность баллона приведет к отсутствию изображения на экране. Накальная цепь следует за баллоном, но предшествует всем цепям управления лучом, так как при бездействующей накальной цепи электронный луч не появится.

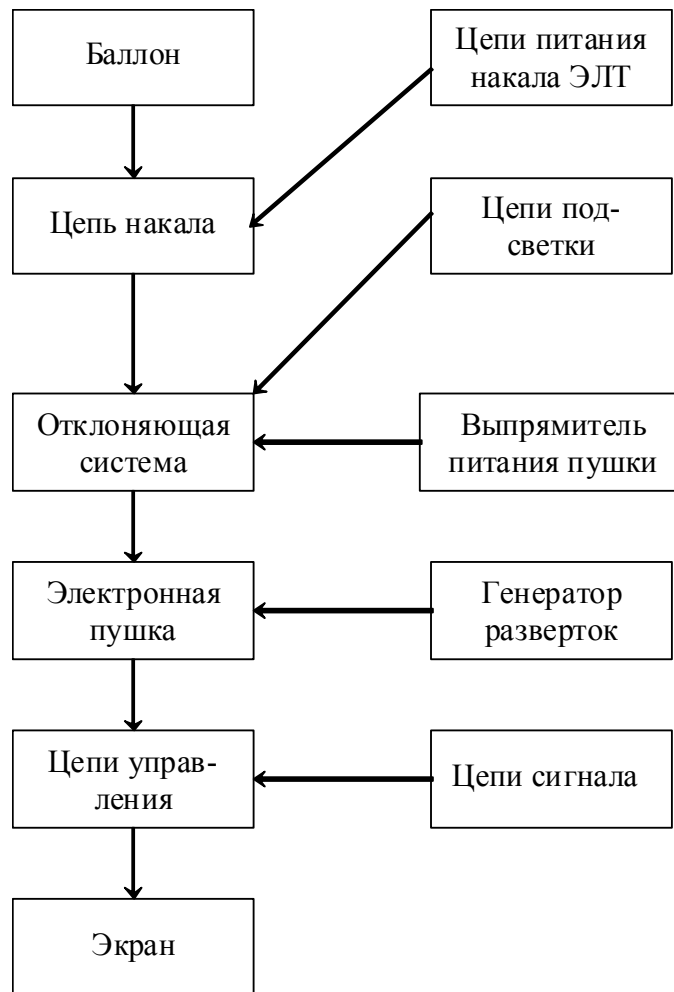


Рис. 8.2. Логика взаимодействия составных частей ЭЛТ

Составители эксплуатационной документации озабочены прежде всего сокращением объема чертежей. Часто схемы размещаются без учета логики взаимодействия на свободных местах поля чертежа. Это вызывает пересечения, возвраты и совмещения связей между цепями, разнесение их частных цепей в отдаленные места чертежа или перенос на другие листы. Кинематические и электрические схемы не содержат иногда указаний о направлениях передачи энергии или потоков информации. Сведения о таких направлениях удается найти только при изучении технических описаний. Функциональные схемы обычно не содержат в своем составе источников питания, схем защиты от перегрузок, встроенных средств диагностирования и точек съема диагностической информации. В малой степени в функциональных схемах изображаются эксплуатационные и настроечные регуляторы.

Когда возникает необходимость отыскать неисправность, всегда нет времени на подробный анализ чертежа и описания и недостатки документации проявляются наиболее сильно.

Если схема РЭУ содержит более 100 элементов (каскадов или ИС), то запоминание схемы совместно со средствами и точками диагностирования становится затруднительным. Изучение таких схем должно основываться не на полном запоминании, а на умении быстро разобраться в них при анализе состояния РЭУ.

При практическом решении задач диагностики необходимо уметь распознавать логику взаимодействия элементов в схеме РЭУ на любом уровне деления на элементы. При этом нужно учитывать следующее:

1. Большинство элементов на любом уровне деления представляют собой первичные формирователи или преобразователи (усилители) сигналов или автономные источники и преобразователи энергии. Действие таких элементов носит односторонний характер. Сигналы и энергия передаются от одного элемента к другому, как правило, без возврата.
2. Последовательности элементов, содержащие обратные связи, могут при проверках переводиться в такие режимы, в которых обратные связи временно разрываются.
3. Последовательности элементов в соответствии с выполняемыми изделием функциями могут сходиться (конвергировать) к одному или нескольким элементам.
4. Последовательности элементов могут разветвляться и исходить (дивергировать) из одного элемента.
5. В число элементов должны включаться не только преобразователи сигналов, но и средства питания, управления и блокировки, в том числе чувствительные к различным влияниям устройства защиты от перегрузок.

Второй этап требует изучения выходных характеристик элементов, которые являются диагностическими параметрами. Изучаются существующие в РЭУ средства диагностирования, способы извлечения диагностической информации и реакции объекта диагностирования на рабочие и тестовые воздействия.

Третий этап анализа РЭУ связан с установлением видов неисправностей, которые могут произойти в каждом элементе, и их влиянием на значения диагностических параметров. При этом изучаются и практически осваиваются способы проверки и оценки этих параметров.

На четвертом этапе осваиваются технология работ по устранению неисправностей и особенности сборочно-разборочных и монтажных работ.

Эксплуатационная документация РЭУ дает ответ не на все вопросы, появляющиеся при эксплуатации и ремонте. Изучение электротехники, радиотехники и механики позволяет на основе общих технических знаний восполнить пробелы в описании и схемах. Это особенно важно при выборе, проверке и оценке диагностических параметров во время поиска неисправностей.

Радиоэлектронные средства имеют ряд типичных структур, которые мало изменяются при переходе с одной элементной базы на другую при изменениях принципов работы схем и различной степени стандартизации и унификации конструкций.

Диагностика в основном связана с исследованием взаимодействия элементов объекта диагностирования независимо от физической задачи, решаемой этим объектом. Поэтому специалист-ремонтник наряду с физикой работы должен знать структуру ОД, отражающую, прежде всего логику взаимодействия элементов.

Если при первичном изучении ОД возможно постепенное освоение различных ее участков и способов проверки, то при необходимости отыскать неисправность требуется немедленное восстановление в памяти всей схемы ОД хотя бы на уровне типовых составных частей. Совершенно необязательно вспоминать особенности электрических цепей всех узлов. Можно остановиться на элементах, выполняющих самостоятельные функции (усиление или преобразование сигналов, передача энергии).

Источники питания могут содержать электронные устройства защиты цепей от перегрузок, а также предохранительные плавкие вставки. В устройствах защиты применяются тепловые и максимальные реле и электромеханические прерыватели с чувствительными элементами, срабатывающие при перегреве или увеличении магнитного потока или изменениях других физических характеристик. Короткие замыкания и сильные перегрузки появляются при пробоях изоляции, попадания влаги и металлических предметов между

электродами и проводниками. Средства защиты содержат чувствительные элементы, которые при превышении током нормального значения срабатывают и отключают источник питания от цепей нагрузки. Характеристики элемента подбирают так, чтобы он сработывал раньше, чем произойдут разрушения исправных цепей и источника питания.

Устройство, в котором действуют большие напряжения и содержатся критические к изменению режимов элементы, всегда имеет несколько ступеней предохранения. Это особенно отчетливо наблюдается в радиопередающих устройствах, мощных лазерных установках, в некоторых видах вычислительной техники управления и в РЭС.

Кроме того средства защиты выполняют особую роль в РЭУ, которой в описаниях уделяется мало внимания. Они служат сигнализаторами о появлении сильных перегрузок и коротких замыканий и способствуют отысканию места, где произошло замыкание.

Таким образом, изучение РЭУ следует начинать с источников питания и систем защиты их от перегрузок, затем проследить цепи подачи энергии в различные участки блоков и определять размещение сигнализаторов и различного рода блокировок (от прижимных контактов до наборных замков).

Особое внимание необходимо уделять точкам разветвления питания, распределительным платам и многоконтактным соединителям. При изучении цепей преобразования сигналов необходимо проследить прохождение сигналов от расположенных друг за другом элементов и определять точки разветвления и слияния последовательностей. Эту процедуру необходимо совмещать с изучением видов сигналов на входах и выходах элементов и способов их проверки. Помимо этого нужно отмечать положения всех регуляторов и влияние их на выходные сигналы элементов и всего РЭУ. Следует иметь в виду, что число различных выходов средств наблюдения, связи и управления, связанных с разными участками схем, невелико. К числу многовыходных РЭУ можно отнести телевизионный приемник с дисплеем. Он может содержать визуальный, звуковой, записывающий выходы и электронно-оптический адаптер для передачи информации. Все остальные выходы такого РЭУ являются повторами четырех перечисленных выходов.

При изучении РЭУ в целях поиска неисправностей важно знать:

- положение каждого элемента в структурной или функциональной схеме РЭУ;
- способы воздействия на РЭУ, приводящие к его работе (способы стимуляции действия);
- места, способы проверки и характер диагностических параметров РЭУ.

Эти сведения в ряде случаев являются даже более важными, чем знание физических принципов работы РЭУ. Подтверждением этому служит успешная работа по ремонту многих лиц, не получивших специального образования, но научившихся этому делу на практике. Анализ их действий и рассуждений при поиске неисправностей показывает, что они держат в памяти схемы, близкие к структурным и отчасти функциональным, связывают с ними характеристики выходных сигналов приборов и встроенные средства диагностирования. По мере накопления опыта поиска неисправностей эти знания обогащаются и позволяют достичь успеха при неполном знании физики действия схем. Затем постепенно приходит полное знание устройства, в том числе тонкостей физики работы.

8.4. Особенности учета обрывов и перегрузок в РЭУ при построении структурных моделей

Схема РЭУ, выполненная на любом уровне деления на элементы, отражает электрические и электромагнитные процессы, протекающие в исправном устройстве. Если в схеме учтены все взаимосвязи между элементами питания и преобразования сигналов, то она может служить как для изучения принципов действия РЭУ, так и для поиска неисправностей, которые объединяются под общим названием "обрывы" (рис.8.3).

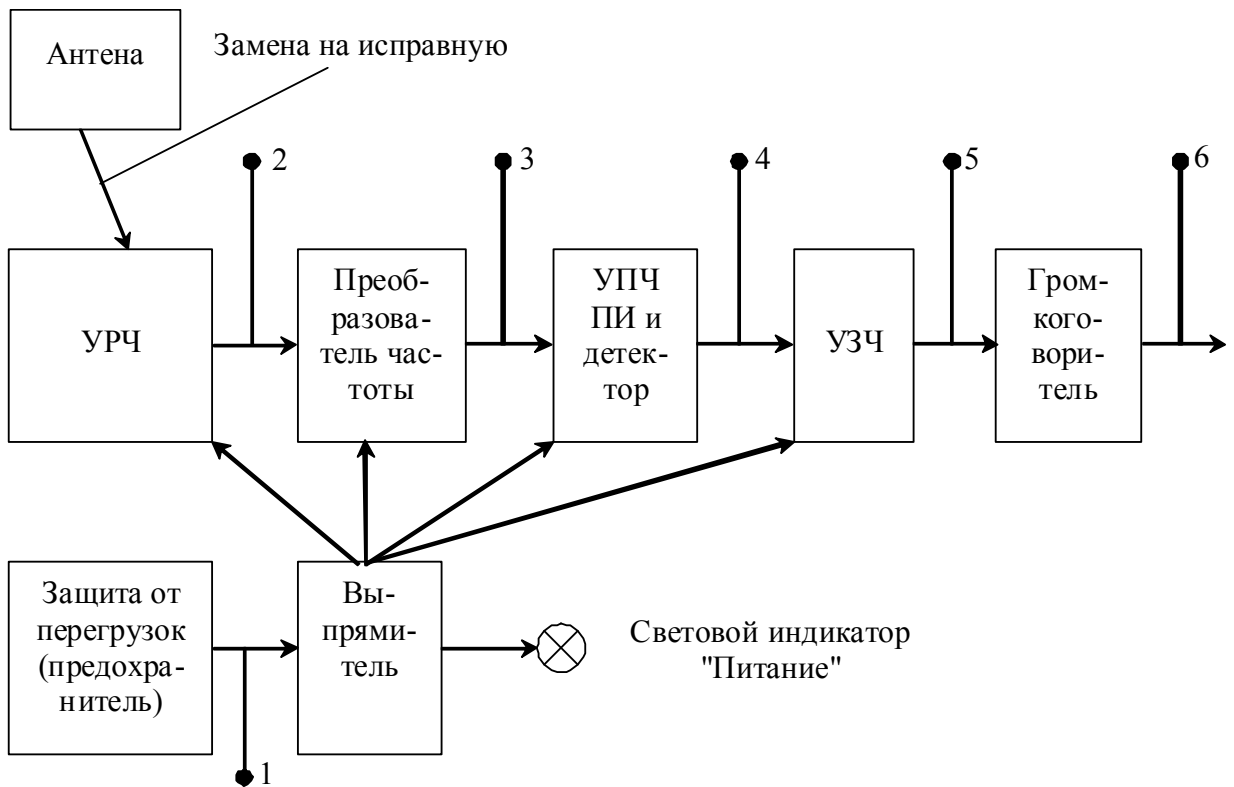


Рис.8.3. Гипотетическое расположение точек встраивания средств диагностирования в соответствии с логикой взаимодействия элементов типового РЭУ: 1 – контроль напряжения на выходе выпрямителя; 2-6 – проверка сигналов на выходах блоков с помощью встроенного прибора с переключателем

Под обрывом понимается всякое ухудшение или прекращение действия любого элемента, не приводящее к срабатыванию защитного устройства от перегрузок и не вызывающее изменений напряжений питания в схемах РЭУ. Обрывом может быть физический разрыв цепи или любое препятствие прохождению сигналов.

При обрыве в любом элементе происходят следующие явления: все напряжения питания и сигналы на входах этого элемента нормальные, а сигнал на выходе (или выходное напряжение) вышел за пределы поля допуска вплоть до полного исчезновения. Это явление вызывает изменения в действии системы, в которой находится этот элемент.

При обрыве в одном элементе устройства на все следующие за ним элементы перестают поступать нормальные сигналы (или входные напряжения). В результате все элементы, предшествующие отказавшему, и все, не зависящие от него элементы, будут продолжать действовать, а между отказавшим элементом и выходами устройства образуются цепи исправных элементов, которые не передают сигналы или сильно их искажают. Сигналы на выходах РЭУ, связанные с отказавшим элементом, сильно искажаются или принимают нулевые значения (исчезают).

При отказах типа обрыв задача поиска разрешается, если найден элемент, на входах которого сигналы и питание имеются, а на выходе сигнала нет (или он сильно искажен либо изменился).

Если бы удалось поставить на выходе каждого элемента РЭУ световой индикатор действия без сильного возрастания числа деталей РЭУ, то при обрыве в одном элементе гасли бы все индикаторы от отказавшего элемента до связанных с ним выходных элементов. Тогда решение задачи поиска сводилось бы к прослеживанию цепей погасших инди-

каторов до установления координаты первого элемента, индикатор которого перестал светиться.

Однако в реальных устройствах число встроенных средств диагностирования значительно меньше числа элементов. Это затрудняет поиск отказавшего элемента, так как требуется изыскание точек диагностирования (и диагностических параметров) и подключение к ним внешних средств диагностирования при проверках.

Срабатывание защитного устройства в большинстве случаев проявляется в виде обрыва чувствительного элемента. Поэтому поисковая последовательность приводит к локализации сработавшего защитного устройства. Попытки устранить обрыв заменой плавкой вставки (или возвратом контактов реле на замыкание) могут иметь два несовместных явления:

- устойчивое восстановление контакта в защитном устройстве (при случайном скачке тока в нем или естественной внутренней неисправности);
- срабатывание защитного устройства и разрыв цепи питания при каждой попытке устранить обрыв (при коротком замыкании в питаемых элементах либо в самом устройстве защиты).

Во втором случае возникает необходимость поиска и локализации элемента, в котором произошло замыкание. К таким элементам относятся все цепи и устройства питания, функциональные узлы и блоки, потребляющие энергию.

При перегрузках элементы взаимодействуют иначе, чем при обрывах, что требует пояснений. В устройствах радиоэлектроники обычно применяется параллельная схема питания элементов. Цепи подачи питания начинают разветвляться на входах внутренних источников питания, и к каждому элементу подводится одна ветвь этой цепи по каждому виду питания.

Если в системе появляются обрывы, то защитные устройства, расположенные в цепях питания, не срабатывают. При появлении перегрузки или короткого замыкания в цепях элементов или в цепях подачи питания срабатывает наиболее близкое к месту замыкания защитное устройство. Оно отключает от источников питания цепь, в которой имеется перегрузка.

Процесс действия перегрузки (или замыкания) на устройство защиты весьма прост. При коротком замыкании в элементе, получающем питание, резко уменьшается сопротивление цепи. При этом шунтируются цепи питания, и ток в них возрастает. Происходит срабатывание ближайшего устройства защиты от перегрузок. В ряде случаев возможен сильный нагрев корпусов элементов, проводящих сильный ток.

Следовательно, при отказах типа перегрузка взаимодействие элементов иное, чем при обрывах. При этом входными или начальными элементами являются элементы, включенные на концах цепей подачи питания. Участки цепей питания следуют за этими элементами и занимают промежуточное положение. Если между потребителем энергии и защитным устройством есть преобразователи напряжения и токов, то они тоже являются промежуточными элементами. Выходным элементом для каждого вида питания служит защита от перегрузок.

Рассмотрим простой пример, поясняющий логическое и физическое действия перегрузок и замыканий на устройство защиты и на выходные параметры РЭУ. Перейдем снова к упрощенной схеме радиоприемника (рис.8.3). Обратим внимание на то, что все элементы – преобразователи сигналов - получают питание отдельно и между собой по напряжению питания не связаны. Это показано на рис.8.4. На этом же рисунке приведен случай когда произошло короткое замыкание в блоке УРЧ. При этом сильно увеличивается проводимость в цепях УРЧ, т.е. резко уменьшается сопротивление. Усилитель РЧ начинает потреблять большой ток и шунтирует выход источника питания. В свою очередь, источник питания начинает отбирать от первичной цепи повышенный ток. Этот ток проходит через предохранитель. Предохранитель начинает нагреваться. В момент, когда теп-

ло, рассеиваемое в плавкой вставке, расплавляет ее, цепь разрывается, напряжение на источник питания не поступает и работа приемника прекращается.

На рис.8.5 показана та же схема, но при замыкании в источнике питания. При этом все потребители энергии прекращают действие, так как напряжение на выходе источника питания сильно понижается или становится равным нулю. Резкое понижение сопротивления источника питания вызывает плавление предохранителя и выключение устройства.

Наряду с короткими замыканиями в цепях, находящихся под напряжением, могут появиться перегрузки. Перегрузка представляет собой значительное снижение сопротивления, но не полное замыкание. При перегрузках ток в цепях возрастает, он возрастает во всех участках схемы от места, где произошла перегрузка, до предохранителя. Возможны два случая действия перегрузки.

В первом случае сила тока возрастает настолько, что вызывает постепенный нагрев и разрыв плавкой вставки подобно тому, как это бывает при коротких замыканиях. Однако может пройти некоторое время, прежде чем предохранитель перегорит. Это время зависит от силы тока, т.е. от степени снижения сопротивления в отказавшем участке. Такие явления характерны при частичных межвитковых замыканиях в трансформаторах блоков питания.

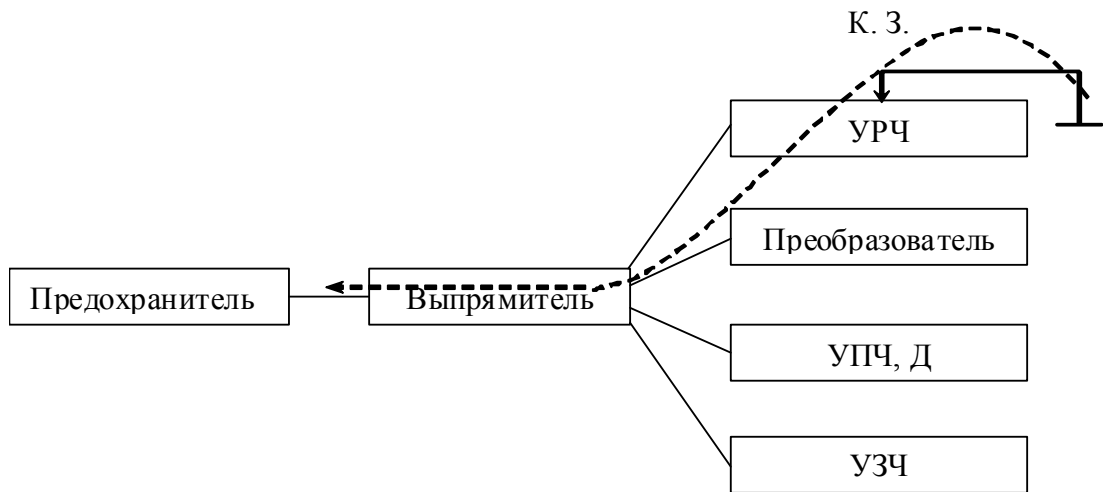


Рис.8.4. Направление действия волны перегрузки при коротком замыкании УРЧ радиоприемника

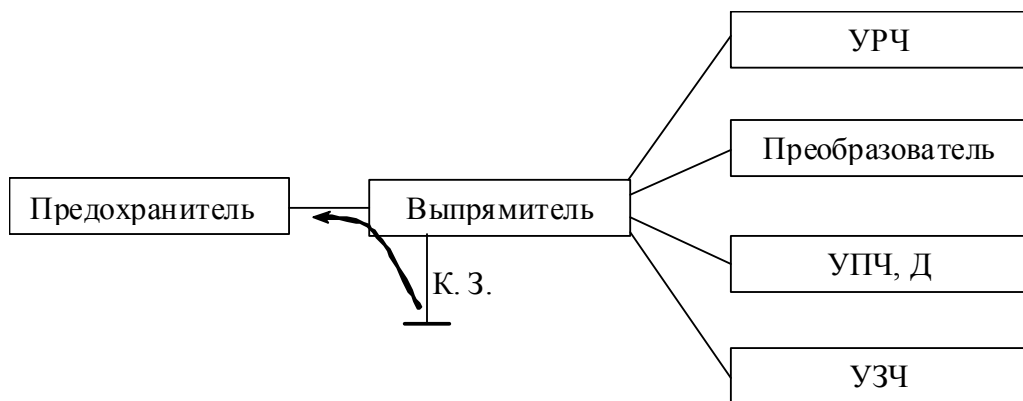


Рис.8.5. Направление действия волны перегрузки при коротком замыкании в блоке питания радиоприемника

Во втором случае ток не достигает значений, при которых предохранитель срабатывает. Это происходит при малых изменениях сопротивления цепей питания и в элемен-

тах, получающих питание. Если при этом отсутствует заметное влияние на выходные сигналы системы, то такая частичная перегрузка не обнаруживается и не относится к числу отказов до перехода к сильной перегрузке.

Если же перегрузка приводит к изменению напряжений и токов и это обнаруживается по ухудшению характеристик выходных сигналов системы, то это явление следует отнести к искажениям сигналов, т.е. к обрывам. Поисковая последовательность локализует элемент, в котором возникла такая перегрузка, только при дополнении схемы РЭУ схемами, отражающими механизм воздействия перегрузок на устройства питания. Эти дополнительные схемы подобны схемам взаимодействия элементов при замыканиях и могут даже совпадать с ними. Поэтому все элементы, в которых могут быть замыкания, логически влияют на схемы защиты. Они предшествуют схемам устройства защиты в порядке, который соответствует цепям и схемам питания. В соответствии с принятым порядком изображения схем слева направо на рис.8.6 показано взаимодействие элементов радиоприемника по коротким замыканиям.

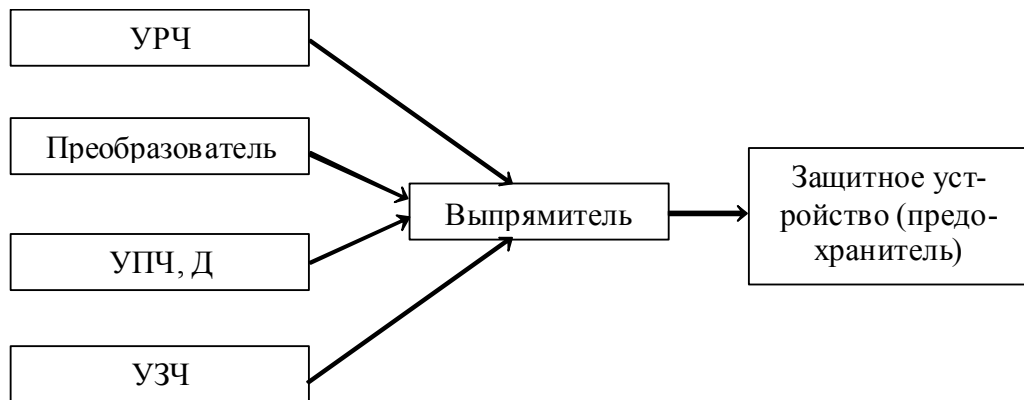


Рис.8.6. Обращенная схема взаимодействия элементов радиоприемника при коротких замыканиях и перегрузках по току

В реальных РЭУ элементы получают питание от нескольких источников питания, защищенных от перегрузок своими предохранителями. При разрыве цепи предохранителя работа устройства ухудшается или прекращается. Пользователь обнаруживает такие отказы в основном по искажениям или исчезновению выходных сигналов и редко непосредственно по перегоранию предохранителя.

Вопрос об обнаружении факта отказа и установлении вида отказа решается прежде всего по характеру отклонения выходных сигналов РЭУ от нормальных значений. Поэтому нужно знать, как действуют физически различные отказы на выходные сигналы.

Для выяснения этого вопроса следует объединить эти схемы в единое целое.

Влияние коротких замыканий на устройство защиты от перегрузок отчетливо проявляется, когда токи в защищаемых цепях достаточно велики. В некоторых слаботочных цепях, даже если в них действуют высокие напряжения, короткое замыкание может не повлечь за собой срабатывание устройства защиты. При этом перегрузка по току будет распространяться до ближайшего элемента, чувствительного к шунтированию, но рассчитанного на протекание больших токов (например, резистор с большой мощностью рассеяния), и произойдет его шунтирование. Участок системы, связанный с этим элементом, перестанет работать. Явления, сопровождающие такую неисправность, не совпадают с симптомами обрывов, так как локализация элемента, не выдерживающего перегрузку, и его замена не приводят к устранению неисправности. Возможно возникновение неопределенности.

Подобные случаи сравнительно редки, но следует знать, как поступить при их появлении. Для этого нужно заранее, опираясь на опыт и знания, провести анализ тех участков схем, в которых возможны замыкания из-за нарушения изоляции, но токи при этом не

достигают критических значений. Необходимо определить, какой элемент ограничивает дальность распространения перегрузки. После этого важно узнать, какие явления (симптомы) сопровождают обрыв в этом элементе и какие симптомы появляются при шунтировании замыканием, и установить элемент, ограничивающий действие тока.

Защита от перегрузок является важным условием действия РЭУ. Поэтому рекомендуется, не зависимо от других элементов, выделить отдельно предохранители и чувствительные выключатели. С другой стороны, предохранители и выключатели выполняют функции, связанные с поиском неисправностей. При отключении определенного участка схемы они показывают, что в нем имеется частичное или полное замыкание между цепями с различными потенциалами. По логике действия на них оказывают влияние все цепи передачи питания и потребители этих напряжений при замыканиях.

Все связи элементов по замыканиям направлены к устройствам защиты. Предохранители и другие элементы защиты от перегрузок сами по себе также могут служить источниками обрывов и замыканий, так как представляют собой электрические и электро-механические устройства. Поэтому при вычерчивании объединенных схем взаимодействия элементов они должны повторяться дважды – среди элементов, дающих обрывы, и среди элементов, дающих замыкания (рис.8.7)

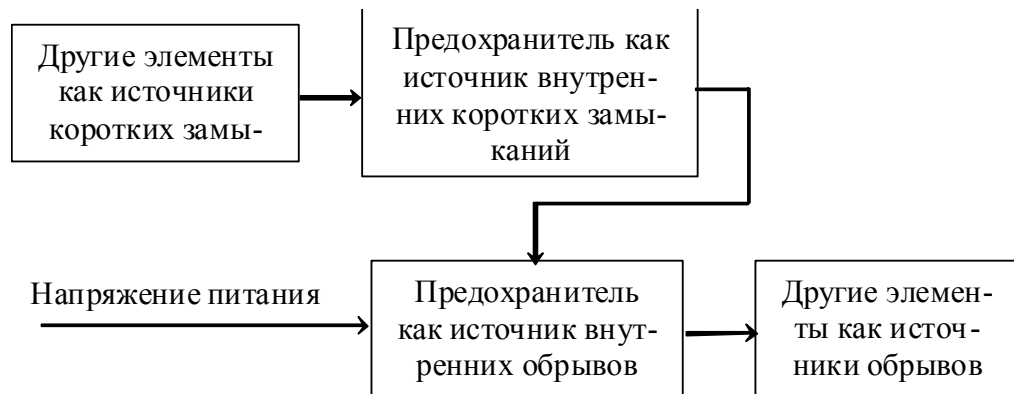


Рис.8.7. Логика взаимодействия предохранителя как источника замыканий и обрывов с другими элементами РЭУ

При повторениях предохранитель как источник замыканий и все связанные с ним источники внутренних замыканий предшествуют тому же предохранителю, но уже как источнику внутренних обрывов. Предохранитель в качестве источника обрыва предшествует всем источникам обрывов по данному виду питания.

Следует обращать внимание на блокировки, защиту и сигнализацию в блоках питания, имеющих сильные разветвления, что затрудняет выбор диагностических параметров и оценку результатов.

Любые внезапные отказы приводят к искажению или пропаданию выходных сигналов РЭУ. Изменение выходных сигналов и выход их за пределы поля допуска есть основной симптом появления отказа в устройстве. Большое количество деталей не позволяет заранее предугадать, какая из них явилась причиной отказа и какой дефект произошел. Необходимо провести поиск дефекта. Для упорядочения поиска имеет смысл сделать схему РЭУ удобной для этой работы и учесть различные виды отказов элементов. При обрывах элементы выстраиваются один за другим так, как они расположены в схеме исправного РЭУ. При перегрузках элементы также выстраиваются друг за другом, но порядок их соединения повторяет схему питания с обратными направлениями связей. Другими словами, при замыканиях порядок взаимодействия элементов противоположен тому, который был при нормальной подаче напряжения питания. В момент обнаружения факта отказа еще не ясно, обрыв это или перегрузка в РЭУ.

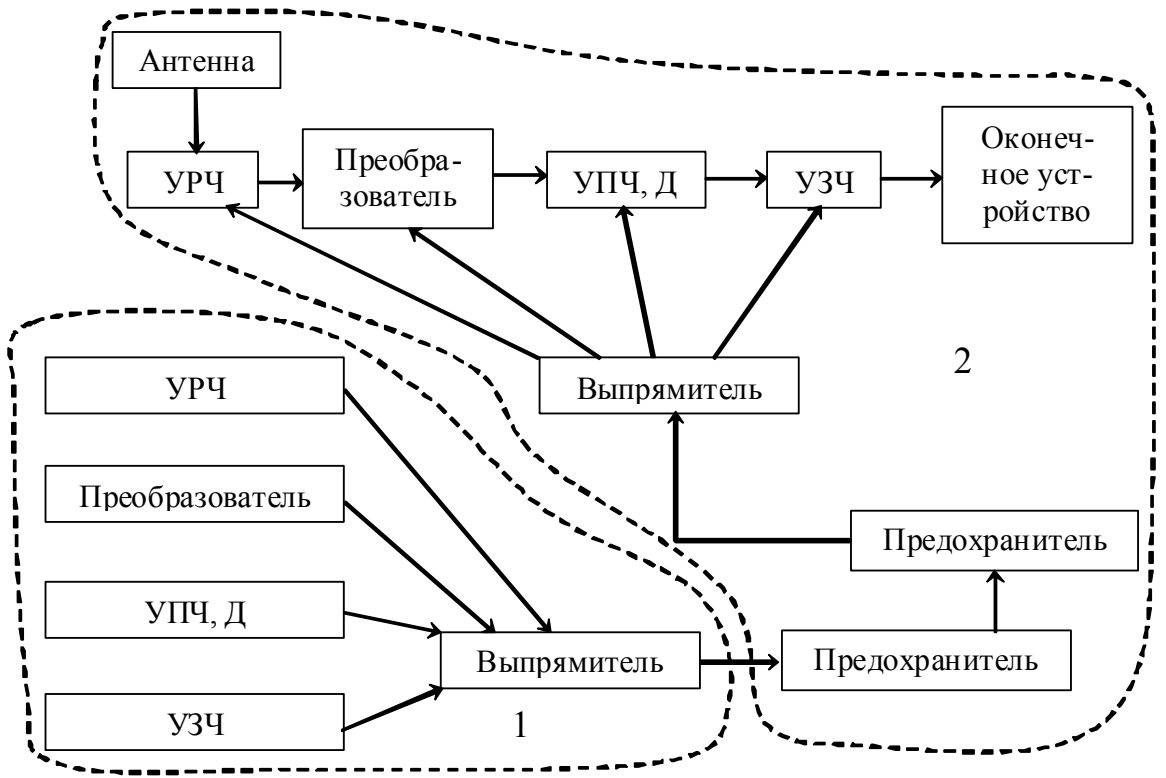


Рис.8.8. Объединенная схема взаимодействия элементов радиоприемника по обрывам и перегрузкам:

1 – подмножество коротких замыканий, приводящих к срабатыванию защитного устройства; 2 – подмножество обрывов и расстроек

Если в РЭУ могут быть только обрывы, то множество отказов совпадает со схемой при исправной работе, а для проверки ее работоспособности используются естественные выходы РЭУ. Если в РЭУ могут быть только перегрузки, то множество отказов совпадает со схемой распределения питания, а для проверки работоспособности используются элементы защиты и рабочие выходы устройства.

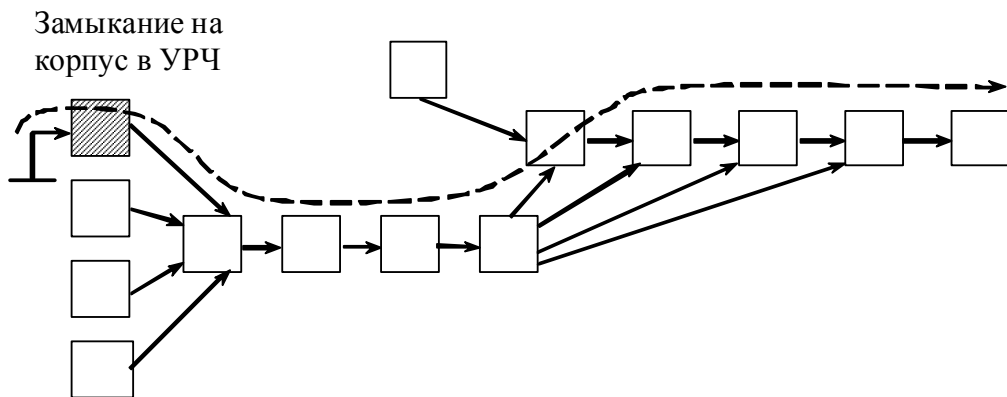


Рис.8.9. Пути передачи симптомов перегрузки (замыкания) на выход радиоприемника при замыкании на корпус в УРЧ

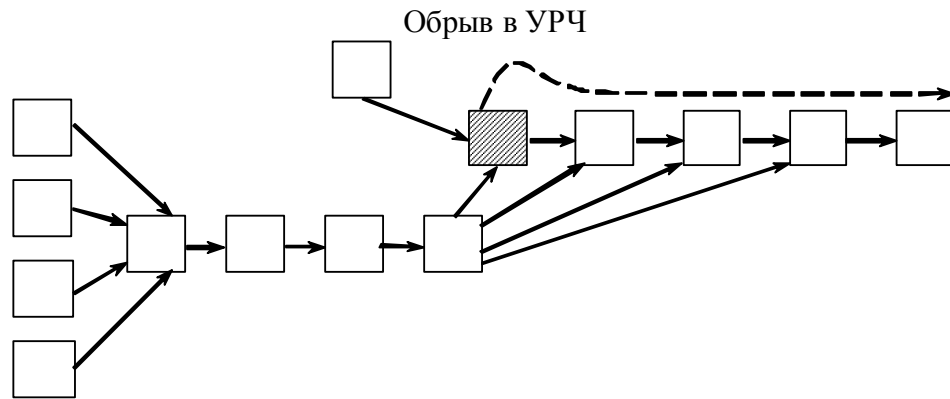


Рис.8.10. Пути передачи симптомов обрыва (расстройки) на выход радиоприемника при обрыве (расстройке) в УРЧ

Если в РЭУ появляются и обрывы, и перегрузки, то схема взаимодействия элементов по обрывам и перегрузкам (рис.** и рис.***) должны быть совмещены в одну (рис.б). Объединение сделано так, что все перегрузки действуют на предохранитель и через него на выходной элемент. Все обрывы действуют только на выходной элемент, не влияя на предохранитель. Сам предохранитель повторяется в схеме два раза, так как он сам по себе может давать и обрывы, и перегрузки вследствие внутренних неисправностей. Эта схема показывает влияние любых отказов на выходные сигналы. При перегрузке (замыкании) в одном из элементов, например в УРЧ, перегрузка влияет через источник питания на предохранитель. Предохранитель срабатывает и обрывает цепь питания. Все элементы перестают работать, и сигнал на выходе исчезает (рис. 7). При обрыве в этом же УРЧ искажение или исчезновение сигнала на его выходе передается непосредственно на выход приемника (рис. 8).

Из примера следует, что при одном предохранителе каждый элемент, получающий питание, повторяется в объединенной схеме два раза, один раз как источник обрыва, и один раз как источник перегрузки.

Объединение схемы взаимодействия элементов РЭУ по обрывам со схемами взаимодействия элементов по перегрузкам позволяет выяснить, как влияют различные отказы на выходные сигналы и какие параметры нужно проверять при поиске неисправностей.

Разработка объединенных схем требует изучения принципов действия исправного РЭУ от входных гнезд питания до выходных или оконечных устройств. Кроме того, в процессе разработки объединенных схем выясняются вопросы о возможных отказах системы, способах ее проверки и характере диагностических параметров.

8.5. Трудности и ошибки, возникающие при диагностировании радиоэлектронных устройств

Практика решения поисковых задач показывает, что процедура поиска состоит из ряда простейших проверок диагностических параметров. После каждой проверки происходит разветвление последовательности поиска. В результате появляется геометрическая фигура – дерево.

Каждая ветвь этого дерева ведет к отдельному конечному исходу поиска – неисправному элементу. Поэтому число ветвей дерева равно числу различных неисправностей в проверяемом устройстве.

Если число элементов в устройстве возрастает, то растет и число деревьев различных форм, которые можно построить при поиске неисправностей. В зависимости от взаимного положения проверок длины ветвей дерева изменяются. Во многих случаях удается построить дерево, у которого все ветви имеют одинаковые длины. При этом длины ветвей

становятся наименьшими и говорят, произошла минимизация средней длины ветви дерева.

Кажущаяся простота построения деревьев создает обманчивое мнение о примитивности решения поисковых задач. Диагностические задачи начинают привлекать человека, когда их решения не регламентированы и существует некоторая свобода выбора вариантов поиска неисправностей. Но свобода выбора шагов поиска так же, как и свобода выбора ходов в сложной игре, используется участниками по-разному. Исход поиска или игры зависит от опыта, желания достичь цели, везения и множества других причин.

На успех поиска оказывают сильное влияние психологические факторы, особенно сти объекта диагностирования и его параметров, степень знания и учета исполнителем работ методов и средств поиска.

При выборе ходов в логической игре и при выборе проверок во время поиска неисправностей происходит борьба между случайным и заранее запланированным выбором ходов (или проверок).

План поиска в форме дерева представляет собой заранее упорядоченную (алгоритмизированную) последовательность поиска. Если поиск выполняется случайным выбором проверок, то появляется ветвь случайно сформированного дерева, характеристики которого отличаются от характеристик алгоритмизированного дерева и в среднем оказываются хуже. Поэтому надежда на эффективное решение задач поиска на основе угадывания точек проверок оправдывается только в редких случаях. Однако примеры успешного решения задач диагностирования путем случайного поиска привлекают эксплуатационников. Одни из них воодушевляются этими успехами, у других отдельные успехи случайного, неорганизованного и необъясненного поиска вызывают неверное представление о непреодолимых трудностях поиска, об особой интуиции некоторых операторов. Но дело не в особой интуиции и не в сверхспособностях отдельных лиц, а в том, что нет доступных для массового оператора технологий диагностирования РЭА. В связи с этим возникает ряд психологических трудностей, мешающих успеху поиска.

Первая трудность заключается в том, что диагност не всегда верно судит о количестве возможных исходов поиска, т. е. Неисправных состояний системы и их взаимозависимостях. Такая неопределенность в представлениях о множестве различных решений не позволяет оценить необходимые поисковые усилия. Появляется неуверенность в успехе поиска.

Другая трудность состоит в отсутствии строгих определений понятий, связанных с процессом поиска. Человек-оператор оказывается не в состоянии правильно сформулировать суть проблем, возникающих при поиске. Он не может общаться с более опытными специалистами и обсуждать эти проблемы для лучшего их разрешения.

Третья трудность объясняется тем, что поисковые задачи в обучении специалистов по эксплуатации и диагностике занимают мало времени. Это время тратится, прежде всего, на изучение физических процессов, происходящих в схемах, и методов и средств измерений. В результате обучающийся начинает воспринимать знания, способствующие успеху поиска, но носящие вспомогательный характер, как обучение самому процессу поиска. При столкновении с реальными поисковыми ситуациями он начинает испытывать сомнения в своей профессиональной пригодности, хотя неудачи поиска связаны с недостатками обучения.

В основе четвертой трудности лежит слитное восприятие процесса поиска, в то время как это процесс по своей природе дискретен. Обучающийся, который наблюдает решение задачи поиска другим человеком, упускает из вида те шаги поиска, которые исполнитель проводит мысленно, а также проверки, выбираемые случайно или в силу субъективных соображений. Скрытая, проводимая на основе наблюдений и сопоставления пассивных диагностических параметров и показаний встроенных в приборы средств измерений и сигнализаторов, фаза поиска наиболее информативна и сложна для усвоения при существующем порядке обучения.

Пятая трудность возникает вследствие недостатка времени, препятствующего полному усвоению логики и физики работы схем радиоэлектронной системы, Если поиск не алгоритмизирован заранее, то в условиях дефицита времени возникает стрессовое состояние, затрудняющее поиск.

Кроме психологических трудностей часто возникают методические ошибки. Это происходит при следующих условиях:

1. недостаточное внимание, уделяемое изучению функциональных схем изделия, в то время как эти схемы из всех эксплуатационных документов наиболее полно отражают логику взаимодействия частей изделия;
2. попытки представить последовательность поиска при диагностировании в виде совокупности измерений, исключив из этой последовательности наблюдение пассивных признаков, пробные замещения, физические исключения, смену режимов и другие приемы, характерные для диагностики;
3. неоправданное мнение о том, что существует парная связь между диагностическим параметром и отказом определенного участка РЭУ. Для большинства деталей или элементов РЭУ необходимо провести проверку не менее чем двух диагностических параметров в зависимости от числа входов элемента и его положения в схеме.
4. незнание процессов, вызывающих появление отказов, и неумение оценить их влияние на диагностические параметры. При этом происходит смешение отказов вида "обрыв" с отказами вида "перегрузка", органически необратимых изменений и расстроек, устойчивых дефектов и сбоев;
5. нежелание обсуждать с другими лицами степень обоснованности выбора проверок при поиске и пренебрежение рациональным планированием поиска;
6. неоправданно высокая оценка собственной диагностической деятельности лицами, получившими поисковые навыки на опыте, и, как следствие, сопротивление этих лиц внедрению рациональных методов поиска.

Перечисленные ошибки носят субъективный характер. Кроме того, возможны ошибки, связанные с пробелами в знаниях и недостаточным умением. К ним можно отнести:

1. рассмотрение элементов системы изолированно, вне связи со структурой и другими элементами;
2. перевод поиска с самого начала на уровень принципиальной электрической схемы, чтобы подменить поиск измерениями;
3. попытки оценки результатов проверок сделать многоальтернативными, т.е. имеющими больше двух результатов. Эти попытки необоснованно связывают с необходимостью повышения точности измерений;
4. пренебрежение случаями, когда одновременно появляются два и более дефектов в разных участках ОД;
5. пренебрежение и, наоборот придание большого значения трудоемкостям проверок параметров и особенно вероятностям отказов, что для больших объектов не играет существенной роли;
6. необоснованный выбор места пробных замен, исключений и переходов в другие режимы при формировании последовательностей поиска;
7. необоснованная преждевременная или ненужная разборка РЭУ;
8. повторение проверок при отсутствии ошибок результатов их проведения;
9. незнание способов построения пространства состояний РЭУ и непонимание способа индексации состояний в этом пространстве;
10. мнение о невозможности или нецелесообразности диагностирования цифровых средств методами функционального диагностирования посредством построения условных процедур поиска, которые наиболее близки к внешнему проявлению альтернативного мышления, присущего человеку.

Таким образом, при поиске и устранении неисправностей желательно иметь сведения о следующих характеристиках объекта диагностирования:

1. модель ОД в графической форме с координатами элементов;
2. виды отказов или повреждений и соответствующие им ожидаемые неисправности;
3. диагностические параметры, способы и средства воздействия на ОД, точки контроля диагностических параметров и время проведения проверок;
4. наиболее рациональные алгоритмы диагностирования, т.е. диагностические процедуры, применение которых приближает к минимуму стоимость и время восстановления ОД (суммарные стоимость, время поиска и устранения неисправностей);
5. технология устранения неисправностей на заданном делении на элементы.

Приведенные сведения не исчерпывают всех трудностей, ошибок и заблуждений, возникающих при поиске неисправностей, но служат предостережением для лиц, проявляющих излишнюю самонадеянность при диагностировании РЭС.

Литература

1. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
2. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
3. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики / (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
4. Фолкенберри Л.М. Справочное пособие по ремонту электрических и электронных систем: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
5. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 272 с.
6. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.
7. Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высшая школа, 1975. – 206 с.
8. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
9. Яковлев Н.И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электронной аппаратуры. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
10. Мирский Г.Я. Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.