

Надежность и эффективность в технике

Справочник в десяти томах

Надежность и эффективность в технике

Справочник в десяти томах

Редакционный совет:

*В.С. АВДУЕВСКИЙ, акад. АН СССР
(председатель);*

В.И. КУЗНЕЦОВ, акад. АН СССР;

Н.Д. КУЗНЕЦОВ, акад. АН СССР;

В.А. МЕЛЬНИКОВ, акад. АН СССР;

В.П. МИШИН, акад. АН СССР;

В.Ф. УТКИН, акад. АН СССР;

К.В. ФРОЛОВ, акад. АН СССР;

Б.В. ГНЕДЕНКО, акад. АН УССР;

И.Н. КОВАЛЕНКО, акад. АН УССР;

Б.Ф. ЛОМОВ, чл.-корр. АН СССР

Том
9

*Техническая
диагностика*

*Под общей редакцией д-ра техн. наук проф.
В. В. КЛЮЕВА,
чл.-корр. АН СССР
П. П. ПАРХОМЕНКО*



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1987

ББК 30.14
Н17
УДК 621.192 (035)

Авторы тома: **И. М. Синдеев, В. Ф. Воскобоев,
Д. В. Гаскаров, В. В. Ключев, А. В. Мозгалевский,
П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян**

Рецензент акад. АН СССР **И. Ф. Образцов**

Надежность и эффективность в технике: Справочник.
Н17 В 10 т./Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. — М.:
Машиностроение, 1987. — (В пер.).
Т. 9. Техническая диагностика/Под общ. ред. В. В. Ключева,
П. П. Пархоменко. — 352 с.: ил. — 1 р. 90 к.

Изложены задачи и особенности технического диагностирования при обеспечении надежности; приведены модели, алгоритмы и методы диагностирования, даны неразрушающие методы контроля качества и надежности в эксплуатации.

Предназначен для инженерно-технических работников, занятых проектированием, изготовлением, испытаниями и эксплуатацией техники. Будет полезен студентам и преподавателям высших учебных заведений.

Н 2702000000-608
038 (01)-87 Подписное

ББК 30.14

Оглавление

Глава 1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ — ЭТАП ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

1. Содержание технической диагностики (*Е. С. Согомонян*) 7
2. Методология диагностирования (*А. В. Мозгалевский*) 16
3. Поиск дефектов (*И. М. Синдеев*) 26

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

1. Модели аналоговых объектов (*В. Ф. Воскобоев, А. В. Мозгалевский*) 35
2. Модели дискретных комбинационных объектов (*П. П. Пархоменко*) 51
3. Дискретные объекты с памятью (*П. П. Пархоменко*) 70

Глава 3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

1. Анализ моделей объектов диагностирования с логическими переменными (*П. П. Пархоменко*) 84
2. Исследование моделей аналоговых объектов диагностирования (*В. Ф. Воскобоев, А. В. Мозгалевский*) 115

Глава 4. ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

1. Методы оптимизации безусловных алгоритмов диагностирования (*П. П. Пархоменко, И. М. Синдеев*) 136
2. Методы оптимизации условных алгоритмов диагностирования (*П. П. Пархоменко*) 142
3. Прогнозирование технического состояния (*Д. В. Гаскаров*) 153

Глава 5. СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ (*А. В. Мозгалевский*)

1. Структура системы диагностирования 174
2. Встроенные средства диагностирования (*Е. С. Согомонян*) 186
3. Внешние средства диагностирования 197
4. Особенности проектирования ТСД 199

Глава 6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ (*В. В. Ключев*)

1. Общая характеристика параметров диагностирования и методов их измерения 211
2. Измерение вибраций, удара и шума 219

3. Дефектоскопия и интроскопия	234	Глава 7. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИ- СТИРОВАНИЯ (<i>В. В. Клюев</i>)	301		
4. Структуроскопия и измерение состава вещества	243				
5. Измерение размеров и определение положения объектов	250				
6. Измерение температуры и давления	255				
7. Измерение уровня и расхода	260				
8. Измерение механических параметров материалов	266				
9. Измерение влажности и плотности	275				
10. Измерение массы и времени	283				
11. Измерение электрических параметров	291				
				1. ТСД ЭВМ и электронных приборов	301
				2. ТСД судового оборудования	309
		3. ТСД автотракторного оборудования	316		
		4. ТСД технологического оборудования и гибких производственных систем	323		
		5. ТСД оборудования АЭС	330		
		6. ТСД оборудования летательных аппаратов	337		
		Список литературы	345		
		Предметный указатель	348		

1. СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Основные понятия. Объектом технического диагностирования называют изделие, его составные части или заготовку, техническое состояние которых подлежит определению. Техническое диагностирование представляет собой процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью. Завершением процесса диагностирования является установление вида технического состояния. Различают следующие виды технического состояния: исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, правильное функционирование и неправильное функционирование.

Жизненный цикл любого объекта состоит из этапов производства и эксплуатации. На каждом из этих этапов к объекту предъявляются определенные технические требования. Объект всегда должен удовлетворять требованиям, установленным технической документацией. Возникающие в объекте дефекты нарушают это соответствие. Задача диагностирования состоит в том, чтобы своевременно обнаружить дефекты, найти места и причины их возникновения и, в конечном итоге, восстановить нарушенное дефектами соответствие объекта техническим требованиям.

Дефекты могут появиться и на этапе проектирования объекта. Ошибки проектирования представляют собой особый класс дефектов, также подлежащих устранению с помощью методов и средств технической диагностики.

В технической диагностике термин «неисправность» используют как название модели дефекта, а также для

обозначения неисправного состояния объекта или его составной части.

Чтобы убедиться в том, что объект исправен (т. е. в нем нет ни одной неисправности), проводят проверку исправности объекта. На этапе производства такая проверка позволяет узнать, содержит ли созданный объект дефектные компоненты (детали, элементы, блоки, узлы и т. п.), а их монтаж — ошибки. Проверка исправности является основой деятельности производственных отделов технического контроля. На этапе эксплуатации проверяют: в условиях ремонта — все ли имевшиеся в объекте неисправности устранены; в условиях хранения — не возникли ли какие-либо неисправности за время хранения объекта. При профилактике объекта перед применением его по назначению или после такого применения в ряде случаев необходимо установить, в состоянии ли объект выполнить все функции, предусмотренные его рабочим алгоритмом функционирования, т. е. проверить работоспособность объекта. Проверка работоспособности может быть менее полной, чем проверка исправности, т. е. после проверки могут остаться обнаруженными неисправности, которые не препятствуют применению объекта по назначению. Например, резервированный объект может быть работоспособным несмотря на наличие неисправностей в резервных компонентах или связях.

На этапе эксплуатации в процессе применения объекта по назначению часто необходимо проверить правильность функционирования, т. е. выявить неисправности объекта, нарушающие его нормальную работу в текущий момент реального времени. Проверка правильности функционирова-

ния является менее полной, чем проверка работоспособности, так как позволяет убедиться только в том, что объект правильно функционирует в данном режиме работы в данный момент времени. Однако в правильно функционирующем объекте возможны неисправности, которые могут быть причиной неправильной работы объекта в других режимах, тогда как работоспособный объект правильно функционирует во всех режимах.

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

Важной характеристикой процедур проверки исправности, работоспособности или правильности функционирования является полнота обнаружения дефектов, задающая долю гарантированно обнаруживаемых неисправностей относительно всех заданных или рассматриваемых неисправностей объекта.

Техническое диагностирование с целью определения мест и, при необходимости, причин и видов дефектов объекта называют поиском дефектов. Поиск дефектов необходим для выявления и замены дефектных компонентов или связей объекта, для устранения ошибок монтажа и т. п. После устранения дефектов объект становится исправным, работоспособным или правильно функционирующим. Поиск дефектов является существенной составляющей деятельности служб наладки на этапе производства и ремонтных служб на этапе эксплуатации.

Характеристикой поиска дефектов является глубина поиска дефектов, задаваемая обычно указанием составной части объекта диагностирования или ее участка, с точностью до которых определяется место дефекта. Техническое диагностирование осуществляют с помощью тех или иных технических средств диагностирования (ТСД).

Система технического диагностирования представляет собой совокупность средств и объекта диагностирова-

ния и, при необходимости, исполнителей, подготовленная к диагностированию или осуществляющая его по правилам, установленным соответствующей документацией. Различают системы: тестового диагностирования [отличительная особенность — возможность подачи на объект диагностирования специально организуемых (тестовых) воздействий от средств диагностирования] и функционального диагностирования (на объект диагностирования поступают только рабочие воздействия).

С помощью систем тестового диагностирования обычно решают задачи проверки исправности и работоспособности объекта, а также поиска неисправностей (всех или только нарушающих работоспособность). Эти системы работают, как правило, в том случае, когда объект не применяют по прямому назначению. Использование систем тестового диагностирования при работающем объекте возможно, но при этом тестовые воздействия могут быть только такими, которые не мешают нормальному функционированию объекта.

Системы функционального диагностирования используют для проверки правильности функционирования объекта и поиска неисправностей, нарушающих нормальное функционирование. Эти системы работают при применении объекта по назначению. В противном случае необходима имитация условий функционирования объекта (в частности, имитация рабочих воздействий).

Процесс диагностирования может состоять из отдельных частей, характеризующих подаваемым на объект тестовым или рабочим воздействием и составом контрольных точек, в которых снимаются ответы объекта на это воздействие. Эти части процесса называют элементарными проверками объекта. В результате элементарной проверки получают значение ответа объекта, т. е. совокупность или последовательность диагностических значений параметров в контрольных точках. Тогда формальное описание процесса диагностирования, т. е. алгоритм технического диагностирования, представляет собой безусловную или условную

последовательность элементарных проверок с правилами анализа их результатов. Диагноз есть результат реализации алгоритма диагностирования.

Задачи организации диагностического обеспечения. В основе диагностического обеспечения любого объекта лежит организация его тестового и (или) функционального диагностирования. При разработке соответствующей системы функционального или тестового диагностирования необходимо:

изучить (исследовать) объект диагностирования, т. е. принципы его работы, структуру, конструкцию, выполняемые функции и др.;

указать перечень или классы возможных (наиболее вероятных) дефектов объекта, условия и признаки их проявления, передачи (транспортировки) признаков в контрольные точки и их обнаружения в этих точках; для малоизученных объектов может потребоваться физическое моделирование дефектов;

при возможности или необходимости формализованного решения задач диагностирования выбрать известную или построить новую математическую модель объекта и соответствующие ей модели возможных дефектов;

выбрать метод и составить алгоритм диагностирования, анализируя модели объекта формализованным путем, а при отсутствии модели — интуитивно на основе опыта;

оценить качество полученного алгоритма диагностирования; для алгоритмов проверки исправности, работоспособности или правильности функционирования объекта основной характеристикой является полнота обнаружения возможных дефектов, для алгоритмов поиска дефектов — глубина поиска; если указанные характеристики не соответствуют требуемым, выполняют либо доработку полученного алгоритма, либо составляют новый алгоритм, воспользовавшись другим методом диагностирования или улучшив предварительно контролепригодность объекта;

выбрать из известных или разработать новые подходящие средства диагностирования, которые реализуют ал-

горитм диагностирования, удовлетворяющий требованиям полноты обнаружения или глубины поиска возможных дефектов;

оценить характеристики выбранных или разработанных средств диагностирования, например, их объем, массу, безотказность, достоверность работы и др.; если какие-либо характеристики не соответствуют требуемым, выполняют либо доработку выбранных средств, либо подбирают или разрабатывают другие средства, не меняя полученный алгоритм диагностирования; если указанные меры не дают нужных результатов, уменьшают полноту обнаружения или глубину поиска возможных дефектов с последующей разработкой нового алгоритма диагностирования и реализующих его средств;

исследовать, в том числе экспериментально, систему диагностирования в целом.

Схема алгоритма, используемого при разработке системы диагностирования, приведена на рис. 1.

Сложный объект практически всегда можно представить в виде некоторой иерархической структуры (функциональной, конструктивной, организационной), каждый уровень которой содержит одну или несколько составных частей. Объект диагностирования может быть разделен на составные части в том случае, если эти части разрабатывают и изготавливают разные исполнители, или в случае декомпозиции сложных задач диагностирования объекта в целом на более простые задачи диагностирования его составных частей.

Средства тестового диагностирования могут быть как внешними (чаще всего), так и встроенными, аппаратурными и (или) программными, автоматическими, автоматизированными или ручными, универсальными или специализированными.

Средства функционального диагностирования обычно являются встроенными, автоматическими, специализированными, аппаратурными или программными. Чаще всего их называют средствами встроенного контроля.

Общий порядок действий, приведенный на схеме алгоритма (см. рис. 1), не

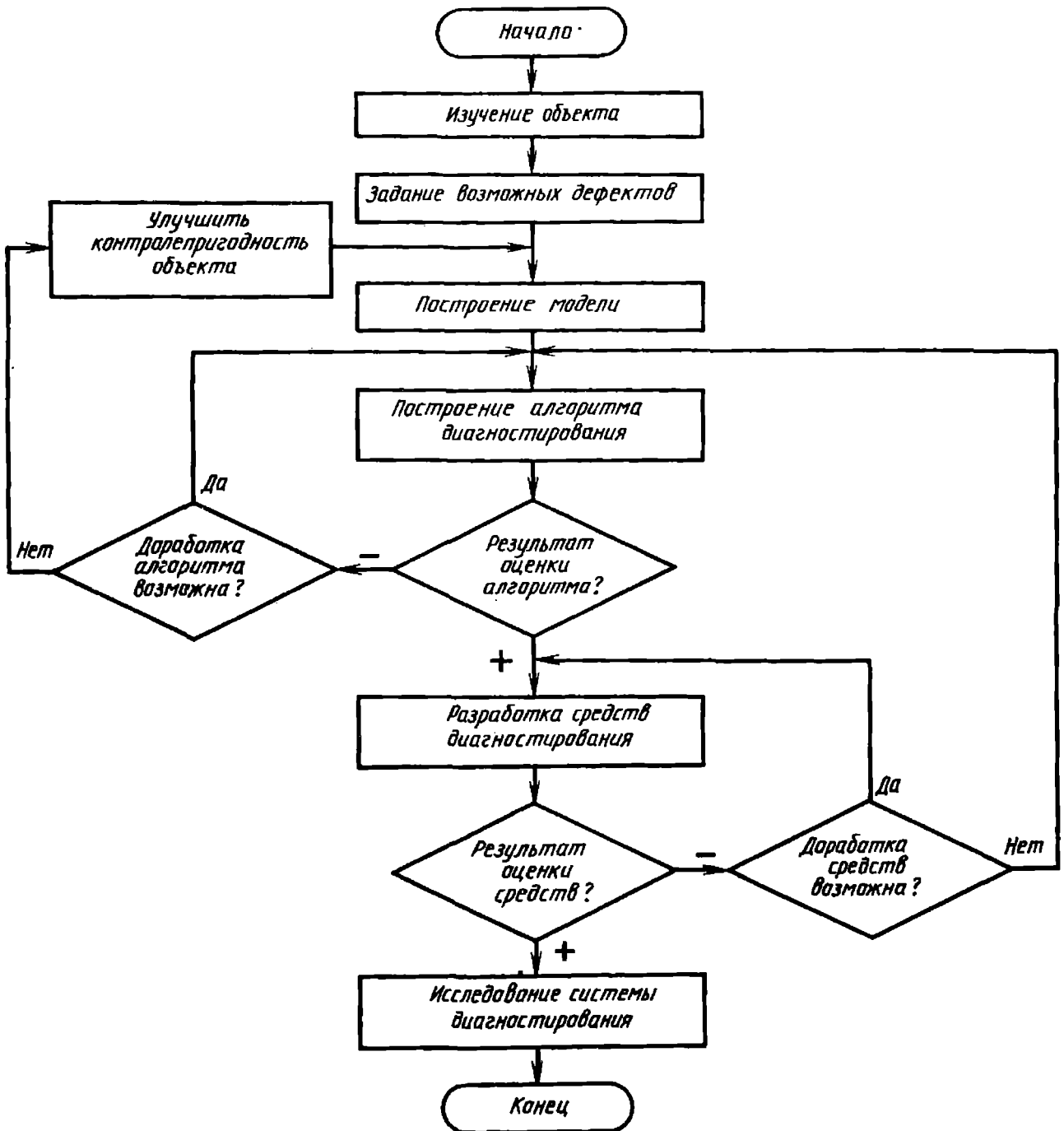


Рис. 1. Схема последовательности действий при разработке системы диагностирования

зависит от вида разрабатываемой системы (тестового или функционального) диагностирования или иерархического уровня и «размеров» составной части, являющейся объектом диагностирования. Тестовое и функциональное диагностирование дополняют друг друга, и поэтому усиление одного из них может ослабить требования к другому, и наоборот.

Разработку диагностического обеспечения вновь создаваемого объекта необходимо выполнять на этапе его

проектирования с тем, чтобы предусмотреть требуемый уровень контролепригодности объекта и приспособленность его к диагностированию.

Функциональное диагностирование. Иерархическая организация объекта в целом определяет соответствующую иерархию организации его диагностического обеспечения. Рассмотрим в качестве объекта диагностирования (ОД) составной части низшего иерархического уровня объекта. Особенность этого ОД заключается в том, что ни один

его элемент не имеет диагностического обеспечения.

Первый вопрос, возникающий перед разработчиком диагностического обеспечения, формулируется так: нужна ли система функционального диагностирования для рассматриваемого ОД?

Возможные ответы на этот вопрос следующие.

Система функционального диагностирования (СФД) не нужна в том случае, когда значение вероятности $P_6(t)$ безотказной работы ОД в конце самого длинного периода непрерывного его применения по назначению (например, периода между профилактическими проверками) не ниже допустимого [заданного в техническом задании (ТЗ)] значения вероятности правильного функционирования ОД. При этом неправильное функционирование (появление отказов) ОД возможно с вероятностью $1 - P_6(t)$, а профилактические (плановые и неплановые) проверки и ремонт обеспечат восстановление вероятности безотказной работы ОД до ее исходного значения $P_6(t_0)$. Если безотказность ОД недостаточна, ее можно повысить до требуемого уровня введением статического или динамического резервирования ОД. При статическом резервировании СФД не нужна, при динамическом — необходима для получения сигнала включения резерва при появлении дефектов основного оборудования.

СФД необходима тогда, когда (независимо от значения вероятности безотказной работы, которое всегда меньше единицы) следует обеспечить заданную высокую вероятность правильного функционирования ОД. В этом случае с помощью средства функционального диагностирования предотвращают выдачу неправильных значений сигналов или воздействий на выходе ОД. При этом должна быть обеспечена безотказность средств диагностирования (за максимальный период применения ОД по назначению) или СД должны быть выполнены самопроверяемыми (см. гл. 5).

Вопрос о необходимости СФД решается диагностами совместно со специалистами по надежности. Результаты рассмотрения утверждает разработчик

ОД, и если принято решение о необходимости СФД, диагност приступает к ее разработке в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

При разработке СФД учитывают возможное появление таких дефектов ОД, которые в процессе применения ОД по назначению могут вызвать недопустимые отклонения значений выходных сигналов ОД от их нормальных значений. Отклонения могут быть как устойчивыми (отказы), так и кратковременными (сбои).

Модели, методы и алгоритмы диагностирования для дискретных объектов (узлов и блоков вычислительных машин, устройств дискретной автоматики), а также принципы построения аппаратурных средств функционального диагностирования приведены в гл. 5. Аналоговые объекты в случае допусковых способов их проверки могут быть представлены логической моделью или сетью причинно-следственных связей. Построение алгоритмов диагностирования сводится в основном к выбору составов контрольных точек (см. гл. 2 и 3). Если аналоговый объект представляет собой замкнутую динамическую систему с обратными связями, то для организации его функционального диагностирования можно воспользоваться, например, методом введения дополнительных переменных. Функциональное диагностирование вращающихся механизмов и машин целесообразно проводить виброакустическими методами и средствами.

Сигналы, выдаваемые средствами функционального диагностирования некоторой составной части объекта (при нарушении правильности ее функционирования), могут быть использованы для световой или звуковой локальной индикации факта нарушения правильной работы составной части, выработки обобщенного сигнала нарушения правильной работы объекта в целом, управления вводом в работу резервного оборудования при автоматическом восстановлении объекта, а также управления функционированием объекта при наличии дефекта (например, реконфигурации).

Если СФД предназначена не только для проверки правильности функционирования, но также и для поиска

дефектов, выдаваемые средствами системы сигналы должны быть разными для разных классов, не требующих различения дефектов.

При функциональном диагностировании глубину поиска дефектов, как правило, задают через указание конструктивных узлов ОД, с точностью до которых требуется знать место дефекта. Каждый такой узел снабжают собственными средствами функционального диагностирования, по выходным сигналам которых непосредственно или после их логической обработки указывают неисправный узел.

Заметим, что в ответственных СФД сигналы срабатывания их средств используют также для автоматического сбора статистических данных о дефектах, возникающих в процессе эксплуатации ОД.

Тестовое диагностирование. После выбора удовлетворительного варианта СФД и предварительного утверждения его разработчиком ОД или после принятия решения, что СФД не нужна, приступают к разработке системы тестового диагностирования (СТД) ОД. В отличие от функционального диагностирования, тестовое диагностирование всегда необходимо. Не являются исключениями даже ОД, в которых предусмотрена собственная СФД, и для ОД понятия правильности функционирования, работоспособности и исправности совпадают — после изготовления необходимо проверить исправность ОД и средств его функционального диагностирования, которые могут быть неисправными и с помощью которых нельзя проверить ОД.

При разработке СТД прежде всего задают возможные (подлежащие обнаружению и поиску) дефекты. При этом состав возможных дефектов зависит от назначения СТД.

Типичной является ситуация, когда для условий производства ОД (наладки, сдачи объекта ОТК или представителю заказчика) и его ремонта предусматривают систему проверки исправности и поиска дефектов, нарушающих исправность, а для условий эксплуатации (профилактика плановая, неплановая, перед или после применения ОД, его транспортировки или хранения) — систему проверки рабо-

тоспособности и поиска дефектов, нарушающих работоспособность. В некоторых случаях понятия работоспособности ОД и его исправности совпадают.

При разработке СТД для проверки исправности и поиска соответствующих дефектов в состав возможных включают все дефекты, наличие которых делает ОД не соответствующим заданным на него техническим условиям. В частности, в число возможных должны быть включены, например, дефекты резервного оборудования, предусмотренного в ОД для целей повышения его безотказности, а также дефекты, ухудшающие такие характеристики, как потребляемая мощность или способность нормально работать в заданных экстремальных условиях внешней среды, или дефекты типа повреждения краски на кожухе.

При разработке СТД для проверки работоспособности и поиска соответствующих дефектов в число возможных должны включаться только такие дефекты, которые будут препятствовать выполнению всех тех функций ОД, которые необходимы в конкретных условиях его применения. Таким образом, некоторые дефекты, нарушающие исправность, могут не войти в число возможных при решении задачи проверки работоспособности.

Исправный ОД всегда является работоспособным. Проведение проверки работоспособности вместо проверки исправности часто является вынужденной мерой, продиктованной, например, дефицитом времени, выделенного на проверку, или какими-либо другими ограничениями.

Итак, пусть определен состав возможных дефектов, нарушающих исправность ОД. Если ОД выполнен без СФД, то этот состав дефектов принимают за исходный при обработке в соответствии с рис. 1. Если же ОД выполнен с СФД, то для получения исходного состава возможных дефектов необходимо в число возможных добавить все те дефекты средств СФД, которые нарушают исправность последних, т. е. в качестве ОД теперь необходимо рассматривать не только составную часть проектируемого объекта, но также и встроенные аппаратурные средства СФД.

Отметим, что для ОД с СФД можно сократить состав возможных дефектов, нарушающих исправность или работоспособность ОД, исключив те дефекты, которые всегда обнаруживаются средствами СФД при каждом применении ОД по назначению. Этот прием может упростить разработку СТД и реализацию ее средств. При этом процедура проверки исправности (и поиска дефектов, нарушающих исправность) должна, особенно в условиях производства, состоять из двух частей: вначале — тестовое диагностирование ОД и средств его СФД средствами СТД; затем — организация (или имитация) режима применения ОД по назначению, во время которого исправными средствами СФД диагностируются дефекты ОД, не диагностируемые средствами СТД.

При разработке СТД для проверки исправности и поиска соответствующих дефектов основной задачей (после построения модели ОД и его дефектов) является построение проверяющих тестов и тестов поиска дефектов (алгоритм диагностирования на рис. 1). Для дискретных ОД имеются не только формализованные методы и алгоритмы, но также машинные системы построения и анализа полноты тестов. Задачу поиска дефектов для сложных дискретных ОД решают, как правило, на основе проверяющих тестов с использованием выносных (в том числе программно управляемых) зондов и адаптеров. Широко применяют методы сжатия диагностической информации при помощи сигнатурных анализаторов. В ряде случаев используют встроенные аппаратные средства тестового диагностирования.

Для аналоговых объектов разработано мало формализованных методов построения тестов, поэтому необходимо привлекать опыт и интуицию инженера, пользоваться методами проверки частотных и переходных характеристик, разработанными в теории регулирования, методами проверки аналоговых вычислительных машин, результатами теории электрических цепей и др. При допусковом способе проверки аналоговых ОД, представленных в виде логической модели или сети причинно-следственных связей,

задача построения тестов полностью вырождается — тест при этом состоит из единственного тестового воздействия, все входные сигналы которого имеют допустимые (например, номинальные) значения. Следует отметить, что при таком подходе осуществляют не проверку исправности, а, в лучшем случае, проверку работоспособности ОД.

При проверке работоспособности как дискретных, так и аналоговых ОД тесты не составляют в тех случаях, когда имеется возможность проверить ОД подачей на их входы рабочих воздействий, вызывающих выполнение ОД всех заданных функций во всех возможных режимах работы в процессе применения по назначению. При такой проверке работоспособности, однако, имеется опасность неполной проверки, особенно тогда, когда число возможных рабочих воздействий велико и поэтому не удается реализовать все эти воздействия. Чтобы исключить такой недостаток диагностирования, выполняют диагностическое моделирование поведения ОД с целью определения тех дефектов, которые нарушают работоспособность, но не обнаруживаются при подаче рабочих воздействий. Если такие дефекты существуют, следует либо расширить состав используемых рабочих воздействий, либо найти (построить) тестовые воздействия, обнаруживающие указанные дефекты.

Важным моментом процедур построения тестов проверки исправности и работоспособности является оценка обеспечиваемой ими полноты обнаружения возможных дефектов ОД. Независимо от того, как был получен тест (например, формализованным методом, при помощи машины или интуитивно), оценка полноты должна быть проведена достаточно объективно, что для сложных объектов требует привлечения машинных систем диагностического моделирования.

Точно так же объективно оценивают глубину диагностирования для тестов поиска дефектов, нарушающих исправность или работоспособность ОД. Задача формализованной оценки глубины поиска дефектов является более сложной, чем задача оценки полноты

обнаружения дефектов. Только для относительно простых дискретных ОД существующие машинные системы диагностического моделирования позволяют оценить глубину поиска путем, например, построения диагностических словарей. Для сложных ОД, поиск дефектов которых предполагается осуществлять при помощи зондов и адаптеров, объективная оценка глубины поиска требует диагностического моделирования поведения ОД на проверяющих тестах совместно с моделированием алгоритмов управления зондами и адаптерами.

При выборе средств систем тестового диагностирования для проверки исправности, работоспособности и поиска дефектов ОД, являющихся составными частями объекта в целом, может потребоваться учет большего числа факторов, чем при выборе средств функционального диагностирования. Решения, предполагаемые диагностом, должны быть согласованы не только с разработчиком соответствующего ОД, но также и с головным разработчиком объекта в целом. Головной разработчик решает, каким должно быть для объекта в целом соотношение между объемами универсальных и специализированных, внешних и встроенных, аппаратурных и программных средств тестового диагностирования. Преобладание специализированных аппаратурных внешних средств тестового диагностирования может привести к большим объемам и массам этих средств, а преобладание универсальных средств — к установке различных преобразователей для унификации диагностических параметров. При выборе или создании средств СТД учитывают различие условий изготовления и условий эксплуатации ОД, т. е. средства, решающие одну и ту же задачу диагностирования, могут быть различны для условий производства и условий эксплуатации.

Организация диагностирования сложных объектов. Задачи диагностического решения составных частей объекта в целом выполняются на более низком функциональном уровне.

Основное отличие диагностирования сложного ОД состоит в том, что в этих ОД содержатся составные части с собственными СФД и СТД. Поэтому конкретному рассмотрению подлежат только те компоненты ОД, в которых не проводится функциональное и тестовое диагностирование его составных частей.

В общем случае системы диагностирования (как СФД, так и СТД) предназначены для получения информации о техническом состоянии ОД с целью воздействия на ОД в зависимости от этапа его жизни, режима работы и назначения объекта. Например, при изготовлении и наладке необходимо довести уровень надежности выпускаемого ОД до заданного, устранив все дефекты, нарушающие исправность объекта; в процессе применения по назначению для невосстанавливаемой части объекта — исключить возможность неправильной ее работы в составе объекта, если таковая недопустима, или сохранить работоспособность объекта, но с пониженной эффективностью; для восстанавливаемого объекта при применении по назначению — обеспечить работоспособность объекта или наиболее важных его составных частей, блокируя действия дефектов или устраняя их за заданное время. В любом из указанных случаев необходим орган, анализирующий сигналы от системы диагностирования, принимающий и выполняющий решения. Эти решения (например, по реконфигурации или включению резерва) могут приниматься автоматически или полуавтоматически с участием оператора.

На рис. 2 представлена схема организации диагностирования объекта с трехуровневой иерархической структурой. ОД состоит из m частей: $ОД_1, \dots, ОД_m$. Каждая из этих частей в свою очередь содержит более мелкие составные части. Например, $ОД_1$ состоит из частей: $ОД_{11}, \dots, ОД_{1k_1}$. В общем случае объект и каждая его составная часть имеют свои средства функционального (СРФД; $СРФД_1, \dots, СРФД_m$; $СРФД_{11}, \dots, СРФД_{1k_1}$ и т. д.) и тестового (СРТД; $СРТД_1, \dots, СРТД_m$; $СРТД_{11}, \dots, СРТД_{1k_1}$ и т. д.) диагностирования. Средства функционально-

го диагностирования получают информацию от своего объекта в процессе его функционирования и выдают информацию о техническом состоянии объекта. С помощью этих средств можно также установить место дефекта в объекте. Информация либо используется в пределах данного уровня (например, для включения резерва), либо передается для обработки и принятия решения на более высокий уровень вплоть до органа, принимающего и выполняющего решение ОПВР. Аналогично работают средства тестового диагностирования. Средства тестового диагностирования сами формируют и оказывают воздействие на объект и его составные части, причем составная часть может проверяться собственными локальными средствами или средствами более высокого уровня. Например, определение технического состояния составной части может выполняться СРТД более высокого уровня, а поиск дефектов — локальными средствами диагностирования данной составной части. Поиск места дефекта осуществляется как СРФД, так и СРТД. Глубина поиска дефекта может зависеть от этапа жизненного цикла объекта, на котором осуществляется диагностирование, так как на разных этапах допустимое время восстановления и размеры сменных компонентов объекта могут быть разными.

На рис. 2 стрелка от ОПВР к ОД условно изображает управление ОД в соответствии с принятым решением. Пунктирные линии от СРФД и СРТД к ОПВР символизируют передачу информации о техническом состоянии ОД на ОПВР.

Таким образом, выбор структуры системы диагностирования объекта в целом определяется структурой объекта, алгоритмом управления его функционирования, режимом работы и объемом управляющей и диагностической информации на каждом уровне иерархии. Кроме средств диагностирования для сложных объектов необходимо предусматривать средства сбора и хранения информации о возникающих дефектах (СХИД на рис. 2).

Перечень дефектов, алгоритмы и средства диагностирования выбирают таким образом, чтобы обеспечить за-

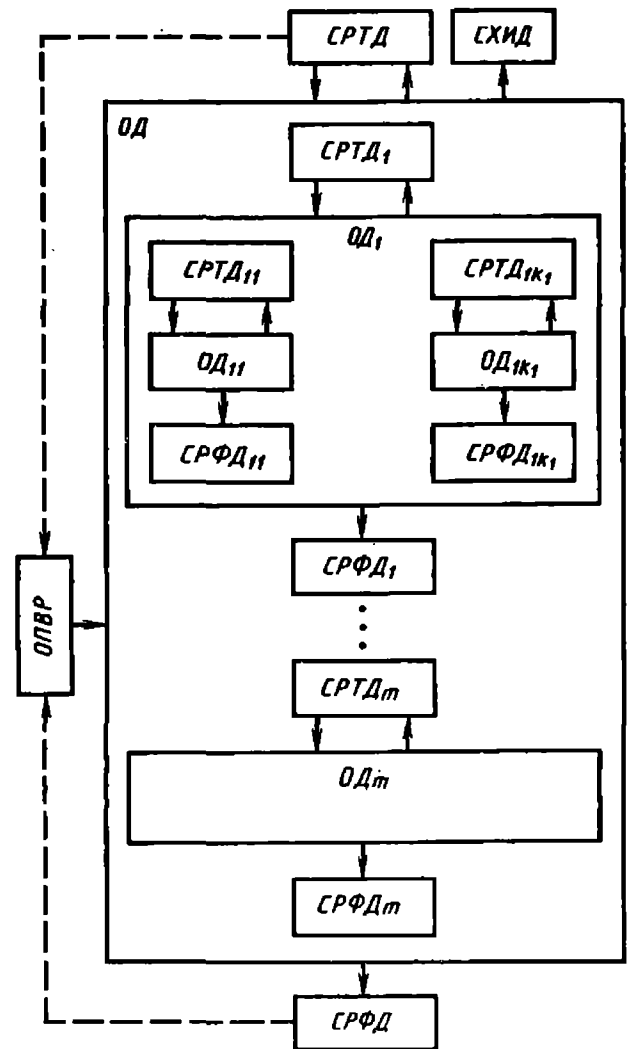


Рис. 2. Схема организации диагностирования объекта с трехуровневой структурой

данные в ТЗ требования к объекту по надежности, т. е. например, требуемый коэффициент оперативной готовности или другой заданный показатель надежности, зависящий от качества диагностирования, или время восстановления, зависящее от времени тестового диагностирования и глубины поиска дефектов.

Должны быть также выполнены ограничения на средства диагностирования по массе и габаритным размерам. Обнаружить все возможные неисправности сложного объекта при диагностировании (особенно на этапе эксплуатации) в ряде случаев не представляется возможным из-за большой размерности модели объекта, сложности построения тестов и большого времени диагностирования. Поэтому перечень дефектов, подлежащих обнаружению и поиску, должен быть ограничен. В рамках общей структуры построения системы диагностирования

(см. рис. 1) возможны два различных подхода, отличающиеся принципом выбора ограниченного перечня (класса) дефектов, подлежащих обнаружению.

Первый подход основан на учете важности наиболее вероятных дефектов различных составных частей объекта и, в первую очередь, повышения уровня надежности этих частей с помощью диагностирования и восстановления. Выбор алгоритмов диагностирования и восстановления в общем случае определяется перечнем дефектов, режимом работы объекта и заданной глубиной поиска дефектов. Перечень дефектов, алгоритм и средства диагностирования при заданной глубине поиска дефектов определяют время диагностирования. В свою очередь, время диагностирования и процедура восстановления определяют время восстановления.

Оценка алгоритма диагностирования состоит в проверке обеспечения алгоритмом полного обнаружения дефектов из заданного перечня и поиска дефектов с требуемой глубиной; оценка средств диагностирования — в проверке соответствия времени диагностирования заданному времени, которое определяется допустимым временем восстановления и зависит от процедуры восстановления, а также в проверке соответствия заданным ограничениям по массе и габаритным размерам.

Второй подход ориентирован на опыт, квалификацию, интуицию разработчиков объектов и не учитывает вероятностные характеристики дефектов. При этом подходе в одних случаях перечень (класс) дефектов выбирают на основе опыта, например, класс дефектов, описываемых константными неисправностями. Опыт показал, что этот класс дефектов для дискретных объектов, выполненных на элементах малой степени интеграции, достаточно представителен. В других случаях перечень определяют выбранным методом и средствами диагностирования. Например, в дублированной структуре с органом сравнения не обнаруживаются дефекты, существующие в разных каналах одновременно, и дефекты, при которых значения выходных сигналов в каждом канале одинаковы при любом входном воз-

действии. В этом случае разработчик системы диагностирования проверяет соответствие требованиям к массе и габаритным размерам, глубине поиска дефектов и времени диагностирования. Выполнение требований к надежности учитывают интуитивно с использованием опыта аналогичных разработок. Проверка качества диагностирования состоит в определении полноты диагностирования относительно выбранного перечня дефектов путем моделирования.

Таким образом, задачи организации диагностического обеспечения сложных объектов, и в частности задачи проектирования систем диагностирования, должны решаться в процессе проектирования объектов с учетом всех этапов их жизненного цикла. В составе коллективов, проектирующих объекты, должны быть подразделения по проектированию диагностического обеспечения, работающие совместно с подразделениями обеспечения надежности. В технических заданиях на объекты необходимо сформулировать требования к их диагностическому обеспечению в виде, допускающем объективную проверку выполнения этих требований расчетным или экспериментальным путем, а методы и средства диагностирования выбирать с учетом особенностей производства, наладки, режимов работы и обслуживания объектов диагностирования. Системы диагностирования сложных объектов целесообразно строить по иерархическому принципу с локальными и общими средствами функционального и тестового диагностирования. В проектной документации на объекты следует выделять специальные разделы по диагностическому обеспечению.

При разработке систем диагностирования предусматривают автоматический сбор и хранение информации о дефектах, возникающих в объектах при эксплуатации.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Диагностирование — системная задача этапов проектирования, производства и эксплуатации. В табл. 1

1. Содержание задач диагностирования, решаемых на этапах жизненного цикла объектов

Жизненный цикл объекта		Виды технического состояния ОД					
Этап	Период	Исправность		Работоспособность		Правильность функционирования	
		Проверка	Поиск дефектов	Проверка	Поиск дефектов	Проверка	Поиск дефектов
Производство	Изготовление	○	○				
	Наладка	○	○			○	○
	Сдача ОТК	○					
Эксплуатация	Применение по назначению	○				○	○
	Профилактика			○	○		
	Ремонт	○	○			○	○
	Транспортирование, хранение			○	○		
Проектирование		○	○	○	○	○	○

Условное обозначение: ○ — операция выполняется.

приведены задачи диагностирования с указанием, какие из них, на каком этапе и периоде жизненного цикла объекта находят применение. Проверка исправности и поиск дефектов, нарушающих исправность, необходимы при изготовлении, наладке и ремонте объекта. Сдача объекта ОТК требует только проверки его исправности — неисправный объект возвращается изготовителю для поиска и устранения дефектов. Проверку работоспособности и поиск дефектов, нарушающих работоспособность, осуществляют обычно при профилактике (плановой, перед применением или после применения), а также после транспортирования и в процессе хранения объекта. Наконец, проверка правильности функционирования и поиск дефектов, нарушающих правильное функциониро-

вание, нужны, в первую очередь, при применении объекта по назначению и могут потребоваться в процессе наладки и при ремонте объекта. Все задачи диагностирования решают в процессе проектирования объекта.

Для правильной организации диагностического обеспечения проектируемый объект должен быть приспособлен к диагностированию его технического состояния с требуемой точностью, а средства диагностирования должны быть разработаны с учетом условий производства и эксплуатации объекта.

Системный характер задач диагностирования состоит в том, что они должны решаться комплексно для всех периодов и этапов жизненного цикла объекта. При разработке методов и средств диагностирования необходимо учитывать особенности объекта и ус-

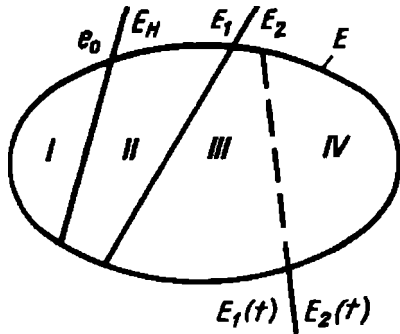


Рис. 3. Задача диагностирования в терминах разбиения множества технических состояний на подмножества

ловий его производства и эксплуатации, а также обеспечить контролепригодность проектируемого объекта. При разработке автоматизированных средств диагностирования важным этапом является проектирование деятельности человека-оператора, участвующего в процессе диагностирования и восстановления объекта.

Общая методика решения задач диагностирования. Допускается процесс диагностирования трактовать как процесс выделения в множестве всех рассматриваемых технических состояний объекта некоторого подмножества, которому принадлежит действительное техническое состояние объекта.

Пусть E — множество рассматриваемых технических состояний ОД, из которых одно (e_0) является исправным, а остальные определяются множеством рассматриваемых дефектов объекта. Тогда проверка исправности объекта состоит в том, чтобы определить, является ли его действительное техническое состояние e^* состоянием e_0 (объект исправен) или принадлежит подмножеству $E_H = E \setminus e_0$ (объект неисправен).

В задачах проверки работоспособности множество E также состоит из двух подмножеств E_1 и E_2 . Подмножество E_1 содержит все те технические состояния (включая e_0), находясь в которых объект является работоспособным, т. е. выполняет все свои функции, хотя, возможно, и с некоторой допустимой потерей эффективности. Понятие работоспособности объекта является согласительным, зависящим в первую очередь от конкретных условий применения объекта. В подмножест-

во E_2 включены технические состояния, которые соответствуют тем дефектам, наличие которых делает объект неработоспособным. Задача проверки работоспособности решена, если указано, какому подмножеству (E_1 или E_2) принадлежит действительное техническое состояние e^* объекта.

В ряде случаев задача проверки работоспособности может быть усложнена введением понятия *степени работоспособности*. При этом подмножество E_1 подразделяют на ряд подмножеств, каждому из которых соответствует своя степень работоспособности.

Применительно к задачам проверки правильности функционирования объекта также можно говорить о делении множества E на два подмножества, определяющих состояния: $E_1(t)$ — правильного функционирования, $E_2(t)$ — неправильного функционирования. Однако теперь деление на подмножества не является фиксированным, а меняется в реальном времени и зависит от того, какую функцию реализует объект в текущий момент времени t его применения по назначению. При любом делении в подмножество $E_1(t)$ постоянно входит исправное состояние e_0 и все работоспособные состояния. С помощью средств функционального диагностирования следят за тем, принадлежит ли текущее действительное техническое состояние $e^*(t)$ объекту текущему подмножеству $E_1(t)$, и фиксируют принадлежность состояния $e^*(t)$ текущему подмножеству $E_2(t)$.

На рис. 3 изображено в виде овала множество E . Секущие овал прямые делят множество E на подмножества:

I — объект исправен, работоспособен и правильно функционирует;

II — объект неисправен, но работоспособен и правильно функционирует;

III — объект неисправен, неработоспособен, но правильно функционирует;

IV — объект неисправен, неработоспособен и неправильно функционирует.

Задачам поиска дефектов соответствует деление множества E на $\lambda > 2$ подмножеств E_ν ($\nu = 1, 2, \dots, \lambda$) в соответствии с заданной глубиной поиска. В зависимости от вида задачи

поиска дефектов одно из подмножеств E_v является исправным состоянием e_0 , или подмножеством E_1 работоспособных состояний, или подмножеством $E_1(t)$ состояний правильного функционирования. Если при тестовом диагностировании заранее известна неисправность или неработоспособность объекта, то указанные состояния e_0 или E_1 исключаются из рассмотрения — разбиения на подмножества E_v задаются на множествах E_1 или E_2 соответственно.

Заметим, что в рассмотренной трактовке задач диагностирования как задач разбиения множества технических состояний на подмножества задачи проверки исправности, работоспособности и правильности функционирования отличаются от задачи поиска дефектов тем, что для них $\lambda = 2$.

Процесс определения технического состояния какого-либо объекта (процесс диагностирования) состоит, как правило, из отдельных экспериментов, каждый из которых характеризуется подаваемым или поступающим на объект воздействием и составом контрольных точек, с которых снимается ответ (реакция) объекта на это воздействие. Такие эксперименты называют *элементарными проверками объекта*. Результатом элементарной проверки является получаемое при ее реализации значение ответа объекта, т. е. набор значений сигналов в контрольных точках. Тогда формальное описание процесса диагностирования, т. е. алгоритм диагностирования объекта, представляет собой безусловную или условную последовательность элементарных проверок и правил анализа результатов последних.

Процесс реализации алгоритмов диагностирования также можно интерпретировать в терминах разбиения множества E технических состояний объекта на классы.

Обозначим результат элементарной проверки π_j объекта, находящегося в техническом состоянии e_i , символом R_j^i ; число различных результатов R_{ju} , $u = 1, 2, \dots, a_j$, элементарной проверки π_j , возможных на множестве E технических состояний объекта, символом μ_j .

Результаты R_{ju} могут служить признаками деления множества E на a_j подмножеств (классов) E_{ju} . При этом техническое состояние $e_i \in E$ принадлежит подмножеству E_{ju} , если $R_j^i = R_{ju}$.

Пусть первая в алгоритме диагностирования элементарная проверка π_1 дает деление множества E на a_1 подмножеств E_{1u} . Следующая элементарная проверка π_2 разделит подмножества E_{1u} на более мелкие классы и т. д. Алгоритмы диагностирования необходимо составлять таким образом, чтобы содержащиеся в них элементарные проверки обеспечивали окончательное деление множества E на классы E_k , $k = 1, 2, \dots, l \geq \lambda$, удовлетворяющие условию $E_k \leq E_\mu$ для всех $\mu = 1, 2, \dots, \lambda$. Реализацию конкретного алгоритма диагностирования конкретного объекта, находящегося в техническом состоянии e^* , завершает выделение класса E_k^* , содержащего состояние e^* .

Результаты элементарных проверок, т. е. совокупности или последовательности значений диагностических параметров в контрольных точках, характеризуют состояние объекта как динамической системы. В пространстве возможных состояний объекта могут быть выделены области исправных и неисправных, работоспособных и неработоспособных состояний, состояний правильного и неправильного функционирования, а также состояний, представляющих поведение объекта при наличии в нем определенных дефектов. Эти области в пространстве состояний объекта соответствуют рассмотренным выше классам E_v множества E его технических состояний. Тем самым определение фактического технического состояния e^* или класса E_k^* есть определение точки или подобласти в той или иной области пространства состояний объекта.

Показатели и критерии эффективности диагностирования. Показатели диагностирования определяют при проектировании, испытании и эксплуатации систем диагностирования и включают их в ТЗ на разработку объекта. Показатели диагностирования нормируют на основе расчетов по технико-

экономическому обоснованию СД из условия обеспечения максимальной эффективности применения объекта по назначению. Показатели диагностирования используют при сравнении различных вариантов СД.

ГОСТ 23564—79 устанавливает следующие показатели диагностирования:

вероятность ошибки диагностирования (P_{ij}), т. е. вероятность совместного наступления двух событий: ОД находится в техническом состоянии i , а по результатам диагностирования объект считается находящимся в техническом состоянии j ;

апостериорную вероятность ошибки диагностирования (P_{ij}^A), т. е. вероятность нахождения ОД в техническом состоянии i при условии, что в результате диагностирования получен результат «ОД в техническом состоянии j »;

вероятность правильного диагностирования (D), т. е. вероятность того, что средства диагностирования (ТСД) определяют то техническое состояние, в котором действительно находится ОД;

среднюю оперативную продолжительность диагностирования (τ_D), равную математическому ожиданию оперативной продолжительности однократного тестового диагностирования;

среднюю стоимость диагностирования (C_D), равную математическому ожиданию стоимости однократного тестового диагностирования;

среднюю оперативную трудоемкость диагностирования (S_D), равную математическому ожиданию оперативной трудоемкости проведения однократного тестового диагностирования.

Вероятность ошибки диагностирования рассчитывают по формуле

$$P_{ij} = P_i^0 \sum_{l=1}^k {}^l P_l^c P_{j,i,l}^y = \sum_{l=1}^k P_l^c P_{j,l}^a P_{i,l}^b \quad (1)$$

где $i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ (m — число рассматриваемых технических состояний ОД); k — число рассматриваемых технических состояний ТСД; P_i^0 — априорная вероятность нахождения

ОД в техническом состоянии i ; P_l^c — априорная вероятность нахождения ТСД в техническом состоянии l ; $P_{j,i,l}^y$ — условная вероятность того, что в результате диагностирования ОД признается находящимся в техническом состоянии j при условии, что он находится в техническом состоянии i и ТСД находится в техническом состоянии l ; $P_{j,l}^a$ — условная вероятность получения результата «ОД находится в техническом состоянии j » при условии, что ТСД находится в техническом состоянии l ; $P_{i,j,l}^b$ — условная вероятность нахождения ОД в техническом состоянии i при условии, что получен результат «ОД в техническом состоянии j » и ТСД находится в техническом состоянии l .

Если в процессе диагностирования решается только задача проверки, например, работоспособности, когда $m = 2$, то рассчитывают вероятность:

$$P_{1,2} = \sum_{l=1}^k P_l^c P_{2,l}^a P_{1,2,l}^b \quad (2)$$

или

$$P_{2,1} = \sum_{l=1}^k P_l^c P_{1,l}^a P_{2,1,l}^b \quad (3)$$

где $P_{1,2}$ — вероятность совместного наступления двух событий: ОД находится в работоспособном состоянии, а в результате диагностирования считается неработоспособным; $P_{2,1}$ — вероятность совместного наступления двух событий: ОД находится в неработоспособном состоянии, а в результате диагностирования считается работоспособным; $P_{2,l}^a$ — условная вероятность получения результата «ОД находится в неработоспособном состоянии» при условии, что ТСД находится в техническом состоянии l ; $P_{1,2,l}^b$ — условная вероятность нахождения ОД в работоспособном состоянии при условии, что получен результат «ОД находится в неработоспособном состоянии» и ТСД находится в техническом состоянии l ; $P_{1,l}^a$ — условная вероятность получения результата «ОД находится в работоспособном состоянии»

при условии, что ТСД находятся в техническом состоянии l ; $P_{2,1,l}^b$ — условная вероятность нахождения ОД в неработоспособном состоянии при условии, что получен результат «ОД находится в работоспособном состоянии» и ТСД находятся в техническом состоянии l .

Среди возможных технических состояний средств диагностирования для расчетов вероятности ошибки диагностирования существенными являются следующие три, в каждом из которых проявляется работоспособное состояние средств:

$l = 1$ — работоспособное или исправное состояние;

$l = 2$ — неработоспособное состояние, при котором ТСД фиксируют работоспособное состояние ОД независимо от его действительного технического состояния; $l = 3$ — неработоспособное состояние, при котором ТСД фиксируют неработоспособное состояние ОД независимо от его действительного технического состояния.

Формулы (2) и (3) применяют также для решения задач проверки исправности и правильности функционирования объекта.

В тех случаях, когда техническое состояние аналогового ОД определяется значениями n независимых диагностических параметров *, вероятности $P_{1,2}$, $P_{2,1}$ вычисляют с помощью следующих формул:

$$P_{1,2} = \sum_{l=1}^k P_l^c \times \left[\prod_{v=1}^n P_v - \prod_{v=1}^n (P_v - \alpha_{v,l}) \right]; \quad (4)$$

$$P_{2,1} = \sum_{l=1}^k P_l^c \left[\prod_{v=1}^n (P_v - \alpha_{v,l} - \beta_{v,l}) - \prod_{v=1}^n (P_v - \alpha_{v,l}) \right], \quad (5)$$

где P_v — априорная вероятность нахождения значения v -го диагностиче-

ского параметра в поле допуска; $\alpha_{v,l}$ — вероятность совместного наступления двух событий: значение v -го диагностического параметра находится в поле допуска, но считается находящимся вне поля допуска при условии, что ТСД находятся в техническом состоянии l ; $\beta_{v,l}$ — вероятность совместного наступления двух событий: значение v -го диагностического параметра находится вне поля допуска, но считается находящимся в поле допуска при условии, что ТСД находятся в техническом состоянии l .

Значения вероятностей ошибки диагностирования вычисляют по формулам:

апостериорной

$$P_{ij}^A = \frac{P_{i,j}}{\sum_{i=1}^m P_{ij}}; \quad (6)$$

правильного диагностирования

$$D = \sum_{i=1}^m P_{i,j} = 1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m P_{i,j} \quad \text{при } i \neq j. \quad (7)$$

Если в процессе диагностирования решается только задача проверки, например, работоспособности ($m = 2$), то вероятность правильного диагностирования находят из выражения

$$D = 1 - P_{1,2} - P_{2,1}, \quad (8)$$

где $P_{1,2}$ и $P_{2,1}$ рассчитывают по (4) и (5).

В тех случаях, когда техническое состояние ОД определяется значениями n независимых диагностических параметров и ТСД, различают 2^n состояний ОД, а вероятность правильного диагностирования

$$D = \sum_{l=1}^k P_l^c \prod_{v=1}^n (1 - \alpha_{v,l} - \beta_{v,l}). \quad (9)$$

Средняя оперативная продолжительность тестового диагностирования

$$\tau_d = \sum_{i=1}^m P_i^c \sum_{l=1}^k \tau_{i,l} P_l^c, \quad (10)$$

* В терминах элементарных проверок это означает, что имеется n контрольных точек, в которых снимают ответы объекта на поступающие на него воздействия (тестовые или рабочие).

где $\tau_{i,l}$ — оперативная продолжительность тестового диагностирования ОД, находящегося в i -м техническом состоянии при условии, что ТСД находятся в l -м техническом состоянии; $\tau_{i,l}$ включает в себя как продолжительность вспомогательных операций, так и продолжительность собственно диагностирования.

Средняя стоимость тестового диагностирования

$$C_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m P_i^c \sum_{l=1}^k C_{i,l} P_l^c, \quad (11)$$

где $C_{i,l}$ — стоимость тестового диагностирования ОД, находящегося в техническом состоянии i при условии, что ТСД находятся в техническом состоянии l .

Стоимость $C_{i,l}$ состоит из амортизационных затрат, затрат на эксплуатацию системы диагностирования и стоимости износа ОД.

Среднюю оперативную трудоемкость тестового диагностирования находят из выражения

$$S_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m P_i^c \sum_{l=1}^k S_{\text{ди},l} P_l^c, \quad (12)$$

где $S_{\text{ди},l}$ — оперативная трудоемкость тестового диагностирования ОД, находящегося в техническом состоянии i при условии, что ТСД находятся в техническом состоянии l .

Пример расчета приведенных показателей диагностирования содержится в справочном приложении к ГОСТ 23564—79.

Диагностирование направлено на повышение эффективности объекта, поэтому количественно эффективность диагностирования можно оценить мерой повышения эффективности объекта, обусловленной осуществлением диагностирования с учетом затрат или потерь на его выполнение.

Абсолютное приращение эффективности объекта в общем виде определяют следующим образом:

$$\Delta E(t) = \Phi_{\text{д}}(t) - \Phi(t), \quad (13)$$

где $\Phi(t)$ и $\Phi_{\text{д}}(t)$ — показатели эффективности соответственно недиагности-

руемого объекта и объекта при осуществлении диагностирования.

Относительное приращение эффективности объекта определяют из соотношения

$$E(t) = \frac{\Phi_{\text{д}}(t) - \Phi(t)}{\Phi_{\text{ди}}(t) - \Phi(t)}, \quad (14)$$

где $\Phi_{\text{ди}}(t)$ — показатель эффективности объекта при осуществлении идеального диагностирования (без затрат и потерь).

В качестве показателя эффективности объектов можно применять коэффициент

$$K = \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{н}}}{T_{\text{э}}}, \quad (15)$$

где $T_{\text{э}}$ — рассматриваемый интервал времени эксплуатации объекта; $T_{\text{н}}$ — время, в течение которого объект находился в неработоспособном состоянии.

В общем случае время нахождения объекта в неработоспособном состоянии определяют как сумму

$$T_{\text{н}} = T_{\text{нр}} + \tau_{\text{д}} + T_{\text{в}} + T_{\text{ро}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{нр}}$, $\tau_{\text{д}}$, $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{ро}}$ — суммарное время нахождения соответственно объекта в неработоспособном состоянии до начала диагностирования, диагностирования, устранения дефектов, установленных по результатам диагностирования, и время, затраченное на проведение технического обслуживания.

Эффективность систем диагностирования, выраженную через вероятность получения правильного заключения о техническом состоянии объекта (диагноза), можно вычислить поэтапно, пользуясь так называемым иерархическим деревом показателей, характеризующих надежность ТСД и достоверность процесса диагностирования. Пример такого дерева приведен на рис. 4.

Показатель V первого уровня является обобщенной величиной и представляет собой вероятность получения правильного диагноза. Второй уровень определяет надежность ТСД (вероятность $P_{\text{ср}}$ их правильного функционирования) и достоверность процесса диагностирования D . На третьем уровне находятся частные показатели,

характеризующие надежность ТСД: вероятность $P(\tau_D)$ безотказной работы за время диагностирования τ_D и коэффициента готовности K_G и частные показатели, характеризующие процесс диагностирования: полнота обнаружения дефектов D_{Π} и инструментальная достоверность $D_{И}$.

На каждом следующем уровне дерева показателей помещают такие показатели, от которых зависят показатели предыдущего уровня. Например, на четвертом уровне дерева (см. рис. 4) можно поместить показатели надежности функциональных или конструктивных узлов ТСД, составляющие инструментальной достоверности и т. п.

В соответствии с деревом показателей, зная K_G , $P(\tau_D)$, D_{Π} и $D_{И}$, находим: вероятность правильного функционирования ТСД

$$P_c = K_G P(\tau_D);$$

достоверность процесса диагностирования

$$D = D_{\Pi} D_{И};$$

вероятность получения правильного диагноза

$$V = P_{cp} D.$$

Об эффективности системы диагностирования можно судить по потере информации в ТСД. В этом случае ТСД рассматривают как средства своеобразной информационно-измерительной системы, задачей которых является получение информации о состоянии объекта. Тогда в качестве меры эффективности можно рассматривать отношение количества информации $I_y(t)$, полученной на выходе ТСД за время t их работы, к количеству информации $I_x(t)$ на входе ТСД за то же время:

$$W(t) = \frac{I_y(t)}{I_x(t)} = \frac{I_x(t) - \Delta I(t)}{I_x(t)},$$

где $\Delta I(t) = I_x(t) - I_y(t)$ — суммарные потери информации в ТСД за время t .

Величина $W(t)$ изменяется от 1 до 0. Чем ее значение больше, тем выше эффективность ТСД. Значение $I_x(t)$ в предположении, что значения диагностических параметров аналогового

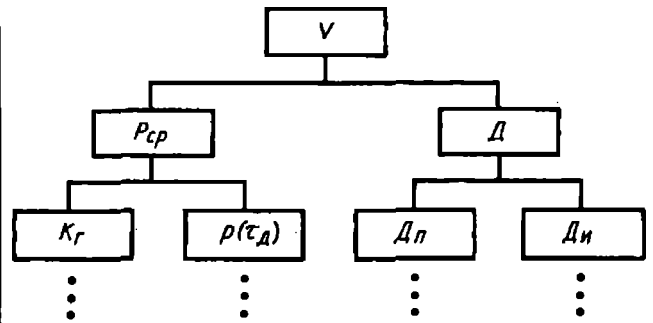


Рис. 4. Иерархическое дерево показателей эффективности

объекта распределены по нормальному закону, определяют из выражения

$$I_x(t) = \Omega t 2\pi l \ln \sigma_x^2,$$

где Ω — максимальная частота спектра изменения значений диагностического параметра ОД; σ_x^2 — дисперсия значений исследуемого параметра. Количество информации рассчитывают по формуле

$$I_y(t) = W_n(t) I_0(t),$$

где $I_0(t)$ — количество информации на выходе ТСД за время t при их абсолютной безотказности;

$$I_0(t) = \frac{1}{2} Ft \ln \frac{\sigma_x^2 + \sigma_\epsilon^2}{\sigma_\epsilon^2};$$

$$W_n(t) = \frac{1}{t} \int_0^t P(t) dt.$$

В формулах F — частота опроса диагностических параметров объекта; σ_ϵ^2 — дисперсия шума; $P(t)$ — вероятность безотказной работы ТСД.

Алгоритм диагностирования. Совокупность предписаний в виде последовательности проверок и правил обработки их результатов с целью получения диагноза называют алгоритмом технического диагностирования.

Различают безусловные и условные алгоритмы диагностирования. При безусловном алгоритме задают одну фиксированную последовательность проведения проверок: информация о техническом состоянии независимо от результатов проверки поступает и обрабатывается последовательно. Если

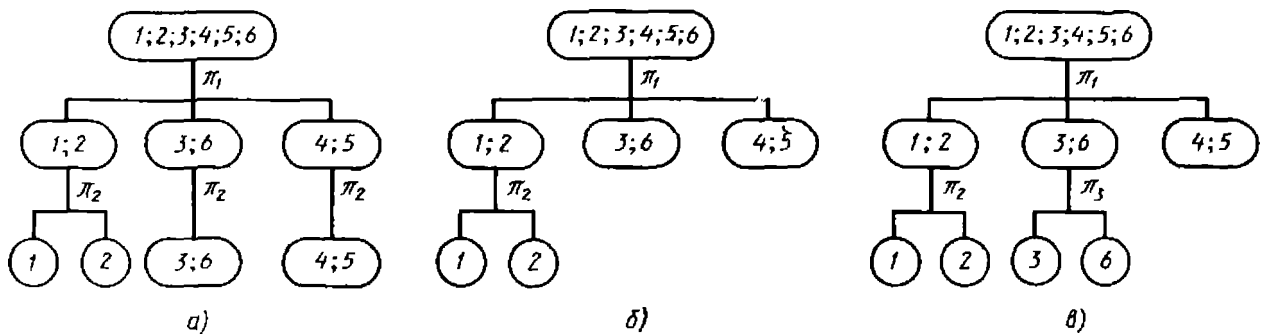


Рис. 5. Графическое задание алгоритмов диагностирования

заключение о техническом состоянии может быть сделано только после проведения всех проверок, предусмотренных алгоритмом, то такой алгоритм называют *алгоритмом с безусловной остановкой*. Такие алгоритмы наиболее часто используют во встроенных системах контроля.

Условным алгоритмом диагностирования называют последовательность выполнения проверок, зависящую от результатов предыдущего анализа проверок.

Если заключение может быть сделано до реализации всей последовательности проверок, то алгоритм называют *алгоритмом с условной остановкой*. Условный алгоритм всегда является алгоритмом с условной остановкой.

В соответствии с задачами диагностирования различают алгоритмы проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования и поиска дефектов.

Алгоритмы функционального диагностирования обладают спецификой, заключающейся в том, что последовательность реализации их элементарных проверок задается порядком следования рабочих воздействий, определяемых функционированием объекта. Формами задания алгоритмов функционального диагностирования являются аналитические, табличные или другие описания функционирования реализующих эти алгоритмы средств диагностирования (см. гл. 4).

Простейшей формой алгоритмов тестового диагностирования являются *древовидные графы*. Корневая вершина дерева представляет множество E всех рассматриваемых технических состояний объекта, а остальные вершины — подмножества технических состояний, выделяемые в результате деления мно-

жества E и его подмножеств по результатам элементарных проверок, причем всякие вершины дерева являются подмножествами технических состояний, более детальное деление которых не требуется по условиям рассматриваемой задачи диагностирования. Исходящими из вершин дерева дугами изображают элементарные проверки, а входящими дугами — результаты этих проверок.

На рис. 5 даны примеры деревьев, представляющих собой алгоритмы тестового диагностирования для задач проверки исправности (рис. 5, а и б) и поиска дефектов (рис. 5, в). Множество E состоит из шести технических состояний 1, 2, ..., 6 (состояние 1 является исправным состоянием объекта).

Древовидный граф на рис. 5, а является безусловным алгоритмом проверки исправности с безусловной остановкой. Независимо от результата элементарной проверки π_1 выполняется проверка π_2 , и только после этого проводится анализ с целью получения диагноза. Если выделено техническое состояние 1, то объект исправен; в остальных случаях (состояние 2 или одна из пар состояний {3, 6} или {4, 5}) — неисправен.

Безусловный алгоритм проверки исправности с условной остановкой приведен на рис. 5, б. Если в результате элементарной проверки π_1 выделится подмножество состояний {3, 6} или {4, 5}, то дальнейшая реализация алгоритма прекращается — установлена неисправность объекта. В противном случае проводят проверку π_2 , чтобы различить состояния 1 и 2.

На рис. 5, в дан условный алгоритм поиска дефектов. Предположим, что в задаче требуемая глубина поиска

задана делением множества E на четыре подмножества E_v : $E_1 = \{1\}$, $E_2 = \{2, 6\}$, $E_3 = \{3\}$ и $E_4 = \{4, 5\}$. При выделении первой элементарной проверкой π_1 подмножества $\{1, 2\}$ следующей проверкой является проверка π_2 , а для подмножества $\{3, 6\}$ — проверка π_3 . Подмножество $\{4, 5\}$ не требует разбиения согласно заданной глубине поиска. Представленные множества вершинами подмножества E_h удовлетворяют требованию $E_h \leq E_v$ для всех $v = 1, 2, 3, 4$.

Аналитической формой алгоритмов диагностирования является запись его в виде логической схемы. Эта запись содержит операторы и логические условия. Операторы могут представлять элементарные проверки или составляющие их отдельные операции (например, подключение к объекту генератора тестовых воздействий, подача на объект конкретной тестовой последовательности, подключение к контрольным точкам измерительных приборов, чтение показаний приборов и т. п.), а логические условия — результаты элементарных проверок.

В логической схеме алгоритма операторы и логические условия следуют друг за другом, а пронумерованные стрелки определяют порядок выполнения операторов после проверки логических условий.

Обычно операторы обозначают большими латинскими буквами (A, B, C и т. д.), а логические условия — малыми (p, q, r и т. д.). Стрелки, являющиеся переходами между не соседними в записи операторами, проводят вертикально, причем \uparrow^1 означает начало перехода по стрелке (ставится только после логического условия), а \downarrow_1 — окончание перехода (ставится в любом месте схемы).

Алгоритм начинается с исполнения крайнего левого элемента. Если левый крайний элемент — оператор, то после его выполнения выполняется элемент, стоящий рядом с ним справа. Если левый крайний элемент — логическое условие, то при его удовлетворении выполняется элемент, стоящий непосредственно справа от логического условия. В том случае, если логическое условие не удовлетворяется, выполняют элемент схемы, к которому ведет

стрелка, помещенная справа от логического условия.

Достоинство логических схем алгоритмов состоит в том, что эти схемы могут быть составлены по содержательному описанию алгоритма диагностирования. При этом принимают требуемую детализацию операторов, логических условий и выбирают порядок их следования.

Например, пусть алгоритм проверки работоспособности объекта имеет следующее содержание: последовательно во времени оценивают по двоичной шкале значений два диагностических параметра; если значение первого из параметров не выходит за допустимые пределы, то оценивают второй параметр; если же значение первого параметра выходит за допустимые пределы, то переходят к алгоритму поиска возникшего дефекта; переход к поиску дефекта осуществляют и в том случае, если значение второго параметра выходит за допустимые пределы.

Логическая схема этого алгоритма имеет вид

$$O_1 p_1 \uparrow^1 O_2 p_2 \uparrow^2 \downarrow_{1,2} P_d,$$

где O_1 и O_2 — операторы оценки соответственно первого и второго диагностических параметров; p_1 и p_2 — логические условия нахождения значений параметров в допустимых пределах; P_d — оператор перехода к алгоритму поиска дефекта.

Для дискретных объектов распространена табличная форма алгоритмов диагностирования. Характерным примером такого представления является задание алгоритмов тестового диагностирования комбинационных объектов в форме сжатой таблицы функций неисправностей (см. гл. 3 и 4).

Логические схемы алгоритмов также могут иметь табличную или матричную форму. Строки и столбцы матрицы в этом случае ставятся в соответствие операторам; в клетке (ij) матрицы проставлено одно из следующих значений: 1 — если за оператором O_i непосредственно следует оператор O_j ; p_{ij} — значение логического условия, при котором оператор O_j выполняется после оператора O_i ;

0 — в остальных случаях.

2. Матричная форма задания алгоритма

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
V_0	1	0	0	0	0	0	0
V_1	0	P	0	P	0	0	0
V_2	0	0	1	0	0	0	0
V_3	0	0	0	0	0	0	0
V_4	0	0	0	0	1	0	0
V_5	0	0	0	0	0	P	P
V_6	0	0	0	0	0	0	0
V_7	0	0	0	0	0	0	0

Условные обозначения: V_0 — начальный оператор; V_1 — V_7 — текущие операторы.

В табл. 2 приведен пример матричной формы задания алгоритма, которому соответствует следующая логическая схема:

$$V_0 V_1 p_1 \uparrow {}^1 V_2 V_3 \downarrow {}_1 V_4 V_5 p_2 \uparrow {}^2 V_6 \downarrow {}_2 V_7.$$

Матричная форма задания удобнее аналитической в тех случаях, когда логические условия могут принимать больше двух значений.

Рассмотренные формы задания алгоритмов пригодны для более или менее простых алгоритмов диагностирования. Для описания сложных алгоритмов многокомпонентных многофункциональных дискретных и аналоговых объектов используют специальные формализованные языки, например АТЛАС, предназначенный для описания операций диагностирования аналоговых и гибридных объектов различной физической природы, или ТЕСТ, дающий компактное представление входных тестовых последовательностей дискретных объектов.

3. ПОИСК ДЕФЕКТОВ

Принципы построения алгоритмов поиска дефектов. Если при определении работоспособного состояния установлено, что ОД неисправен, то возникает необходимость поиска дефекта. Опыт эксплуатации сложных систем

показывает, что время поиска дефектов существенно больше времени их устранения, поэтому большое внимание уделяют разработке методов обнаружения и поиска дефектов, на основе которых можно вручную или автоматически в наиболее короткий срок определить дефектный элемент системы.

Наличие дефектов в системе проявляется в изменении диагностических признаков (параметров) системы. Измерение диагностических признаков позволяет установить место появления дефекта.

Составление алгоритмов поиска — одна из основных задач технического диагностирования. Для составления алгоритмов используют некоторые критерии эффективности, например, минимум средних потерь (средние затраты на поиск дефекта, среднее время поиска дефекта и т. п.).

Составление алгоритмов связано с решением задачи оптимизации — нахождения алгоритма, критерий оценки которого имеет минимальное или близкое к нему значение. Нахождение такого алгоритма связано с рядом трудностей, поэтому для решения задачи оптимизации предложен ряд методов, целесообразность применения которых обусловлена характером исходной информации и сложностью объекта.

Алгоритмы поиска дефектов, основанные на анализе показателей надежности. Безусловный алгоритм поиска (метод время — вероятность). Элементы объекта контроля соединены произвольно. Их проверяют по одному в определенной, заранее заданной последовательности. Если проверяемый элемент исправен, то проводят проверку следующего элемента; если неисправен, то поиск прекращают, и объект восстанавливается. Качество алгоритма оценивают по среднему времени поиска неисправного элемента.

Допустим, что ОД состоит из n элементов, в одном из которых имеется дефект. Вероятности q_i ($i = \overline{1, n}$) дефектов элементов суммируются $\sum_{i=1}^n q_i = 1$. Время, необходимое для

проверки π_i состояния i -го элемента, равно τ_i .

Для произвольного алгоритма диагностирования Π_1 , составленного, например, в соответствии с нумерацией элементов, математическое ожидание времени поиска

$$M\Pi_1(\tau) = q_1\tau_1 + q_2(\tau_1 + \tau_2) + \dots + q_n(\tau_1 + \dots + \tau_n).$$

Если изменить порядок проверок (например, π_1 и π_2), то для второго алгоритма поиска

$$M\Pi_2(\tau) = q_2\tau_2 + q_1(\tau_1 + \tau_2) + \dots + q_n(\tau_1 + \dots + \tau_n).$$

Разность математических ожиданий времени поиска по алгоритмам Π_1 и Π_2 равна:

$$M\Pi_1(\tau) - M\Pi_2(\tau) = q_2\tau_1 - q_1\tau_2.$$

Очевидно, что алгоритм Π_1 эффективнее алгоритма Π_2 , если $q_2/\tau_2 < q_1/\tau_1$. Таким образом, упорядочив проверки в соответствии с отношением $q_1/\tau_1 > q_2/\tau_2 > \dots > q_n/\tau_n$, получим алгоритм, при осуществлении которого математическое ожидание времени поиска минимально. В этом случае, если после проведения $n-1$ -проверки дефектный элемент не обнару-

жен, то вследствие того, что $\sum_{i=1}^n q_i = 1$, за дефектный принимают последний элемент и не проверяют его. Учет этого факта (так называемого конечного эффекта) приводит к дополнительному уменьшению средних потерь на указание дефектного элемента на $\tau_n q_n$.

Построение алгоритмов диагностирования методом динамического программирования. Состояние системы, состоящей из n произвольно соединенных элементов, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний, задано матрицей допустимых тестов. Априори известно, что с вероятностью $P(s_i)$ ($0 < P(s_i) < 1$, $\sum_{i=1}^n P(s_i) = 1$) система может находиться в состоянии s_i . Задают конечное множество $\Pi = \{\pi_i\}$ ($i = \overline{1, m}$)

возможных проверок, имеющих два исхода (положительный или отрицательный), и стоимость выполнения каждой π_i проверки C_i ($C_i > 0$). Делают предположение, что в процессе диагностирования система не переходит из одного состояния в другое, а стоимость C_j проверки π_j не зависит от порядка выполнения проверок. Требуется построить оптимальный в смысле минимума средней стоимости условный алгоритм поиска дефекта.

Построение условного алгоритма диагностирования начинают с выбора первой проверки. В зависимости от исхода первой проверки π_l множество возможных состояний S делят на два подмножества S_l^0 и S_l^1 , после чего выбирают проверки, разделяющие эти подмножества. Выбор проверок продолжают до тех пор, пока множество не будет разделено на отдельные состояния.

Допустим, что в результате выполнения некоторой последовательности проверок установлено, что состояние, в котором находится система, относится к подмножеству S_k^0 . Следующая проверка π_i разделит S_k^0 на два подмножества S_{ki}^{00} и S_{ki}^{01} .

Вероятности отрицательного и положительного исходов проверки π_i равны:

$$P(S_{ki}^{00}) = \frac{\sum_{s_t \in S_{ki}^{01}} P(s_t)}{\sum_{s_t \in S_k^0} P(s_t)},$$

$$P(S_{ki}^{01}) = \frac{\sum_{s_t \in S_{ki}^{01}} P(s_t)}{\sum_{s_t \in S_k^0} P(s_t)}.$$

Если процесс начинается с S_k^0 , то среднюю стоимость алгоритма диагностирования можно найти из выражения

$$C_i(S_k^0) = c_i + P(S_{ki}^{00})C(S_{ki}^{00}) + P(S_{ki}^{01})C(S_{ki}^{01}), \quad (17)$$

где c_i — стоимость выполнения проверки π_i ; $C(S_{ki}^{00})$ — средняя стоимость диагностирования состояния системы при условии, что $s_t \in S_{ki}^{00}$; $C(S_{ki}^{01})$ — средняя стоимость диагностирования состояния при $s_t \in S_{ki}^{01}$.

Условный алгоритм диагностирования будет оптимальным, если для всех входящих в него проверок средняя стоимость $C_i(S_k^0)$ минимальна:

$$C_i(S_k^0) = \min_{\pi_i \in \Pi} [c_i + P(S_{ki}^{00})C(S_{ki}^{00}) + P(S_{ki}^{01})C(S_{ki}^{01})]. \quad (18)$$

Для построения оптимального безусловного алгоритма диагностирования, который минимизирует среднюю стоимость определения состояния ОД, используют матрицу допустимых тестов (табл. 3; см. также таблицу функций неисправностей, гл. 2 и 3).

Вероятности состояний: $P(s_1) = 0,1$; $P(s_2) = 0,15$; $P(s_3) = 0,20$; $P(s_4) = 0,25$; $P(s_5) = 0,3$, а стоимости соответственно равны: $c_{\pi_1} = 30$; $c_{\pi_2} = 40$; $c_{\pi_3} = 10$; $c_{\pi_4} = 50$.

Если число проверок известно $k = 4$, то число возможных безусловных алгоритмов диагностирования равно

$$k! = 4! = 24.$$

Оптимальный алгоритм диагностирования из числа возможных алгоритмов определяют путем полного перебора, однако эта процедура требует слишком много времени.

Для каждого подмножества Π_v определяют минимальную стоимость вы-

3. Матрица допустимых тестов объекта

Π	S				
	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅
π ₁	0	1	1	1	1
π ₂	0	0	0	1	1
π ₃	1	1	0	1	1
π ₄	1	1	0	0	1

полнения алгоритма диагностирования, используя выражение

$$m(\Pi_v) = 1, C(\Pi_v) = c_j \text{ для } \forall \pi_j \in \Pi_v, \\ n(\Pi_v) = 2, C(\Pi_v) = \min [C(\Pi_v/\pi_j) + c_j q(\Pi_v/\pi_j)],$$

где $C(\Pi_v/\pi_j)$ — стоимость выполнения подмножества проверок Π_v при условии, что $\pi_j \in \Pi_v$ проверка исключена; c_j — стоимость проверки π_j ; $q(\Pi_v/\pi_j)$ — сумма вероятностей тех состояний из S , которые не различаются после выполнения подмножества Π_v проверок, при условии, что π_j -проверка исключена.

Составим из $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4\}$ множество M всех возможных подмножеств $\Pi_v = \{\pi_j\}$, $j = \overline{1, r}$, $r \leq k$, мощность которого равна $n(M) = 2^k - 1 = 15$.

Выпишем все подмножества Π_v ($v = \overline{1, 15}$) в первый столбец табл. 4.

Для каждого из подмножеств Π_v ($v = \overline{1, 15}$) по табл. 3 определяют те состояния из $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$, которые однозначно различаются после проведения всех проверок этого подмножества, и результаты выписывают во второй столбец табл. 4;

сумму вероятностей тех состояний из $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$, которые не различаются после проведения всех проверок этого подмножества, и результаты выписывают в третий столбец табл. 4.

Определяют среднюю стоимость выполнения всех проверок этого подмножества и по минимальной стоимости проводят упорядочение проверок в подмножестве Π_v . Результаты вычислений записывают в четвертый столбец табл. 4. Последовательность вычислений совпадает с нумерацией строк табл. 4. Так, например, для подмножества $\Pi_v = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$ среднюю стоимость выполнения всех проверок определяют по формуле

$$C(\Pi_v) = C(\Pi_v/\pi_j) + c_{\pi_j} q(\Pi_v/\pi_j).$$

При $\pi_j = \pi_1$

$$C(\Pi_v) = C(\{\pi_2, \pi_3\}) + c_{\pi_1} q(\{\pi_2, \pi_3\});$$

4. Подмножества проверок и их стоимости

Номер проверки	Π_v	S_v	$q(\Pi_v)$	$C(\Pi_v)$
1	π_1	S_1	0,9	$\pi_1 \rightarrow 30$
2	π_2	—	1,0	$\pi_2 \rightarrow 40$
3	π_3	S_3	0,8	$\pi_3 \rightarrow 10$
4	π_4	—	1	$\pi_4 \rightarrow 50$
5	$\pi_1\pi_2$	S_1	0,9	$\pi_1\pi_2 \rightarrow 66; \pi_2\pi_1 \rightarrow 70$
6	$\pi_1\pi_3$	S_1, S_3	0,7	$\pi_1\pi_3 \rightarrow 37; \pi_3\pi_1 \rightarrow 31$
7	$\pi_1\pi_4$	S_1	0,9	$\pi_1\pi_4 \rightarrow 75; \pi_4\pi_1 \rightarrow 77$
8	$\pi_2\pi_3$	S_3	0,8	$\pi_2\pi_3 \rightarrow 48; \pi_3\pi_2 \rightarrow 42$
9	$\pi_2\pi_4$	S_3, S_4, S_5	0,25	$\pi_2\pi_4 \rightarrow 52,5; \pi_4\pi_2 \rightarrow 60$
10	$\pi_3\pi_4$	S, S_4	0,55	$\pi_3\pi_4 \rightarrow 55,5; \pi_4\pi_3 \rightarrow 37,5$
11	$\pi_1\pi_2\pi_3$	S_1, S_2, S_3	0,55	$\pi_1\pi_2\pi_3 \rightarrow 75; \pi_1\pi_3\pi_2 \rightarrow 59;$ $\pi_2\pi_3\pi_1 \rightarrow 66$
12	$\pi_1\pi_2\pi_4$	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	0	$\pi_1\pi_2\pi_4 \rightarrow 111; \pi_1\pi_4\pi_2 \rightarrow 111;$ $\pi_2\pi_4\pi_1 \rightarrow 60$
13	$\pi_1\pi_3\pi_4$	S_1, S_3, S_4	0,45	$\pi_1\pi_3\pi_4 \rightarrow 66; \pi_1\pi_4\pi_3 \rightarrow 84;$ $\pi_4\pi_3\pi_1 \rightarrow 46$
14	$\pi_2\pi_3\pi_4$	S_3, S_4, S_5	0,25	$\pi_2\pi_3\pi_4 \rightarrow 82; \pi_3\pi_4\pi_2 \rightarrow 57,5;$ $\pi_2\pi_4\pi_3 \rightarrow 56$
15	$\pi_1\pi_2\pi_3\pi_4$	S_1, S_2, S_3, S_4, S_5	0	$\pi_3\pi_1\pi_2\pi_4 \rightarrow 86,5; \pi_2\pi_4\pi_1\pi_3 \rightarrow 60;$ $\pi_3\pi_4\pi_1\pi_2 \rightarrow 63; \pi_3\pi_4\pi_2\pi_1 \rightarrow 62,5$

при $\pi_j = \pi_2$

$$C(\pi_v) = C(\{\pi_1, \pi_3\}) + c_{\pi_1} q \times (\{\pi_1, \pi_3\}).$$

Рассмотрим подмножество проверок $\{\pi_1, \pi_2\}$:

при $\pi_j = \pi_1$

$$C(\{\pi_2, \pi_1\}) = c_{\pi_1} + c_{\pi_1} q(\pi_2) = 40 + 30 \cdot 1 = 70;$$

при $\pi_j = \pi_2$

$$C(\{\pi_1, \pi_2\}) = c_{\pi_1} + c_{\pi_1} q(\pi_1) = 30 + 40 \cdot 0,9 = 66.$$

Рассмотрим подмножество проверок $\{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$:

при $\pi_j = \pi_3$

$$C(\{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}) = C(\{\pi_1, \pi_2\}) + c_{\pi_3} q(\pi_1, \pi_2) = 66 + 10 \cdot 0,9 = 75,0;$$

$\pi_1\pi_2\pi_3 \rightarrow 75$

при $\pi_j = \pi_2$

$$C(\{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}) = C(\{\pi_1, \pi_3\}) + c_{\pi_2} q(\pi_1, \pi_3) = 31 + 40 \cdot 0,7 = 59;$$

$\pi_1\pi_3\pi_2 \rightarrow 59$

при $\pi_j = \pi_1$

$$C(\{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}) = C(\{\pi_2, \pi_3\}) + c_{\pi_1} q(\pi_2, \pi_3) = 42 + 30 \cdot 0,8 = 66.$$

$\pi_2\pi_3\pi_1 \rightarrow 66$

Из расчетов следует, что для проверки $\pi_j = \pi_2$ значение средней стоимости минимально, а оптимальным упорядочением для $\{\pi_1, \pi_3\}$ является π_3, π_1 . Отсюда оптимальным упорядочением для подмножества $\Pi_v = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$ является π_3, π_1, π_2 . Упорядочение проверок $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$, записанное в последней строке четвертого столбца табл. 4, соответствует оптимальному безусловному алгоритму проверок, средняя стоимость которого равна 62,5. Из табл. 4 следует, что в этом примере для определения любого $s_i \in S$ состояния объекта достаточно выполнить

только три проверки π_2, π_4, π_1 . Однако средняя стоимость такого безусловного алгоритма диагностирования превосходит среднюю стоимость оптимального условного алгоритма диагностирования.

Применение методов теории информации для построения алгоритмов диагностирования. Для составления алгоритма поиска дефектов, близкого к оптимальному, используют метод теории информации. При составлении алгоритма в качестве ведущей функции может быть использовано количество информации, содержащееся в проверке. Алгоритм начинают с проверки, несущей наибольшее количество информации. Следующую проверку выбирают с учетом результата предыдущей, также исходя из наибольшего количества информации.

Условный алгоритм диагностирования с учетом максимального количества информации в проверке составляют при следующих допущениях: система неисправна, в системе имеется только один дефект, известны априори вероятности появления дефектов.

Неопределенность состояния системы $S = \{s_i\}$, диагностирование которой осуществляют до начала процесса, характеризуется ее энтропией $H(S)$. Допустим, что система может быть неисправной вследствие дефекта только одного какого-либо k -го элемента из общего числа N с условной вероятностью q_k ; тогда

$$H(S) = - \sum_{k=1}^N q_k \log_2 q_k, \quad \sum_{k=1}^N q_k = 1. \quad (19)$$

Значения q_k определяют на основе статистических данных о надежности элементов (блоков) системы.

Процесс поиска дефектов определяется множеством проверок $\Pi = \{\pi_i\}$, где $|\Pi| = n$. Каждая проверка π_i априори содержит некоторое количество информации $I_{\pi_i \rightarrow S}$ относительно состояния системы S

$$I_{\pi_i \rightarrow S} = H(S) - H(S/\pi_i), \quad (20)$$

где $H(S/\pi_i)$ — средняя условная энтропия состояния системы при условии осуществления проверки π_i .

Если при проверке π_i контролируется m элементов (блоков), сумма вероятностей отказов которых $Q_{\pi_i} = \sum_{j=1}^m q_j$, то

$$\begin{aligned} H(S/\pi_i) &= \\ &= - \left\{ Q_{\pi_i} \sum_{j=1}^m \frac{q_j}{Q_{\pi_i}} \log_2 \frac{q_j}{Q_{\pi_i}} + \right. \\ &\quad \left. + (1 - Q_{\pi_i}) \sum_{j=m+1}^N \frac{q_j}{1 - Q_{\pi_i}} \times \right. \\ &\quad \left. \times \log_2 \frac{q_j}{1 - Q_{\pi_i}} \right\}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} I_{\pi_i \rightarrow S} &= - \{ Q_{\pi_i} \log_2 Q_{\pi_i} + \\ &\quad + (1 - Q_{\pi_i}) \log_2 (1 - Q_{\pi_i}) \}. \end{aligned}$$

Поиск дефекта в системе начинают с проверки π_i , несущей наибольшее количество информации.

Легко определить проверку π_i , при которой $I_{\pi_i \rightarrow S}$ максимально:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{\pi_i \rightarrow S}}{dQ_{\pi_i}} &= - \{ \log_2 Q_{\pi_i} - \\ &\quad - \log_2 (1 - Q_{\pi_i}) \} = 0, \end{aligned}$$

$$Q_{\pi_i} = \frac{1}{2},$$

т. е. проверка π_i , соответствующая проверке m элементов, сумма вероятностей отказов которых $\sum_{j=1}^m q_j = \frac{1}{2}$,

несет наибольшее количество информации. Следовательно, поиск дефекта необходимо начинать с проверки π_i , для которой сумма вероятностей отказов проверяемых элементов близка к $1/2$.

При условном алгоритме диагностирования следующую проверку выбирают исходя из результатов проверки π_i . Если при проверке зафиксиро-

ровано, что дефект содержится в каком-либо из элементов $i = \overline{1, m}$ $R_i = 0$, то следующую проверку выбирают по таблице, содержащей только m элементов, по максимуму количества информации

$$I_{\pi_k \rightarrow S/R_i=0} = H(S/R_i=0) - H(S/\pi_k).$$

Если $R_i = 1$, то по таблице, содержащей элементы с номерами $m + 1, \dots, N$, находят

$$I_{\pi_l \rightarrow S/R_1=1} = H(S/R_1=1) - H(S/\pi_l).$$

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из шести блоков (рис. 6). Известны вероятности отказов блоков: $q_1 = 0,05$; $q_2 = 0,1$; $q_3 = 0,15$; $q_4 = q_5 = 0,25$; $q_6 = 0,2$.

Поиск дефекта можно производить путем осуществления проверок, перечень которых указан в табл. 5. Выходные и входные сигналы обозначены буквами A, B, \dots, H .

Образование алгоритма поиска неисправностей показано на рис. 7, а соответствующее ему дерево поиска дефектов — на рис. 8.

5. Перечень проверок

Номер проверки	Выходной сигнал	Элементы схемы						Входной сигнал	Вероятность отказа
		1	2	3	4	5	6		
1	B	1	0	0	0	0	0	A	0,05
2	C	0	1	0	0	0	0	B	0,1
3	D	0	0	1	0	0	0	B	0,15
4	E	0	0	0	1	0	0	D	0,25
5	G	0	0	0	0	1	0	L	0,25
6	H	0	0	0	0	0	1	DG	0,2
7	C	1	1	0	0	0	0	A	0,15
8	D	1	0	1	0	0	0	A	0,2
9	E	1	0	1	1	0	0	A	0,45
10	E	0	0	1	1	0	0	B	0,4
11	H	1	0	1	0	1	1	AL	0,65
12	H	0	0	1	0	1	1	BL	0,6
13	H	0	0	0	0	1	1	DL	0,55
14	H	1	0	1	0	0	1	GA	0,4
15	H	0	0	1	0	0	1	GB	0,4

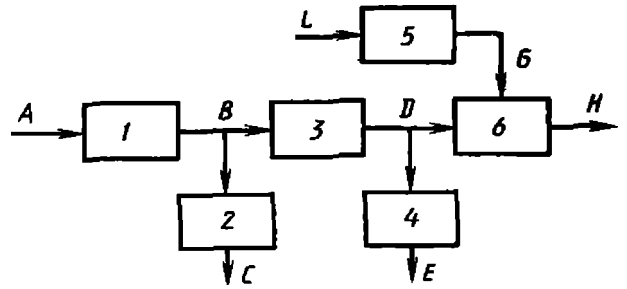


Рис. 6. Исследуемая система

Выбор проверок по максимуму количества информации приводит при равных значениях вероятностей отказов блоков к поиску неисправностей по методу половинного деления. Если дана система, состоящая из N последовательно соединенных блоков, и вероятности отказов их одинаковы и равны $q = 1/N$, то энтропия системы

$$H(S) = - \sum_1^N \frac{1}{q} \log_2 \frac{1}{q} = \log_2 N.$$

При осуществлении проверки π_i количество информации

$$I_{\pi_i \rightarrow S} = - \left[\frac{m}{N} \log_2 \frac{m}{N} + \left(1 - \frac{m}{N} \right) \log_2 \left(1 - \frac{m}{N} \right) \right]$$

при условии, что проверяют m блоков из N .

Максимум $I_{\pi_i \rightarrow S}$ соответствует $\frac{m}{N} = \frac{1}{2}$, поэтому первая проверка сводится к подаче сигнала на вход и измерению реакции в середине схемы системы. При этом $I_{\pi_i \rightarrow S} = 1$. Выбирая каждую следующую проверку так, чтобы

$$I_{\pi_i \rightarrow S} = I_{\pi_2 \rightarrow S/\pi_i} = I_{\pi_3 \rightarrow S/\pi_i \pi_2} = \dots = 1,$$

находим, что необходимое число проверок не превышает $k \geq \log_2 N$, т. е. $2^k \geq N$, где k — целое число.

Число проверок в программе поиска при составлении алгоритма с учетом количества информации оказы-

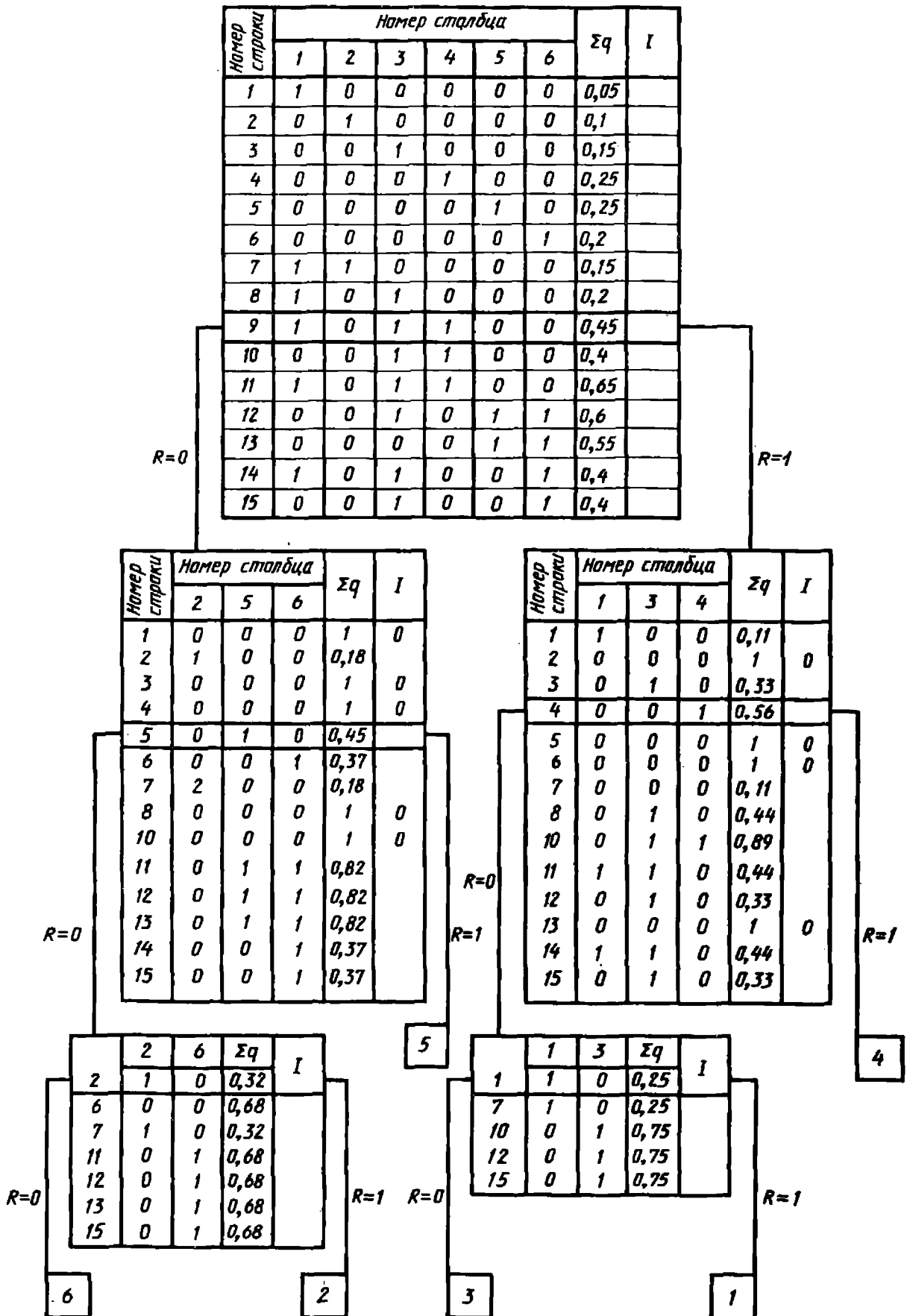


Рис. 7. Алгоритм поиска неисправностей системы

вается значительно меньше, чем при последовательных проверках элементов (особенно при большом числе элементов).

При последовательных проверках математическое ожидание числа проверок в программе

$$M(k) = \frac{1}{N} [1 + 2 + \dots + (N - 1)] = \frac{N - 1}{2}.$$

Использование при составлении алгоритма поиска дефектов критерия, основанного только на значении количества информации, не позволяет учесть важный для эксплуатации фактор — «стоимость» получения информации.

При составлении алгоритма поиска по «цене» информации в качестве первой проверки выбирают проверку π_i , для которой значение $\gamma_i = I_{\pi_i \rightarrow S} / c_i$ максимально. В остальном методика построения алгоритма поиска по «цене» информации не отличается от методики построения алгоритма по количеству информации, но сами алгоритмы поиска отличаются друг от друга.

Практически критерии, основанные на использовании понятия «цена» информации, целесообразно применять при составлении инструкций по поиску дефектов в сложных системах.

Основой для составления безусловного алгоритма поиска дефекта является матрица допустимых тестов. Синтез алгоритма диагностирования состояния системы сводится к выбору минимального числа проверок, определяющих каждое из возможных состояний.

Решение, близкое к оптимальному тесту диагностирования, можно получить, используя метод, основанный на использовании теории информации и дающий возможность установить алгоритм поиска дефектов, достаточный для диагностирования системы S , заданной матрицей допустимых проверок.

С точки зрения теории информации задача отбора проверок, определяющих состояние системы, формулируется следующим образом: система

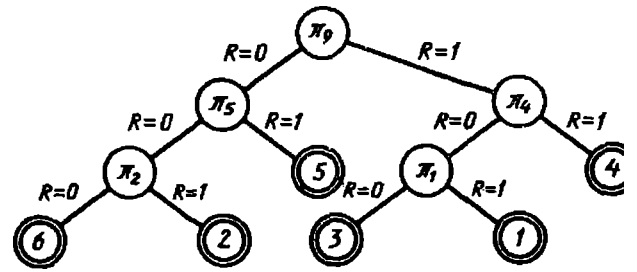


Рис. 8. Дерево поиска дефектов системы

$S = \{s_i\}, (i = \overline{1, N})$ может принимать одно состояние i из N возможных состояний с вероятностью $P = 1/N$,

где $P_i = P(s_i) \left(\sum_1^N P_i = 1 \right)$.

Неопределенность состояния системы S характеризуется энтропией

$$H(S) = - \sum_1^N P_i \log_2 P_i.$$

Для того чтобы установить, в каком i -м состоянии из N возможных находится объект, необходимо провести программу проверок $\Pi \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\} (m \leq N)$. Каждая проверка содержит некоторую информацию $I_{\pi_k \rightarrow S}$ о состоянии S объекта:

$$I_{\pi_k \rightarrow S} = H(S) - H(S/\pi_k),$$

где

$$H(S/\pi_k) = P(R_k = 1) H_{R_k=1}(S) + P(R_k = 0) H_{R_k=0}(S);$$

$$H_{R_k=1}(S) = - \sum_{i=1}^N P(S_i/R_k = 1) \times \log_2 P(S_i/R_k = 1);$$

$$H_{R_k=0}(S) = - \sum_{i=1}^N P(S_i/R_k = 0) \times \log_2 P(S_i/R_k = 0).$$

Оптимизация теста поиска дефекта состоит в таком выборе проверок, при котором их число минимально,

т. е. каждая проверка должна содержать максимально возможное количество информации о состоянии объекта. Следовательно, выбор проверок должен начинаться с проверки, несущей максимальное количество информации:

$$I_{\pi_k \rightarrow S} = H(S) - H(S/\pi_k) = \\ = \{I_{\pi_k \rightarrow S}\}_{\max}.$$

После выбора проверки π_k система будет обладать энтропией $H(S/\pi_k)$, характеризующей некоторое новое определенное состояние системы, в которое перейдет для наблюдателя объект диагностирования.

Следующую проверку выбирают с помощью того же критерия, что и первую, но исходя из состояния объекта, характеризуемого энтропией $H(S/\pi_k)$. Тогда

$$I_{(\pi_l/\pi_k) \rightarrow S} = H(S/\pi_k) - H(S/\pi_k, \pi_l),$$

где

$$H(S/\pi_k, \pi_l) = \sum_{j=0}^1 \sum_{m=0}^1 P(R_l = \\ = j/R_k = m) H_{R_l=j/R_k=m}(S); \\ H_{R_l=j/R_k=m}(S) = \\ = - \sum_{i=1}^N P(S_i/R_k=m, R_l=j) \log_2 p \times \\ \times (S_i/R_k=m, R_l=j).$$

Полное количество информации, которое содержит данный алгоритм проверок $\Pi = \{\pi_1, \pi_k\}$ относительно системы S ,

$$I_{\Pi \rightarrow S} = I_{\pi_1 \rightarrow S} + I_{(\pi_2/\pi_1) \rightarrow S} + \\ + \dots + I_{(\pi_k/\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{k-1}) \rightarrow S}.$$

Отбор проверок продолжают до тех пор, пока $H(S/\pi_1, \dots, \pi_k)$ не станет равной нулю, т. е.

$$I_{\Pi \rightarrow S} = H(S).$$

1. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ
ОБЪЕКТОВ

Аналоговыми называют объекты, входные внутренние и выходные координаты которых могут принимать значения их континуальных множеств значений, а время отсчитывается непрерывно.

Логические модели и графы причинно-следственных связей. В достаточно большом числе практических случаев техническое состояние аналоговых объектов можно оценить по принципу «в норме — не в норме». При этом используют модели логического типа и для их анализа применяют соответствующий математический аппарат.

Исходными данными для построения логических моделей являются: структурные, функциональные и принципиальные схемы объекта; системы алгебраических и дифференциальных уравнений; причинно-следственные связи между параметрами объекта. Основное достоинство логических моделей — их простота. Однако логические модели имеют ограниченное применение при решении задач поиска дефектов.

Для построения логической модели объекта каждый входной (выходной) сигнал блока B_i , характеризуемый несколькими параметрами, представляют несколькими входами (выходами), число которых равно числу этих параметров [43]. Например, если для блока B_i внешний сигнал x_i характеризуется двумя параметрами, внутренний сигнал z_i — тремя, а выходной сигнал y_i — двумя параметрами (рис. 1, а), то в логической модели блок B_i будет иметь пять входов и два выхода (рис. 1, б). Затем каждый блок

B_i , имеющий k_i выходов, заменяют блоками k_i , каждый из которых имеет один выход y_{ij} и существенные для данного выхода входы. В результате получают множество $\{Q_j\}$, $j = 1, 2, \dots, h$; $h = \sum_{i=1}^N k_i$ блоков логической модели, где N — число блоков в исходной схеме объекта.

Значение входа (выхода) блока допустимо, если значение соответствующего ему параметра принадлежит области допустимых значений. В этом случае значение входа (выхода) обозначают цифрой 1, в противном случае — 0.

Если каждой входной переменной блока B_i модели соответствует одно из двух значений — 1 или 0, то его выходная функция F_i является булевой. Булеву функцию можно представить в совершенной дизъюнктивной нормальной форме, а затем получить ее минимальную форму. Поскольку все буквы, входящие в минимальную форму, существенны, то таким образом для каждого блока модели может быть получена совокупность существенных входов.

Значение выхода y_i блока Q_i логической модели зависит от того, имеется ли в блоке дефект, а также от значения реализуемой блоком функции F_i , т. е. $y_i = Q_i F_i$. Если в блоке отсутствует

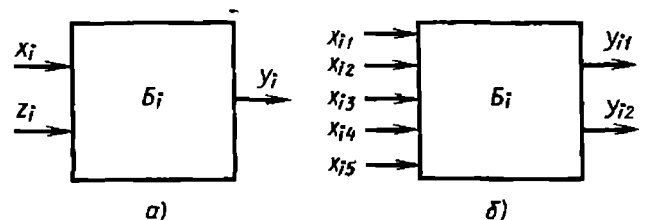


Рис. 1. Блок ОД (а) и его обобщенная логическая модель (б)

1. Таблица дефектов объекта, представленного логической моделью (см. рис. 2)

R		E					
		Q_0	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
П	y_1	1	0	1	1	1	1
	y_2	1	0	0	0	0	0
	y_3	1	1	1	0	0	0
	y_4	1	1	1	1	0	0
	y_5	1	1	1	1	1	0

дефект, то $Q_i = 1$. В противном случае $Q_i = 0$.

Информацию о состоянии объекта снимают с выходов блоков логической модели. Максимум информации можно получить в том случае, если контролируются выходы всех блоков. Однако при решении задач проверки работоспособности и даже поиска дефектов в общем случае нет необходимости проверять все выходы блоков. Более того, можно определить минимальное число выходов блоков модели, необходимых и достаточных для решения той или иной задачи диагностирования.

При работе с логической моделью предполагают, что на входы объекта поступает единственное входное воздействие, определяемое допустимыми значениями всех входных сигналов. Поэтому возможные элементарные проверки объекта могут различаться только составами контрольных точек. В этом случае задача построения алгоритма диагностирования сводится к выбору совокупности контроль-

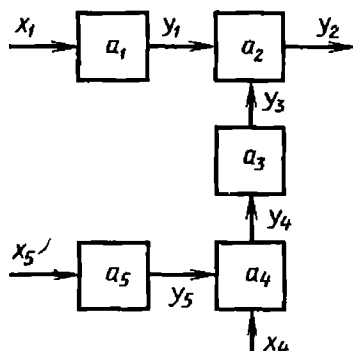


Рис. 2. Логическая модель объекта

ных точек, достаточной или необходимой и достаточной (минимальной) для рассматриваемой задачи диагностирования.

Для построения алгоритмов диагностирования на основе логической модели составляют таблицу дефектов. В таблице строкам соответствуют выходы блоков модели, а столбцам — исправное состояние объекта, обозначаемое символом Q_0 , или неисправное состояние, обозначаемое символом Q_j , неисправного в этом состоянии блока модели.

В каждой клетке таблицы проставляют допустимое (1) или недопустимое (0) значение выхода y_i для соответствующего технического состояния объекта. Таблицу дефектов можно заполнять как по столбцам, так и по строкам. При построении таблицы по столбцам задаются техническим состоянием объекта и подставляют соответствующие значения Q_j в выражения для y_i . Первый столбец таблицы соответствует такому состоянию объекта, при котором дефекты в объекте отсутствуют. В этом случае $Q_j = 1$ для всех $j = 1, 2, 3, \dots, h$, и поэтому все $y_i = 1$. При одиночных неисправностях (неисправным может быть только один блок модели) второй столбец вычисляют при $Q_1 = 0$ и остальных $Q_j = 1$, $j = 2, 3, \dots, h$. Третий столбец соответствует условию $Q_2 = 0$ и т. д. Аналогично поступают при кратных неисправностях.

Заполнение строк таблицы начинают с определения зависимости выходов для каждого из блоков модели от всех переменных Q_j .

Пример 1. Построить таблицу дефектов (табл. 1) объекта, представленного логической моделью, приведенной на рис. 2. Блоки модели обозначены символами a_1, \dots, a_5 ; входные переменные объекта — символами x_1, x_4, x_5 .

Определим функции F_i : $F_1 = x_1$; $F_2 = y_1 y_3$; $F_3 = y_4$; $F_4 = x_4 y_5$; $F_5 = x_5$.

Заполним таблицу по столбцам. В первом столбце все элементы 1. Для второго столбца принимаем $Q_1 = 0$, и, следовательно: $y_1 = F_1 Q_1 = 1 \cdot 0 = 0$; $y_2 = F_2 Q_2 = 0 \cdot 1 \cdot 1 = 0$; $y_3 =$

$$= F_3 Q_3 = 1 \cdot 1 = 1; \quad y_4 = F_4 Q_4 = 1 \times 1 \times 1 = 1; \quad y_5 = F_5 Q_5 = 1 \cdot 1 = 1.$$

Действуя аналогично, заполняют всю матрицу дефектов (см. табл. 1). В таблице Π — множество элементарных проверок, E — множество технических состояний и R — обозначение множества возможных результатов элементарных проверок.

Если считать, что цены элементарных проверок одинаковы, и не учитывать вероятности возникновения дефектов, то для построения экономного алгоритма диагностирования следует выбрать минимальную совокупность элементарных проверок.

Построение алгоритма проверки работоспособности (или исправности) состоит в выборе проверяющей совокупности строк таблицы, содержащих хотя бы по одному нулю в каждом столбце Q_j , $j = 1, 2, \dots, h$.

В простейших случаях минимальную проверяющую совокупность элементарных проверок (минимальное число строк) легко определить при просмотре таблицы. В более сложных случаях следует применять формализованные методы построения алгоритмов диагностирования (см. гл. 4).

В рассмотренном примере для определения работоспособности достаточно выбрать только одну проверку выхода блока a_2 (вторая строка таблицы).

В общем случае для проверки работоспособности или исправности объекта достаточно контролировать все его внешние выходы. Поэтому, казалось бы, нет необходимости в построении логической модели. Однако логическая модель и таблица дефектов позволяют найти такую минимальную совокупность проверок, в которую, в частности, не войдут внешние выходы объекта, являющиеся также входами блоков модели.

При решении задачи поиска дефектов нельзя различить технические состояния блоков логической модели, охваченных обратной связью, поскольку выходы всех таких блоков имеют одно и то же (недопустимое или допустимое) значение. В таблице дефектов этим блокам будут соответствовать одинаково заполненные строки. Этим же неразличимым техни-

ческим состояниям будут соответствовать одинаковые столбцы таблицы дефектов. Это обстоятельство позволяет в логической модели каждую группу блоков, охваченных обратной связью, заменить одним обобщенным блоком (построить обобщенную логическую модель), а в таблице дефектов группы одинаковых столбцов и строк заменить одним их представителем (любым) из каждой группы.

Алгоритм поиска дефектов при максимальной глубине поиска должен различать каждую пару рассматриваемых дефектов (технических состояний). Следовательно, построение алгоритма поиска дефектов состоит в выборе такой различающей совокупности строк таблицы дефектов, для которой все образуемые этими строками столбцы Q_j , $j = 1, 2, \dots, h$ были бы различны.

В общем случае для определения минимальной совокупности строк необходимо применять специальные *методы минимизации*, требующие в сложных задачах значительных по объему вычислений. Однако в ряде практических случаев, когда объект представлен обобщенной логической моделью, можно подобрать минимальную совокупность строк более просто. В минимальную различающую совокупность выходов обязательно входят внешние выходы обобщенной логической модели, образующие минимальную проверяющую совокупность, и выходы тех блоков, каждый из которых соединен только с входом другого блока.

Если объект *многорежимный*, т. е. предназначен для выполнения нескольких алгоритмов функционирования, в которых участвуют разные совокупности блоков и связей, то каждый режим (алгоритм) следует рассматривать отдельно, т. е. алгоритмы проверки работоспособности или поиска дефектов следует строить отдельно для каждого режима по соответствующей таблице дефектов, а затем полученные совокупности элементарных проверок объединить.

В тех случаях, когда объект не имеет явно выраженных функциональных блоков, построение его логической модели может вызвать затруд-

нения. Кроме того, бывают ситуации, когда точные зависимости между параметрами объекта неизвестны, а известно лишь о влиянии одного параметра на другой или о зависимости одного параметра от другого. Такого рода влияния и зависимости хорошо согласуются с понятием причинно-следственных связей, которые, кстати, охватывают также строгие формальные зависимости между параметрами объекта.

Графом причинно-следственных связей называют ориентированный граф, вершинами которого являются параметры, а дуги отражают причинно-следственные связи между вершинами. Направление дуги соответствует направлению перемещения от причины к следствию.

Графы причинно-следственных связей применяют для представления различных электрических, механических, гидравлических, а также комбинированных (например, электромеханических) устройств, механизмов, машин и различных технологических процессов.

Логическая модель объекта может трактоваться как граф причинно-следственных связей между входными, внутренними и выходными параметрами объекта. При этом вершины графа соответствуют входным параметрам объекта и выходным параметрам блоков модели, а дуги — связям блоков между собой и с внешними входами объекта. Поэтому рассмотренные выше методы обработки логической модели могут быть изложены без каких-либо изменений в терминах графов причинно-следственных связей. Рассматриваемые в этой главе диаграммы прохождения сигналов и топологическая модель объекта являются специфическими формами задания графов причинно-следственных связей.

Модели в виде систем дифференциальных уравнений. Свойства динамических аналоговых объектов определяются дифференциальными уравнениями движения (линейными и нелинейными), например, системой линейных дифференциальных уравнений вида

$$L_1 y_1 = f_1(t),$$

$$\dots$$

$$L_k y_k = f_k(t),$$

где

$$L_j y_j = y_j^{(n_j)} + a_j n_{j-1} y_j^{n_j-1} + \dots + a_{j_0} y_j \quad (j = \overline{1, k})$$

— линейный оператор порядка n_j ; y_j и $f_j(t)$ — функции соответственно выходная и входная.

Использование линейных дифференциальных уравнений в качестве диагностических моделей [50] позволяет сформулировать условия работоспособности в виде ограничений на реакцию объекта при стандартном входном воздействии, изменении коэффициентов уравнений и, в общем случае, при перемещении полюсов и нулей на комплексной плоскости. Однако для построения моделей в этом случае необходимо знать большое число параметров объекта, которое на этапе проектирования с достаточной точностью получить не удастся. В связи с этим на практике часто ограничиваются рассмотрением зависимостей (передаточных функций) между некоторыми, представляющими наибольший интерес, входами и выходами объекта.

В ряде случаев в качестве диагностической модели можно рассмотреть *характеристическое уравнение* $a_n p^n + \dots + a_0 = 0$ и анализировать только изменение коэффициентов a_i или полюсов p_i ($i = \overline{1, n}$). Это возможно, так как нули передаточной функции определяют лишь относительную величину составляющих выходного сигнала, в то время как полюсы определяют характер изменения выходного сигнала во времени и величины собственных частот объекта.

Если характеристическое уравнение высокого порядка, то с целью упрощения вычислений используют для анализа *эквивалентное уравнение* более низкого порядка. Для того чтобы сохранить существующие связи между коэффициентами уравнений и параметрами объекта, эквивалентное уравнение получают «усечением», т. е. простым устранением ряда членов при условии эквивалентности по

определяющим корням уравнения. В этом случае рассматривают процесс построения последовательности $\{x_n\}$, сходящейся к корню x полного уравнения $f(x) = 0$. В качестве нулевого приближения x_0 берется корень усеченного уравнения $\varphi(x) = 0$.

Если процесс сходится к корню уравнения $f(x) = 0$ и можно оценить погрешность его приближения, то уравнение $\varphi(x) = 0$ можно считать эквивалентным уравнению $f(x) = 0$. Под эквивалентностью в этом случае понимают близость корней уравнения $\varphi(x) = 0$ к корням уравнения $f(x) = 0$, выбранным в качестве определяющих. При построении эквивалентного уравнения используется итерационный способ, дающий следующие формальные итерации:

$$x_0 \text{ — произвольное число;}$$

$$x_1 = x_0 - f(x_0)/f'(x_0);$$

$$x_{n-1} = x_n - f(x_n)/f'(x_n).$$

Этим способом первоначально приближенно решали алгебраические и трансцендентные уравнения в случае действительных корней, а затем уравнения с комплексными корнями.

Если x — корень уравнения $\varphi(x) = 0$ и существует такое (неотрицательное) число $\delta < 1$, что в окружности радиуса $R = \delta/(1 - \delta)$ число $\theta = 0,5 \sup |f''(x)/f'(x)|$ удовлетворяет неравенству $\varepsilon \theta \leq \delta$ ($\varepsilon = |f(x_0)/f'(x_0)|$), то $\exists x$ — корень уравнения $f(x) = 0$, обеспечивающий неравенство $|x - x_0| \leq \delta/(1 - \delta)$. Соблюдение этого условия означает, что можно с точностью δ приблизить корень x полного уравнения $f(x) = 0$ к корню x_0 усеченного уравнения $\varphi(x) = 0$. Если корни x_1, x_2, \dots, x_n малы, то устраняют числа с большей степенью (слева); если же x_1, x_2, \dots, x_n велики, то нужно устранять члены с меньшей степенью (справа).

Условия работоспособности в области коэффициентов уравнений могут быть получены методом малого параметра. Для случая одновременного изменения нескольких коэффициентов задача сводится к решению линейного дифференциального уравнения

$$f(x, \lambda_0, \dots, \lambda_{n-1}) = x^{(n)} +$$

$$+ a_{n-1}(\lambda_{n-1})x^{(n-1)} + \dots + a_0(\lambda_0) = 0.$$

Решение этого уравнения для n переменных можно представить в виде ряда

$$x(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}) = x(0, 0, \dots, 0) + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial x}{\partial \lambda_j} \lambda_j + \sum_{k_0, \dots, k_{n-1}} x_{k_0, \dots, k_{n-1}} \lambda_0^{k_0}, \dots, \lambda_{n-1}^{k_{n-1}}.$$

Если пренебречь малыми величинами второго порядка, то третий член в решении можно не учитывать. Таким образом, если условия работоспособности объекта задать ограничением на перемещение корней характеристического уравнения

$$|x(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}) - x(0, 0, \dots, 0)| < \delta,$$

то в области коэффициентов изменения λ_j можно определить из условия

$$\left| \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial x(0, 0, \dots, 0)}{\partial \lambda_j} \lambda_j \right| < \delta,$$

поскольку

$$x(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}) - x(0, 0, \dots, 0) = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial x_j}{\partial \lambda_j} \lambda_j.$$

Полученное условие можно рассматривать как требование невыхода из пределов n -мерного многоугольника, т. е.

$$|a_0 \lambda_0 + a_1 \lambda_1 + \dots + a_{n-1} \lambda_{n-1}| < \delta.$$

Пример 2. Объект (рис. 3) описывается передаточной функцией вида

$$K(P) = \frac{k_1}{P^2 + 2\xi\omega_c P + (\omega_0^2 + k_1 k_2)},$$

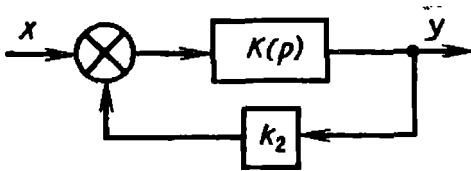


Рис. 3. Структурная схема объекта второго порядка

что соответствует характеристическому уравнению

$$P^2 + a_1 P + a_0 = 0,$$

где $a_1 = 2\xi\omega_c$, $a_0 = \omega_c^2 + k_1 k_2$.

Известно, что $\omega_c = 1,5$; $k_2 = 0,9$; $\xi = 1,67$, и, следовательно, $a_1 = 5$; $a_0 = 4$. В этом случае корни характеристического уравнения соответственно равны $P_{01} = -1$; $P_{02} = -4$.

Предполагая, что ξ и k_2 изменяются, получим уравнение

$$f(P, \lambda_1, \lambda_2) = P^2 + 2\omega_c(\xi + \lambda_1)P + [\omega_c^2 + k_1(k_2 + \lambda_2)] = 0.$$

Непосредственным дифференцированием получим

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda_1} = 2\omega_c P; \quad \frac{\partial f}{\partial \lambda_2} = k_1;$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = 2P + 2\omega_c(\xi + \lambda_1).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial \lambda_1}(P_{01}, 0, 0) &= \\ &= -\frac{\partial f / \partial \lambda_1}{\partial f / \partial P}(P_{01}, 0, 0) = \\ &= -\frac{2\omega_c}{-2 + 2\omega_c \xi} = 1; \\ \frac{\partial P_1}{\partial \lambda_2}(P_{01}, 0, 0) &= \\ &= -\frac{\partial f / \partial \lambda_2}{\partial f / \partial P}(P_{01}, 0, 0) = \\ &= -\frac{k_1}{-2 + 2\omega_c \xi} = -0,63; \\ \frac{\partial P_2}{\partial \lambda_1}(P_{02}, 0, 0) &= \frac{\partial f / \partial \lambda_1}{\partial f / \partial P} \times \\ &\times (P_{02}, 0, 0) = \end{aligned}$$

$$= -\frac{8\omega_c}{-8 + 2\omega_c \xi} = -4;$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \lambda_2}(P_{02}, 0, 0) =$$

$$= \frac{\partial f / \partial \lambda_2}{\partial f / \partial P}(P_{02}, 0, 0) =$$

$$= -\frac{k_1}{-8 + 2\omega_c \xi} = 0,63.$$

Таким образом, приближенные равенства будут иметь вид

$$P_1(\lambda_1, \lambda_2) = -1 + (\lambda_1 - 0,63\lambda_2);$$

$$P_2(\lambda_1, \lambda_2) = -4 - (4\lambda_1 - 0,63\lambda_2).$$

Если в комплексной плоскости условия работоспособности объекта соответствуют $|P_1 - P_{10}| \leq \delta = 0,5$, то в области коэффициентов необходимо соблюдать неравенства $|\lambda_1 - 0,63\lambda_2| \leq 0,5$. Следовательно, если $\lambda_1 = 0,13$, то $-0,59 \leq \lambda_2 \leq 1$.

Если диагностическая модель представлена нелинейными дифференциальными уравнениями, то в общем виде решить задачу определения условий работоспособности невозможно. Наличие нелинейностей в объекте приводит к тому, что в уравнении движения появляются коэффициенты, зависящие от входной и выходной величин или от их разности. Решение может быть получено различными способами. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся случаи.

Первый случай. Коэффициенты левой части уравнения движения постоянны, а коэффициенты правой части — функции от входной величины:

$$\begin{aligned} y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_0 y &= \\ &= b_m(x)x^{(m)} + b_{m-1}(x)x^{(m-1)} + \\ &+ \dots + b_0(x)x. \end{aligned}$$

Эта зависимость характерна для разомкнутых систем, в которых величина сигнала на выходе нелинейного элемента зависит от величины входного сигнала.

Пример 3. На рис. 4 приведена структурная схема объекта, где линей-

ная часть имеет передаточную функцию $K(p) = k_1/(Tp + 1)$, а нелинейная $N(x)$ имеет насыщение (рис. 5), т. е.

$$x_1 = \begin{cases} (b/a)x & \text{при } -a \leq x \leq a, \\ b & \text{при } |x| > |a|. \end{cases}$$

В этом случае уравнение движения будет иметь вид

$$y' + a_0 y = b_0(x) x,$$

где

$$a_0 = 1/T, \quad b_0(x) = (k_1/T) N(x).$$

Второй случай. Коэффициенты левой и правой частей уравнения движения зависят от входной величины:

$$y^{(n)} + a_{n-1}(x) y^{(n-1)} + \dots + a_0(x) y = b_m(x) x^{(m)} + \dots + b_0(x) x.$$

Такая зависимость характерна для систем с обратной связью, воздействие которой постоянно (имеется релейный элемент или элемент, работающий в зоне насыщения).

В этом случае условие работоспособности можно получить как ограничение, налагаемое на изменение коэффициентов левой части при заданной области допустимых значений характеристических показателей объекта.

Коэффициенты характеристического уравнения представляют собой интегралы вида

$$\bar{a}_i(x) = \frac{1}{T} \int_0^T a_i[x_i(t)] dt,$$

$$i = 0, 1, \dots, n-1.$$

Объект оказывается работоспособным при достаточно малых значениях разности

$$\bar{a}_i(x) = a_i(x) - \bar{a}_i(x).$$

Пример 4. Объект описывается уравнением:

$$y' + a(x) y = x,$$

где $x = \sin t$ — периодическая функция с периодом T .

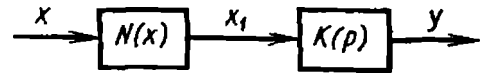


Рис. 4. Структурная схема объекта

Решение уравнения имеет вид

$$y = y_n + z,$$

где

$$y_n = e^{\int_0^t a[x(t)] dt} \int_0^t x(t) \times$$

$$\times e^{-\int_0^t a[x(t)] dt} dt;$$

$$z = C e^{-\int_0^t a[x(t)] dt}$$

— решение уравнения

$$z' + a(x) z = 0.$$

Условием работоспособности будет соблюдение равенства

$$\bar{a}[x(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T a[x(t)] dt > \delta.$$

Если

$$a(x) = \begin{cases} 2 + \frac{1}{kx + E} & \text{при } x > 0; \\ 2 + \frac{1}{kx - E} & \text{при } x < 0, \end{cases}$$

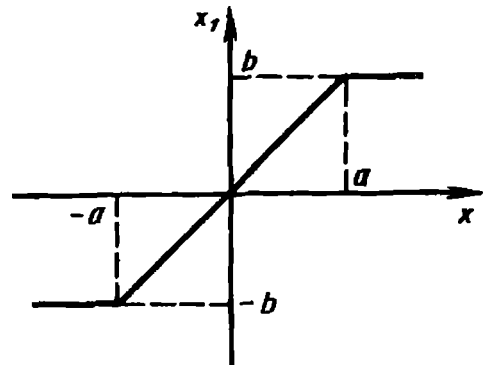


Рис. 5. Характеристика нелинейного элемента

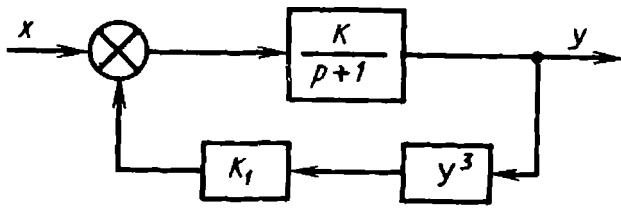


Рис. 6. Структурная схема объекта с нелинейным элементом в цепи обратной связи

то

$$\bar{a} = 2 + \frac{1}{2\pi} \times \left(\int_0^{\pi} \frac{dt}{k \sin t + E} + \int_{\pi}^{2\pi} \frac{dt}{k \sin t - E} \right).$$

Третий случай. Коэффициенты левой части уравнения движения зависят от выходной величины, а коэффициенты правой части постоянны, т. е.

$$y^{(n)} + a_{n-1}(y)y^{n-1} + \dots + a_0(y)y = b_mx^{(m)} + \dots + b_0x.$$

В этой ситуации решение может быть получено только для частных случаев.

Пример 5. На рис. 6 приведена структурная схема объекта с нелинейным элементом в цепи обратной связи. В этом случае

$a(y) = a_0 + a_3y^3$; $a_0 = 1$; $a_3 = k_1k$, а поведение объекта описывается уравнением

$$y' + (1 + k_1kn)y = kx.$$

При достаточно малом k оказывается малым $\bar{y}(t, \lambda)$, и

$$\begin{aligned} \overline{a(\bar{y}) + a'(\bar{y})\bar{y}} &= \\ &= \overline{a_0 + a_3\bar{y}^3 + 3a_3\bar{y}^3} = \\ &= \overline{a_0 + 4a_3\bar{y}^3} = a_0 + 4a_3\bar{y}^3. \end{aligned}$$

Так как $a_0 > 0$, а \bar{y} мало, то объект, описываемый нелинейным уравнением, будет работоспособным при достаточно малых значениях k .

Решение задач поиска дефектов с помощью модели дифференциальных уравнений может быть выполнено в тех случаях, когда известны связи между

коэффициентами уравнений и параметрами объекта, характеризующими наличие в нем дефектов.

В общем виде математическая модель динамического объекта выражается векторным дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t), \quad (1)$$

где $x = \{x_i, i = \overline{1, n}\}$ — вектор состояний системы; $u = \{u_j, j = \overline{1, m}\}$ — вектор внешних воздействий, являющийся кусочно-непрерывной вектор-функцией времени t .

С точки зрения решения задач диагностирования основная цель анализа уравнения (1) заключается в построении или выборе так называемого *обобщенного диагностического параметра* (ОДП) [5]. ОДП представляет собой совокупность подаваемых и (или) поступающих на объект входных (тестовых или рабочих) воздействий, зависящих от времени, и соответствующих этим воздействиям ответов объекта, измеряемых в контрольных точках. Эта совокупность построена с учетом структуры объекта и технических состояний его функциональных элементов и, возможно, оптимизирована по полноте обнаружения и (или) глубине поиска дефектов при учете ограничений на средства диагностирования.

Сформулируем задачу выбора ОДП в общем виде. Исходными данными для постановки задачи выбора являются: показатель качества объекта $\Phi \in \Phi_0$ (где Φ_0 — область допустимых значений Φ с точки зрения применения объекта по назначению); заданная глубина n диагностирования, которая определяется параметрами состояния объекта $S(t)$; набор допустимых входных воздействий $\{X(t)\}$ и доступных для измерения сигналов $\{Y(t)\}$; описание системы в пространстве параметров $X(t)$ и $Y(t)$ с учетом воздействия внешних факторов $N(t)$ в виде уравнения $F[X(t), Y(t), N(t), S(t), t] = 0$. Кроме того, должны быть заданы функции, определяющие конструктивно-технологические и иные свойства средств диагностирования (например, массу, стоимость, достоверность и др.) и зависящие от вход-

ных воздействий и измеряемых сигналов. На каждую из этих функций необходимо задать допустимые области их определения, зависящие от показателя Φ и некоторых параметров $v_j, j = 1, J$, где параметры v_j могут определять характеристики элементной базы аппаратурных средств диагностирования. Обозначим эти функции через $c(X, Y), m(X, Y), p(X, Y), \theta(X, Y)$, а соответствующие допустимые области их определения через $C(\Phi, v_j), M(\Phi, v_j), P(\Phi, v_j), \Theta(\Phi, v_j)$. Тогда оптимальный ОДП есть совокупность

$$\begin{aligned} \{X^*(t), Y^*(t): X^*(t) \in \{X(t)\}, \\ Y^*(t) \in \{Y(t)\}\}, \end{aligned} \quad (2)$$

для которой

$$\begin{aligned} \theta(X^*(t), Y^*(t)) = \\ = \operatorname{extr}_{\theta \in \Theta(\Phi, v_j)} \{\theta(X(t), Y(t))\} \end{aligned} \quad (3)$$

при

$$\begin{cases} m(X(t), Y(t)) \in M(\Phi, v_j), \\ c(X(t), Y(t)) \in C(\Phi, v_j), \\ p(X(t), Y(t)) \in P(\Phi, v_j), \end{cases} \quad (4)$$

$\operatorname{rank} J [F(X^*, Y^*, S, N, t)] = n$, (5)
где $J [\]$ — якобиан преобразования.

Если считать, например, что функция $\theta(\cdot)$ определяет размерность ОДП, $m(\cdot)$ — массу, $c(\cdot)$ — стоимость средства диагностирования, $p(\cdot)$ — достоверность диагностирования, то приведенную постановку задачи можно интерпретировать как выбор ОДП с минимальным числом компонентов входных воздействий и измеряемых сигналов при условии, что масса и стоимость средств диагностирования не выйдут из допустимых пределов, будут обеспечены не ниже заданных достоверность и глубина диагностирования. Выполнимость этих условий гарантируется введением выражения (5), определяющего в общем случае условие разрешимости уравнения $F [\] = 0$ относительно параметров состояния $S(t)$.

Из приведенной общей постановки можно получить ряд частных постановок. Например, если решать задачу

выбора ОДП $\{X(t), Y(t)\}$ из условия оптимизации (3) при учете только (5), то можно будет сформулировать задачу определения минимальной совокупности входных и измеряемых параметров при условии обеспечения заданной глубины диагностирования, но без учета каких-либо иных ограничивающих факторов. Смена показателя оптимизации или состава ограничивающих факторов позволяет решать задачу выбора ОДП при весьма разнообразных требованиях, что может быть необходимым в ходе разработки систем диагностирования для объектов различных классов.

Эффективность решения задач диагностирования связана прежде всего с установлением факта существования ОДП для заданного объекта или, что эквивалентно, — условий, определяющих существование ОДП. В общем виде эти условия существования определяются выражением (5), но проверка последнего не всегда удобна. Более целесообразно воспользоваться положениями теории идентификации.

Вернемся к уравнению (1) и будем рассматривать его в области $D \subset R^n$ в промежутке времени $\tau = [t_0, t_1]$. Пусть заданы начальное (x_0) и конечное (x_1) состояния объекта. Объект, описываемый уравнением (1), называют управляемым в области $D \subset R^n$, если для любых $x_0, x_1 \in D$ существует такое управление $u(t)$, что соответствующее ему решение $x(t)$ уравнения (1) удовлетворяет условиям $x(t) \in D$ для $t \in [t_0, t_1]$, $x(t_0) = x_0$, $x(t_1) = x_1$ при $t_1 \geq t_0$.

Зададим теперь дополнительно функцию

$$\Phi = \rho(x, t), \quad \Phi = \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}. \quad (6)$$

Объект, описываемый уравнением (1), называют *наблюдаемым* в пространстве $D \times \tau$ по функции (6), если для двух любых решений $x_1(t)$ и $x_2(t) \in X$ существует момент $t \in \tau$, такой, что $\rho(x_1(t), t) \neq \rho(x_2(t), t)$, где X — множество решений.

Применительно к задачам диагностирования *свойство управляемости* означает, что существует такая совокупность внешних входных сигналов, при

воздействии которых на объект с каждого функционального элемента объекта может быть получен ответ. Физически это соответствует тому, что отсутствуют функциональные элементы, недоступные проверкам.

Свойство наблюдаемости означает существование взаимно однозначного соответствия между множеством состояний $x(t)$ и множеством сигналов φ .

Можно считать, что если объект является управляемым и наблюдаемым, то для него существует ОДП. Свойства управляемости и наблюдаемости позволяют обеспечить требования к ОДП с точки зрения удовлетворения требованиям заданной глубины диагностирования — необходимая глубина диагностирования задается делением объекта на функциональные элементы, доступность проверки которых гарантируется этими свойствами.

Общего критерия полной глобальной управляемости для нелинейных систем не существует, т. е. при произвольных размерах области работоспособности и произвольных структурах объекта диагностирования теория идентификации не располагает критериями определения достаточного набора входных сигналов, с помощью которых можно было бы обеспечить получение ответа с каждого функционального элемента объекта. Исследования необходимо вести каждый раз применительно к конкретной структуре, к конкретной задаче. При этом рационально пользоваться понятием *локальной управляемости*.

Пусть для объекта с заданной структурой существует такое управление (набор входных сигналов) $u^0(t) \in U$, при котором за конечное время $t_1 - t_0$ возможен перевод объекта из заданной точки области D_0 в заданную точку области D_1 , и известно соответствующее решение $x^0(t)$ (это эквивалентно получению за конечное время отклика со всех составляющих этот объект функциональных элементов). Тогда объект (1) называют *локально вполне управляемым* в окрестности $x^0(t)$, $u^0(t)$, если для новой достаточно малой по норме гладкой функции $\delta x(t)$ существует единственная функция $\delta u(t)$,

при которой векторы состояния $x(t) = x^0(t) + \delta x(t)$ и входных сигналов $u(t) = u^0(t) + \delta u(t)$ удовлетворяют уравнению (1) при заданном начальном условии.

Для локальной управляемости объекта (1) при аналитическом задании его функций и входных сигналов необходимо и достаточно, чтобы

$$\text{rang} \left[\frac{\partial f}{\partial u}, \frac{\partial Lf}{\partial u}, \dots, \frac{\partial L^{n-1}f}{\partial u} \right] = n, \quad (7)$$

где

$$L[*] = \frac{\partial[*]}{\partial x} f + \frac{\partial[*]}{\partial u} \dot{u} + \frac{\partial[*]}{\partial t}$$

— оператор Ляпунова.

Применительно к задачам диагностирования ранг n определяет необходимую (и заданную) глубину поиска неисправности.

По аналогии необходимым и достаточным условием полной наблюдаемости при бесконечно малом времени наблюдения является

$$\text{rang} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)^T, \left(\frac{\partial L\rho}{\partial x} \right)^T, \dots, \left(\frac{\partial L^{n-1}\rho}{\partial x} \right)^T \right] = n,$$

где $L\rho$ — оператор Ляпунова от функции наблюдения ρ (6).

Это условие является только достаточным в случае, когда наблюдение осуществляют на конечном интервале времени. Поскольку при диагностировании интервал наблюдения всегда конечен (и может быть значительным), то условие следует понимать как достаточное условие существования ОДП.

Таким образом, всегда есть возможность путем выбора областей, для которых выполняется условие локальной управляемости и достаточное условие наблюдаемости, убедиться в существовании ОДП для конкретного

объекта диагностирования с заданной структурой.

Методы выбора и оптимизации ОДП приведены в гл. 3.

Диаграммы прохождения сигналов. При решении задач поиска дефектов обычно учитывают структурные особенности и внутренние связи в объекте, для чего удобно использовать графоаналитические модели объекта в виде *диаграмм прохождения сигналов*.

Графическое изображение диаграммы прохождения сигналов представляет собой схему, состоящую из узлов, соединенных направленными ветвями. Диаграмме обычно соответствует система алгебраических линейных уравнений; узлам диаграммы соответствуют переменные (ветви характеризуют связь между переменными); их операторам — коэффициенты уравнений.

В ряде случаев диаграмма прохождения сигналов может быть построена без составления уравнений, только на основании рассмотрения структуры объекта. Используя достаточно простые правила, преобразовывают диаграмму прохождения сигналов и находят все возможные решения уравнений.

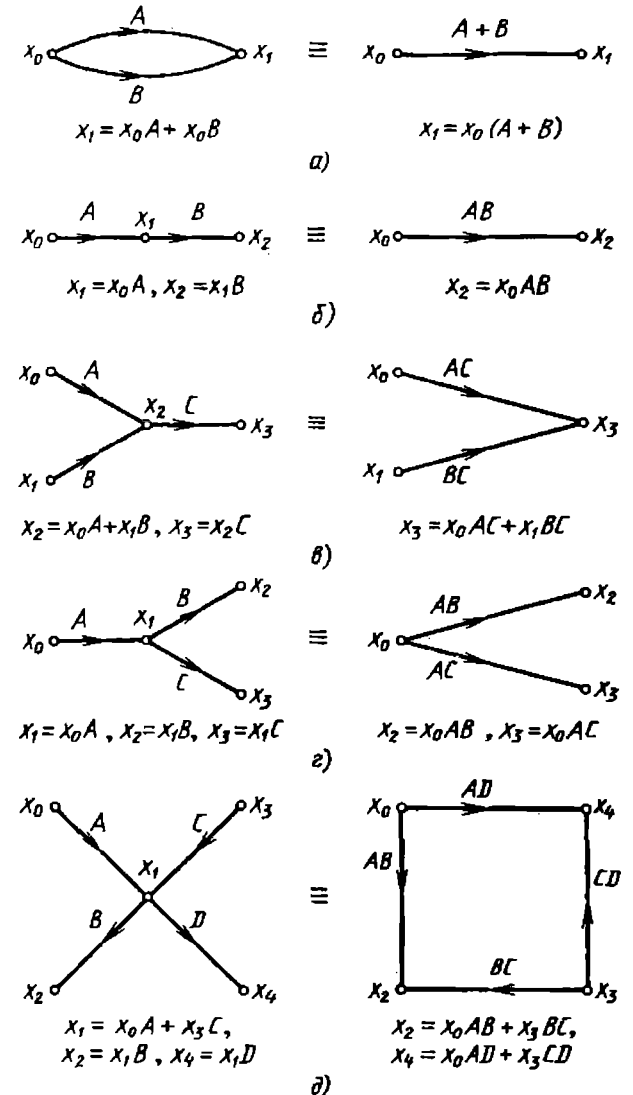
Узлами диаграммы могут быть источники, простые каскадные узлы и стоки. *Источниками* называют такие узлы, у которых имеются только выходящие ветви; *стоками* — только входящие ветви. Источники соответствуют независимым переменным, а стоки — зависимым. Узлы с входящими и выходящими ветвями являются простыми каскадными узлами.

Каждой ветви соответствует свой оператор T_{ij} , где i означает узел, откуда начинается ветвь, j — узел, где ветвь заканчивается. Направление ветви указывают стрелкой. Каждому узлу соответствует своя переменная, равная сумме входящих в узел сигналов:

$$x_k = \sum_j x_j T_{jk}, \quad j = 1, 2, \dots$$

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

Диаграммы прохождения сигналов можно упрощать, используя достаточно простые правила преобразования:



Кроме простейших правил преобразования обычно применяют правило инверсии пути и правило Мэсона.

Правило инверсии пути позволяет уменьшить число контуров обратной связи и провести взаимную замену зависимых и независимых переменных. При инвертировании ветви изменяют ее направление на обратное и переносят 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. Передачи оставшихся ветвей диаграммы изменяются таким образом, чтобы общие передачи от источника к стоку оставались неизменными. При инвертировании пути инвертируют все ветви, входящие в этот путь.

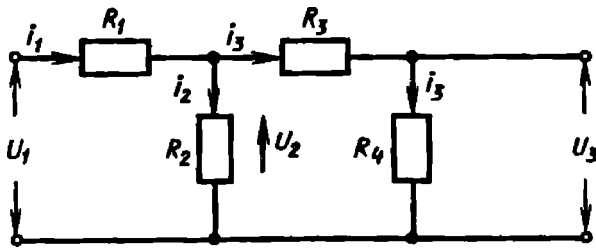


Рис. 7. Электрическая схема

Правило Мэсона (правило исключяющихся контуров) позволяет свести к минимуму число математических операций, применяемых для решения диаграммы прохождения сигналов. Математически правило Мэсона выражается формулой

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

где T_{ij} — функция передачи от i -го узла к j -му; ρ_k — прямой путь прохождения сигнала; Δ_k — минор определителя, соответствующий k -му пути; Δ — определитель.

Определитель может быть вычислен как единица минус сумма функций передач всех замкнутых контуров, плюс сумма произведений функций передач пар некасающихся контуров (т. е. не имеющих общих узлов), минус сумма произведения функций передач троек некасающихся контуров, плюс и т. д. В большом числе практических случаев произведения функций передач контуров второго и более высокого порядка мало влияют на величину результирующей функции передачи и поэтому могут не учитываться.

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

Определитель является характеристикой диаграммы прохождения сиг-

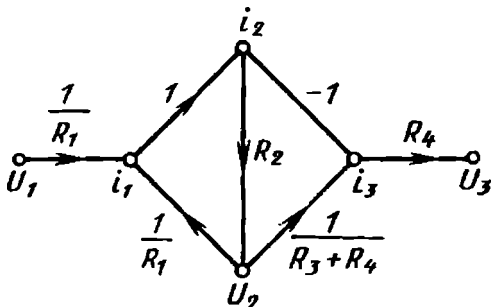


Рис. 8. Граф электрической схемы

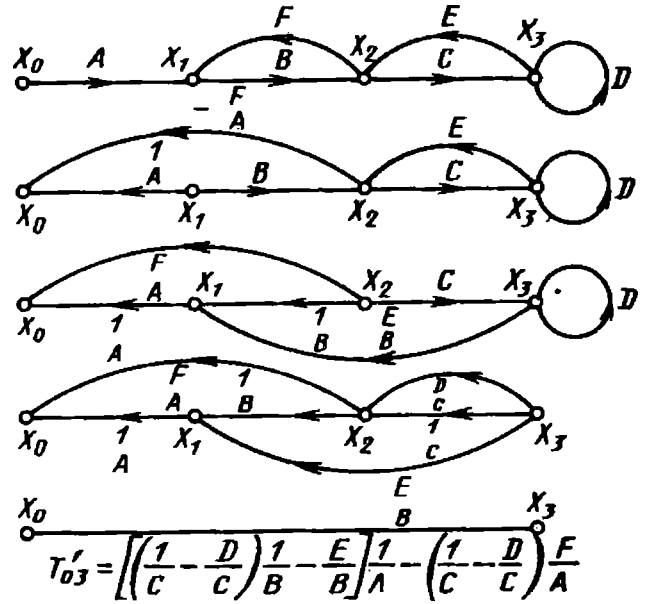


Рис. 9. Инверсия графа

налов в целом, т. е. характеристикой системы уравнений, описывающей рассматриваемый объект.

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

Пример 6. Построить диаграмму прохождения сигналов для объекта, представленного электрической схемой (рис. 7) и описываемого системой уравнений:

$$i_1 = \frac{U_1 - U_2}{R_1}, \quad U_2 = i_2 R_2,$$

$$i_2 = i_1 - i_3,$$

$$U_3 = i_3 R_4, \quad i_3 = \frac{U_2}{R_3 + R_4}.$$

Пользуясь приведенными правилами, строим диаграмму прохождения сигналов (рис. 8).

Пример 7. Осуществить инверсию диаграммы, приведенной в верхней части рис. 9. Решение начинается с инвертирования ветви \$A\$, затем последовательно инвертируют ветви \$B\$ и \$C\$. В результате получают диаграмму, которая представлена одной ветвью (нижняя часть рис. 9).

В данном случае инверсия позволила устранить контуры обратной связи.

Подобный граф может быть построен также по схеме соединения блоков в объекте. Число узлов должно соответствовать числу блоков. Узлы могут характеризоваться вероятностью выполнения p_i или невыполнения q_i блоком своих функций. Ветви графа отражают влияние блоков друг на друга. Направления ветвей определяют по схеме соединений, степень влияния — операторами T_{ij} .

В графе возможны структурные преобразования, сводящиеся к объединению вершин, между которыми имеется причинно-следственная связь. При этом каждую пару x_i и x_j объединяемых вершин заменяют сложной вершиной x_{ij} , характеризуемой ее локальными степенями $\mu_{1ij} = \mu_{1i} + \mu_{1j} - 1$ и $\mu_{2ij} = \mu_{2i} + \mu_{2j} - 1$, где μ_{1i} и μ_{1j} — числа входящих ветвей; μ_{2i} и μ_{2j} — числа выходящих ветвей соответственно из i -й и j -й вершин.

Топологическая модель. Топологической моделью объекта называют ориентированный граф [23]. Вершинами графа являются либо свойства объекта, либо характеризующие эти свойства параметры. Вершинами графа могут также быть существенные свойства или параметры внешней среды.

Структурным параметрам, т. е. параметрам, характеризующим свойства или функционирование отдельных составных частей (узлов, блоков, деталей) объекта, в модели сопоставляются возможные дефекты, вызывающие нарушение свойств или нормального функционирования составных частей. Структурные параметры и соответствующие им дефекты обозначают одними и теми же символами d_i , $i=1, 2, \dots, n$. Эти параметры в модели являются входными вершинами графа (вершинами, не имеющими входящих дуг, ведущих от других вершин). Другие параметры модели, называемые *косвенными*, обозначают символами x_j ; $j = 1, 2, \dots, m$. Эти параметры являются внутренними вершинами графа.

Каждой вершине d_i или x_j графа соответствует число — *вес* вершины $a(d_i)$ или $a(x_j)$, который характеризует затраты на оценку соответствующих параметров (время, стоимость,

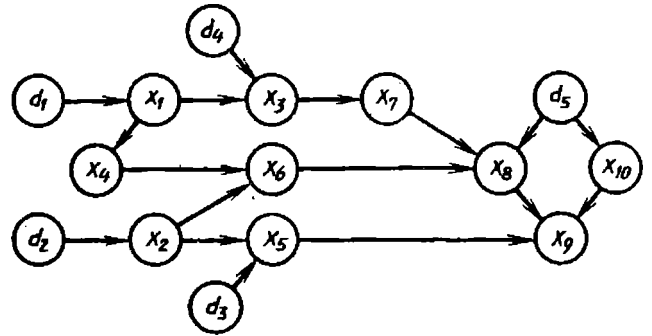


Рис. 10. Топологическая модель ОД

доступность для измерения) и достоверность оценки. Вес вершины принимают равным нулю, если оценка параметра невозможна принципиально или не может быть осуществлена без разборки объекта.

Дуги (ветви) графа представляют причинно-следственные связи между параметрами. Каждой дуге графа ставится в соответствие число — вес дуги $I(x_k/x_j)$, представляющий собой относительное количество информации о значении параметра x_k . Значение этого параметра, соответствующего начальной вершине дуги, получают в результате оценки параметра x_j , в свою очередь соответствующего конечной вершине дуги. Веса дуг (петель) одинаковы и равны некоторой максимальной величине

$$I(x_k/x_j) = I_{\max},$$

т. е. максимум информации о значении параметра получают при оценке самого параметра.

Поскольку данные для расчета количества информации обычно отсутствуют, то для оценки весов дуг (как, впрочем, и весов вершин) следует пользоваться услугами экспертов. Для удобства расчетов целесообразно перейти от абсолютных весов вершин и дуг к их относительным весам соответственно:

$$a_j = \frac{a(x_j)}{a_{\max}}; s_{kj} = \frac{I(x_k/x_j)}{I_{\max}},$$

где a_{\max} — максимальный абсолютный вес некоторой вершины.

Пример 8. На рис. 10 приведена топологическая модель некоторого объекта, которая содержит 15 вершин,

2. Веса вершин x_j

Вершина	Вес вершины	Вершина	Вес вершины
x_1	0,1	x_6	0,3
x_2	0,9	x_7	1,0
x_3	0,9	x_8	0,8
x_4	0,9	x_9	0,95
x_5	0,9	x_{10}	0,7

представляющих два множества:
множество дефектов

$$D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$$

и множество косвенных параметров

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}.$$

Веса вершин d_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ равны нулю, а веса a_j вершин x_j приведены в табл. 2.

Веса дуг представлены матрицей связей (табл. 3).

3. Веса дуг

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
d_1						1									
d_2							1								
d_3										1					
d_4								1							
d_5													1		0,8
x_1								0,8	0,6						
x_2										1	0,8				
x_3												0,6			
x_4											0,4				
x_5															0,8
x_6													1		
x_7														0,2	
x_8															0,8
x_9															
x_{10}															0,4

Примечание. Все незаполненные клетки — нулевые.

4. Степень S_j^i связи структурного параметра с косвенным параметром

Структурные параметры	Косвенные параметры									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
d_1	1,0		0,8	0,6		0,24	0,48	0,31	0,25	
d_2		1,0			1,0	0,8		0,8	0,93	
d_3					1,0				0,8	
d_4			1,0				0,6	0,12	0,1	
d_5								1,0	0,86	0,8

Если топологическая модель объекта имеет большую размерность, то для удобства анализа осуществляют ее декомпозицию по множеству дефектов.

Оптимальным по точности распознавания дефектов было бы такое разбиение множества дефектов на такие классы, отображения которых в пространстве параметров не пересекаются. Выполнение этого условия на практике очень редко, поэтому в общем случае находят такие классы дефектов, отображения которых в пространстве параметров имеют наименьшее пересечение. Поэтому при декомпозиции в первую очередь определяют степень отображения каждого дефекта d_i в каждом из косвенных параметров x_j , т. е. степень S_j^i связи каждого структурного параметра i с каждым косвенным параметром j .

Если вершина d_i имеет единственную связь с вершиной x_j , то значение S_j^i вычисляют по формуле

$$S_j^i = \prod_{t=1}^{j-1} S_{t, t+1}$$

где $S_{t, t+1}$ — вес дуги, соединяющей вершины x_t и x_{t+1} , принадлежащие пути между вершинами d_i и x_j .

При наличии нескольких путей, соединяющих вершины d_i и x_j , для вы-

числения S_j^i можно воспользоваться формулой

$$S_j^i = \sum_{\alpha} S_j^i(\alpha) - \sum_{\alpha, \beta} S_j^i(\alpha) S_j^i(\beta) + \sum_{\alpha, \beta, \gamma} S_j^i(\alpha) S_j^i(\beta) S_j^i(\gamma),$$

где α, β, γ — символы путей; $S_j^i(\alpha)$ — степень отображения дефекта d_i в параметре x_j по пути α .

Пример 9. Для топологической модели из примера 8, используя табл. 3 и приведенные формулы, находим значения S_j^i для всех $i = 1, 2, \dots, 5$ и всех $j = 1, 2, \dots, 10$. Результаты сведены в табл. 4.

При решении задачи поиска дефектов следует рассмотреть попарно все дефекты и оценить возможность распознавания дефектов каждой пары по всем косвенным параметрам.

Различающую способность r_{il}^j параметра x_j относительно пары дефектов d_i и d_l оценивают следующим образом:

$$r_{il}^j = \begin{cases} (S_j^i - S_j^l)^2, & \text{если } S_j^i > S_j^l; \\ 0, & \text{если } S_j^i \leq S_j^l. \end{cases}$$

Чтобы учесть затраты на оценку параметра x_j (в частности, доступность

5. Значения степени попарной различимости дефектов

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
d_1	0	1,23	1,32	0,49	1,25
d_2	2,53	0	1,66	3,02	2,00
d_3	1,19	0	0	1,37	0,90
d_4	0,50	1,26	1,27	0	1,26
d_5	1,18	0,48	1,25	1,62	0

его измерения), вместо характеристики r_{il} целесообразно пользоваться показателем γ_{il}^j , вычисляемым по формуле

$$\gamma_{il}^j = r_{il}^j a_j.$$

Степень различимости r_{il} дефектов d_i и d_l по всем косвенным параметрам x_j , $j = 1, 2, \dots, m$ оценивается следующей суммой:

$$r_{il} = \sum_{j=1}^m \gamma_{il}^j.$$

Пример 10. Для рассматриваемого примера топологической модели (см. рис. 10) с использованием данных табл. 4 и 2 получаем значения степени попарной различимости дефектов (табл. 5).

В соответствии с принципом разделения дефектов на классы по величине пересечения их отображений в пространстве параметров в один класс объединяют те дефекты, которым соответствуют малые значения r_{il} . Задаваясь пороговым значением степени различимости или вычислив значение r_{il} методами теории распознавания образов, выделяют все пары дефектов d_i и d_l , для которых имеет место неравенство $r_{il} < \beta$. Из выделенных пар дефектов образуют пересекающиеся подмножества дефектов. Дефекты, не вошедшие в выделенные пары, образуют самостоятельное подмножество.

Пример 11. Для $\beta = 1$ из табл. 5 выделяют пары дефектов (табл. 6).

6. Пары дефектов

r_{il}	D_{il}
0	3,2
0,48	5,2
0,49	1,4
0,50	4,1
0,90	3,5

Выделенные пары образуют два непересекающихся подмножества: $D_1 = \{d_1, d_4\}$ и $D_2 = \{d_2, d_3, d_5\}$.

Деление множества дефектов на непересекающиеся подмножества не всегда возможно. В таких случаях следует находить подмножества, пересечения которых минимальны.

Условие минимальности пересечений подмножеств дефектов является недостаточным для декомпозиции подмножества дефектов, отображающихся в параметры, которым соответствуют вершины, принадлежащие некоторому одному и тому же пути топологической модели объекта. При этом задачу декомпозиции решают путем выделения ряда вершин, представляющих те параметры, для которых допускается задание их стабильных значений при реализации процесса диагностирования. Физический смысл такого выделения состоит в том, что из-за стабилизации значения параметра, представленного внутренней вершиной некоторого пути в графе, дефекты, появление которых возможно в вершинах, предшествующих выделенной, перестают влиять на значения параметров, представленных вершинами, следующими за выделенной.

Выбор параметров, подлежащих стабилизации, целесообразно осуществлять методами, обеспечивающими минимизацию числа их параметров.

Более подробное описание методов обработки топологических моделей сложных объектов, в том числе методов определения совокупностей параметров, обеспечивающих проверку работоспособности, а также поиск дефектов, содержится в работах [23, 32].

2. МОДЕЛИ ДИСКРЕТНЫХ КОМБИНАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Дискретными объектами называют объекты, значения входных, внутренних и выходных координат которых задаются на конечных множествах, а время отсчитывается дискретно. Комбинационными объектами, или объектами без памяти, называют дискретные объекты, значения выходных координат которых определяются только значениями их входных координат, т. е. не зависят от времени. Часто входные и внутренние координаты объекта называют входными и соответственно внутренними переменными, а выходные координаты — выходными функциями. Входные переменные и выходные функции могут быть сопоставлены соответственно как основным (необходимым в условиях применения объекта по назначению), так и дополнительным (предусмотренным для целей диагностирования) входам и выходам объекта.

Явные и неявные модели [55]. Пусть X есть n -мерный вектор, компонентами которого являются значения n входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n , а Z есть k -мерный вектор значений k выходных функций z_1, z_2, \dots, z_k объекта. Согласно определению дискретного объекта, число возможных значений входных переменных, как и выходных функций, конечно (чаще всего в дискретной технике это число равно двум). Тем самым число возможных (реализуемых) различных значений векторов X и Z также конечно и в двоичном случае не превышает 2^n и соответственно 2^k .

Под записью

$$Z = \Psi(X) \quad (8)$$

понимают отображение $\Psi: X \rightarrow Z$, представляющее собой зависимость реализуемых исправным дискретным комбинационным объектом выходных функций Z от его входных переменных X . Зависимость (8) является математической моделью исправного дискретного комбинационного объекта и в том или ином конкретном случае может быть представлена в табличной, аналитической, графич-

ческой или какой-либо другой форме.

При строго детерминированной постановке задач диагностирования всегда предполагается, что обнаружению или поиску подлежит конечное множество возможных физических дефектов объекта. Наряду с термином «дефект» в дальнейшем используется термин «неисправность», под которым понимают формализованную (математическую) модель физического дефекта. Принято различать одиночные и кратные неисправности. Под *одиночной* понимают неисправность, принимаемую в качестве элементарной, т. е. такую, которая не может быть представлена (или не подлежит представлению) совокупностью нескольких других, более «мелких» неисправностей. *Кратная* неисправность является совокупностью одновременно существующих двух и более одиночных неисправностей.

Символом S обозначают множество всех рассматриваемых (не обязательно всех возможных) одиночных и кратных неисправностей объекта; символом O — множество рассматриваемых его одиночных неисправностей. Очевидно, $O \subseteq S$. При наличии в объекте неисправности (дефекта) $s_i \in S, i = 1, 2, \dots, |S|$, (или $o_i \in O, i = 1, 2, \dots, |O|$) он находится в i -неисправном состоянии или является i -неисправным.

Поведение i -неисправного дискретного комбинационного объекта может быть описано зависимостью

$$Z^i = \Psi^i(X), \quad (9)$$

представляемой обычно в той же форме, что и зависимость (8). Зависимость (9) является математической моделью i -неисправного дискретного комбинационного объекта.

Совокупность явно заданных зависимостей (8) и (9) образует *явную модель* дискретного комбинационного ОД.

Фактически реализуемую конкретным ОД зависимость Z от X отмечают знаком «*»:

$$Z^* = \Psi^*(X). \quad (10)$$

В рамках рассматриваемого модельного представления объектов диагно-

стирования зависимость (10) будет либо зависимостью (8), либо одной (для фиксированного i) из зависимостей (9). Из-за высокой размерности явных моделей вместо последних часто используют неявные модели ОД. *Неявную модель* образуют заданная явно, как правило, зависимость (8), множество S или O рассматриваемых дефектов объекта, представленных их математическими моделями, и способ вычисления зависимостей (9) по зависимости (8) для любой неисправности s_i или o_i . Получив зависимости (9) для всех $s_i \in S$ или $o_i \in O$, можно перейти от неявной модели объекта к его явной модели.

Описание поведения исправного ОД, представленное в той или иной форме зависимостью (8), всегда имеется. Этого нельзя сказать о математических моделях рассматриваемых дефектов. Если таких моделей нет, то описания (9) поведения неисправных модификаций ОД в ряде случаев могут быть получены в результате физического эксперимента над объектом или над его физической моделью при внесении в объект или его физическую модель соответствующих дефектов.

В неявных моделях ОД математическими моделями неисправностей чаще всего являются определенные «искажения» зависимости (8). Например, при задании (8) в аналитической форме такими искажениями могут быть фиксации константами некоторых входных переменных или отдельных их вхо-

7. Таблица истинности

Номер строки	Входные наборы			Выходные наборы	
	x_1	x_2	x_3	z_1	z_2
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	1	0	1
4	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	1
6	1	1	0	1	0
7	1	1	1	1	1

ждений в формулу, исключение или добавление новых членов формулы и т. п. Необходимо, чтобы математические модели неисправностей достаточно адекватно представляли соответствующие им реальные физические дефекты объекта диагностирования.

Модели исправных комбинационных объектов. При изучении технических объектов, в том числе в целях их диагностирования, приняты два подхода: функциональный и структурный. *Функциональный подход* заключается в рассмотрении только алгоритмов функционирования объекта, т. е. реализуемых объектом функций. *Структурный подход* предусматривает исследование не только реализуемых функций, но также внутренней организации или структуры объекта.

При функциональном подходе исследуемый объект рассматривают как «черный ящик», внутреннее устройство которого либо неизвестно, либо не имеет значения.

Комбинацию значений входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n комбинационного дискретного объекта с n входами будем называть *входным набором* и обозначать символом X_j . При фиксированном порядке двоичных входных переменных каждый входной набор может быть представлен n -разрядным двоичным числом.

Комбинацию значений выходных функций z_1, z_2, \dots, z_k комбинационного объекта с k выходами будем называть *выходным набором* и обозначать символом Z_j , если данный выходной набор получен при подаче на объект входного набора X_j . Выходные наборы также могут быть представлены двоичными (k -разрядными) числами.

Выходные функции z_1, z_2, \dots, z_k являются булевыми функциями двоичных входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n , для задания которых используют *таблицы истинности*. Столбцам таблиц истинности соответствуют входные переменные (в левой части) и выходные функции (в правой части). В строке j таблицы истинности обычно в виде двоичных чисел записываются входной набор X_j и соответствующий ему выходной набор Z_j .

Пример 12. Табл. 7 является таблицей истинности, задающей две бу-

левы функции z_1 и z_2 от трех входных переменных x_1, x_2, x_3 . В первом слева столбце этой таблицы указаны порядковые номера строк, являющиеся в данном случае десятичными эквивалентами двоичных чисел, представляющих входные наборы.

От таблицы истинности, являющейся табличной формой функциональной математической модели комбинационного объекта, можно перейти к его аналитической функциональной модели, представляя выходные функции, например, в виде формул булевой алгебры.

Одна и та же булева функция может быть представлена в прямом или инверсном виде разными формулами.

Пример 13. Прямой вид функции z_1 (табл. 7) может быть задан совершенной дизъюнктивной нормальной формой

$$z_1 = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \vee x_1 x_2 x_3,$$

минимальной дизъюнктивной нормальной формой

$$z_1 = x_1 x_2 \vee x_2 \bar{x}_3,$$

скобочной формой

$$z_1 = x_2 (x_1 \vee \bar{x}_3)$$

и другими формами.

Для инверсного вида функции z_1 получим

$$\bar{z}_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3$$

или

$$\bar{z}_1 = \bar{x}_1 x_3 \vee \bar{x}_2.$$

Возможен обратный переход от формульного задания булевой функции к таблице истинности. Если функция полностью определена (заданы ее определенные значения 0 или 1 на всех 2^n входных наборах), то независимо от формы задания функции будет получена одна и та же таблица истинности.

Более компактной формой представления таблиц истинности булевых функций являются так называемые карты Карно. Для получения такой карты множество входных переменных разбивают на два непустых подмножества с числом переменных в них

8. Карта Карно

		x_3	
		0	1
$x_1 x_2$	00	00	00
	01	10	01
	11	10	11
	10	01	01

n_1 и n_2 , $n_1 + n_2 = n$. Карта Карно — это двумерная прямоугольная таблица с числом строк (столбцов) 2^{n_1} и числом столбцов (строк) 2^{n_2} . Число клеток при этом равно $2^{n_1} \cdot 2^{n_2} = 2^n$. Каждой строке (каждому столбцу) сопоставляется одно из n_1 (n_2)-разрядных двоичных чисел, располагаемых в порядке соседства, когда числа в двух соседних строках или столбцах отличаются друг от друга только в одном разряде. В клетках карты располагают значения выходных функций. Табл. 8 является таблицей истинности 7 в форме карты Карно ($n_1 = 2$; $n_2 = 1$).

В рамках функционального подхода для более или менее сложных объектов нельзя достичь требуемых значений таких показателей диагностирования, как глубина поиска и полнота обнаружения дефектов. Этим объясняется необходимость применения структурных математических моделей ОД вообще и комбинационных дискретных объектов в частности.

Дискретные объекты состоят, как правило, из отдельных компонент, соединенных между собой определенным образом с целью получения требуемых функциональных зависимостей. Часто компонента объекта — это конструктивно и функционально законченная элементарная часть объекта, не подлежащая дальнейшему расщеплению. Поэтому для описания компоненты достаточно ее функциональной математической модели. Комбинационные дискретные объекты состоят из комбинационных компонент, называемых *логическими элементами*.

Часто ограничиваются одновыходными логическими элементами, пред-

ставляя многовыходные логические элементы совокупностями одновыходных элементов с объединением их одноименных входов. Далее будут рассматриваться двоичные логические элементы, обладающие свойствами односторонней проводимости (от входов к выходам), независимости и сущности всех входов. Примерами таких элементов являются широко используемые бесконтактные полупроводниковые логические элементы.

В качестве структурной математической модели исправного комбинационного дискретного объекта обычно принимают правильную логическую сеть (схему). Множество функционально разных логических элементов объекта называют *базисом* логической сети и обозначают символом H . Логическая сеть определяется множествами $\{\eta_i\}$ логических элементов из базиса H , $\{x_\alpha\}$ входных полюсов и $\{z_\gamma\}$ выходных полюсов. Каждому входному (выходному) полюсу взаимно однозначно соответствует входная переменная x_α , $\alpha = 1, 2, \dots, n$ (выходная функция z_γ , $\gamma = 1, 2, \dots, k$).

Кроме того, для логической сети задают соединения входных полюсов с входами элементов, выходов элементов с выходными полюсами и, наконец, выходов одних элементов с входами других элементов. В частном случае входной полюс может быть соединен с выходным полюсом. Для представления входного полюса или выхода элемента, соединенного с несколькими входами элементов или выходными полюсами, в логической сети предусматривают узел разветвления. Условимся под *соединением* или *узлом* сети подразумевать связь входного полюса, выхода элемента или узла разветвления с входом элемента, с выходным полюсом или с узлом разветвления. Связь узла разветвления с входом элемента или выходным полюсом называют *ветвью разветвления*.

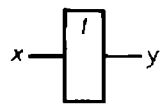
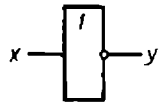
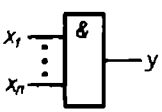
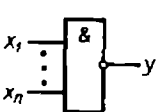
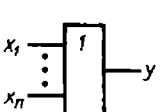
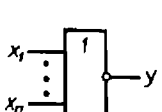
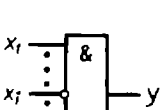

Логическую сеть, представляющую комбинационный бесконтактный объект, называют *правильной*, если никакие два выхода элементов не соединены вместе и если каждую из k функций, реализуемых на выходных по-

люсах сети, можно представить как булеву функцию входных переменных, сопоставленных с n входными полюсами сети.

Логической сети соответствует ориентированный граф, вершинам которого соответствуют логические элементы, входные и выходные полюсы сети и узлы разветвлений, а направленным дугам — соединения сети, причем дуги, инцидентные вершинам, которым соответствуют логические элементы, упорядочены. Это вызвано тем, что в общем случае функция y_i , реализуемая элементом η_i , несимметрична относительно перестановок входных переменных элемента. Для одновыходных элементов достаточно упорядочить дуги, заходящие в указанные вершины. Таким образом, при задании дуги в графе логической сети, кроме указания вершин, которые она соединяет, в общем случае указывают номер входа элемента, соответствующего вершине, в которую заходит рассматриваемая дуга. Будем считать этот номер весом рассматриваемой дуги. Дуги, заходящие в вершины, которые соответствуют элементам, симметричным относительно перестановок их входов, можно не взвешивать, как и дуги, заходящие в вершины, которым соответствуют выходные полюсы сети. Граф логической сети дискретного объекта обычно представляют графически.

В табл. 9 приведен перечень типовых двоичных одновыходных логических элементов, часто называемых *вентильями*. Элементы *И*, *ИЛИ*, *НЕ* называют *булевыми логическими элементами*, а их совокупность — *булевым базисом*. Логический элемент является простым, т. е. принадлежит *простому базису*, если существует представляющая его логическая сеть в булевом базисе, не содержащая узлов разветвлений. В противном случае элемент называется сложным. Все элементы, приведенные в табл. 9, простые. Примерами сложных элементов являются элементы, реализующие функцию неравнозначности (сумму по модулю 2) или функцию равнозначности (эквивалентности) от двух входных переменных.

9. Перечень типовых двоичных логических элементов

Название реализуемой функции	Реализуемая функция	Условное обозначение	Изображение на схемах
Повторение	$y = x$	<i>П</i>	
Отрицание (инверсия)	$y = \bar{x}$	<i>НЕ</i>	
Конъюнкция	$y = x_1, x_2, \dots, x_n$	<i>И</i>	
Отрицание конъюнкции (штрих Шеффера)	$y = \overline{x_1, x_2, \dots, x_n}$	<i>И-НЕ</i>	
Дизъюнкция	$y = x_1 \vee \dots \vee x_n$	<i>ИЛИ</i>	
Отрицание дизъюнкции (стрелка Пирса)	$y = \overline{x_1 \vee \dots \vee x_n}$	<i>ИЛИ-НЕ</i>	
Конъюнкция с запретом	$y = x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$	—	
Дизъюнкция с запретом	$y = x_1 \vee \dots \vee \bar{x}_i \vee \dots \vee x_n$	—	

Пример 14. На рис. 11 изображена логическая сеть комбинационного дискретного объекта в булевом базисе. В сети имеются четыре входа *a*, *b*, *c* и *d* и один выход *z*.

Понятие логической сети нетрудно распространить на представление комбинационных дискретных объектов, компонентами которых являются не только указанные выше логические

элементы, но также более сложные образования (макроэлементы), например, типовые микросхемы среднего и даже большого уровня интеграции (в частности, дешифраторы, мультиплексоры, демультимплексоры, коммутаторы и др.). Макроэлементом может быть названа любая выделенная по тем или иным соображениям подсеть логической сети, первоначально представленной в некотором другом базисе.

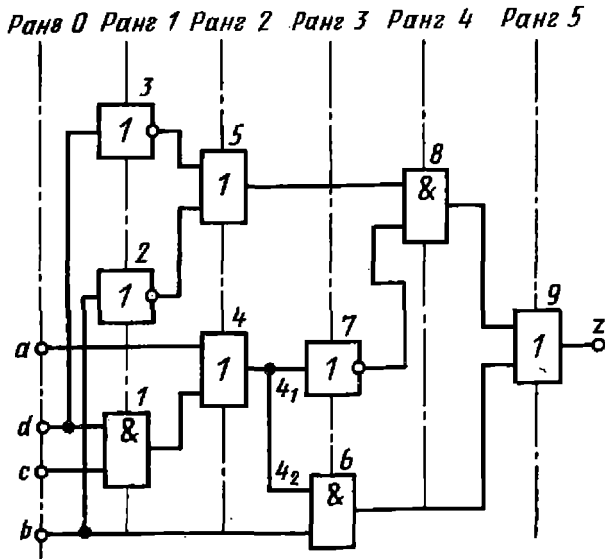


Рис. 11. Логическая сеть (пример)

Элементы логической сети, не имеющие контуров, могут быть упорядочены по рангам. К нулевому рангу относятся входные полюсы сети. Входами элементов ранга j обязательно являются выходы элементов ранга $j-1$ и, возможно, входные полюсы и выходы элементов ранга, меньшего $j-1$. Логические элементы сети нумеруют, как правило, в порядке неубывания их рангов. Для логической сети (см. рис. 11) ранги ее элементов указаны в верхней части рисунка, а номера элементов — над их изображениями.

По правильной логической сети легко получить функциональное описание соответствующего ей комбинационного объекта — аналитическую функциональную модель последнего. При этом предполагается, что известны функции, реализуемые элементами сети, и применяется метод прямой (начиная с первого ранга сети) или обратной (начиная с последнего ранга сети) подстановки.

Пример 15. Обозначим внутренние узлы сети символом y с нижним индексом, указывающим номер элемента, для которого соответствующий узел представляет исходящую дугу. Методом прямой подстановки для сети (см. рис. 11) получим:

$$\begin{aligned} \text{ранг 1: } & y_1 = cd, y_2 = b, y_3 = d; \\ \text{ранг 2: } & y_4 = y_1 \vee a = cd \vee a, \\ & y_5 = y_2 \vee y_3 = b \vee d; \end{aligned}$$

$$\text{ранг 3: } y_6 = by_4 = b(cd \vee a),$$

$$y_7 = \bar{y}_4 = (\bar{c} \vee \bar{d}) \bar{a};$$

$$\begin{aligned} \text{ранг 4: } y_8 &= y_7 y_5 = (\bar{c} \vee \bar{d}) \bar{a} (b \vee d) = \\ &= \bar{a} (b\bar{c} \vee d); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ранг 5: } z &= y_6 \vee y_8 = \\ &= b(cd \vee a) \vee \bar{a}(b\bar{c} \vee d) = \\ &= ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}b\bar{c}. \end{aligned}$$

Пример 16. Метод обратной подстановки для той же сети дает:

$$\text{ранг 5: } z = y_6 \vee y_8;$$

$$\text{ранг 4: } z = y_6 \vee y_7 y_5;$$

$$\text{ранг 3: } z = by_4 \vee \bar{y}_4 y_5;$$

$$\text{ранг 2: } z = b(y_1 \vee a) \vee$$

$$\vee (\overline{y_1 \vee a})(y_2 \vee y_3);$$

$$\begin{aligned} \text{ранг 1: } z &= b(cd \vee a) \vee (\bar{c} \vee \bar{d}) \bar{a} \times \\ &\times (b \vee d) = ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}b\bar{c}. \end{aligned}$$

Выражение для инверсных выходных функций логической сети можно получить либо путем инвертирования формул, представляющих прямые функции, либо непосредственно по сети, пользуясь процедурами прямой или обратной подстановки. В последнем случае операции подстановок выполняются над инверсными входными переменными или над инверсными выходными функциями.

Пример 17. Процедура обратной подстановки для получения инверсной функции \bar{z} сети (см. рис. 11) дает:

$$\text{ранг 5: } \bar{z} = \overline{y_6 \vee y_8} = \bar{y}_6 \bar{y}_8;$$

$$\text{ранг 4: } \bar{z} = \bar{y}_6 (\bar{y}_7 \vee \bar{y}_5);$$

$$\text{ранг 3: } \bar{z} = (b \vee \bar{y}_4)(y_4 \vee \bar{y}_5);$$

$$\text{ранг 2: } \bar{z} = (b \vee \bar{y}_1 \bar{a})(\bar{y}_1 \vee a \vee \bar{y}_2 \bar{y}_3);$$

$$\text{ранг 1: } \bar{z} = [\bar{b} \vee (\bar{c} \vee \bar{d}) \bar{a}] (cd \vee a \vee \vee bd) = ab \vee \bar{b}cd \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c}d.$$

Булевы функции могут быть также заданы *альтернативными графами* [67]. Вершинам альтернативного графа соответствуют переменные (инверсии переменных) булевых функций. Каждая вершина имеет две исходящие дуги. При графическом изображении альтернативных графов принято: исходящие дуги, направленные слева направо (сверху вниз), соответствуют единичным (нулевым) значениям переменных или инверсий переменных. Единственная начальная вершина графа не имеет заходящих дуг. Конечные вершины (их число может быть любым) отличаются тем, что хотя бы одна из их исходящих дуг не является заходящей дугой ни для какой вершины графа (такие исходящие дуги при представлении графов могут быть опущены).

В табл. 10 приведены *элементарные альтернативные графы* для ряда типовых логических элементов простого и сложного базисов.

Альтернативные графы для булевых функций, заданных, например, формулами, строятся на основе применения последовательного разложения по их переменным [48]. Такие альтернативные графы называют *функциональными*. Сложность получаемых функциональных альтернативных графов зависит от порядка выбора переменных при разложении, а также от возможностей дополнительных упрощений графов за счет объединения его вершин.

Пример 18. На рис. 12 даны альтернативные графы, представляющие собой булеву функцию $ab \vee \bar{b}cd \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c}d$ из предыдущего примера. На рис. 12, а показан граф, получаемый при выборе в качестве первой переменной при разложении переменной a (начальной вершины); на рис. 12, б — переменной b . Первый граф содержит пять вершин, из которых три конечные (b, \bar{b}, d), второй — шесть вершин, из них пять конечных ($a, \bar{a}, c, \bar{c}, d$).

Каждый путь в альтернативном графе от начальной вершины до исходя-

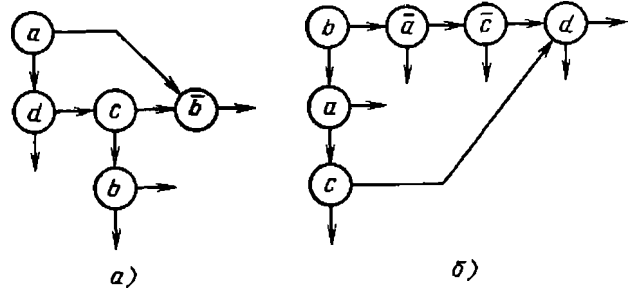


Рис. 12. Альтернативные графы булевой функции

щей дуги какой-либо конечной вершины соответствует набору значений переменных функции, представленных вершинами пути. При этом выходе из графа по исходящей дуге, направленной слева направо, соответствует *единичный набор* значений переменных (набор, на котором функция равна единице), а дуге, направленной сверху вниз, — *нулевой набор* (функция равна нулю). Например, на рис. 12, а путь (a, d, c, \bar{b}) с выходом вправо соответствует единичному набору 0 0 1 1 ($a b c d$), а с выходом вниз — нулевому набору 0 1 1 1. На том же графе путь (a, d) с выходом вниз соответствует нулевому набору 0 ~ ~ 0.

Аналитическая запись выходных функций (см. примеры 15—17) комбинационного объекта в общем случае не отражает структуры представляющей его логической сети. Однако существуют другие виды аналитической записи выходных функций комбинационного объекта, содержащие информацию о его структуре и позволяющие восстанавливать граф его логической сети. Такими формами являются, например, скобочная форма (СФ) специального вида, а также эквивалентная нормальная форма (ЭНФ) представления булевых функций.

Скобочная форма может быть получена процедурой прямой или обратной подстановки по ранжированной логической сети с пронумерованными элементами. Особенность применения процедур подстановки состоит в том, что выражение для прямой (или инверсной) функции, реализуемой элементом с номером i , во всех его вхождениях заключают в скобки, снабженные нижним индексом i , и не производят ни-

10. Элементарные альтернативные графы

Реализуемая функция	Начертание на схемах	Альтернативный граф функции
$y = \bar{x}$		
$y = x_1 x_2 x_3$		
$y = \overline{x_1 x_2 x_3}$		
$y = x_1 \vee x_2 \vee x_3$		
$y = \overline{x_1 \vee x_2 \vee x_3}$		
$y = x_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 x_2$		
$y = x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee x_2 x_3$		

каких раскрытий скобок и исключений отрицаний над скобками преобразованием внутрискобочных выражений.

Пример 19. Применение процедуры обратной подстановки для получения

скобочной формы выходной функции сети по рис. 11 дает:

ранг 5: $z = (y_6 \vee y_5)_6;$

ранг 4: $z = [y_6 \vee (y_7 y_6)]_6;$

ранг 3: $z = \{(by_4)_6 \vee [(\bar{y}_4)_7 y_5]_8\}_9;$

ранг 2: $z = \{[b(y_1 \vee a)]_4\}_6 \vee$

$\vee \{[(y_1 \vee a)]_4\}_7 (y_2 \vee y_3)_5\}_8\}_9;$

ранг 1: $z = \{[b[(cd)_1 \vee a]_4]_6 \vee$

$\vee \{[(cd)_1 \vee a]_4\}_7 \times$

$\times [(b)_2 \vee (d)_3]_5\}_8\}_9.$

По скобочной форме, полученной указанным образом, можно однозначно восстановить соответствующую ей логическую сеть.

Эквивалентную нормальную форму можно получить как по скобочной форме, так и непосредственно по логической сети с предварительным ее преобразованием в древовидную. В первом случае в СФ избавляются от лишних (с точки зрения правил записи булевых формул) скобок путем перенесения их нижних индексов непосредственно к символам входных переменных (к буквам СФ). При этом полученная и упорядоченная в порядке возрастания совокупность индексов при той или иной букве указывает в терминах номеров элементов сети путь, существующий в логической сети от соответствующего данной букве входа до выхода. В целях упрощения записи можно выполнить «перекодирование» совокупностей индексов таким образом, чтобы отличающимся совокупностям при одинаковых буквах соответствовали разные новые (более короткие) индексы. Заключительными операциями перехода от СФ к ЭНФ являются операции исключения инверсий над скобками и раскрытия скобок по правилам булевой алгебры.

Пример 20. Из СФ (пример 19) после удаления лишних скобок получим

$$z = b_{69}c_{1469}d_{1469} \vee b_{69}a_{469} \vee$$

$$\vee (c_{14789}d_{14789} \vee a_{4789}) (\bar{b}_{2589} \vee \bar{d}_{3589}).$$

Перекодируем совокупности индексов следующим образом:

$$a \begin{cases} 469 \rightarrow 1 \\ 4789 \rightarrow 2 \end{cases}; \quad b \begin{cases} 69 \rightarrow 1 \\ 2589 \rightarrow 2 \end{cases};$$

$$c \begin{cases} 1469 \rightarrow 1 \\ 14789 \rightarrow 2 \end{cases}; \quad d \begin{cases} 1469 \rightarrow 1 \\ 14789 \rightarrow 2 \\ 3589 \rightarrow 3 \end{cases}.$$

После замены индексов, инвертирования первой скобки и раскрытия скобок окончательно имеем ЭНФ:

$$z = a_1b_1 \vee b_1c_1d_1 \vee \bar{a}_2\bar{b}_2\bar{c}_2 \vee \bar{a}_2\bar{b}_2d_2 \vee \\ \vee \bar{a}_2\bar{c}_2d_3 \vee \bar{a}_2d_2d_3.$$

Одновыходная логическая сеть является *деревом*, если эта сеть не содержит ни одной вершины, из которой исходит более одной дуги. Это означает, что разветвления входных полюсов и выходов логических элементов сети отсутствуют. Преобразование одновыходной логической сети без обратных связей к логической сети, имеющей вид дерева и функционально эквивалентной исходной сети при отождествлении одноименных входных полюсов, может быть выполнено следующим образом [55].

В исходной логической сети проверим, имеет ли она вершины с несколькими исходящими дугами. Если таких вершин нет, то заданная логическая сеть является деревом. В противном случае отметим все вершины, инцидентные нескольким исходящим дугам, и поместим их в список в порядке неубывания рангов этих вершин (входных полюсов, элементов). Возьмем первую вершину i из списка, имеющую $v_i \geq 2$ исходящих дуг. «Расщепим» ее на v_i вершин, имеющих по одной исходящей дуге, с одновременным повторением v_i раз подсети, для которой вершина i является выходным полюсом. Указанную подсеть будем называть i -подсетью. Присвоим номерам элементов и символам входных переменных разных i -подсетей индексы $1, 2, \dots, v_i$. Возьмем вторую вершину из исходного списка и повторим для нее указанную процедуру «расщепления» в полученной на первом шаге логической сети. При этом у номеров элементов и символов входных переменных, участвующих в «расщеплении», появляются или добавляются новые индексы. Выполнив последовательно описанные операции для каждой вершины из списка, получим искомое дерево, эквивалентное исходной сети, если в нем отождествить входные переменные, символы которых отличаются только индексами. Для краткости полученную сеть будем называть *эквивалентным деревом* (ЭД).

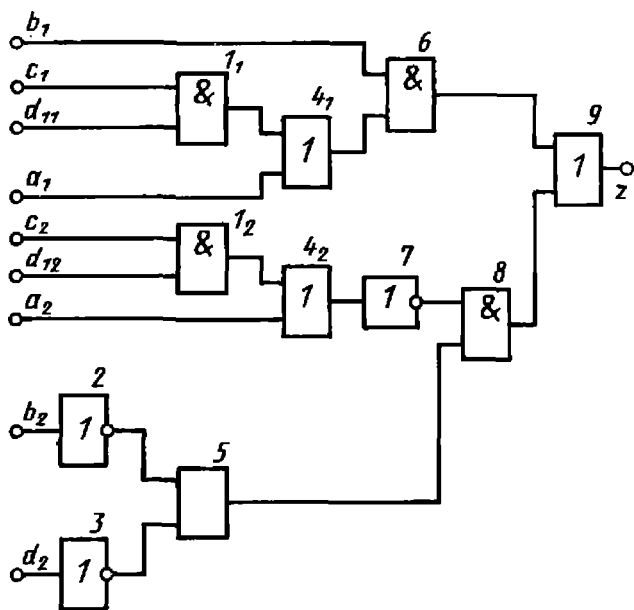


Рис. 13. Эквивалентное дерево логической сети (см. рис. 11)

Эквивалентная нормальная форма функции, реализуемой исходной логической сетью, может быть получена по ЭД при помощи процедур прямой или обратной подстановки, сопровождаемых приведением получаемых формул к нормальному виду путем исключения инверсий над скобками и раскрытием последних.

Пример 21. Для логической сети (см. рис. 11) эквивалентное дерево изображено на рис. 13. Входные полюсы b и d , а также выход элемента 4 (см. рис. 11) разветвляются. Вначале «расщепляют» входные полюсы b и d на b_1b_2 и d_1d_2 , затем 4-подсеть представляется дважды: 4₁-подсетью (элементы 1₁, 4₁; входные полюсы c_1 , d_{11} , a_1) и 4₂-подсетью (1₂, 4₂; c_2 , d_{12} , a_2).

ЭНФ, полученная по ЭД, имеет вид

$$z = a_1b_1 \vee b_1c_1d_{11} \vee \bar{a}_2\bar{b}_2\bar{c}_2 \vee \bar{a}_2\bar{b}_2d_{12} \vee \bar{a}_2\bar{c}_2d_2 \vee \bar{a}_2d_{12}d_2,$$

отличающийся от ЭНФ, полученной по СФ в примере 20, только индексацией буквы d .

По ЭД может быть получена также обратная (инверсная) эквивалентная нормальная форма (ОЭНФ) функции

$$\bar{z} = a_2\bar{b}_1 \vee \bar{b}_1c_2d_{12} \vee \bar{b}_1b_2d_2 \vee \bar{a}_1a_2\bar{c}_1 \vee \bar{a}_1\bar{c}_1c_2d_{12} \vee \bar{a}_1\bar{b}_2\bar{c}_1d_2 \vee \bar{a}_1a_2d_{11} \vee \bar{a}_1c_2\bar{d}_{11}d_{12} \vee \bar{a}_1\bar{b}_2d_{11}d_2.$$

Каждая буква ЭНФ (ОЭНФ) представляет входную переменную исходной сети. Например, буква \bar{d}_{12} в приведенной в примере 21 ЭНФ является отрицанием входной переменной d_{12} ЭД (см. рис. 13) и представляет входную переменную d исходной сети (см. рис. 11). С каждой буквой в ЭНФ ассоциирован вполне определенный путь в ЭД и в исходной сети от соответствующего входного полюса до выходного. Например, с буквой \bar{d}_{12} ассоциирован путь в ЭД от входного полюса d_{12} через элементы 1₂, 4₂, 7, 8 и 9 до выхода z , а в исходной сети — от входного полюса d через элементы 1, 4, 7, 8 и 9 также до выхода z . И наоборот, каждому возможному пути от входа ЭД или исходной сети к выходу в ЭНФ соответствует по крайней мере одна буква (одно вхождение буквы). Каждый дизъюнктивный член (будем называть его *термом*) ЭНФ и ОЭНФ является условием равенства выходной функции 1 (0), т. е. $z = 1$ (0), если все буквы хотя бы одного терма ЭНФ (ОЭНФ) принимают значения 1.

В ЭНФ (ОЭНФ), как в форме представления булевой функции, в качестве символов переменных используют буквы с индексами. Иными словами, при построении ЭНФ (ОЭНФ) нельзя удалять никакие буквы или термы, несмотря на их логическую избыточность. Например, в построенной ЭНФ логически избыточными являются три последних терма (сокращаясь до $\bar{a}\bar{d}$, последний терм поглощает два предыдущих). ОЭНФ из примера 21 содержит шесть логически избыточных термов. Логическую избыточность легко проверить, сравнивая ЭНФ и ОЭНФ с «обычной» нормальной формой представления функции и ее отрицания (см. примеры 16 и 17).

Структура логической сети комбинационного объекта может быть косвенно отображена также при ее представлении *структурными альтернативными графами* [7]. Древоподобные структуры, а также структуры, не имеющие разветвлений выходов логических элементов, представляются единственным альтернативным графом; структуры с внутренними разветвлениями —

совокупностью альтернативных графов, каждый из которых является поддеревом исходной структуры. Входами поддеревьев служат внешние входы логической сети и ветви внутренних узлов разветвлений, а выходами — выходы логической сети и узлы разветвлений.

Структурные альтернативные графы строят по логической сети путем последовательной суперпозиции (замены отдельных вершин элементарными альтернативными графами), начиная с выходных элементов поддеревьев сети.

Пример 22. Логическая сеть (см. рис. 11) содержит два поддерева — одно с выходом z и входами $b, d, 4_1$ и 4_2 (4_1 и 4_2 — ветви узла разветвления 4) и второе с выходом 4 и входами a, c и d . На рис. 14, а приведена последовательность построения структурного альтернативного графа для z -поддерева; на рис. 14, б — для 4-поддерева. Первым фрагментом для z -поддерева является элементарный альтернативный граф (см. табл. 10) элемента 9 (ИЛИ). На втором шаге вершину 8 первого фрагмента заменяют элементарным альтернативным графом элемента 8 (И), и так далее до получения графа, все вершины которого представляют входные переменные z -поддерева. Аналогичные операции выполняются для 4-поддерева.

Булеву функцию n переменных можно отобразить на n -мерный куб. Такой куб содержит 2^n вершин. Каждые две вершины, соседние по одной переменной, соединяют ребром. Каждой вершине соответствует свой набор значений всех n переменных функций и единичное или нулевое значение функции на этом наборе. Единичные наборы (вершины n -мерного куба, на которых функция принимает значение 1) называют 0-кубами. Пары 0-кубов, отличающихся значениями только одной переменной, образуют 1-кубы. Например, два 0-куба 101 и 100 некоторой функции трех переменных a, b, c образуют 1-куб, обозначаемый $10\sim$. Символ \sim (тильда) ставят на месте переменной, по которой 0-кубы являются соседними. Аналогично определяют кубы более высокой размерности. Так, четыре 0-куба 101, 100, 110 и 111 образуют 2-куб $1\sim\sim$.

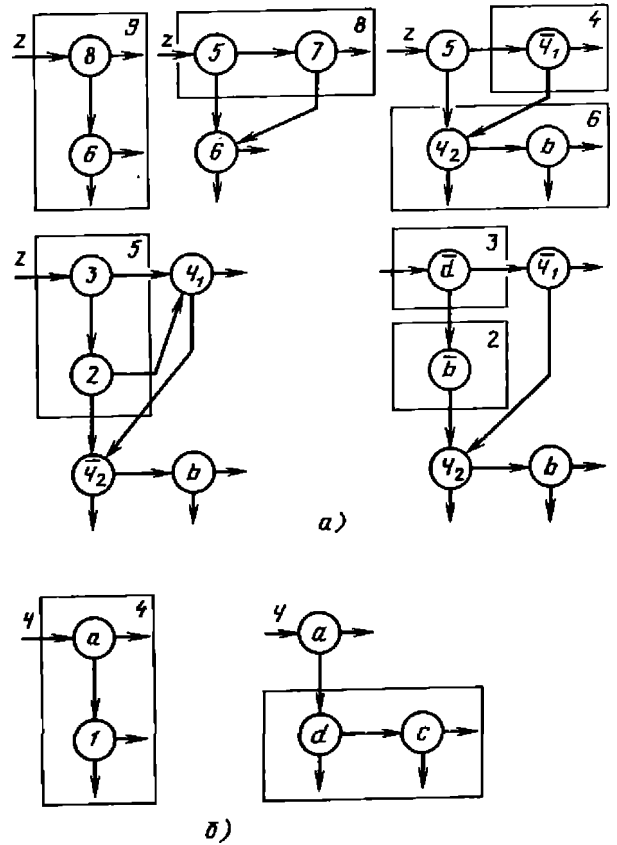


Рис. 14. Структурные альтернативные графы для логической сети (см. рис. 11)

С помощью комплексов кубов булевы функции представляют в виде так называемых *сжатых таблиц истинности*, более компактных, чем обычные таблицы истинности, содержащие перечень всех 0-кубов для единичных и нулевых значений функции.

Сжатые таблицы истинности для ряда типовых логических элементов приведены в табл. 11—15.

Пример 23. Для функций z_1 и z_2 из примера 12 сжатые таблицы истинности даны соответственно в виде табл. 16 и 17.

От задания единичных значений булевой функции в виде дизъюнктивной нормальной формы также можно перейти к ее заданию комплексами кубов.

11. Элемент И

x_1	x_2	y
0	\sim	0
\sim	0	0
1	1	1

12. Элемент ИЛИ

x_1	x_2	y
0	0	0
\sim	1	1
1	\sim	1

13. Элемент И-НЕ

x_1	x_2	y
\sim	0	1
0	\sim	1
1	1	0

14. Элемент ИЛИ-НЕ

x_1	x_2	y
0	0	1
\sim	1	0
1	\sim	0

15. Мажоритарный элемент

x_1	x_2	x_3	y
0	0	\sim	0
0	\sim	0	0
\sim	0	0	0
\sim	1	1	1
1	\sim	1	1
1	1	\sim	1

16. Сжатая таблица истинности функции z_1

x_1	x_2	x_3	z_1
\sim	1	0	1
1	1	\sim	1
0	\sim	1	0
\sim	0	\sim	0

17. Сжатая таблица истинности функции z_2

x_1	x_2	x_3	z_2
\sim	1	1	1
1	\sim	1	1
1	0	\sim	1
0	\sim	0	0
\sim	1	0	0
0	0	\sim	0

18. Сжатая таблица истинности функции z

a	b	c	d	z
1	1	\sim	\sim	1
0	\sim	\sim	1	1
\sim	1	1	1	1
0	0	0	\sim	1

Пример 24. Для функции из примера 16, реализуемой логической сетью (см. рис. 11), вместо формулы

$$z = ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c}$$

получим сжатую таблицу истинности функции z (табл. 18).

Аналогично для инверсии функции

$$\bar{z} = ab \vee bcd \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c}$$

из примера 17 сжатой таблицей истинности является табл. 19.

К классу дискретных объектов, наряду с рассмотренными выше комбинационными объектами, построенными из логических элементов с односторонней проводимостью, относят также объекты, элементы которых обладают двусторонней проводимостью. Характерным представителем таких элементов является контакт электромеханического реле.

Для описания контактных схем, имеющих параллельно-последовательную структуру, пригодны без каких-либо изменений все приведенные ранее формы представления булевых функций. Некоторые особенности имеют контактные схемы, содержащие так называемые *мостиковые соединения*. Об-

19. Сжатая таблица истинности функции \bar{z}

a	b	c	d	\bar{z}
1	0	\sim	\sim	1
\sim	0	1	1	1
0	1	0	1	1

щее правило, которому необходимо следовать при описании любых дискретных объектов (в том числе объектов с элементами, обладающими двухсторонней проводимостью и имеющих мостиковые соединения), состоит в том, что должны быть заданы булевы функции, полностью определяющие условия проводимости между каждой парой узлов объекта, выделенных (т. е. представляющих интерес) при данном конкретном рассмотрении.

Пример 25. На рис. 15, а представлена контактная параллельно-последовательная реализация функции z для логической сети (см. рис. 11).

Схема реализует ту же функцию, что и логическая сеть (см. пример 15 или 16):

$$z = ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c}.$$

На рис. 15, б приведена реализация той же функции мостиковой контактной схемой. Однако при мостиковой реализации в схеме появились дополнительные пути, представленные двумя последними членами дизъюнктивной формы функции:

$$z = ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c} \vee a\bar{a}c \vee b\bar{b}c\bar{c}.$$

Указанные два члена логически избыточны, однако исключать их не следует (по аналогии с логически избыточными термами в ЭНФ или ОЭНФ).

Современная микроэлектронная элементная база содержит элементы, функционально эквивалентные элементам с двухсторонней проводимостью или имеющим «третье состояние» — *состояние высокого импеданса*, при котором элемент на соответствующих выводах не выдает и не воспринимает рабочих сигналов логического уровня 0 или 1. Настройка таких элементов на определенное поведение (передача рабочих сигналов в определенном направлении или отсутствие любой передачи) осуществляется путем подачи сигналов на их управляющие входы. Благодаря этому описание функционирования этих элементов на языке булевых функций также возможно, хотя и более сложно, чем для обычных однонаправленных логических элементов или элементов типа контактов электромеханических реле.

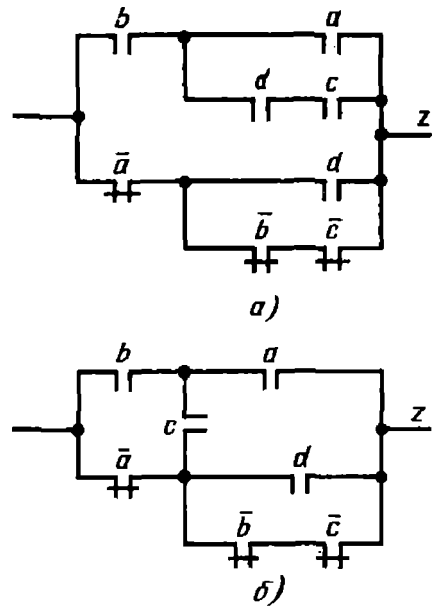


Рис. 15. Контактные схемы (примеры)

Приведенные выше формы описания комбинационных дискретных объектов были даны для одновыходных объектов (за исключением таблицы истинности в примере 12). Описание многовыходных объектов чаще всего представляет совокупность описаний для каждого выхода в отдельности.

Модели дефектов и модели неисправных комбинационных объектов. Под *физической неисправностью* (дефектом) s_i дискретного объекта понимают последствия некоторого события (явления), которое преобразует исправный объект A в некоторый другой, неисправный (в том или ином смысле отличный от A) объект A^i и поддерживает его в этом i -неисправном состоянии в течение интервала времени Δt . Подразумевается, что входы (выходы) объекта A взаимно однозначно сопоставлены входам (выходам) объекта A^i .

Одни и те же последствия некоторого события в разных случаях могут классифицироваться либо как неисправность объекта, либо как исправность. Это зависит от условий, определяющих конкретную постановку задачи диагностирования, и находит формальное отражение в выборе математических моделей объекта диагностирования и его неисправностей. Например, возможны последствия, которые являются неисправностями при описании объекта на структурном

уровне и не являются таковыми при функциональном описании объекта.

Вне зависимости от того, какую модель используют при описании исправного объекта A , множество всех неисправностей, которые могут в нем возникнуть, делят на два класса. Неисправность s_i называют *правильной*, если i -неисправный объект A^i описывается моделью, принятой для описания исправного объекта. В противном случае неисправность называют *неправильной*.

При функциональном подходе не выполняют анализ и сравнение процессов внутри объектов A и A^i , а сопоставляют лишь их внешнее поведение. Если объект A является комбинационным, то неисправность, преобразующая его в другой также комбинационный объект A^i , является *правильной* неисправностью. При функциональном описании комбинационного объекта A в предположении, что возможные неисправности в нем являются *правильными*, сопоставление объектов A и A^i заключается в сравнении значений соответствующих выходных функций $(z_\gamma)_j$ и $(z_\gamma)_j^i$, $\gamma = 1, 2, \dots, k$, на входных наборах $\{X_j\}$, $j \in \{1, 2, \dots, 2^n\}$ из множества $\{X\}$ всех возможных наборов. При описании исправного объекта A , так же как и при сопоставлении объектов A и A^i , рассматривают лишь на заданном подмножестве $\{X\}_z$ множества $\{X\}$ входных наборов. Подмножество $\{X\}_z$ может содержать, например, только те входные наборы, которые возможны в процессе рабочего функционирования объекта A .

Исследуемый объект A^* считают содержащим неисправность s_i (или неисправным при функциональном подходе), т. е. $A^* = A^i$, если при сравнении со своим исправным эталоном A в нем найдется по крайней мере один входной набор $X_j \in \{X\}_z$, на котором выходной набор Z_j исправного объекта отличен от выходного набора Z_j^* исследуемого объекта. Иначе исследуемый объект считают исправным, т. е. $A^* = A$, так как его внешнее поведение на множестве $\{X\}_z$ совпадает с поведением исправного объекта. При

этом не исключено, что имеется такой входной набор $X_j \in \{X\}$, при котором $Z_j \neq Z_j^*$, но при функциональном подходе к оценке технического состояния исследуемого объекта на множестве наборов $\{X\}_z \subset \{X\}$ это не имеет значения.

Рассмотренная постановка характерна для задач проверки работоспособности и проверки правильности функционирования комбинационных объектов. При решении задач проверки исправности и поиска неисправностей объекта в большинстве случаев нельзя ограничиться его функциональным описанием, а тем более на ограниченном числе входных наборов.

В реальных объектах, описываемых моделью комбинационных схем, возможны такие физические явления, при которых i -неисправное устройство A^i нельзя отнести к классу комбинационных объектов. Например, при описании устройства A^i может потребоваться его модель конечного автомата с памятью. В этом случае речь идет о классе *неправильных* неисправностей, и сопоставление поведения объектов A и A^i оказывается более сложным, требующим привлечения методов исследования дискретных объектов с памятью.

При задании комбинационного объекта A *правильной* логической сетью некоторое физическое явление, происшедшее в нем, классифицируют как неисправность s_i , а объект A^i — как *неисправный*, если логическая сеть, представляющая объект A^i , не тождественна логической сети объекта A . Как следует из определения логической сети, рассматриваемое явление (*неисправность*) приводит либо к нарушению функционирования хотя бы одного логического элемента сети, представляющей объект A , либо к искажению ее связей. Если объект A^i описывается при этом *правильной* логической сетью, то рассматриваемая неисправность s_i принадлежит к классу *правильных* неисправностей.

Уточним это определение. Понятие *неисправности* логического элемента сети подразумевает функциональный

подход к оценке технического состояния элемента, рассматриваемого как функционально заданный комбинационный подобъект. Каждый такой элемент η_i с n_i входами описывается реализуемой им функцией, заданной на множестве всех 2^{n_i} входных наборов. Функционирование логического элемента нарушено (элемент неисправен), если он реализует функцию, значение которой не совпадает с соответствующим значением функции, реализуемой исправным элементом, хотя бы на одном входном наборе элемента. Неправильная неисправность логического элемента сети рассматривается как неправильная неисправность объекта, заданного логической сетью.

Под *искажением связей логической сети* понимается отсутствие изоморфности взвешенных графов логической сети исправного объекта A и логической сети, представляющей i -неисправный объект A^i .

Приведем несколько примеров физических неисправностей в комбинационных объектах.

Пример 26. На рис. 16 изображена принципиальная схема двухвходового логического элемента И-НЕ. В исправном состоянии этот элемент реализует функцию $y = x_1 x_2$. Зададимся перечнем физических явлений, возможных в рассматриваемом элементе:

- обрыв цепи коллектора триода T ;
- короткое замыкание цепи коллектор—эмиттер;
- короткое замыкание диода D_3 ;
- короткое замыкание резистора R_1 ;
- обрыв в диоде D_1 ;
- обрыв в диоде D_3 ;
- короткое замыкание диода D_1 .

Обозначим функции, реализуемые элементом в каждом из указанных случаев, соответственно через y^1, y^2, \dots, y^7 . Эти функции могут быть определены путем анализа поведения элемента при наличии в нем соответствующих неисправностей. Не исключено, что для этого в общем случае может понадобиться физическое моделирование элемента и его неисправностей. Пусть указанные функции являются такими же, какие приведены в табл. 20, представляющей собой

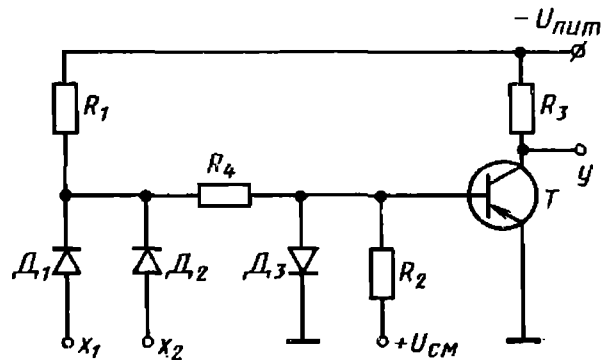


Рис. 16. Логический элемент И-НЕ с двумя входами

совокупность таблиц истинности функции y и функций y^1, y^2, \dots, y^7 .

Сравним столбцы y^1, y^2, \dots, y^7 со столбцом y табл. 20; отметим, что с функциональной точки зрения только явления $y_1—y_6$ могут быть классифицированы как правильные неисправности элемента. Обрыв в диоде D_3 не вносит изменений в функционирование элемента ($y^6 = y$) и поэтому не может расцениваться как неисправность.

Диод D_3 в схеме элемента не выполняет логических функций и необходим для увеличения надежности работы элемента, предохраняя базу триода от положительных импульсов помех. Короткое замыкание диода D_1 также не изменяет функцию, реализуемую на выходе элемента ($y^7 = y$), но при этом нарушается условие разделительности (независимости) входов элемента. Действительно, при подаче на вход x_2 сигнала 0 на входе x_1 будет наблюдаться сигнал 0 независимо от того, какой сигнал подается на него извне (подразумевается, что входные сигналы поступают с выходов аналогичных элементов). Таким образом, короткое замыкание диода D_1 является

20. Таблица истинности

x_1	x_2	y	y^1	y^2	y^3	y^4	y^5	y^6	y^7
0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
0	1	1	1	0	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
1	1	0	1	0	1	0	0	0	0

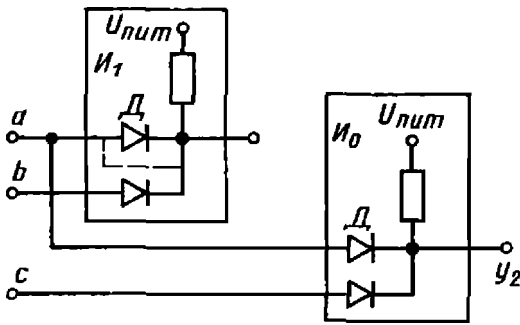


Рис. 17. Логическая схема, в которой места возникновения и проявления дефекта не совпадают

неправильной неисправностью элемента.

Особенность рассмотренной неисправности диода D_1 состоит в том, что она не нарушает функциональных свойств того элемента, в котором она возникает, но может нарушить поведение другого, связанного с ним исправного элемента объекта. Иными словами, в данном случае место возникновения неисправности не совпадает с местом его проявления.

Пример 27. В схеме, изображенной на рис. 17, замыкание диода D в элементе I_1 не меняет функцию, реализуемую на его выходе ($y_1 = ab$), но функция, реализуемая на выходе исправного элемента I_2 , при этом изменяется: вместо $y_2 = ac$ будет $y_2^i = abc$.

Нарушение условия разделительности входов элемента может в некоторых случаях вывести рассматриваемый объект из класса комбинационных.

Пример 28. На рис. 18 изображена комбинационная правильная логическая сеть, в которой при замыкании диода D в элементе I образуется существенная обратная связь. Действительно, при входном сигнале $a = 1$ элементы $I-HE_1$, $I-HE_2$ и I обра-

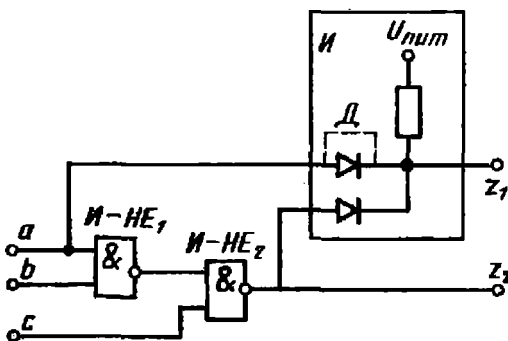


Рис. 18. Логическая сеть, в которой дефект вызывает образование существенной обратной связи

зуют потенциальный триггер с отдельными входами b и c .

В качестве неисправности можно рассматривать ошибочную установку в процессе монтажа объекта вместо одного логического элемента некоторого другого элемента, реализующего функцию, отличную от функции правильного элемента.

Среди наиболее часто встречающихся физических дефектов связей (соединений) элементов объекта можно выделить следующие: обрыв соединения; замыкание соединения с некоторой шиной питания; перепутывание связей; появление лишних связей; замыкание нескольких связей между собой; совокупность перечисленных выше неисправностей. Для большинства логических элементов обрыв входа с функциональной точки зрения эквивалентен подаче на оборванный вход некоторого постоянного сигнала, соответствующего одному из логических значений 0 или 1, т. е. константе 0 или 1.

Пример 29. Так, для элемента $I-HE$, изображенного на рис. 16, обрыв соединения, идущего на один из его входов, например x_1 , соответствует подаче на этот вход постоянного сигнала 1; при этом функция, реализуемая элементом с оборванным входом x_1 , соответствует столбцу y^b в табл. 20.

Как правило, замыкание какого-либо соединения с шиной питания также соответствует подаче на рассматриваемое соединение постоянного сигнала 0 или 1, т. е. соответствует изменению функции, реализуемой элементом, на входе или выходе которого произошло замыкание.

Перепутывание связей, появление лишних связей или лишних логических элементов в основном происходит в процессе производства. Перепутывание входов элемента, симметричного относительно перестановки его входов (например, элемента $IЛИ$), преобразует граф исходной логической сети в изоморфный граф, а поэтому такое перепутывание не расценивают как неисправность. Перепутывание входов элемента, несимметричного отно-

сительно некоторой перестановки его входов, эквивалентно изменению функции, реализуемой элементом. Лишние связи, лишние элементы и замыкание соединений между собой также могут вывести объект из класса объектов, описываемых правильными логическими сетями, и даже из класса комбинационных объектов.

До сих пор рассматривались физические явления, в результате которых неисправный объект по-прежнему оставался дискретным объектом для переработки двоичной информации. Количественные изменения параметров элементов, например прямых и обратных сопротивлений диодов, коэффициентов усиления триодов и другие явления могут привести к тому, что объект перестанет удовлетворять принятому представлению информации и способам описания ее переработки. Иногда для исследования подобных явлений изменяют условия работы объекта (например, изменяют питающие напряжения, частоту входных сигналов, температуру, нагрузки и др.), что в некоторых случаях позволяет использовать известный аппарат и модели для описания работы объектов с такого рода неисправностями.

Приведенное выше определение неисправности объекта, заданного своей структурой (логической сетью), не связано с сопоставлением выходных функций, реализуемых объектами A и A^i (в отличие от функционального подхода к определению технического состояния объекта). Явление, в результате которого логические сети объектов A и A^i становятся различными, расценивают как неисправность, хотя с функциональной точки зрения эти сети могут быть эквивалентными (реализовать одинаковые выходные функции). В этом случае неисправности называют *несущественными*, в отличие от *существенных* неисправностей, в результате появления которых системы передаточных функций объектов A и A^i становятся различными на заданном множестве $\{X\}_3$ входных наборов. Исследование несущественных неисправностей необходимо потому, что эти неисправности, не меняя функциональных свойств объекта, мо-

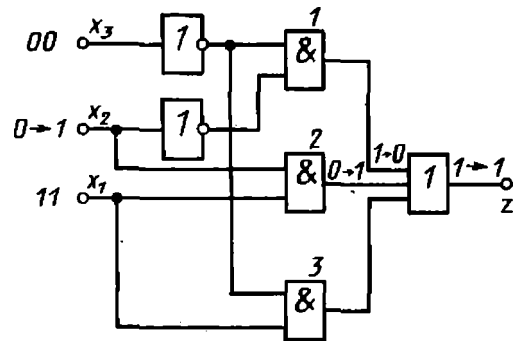


Рис. 19. Логическая сеть комбинационного объекта (неисправность приводит к появлению логических состязаний в объекте)

гут менять некоторые другие важные его показатели (например, безотказность, нагрузочные характеристики), а также вызвать появление в объекте *логических состязаний* или изменить функциональное поведение объекта при появлении в нем новых неисправностей и т. п.

В дискретных объектах в процессе их работы могут возникать непредусмотренные кратковременные импульсные сигналы в моменты переходов от одного входного набора или внутреннего состояния к другому. Физической причиной состязаний является разница во времени прохождения по цепям устройства сигналов, поступающих на различные входы одного и того же логического элемента или элемента памяти.

Пример 30. На рис. 19 изображена логическая сеть комбинационного объекта, свободного от логических состязаний при изменении значения любой одной входной переменной (это достигнуто введением избыточного элемента 3). При наличии константы 0 на выходе элемента 3 объект, продолжая реализовать ту же функцию, что и исправный объект, не свободен от состязаний при переходе от входного набора 100 ($x_1x_2x_3$) к набору 101 или от 101 к 100 — из-за наличия разных временных задержек в элементах 1 и 2 во время указанного перехода на выходе z может появиться импульсный сигнал 0 ($1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$).

При построении неявных математических моделей объектов диагностирования требуется задание математических моделей их дефектов. Это равносильно выбору из всех возможных

дефектов объекта некоторого класса дефектов, поддающихся формальному заданию. Так, для объектов, описываемых логической сетью, как правило, задаются классом правильных неисправностей. Среди них часто выделяют класс *логических неисправностей*, под которыми понимают неисправности логических элементов, а также неисправности связей, сводящиеся к изменению логических функций, реализуемых элементами. В классе логических неисправностей очень распространены так называемые *константные неисправности*, т. е. неисправности элементов и связей, которые эквивалентны такому изменению функций, реализуемых логическими элементами, которое соответствует подаче на один или несколько входов хотя бы одного элемента или на его выход постоянного сигнала (константы) 0 или 1. Так, к классу константных относят неисправности рассмотренного выше логического элемента И-НЕ, соответствующие столбцам y^1 — y^5 табл. 20.

Если предположить, что в объекте возможна только одна логическая неисправность, т. е. неисправность одного логического элемента, то в таких случаях говорят о классе *одиночных логических неисправностей*. Если в объекте допускается константная неисправность только одного входного полюса или только одного входа (выхода) одного элемента, то тем самым выделяют класс *одиночных константных неисправностей*. Под классом *кратных неисправностей* подразумевают произвольные (однако имеющие физический смысл) сочетания одиночных неисправностей, часто называемых составляющими данной кратной неисправности.

Анализ приведенных примеров показал, что большое число реальных физических дефектов осталось за пределами классов одиночных или кратных правильных логических или константных неисправностей, хотя даже класс константных неисправностей является достаточно широким. Одним из преимуществ применения при диагностировании правильных логических или константных неисправностей является возможность использования *невяных математических моделей* объ-

ектов, что в ряде случаев заметно облегчает вычисления при построении алгоритмов диагностирования. Для класса неправильных неисправностей, а также неисправностей, нарушающих условия двоичного представления информации в объекте, необходимо строить явные математические модели, что ограничивает область применения соответствующих методов задачами небольших размерностей.

Как уже указывалось, неисправность преобразует объект A в объект A^i и поддерживает его в этом состоянии в течение интервала времени Δt . Если этот интервал не меньше длительности процесса определения технического состояния объекта и, кроме того, начинается не позже, чем этот процесс, то неисправность считается *устойчивой*. Это значит, что в течение времени диагностирования техническое состояние объекта не изменяется, т. е., в частности, в нем не возникают новые и не исчезают имеющиеся дефекты. Если же за время диагностирования техническое состояние объекта изменяется за счет появления в нем новых или исчезновения имевшихся неисправностей, то последние будем называть *неустойчивыми*, независимо от абсолютных значений их интервалов Δt . Неустойчивую неисправность будем называть *сбоем*, если для нее Δt значительно меньше длительности процесса диагностирования.

Описание комбинационного дискретного объекта с помощью ЭНФ и ОЭНФ позволяет задавать одиночные и кратные константные неисправности входов логических элементов. Это достигается путем такой фиксации константами 0 и 1 букв ЭНФ (ОЭНФ), при которой получают функцию, эквивалентную функции, реализуемой неисправным объектом с соответствующей константной неисправностью (одиночной или кратной) его логических элементов.

Пример 31. Пусть в логической сети (см. рис. 11) имеется одиночная неисправность, тождественная 0, на выходе элемента b (будем обозначать это записью b^0). По поведению сети это эквивалентно тому, как если бы по меньшей мере на одном входе эле-

мента b сохранялся постоянный сигнал 0. Обращаясь к эквивалентному дереву сети на рис. 13, выделим то или иное поддереву, выход которого является входом элемента b , и его входные переменные. Любой набор значений этих входных переменных, при котором выход поддерева получает нулевое значение, является решением поставленной задачи. Поддереву, опирающееся на верхний вход элемента b , имеет единственную входную переменную b_1 . Требуемый входной набор при этом $b_1 = 0$. Входными переменными поддерева для нижнего входа элемента b являются переменные c_1, d_{11}, a_1 . Нулевое значение выхода этого поддерева будет получено на любом из входных наборов 000 ($a_1c_1d_{11}$), 001, 010.

Каждый из полученных входных наборов поддерева может быть использован для соответствующей фиксации букв ЭНФ, представляющей эквивалентное дереву (см. пример 20).

Одиночным константным неисправностям логической сети могут соответствовать кратные неисправности эквивалентного дерева. Это характерно для тех случаев, когда неисправный узел или элемент сети подвергается «расщеплению» при построении эквивалентного дерева. Например, неисправности 4^1 сети (см. рис. 11) соответствует кратная неисправность ($4_1^1, 4_2^1$) эквивалентного дерева (см. рис. 13).

Отображение кратных неисправностей эквивалентного дерева в виде букв ЭНФ (ОЭНФ) может быть выполнено аналогично описанному для одиночных неисправностей. Однако при этом необходимо предварительное выделение так называемых доминирующих одиночных составляющих кратной неисправности сети. Неисправность некоторого узла или элемента сети является *доминирующей*, если от этого узла до выхода сети имеется хотя бы один путь, не содержащий других неисправных узлов или элементов.

При задании объекта его ЭНФ и ОЭНФ операции перехода от неисправностей логической сети к фиксации букв не выполняют. Вместо этого фиксируют всеми возможными вари-

антами с помощью констант 0 и 1 каждую отдельную букву и возможно некоторые группы букв, что и определяет класс рассматриваемых при этом неисправностей объекта.

При скобочных формах задания булевых функций (см. пример 19) можно также установить соответствие между константными неисправностями узлов и элементов логической сети и фиксацией букв, а также скобок (т. е. заключенных в скобки выражений) константами 0 и 1. При задании комбинационного объекта альтернативными графами основным классом рассматриваемых неисправностей является класс константных неисправностей в узлах логической сети, хотя допустимо рассмотреть неисправности более широкого класса. Возможность обнаружения константных неисправностей объекта по его структурным альтернативным графам базируется на том, что каждой вершине этих графов сопоставлен единственный путь в соответствующем поддереву логической сети.

Для контактных схем константные неисправности эквивалентны физическим дефектам типа обрывов и закорачиваний контактов.

Наиболее общей, с точки зрения классов рассматриваемых неисправностей, является явная модель комбинационного объекта в виде таблицы функций неисправностей. *Таблица функций неисправностей* (ТФН) представляет собой совокупность таблиц истинности исправного объекта и всех его неисправных модификаций. Возможность рассмотрения любого физического дефекта объекта при применении ТФН определяется только возможностью получения таблицы истинности для соответствующей неисправной модификации объекта, т. е. для объекта, содержащего рассматриваемый дефект. Однако указанные преимущества ТФН удается использовать только для сравнительно простых объектов из-за высокой размерности ТФН, трудностей ее получения, хранения и обработки.

Для описания исправного комбинационного объекта и всех его неисправных модификаций в предположении кратных константных неисправ-

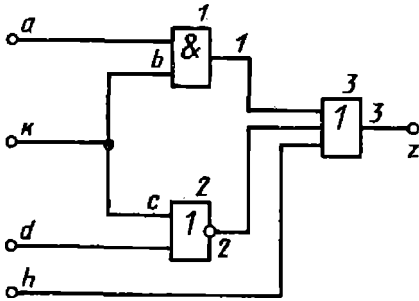


Рис. 20. Логическая сеть к примеру 32

ностей узлов логической сети объекта можно воспользоваться аналитической неявной моделью в виде так называемой *обобщенной функции выхода сети*. Для этой модели принимают, что каждый узел, например узел a , сети находится в одном из следующих α -состояний:

a^k — узел функционирует исправно (находится в состоянии k);

a^1 — в узле постоянно присутствует сигнал 1 (состояние 1);

a^0 — в узле постоянно присутствует сигнал 0 (состояние 0).

Если узлу a соответствует логическая переменная a , условия обобщенного единичного значения этой переменной запишутся в виде

$$\bar{a} = aa^k \vee a^1.$$

Аналогично условия обобщенного нулевого значения переменной a в узле a принимают вид

$$\bar{\bar{a}} = \bar{a}a^k \vee a^0.$$

Пользуясь методом прямой или обратной подстановки, с учетом приведенных условий по логической сети объекта можно получить выражение для обобщенной функции выхода сети. В этом выражении будут содержаться не только символы входных переменных сети, но также α -состояния всех ее узлов. Задав для всех узлов значения $a^k = 1$ и $a^1 = a^0 = 0$, получают обычное булево выражение, описывающее функцию, реализуемую исправным объектом. Задав некоторую комбинацию значений α -состояний, отличную от указанной, получают функцию, реализуемую неисправным объектом с неисправностью, соответствующей заданной комбинации значений α -состояний узлов.

Пример 32. Для сети на рис. 20 выражение для обобщенной функции выхода имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{z} = & \{[(aa^k \vee a^1) 1^k \vee 1^1] 3^k \vee 3^1\} \times \\ & \times \{[(kk^k \vee k^1) b^k \vee b^1] 1^k \vee 1^1\} \times \\ & \times 3^k \vee 3^1 \vee \{[(\bar{k}k^k \vee k^0) c^k \vee c^0] 2^k \vee \\ & \vee 2^1\} 3^k \vee 3^1 \vee \{[(\bar{d}d^k \vee d^0) 2^k \vee 2^1\} \times \\ & \times 3^k \vee 3^1 \vee [(hh^k \vee h^1) 3^k \vee 3^1]. \end{aligned}$$

При k -состоянии для всех узлов сети, равном 1, и при 1-состоянии и 0-состоянии всех узлов, равном 0, получим функцию исправной сети

$$\bar{z} = z = ak \vee \bar{k}d \vee h.$$

Для неисправности двух узлов сети $s = \{d^0, 1^0\}$ в выражении для \bar{z} принимаем, что d^0 и 1^0 , а также буквы $a^k, k^k, b^k, c^k, 2^k, h^k$ и $3^k = 1$, а остальные буквы, представляющие α -состояния узлов, — 0. В этом случае функция неисправной сети

$$\bar{z} = z^s = \bar{k} \vee h.$$

Обобщенная функция выхода является неявной формой задания таблицы функций неисправностей. Она содержит в себе описание поведения как исправного объекта, так и всех его неисправных модификаций при одиночных и кратных неисправностях.

3. ДИСКРЕТНЫЕ ОБЪЕКТЫ С ПАМЯТЬЮ

Дискретными объектами с памятью называют объекты, текущие значения выходных координат которых зависят не только от текущих значений их входных координат, но также от времени, т. е. от предыдущих входных воздействий. В памяти дискретных объектов сохраняется информация о предыдущих входных воздействиях и реализуется физически либо при помощи специальных элементов памяти (например, триггеров), либо путем организации контуров обратных связей, либо элементами временных задержек. Внутренние переменные дискретных объектов с памятью соответ-

ствуют обычно выходам триггеров, элементов, охваченных обратной связью, или элементов задержки. Совокупность значений выделенных внутренних переменных объекта с памятью в некоторый момент времени называют его *внутренним состоянием*. (В дальнейшем там, где это допустимо, определение «внутренний» будет опускаться.)

Модели исправных дискретных объектов с памятью. Общепринятой математической моделью объекта с памятью является *абстрактный* или *структурный конечный автомат*. В конечном автомате всегда можно выделить комбинационную часть и память (рис. 21). На этом рисунке автомат дан в однолинейном представлении, которое соответствует рассмотрению дискретного объекта с памятью как абстрактного конечного автомата. При этом предполагается, что память автомата реализована на задержках, каждая из которых обеспечивает запаздывание сигнала на одно и то же время.

Если изменение значений входного сигнала происходит одновременно с изменением выходного сигнала памяти через интервалы времени τ , то абстрактный автомат является *синхронным*, а интервал времени τ называется *тактом синхронизации*. В теории абстрактных автоматов принято называть внешний входной сигнал X , внешний выходной сигнал Z , выходной сигнал памяти Y соответственно входным символом, выходным символом, символом внутреннего состояния или сокращенно состоянием. Совокупность различных входных, выходных символов и символов состояний принято называть соответственно *входным алфавитом*, *выходным алфавитом* и *алфавитом состояний автомата*.

В соответствии с принятой идеализацией функционирование исправного абстрактного конечного автомата может быть задано двумя зависимостями:

$$Z_v = f_Z(X_v, Y_v) \quad (11)$$

и

$$Y_{v+1} = f_Y(X_v, Y_v), \quad (12)$$

где X_v, Z_v, Y_v — символы алфавитов соответственно входного $\{X\}$, выходного $\{Z\}$ и состояний $\{Y\}$, а ниж-

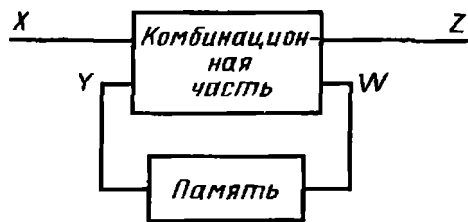


Рис. 21. Однолинейное представление конечного автомата:

X и Z — внешние сигналы автомата соответственно входной и выходной; W и Y — сигналы памяти соответственно входной и выходной

ние индексы являются номерами настоящего (текущего) и следующего тактов.

Для входных сигналов памяти можно записать

$$W_v = f_W(X_v, Y_v). \quad (13)$$

Кроме того, в данном случае

$$Y_{v+1} = W_v.$$

Зависимости (11) и (12) описывают автомат Мили. Для этого автомата выходные сигналы зависят как от входных сигналов, так и от выходных сигналов памяти, т. е. состояний. Известны также автоматы Мура, у которых выходные сигналы определяются только состояниями автомата.

Комбинационное устройство можно рассматривать как вырожденный случай автомата с памятью, когда выходной сигнал Z зависит только от внешних входных сигналов.

Задание автомата зависимостями (11) и (12) соответствует перечислению всех возможных пар входной сигнал — состояние и сопоставлению этим парам выходных сигналов и состояний. Это часто делают в табличной, графической или матричной форме.

Пример 33. Примером задания абстрактного автомата с входным алфавитом $\{X\} = \{X_1, X_2\}$, выходным алфавитом $\{Z\} = \{Z_1, Z_2\}$ и алфавитом состояний $\{Y\} = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5\}$ в табличной форме является табл. 21, называемая *таблицей переходов-выходов* автомата.

Строки таблицы соответствуют состояниям входов (символам входного алфавита, входным наборам) автомата в настоящий момент времени v , а

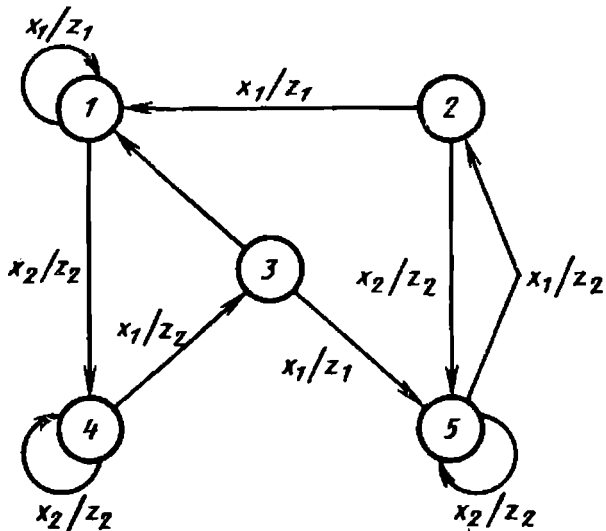


Рис. 22. Граф переходов-выходов автомата столбцы — состояниям автомата из алфавита $\{Y\}$ в тот же момент времени (в табл. 21 вместо символов Y_1, Y_2, Y_5 приведены индексы 1, 2, ..., 5).

21. Табличная форма абстрактного автомата

		$\{Y_v\}$				
		1	2	3	4	5
Y_{v+1}/Z_v						
$\{X_v\}$	X_1	1/Z ₁	1/Z ₁	5/Z ₁	3/Z ₂	2/Z ₂
	X_2	4/Z ₂	5/Z ₂	1/Z ₂	4/Z ₂	5/Z ₂

В таблицах переходов-выходов в шапке боковика указывается содержимое клеток таблицы, а именно состоя-

ния автомата в момент времени $v + 1$, и (через косую черту) выходные состояния (выходные символы) в момент времени v .

По таблице переходов-выходов легко проследить все возможные переходы из одного состояния автомата в другое, а также имеющие при этом место состояния выходов (символы выходного алфавита, выходные наборы). Например, автомат, находящийся в данный момент в состоянии 3, под действием входного символа X_1 перейдет в состояние 5 и при этом выдаст выходной символ Z_1 , а под воздействием входного символа X_2 перейдет в состояние 1 и выдаст выходной символ Z_2 .

Графической формой задания автомата является его *граф переходов-выходов* или сокращенно — *граф переходов*. Для рассмотренного в примере 33 автомата такой граф приведен на рис. 22. Вершины графа переходов-выходов соответствуют состояниям автомата, а дуги — возможным переходам из состояния в состояние (по направлению стрелок). Каждая дуга имеет символы входной, при подаче которого осуществляется соответствующий переход, и выходной (через косую черту), выдаваемый автоматом.

Матричной формой задания автомата является *матрица переходов-выходов* (для примера 33 приведена табл. 22). Это квадратная матрица, порядок ко-

22. Матрица переходов-выходов абстрактного автомата

		$\{Y_{v+1}\}$				
		1	2	3	4	5
$\{Y_v\}$	1	X_1/Z_1			X_2/Z_2	
	2	X_1/Z_1				X_2/Z_2
	3	X_2/Z_2				X_1/Z_1
	4			X_1/Z_2	X_2/Z_2	
	5		X_1/Z_2			X_2/Z_2

торой равен числу состояний автомата. Каждому состоянию в момент времени v сопоставляется строка матрицы, а в момент $v + 1$ — ее столбец. На пересечении строки i и столбца j ставится либо пара вход-выход (входной-выходной символы), если в автомате имеется переход из состояния Y_i в состояние Y_j , либо ничего не ставится, если такого перехода нет. Все три рассмотренные формы задания автоматов эквивалентны.

Различают устойчивые и неустойчивые состояния автомата. Автомат находится в *устойчивом* состоянии Y_i относительно входного символа X_j , если при этом входном символе состояние автомата не меняется, т. е. в моменты v и $v + 1$ остается равным Y_i . В противном случае состояние Y_i *неустойчиво*.

Рассмотренный выше автомат имеет устойчивое состояние 1 на входном символе X_1 , а также состояния 4 и 5 на входном символе X_2 . По таблице переходов-выходов устойчивые состояния находят путем просмотра ее столбцов: состояние, указанное в клетке некоторого столбца таблицы, устойчиво, если оно совпадает с состоянием, которому соответствует данный столбец. На графе переходов-выходов устойчивым состояниям соответствуют вершины, имеющие петли, а в матрице переходов-выходов устойчивыми являются состояния с непустыми диагональными клетками.

Различают *инициальные* и *неинициальные* автоматы. Для первых задано одно начальное состояние, а у вторых может быть любое начальное состояние. С физической точки зрения инициальный автомат требует наличия цепи установки его в начальное состояние по специальному сигналу. У неинициальных автоматов цепей установки в начальное состояние нет.

Рассмотренные однолинейная структурная схема рис. 21, таблицы, графы и матрицы переходов-выходов отображают абстрактный конечный автомат, у которого входные, выходные сигналы и состояния выражают символами. Для решения ряда практических задач пользоваться моделью абстрактного автомата не всегда удобно. Рассмотрим

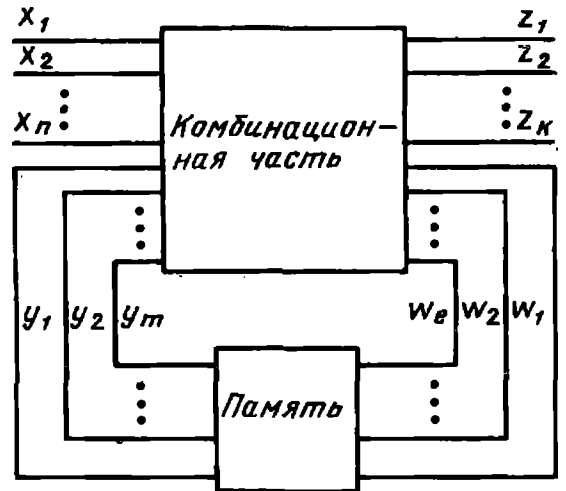


Рис. 23. Схема структурного автомата

другую модель, более детально описывающую дискретное устройство с памятью, — структурный конечный автомат.

Схема структурного автомата с выделенными комбинационной частью и памятью приведена на рис. 23. Автомат имеет: n внешних входов, которым сопоставлены входные переменные x_1, x_2, \dots, x_n ; k внешних выходов с соответствующими им выходными функциями z_1, z_2, \dots, z_k ; l входов памяти, на которых реализуются функции возбуждения w_1, w_2, \dots, w_l , и, наконец, m выходов памяти, которым соответствуют внутренние переменные y_1, y_2, \dots, y_m . Для исправного структурного автомата вместо (11)–(13) имеем

$$z_{i, v} = f_{z_i}(X_v, Y_v) \quad (14)$$

для всех $i = 1, 2, \dots, k$;

$$y_{j, v+1} = f_{y_j}(X_v, Y_v) \quad (15)$$

для всех $j = 1, 2, \dots, m$;

$$w_{g, v} = f_{w_g}(X_v, Y_v) \quad (16)$$

для всех $g = 1, 2, \dots, l$.

В этих формулах X_v — набор значений входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n и Y_v — набор значений внутренних переменных y_1, y_2, \dots, y_m (состояние) в момент времени v .

Пример 34. Для кодирования двух символов входов абстрактного автомата, рассмотренного в примере 33, достаточно одной входной переменной x , если значение $x = 0$ поставить в со-

23. Таблица переходов структурного автомата

$y'_1 y'_2 y'_3 / z$		$y_1 y_2 y_3$		
		000	001	010
x	0	000/0	000/0	100/0
	1	011/1	100/1	000/1

$y'_1 y'_2 y'_3 / z$		$y_1 y_2 y_3$	
		011	100
x	0	010/1	001/1
	1	011/1	100/1

ответствии X_1 , а значение $x = 1 - X_2$. Для кодирования выходных символов необходимы также одна выходная функция z ; символы состояний — три внутренние переменные y_1, y_2, y_3 . Пусть принято следующее кодирование:

$$x = \begin{cases} 0 - X_1 \\ 1 - X_2 \end{cases}; \quad z = \begin{cases} 0 - Z_1 \\ 1 - Z_2 \end{cases};$$

$$y_1 y_2 y_3 = \begin{cases} 000 - Y_1 \\ 001 - Y_2 \\ 010 - Y_3 \\ 011 - Y_4 \\ 100 - Y_5 \end{cases}.$$

Тогда вместо таблицы переходов-выходов абстрактного автомата (см. табл. 21) получаем таблицу перехо-

дов-выходов структурного автомата в виде табл. 23, в которой для упрощения индекс v опущен, а индекс $v+1$ заменен штрихом.

Воспользовавшись таблицей переходов-выходов структурного автомата, задают зависимости (24)—(26) в виде таблицы истинности, в которой значениями независимых переменных являются значения входных переменных, а также внутренних переменных в момент времени v , а значениями функций — значения внутренних переменных в момент времени $v+1$ и значения выходных функций в момент времени v .

Таблица истинности, построенная таким образом, может содержать меньше чем 2^{n+m} строк, так как некоторые комбинации значений ее независимых переменных могут отсутствовать в таблице переходов-выходов. Для структурного автомата из примера 34 таблица истинности (табл. 24) построена по данным табл. 23.

От таблицы истинности нетрудно перейти к тем или иным формам представления булевых функций, и, например, используя табл. 24, получим следующие дизъюнктивные нормальные формы:

$$z = y_2 y_3 \vee y_1 \bar{y}_2 \vee x;$$

$$y'_1 = x y_2 \bar{y}_3 \vee \bar{x} \bar{y}_2 y_3 \vee x y_1 \bar{y}_3;$$

$$y'_2 = \bar{x} y_2 y_3 \vee x \bar{y}_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \vee x y_2 y_3;$$

$$y'_3 = \bar{x} y_1 \bar{y}_2 \vee x \bar{y}_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 \vee x y_2 y_3.$$

Эти формы являются явным заданием зависимостей (14) и (15).

24. Таблица истинности структурного автомата

x	y_1	y_2	y_3	y'_1	y'_2	y'_3	z	x	y_1	y_2	y_3	y'_1	y'_2	y'_3	z
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1

Таблица истинности или соответствующая ей система булевых выражений являются описанием *комбинационного эквивалента* автомата с памятью. Представление конечного автомата (см. рис. 23) его комбинационным эквивалентом (рис. 24) соответствует условному разрыву обратных связей на выходах памяти.

Различают полностью определенные и не полностью определенные автоматы с памятью. Автомат является *полностью определенным*, если его поведение определено для всех 2^n входных наборов (символов входного алфавита) и для всех внутренних состояний, т. е. для каждого входного набора (входного символа) и каждого состояния определены как переход в следующее состояние, так и значения всех его выходов (выходной символ). В противном случае автомат является *не полностью определенным*. Следовательно, таблица переходов-выходов полностью определенного автомата имеет число строк, равное 2^n , и не содержит хотя бы частично незаполненных клеток.

Дискретный объект с памятью может иметь структурную форму логической сети. В этом случае базис сети может содержать элементы памяти (задержки, триггеры), а среди k выходных функций, реализуемых на выходных полюсах сети, найдется хотя бы одна, существенно зависящая от внутренних переменных сети, сопоставленных выходам элементов памяти или выходам элементов, охваченных обратными связями.

Комбинационная часть автомата всегда может быть представлена многовыходной логической сетью, входами которой являются внешние входы x_1, x_2, \dots, x_n автомата и выходы y_1, y_2, \dots, y_m памяти, а ее выходами — внешние выходы z_1, z_2, \dots, z_k автомата и входы w_1, w_2, \dots, w_l памяти. Поэтому все свойства и особенности логических сетей, а также способы получения их аналитических описаний, изложенные ранее для комбинационных объектов, остаются теми же и для комбинационных частей автоматов. Условный обрыв обратных связей позволяет выполнить ранжирование элементов ло-

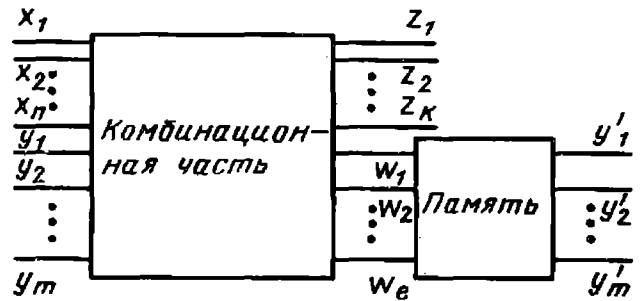


Рис. 24. Схема комбинационного эквивалента структурного автомата

гических сетей с памятью. Если память реализована при помощи контуров обратных связей, охватывающих логические элементы, то аналитические описания логических сетей с памятью могут быть получены теми же методами, которые применимы для комбинационных логических сетей. В этом случае блок памяти автомата содержит не связанные между собой прямые соединения. Предположим, что прямые соединения блока памяти являются повторителями, т. е. $y_i = w_i$ для всех $i = 1, 2, \dots, m = l$, и оборвем (условно) соединения сети на выходах блока памяти. Это ведет к замене блока памяти блоком повторителей, а логической сети с памятью — комбинационной логической сетью без обратных связей с входными полюсами $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m$ и выходными полюсами $z_1, z_2, \dots, z_k, y'_1, y'_2, \dots, y'_m$. Для описания такой сети могут быть использованы все те методы и приемы, которые были рассмотрены в предыдущем параграфе.

Рассмотрим получение аналитических описаний логических сетей, память которых реализована на триггерах. На рис. 25 приведена схема

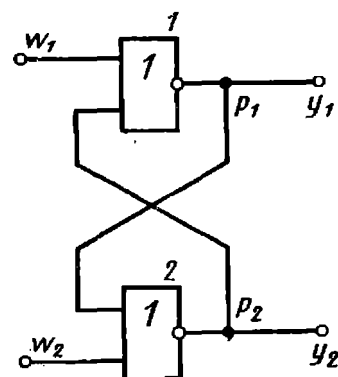


Рис. 25. Триггер

25. Таблица переходов-выходов триггера

p_1'/y_1y_2		p_1	
		0	1
w_1w_2	00	0/01	1/10
	01	1/10	1/10
	10	0/01	0/00
	11	0/00	0/00

широко распространенного двухвходового триггера из двух логических элементов ИЛИ-НЕ, охваченных обратной связью. Выберем в качестве внутренней переменной триггера переменную p_1 , сопоставленную соединению между выходом элемента 1 и входом элемента 2. Табл. 25 является таблицей переходов-выходов триггера.

Используя табл. 25, получим аналитические выражения для выходных функций y_1 , y_2 и внутренней переменной p_1' :

$$y_1 = p_1' = (p_1 \vee w_2) \bar{w}_1,$$

$$y_2 = \bar{p}_1 \bar{w}_2.$$

Анализ работы рассматриваемого триггера с учетом временных задержек логических элементов показывает, что если входной набор 11 (w_1w_2), который однозначно устанавливает выходной набор 00 (y_1y_2), изменяется на входной набор 00, возможно неоднозначное поведение триггера (разные физические экземпляры триггера будут вести себя по-разному). Если, напри-

26. Таблица переходов-выходов триггера с запретами

p_1'/y_1y_2		p_1	
		0	1
w_1w_2	00	—	—
	01	1/10	1/10
	10	0/01	0/00
	11	0/00	0/00

27. Таблица переходов-выходов триггера с учетом переходных режимов

y_1y_2		p_1p_2			
		00	01	10	11
w_1w_2	00	—	01	10	—
	01	10	00	10	00
	10	01	01	00	00
	11	00	00	00	00

мер, задержка элемента 1 меньше задержки элемента 2, то при указанном изменении сигналов на входах будет получен выходной набор 10 (y_1y_2). В противном случае выходной набор будет 01. В связи с этим при проектировании объекта с памятью считают входной набор 00 запрещенным, что соответствует описанию триггера таблицей переходов-выходов, заданной табл. 26 с прочерками в строке 00.

В ряде случаев может оказаться необходимым более детальное описание поведения триггера, когда каждому соединению контура обратной связи сопоставляется своя независимая внутренняя переменная. Учет всех возможных комбинаций значений этих переменных позволяет рассмотреть переходные режимы работы контура и более точно выявить возможные неоднозначности состояний триггера и переходов между ними. Для триггера (см. рис. 25) при указанных условиях табл. 27 является таблицей переходов-выходов.

В этой таблице указаны только значения выходов y_1 и y_2 , так как в данном случае $p_1' = y_1$ и $p_2' = y_2$. Прочерки в таблице означают, что входной набор 00 запрещен. Аналитические выражения для выходных функций триггера имеют вид

$$y_1 = p_1' = \bar{p}_2 \bar{w}_1,$$

$$y_2 = p_2' = \bar{p}_1 \bar{w}_2.$$

Аналогично могут быть описаны и другие виды триггеров с потенциальным управлением. Такому же рассмотрению могут подвергаться любые

одинокные и взаимосвязанные контуры обратных связей. Однако для триггеров как типовых элементов памяти предварительное получение описания их поведения оправдано, чего нельзя сказать о контурах обратных связей, многообразие которых чрезвычайно велико. Поэтому описание контуров обратных связей обычно выполняют в процессе описания объекта в целом.

Возможные неоднозначности поведения контуров выявляют в процессе анализа объекта на наличие в нем состязаний. Для этого используют так называемое *трощное моделирование*.

Пусть для реализации памяти автомата используют триггеры. Тогда возможны два способа получения аналитических описаний логической сети, представляющей такой автомат. Первый способ состоит в представлении каждого триггера сетью из логических элементов, охваченных обратными связями, и в вынесении этих элементов из блока памяти в комбинационную часть автомата. Это равносильно переходу к логической сети, в которой память реализована обратными связями.

Можно и не проводить указанного преобразования элементов памяти, а построить аналитическое описание комбинационной части автомата. Это описание содержит наряду с выражениями для выходных функций z_1, z_2, \dots, z_k выражения для функций возбуждения w_1, w_2, \dots, w_l , зависящих от переменных $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m$. Выпишем формулы для реализуемых триггерами функций. Аргументами этих функций являются функции возбуждения w_i , а также внутренние переменные p_j триггеров. После подстановки в эти формулы вместо символов w_i описывающих их выражений будет получено искомое описание сети. В ряде случаев для комбинационной части автомата для функций w_i строят как прямые, так и обратные формы.

Пример 35. На рис. 26, а приведена логическая сеть с триггером (элементы 4 и 5) и обратной связью, охватывающей все элементы сети; на рис. 26, б — комбинационная логическая сеть, полученная из данной сети

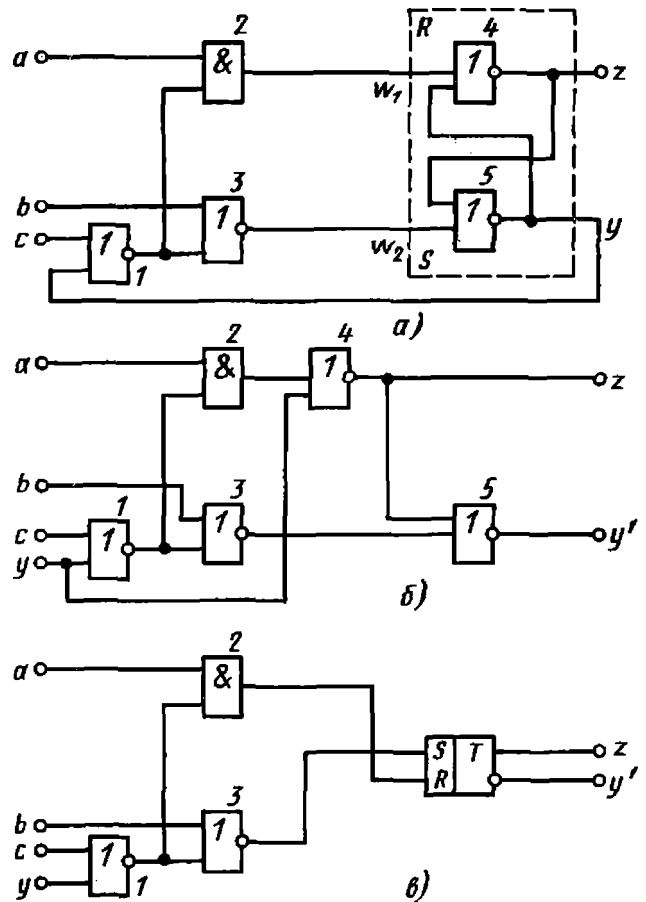


Рис. 26. Логическая сеть и ее эквиваленты

путем обрыва соединения выхода элемента 5 с элементами 4 и 1. Дизъюнктивные нормальные формы функций, реализуемых сетью, имеют вид

$$z = \bar{a}\bar{y} \vee c\bar{y};$$

$$y' = ab\bar{c} \vee by \vee ac\bar{y}.$$

При рассмотрении триггера как элемента памяти, описываемого таблицей переходов-выходов или соответствующими зависимостями выходов от входов, получим структуру, изображенную на рис. 26, в. Пусть триггер описывается табл. 27; тогда

$$w_1 = ac\bar{y}; \quad \bar{w}_1 = \bar{a} \vee c \vee y;$$

$$w_2 = cb \vee yb; \quad \bar{w}_2 = \bar{c}\bar{y} \vee b;$$

$$z = p'_1 = \bar{p}_2 \bar{w}_1 = \bar{p}_2 (\bar{a} \vee c \vee y);$$

$$y' = p'_2 = \bar{p}_1 \bar{w}_2 = \bar{p}_1 (c\bar{y} \vee b).$$

Реальные дискретные объекты с памятью, как и комбинационные объекты, могут иметь такие соединения их элементов, которые не удовлетворяют формальному определению правильной логической сети. В таких случаях

28. Элемент И

x_1	x_2	y
0	0	0
0	1/2	0
0	1	0
1	0	0
1	1/2	1/2
1	1	1
1/2	0	0
1/2	1	1/2
1/2	1/2	1/2

необходимы либо искусственные приемы, делающие возможным использование логической сети как модели объекта, либо применение других более подходящих моделей.

При рассмотрении комбинационных объектов обычно не уделяют внимание состязаниям в связи с тем, что эти состязания не мешают делать правильные выводы о техническом состоянии таких объектов в предположении наличия в них правильных устойчивых неисправностей. Этого нельзя сказать о состязаниях в объектах с памятью. Возникающие в них импульсы могут поступать на входы триггеров или логических элементов, охваченных обратной связью, и таким образом могут запоминаться, т. е. изменять непредвиденным образом внутренние состояния объекта. Состязания могут привести к нарушению алгоритма функционирования объекта с памятью, а при диагностировании —

29. Элемент ИЛИ-НЕ

x_1	x_2	y
1	0	1
0	1/2	1/2
0	1	0
1	0	0
1	1/2	0
1	1	0
1/2	0	1/2
1/2	1	0
1/2	1/2	1/2

к неправильным выводам о его техническом состоянии.

Для выявления состязаний в комбинационном объекте (в комбинационной части объекта с памятью) обычно выполняют специальный анализ логической сети в предположении, что сигналы на полюсах и в узлах сети могут принимать одно из трех возможных значений: 0, 1 или 1/2. При этом 0 и 1 являются «обычными» определенными значениями сигналов, а 1/2 означает либо изменение сигнала с 0 (1) на 1 (0), либо может трактоваться как неопределенное (0 или 1) значение. Такой анализ называют троичным моделированием.

При троичном моделировании каждый раз рассматривают пару входных наборов X_1 и X_2 и определяется возможность появления состязаний в объекте при переходе от одного из этих наборов к другому. По наборам X_1 и X_2 строят переходный троичный набор $X_{1,2}$, у которого входные переменные имеют значение 1/2, если их значения в наборах X_1 и X_2 различны; значения других переменных набора $X_{1,2}$ совпадают с их значениями в наборах X_1 и X_2 . Всем внутренним узлам и выходным полюсам логической сети объекта приписывают значения 1/2. После этого на входы устройства подаются последовательно наборы X_1 , $X_{1,2}$, X_2 . Для каждого входного набора и набора значений внутренних переменных $Y = y_1 y_2 \dots y_m$, установившегося в результате подачи предыдущего входного набора (для первого набора X этими значениями являются значения 1/2), вычисляются значения во всех узлах сети. Такой троичный расчет сети с памятью имеет две особенности. Первая из них определяется наличием значения 1/2 сигналов и состоит в умении вычислять троичные значения выходных функций логических элементов и элементов памяти в случаях, когда на их входы подаются неопределенные значения 1/2. Для каждого типа элемента могут быть построены соответствующие таблицы, подобные табл. 28 и 29, для двухвходовых элементов И и ИЛИ-НЕ.

Вторая особенность состоит в том, что при расчете значений в узлах может потребоваться многократная об-

работка одних и тех же элементов, охваченных контурами обратной связи до тех пор, пока не будут получены установившиеся значения (0, 1 или 1/2) во всех узлах сети. В результате трюичного моделирования на наборах X_1 , $X_{1,2}$ и X_2 каждому узлу и полюсу сети будет приписана последовательность из трех установившихся трюичных значений сигналов. Последовательности $\langle 0, 0, 0 \rangle^*$ или $\langle 1, 1, 1 \rangle$ свидетельствуют о том, что в соответствующем узле устанавливается определенное значение и состязания при переходе от X_1 к X_2 не возникают. Признаком возможного появления статических состязаний являются последовательности вида $\langle 0, 1/2, 0 \rangle$ или $\langle 1, 1/2, 1 \rangle$, а динамических состязаний — последовательности вида $\langle 0, 1/2, 1 \rangle$ или $\langle 1, 1/2, 0 \rangle$. По другим видам последовательностей (например, $\langle 0, 1/2, 1/2 \rangle$ или $\langle 1/2, 1/2, 1/2 \rangle$) можно судить о неопределенности значений сигналов либо о наличии генераторного режима в контуре обратной связи.

Пример 36. Выполнить трюичное моделирование для логической сети (см. рис. 26) на входных наборах $X_1 = 1\ 0\ 1$ (abc) и $X_2 = 0\ 1\ 0$. Строим промежуточный набор $X_{1,2} = 1/2, 1/2, 1/2$. Результаты вычисления значений сигналов в узлах 1—5 на каждом наборе приведены в табл. 30.

При вычислении использовались табл. 28 и 29. На наборах 1 0 1 и 1/2, 1/2, 1/2 установившиеся значения сигналов получены после двух просчетов, а на наборе 0 1 0 — после одного. Анализ последовательности установившихся значений дает следующие результаты: при подаче на сеть последовательности наборов $\langle X_1, X_2 \rangle$ статические состязания возможны в узле 2, а динамические — в узле 3; узлы 1, 4 и 5 имеют неопределенные значения сигналов.

Неисправные дискретные объекты с памятью и их модели. При исследовании таких объектов возможен функциональный подход, при котором задано только правильное функционирование автомата на множестве вход-

30. Значения сигналов в узлах 1—5 на каждом наборе

a	b	c	1	2	3	4	5
1	0	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
1	0	1	0	0	1	1/2	0
1	0	1	0	0	1	1	0
1/2	1/2	1/2	0	0	1	1	0
1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0
1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
0	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
0	1	0	1/2	0	0	1/2	1/2

ных последовательностей. Способы задания неисправных комбинационных объектов, рассмотренные ранее, полностью распространяются на комбинационные части объектов с памятью. Задание неисправных дискретных объектов имеет свою специфику, обусловленную наличием у объектов памяти.

Понятие правильной неисправности необходимо расширить, распространив его на случаи, когда неисправности превращают исправный объект с памятью в комбинационный. При этом сохраняется условие описания неисправного объекта A^i моделью, принятой для описания исправного объекта A , так как комбинационный объект является вырожденным объектом с памятью, имеющим единственное внутреннее состояние.

Функциональным описанием дискретного объекта с памятью является таблица переходов-выходов или эквивалентные ему описания в виде графа, матрицы переходов-выходов, таблицы истинности (или ее части) комбинационного эквивалента или системы булевых выходных функций и внутренних переменных.

Рассмотрим постановку задачи проверки работоспособности (или исправности) комбинационного объекта на заданном множестве $\{X\}_g$ входных наборов в рамках функционального подхода применительно к объектам с памятью.

* Условимся последовательности входных и выходных символов, а также символов состояний обозначать скобками $\langle \ \rangle$.

В распоряжении исследователя имеется некоторый объект A^* , являющийся неисправной модификацией исправного объекта с памятью A . Возможные неисправности объекта A — правильные. Известно функциональное описание объекта A в виде таблицы переходов-выходов абстрактного или структурного автомата. Задано некоторое конечное множество $\{(X_j)_l\}_z$, $j = 1, 2, \dots, N$, допустимых входных последовательностей (l — порядковый номер последовательности, j — порядковый номер входного набора в последовательности). Что можно сказать о техническом состоянии объекта A^* , если имеется возможность наблюдать (измерять, контролировать) только выходные последовательности $\{Z_j^*\}_l$, выдаваемые объектом в ответ на допустимые входные последовательности $\{(X_j)_l\}_z$ из множества $\{(X_j)_l\}_z$?

Процесс подачи входных последовательностей, наблюдения соответствующих им выходных последовательностей и вывода заключений, основанных на этих наблюдениях, называют *экспериментом над объектом* (над автоматом).

Поведение объекта с памятью зависит не только от значений входов, но также от его состояний. Иными словами, один и тот же объект в ответ на одну и ту же входную последовательность может выдавать различные выходные последовательности в зависимости от того, в каком начальном состоянии находится объект в момент подачи первого входного символа (входного набора) рассматриваемой входной последовательности. При функциональном подходе состояния устройства исследователю неизвестны, так как внутренние переменные недоступны для наблюдения.

Пусть исправный объект A имеет M состояний Y_h ($h = 1, 2, \dots, M$). Тогда в исправном объекте, не имеющем установки в начальное состояние (в неинициальном автомате), для входной последовательности $\{(X_j)_l\}$ начальным состоянием $Y_{нач}$ может оказаться любое из M состояний множества $\{Y_h\}$ всех возможных состояний объекта. Следовательно, каждой подаваемой на исправный объект A входной последо-

вательности $\{(X_j)_l\}$ можно сопоставить M выходных последовательностей $\{Z_j\}_{lh}$. Выходные последовательности $\{Z_j\}_{lh}$ будем называть правильными. При заданной входной последовательности $\{(X_j)_l\}$ правильные выходные последовательности нетрудно получить по таблице переходов-выходов исправного объекта.

Исходя из зависимости поведения объекта с памятью от его начального состояния, можно сделать вывод, что если хотя бы одна полученная при эксперименте над объектом A^* выходная последовательность $\{Z_i^*\}_{lh}$, $l = 1, 2, \dots, N$, не совпадает ни с одной из M правильных последовательностей $\{Z_j\}_{lh}$, $h = 1, 2, \dots, M$, то исследуемый объект неисправен (и неработоспособен на множестве $\{(X_j)_l\}_z$ заданных входных последовательностей). Однако в противном случае (даже тогда, когда каждая из N выходных последовательностей $\{Z_j^*\}_{lh}$ совпадает с какой-либо из M соответствующих ей правильных последовательностей $\{Z_j\}_{lh}$) об исправности или работоспособности объекта ничего сказать нельзя — он может оказаться как исправным (работоспособным), так и неисправным (неработоспособным).

Эти выводы справедливы и для инициальных автоматов при функциональном подходе. Отличие состоит только в меньшем числе необходимых сравнений фактических выходных последовательностей $\{Z_j^*\}_l$ с правильными выходными последовательностями, так как имеется лишь одна (вместо M для неинициального автомата) правильная выходная последовательность $\{Z_j\}_l$.

Рассмотренная постановка задачи характерна для проверки правильности функционирования объекта с памятью, когда множество $\{(X_j)_l\}_z$ состоит из рабочих входных последовательностей объекта, т. е. тех последовательностей, которые подаются на него в процессе функционирования. При решении задач проверки работоспособности, исправности или поиска неисправностей ограничиться функциональным описанием объектов с памятью в большинстве случаев нельзя.

При задании объекта с памятью логической сетью его неисправности состоят либо в нарушении функционирования хотя бы одного логического элемента или элемента памяти сети, либо в искажении связей сети. Существенными для объектов с памятью являются изменения величин временных задержек логических элементов, а также задержек, вводимых в качестве элементов памяти или с целью исключения состязаний. «Малые» изменения величин задержек, а также обрывы или короткие замыкания элементов, реализующих задержки, могут приводить к искажению переходов и выходных функций объектов с памятью.

Неисправности типа обрыва элементов, реализующих задержки, хорошо представимы моделью константных неисправностей. При формализации решения задач обнаружения и особенно поиска неисправностей типа «малых» изменений и коротких замыканий элементов, реализующих задержки, в общем случае необходимы более точные описания неисправных устройств, чем при рассмотрении логических неисправностей. Частым следствием неисправностей временных задержек являются состязания, приводящие к неправильной работе памяти объектов. Состязания могут возникнуть также вследствие появления в объекте константных неисправностей, например, таких, которые ликвидируют структурную избыточность, введенную специально с целью исключения состязаний.

Неисправности триггеров можно рассматривать как на физическом, так и логическом уровнях, как и неисправности логических элементов. Для описания неисправных модификаций триггера можно использовать как таблицы (графы, матрицы) переходов-выходов, так и таблицы состояний комбинационных эквивалентов.

Однако из-за большой сложности анализа объектов с памятью на практике часто рассматривают триггер как функциональный элемент и ограничиваются классом константных неисправностей на его входах и выходах. При этом число рассматриваемых неисправностей может оказаться меньше, чем при рассмотрении триггера как логи-

ческой сети, поскольку при рассмотрении триггера как функционального элемента константные неисправности внутренних соединений триггера не учитываются.

В соответствии с классической теорией экспериментов над автоматами математической моделью объекта с памятью является обычно абстрактный конечный автомат. При этом неисправности объекта интерпретируются как искажения выходных символов автомата или переходов между его состояниями. Очень часто невозможно однозначно указать места возникновения физических дефектов в объекте, вызывающих данное нарушение переходов между состояниями абстрактного автомата. Это ограничивает применение модели абстрактного автомата. Прежде чем перейти к рассмотрению моделей i -неисправных объектов с памятью, сделаем несколько замечаний. Будем предполагать, что все неисправности являются правильными. Под элементарной проверкой объекта с памятью будем понимать подачу на его входы (основные и, возможно, дополнительные) последовательностей входных наборов и наблюдение ответных выходных последовательностей на контрольных точках, в число которых входят все основные и могут входить дополнительные выходы объекта. Если на входные последовательности не наложены никакие ограничения, их число бесконечно, а длина может меняться от 1 до бесконечности. Поэтому прямое перечисление входных последовательностей при задании автомата в общем случае невозможно. В то же время таблица переходов-выходов автомата описывает в компактной форме все (в том числе бесконечные по длине) возможные входные последовательности автомата. Будем предполагать, что никакие ограничения на входные последовательности не накладываются (все последовательности допустимы).

Чаще всего дискретный объект с памятью, как и комбинационный, задается своей функциональной схемой (логической сетью) и реже — аналитическим описанием. Таблицы переходов-выходов для реальных объектов задаются очень редко и, как правило,

только для исправных объектов. Рассмотрим, как построить таблицы переходов-выходов структурного и абстрактного автоматов для устройства с памятью, заданного аналитически или логической сетью.

Когда объект задан аналитически, построение структурной таблицы переходов-выходов состоит в вычислении значений выходных функций z и внутренних переменных y' для каждой пары входной набор — внутреннее состояние (X_j, Y_h) , $j = 1, 2, \dots, 2^n$, $h = 1, 2, \dots, 2^m$.

Когда объект задан логической сетью, можно либо сначала получить его аналитическое выражение (методом прямой или обратной подстановки) и затем поступить так, как указано выше, либо вычислить значения выходов и внутренних переменных непосредственно по структуре.

Построение таблицы переходов-выходов исправного объекта с некоторой неисправностью проводится таким же образом, если известна логическая сеть или аналитическое описание с этой неисправностью.

Логическая сеть исправного объекта с памятью A^i может быть получена из логической сети исправного объекта A изменением функциональных свойств логических элементов, элементов памяти или связей, определяемых наличием в объекте неисправности.

Таким образом, можно говорить о явной графической модели объекта с памятью и от нее перейти к явной аналитической модели, получив аналитические описания всех i -неисправных объектов. Наконец, вычислив значения выходных функций и внутренних переменных на каждом входном наборе X_j при каждом состоянии Y_h , можно перейти от указанных моделей к совокупности таблиц переходов-выходов исправного и всех i -неисправных объектов. Все перечисленные явные модели громоздки и поэтому неудобны. Однако основные результаты теории экспериментов над автоматами базируются на явной модели [16].

Структурная неявная модель, представляющая собой задание логической

сети исправного объекта A , класса неисправностей S и правил получения для каждой $s_i \in S$ логической сети i -неисправного объекта A^i , находит широкое применение при построении проверяющих входных последовательностей.

По существу даже абстрактная таблица переходов-выходов исправного объекта с памятью также может рассматриваться как неявная его модель при условии, что рассматриваемым классом неисправностей являются искажения переходов между состояниями и значений выходных сигналов.

Структурная таблица переходов-выходов при этом позволяет детализировать класс неисправностей до искажений значений отдельных внутренних переменных и отдельных выходных функций.

Для описания дискретных объектов с памятью, кроме различных форм булевых функций (скобочной, эквивалентной нормальной, обобщенной), можно применять также аппарат комплексов кубов и аппарат альтернативных графов. Эти аппараты следует расширить в первую очередь описаниями элементов памяти. Получение сжатых таблиц истинности для триггеров не имеет каких-либо особенностей по сравнению с получением таких таблиц для логических элементов. Функциональные альтернативные графы для элементов памяти могут быть получены по описывающим их поведение булевым формулам типа (14) и (15) с введением временного параметра, отображающего тактовый сдвиг в работе элемента [67].

В практике построения тестов для дискретных объектов с памятью применяют *итеративную модель*, представляющую собой последовательное соединение комбинационных эквивалентов (копий) логической сети объекта с объединением выходов, соответствующих внутренним переменным y'_i предшествующей копии, с одноименными входами y_i следующей копии.

Число копий итеративной модели заранее не определяют, а постепенно увеличивают по мере возрастания дли-

ны искомой тестовой входной последовательности.

Рассмотренные выше модели позволяют решать задачи диагностирования достаточно сложных дискретных объектов с памятью, особенно в тех случаях, когда возможна декомпозиция объектов с организацией доступа не только к внешним входам и выходам объекта, но также к его внутренним точкам. Однако применение этих моделей для описания объектов с памятью, например, таких, как однокристалльные или малокристалльные микропроцессоры и другие большие интегральные схемы (БИС) с нерегулярной структурой, вызывает затруднения из-за высокой сложности объектов, а также в ряде случаев из-за отсутствия описания их структуры на логическом уровне. Диагностирование технического состояния сложных программно-управляемых объектов выполняют на основе функционального подхода. Формализованная постановка задачи предполагает, что для объекта строят его модель, например, в виде совокупности функционально законченных модулей (комбинационных и с памятью), либо последовательности информационно связанных микроопераций, охватывающих при их реализации всю аппаратуру объекта, либо модели регистровых передач, в которой объект представлен совокупностью операционной и управляющей частей, с выделением перечня функций (операций), реализуемых объектом. Для каждой такой модели определяют подходящий класс неисправностей, нарушающих

правильное выполнение соответствующих функций объекта.

К сложным дискретным объектам с памятью в вычислительной технике относят типовые элементы замены (ТЭЗ), элементная база которых содержит микросхемы средней и большой степеней интеграции. Для облегчения работы с такими объектами повышают их контролепригодность за счет улучшения условий наблюдаемости и управляемости. Характерным примером повышения контролепригодности ТЭЗ является создание в их структуре сдвигового регистра из основных и дополнительных триггеров, что обеспечивает выделение в схеме ТЭЗ комбинационных частей с внешним доступом (через указанный регистр) к их входам и выходам. Аналогичный эффект, состоящий в преобразовании в процессе тестирования объекта с памятью в комбинационный объект, достигается путем организации управляемых разрывов обратных связей. В этом случае не нужны дополнительные элементы памяти, как в методе сдвигового регистра, однако число дополнительных выводов для управления разрывами обратных связей возрастает.

Известны также другие подходы к обеспечению контролепригодности сложных объектов, состоящие в уменьшении сложности моделей ОД и операций по их обработке (реализация легко тестируемых структур, введение в объекты встроенных средств тестового и функционального диагностирования и др.).

1. АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ С ЛОГИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ

При анализе моделей объектов основными являются задачи построения оптимизированных алгоритмов диагностирования. Возможность оптимизации алгоритмов диагностирования определяется тем, что число элементарных проверок, достаточных для решения конкретной задачи диагностирования, как правило, меньше числа всех допустимых (т. е. физически реализуемых) элементарных проверок, а также тем, что разные элементарные проверки могут требовать разных затрат на их реализацию и давать разную информацию о техническом состоянии объекта.

1. Таблица функций неисправностей

		E				
		e	...	e _i	...	e _S
R	π ₁	R ₁		R ₁ ⁱ		R ₁ ^S
Π	π _j	R _j		R _j ⁱ		R _j ^S
	π _Π	R _Π		R _Π ⁱ		R _Π ^S

Типичными представителями ОД с логическими переменными являются в первую очередь дискретные объекты, а также те аналоговые объекты, диагностирование которых выполняют на принципах допускового контроля.

Таблицы функций неисправностей. Обозначим множество рассматриваемых или возможных технических состояний объекта символом E. Пусть e ∈ E обозначает исправное состояние объекта, а e_i ∈ E, i = 1, 2, ..., |S|, — i-неисправное состояние при наличии в объекте неисправности s_i из множества S рассматриваемых или возможных неисправностей.

Обозначим символом Π множество допустимых (всех возможных или только некоторых из них) элементарных проверок π_j, j = 1, 2, ..., |Π|. Построим прямоугольную таблицу, строкам которой сопоставим элементарные проверки из множества Π, а столбцам — технические состояния из множества E. В клетке (j, i) таблицы поставим результат R_jⁱ элементарной проверки π_j ∈ Π объекта, находящегося в техническом состоянии e_i ∈ E (значение индекса i = 0 будем относить к столбцу исправного состояния e объекта). Построенная таким образом таблица (табл. 1) является ТФН.

Применение ТФН для сложных объектов часто невозможно из-за ее высокой размерности. Однако, как универсальная модель объекта, ТФН очень наглядна и удобна при рассмотрении принципов и процедур построения и реализации алгоритмов диагностирования, даже если эти принципы и процедуры формулируются первоначально на языках, отличных от языка ТФН.

Для определенности примем, что множество Π обладает свойством обнаружения любой неисправности из множества S , т. е. для любой неисправности $s_i \in S$ найдется хотя бы одна такая элементарная проверка $\pi_j \in \Pi$, при которой $R_j \neq R_j^i$, 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 $R_j^i \neq R_j^k$.

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

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 требуемую глубину диагностирования можно задать через фиксированное разбиение множества E на непересекающиеся подмножества: $E_\nu, \nu = 1, 2, \dots, \lambda, \bigcup_{\nu=1}^{\lambda} E_\nu = E, E_\nu \cap E_\mu = \emptyset$ при $\nu \neq \mu$.

Тогда проверке исправности или работоспособности соответствует минимальная глубина диагностирования, при которой $\lambda = 2$, причем одно подмножество E_1 содержит либо одно исправное состояние, либо группу работоспособных состояний, а второе подмножество E_2 — все остальные неисправные состояния. При поиске неисправностей с максимальной глубиной (т. е. с точностью до каждого одного технического состояния) $\lambda = |S| + 1, E_1 = \{e\}, E_\nu = \{e_i\}, i = 1, 2, \dots, |S|, \nu = i + 1$.

Способ задания глубины диагностирования разбиением множества E технических состояний объекта на подмножества E_ν является достаточно универсальным, но этот способ неудобен для применения в том случае, когда отсутствует соответствие такого разбиения делению объекта на конструктивные составные части. Значительно

удобнее требуемую глубину диагностирования задавать через разбиение множества конструктивных компонент объекта на непересекающиеся подмножества. Например, широко известно требование получения диагноза с глубиной до сменного блока (узла, компоненты) объекта.

Пусть объект подразделен 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 неисправен только один (любой) блок, то объединение N подмножеств E_l вместе с исправным состоянием e объекта образует множество E всех возможных технических состояний. Поэтому $\lambda = N + 1, E_1 = \{e\}, E_\nu = E_l$. Этот случай соответствует рассмотрению одиночных неисправностей объекта, если в качестве последних принять неисправности каждого сменного блока.

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

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_ν и E_μ ($\nu \neq \mu$), хотя может и не различать любую пару технических состояний, принадлежащих одному и тому же подмножеству E_ν . Первое условие означает, что для

каждой пары технических состояний e_i и e_k , принадлежащих разным подмножествам E_ν 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. $R_j^i \neq R_j^k$.

Построение всех избыточных совокупностей T по таблице функций неисправностей осуществляют следующим образом:

1) просмотром (перебором) всех возможных неупорядоченных пар столбцов таблицы функций неисправностей выделяют пары e_1, e_k технических состояний, принадлежащих разным подмножествам E_ν, E_μ , и для каждой пары также просмотром (перебором) всех строк таблицы определяют 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;

2) просмотром (перебором) всех подмножеств Π_{ik} , полученных в результате выполнения операции, находят все такие избыточные 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} .

Схема алгоритма A_1 выполнения операции пункта 1 приведена на рис. 1. Исходными данными являются таблица функций неисправностей и разбиение множества E на множества E_ν . Номера столбцов таблицы отмечают индексами $i = 0, 1, \dots, |S| - 1$, $k = i + 1, i + 2, \dots, |S|$, а номера строк — индексом $j = 1, 2, \dots, |P|$.

Формальный способ выполнения операции п. 2 состоит в следующем. Обозначим символом U множество всех подмножеств Π_{ik} , полученных в результате выполнения операции п. 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 проводим следующие упрощения: каждую пару вида (π_j, π_j) заменяем одной

элементарной проверкой (π_j) ; при наличии одной элементарной проверки (π_j) и пар вида (π_j, π_q) удалим эти пары. Полученное после упрощений множество пар и, возможно, одиночных элементарных проверок обозначим символом Π_1 . Затем из множества $(\Pi_{ik})_3$ и построенного множества Π_1 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 избыточной совокупностью T элементарных проверок.

Схема алгоритма A_2 выполнения операции пункта 2 изображена на рис. 2. 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.

Чем больше разнообразие (а значит, и число) элементарных проверок в множестве Π , тем шире возможности получения алгоритмов диагностирования с малым числом элементарных проверок. Однако, чем больше строк (а также столбцов) содержит ТФН, тем больше операций необходимо при ее обработке для построения оптимальных алгоритмов диагностирования. Поэтому можно сделать следующий неформальный вывод: чем больше усилий затрачивается при построении алгоритма диагностирования, тем проще последующая техническая реализация системы диагностирования.

Например, никаких усилий не требуется на построение так называемого *тривиального алгоритма диагностирования*, содержащего все элементарные проверки множества Π , но при этом время и другие затраты на реализацию алгоритма будут наибольшими. Другая крайняя ситуация заключается в получении всех избыточных алгоритмов диагностирования с целью последующего выбора из них наилучшего. Этого можно достичь, в частности, с помощью алгоритмов A_1 и A_2 , представляющих собой полный перебор всех возможных решений и поэтому требующих максимального

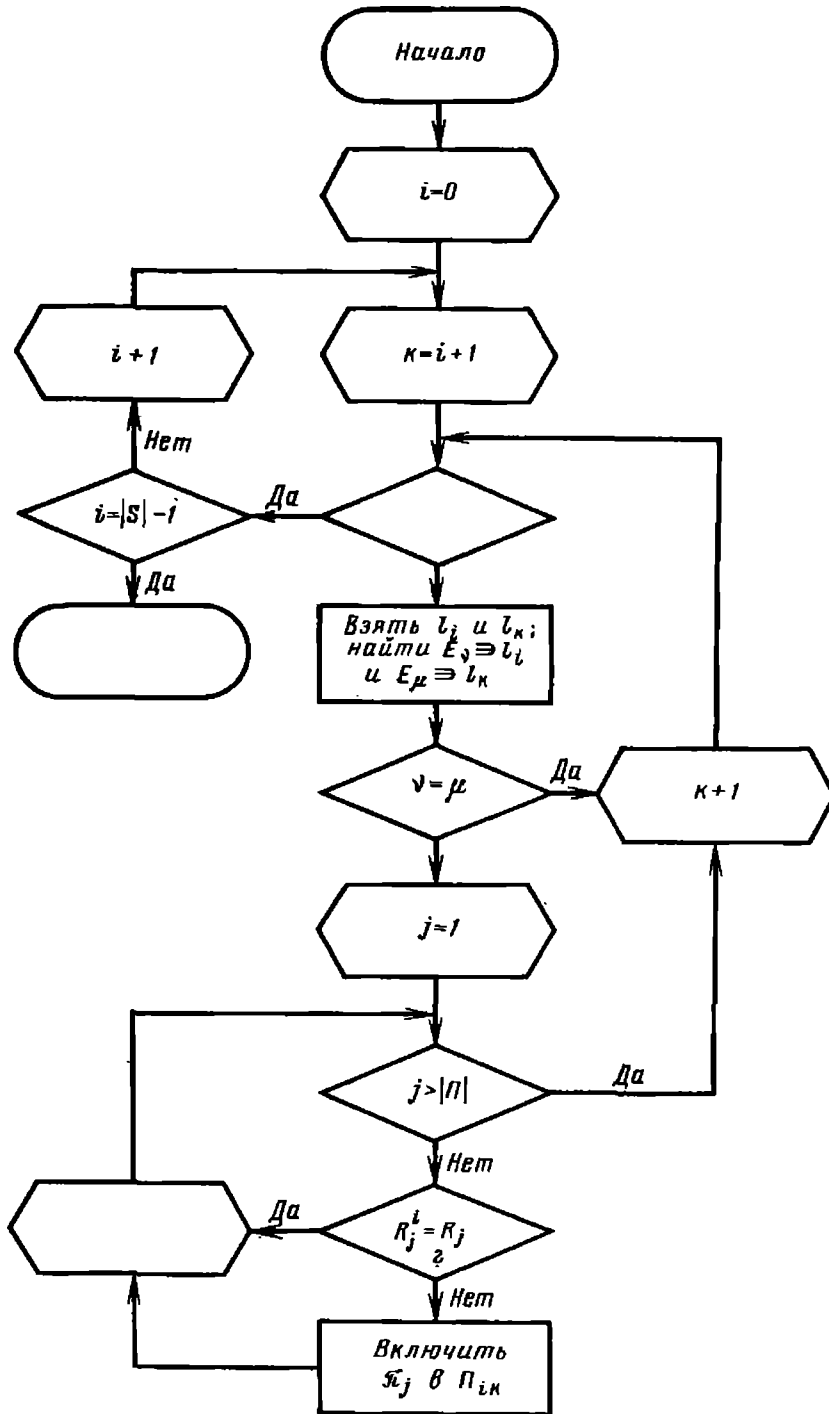


Рис. 1. Схема алгоритма A_1 определения множества элементарных проверок

объема операций по обработке ТФН. Между этими двумя крайними ситуациями лежит ряд промежуточных, различающихся объемами вычислений и соответственно размерами затрат на реализацию систем диагностирования.

Информацию, содержащуюся в ТФН, можно получать по частям, что соответствует работе с неявной математической моделью объекта. Характерным примером неявной модели, при которой возможно последовательное извлечение информации, является приведенная в гл. 2 обобщен-

ная функция выхода логической сети. Методы и примеры обработки ТФН даны в гл. 4.

Необходимо отметить, что если в множестве Π элементарных проверок все проверки имеют один и тот же состав контрольных точек, то построенный по ТФН алгоритм диагностирования будет представлять собой совокупность входных воздействий. Такие алгоритмы диагностирования называются *тестами*. В других случаях все элементарные проверки могут иметь одно и то же входное воздейст-

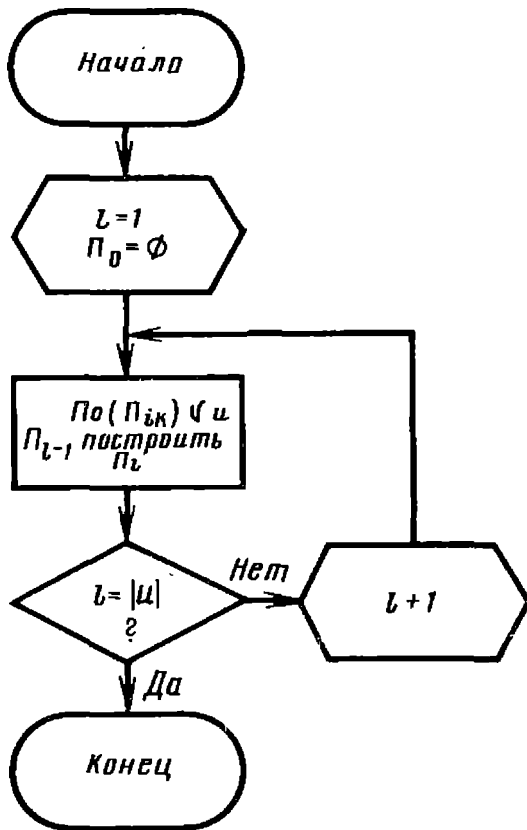


Рис. 2. Схема алгоритма A_2 определения избыточной совокупности ЭП

вие (последовательность воздействий) и отличаются только составами контрольных точек. Для этих проверок алгоритм диагностирования будет представлять собой совокупность контрольных точек, в которых наблюдают ответы объекта при его диагностировании.

Задача построения тестов является типичной для дискретных объектов, когда за контрольные точки принимают внешние выходы объектов. Для комбинационных объектов при этом воздействиями элементарных проверок являются входные наборы, а для объектов с памятью — пары: входной символ или набор — внутреннее состояние. Задача определения составов контрольных точек характерна для случая аналоговых объектов, представленных их логической моделью.

Построение тестовых последовательностей для автоматов с памятью по ТФН имеет ряд специфических особенностей.

Построение проверяющих и различающих совокупностей входных наборов для дискретных комбинационных объектов по их неявным моделям.

Входные наборы, на которых выходной набор Z^s дискретного комбинационного объекта, находящегося в техническом состоянии e_s , отличается от выходного набора Z^t объекта, находящегося в состоянии e_t , называют *различающими* (относительно e_s и e_t) и записывают следующим образом: $X(s, t)$. Когда одно из технических состояний, например e_t , является исправным состоянием, различающие наборы называют *проверяющими* или *обнаруживающими* и обозначают: $X(0, s)$. Для обозначения совокупностей различающих входных наборов (различающих совокупностей) используют фигурные скобки $\{X(s, t)\}$, $\{X(0, s)\}$.

Задача построения проверяющей или различающей совокупностей наборов значений входных переменных объекта может быть решена аналитически, если объект во всех технических состояниях задан с помощью аналитических выражений его выходных функций. Действительно, различающие наборы двух булевых функций f^i и f^j , т. е. наборы значений входных переменных, на которых значения функций f^i и f^j различны, совпадают с рабочими наборами так называемой *различающей функции* $D[f^i, f^j] = f^i \oplus f^j = f^i \bar{f}^j \vee \bar{f}^i f^j$.

Таким образом, если комбинационный объект, находящийся в техническом состоянии e_i , реализует на своих выходах функции z_1^i, z_k^i , а в техническом состоянии e_j — функции z_1^j, z_k^j , то рабочие наборы различающей функции $D[z_1^i, z_1^j, \dots, z_k^i, z_k^j] = D[Z^i, Z^j] = z_1^i \oplus z_1^j \vee \dots \vee z_k^i \oplus z_k^j$ составляют совокупность всех различающих наборов значений входных переменных x_1, \dots, x_n объекта.

Пример 1. Построить по различающей функции совокупность всех проверяющих входных наборов для объекта рис. 11 гл. 2 при наличии в нем неисправности $s = \{a^0, (6, 2)^1, 6^0\}$. Запись $(6, 2)^1$ означает $\equiv 1$ на нижнем (втором сверху) входе элемента 6.

Выражение функции, реализуемой объектом в исправном состоянии,

$-z = ab \vee \bar{a}\bar{d} \vee bc d \vee \bar{a}\bar{b}\bar{c}$ и функции неисправности $-z^s = \bar{b}\bar{c} \vee \bar{d}$.

Вычислим различающую функцию и представим ее в совершенной дизъюнктивной нормальной форме:

$$D[z, z^s] = z\bar{z}^s \vee \bar{z}z^s = bcd \vee$$

$$\vee abd \vee ab\bar{c} \vee a\bar{b}\bar{d} = abcd \vee$$

$$\vee \bar{a}bcd \vee ab\bar{c}\bar{d} \vee a\bar{b}\bar{c}\bar{d} \vee ab\bar{c}\bar{d} \vee a\bar{b}\bar{c}\bar{d}.$$

Шесть полученных конъюнкций соответствуют всем шести входным наборам сети (см. рис. 11, гл. 2), на которых обнаруживается заданная неисправность s .

Для объектов большой размерности получение функций Z^i, Z^j и вычисление всех рабочих наборов различающей функции $D[Z^i, Z^j]$ часто оказываются затруднительным или невозможным. Упрощение может быть достигнуто как за счет отказа от требования получения всех различающих наборов, так и за счет использования информации о структуре объекта.

Пусть комбинационный объект задан своей логической сетью, не содержащей петель обратной связи. Входные переменные сети — x_1, \dots, x_n , ее выходные функции — z_1, \dots, z_k . Сеть состоит из N логических элементов.

Функцию, реализуемую сетью на выходе логического элемента n_i , обозначим y_i ; прямую или инверсную функцию, реализуемую в произвольном узле i сети, — w_i , т. е. $w_i \in \{x_1, \bar{x}_1, \dots, x_n, \bar{x}_n, y_1, \bar{y}_1, \dots, y_N, \bar{y}_N\}$; совокупность $\{w_{l_i}\}$ всех входных переменных элемента η_i сети — W_{l_i} .

Пусть неисправность s задана совокупностью $\{\eta\}^s$ неисправных элементов сети. Как и прежде, $y_i(y_i^s)$ или $z_\gamma(z_\gamma^s)$ является функцией, реализуемой в исправной сети (в сети, содержащей неисправность s) соответственно на выходе элемента η_i или на выходном полюсе z_γ . Аналогично трактуются функции w_i и w_i^s, w_{l_i} и $w_{l_i}^s$. Исправный элемент сети $\eta_i (\eta_i \notin \{\eta\}^s)$ реализует логическую функцию $\eta_i(w_{l_i})$.

Для неисправного элемента $\eta_i^s (\eta_i^s \in \{\eta\}^s)$ логическая функция обозначается $\eta_i^s(w_{l_i})$. Входной набор $X(0, s)$, обнаруживающий неисправность s , должен удовлетворять по крайней мере одному из k булевых уравнений вида

$$D[z_\gamma(X), z_\gamma^s(X)] = z_\gamma(X) \bar{z}_\gamma^s(X) \vee$$

$$\vee \bar{z}_\gamma(X) z_\gamma^s(X) = 1, \gamma = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

Для обозначения различающих функций вида (1) можно воспользоваться более короткой записью $D[Z_\gamma]$. Для любой пары булевых функций f и f^s справедливы следующие соотношения:

$$D[f] = D[\bar{f}];$$

$$f^s D[f] = f D[\bar{f}];$$

$$f D[f] = \bar{f}^s D[\bar{f}].$$

Задача состоит в том, чтобы заменить процедуру непосредственного решения системы уравнений (1) рекуррентной процедурой вычисления одного или нескольких различающих входных наборов из $\{X(0, s)\}$ по логической сети.

Основой этой процедуры являются операции метода обратной подстановки, а также операции вычисления различающей функции $D[y_i]$ выхода некоторого элемента по различающим функциям $D[w_{l_i}]$ его входов и функциям $\eta_i(w_{l_i})$ и $\eta_i^s(w_{l_i})$, реализуемым исправными и неисправными логическими элементами сети.

Выделим в сети, имеющей доминирующую неисправность s , все пути, ведущие от выхода каждого неисправного элемента η_i^s к выходам z_γ сети. Такие пути можно назвать неисправными.

Переменную узла сети, не принадлежащую неисправным путям и являющуюся входной переменной элемента η_i , обозначим ϕ_{l_i} , а принадлежащую неисправным путям — w_{m_i} . По анало-

гии $\widehat{W}_{l_i}(W_{m_i})$ является совокупностью всех входных переменных элемента η_i , не принадлежащих (принадлежащих) неисправным путям. Тогда в исправной сети (относительно которой рассматривают неисправность s) для любого узла i (выхода элемента η_i с входными переменными $\widehat{w}_{l_i}, w_{m_i}$)

$$y_i = \eta_i(\widehat{W}_{l_i}, W_{m_i}). \quad (2)$$

Для неисправной сети $\widehat{w}_{l_i}^s = \widehat{w}_{l_i}$. Поэтому при исправном элементе η_i имеем

$$y_i^s = \eta_i(\widehat{W}_{l_i}, W_{m_i}^s), \quad (3)$$

а при неисправном элементе

$$y_i^s = \eta_i^s(\widehat{W}_{l_i}, W_{m_i}^s). \quad (4)$$

Найдем выражение различающей функции $D[y_i]$ через выражения различающих функций $D[w_{l_i}]$ входных переменных w_{l_i} элемента η_i . Пусть для всех элементов сети реализуемые ими функции $\eta_i(W_{l_i})$ и $\eta_i^s(W_{l_i})$ представлены в дизъюнктивной нормальной форме.

Прежде всего необходимо отметить, что $D[\widehat{w}_{l_i}] = 0$. Рассмотрим исправный элемент сети, реализующий операцию \wedge конъюнкции входных переменных совокупностей \widehat{W}_l и W_m (индекс элемента опускается), т. е.

$$y_{\wedge} = \eta_{\wedge}(\widehat{W}_l, W_m) = \bigwedge_l \widehat{w}_l \bigwedge_m w_m. \quad (5)$$

Аналогично для элемента, реализующего операцию \vee ,

$$y_{\vee} = \eta_{\vee}(\widehat{W}_l, W_m) = \bigvee_l \widehat{w}_l \bigvee_m w_m. \quad (6)$$

Опуская формальные доказательства, получаем следующие выражения для $D[y_{\wedge}]$ и $D[y_{\vee}]$:

$$D[y_{\wedge}] = \left(\bigwedge_l \widehat{w}_l \right) \left(\bigwedge_m w_m \vee \bigwedge_m w_m^s \right) \times \left(\bigvee_m D[w_m] \right); \quad (7)$$

$$D[y_{\vee}] = \left(\bigwedge_l \widehat{w}_l \right) \left(\bigwedge_m \bar{w}_m \vee \bigwedge_m \bar{w}_m^s \right) \times \left(\bigvee_m D[w_m] \right). \quad (8)$$

Для исправного элемента, реализующего произвольную дизъюнкцию конъюнкций

$$y_{\vee \wedge} = \eta_{\vee \wedge}(\widehat{W}_l, W_m) = \bigvee_t \left(\bigwedge_l \widehat{w}_{tl} \bigwedge_m w_{tm} \right), \quad (9)$$

где t — текущий индекс конъюнкции, имеем

$$D[y_{\vee \wedge}] = \left\{ \bigwedge_t \left(\bigvee_l \bar{w}_{tl} \vee \bigvee_m \bar{w}_{tm} \right) \vee \bigvee_t \left(\bigwedge_l \bar{w}_{tl} \bigvee \bigvee_m \bar{w}_{tm}^s \right) \right\} \times \left\{ \bigvee_t \left\{ \left(\bigwedge_l \widehat{w}_{tl} \bigwedge_m w_{tm} \vee \bigwedge_m w_{tm}^s \right) \times \left(\bigvee_m D[w_{tm}] \right) \right\} \right\} \quad (10)$$

В алгоритме получения обнаруживающих входных наборов $X(0, s)$ исправные элементы обрабатывают по формулам (7), (8) и (10). Для неисправных элементов берут различающую функцию в виде $D[y_i] = y_i \bar{y}_i^s \vee \bar{y}_i y_i^s$. В формулу вместо y_i и \bar{y}_i подставляют правую часть и инверсию правой части выражения (4). Тем самым $D[y_i]$ (как и для исправных элементов) представляют как функцию переменных w_{l_i} и $w_{l_i}^s$.

Пусть

$$C = \{\eta^g\}, \quad g = 1, 2, \dots, |C| \leq k, \quad -$$

множество выходных элементов, принадлежащих неисправным путям сети. Тогда выполнение условия (1) эквивалентно удовлетворению равенства

$$\bigvee_{g=1}^{|C|} D[y^g] = 1, \quad (11)$$

где y^g — функция, реализуемая на выходе элемента η^g (выходном полюсе g сети). На каждом шаге алгоритма рассматривают некоторую булеву

функцию Y , записанную в дизъюнктивной нормальной форме, и обрабатывают один из дизъюнктивных членов (терм) T этой формы. Пусть i — текущий индекс рассматриваемой функции Y_i и $j(i)$ — текущий индекс ее обрабатываемого терма, $Y_i = \bigvee_{j(i)} T_j(i)$. Общ. вид терма

$$T_{j(i)} = \wedge \hat{w}_l \wedge w_m \wedge w_m^s D[w_m].$$

Первой ($i = 1$) всегда рассматривают функцию вида $Y_1 = \bigvee_g D[y^g]$ и ее термы $T_{j(1)} = T_g = D[y^g]$.

Обработка терма $T_{j(i)}$ состоит в сопоставлении его переменным \hat{w}_l и w_m соответствующих им выходов логических элементов сети, после чего следует замена этих переменных, а также переменной $D[w_m]$ функциями, аргументами которых являются входные переменные указанных элементов. Замену проводят по следующим правилам:

1. Каждую переменную \hat{w}_l или w_m , не являющуюся входной переменной сети, заменяют правой частью (или инверсией правой части) выражения (2) для элемента, соответствующего этой переменной.

2. Каждую переменную w_m^s заменяют правой частью (или ее инверсией) уравнений (3), когда соответствующий переменной элемент исправен, и (4), когда такой элемент неисправен.

3. Переменную $D[w_m]$ заменяют правой частью уравнений (7), (8) или (9) (в зависимости от функции, реализуемой элементом, соответствующим переменной w_m), если указанный элемент исправен, или выражением $w_m \hat{w}_m^s \vee \bar{w}_m w_m^s$, если элемент неисправен. В последнем случае выполняют повторную замену переменных w_m , w_m^s и их инверсий \bar{w}_m , \bar{w}_m^s в соответствии с правилами 1 и 2.

Схема алгоритма A_3 построения одного входного набора сети, обнаруживающего заданную неисправность s , приведена на рис. 3. Одна остановка («Конец 1») наступает при первом получении функции Y_i , содержащей терм $T^* = \wedge x_l$, т. е. терм,

состоящий только из символов входных переменных x_l сети. Другая остановка («Конец 2») означает, что не существует ни одного входного набора, обнаруживающего неисправность s (т. е. неисправность s несущественна). Число подлежащих обработке термов $T_{j(i)}$ функции Y_i обозначено $d(i)$.

Пример 2. Пусть в сети (рис. 4) имеется константная неисправность $s = 2^\circ$. Неисправным путям принадлежат элементы 2, 5, 6 и 8. Множество S содержит единственный элемент 8, который исправен и реализует функцию $\bar{y}_8 = \widehat{y}_4 \bar{y}_5 \bar{y}_6 \widehat{y}_7$.

Полагаем $i = 1$; тогда

$$Y_i = Y_1 = D[y_8].$$

Единственный необработанный терм $T_{1(1)} = D[y_8]$ в Y_1 не является термом вида $\wedge x_l$, и поэтому его заменяют по правилу 3 согласно выражению (4):

$$T_{1(1)} = D[y_8] = \widehat{y}_4 \widehat{y}_7 (\bar{y}_5 \bar{y}_6 \vee \bar{y}_5^s \bar{y}_6^s) \times \times (D[y_5] \vee D[y_6])$$

или в дизъюнктивной нормальной форме

$$T_{1(1)} = \widehat{y}_4 \widehat{y}_7 \bar{y}_5 \bar{y}_6 D[y_5] \vee \vee \widehat{y}_4 \widehat{y}_7 \bar{y}_5^s \bar{y}_6^s D[y_5] \vee \vee \widehat{y}_4 \widehat{y}_7 \bar{y}_5 \bar{y}_6 D[y_6] \vee \widehat{y}_4 \widehat{y}_7 \times \times \bar{y}_5^s \bar{y}_6^s D[y_6].$$

Увеличиваем i на 1 и принимаем $Y_i = Y_2 = T_{1(1)}$.

В форме Y_2 нет термов вида $\wedge x_l$, а очередным необработанным является ее первый терм $T_{1(2)}$. По правилу 1

$$\begin{aligned} \widehat{y}_4 &= \widehat{x}_2 \vee \widehat{y}_1, \\ \bar{y}_7 &= \widehat{x}_3 \vee \widehat{y}_3, \\ \bar{y}_5 &= \widehat{x}_1 \vee y_2, \\ \bar{y}_6 &= \widehat{x}_4 \vee y_2, \end{aligned}$$

а по правилу 3

$$D[y_5] = D[(\widehat{x}_1, \bar{y}_2)] = \widehat{x}_1 (\bar{y}_2 \wedge \bar{y}_2^s) \times \times D[y_2].$$

Так как входные полюсы сети никогда не принадлежат неисправным путям, условимся не отмечать эти переменные знаком \wedge . Тогда

$$T_{1(2)} = (x_2 \vee \hat{y}_1) (x_3 \vee \hat{y}_3) (x_1 \vee y_2) \times \\ \times (x_4 \vee y_2) \bar{x}_1 (\bar{y}_2 \vee \bar{y}_2^s) D[y_2] = \\ = \bar{x}_1 x_2 x_3 y_2 \bar{y}_2^s D[y_2] \vee \\ \vee \bar{x}_1 \hat{y}_1 y_2 \hat{y}_3 \bar{y}_2^s D[y_2] \vee \bar{x}_1 x_2 \hat{y}_2 D[y_2] \vee \\ \vee \bar{x}_1 x_3 \hat{y}_1 y_2 \bar{y}_2^s D[y_2].$$

Принимаем $Y_3 = T_{1(2)}$. В форме Y_3 нет термов вида $\wedge x_i$. Обработке подлежит ее первый терм $T_{1(3)}$. По правилу 1

$$y_2 = \bar{x}_2 \bar{x}_3;$$

по правилу 2

$$y_2^s = 1;$$

по правилу 3

$$D[y_2] = y_2 \bar{y}_2^s \vee \bar{y}_2 y_2^s = y_2 = \bar{x}_2 \bar{x}_3;$$

т. е.

$$T_{1(3)} = \bar{x}_1 x_2 x_3 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \bar{x}_2 \bar{x}_3 = 0.$$

Получение нулевого значения $T_{1(3)}$ вынуждает перейти к обработке очередного (второго) терма из Y_3 . Для этого терма по правилу 1

$$y_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_3,$$

$$y_3 = \bar{x}_2 \bar{x}_4.$$

С учетом полученных выше значений для y_2 , \bar{y}_2^s и $D[y_2]$

$$T_{2(3)} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4.$$

Полученный терм $T_{2(3)}$ является термом вида $\wedge x_i$ и поэтому задает входной набор 0000 ($x_1 x_2 x_3 x_4$), обнаруживающий неисправность $s = 2^\circ$.

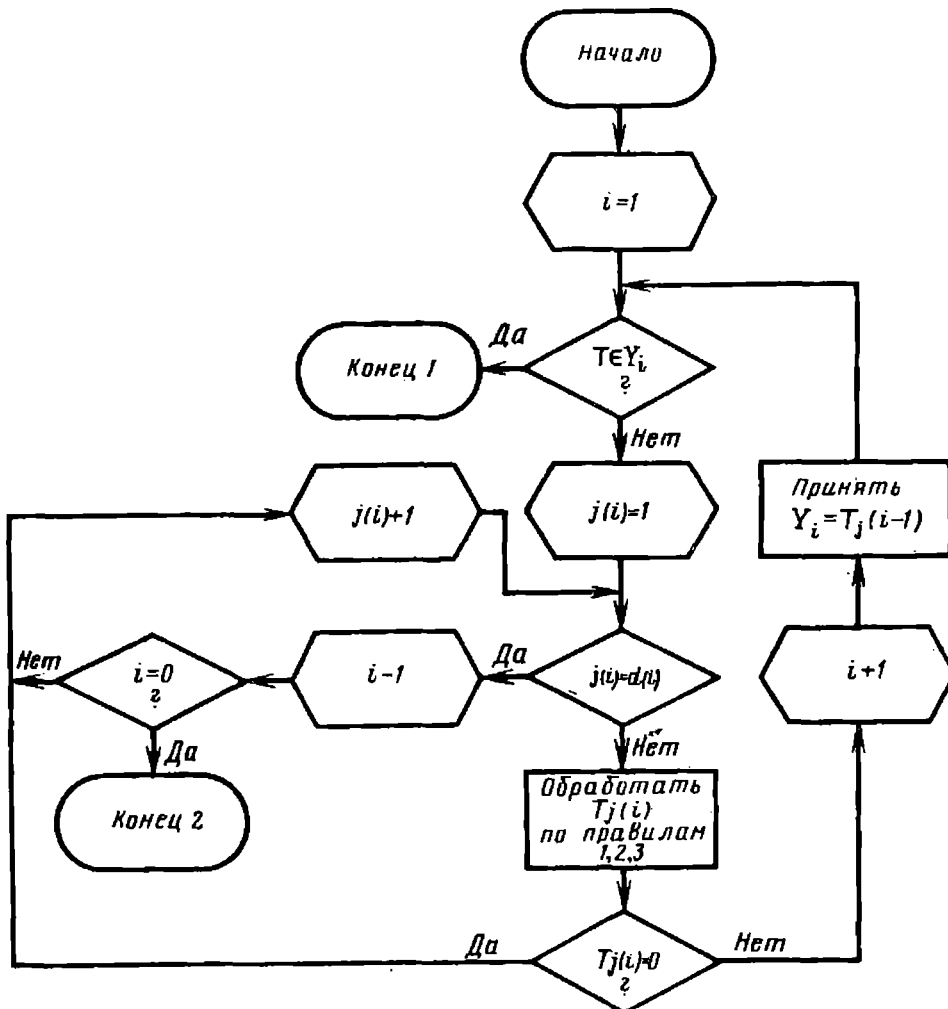


Рис. 3. Схема алгоритма A_2 построения входного набора, обнаруживающего неисправность

Пример 3. Пусть в сети (см. рис. 4) неисправность s состоит в том, что произошло замыкание (соединение) выходов элементов 1 и 5, и, кроме того, оборвался второй вход элемента 2. Предположим, что соединение выходов указанных элементов приводит к тому, что на втором входе элемента 4 и втором входе элемента 8 реализуется функция $y_1 y_5$, а обрыв входа элемента **ИЛИ-НЕ** эквивалентен подаче на оборванный вход константы 0:

$$\begin{aligned} \{\eta\}^s &= \{1, 2, 5\}, \\ \eta_1^s(\omega_{l_1}) &= \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{y}_2, \\ \eta_2^s(\omega_{l_2}) &= \bar{x}_2, \\ \eta_5^s(\omega_{l_5}) &= \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{y}_2. \end{aligned}$$

Выходы элементов 1, 2, 4, 5, 6 и 8 принадлежат неисправным путям; $C = \{8\}$. Полагаем $i = 1$; $Y_1 = D[y_8]$;

$$T_{1(1)} = D[\hat{y}_7 \hat{y}_4 \hat{y}_5 \hat{y}_6].$$

По формуле (4) имеем

$$T_{1(1)} = \hat{y}_7 (\hat{y}_4 \hat{y}_5 \hat{y}_6 \vee \hat{y}_4^s \hat{y}_5^s \hat{y}_6^s) \times (D[y_4] \vee D[y_5] \vee D[y_6]).$$

Так как $T_{1(1)} \neq 0$, $Y_2 = T_{1(1)}$. В качестве первого необработанного термина в Y_2 выберем терм $T_{1(2)} = \hat{y}_7 \hat{y}_4 \hat{y}_5 \hat{y}_6 D[y_4]$, обработка которого дает

$$T_{1(2)} = (x_3 \vee \hat{y}_3)(x_1 \vee y_2) \times (x_4 \vee y_2) \bar{x}_2 y_1 \bar{y}_1^s D[y_1].$$

Так как $T_{1(2)} \neq 0$, $Y_3 = T_{1(2)}$. Обработаем первый терм Y_3 :

$$T_{1(3)} = x_1 x_3 x_4 \bar{x}_2 y_1 y_1^s D[y_1].$$

Так как $y_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_3$, $T_{1(3)} = 0$. Выберем для обработки терм

$$T_{2(3)} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 (x_1 \vee x_3 \vee y_2^s) \times (y_1 \bar{y}_1^s \vee \bar{y}_1 y_1^s),$$

$$T_{2(3)} \neq 0, Y_4 = T_{2(3)}.$$

Обработываем в Y_4 терм

$$\begin{aligned} T_{1(4)} &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 y_2^s y_1 \bar{y}_1^s = \\ &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \neq 0. \end{aligned}$$

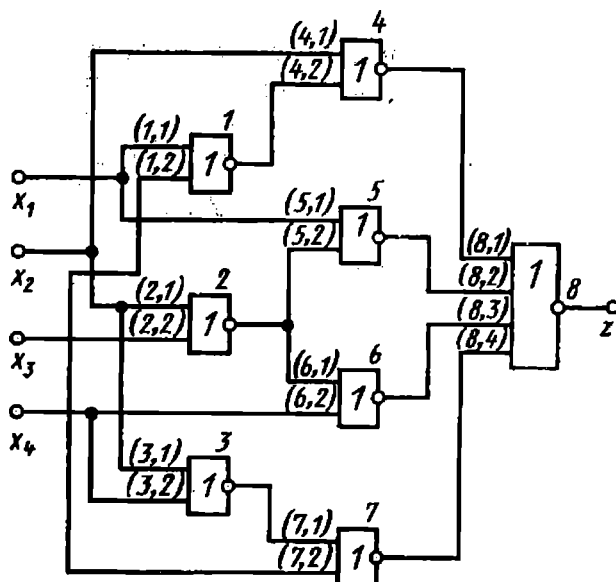


Рис. 4. Логическая сеть для построения проверяющего набора методом различающей функции

Полученный терм задает входной набор 0000 ($x_1 x_2 x_3 x_4$), обнаруживающий заданную неисправность s .

Рассмотренные выше способы построения набора $X(0, s)$ используют для получения и преобразования достаточно сложных аналитических выражений каждой неисправности s . Указанных недостатков нет в методе построения одного проверяющего набора $X(0, s)$ или их полной совокупности $\{X(0, s)\}$ по эквивалентной нормальной форме.

Пусть заданы прямая и обратная эквивалентные нормальные формы функции исправной одновыходной логической сети (ЭНФ и ОЭНФ) и для этой же сети, содержащей константную неисправность s (ЭНФ^s, ОЭНФ^s). Если неисправность s существенна, то всегда существует входной набор X_j , такой, при котором либо $z(X_j) = 0$, а $z^s(X_j) = 1$, либо $\bar{z}(X_j) = 0$, а $\bar{z}^s(X_j) = 1$. В первом случае определяют ЭНФ функции исправной сети, во втором — ОЭНФ.

Если неисправность s существенна, то в ЭНФ или ОЭНФ найдется по крайней мере один терм k , в котором неисправность s , во-первых, фиксирует непустое множество букв Q_k значением 1, во-вторых, не фиксирует ни одной буквы термина k значением 0. Для краткости будем называть такой терм *единичным термом* ЭНФ (ОЭНФ) отно-

сительно неисправности s . Набор X_j , обнаруживающий неисправность s , во-первых, предписывает значение 1 всем буквам k -го единичного терма, не принадлежащим множеству Q_k , во-вторых, значение 0 — хотя бы одной букве из множества Q_k , и, в-третьих, значение 0 — по крайней мере одной букве в каждом из остальных термов ЭНФ (ОЭНФ). Указанные свойства набора по отношению ко всем единичным термам ЭНФ и ОЭНФ, определяемым заданной константной неисправностью s , являются необходимым и достаточным условием принадлежности набора X_j полной проверяющей совокупности $\{X(0, s)\}$.

Таким образом, проверка наличия неисправности s сводится к проверке подмножества Q'_k букв из множества Q_k на наличие фиксации этих букв значением 1.

Пусть задана ЭНФ (ОЭНФ) функции $z(\bar{z})$ и пусть $z_{R_k}(\bar{z}_{R_k})$ — функция, получаемая путем фиксации в k -м терме ЭНФ (ОЭНФ) всех букв множества R_k значением 1. На наборе X_j множество R_k букв k -го терма ЭНФ (ОЭНФ) проверяют в том случае, если во-первых, набор X_j предписывает всем

буквам множества R_k значение 0^* , и, во-вторых, на этом наборе $z(X_j) = 0$ ($\bar{z}(X_j) = 0$), а $z_{R_k}(X_j) = 1$ ($\bar{z}_{R_k}(X_j) = 1$). На наборе X_j все термы ЭНФ (ОЭНФ) равны 0, и в k -м терме всем буквам, не принадлежащим множеству R_k , предписывается значение 1. Сравнив это определение со свойствами наборов из $\{X(0, s)\}$ можно заключить, что при $R_k = Q'_k$ ($Q'_k \subseteq Q_k$) набор X_j обнаруживает неисправность s .

Если для каждого единичного терма ЭНФ и ОЭНФ построить все наборы, проверяющие проверяемые подмножества Q'_k букв, то эти наборы образуют полную проверяющую совокупность $\{X(0, s)\}$. Последняя не зависит от выбранного способа фиксации неисправностью s букв ЭНФ (ОЭНФ) и полностью совпадает с проверяющей совокупностью $\{X(0, s)\}$, полученной любым другим методом, например методом различающих функций.

Пример 4. Для сети на рис. 11 (гл. 2) неисправность $s = \{a^0, (6, 2)^1, 6^0\}$ фиксирует в ЭНФ и в ОЭНФ буквы a_1, a_2, b_1, c_1, d_1 значениями 0, а буквы $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{b}_1, \bar{c}_1, \bar{d}_1$ — значениями 1. Запишем эти значения над соответствующими буквами ЭНФ и ОЭНФ:

$$z = \begin{array}{cccccc} 00 & 000 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ b_1 a_1 & b_1 c_1 d_1 & \bar{a}_2 \bar{c}_2 b_2 & \bar{a}_2 \bar{d}_2 \bar{b}_2 & \bar{a}_2 \bar{c}_2 \bar{d}_3 & \bar{a}_2 \bar{d}_2 \bar{d}_3 \\ \underline{01} & \underline{00} & \underline{011} & \underline{01} & \underline{01} & \underline{0} \end{array}$$

$$\bar{z} = \begin{array}{cccccc} 10 & 1 & 1 & 11 & 11 & \\ b_1 a_2 & b_1 b_2 d_3 & b_1 c_2 d_2 & \bar{a}_1 \bar{c}_1 a_2 & \bar{a}_1 \bar{c}_1 c_2 d_2 & \\ \underline{0} & \underline{011} & \underline{0} & & & \underline{1} \end{array}$$

$$\begin{array}{cccccc} 11 & 101 & 11 & 11 & & \\ \bar{a}_1 \bar{c}_1 b_2 d_3 & \bar{a}_1 a_2 d_1 & \bar{a}_1 \bar{d}_1 c_2 d_2 & \bar{a}_1 \bar{d}_1 b_2 d_3 & & \\ \underline{11} & \underline{1} & \underline{01} & \underline{011} & & \end{array}$$

Единичными относительно неисправности s в ЭНФ являются термы 3, 4, 5 и 6, а в ОЭНФ — термы 2, 3, 5, 6, 8 и 9 (нумерация термов идет слева направо). Начнем с проверки буквы \bar{a}_2 единичного терма 3 в ЭНФ ($Q_3 = \{\bar{a}_2\}$). Выпишем под буквами этого терма значения, которые должны быть им предписаны искомым проверяющим набором $X_j \in \{X(0, s)\}$; и тем самым предпишем входным переменным a, b и c соответственно значения 1, 0, 0, что определяет значения всех других

букв ЭНФ с переменными a, b и c . Все такие предписанные значения букв назовем *обязательными*. Выписанные под формулой z обязательные значения букв подчеркнуты. Значения остальных входных переменных (в данном

* Если входной набор X_j предписывает входной переменной x_α значение $\delta = 1$ (0), то тем самым в ЭНФ (ОЭНФ) любой букве, представляющей переменную x_α (\bar{x}_α) с любым индексом, предписывается значение $\bar{\delta}$ (δ).

случае переменной d) должны быть выбраны так, чтобы все термы ЭНФ были равны 0. В нашем примере все термы ЭНФ равны 0 независимо от значения переменной d . Таким образом, получаем два входных набора 1000 и 1001 ($abcd$), обнаруживающих неисправность s . Проверка буквы \bar{a}_2 в термах 4, 5 и 6 ЭНФ дает еще один искомый набор 1010. Найденные три набора составляют подмножество $\{X(0, s)\}^0$ обнаруживающих неисправность s наборов, на которых исправная схема дает на выходе сигнал 0.

Аналогично проверка проверяемых подмножеств букв единичных термов ОЭНФ относительно неисправности s выявляет наборы подмножества $\{X(0, s)\}^1$, на которых исправная схема имеет на выходе сигнал 1. Заметим, что термы 2, 4, 5, 7, 8, 9 ОЭНФ равны 0 на любом входном наборе. При проверке буквы b_1 в терме 2 ($Q_2 = \{b_1\}$) положим $b = 0$ ($b = 1$) и $d = 1$. Проставим и подчеркнем обязательные вхождения букв. Тогда термы 1 и 3 становятся равными 0, а для равенства нулю терма b необходимо, чтобы одна из переменных a или c равнялась 1, что дает три проверяющих набора 1111, 0111, 1101 $\in \{X(0, s)\}^1$. Проверка подмножеств Q'_k букв в остальных единичных термах ОЭНФ новых проверяющих наборов не выявляет. Построенные шесть обнаруживающих неисправность s входных наборов соответствуют наборам совокупности $\{X(0, s)\}$, найденным выше на основе различающей функции $D[z, z^s]$.

Заметим, что не всегда проверяемые подмножества Q'_k единичных относительно неисправности s термов ЭНФ (ОЭНФ) являются одноэлементными (как в рассмотренном выше примере).

Для получения одного любого проверяющего набора $X(0, s)$ достаточно проверить подмножество букв Q'_k хотя бы в одном единичном относительно s терме ЭНФ или ОЭНФ. Для удовлетворения условий проверки заданного подмножества букв k -го терма в ЭНФ и ОЭНФ большой размерности может потребоваться значительный перебор вариантов доопределения букв, не входящих в k -й терм. Этот перебор можно

исключить, если формализовать процесс проверки букв терма.

Для проверки всех подмножеств Q'_k букв k -го единичного относительно неисправности s терма ЭНФ или ОЭНФ (неисправность s фиксирует значениями 1 множество Q_k букв) необходимо одновременно выполнить следующие условия.

1. Обеспечить равенство $x'_k = 1$ дизъюнкции x'_k инверсий всех переменных, представленных буквами множества Q_k . Тем самым будет обеспечено задание обязательных значений 0 буквам (в конечном итоге входным переменным, представленным буквами) всех проверяемых подмножеств Q'_k множества Q_k .

Пример 5. Для единичного терма 5 $\bar{a}_1 \bar{c}_1 c_2 d_2$ ОЭНФ из примера 4, где $Q_5 = \{\bar{a}_1, \bar{c}_1\}$, получим: $x'_5 = (a \vee c) = 1$.

2. Задать обязательные значения 1 переменным, представленным буквами k -го терма, не принадлежащими множеству Q_k . Это требование можно записать в виде равенства $x''_k = 1$ конъюнкции x''_k указанных переменных.

Для примера 5 имеем: $x''_5 = cd = 1$.

3. Обеспечить равенство нулю остальных термов ЭНФ (ОЭНФ). Поскольку по условию, приведенному в п. 1, k -й терм ЭНФ (ОЭНФ) также равен нулю, рассматриваемое условие (обозначим его записью $\rho = 1$) эквивалентно требованию равенства 1 функции $\bar{z}(z)$. Для этой функции может быть использована любая, в том числе минимальная, форма булевой функции.

Продолжая пример 5, запишем для функции z

$$\rho = z = ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}\bar{c}b = 1.$$

Удовлетворение всех трех условий состоит в равенстве единице функции $x'_k x''_k \rho$, рабочие наборы которой являются искомыми проверяющими наборами.

В завершение примера 5 получим

$$x'_5 x''_5 \rho = (a \vee c)(cd) \times \\ \times (ab \vee \bar{a}d \vee bcd \vee \bar{a}\bar{c}b) = bcd,$$

откуда следует, что все проверяемые подмножества Q_s^i множества Q_s букв можно проверить на наборах 0111 и 1111 ($abcd$). Полученные указанным образом проверяющие наборы для каждого единичного относительно s терма ЭНФ и ОЭНФ образуют полную проверяющую совокупность $\{X(0, s)\}$. Более детальное изложение методов обработки ЭНФ и ОЭНФ содержится в работе [19].

Другой подход к решению задачи построения проверяющих или различающих совокупностей входных наборов состоит в том, что для обнаружения неисправности необходимо и достаточно обеспечить условия ее проявления и условия ее транспортировки до контрольной точки. Этот подход в наиболее явном виде реализует идею метода существенных путей. Формализуем условия одиночных логических неисправностей логических сетей общего вида (произвольный базис элементов, наличие разветвлений, возможная избыточность сети).

Пусть задан комбинационный объект без контуров обратной связи, имеющий n входных и k выходных полюсов и содержащий N логических элементов η_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Для элемента η_i , имеющего n_i входов, на которых в устройстве реализуются функции y_{im} , $m = 1, 2, \dots, n_i$, и один выход с реализуемой на нем функцией y_i , задан список из s_i логических неисправностей. При наличии неисправности s , $s = 1, 2, \dots, s_i$ элемент обозначим символом η_i^s , а реализуемую им логическую функцию — символом y_i^s . Набор $Y_i(0, s)$ значений входных функций y_{im} , на котором $y_i^s(Y_i) \neq y_i(Y_i)$, назовем проверяющим набором элемента η_i (относительно неисправности s). При наличии $p_{is} \geq 1$ проверяющих наборов j -й, $j = 1, 2, \dots, p_{is}$, набор будем обозначать $Y_{ij}(0, s)$. Для m -й компоненты набора $Y_{ij}(0, s)$ введем обозначение $\delta(y)_{im}^s$ и там, где это не внесет путаницы, будем опускать индексы i, m и s . Очевидно, что $\delta(j) = 1, 0$.

Условие подачи на элемент η_i сети хотя бы одного проверяющего набора можно представить в виде

$$\alpha_{is} = \bigvee_{j=1}^{p_{is}} \bigwedge_{m=1}^{n_i} y_{im}^{\delta(j)} = 1, \quad (12)$$

где

$$y_{im}^{\delta(j)} = \begin{cases} y_{im} & \text{при } \delta(j) = 1, \\ \bar{y}_{im} & \text{при } \delta(j) = 0. \end{cases}$$

Выполнение равенства $\alpha_{is} = 1$ является необходимым и достаточным условием проявления неисправности s на выходе элемента η_i .

Подставив в формулу (12) выражения для функций $y_{im}(x_1, \dots, x_n)$, получим функцию α_{is} , зависящую от входных переменных сети, на каждом рабочем наборе которой обеспечивается проявление неисправности s .

Пример 6. Если в сети (см. рис. 11, гл. 2) одиночная неисправность s заключается в изменении функции элемента 4 с ИЛИ на И, то $\alpha_{4s} = y_1 \bar{a} \vee \bar{y}_1 a = \bar{a} c d \vee a (\bar{c} \vee \bar{d})$. На четырех рабочих наборах функции α_{4s} рассматриваемая неисправность s проявляется на выходе элемента 4 в изменении $y_4 = 1$ на $y_4^s = 0$.

Пример 7. В сети (см. рис. 17, гл. 2) короткое замыкание диода D в элементе I_1 не меняет функционирования элемента I_1 , т. е. $y_1 = y_1^s = ab$, но нарушает функционирование элемента I_2 : $y_2 = ac$, $y_2^s = abc$. Указанная неисправность проявляется на выходе элемента I_2 на единственном входном наборе 101 (abc); функция $\alpha_{2s} = abc$ зависит не только от входных переменных a и c элемента I_2 , но также от переменной b .

Константные неисправности на соединениях (узлах), являющихся входами или выходами элемента η_i , будем сводить к логическим неисправностям элемента η_i .

Пример 8. Для шести константных одиночных неисправностей входов и выхода двухвходового элемента I имеем следующие проверяющие на-

боры Y_{ij} и соответствующие функции α_{is} :

z	$Y_{ij}(0, s)$ (y_{i1}, y_{i2})	α_{is}
$(i, 1)^1$	{01}	$\bar{y}_{i1}y_{i2}$
$(i, 2)^1$	{10}	$y_{i1}\bar{y}_{i2}$
$(i, 1)^0$	{11}	$y_{i1}y_{i2}$
$(i, 2)^0$	{11}	$y_{i1}y_{i2}$
i^1	{01, 10, 00}	$\bar{y}_{i1}y_{i2} \vee y_{i1}\bar{y}_{i2} \vee \bar{y}_{i1}\bar{y}_{i2}$
i^0	{11}	$y_{i1}y_{i2}$

При рассмотрении константной неисправности соединения входного полюса с узлом разветвления сети (узла разветвления сети с выходным полюсом) для единообразия представления неисправностей условно внесем в неисправное соединение i -й элемент-повторитель Π_i , функции на входе и выходе которого обозначим соответственно y_{i1} и y_i . Константную неисправность соединения i можно рассматривать как логическую неисправность элемента Π_i .

Запишем функцию α_{is} в виде $\alpha_{is} = \alpha_{is}^1 \vee \alpha_{is}^0$, где α_{is}^1 (α_{is}^0) — функция, рабочие наборы которой задают все проверяющие наборы неисправности s , такие, что $y_i(Y_i) = 1$, а $y_i^s(Y_i) = 0$ ($y_i(Y_i) = 0$, а $y_i^s(Y_i) = 1$).

Обратимся теперь к условию транспортировки неисправности.

Пусть неисправность s проявляется в узле i сети. Введем понятие функции $\beta_{i\gamma}$ наличия существенного (чувствительного) пути от узла i , являющегося выходом элемента η_i , до выходного полюса γ , аргументами которой являются входные переменные сети. Оборвем условно соединение (узел) i и образовавшемуся новому входу сети сопоставим дополнительную входную переменную y_i . Будем считать, что $\beta_{i\gamma}(X_j) = 1$, если на наборе X_j значений входных переменных x_1, \dots, x_n сети изменение значения переменной y_i приводит к изменению значения

выходной функции z_γ сети; в противном случае $\beta_{i\gamma}(X_j) = 0$.

Выполнение равенства

$$\bigvee_{\gamma=1}^k \beta_{i\gamma} = 1 \quad (13)$$

является необходимым условием транспортировки неисправности s элемента η_i , если контрольным точкам соответствуют выходы $z_1, \dots, z_\gamma, \dots, z_k$ сети, а выполнение равенства

$$\bigvee_{\gamma=1}^k \alpha_{is}\beta_{i\gamma} = 1 \quad (14)$$

является необходимым и достаточным условием обнаружения неисправности s элемента η_i на выходах сети. Если (14) не выполняется ни на одном из 2^n наборов входных переменных сети, то неисправность s не существенна, так как она не нарушает правильного функционирования устройства.

Все входные наборы сети, при которых выполняется условие (14), составляют полную проверяющую совокупность $\{X(0, s)\}$ входных наборов относительно неисправности s . Условие проявления одиночной неисправности s определяется требованием образования на входах элемента η_i одного из проверяющих наборов $Y_{ij}(0, s)$. Условие транспортировки неисправности или наличия существенного пути нуждается в конкретизации.

Рассмотрим один из аналитических методов решения уравнения $\beta_{i\gamma} = 1$, т. е. нахождения всех таких входных наборов сети, на каждом из которых обеспечивается существенный путь от узла i до выхода γ . В этом методе использовано понятие *булевой разности*.

Предварительно запишем аналитическое выражение для функции $z_{\gamma i}$, реализуемой на выходном полюсе γ сети, когда узел i является входным полюсом сети с дополнительной входной переменной y_i . Под булевой разностью функции $z_{\gamma i}(x_1, \dots, x_n, y_i)$ относительно переменной y_i понимают функцию

$$dz_{\gamma i}/dy_i = z_{\gamma i}(x_1, \dots, x_n, y_i) \oplus \oplus z_{\gamma i}(x_1, \dots, x_n, \bar{y}_i). \quad (15)$$

Второе слагаемое в правой части выражения (15) отличается от первого инверсным значением переменной y_i , что соответствует изменению значения сигнала в узле i . Из свойства функции «сумма по модулю 2» следует, что выражение (15) равно 1 тогда и только тогда, когда значения первого и второго слагаемых различны, т. е.

$$\beta_{iy} = dz_{yi}/dy_i.$$

Понятие булевой разности функции z_{yi} по переменной y_i совпадает с понятием различающей функции $D[z_{yi}]$, если $z_{yi}^s = z_{yi}(x_1, \dots, x_n, \bar{y}_i)$, т. е. неисправность состоит в инвертировании входной переменной y_i . Приведем без доказательств некоторые важные свойства булевой разности функции $f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ по переменной x_α :

$$1) \frac{df(X)}{dx_\alpha} = \frac{df(X)}{dx_\alpha};$$

$$2) \frac{df(X)}{d\bar{x}_\alpha} = \frac{df(X)}{dx_\alpha};$$

$$3) \frac{df(X)}{dx_\alpha} = 0, \text{ если } f(X) \text{ не зависит от } x_\alpha, \text{ т. е.}$$

$$f(x_1, \dots, x_\alpha, \dots, x_n) = f(x_1, \dots, \bar{x}_\alpha, \dots, x_n);$$

$$4) \frac{df(X)}{d\bar{x}_\alpha} = 1, \text{ если } f(X) \text{ зависит только от } x_\alpha;$$

$$5) \frac{d[f(X)g(X)]}{dx_\alpha} = f(X) \frac{dg(X)}{dx_\alpha} \oplus g(X) \frac{df(X)}{dx_\alpha} \oplus \frac{df(X)}{dx_\alpha} \frac{dg(X)}{dx_\alpha};$$

$$6) \frac{d[f(X) \vee g(X)]}{dx_\alpha} = \bar{f}(X) \frac{dg(X)}{dx_\alpha} \oplus \bar{g}(X) \frac{df(X)}{dx_\alpha} \oplus \frac{df(X)}{dx_\alpha} \frac{dg(X)}{dx_\alpha}.$$

Пример 9. Пусть в сети (см. рис. 11, гл. 2) необходимо найти входные наборы, обеспечивающие наличие существенного пути от нижнего входа 2

элемента 6 до выхода 2. Методом, например, обратной подстановки найдем выражение

$$z_{62}(a, b, c, d, y_{62}) = y_{62}b \vee (\bar{a}d \vee \bar{a}b\bar{c}).$$

Вычислим dz_{62}/dy_{62} . Учитывая свойства 6, 5 и 3 булевой разности булевой функции, получим

$$\beta_{62z} = \frac{dz_{62}}{dy_{62}} = (\bar{a}d \vee \bar{a}b\bar{c}) \frac{d(y_{62}b)}{dy_{62}} = (a \vee d)(a \vee b \vee c)b = ab \vee bd.$$

Последнее выражение обращается в 1 на шести наборах значений переменных a, b, c, d : 1100, 1101, 1110, 1111, 0101, 0111, каждый из которых обеспечивает наличие требуемого существенного пути.

Для неисправности $s = (6, 2)^1$ условие ее проявления имеет вид

$$\alpha_{62s} = \bar{y}_4 = \bar{a}(\bar{c} \vee d) = 1.$$

Тогда полная проверяющая совокупность $\{X(0, s)\}$ может быть получена согласно условию (14):

$$\alpha_{62s}\beta_{62z} = \bar{a}(\bar{c} \vee d)(ab \vee bd) = \bar{a}b\bar{c}d = 1.$$

Таким образом, рассматриваемая неисправность обнаруживается на единственном входном наборе 0101.

Для вычисления булевой разности кроме (15) можно использовать эквивалентное ему выражение

$$\frac{dz_{yi}}{dy_i} = z_{yi}(x_1, \dots, x_n, 1) \oplus \oplus z_{yi}(x_1, \dots, x_n, 0), \quad (16)$$

вычисления по которому в некоторых случаях оказываются проще.

Для рассмотренного примера 9 имеем

$$\begin{aligned} \frac{dz_{62}}{dy_{62}} &= [b \vee \bar{a}(\bar{a}d \vee \bar{a}b\bar{c})] \oplus \\ &\oplus (\bar{a}d \vee \bar{a}b\bar{c}) = \\ &= b(a \vee d)(a \vee b \vee c) = ab \vee bd. \end{aligned}$$

Известны также другие правила получения выражения булевой разности [9].

Метод существенных путей в аналитическом виде для схем большой размерности может оказаться громоздким. Рассмотрим решение задачи задания условий проявления и транспортировки и в конечном итоге построения проверяющей совокупности входных наборов для одиночной неисправности s элемента η_i непосредственно по структуре сети с использованием аппарата комплексов кубов (см. гл. 2) и D -кубов.

Проявление неисправности s элемента η_i на проверяющем ее наборе $Y_{ij}(0, s)$ в двоичной логической сети состоит в изменении значения сигнала $y_i(Y_{ij}) = 1$ (0) в узле i на противоположное значение $y_i^s(Y_{ij}) = 0$ (1). Обозначим это изменение символом D (соответственно \bar{D}).

D -кубом неисправности s элемента η_i назовем $(n_i + 1)$ -мерный вектор, образованный проверяющим набором $Y_{ij}(0, s)$ и приписанным справа от последнего символом D (когда $y_i(Y_{ij}) = 1$ и $y_i^s(Y_{ij}) = 0$) или \bar{D} (когда $y_i(Y_{ij}) = 0$ и $y_i^s(Y_{ij}) = 1$). Совокупность проверяющих наборов $\{Y_{ij}(0, s) / j = 1, 2, \dots, p_{is}\}$ порождает совокупность всех D -кубов неисправности s элемента η_i .

Пример 10. Так, для неисправности s , состоящей в преобразовании трехвходового элемента η_i И в элемент ИЛИ, существует шесть проверяющих наборов входных переменных y_{i1}, y_{i2}, y_{i3} , содержащих одну или две единицы, которые задают шесть D -кубов неисправности s : $100\bar{D}$, $010\bar{D}$, $001\bar{D}$, $011\bar{D}$, $110\bar{D}$ и $101\bar{D}$.

Сжатые D -кубы неисправности s элемента η_i можно получить по минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ) функции α_{is}^1 (α_{is}^0).

Для примера 10 $\alpha_{is} = \alpha_{is}^0 = \bar{y}_{i1}y_{i2} \vee y_{i2}\bar{y}_{i3} \vee y_{i3}\bar{y}_{i1}$ ($\alpha_{is}^1 \equiv 0$). Три конъюнкции функции α_{is}^0 дают три сжатых D -куба неисправности: $10 \sim \bar{D}$, $\sim 10\bar{D}$ и $0 \sim 1\bar{D}$.

Таким образом, задание некоторого D -куба неисправности s является заданием одного из вариантов условия проявления этой неисправности. Чтобы реализовать это задание, необходимо найти такой входной набор X сети, который обеспечивает появление на входах элемента η_i проверяющего набора Y_{ij} , образующего выбранный D -куб неисправности. При этом наборы X и Y_{ij} структурно соответствуют друг другу.

Транспортировка неисправности s из узла i , где s проявляется, в контрольную точку γ , где s обнаруживается, состоит в передаче изменений значений входных сигналов на выходы элементов, расположенных на путях, соединяющих узлы i и γ . Рассмотрим один из таких элементов — элемент η_h .

Изменение значений входных сигналов элемента η_h соответствует тому, что на некотором входном наборе сети X_j его входной набор Y_h при исправной сети отличается от его входного набора Y_h^s при наличии неисправности s в элементе η_i . Сравним по координатно наборы Y_h и Y_h^s и представим их одним набором Y_h^D по следующим правилам:

если $\delta_{hm} = \delta_{hm}^s = 1$ (0), то $\delta_{hm}^D = 1$ (0); если $\delta_{hm} = 1$ (0) и $\delta_{hm}^s = 0$ (1), то $\delta_{hm}^D = D$ (\bar{D}).

Здесь δ_{hm} , δ_{hm}^s и δ_{hm}^D — координаты наборов соответственно Y_h , Y_h^s и Y_h^D , а символ D имеет тот же смысл, что и прежде.

Набор Y_h^D называют входным D -набором элемента η_h ; входной D -набор элемента η_h , представляющий пару наборов Y_h и Y_h^s , таких, что $y_h(Y_h) \neq y_h(Y_h^s)$, — существенным D -набором; D -кубом элемента η_h (или просто D -кубом) — $(n_h + 1)$ -мерный вектор, образованный существенным D -набором и приписанным справа от этого набора символом D или \bar{D} . Входы, которые в D -кубе элемента пред-

ставлены координатами со значениями D и \bar{D} , принято называть существенными* входами относительно данного D -куба, так как одновременное изменение значений сигналов (предписанных набором Y_h) на этих входах на противоположные (предписанные набором Y_h^s) вызывает изменение значения выходного сигнала элемента. Таким образом, D -куб элемента η_h задает один из вариантов выполнения условия транспортировки неисправности через элемент η_h . Все возможные варианты транспортировки любой неисправности s через исправный элемент η_h логической сети могут быть получены исходя только из функции, реализуемой элементом η_h , например, по его таблице истинности путем нахождения всех D -кубов элемента. Для этого попарно сравнивают каждый рабочий набор с каждым из нерабочих наборов таблицы. Один из сравниваемых наборов принимают за набор Y_h , а другой — за набор Y_h^s . При этом в зависимости от того, какой набор пары — рабочий или нерабочий — принят за набор Y_h , каждая пара таких наборов образует два D -куба элемента, один из которых может быть получен из другого заменой всех символов D (\bar{D}) на символы \bar{D} (D). Эти D -кубы называют *дуальными* относительно друг друга.

Пример 11. Пусть табл. 7, гл. 2 (без столбца z_2) является таблицей истинности некоторого трехвходового элемента. Проводя указанное сравнение и выбирая рабочие наборы функции z_1 в качестве набора Y_h , получим (пары сравниваемых наборов представлены в скобках номерами от 0 до 7):

- 1) (2,0) — $0D0D$;
- 2) (2,1) — $0D\bar{D}D$;
- 3) (2,3) — $01\bar{D}D$;
- 4) (2,4) — $\bar{D}D0D$;
- 5) (2,5) — $\bar{D}D\bar{D}D$;
- 6) (6,0) — $DD0D$;
- 7) (6,1) — $DD\bar{D}D$;

- 8) (6,3) — $D1\bar{D}D$;
- 9) (6,4) — $1D0D$;
- 10) (6,5) — $1D\bar{D}D$;
- 11) (7,0) — $DDDD$;
- 12) (7,1) — $DD1D$;
- 13) (7,3) — $D11D$;
- 14) (7,4) — $1DDD$;
- 15) (7,5) — $1D1D$.

Построив для каждого из этих D -кубов его дуальный D -куб, получим множество всех D -кубов рассматриваемого элемента.

Для построенного в примере 11 подмножества D -кубов пары D -кубов: 1 и 9, 2 и 10, 6 и 12, 9 и 15 образуют четыре сжатых D -куба соответственно: $\sim D0D$, $\sim D\bar{D}D$, $DD \sim D$ и $1D \sim D$.

Использование сжатых D -кубов элементов (так же, как и сжатых D -кубов неисправности) позволяет в некоторых случаях более компактно записать множество D -кубов (D -кубов неисправности) элемента и тем самым повышает эффективность алгоритмов вычисления проверяющего набора $X(0, s)$. Наличие сжатого куба с символами \sim на некотором подмножестве координат (будем называть их безразличными) означает наличие D -кубов элемента, отличающихся от рассматриваемого сжатого D -куба элемента всеми возможными наборами значений D , \bar{D} его безразличных координат. Эти D -кубы поглощаются рассматриваемым сжатым D -кубом, и их можно удалить из списка D -кубов элемента.

Так, в примере 11 сжатый D -куб $\sim D0D$ поглощает два D -куба: $DD0D$ и $\bar{D}D0D$. Произведя все поглощения, подмножество D -кубов, построенное в примере 11, можно сократить до семи D -кубов: $\sim D0D$, $\sim D\bar{D}D$, $01D\bar{D}$, $D1\bar{D}D$, $DD \sim D$, $D11D$ и $1D \sim D$.

Координата с символом \sim может иметь любое из четырех значений 0, 1, D или \bar{D} .

Один из вариантов условия транспортировки неисправности s можно представить заданием одного из D -кубов на входах и выходах некоторых элементов, принадлежащих путям, ве-

* Отсюда происходит название «существенный путь».

душим из узла i в узел γ . Необходимыми условиями при этом являются: во-первых, наличие значений D (\bar{D}) только в узлах, принадлежащих этим путям; во-вторых, одному узлу может задаваться только одно из значений D или \bar{D} , точно так же, как и всем узлам, соединенным с одним узлом разветвления; в-третьих, наличие хотя бы одного D -пути (i, γ) , т. е. пути из узла i в узел γ , каждому узлу которого приписан символ D или \bar{D} ; в-четвертых, наличие D -пути (i, h) в любой узел h , имеющий значение D или \bar{D} . Назовем свободными входы элементов D -пути, не принадлежащие этому пути. Тогда для реализации рассматриваемого варианта условия транспортировки неисправности необходимо найти такой входной набор X сети, который обеспечивает появление на свободных входах каждого элемента η_h всех D -путей (i, γ) значений, требуемых D -набором Y_h^D выбранного D -куба элемента η_h .

Набор X является проверяющим относительно неисправности s элемента η_i в том случае, если этот набор структурно соответствует как выбранному проверяющему набору $Y_{ij}(0, s)$ неисправного элемента η_i^s , так и D -набору элемента всех D -путей (i, γ) .

Пусть для элемента η_h имеется входной D -набор Y_h^D , представляющий собой пару таких наборов Y_h и Y_h^s , для которых $y_h(Y_h) = y_h(Y_h^s)$. Тупиковым D -кубом элемента η_h является $(n_h + 1)$ -мерный вектор, состоящий из обладающего указанным свойством D -набора Y_h^D с приписанным справа от этого набора символом 1 (когда $y_h = 1$) или 0 (когда $y_h = 0$). Входы, которые в тупиковом D -кубе элемента представлены координатами со значениями D и \bar{D} , называют несущественными, так как одновременное изменение значений сигналов на этих входах на противоположные не вызывает изменения значения выхода элемента.

Найти тупиковые D -кубы можно

по таблице истинности элемента путем сравнения всех пар рабочих и всех пар нерабочих наборов, принимая один набор пары в качестве набора Y_h , а другой — в качестве набора Y_h^s .

Пример 12. Для элемента (см. предыдущий пример), приняв первый из указанных в скобках набор в качестве набора Y_h , имеем одну часть всех тупиковых D -кубов:

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| (2,6) — $\bar{D}101$; | (1,3) — $0\bar{D}10$; |
| (2,7) — $\bar{D}1\bar{D}1$; | (1,4) — $\bar{D}0D0$; |
| (6,7) — $11\bar{D}1$; | (1,5) — $\bar{D}010$; |
| (0,1) — $00\bar{D}0$; | (3,4) — $\bar{D}DD0$; |
| (0,3) — $0\bar{D}\bar{D}0$; | (3,5) — $\bar{D}D10$; |
| (0,4) — $\bar{D}000$; | (4,5) — $10\bar{D}0$. |
| (0,5) — $\bar{D}0\bar{D}0$; | |

Другие тупиковые D -кубы элемента могут быть найдены построением кубов, дуальных по отношению к каждому из указанных выше.

Аналогично сжатым D -кубам имеется понятие сжатых тупиковых D -кубов, а также операция поглощения кубов.

Задание тупикового D -куба элемента прекращает передачу изменения значений сигналов со входов на выход элемента (обрывается D -путь).

Табл. 2—6 являются сжатыми таблицами: истинности, D -кубов и тупиковых D -кубов двухвходовых элементов И, ИЛИ, «сумма по модулю 2», инвертора и элемента, реализующего функцию $z = x_1x_2 \vee x_2x_3$. Пусть для элементов сети заданы их сжатые таблицы истинности и таблицы всех D -кубов. Для обозначения неопределенного или неизвестного значения сигналов в узлах сети введем символ « \times ». Значения 1, 0, D , \bar{D} будем называть определенными значениями, а значение \sim — безразличным. Назовем кубом элемента η_i $(n_i + 1)$ -мерный вектор, первые n_i координат которого соответствуют входам, а последняя — выходу элемента, причем каждая координата может иметь значение из множества $\{1, 0, D, \bar{D}, \sim, \times\}$.

2. Элемент $z_1 = x_1 x_2 \vee x_2 \bar{x}_3$

x_1	x_2	x_3	z_1	x_1	x_2	x_3	z_1
~	1	0	1	0	1	D	\bar{D}
1	1	~	1	\bar{D}	1	D	D
~	0	~	1	\bar{D}	\bar{D}	~	\bar{D}
0	~	1	0	\bar{D}	1	1	\bar{D}
~	D	0	D	1	\bar{D}	~	\bar{D}
~	D	\bar{D}	D	\bar{D}	1	\bar{D}	1
0	1	\bar{D}	D	0	\bar{D}	\bar{D}	0
D	1	\bar{D}	D	\bar{D}	D	D	0
D	D	~	D	\bar{D}	D	1	0
D	1	1	D	D	1	D	1
1	D	~	D	0	D	D	0
~	\bar{D}	0	\bar{D}	D	\bar{D}	\bar{D}	0
~	\bar{D}	D	\bar{D}	D	\bar{D}	1	0

3. Элемент И

y_1	y_2	y
1	1	1
0	~	0
~	0	0
D	1	D
1	D	D
D	D	D
\bar{D}	1	\bar{D}
1	\bar{D}	\bar{D}
\bar{D}	\bar{D}	\bar{D}
D	\bar{D}	0
\bar{D}	D	0

4. Элемент ИЛИ-НЕ

y_1	y_2	y
0	0	1
~	1	0
1	~	0
\bar{D}	1	D
0	\bar{D}	D
\bar{D}	\bar{D}	D
D	0	\bar{D}
0	D	\bar{D}
D	D	\bar{D}
\bar{D}	D	0
D	\bar{D}	0

5. Элемент «сумма по модулю 2»

y_1	y_2	y	y_1	y_2	y
0	0	0	\bar{D}	1	D
0	1	1	\bar{D}	0	\bar{D}
1	0	1	1	\bar{D}	D
1	1	0	0	\bar{D}	D
D	1	\bar{D}	D	D	0
D	0	D	D	\bar{D}	1
1	D	\bar{D}	\bar{D}	\bar{D}	0
0	D	D	\bar{D}	D	1

Пусть всем узлам сети приписаны неопределенные значения \times .

Заменим некоторые неопределенные значения определенными или безразличными значениями. Результат такой замены называют *исходной фиксацией* соответствующих узлов сети. Узлы сети, для которых при исходной фиксации задают определенные значения, называют *фиксированными*. Суть операции *однозначного распространения* (ОР) над элементом η_i состоит в проверке физической непротиворечивости исходной фиксации и определении значений тех нефиксированных узлов, которым непротиворечивая исходная фиксация однозначно предписывает определенные значения при произвольных значениях в других нефиксированных узлах. Обе эти

6. Инвертор

y_1	y_2
0	1
1	0
D	\bar{D}
\bar{D}	D

задачи решают путем сравнения значений координат заданных исходной фиксацией кубов элементов со значениями соответствующих координат строк их сжатых таблиц истинности и таблиц D -кубов элементов. Строки, для которых значения всех указанных координат совпадают со значениями координат, фиксированных исходной фиксацией, являются *непротиворечивыми* (исходной фиксации). Если в сжатой таблице истинности или таблице D -кубов не содержится ни одной непротиворечивой строки, то исходная фиксация и ее ОР противоречивы. При непротиворечивости исходной фиксации и ОР проверяется наличие одинаковых определенных значений нефиксированных координат во всех непротиворечивых строках. При положительном исходе проверки операцию ОР считают результативной; при отрицательном — нерезультативной. Операция ОР над сетью заканчивается после выполнения всех результативных операций ОР над элементами сети.

Используя операцию ОР над сетью, можно решить задачу проверки — является ли заданный входной набор X сети проверяющим для неисправности s , вариант условия проявления которой задан одним из ее D -кубов неисправности. Исходной фиксацией при этом являются значения сигналов, предписанные D -кубом неисправности s , а также входным набором X .

Схема алгоритма для решения указанной задачи приведена на рис. 5.

Построение всех наборов проверяющей совокупности $\{X(0, s)\}$ можно выполнить путем проверки по алгоритму A_4 каждого из 2^n входных наборов сети для каждого D -куба неисправности s . Если совокупность $\{X(0, s)\}$ пуста, то неисправность s несущественна.

Пример 13. Пусть в сети на рис. 4 неисправным узлом i является входной полюс x_3 , на котором постоянно закреплено значение 0, т. е. $s = x_3^0$. Рассматривая соединение (узел) как повторитель, получим D -куб неисправности s в виде $1D(x_3x_3')$. Проявление рассматриваемой неисправности s обеспечивает каждый из восьми

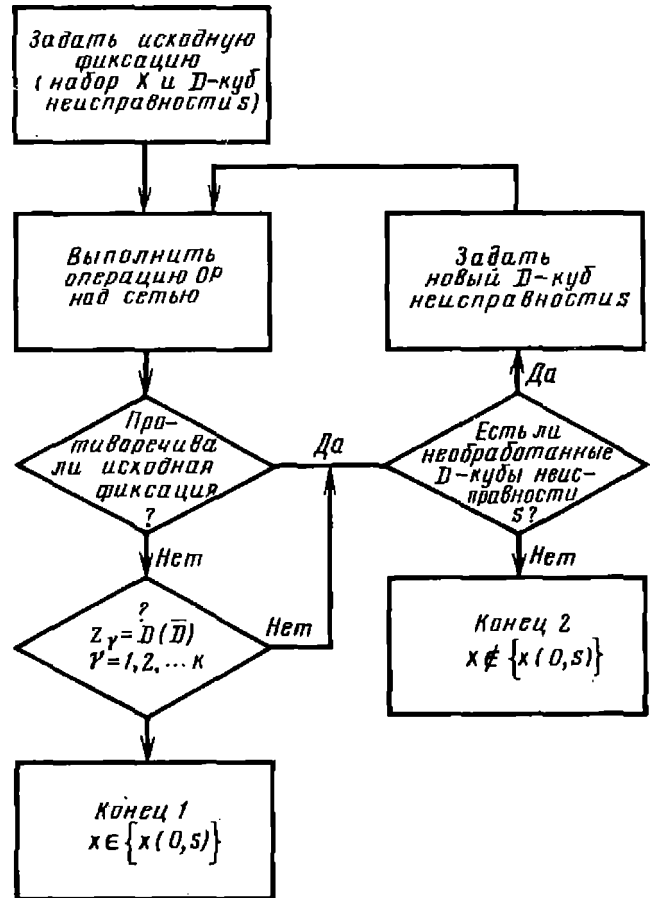


Рис. 5. Схема алгоритма A_4 .

входных наборов сети со значением $x_3 = 1$. Таблица истинности и таблица D -кубов двухвходового элемента ИЛИ-НЕ приведены в табл. 4. Для четырехвходового элемента ИЛИ-НЕ эти таблицы имеют аналогичный вид.

Исходная фиксация задается значением D , на выходе повторителя входа x_3 и исследуемым набором на входах сети. Результаты выполнения операции ОР для всех входных наборов с $x_3 = 1$ сведены в табл. 7. Анализ таблицы показывает, что из восьми наборов, на которых неисправность s проявляется, только на двух (0 0 1 0 и 1 1 1 1) образуется существенный путь от полюса x_3 до выхода z ; эти наборы и составляют искомую совокупность $\{X(0, s)\}$.

Теперь решим задачу построения одного проверяющего набора $X(0, s)$ путем направленного вычисления последнего, а не перебором входных наборов сети.

Введем понятие операции *расширения фиксации* (РФ). Операция РФ над сетью (над элементом) состоит

7. Результаты операции однозначного распространения

Номер по порядку	x_i $x_1 x_2 x_3 x_4$	Y_1 $x_1 x'_3$	Y_2 $x_2 x'_3$	Y_3 $x_3 x_4$	Y_4 $x_2 y_1$	Y_5 $x_1 y_2$	Y_6 $y_2 x_4$	Y_7 $y_3 x'_3$	Y_8 $y_4 y_5 y_6 y_7$	Z	D-пути
1	0 0 1 0	0 D	0 D	0 0	0 \bar{D}	0 \bar{D}	\bar{D} 0	1 D	D D D 0	\bar{D}	$(x'_3, 1, 4, z)$ $(x'_3, 2, 5, z)$ $(x'_3, 2, 6, z)$
2	0 0 1 1	0 D	0 D	0 1	0 \bar{D}	0 \bar{D}	\bar{D} 1	0 D	D D 0 \bar{D}	0	$(x'_3, 1, 4)$ $(x'_3, 7)$ $(x'_3, 2, 5)$
3	0 1 1 0	0 D	1 D	1 0	1 \bar{D}	0 0	0 0	0 D	0 1 1 D	0	$(x'_3, 1)$ $(x'_3, 7)$
4	0 1 1 1	0 D	1 D	1 1	1 \bar{D}	0 0	0 1	0 D	0 1 0 \bar{D}	0	$(x'_3, 1)$ $(x'_3, 7)$
5	1 0 1 0	1 D	0 D	0 0	0 0	1 \bar{D}	\bar{D} 0	1 D	1 0 D 0	0	$(x'_3, 1)$ $(x'_3, 2, 6)$
6	1 0 1 1	1 D	0 D	0 1	0 0	1 \bar{D}	\bar{D} 1	0 D	1 0 0 \bar{D}	0	$(x'_3, 2)$ $(x'_3, 7)$
7	1 1 1 0	1 D	1 D	1 0	1 0	1 0	0 0	0 D	0 0 1 \bar{D}	0	$(x'_3, 7)$
8	1 1 1 1	1 D	1 D	1 1	1 0	1 0	0 1	0 D	0 0 0 \bar{D}	D	$(x'_3, 7, z)$

в принудительном задании или фиксации значений 1 или 0 некоторым незафиксированным узлам сети (входам и выходу элемента). Использование операции РФ позволяет заменять одну фиксацию (когда, например, она противоречива) другой, а также расширять непротиворечивую исходную фиксацию (что необходимо, в частности, когда стоит задача получения фиксированных значений для всех узлов сети). Число возможных вариантов операции РФ определяется числом фиксируемых узлов сети (элемента), каждому из которых независимо от других может быть придано значение 1 или 0.

Суть алгоритма вычисления проверяющего набора (схема этого алгоритма приведена на рис. 6) заключается в следующем. Каждый шаг алгоритма состоит из операции РФ, в результате выполнения которой определяется исходная фиксация на данном шаге, из операции ОР по отношению к этой фиксации и ряда прове-

рок различных условий. Исходную фиксацию на первом шаге задает D-куб неисправности s элемента η_i сети.

Если операция ОР показала, что исходная фиксация непротиворечива, то при наличии нефиксированных узлов выполняют один из вариантов операции РФ, благодаря чему определяется исходная фиксация для следующего шага алгоритма.

Когда нефиксированных узлов нет, проверяют наличие символа D (\bar{D}) хотя бы на одном выходе сети γ (т. е. наличие существенного пути (i, γ)). Если существенный путь (i, γ) имеется, то вычисления в соответствии с алгоритмом заканчиваются определением значений сигналов на входах сети, составляющих искомым проверяющий набор $X(0, s)$ (конец 1).

Если существенного пути нет или операция ОР показала, что исходная фиксация на l -м шаге противоречива, то необходимо вернуться к выполнению того ближайшего шага алгоритма,

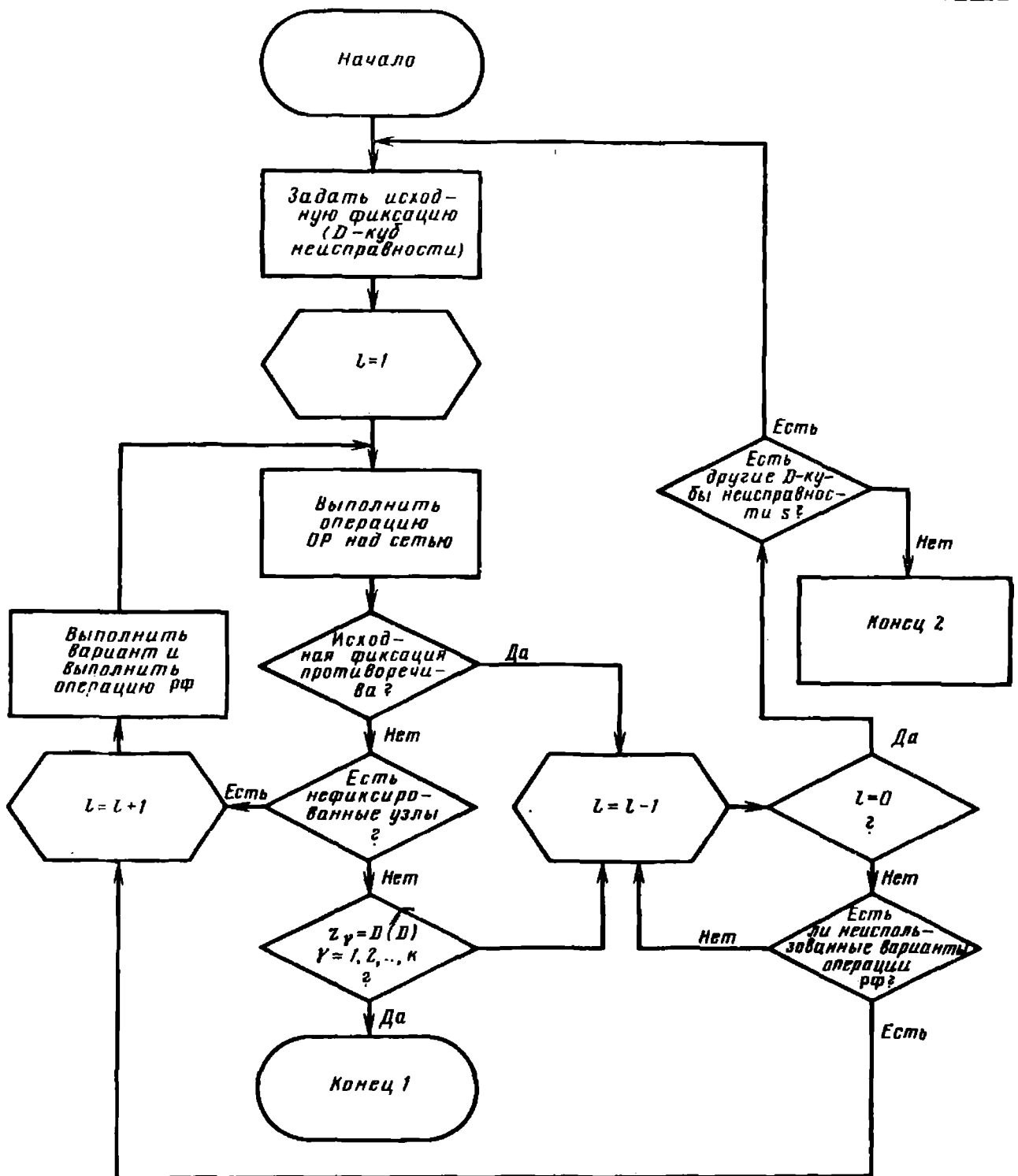


рис. 6. Схема алгоритма A_3

на котором имеется хотя бы один не использованный прежде вариант операции РФ. При возврате с l -го шага к выполнению предыдущего $(l - 1)$ -го шага «стирается» фиксация узлов, полученная при выполнении операций ОР и РФ на l -м шаге. При наличии неиспользованного варианта операции РФ на l -м шаге последняя выпол-

няется, что дает новую исходную фиксацию для $(l + 1)$ -го шага.

Если в процессе возврата алгоритм вышел на первый шаг, то проверяют возможность задания нового D -куба неисправности s . При наличии такого D -куба неисправности алгоритм применяют повторно, а отсутствие D -куба говорит о том, что проверяющего

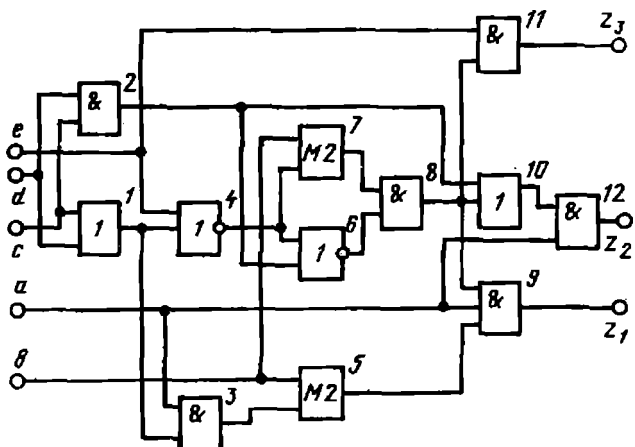


Рис. 7. Логическая сеть для вычисления проверяющего набора методом существенных путей

набора $X(0, s)$ не существует (конец 2), т. е. неисправность s несущественна.

Алгоритм A_5 (см. рис. 6) предполагает наличие некоторой процедуры упорядоченного перебора как вариантов операции РФ, так и D -кубов неисправности s . Это обеспечивает возможность рассмотрения всех возможных вариантов операции РФ для каждого из возможных D -кубов неисправности s . Отсюда следует, что по алгоритму A_5 всегда будет получен проверяющий набор $X(0, s)$, если он существует.

Обычно в работе алгоритма A_5 выделяют два этапа перебора вариантов операции РФ. На первом этапе выполняют так называемые D -операции РФ для организации существенного пути от неисправности узла до одного из выходов сети, а на втором осуществляют доопределение требуемых значений в узлах сети до ее входов.

Пример 14. Построить проверяющий набор для неисправности $s = (4, 2)^0$ сети на рис. 7.

Для указанной неисправности s имеется единственный D -куб неисправности $01\bar{D}$ (ey_1y_4). Результаты расчетов (значения сигналов в узлах сети) сведены в табл. 8, в которой пустые клетки соответствуют значениям \times .

Операция ОР шага 1 непротиворечива и дает $z_3 = 0$ и $y_8 = \sim$. D -операцию РФ шага 2 можно выполнять над элементами 6 и 7; выбираем элемент 6 и D -набор его единственного D -куба $\bar{D}0D$ ($y_4y_2y_6$). В результате операции ОР шага 2 фиксируется значе-

нием D узел 6 сети. На шаге 3 D -операцию РФ проводят над элементом 7 и выбирают вариант D -набора $0\bar{D}$ (by_4). Выполняя операцию ОР этого шага, определяют, что $y_7 = D$, $y_8 = 0$. После шага 3 D -операция РФ невозможна из-за отсутствия в сети элементов, у которых входы фиксированы символами D (\bar{D}), а входы — символом \times . Возвращаемся на один шаг назад и выполняем шаг 3' — проводим D -операцию РФ над элементом 7, выбираем вариант D -набора $1\bar{D}$ (by_4), а также операцию ОР, которая дает $y_7 = y_8 = y_{10} = D$. На шаге 4 D -операция возможна над элементами 9 и 12; выбираем элемент 9 и единственный пригодный D -набор $D11$ (y_8ay_5). Операция ОР при этом противоречива: она требует значения 0 на выходе y_5 , который уже фиксирован значением 1 (в таблице это записано в виде 0/1 для столбца y_5 в строке 8). Возвращаемся на один шаг назад и выполняем шаг 4': для элемента 9 нет вариантов D -операции РФ; проводим D -операцию РФ над необработанным элементом 12, взяв D -набор $D1$ ($y_{10}a$) его единственного D -куба, и операцию ОР, которая фиксирует выход z_2 значением D и узлы y_3 , y_5 и z_1 соответственно значениями 1, 0 и 0. На этом первый этап заканчивается — построены D -пути $(4, 6, 8, 10, z_2)$ и $(4, 7, 8, 10, z_2)$.

На шаге 5 второго этапа алгоритма операция РФ может быть выполнена элементами 1 и 2 (их выходы фиксированы значениями соответственно 1 и 0, а значения входов не определены). Выбираем элемент 2 и по сжатой таблице истинности из двух возможных для операции РФ выбираем куб ~ 00 (dcy_2). В результате операции ОР шага 5 узел d фиксируется значением 1. Все узлы сети фиксированы. Поэтому работа по алгоритму заканчивается — построен проверяющий входной набор $X(0, s) = 11010$ ($abcde$), а полученная на первом этапе алгоритма совокупность D -путей образует сложный существенный путь $\{4, z_2\}$.

При желании получить полную совокупность $\{X(0, s)\}$ проверяющих

8. Построение проверяющего набора

Этап алгоритма	Номер		Операции	Значения сигналов в узлах																
	шага	строки		a	b	c	d	e	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	z ₁	y ₁₀	z ₃	z ₂
I	1	1	РФ (D-куб s)					0	1			\overline{D}								0
		2	ОР					0	1			\overline{D}				~				
	2	3	D-РФ (для η ₆)					0	1	0		\overline{D}				~				0
		4	ОР					0	1	0		\overline{D}		D		~				0
	3	5	D-РФ (для η ₇)		0			0	1	0		\overline{D}		D		~				0
		6	ОР		0			0	1	0		\overline{D}		D	\overline{D}	0				0
	3'	5'	D-РФ (для η ₇)		1			0	1	0		\overline{D}		D		~				0
		6'	ОР		1			0	1	0		\overline{D}		D	D	D		D		0
4	7	D-РФ (для η ₉)	1	1			0	1	0		\overline{D}	1	D	D	D		D		0	
	8	ОР	1	1			0	1	0	1	\overline{D}	0/1	D	D	D	D	D		0	
4'	7'	D-РФ (для η ₁₂)	1	1			0	1	0		\overline{D}		D	D	D		D		0	
	8'	ОР	1	1			0	1	0	1	\overline{D}	0	D	D	D	0	D		D	
II	5	9	РФ (для η ₂)	1	1	0	~	0	1	0	1	\overline{D}	0	D	D	D	0	D	0	D
		10	ОР	1	1	0	1	0	1	0	1	\overline{D}	0	D	D	D	0	D	0	D

входных наборов необходимо после получения каждого очередного набора $X(0, s)$ продолжить работу по алгоритму A_5 путем возврата к выполнению ближайшего предыдущего шага, на котором имеются неиспользованные варианты операции (D -операции) РФ или же варианты задания D -кубов неисправности s . После исчерпания всех таких вариантов работа алгоритма заканчивается, а все полученные наборы $X(0, s)$ образуют совокупность $\{X(0, s)\}$.

Более подробное изложение особенностей построения проверяющих наборов на основе исчисления D -кубов содержится в работах [1, 55].

Построение проверяющих наборов для комбинационных объектов, заданных альтернативными графами, базируется главным образом на понятиях существенного пути и булевой разности, интерпретируемых в терминах движения по вершинам альтернативных графов для древовидных подсхем объекта [67].

Методы построения проверяющих наборов по неявным моделям [37] для релейно-контактных объектов относительно константных неисправностей типа обрывов и коротких замыканий контактов и обмоток реле по существу совпадают с методами проверки букв ЭНФ и ОЭНФ. Для этих объектов аналогами ЭНФ и ОЭНФ являются булевы дизъюнктивные нормальные формы, каждый терм которых представляет цепь и соответственно сечение схемы объекта. Описание методов построения тестов для релейно-контактных схем по ТФН содержится в работе [71].

Построим различающую совокупность входных наборов $\{X(s, t)\}$ для двух неисправностей s и t ($s \neq t$) сети. Для одновыходных комбинационных устройств полная различающая совокупность $\{X(s, t)\}$ может быть построена на основе полных проверяющих совокупностей $\{X(0, s)\}$ и $\{X(0, t)\}$. Действительно, в различающую совокупность $\{X(s, t)\}$ входят те наборы из $\{X(0, s)\}$, которые не являются наборами совокупности $\{X(0, t)\}$, и наоборот. Формально это можно записать в виде разности объединения и пересечения множеств:

$$\begin{aligned} \{X(s, t)\} &= (\{X(0, s)\} \cup \\ &\cup \{X(0, t)\}) \setminus (\{X(0, s)\} \cap \{X(0, t)\}). \end{aligned} \quad (17)$$

Выражение (14) является условием проявления α_{is} и условием транспортировки $\beta_{i\gamma}$ неисправности s элемента η_i , обнаруживаемой на выходе γ . При использовании тех же обозначений необходимое и достаточное условие различения неисправности s элемента η_i и неисправности t элемента η_j приобретает вид

$$\begin{aligned} \bigvee_{\gamma=1}^k [\alpha_{is}\beta_{i\gamma}(\bar{a}_{jt} \vee \bar{\beta}_{i\gamma}) \vee \\ \vee \alpha_{jt}\beta_{j\gamma}(\bar{a}_{is} \vee \bar{\beta}_{i\gamma})] = 1. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь запись \bar{a}_{is} ($\bar{\beta}_{i\gamma}$) означает неудовлетворение условия проявления (транспортировки) неисправности s . Все входные наборы сети, при которых выполняется условие (18), составляют полную различающую совокупность $\{X(s, t)\}$. Условие (18) позволяет выделить в сети по крайней мере один выходной полюс γ и найти такой входной набор, на котором на полюсе γ выполняются оба условия обнаружения неисправности s , но не выполняется хотя бы одно из условий обнаружения неисправности t , или наоборот.

Пример 15. Пусть в сети (см. рис. 11, гл. 2) рассматриваются две неисправности. Неисправность s состоит в изменении функции элемента 4 с ИЛИ на И. Ранее было получено выражение для функции $\alpha_{4s} = \bar{a}cd \vee a(\bar{c} \vee \bar{d})$. Неисправность $t = (6, 2)^0$; для этой неисправности $\alpha_{6t} = by_4 = b(a \vee \vee cd)$. Выражения для функций β_{4z} и β_{6z} найдем на основе выражений для $z_4(a, b, c, d, y_4)$ и $z_6(a, b, c, d, y_6)$ и булевых разностей dz_4/dy_4 и dz_6/dy_6 :

$$\begin{aligned} z_4 &= by_4 \vee \bar{y}_4(b \vee \bar{d}), \\ z_6 &= y_6 \vee (\bar{a} \vee \bar{c}d) / (b \vee \bar{d}) = \\ &= y_6 \vee \bar{a}(\bar{c} \vee \bar{d})(b \vee \bar{d}), \\ \beta_{4z} &= dz_4/dy_4 = b \oplus (b \vee \bar{d}) = d \vee b, \\ \beta_{6z} &= dz_6/dy_6 = [\bar{a}(\bar{c} \vee \bar{d})(b \vee \bar{d})] = \\ &= a \vee d(b \vee c). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Определим } \{X(0, s)\} \text{ и } \{X(0, t)\}: \\
 \alpha_{as}\beta_{az} &= [\bar{a}cd \vee a(\bar{c} \vee \bar{d})](d \vee b) = \\
 &= \bar{a}bcd \vee ab\bar{c}d \vee \bar{a}bcd \vee ab\bar{c}d \vee \\
 & \quad \vee ab\bar{c}d \vee ab\bar{c}d, \\
 \{X(0, s)\} &= \\
 &= \{0111, 1101, 0011, 1001, 1000, 1010\}, \\
 \alpha_{bt}\beta_{bz} &= b(a \vee cd)[a \vee d(b \vee c)] = \\
 &= ab \vee bcd, \\
 \{X(0, t)\} &= \\
 &= \{1100, 1101, 1110, 1111, 0111\}. \\
 & \text{На основании (17)} \\
 \{X(s, t)\} &= \{0011, 1001, 1000, \\
 & \quad 1010, 1100, 1110, 1111\}.
 \end{aligned}$$

Рассмотренный подход построения различающей совокупности можно распространить и на многовыходные устройства, если номера наборов проверяющих совокупностей $\{X(0, s)\}$ $\{X(0, t)\}$ снабжать индексами номеров выходных полюсов, на которых обнаруживаются неисправности s и t .

Построение проверяющих последовательностей входных наборов для дискретных объектов с памятью по их неявным моделям. Одним из видов неявной модели дискретного объекта с памятью является абстрактная или структурная таблица переходов-выходов автомата. Моделью неисправностей при этом являются искажения таблицы переходов-выходов исправного объекта. Проверяющей последовательностью является такая последовательность входных символов или наборов, по ответам на которую исследуемого автомата можно определить, соответствует ли его таблица переходов-выходов таблице исправного автомата. Как правило, предполагают, что автомат сильносвязный, минимальный и для него существует *отличительная* (диагностическая) последовательность, т. е. последовательность, позволяющая определить начальное состояние, в котором находился автомат перед подачей этой последовательности. На класс неисправностей накладывают ограничение: они не увеличивают число состояний автомата.

Один из способов построения проверяющих последовательностей по таблице переходов-выходов исправного автомата заключается в следующем. Последовательность состоит из трех частей. Первая часть предназначена для установки автомата в начальное состояние, например Y_1 . Эта часть состоит из так называемой *установочной* последовательности, переводящей автомат из любого состояния в некоторое известное состояние Y_g , и из последовательности, переводящей автомат из состояния Y_g в состояние Y_1 . Обе эти последовательности всегда существуют для сильносвязного автомата. Вторая часть установочной последовательности состоит из отдельных фрагментов (их число равно числу состояний автомата), каждый из которых содержит отличительную последовательность, предназначенную для проверки того, что автомат действительно был установлен в соответствующее состояние (в частности, Y_1), а также последовательность, переводящую автомат в очередное подлежащее проверке состояние, например Y_2 . Вторая часть проверяющей последовательности завершается фрагментом повторной установки автомата в состояние Y_1 и следующей за ним отличительной последовательности, проверяющей правильность этой установки. Третья часть проверяющей последовательности предназначена для проверки правильности переходов из каждого состояния под воздействием каждого входного символа или набора. Эта часть также состоит из фрагментов, содержащих отдельные входные символы (наборы), отличительные последовательности и последовательности перевода из известного состояния в требуемое.

Методы, реализующие построение проверяющих последовательностей, а также методы, дающие более экономное решение этой задачи, изложены в работах [11, 16].

Многие методы построения проверяющих последовательностей для комбинационных объектов могут быть распространены на объекты с памятью при представлении последних *итеративной моделью*, состоящей из последовательного соединения комбина-

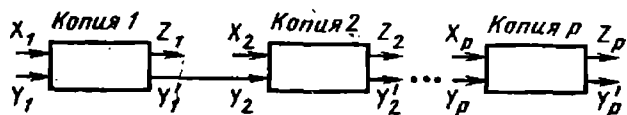


Рис. 8. Однолинейное представление итеративной модели

ционных эквивалентов (копий) логической автоматной сети [когда в последней разорваны все или только внешние обратные связи (см. гл. 2)]. Однолинейная итеративная модель приведена на рис. 8. Нижние индексы при символах векторов входных X , внутренних Y и Y' и выходных Z переменных являются номерами копий и одновременно номерами тактов работы объекта как автомата с памятью. Для копии v , $v = 1, 2, \dots, p$, вектор Y_v задает состояние автомата в настоящий момент времени v , а вектор Y_{v+1} — в следующий момент времени $v + 1$, $Y'_v = Y_{v+1}$.

К итеративной модели для построения входных проверяющих последовательностей, обнаруживающих заданную неисправность, может быть применен метод существенных путей. Одиночная неисправность объекта представляется p -кратной неисправностью итеративной сети (каждая копия содержит одну одиночную неисправность). Контрольными точками являются внешние выходы Z_p последней копии. Начальное состояние объекта предполагается неизвестным, поэтому обязательным условием является получение безразличных значений (\sim) на входах Y_1 первой копии. Искомой проверяющей последовательностью $\langle X_j \rangle$ является последовательность входных наборов $\langle X_1, X_2, \dots, X_l \rangle$ длины $l \leq p$. Случай $l < p$ имеет место для асинхронных устройств при наличии неустойчивых состояний (при этом некоторые соседние копии будут иметь одинаковые входные наборы X_j).

Для построения итеративной модели выбор точек разрывов обратных связей не имеет большого значения, так как при любом выборе проверяющая последовательность будет построена, если она может быть построена этим методом, хотя разные варианты выбора могут давать разные последователь-

ности по составу и числу входящих в них наборов.

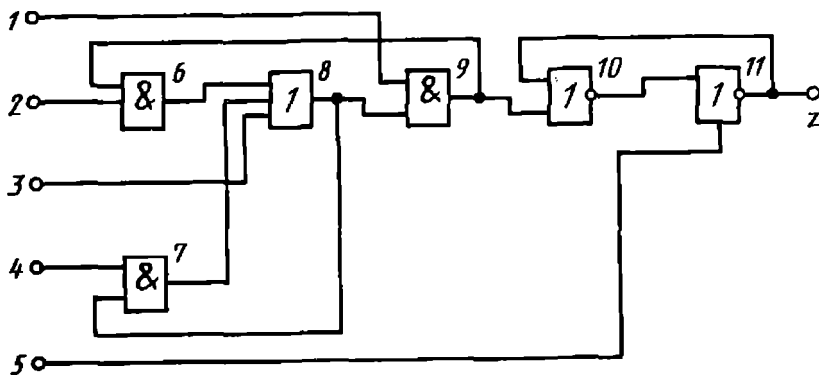
Построение проверяющей последовательности начинают с рассмотрения итеративной модели, содержащей единственную копию ($p = 1$). На сети ищут условия образования существенного пути $\{i, \gamma\}$ от неисправного узла i до хотя бы одного внешнего выхода γ , $\gamma = 1, 2, \dots, k$, при $y_\beta = \sim$ для всех $\beta = 1, 2, \dots, m$. Если существенный путь $\{i, \gamma\}$ построен, то соответствующий входной набор образует искомую входную последовательность $\langle X_p \rangle$ длины 1. Если при указанных условиях существенный путь $\{i, \gamma\}$ построить не удастся, то переходят к рассмотрению итеративной модели из двух копий ($p = 2$), и т. д.

При числе копий $p \geq 2$ следует рассматривать варианты образования существенных путей $\{i_v, \gamma_p\}$ как от неисправного узла i_v одной копии v , $1 \leq v \leq p$, так и от неисправных узлов нескольких копий до внешнего выхода γ_p последней копии p . Иными словами, существенный путь может иметь несколько начальных вершин, а передача значения D (\bar{D}) может происходить через неисправный элемент.

На втором этапе алгоритма (этапе доопределения значений сигналов в узлах сети до ее входов) необходимо обеспечить безразличные значения всех внутренних переменных на входах первой копии и учесть наличие неисправного узла в каждой обрабатываемой копии. Первое требование удовлетворяется путем выбора подходящих вариантов операции расширения фиксации, а неисправные узлы учитывают следующим образом.

Если в результате очередной операции над элементами сети в неисправном узле i будет получено значение 0 или \bar{D} при неисправности i^0 либо значение 1 или \bar{D} при неисправности i^1 , то никаких действий по учету влияния неисправности предпринимать не нужно. В противном случае (в узле получено значение 1 или \bar{D} при неисправности i^0 либо значение 0 или \bar{D} при неисправности i^1) необходимо моделирование работы исправной и не-

Рис. 9. Логическая сеть для построения проверяющей последовательности



исправной сети на полученной последовательности выходных наборов. Если при моделировании значения сигналов в контрольной точке γ для исправной и неисправной сети различны, то последовательность является проверяющей; при одинаковых значениях сигналов в узле γ следует искать другую проверяющую последовательность.

Для синхронных объектов приведенных выше условий построения проверяющих последовательностей достаточно, если предположить, что имеется возможность контролировать значения выходов устройства в каждом такте синхронизирующей последовательности. Для асинхронных объектов необходимо выполнение двух следующих дополнительных требований.

Ради удобства измерений необходимо (или желательно), чтобы значения выхода γ_p (выходов, которыми заканчиваются существенные пути) были устойчивыми. Второе дополнительное требование обуславливается тем, что для обеспечения правильной работы в асинхронных объектах смена

входных наборов должна происходить только в устойчивых состояниях.

Пример 16. Для объекта, заданного логической сетью рис. 9, построить входную последовательность, обнаруживающую неисправность 6^0 . Для логических элементов сети заданы их сжатые таблицы истинности, таблицы D-кубов неисправностей и таблицы D-кубов (в том числе тупиковых D-кубов) элементов. Разорвем контуры сети на верхних входах элементов 6 и 10 и на нижнем входе элемента 7. Точкам разрывов соответствуют переменные y_8, y_9, y_{11} и y'_8, y'_{11} .

Ограничиться одной копией ($p = 1$) нельзя, так как проявление неисправности 6^0 требует задания на элементе 6 единственно возможного D-куба неисправности $11D (y_9, 2, 6)$, который предписывает значение 1 внутренней переменной y_9 .

Две копии ($p = 2$) позволяют найти последовательность, обнаруживающую неисправность 6^0 . На рис. 10 приведена соответствующая итеративная модель, в узлах которой ука-

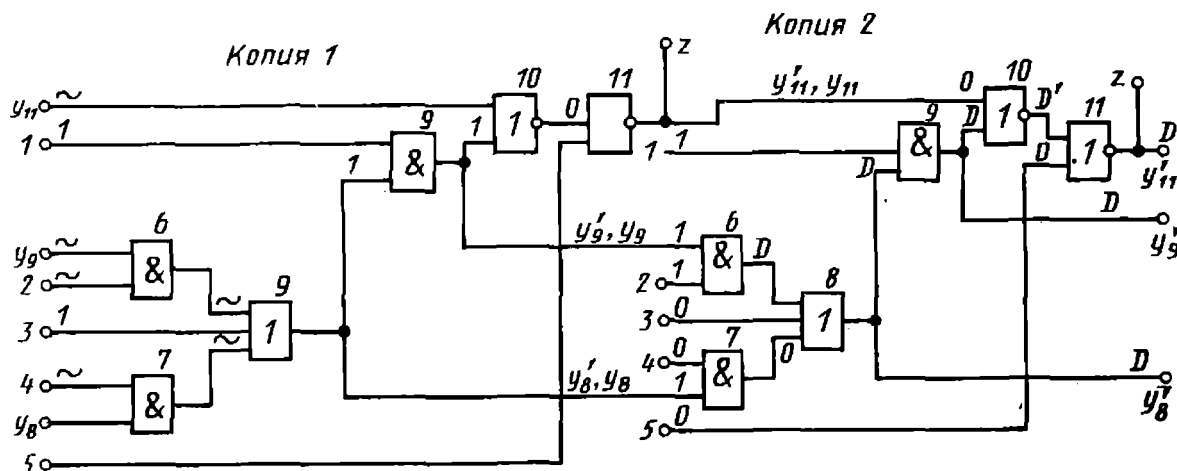


Рис. 10. Итеративная модель для сети на рис. 9

9. Результаты моделирования на входном наборе

Входные наборы	Переменные входного набора										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Исправный объект</i>											
X_1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
$X_{1,2}$	1	1	1/2	0	1/2	1	0	1	1	0	1/2
X_2	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
<i>Неисправный объект</i>											
X_1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
$X_{1,2}$	1	1	1/2	0	1/2	0	0	1/2	1/2	1/2	1/2
X_2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1/2	1/2

заны значения сигналов, полученные в результате расчета. Проверяющая последовательность состоит из двух входных наборов:

$$\begin{array}{cccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\
 X_1 = & 1 & \sim & 1 & \sim & 1 \\
 X_2 = & 1 & 1 & 0 & 0 & 0,
 \end{array}$$

причем набор X_1 определен не полностью.

Получение не полностью определенных входных наборов является характерным при построении тестовых последовательностей по логической сети объекта. Для асинхронных объектов доопределение таких наборов следует выполнять так, чтобы смежные в последовательности наборы отличались значениями как можно меньшего числа переменных. При этом уменьшается опасность возникновения состязаний из-за невозможности практически обеспечить строго одновременное изменение значений нескольких входных переменных. Однако при любом способе доопределения полученная входная последовательность должна подвергаться трюичному моделированию для выявления недопустимых состязаний. Если состязания вызваны отсутствием одновременного изменения значений нескольких переменных в двух смежных наборах X_v и X_{v+1} последовательности, то следует устранить это требо-

вание введением в последовательность дополнительных наборов. Дополнительные наборы X_a, X_b, \dots, X_r должны быть такими, чтобы в последовательности $X_v, X_a, X_b, \dots, X_r, X_{v+1}$ любые два смежных набора были соседними по единственной переменной. После введения дополнительных входных наборов необходимо проверить, является ли полученная последовательность тестовой, и провести повторно трюичное моделирование.

Следуя указанной выше рекомендации, неопределенности в наборе на полюсах 2 и 4 заменяют определенными значениями 1 и 0 из набора X_2 . Тогда $X_1 = 11101$. Результаты моделирования на входных наборах X_1 и X_2 представлены в табл. 9.

Анализ таблицы показывает, что в неисправном устройстве возможны критические состязания (значения 1/2 в узлах 10 и 11 на наборе X_2), из-за которых нельзя будет уверенно обнаружить неисправности 6⁰ на выходе z. Причиной состязаний является одновременное изменение входных переменных 3 и 5 при переходе от набора X_1 к набору X_2 . Введем между X_1 и X_2 дополнительный набор $X_a = 11001$, т. е. перейдем к последовательности (X_1, X_a, X_2) длины 3.

Результаты трюичного моделирования сети (см. рис. 9) на последова-

10. Результаты моделирования на дополнительном наборе

Входные наборы	Переменные дополнительного набора										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Исправный объект</i>											
X_1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
$X_{1, a}$	1	1	1/2	0	1	1	0	1	1	0	0
X_a	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
$X_{a, 2}$	1	1	0	0	1/2	1	0	1	1	0	1/2
X_2	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
<i>Неисправный объект</i>											
X_1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
$X_{1, a}$	1	1	1/2	0	1	0	0	1/2	1/2	1/2	0
X_a	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
$X_{a, 2}$	1	1	0	0	1/2	0	0	0	0	1	0
X_2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

тельности (X_1, X_a, X_2) приведены в табл. 10. Недопустимые состязания теперь не возникают (выход 11 имеет на наборе X_2 определенные значения: 1 — в исправном объекте и 0 — в неисправном).

Известны модификации метода существенных путей для построения свободных от состязаний проверяющих последовательностей, что исключает необходимость их моделирования.

При «автоматном» подходе построение проверяющих последовательностей проводят непосредственно по логической сети исправного объекта без разрыва обратных связей. Элементы памяти и контуры обратных связей могут быть обработаны как отдельные элементы, заданные их таблицами переходов-выходов и D -кубами, либо как логические подсети с обратными связями. В первом случае для контуров предварительно строят таблицы: структурные переходов-выходов, истинности и D -кубов.

D -куб контура называют *внешним (внутренним)*, если значение D (\bar{D}), кроме входных переменных контура, имеют только его входные (только внутренние) переменные. В других случаях D -куб является *смешанным*. Внешний D -куб называют *безуслов-*

ньм, если все его внутренние переменные контура имеют значение \sim . В противном случае внешний D -куб является *условным*. Различают также устойчивые и неустойчивые D -кубы контуров.

Контур может находиться в *псевдоконтурном режиме* (его внутренние переменные несущественны), в *режиме запоминания* (внутренние переменные существенны, состояние контура устойчиво) и в *режиме генерации* (внутренние переменные существенны, состояние неустойчиво). Входной набор контура, устанавливающий его в определенное состояние, называют *устанавливающим*; при этом контур находится в псевдоконтурном режиме. *Нейтральным* называют входной набор, устанавливающий контур в режим запоминания или генерации. Для запоминания в контуре определенного его состояния σ необходимо в общем случае, чтобы подаче нейтрального набора предшествовала подача набора, устанавливающего состояние σ .

В описании алгоритма, реализующего «автоматный» подход к построению проверяющих последовательностей, основное внимание уделено особенностям, отличающим этот алгоритм от алгоритма A_3 , реализующего метод

существенных путей для комбинационных объектов.

Сначала задают на сети условия проявления неисправности, т. е. задают D -кубы неисправности на логическом элементе, элементе памяти, или, наконец, на внешнем входе сети. Если неисправным является выход элемента памяти, то в первую очередь следует использовать безусловные D -кубы неисправности. При использовании условного D -куба неисправности фиксируется начальное внутреннее состояние (обозначим его символом Y_n), предписываемое исправному элементу памяти выбранным D -кубом. Задаваемые D -кубами неисправности значения в узлах сети относят к моменту времени t . В начальное состояние Y_n элемент памяти должен быть установлен заранее в момент времени, меньший t .

После этого переходят к заданию на сети условий транспортировки неисправности, т. е. организации существенного пути $\{i, \gamma\}$ от неисправного узла i до одного из внешних выходов γ , также в момент времени t . При наличии в пути $\{i, \gamma\}$ элементов памяти (в том числе принадлежащих контурам) на этих элементах задаются в первую очередь внешние безусловные D -кубы; если таких D -кубов нет или их задание невозможно из-за противоречий, то используются внешние, а затем и смешанные условные D -кубы. В последних случаях также фиксируются начальные состояния Y_n , в которые должны быть установлены элементы памяти в момент времени меньше t .

В контурах, которые предварительно не были обработаны, условия транспортировки задаются D -кубами контурных логических элементов и контурных элементов памяти. Если при этом в контуре необходимо задание режима запоминания, то фиксируются начальные значения y_n всех контурных узлов с тем, чтобы установить эти значения в момент времени, меньший t .

После задания условий проявления и транспортировки неисправности выполняют операции ОР над элементами сети. Признаком задания контуру режима запоминания при организации

существенного пути служит возникновение одного из противоречий вида $0-D(\bar{D})$ или $1-D(\bar{D})$ на контурном узле. Это противоречие разрешимо и устраняется предварительной установкой начальных значений y_n всех контурных узлов в момент времени, меньший t . В ряде случаев рекомендуется операцию ОР выполнить одновременно с операцией РФ или D -операцией РФ.

В процессе построения существенного пути $\{i, \gamma\}$ могут быть использованы неустойчивые D -кубы элементов памяти, а также могут оказаться неустойчивыми состояния контуров. Поэтому необходимо выполнить прямое моделирование сети с целью определения устойчивости значения $D(\bar{D})$ в узле γ . Если устойчивое значение D или \bar{D} на узле γ не получено, то строят новый вариант существенного пути $\{i, \gamma\}$. В противном случае переходят ко второму этапу алгоритма. Исходной фиксацией значений сигналов в узлах сети при этом являются значения, полученные в результате построения существенного пути $\{i, \gamma\}$ и отнесенные к моменту времени t .

Успешным завершением второго этапа алгоритма для момента времени t является получение входного набора $X(t)$. Если все возможные варианты доопределения оказались противоречивыми (набор $X(t)$ не построен), то возвращаются к первому этапу алгоритма, выбирают другой вариант существенного пути $\{i, \gamma\}$ и снова выполняют доопределение при новой полученной исходной фиксации.

Когда входной набор $X(t)$ получен, моделируют работу сети на наборе $X(t)$ (с предварительным заданием, если это необходимо, исходных состояний $\{Y_n\}_{<t}$ и $\{y_n\}_{<t}$) с целью проверки устойчивости значения $D(\bar{D})$ в контрольной точке γ . Если устойчивость не достигнута, то рассматривают новый вариант доопределения. В противном случае при условии, что $\{Y_n\}_{<t} = \emptyset$ и $\{y_n\}_{<t} = \emptyset$, поиск других вариантов прекращают — построена проверяющая последовательность $\langle X(t) \rangle$ длины 1. Если по-

следнее условие не выполняется, то поступают следующим образом.

На входы тех элементов памяти, которые требуют предварительной установки в состояние Y_H , подают устанавливающие их в Y_H входные наборы. Полученные при этом значения входов элементов памяти, а также значения контурных переменных $\{y_H\}_{<t}$ относят к моменту времени $t-1$ и принимают в качестве исходной фиксации, после чего снова выполняют второй этап алгоритма.

Если из-за противоречий подача устанавливающего в Y_H набора на некоторый элемент памяти невозможна, то следует попытаться сохранить на нем режим запоминания, отнеся установку в состояние Y_H на момент времени, меньший $t-1$. Аналогично следует поступать, когда противоречия не позволяют задать некоторому контуру псевдоконтурный режим — в момент времени $t-1$ сохраняется режим запоминания, а подача устанавливающего набора переносится на момент времени $<(t-1)$.

Успешное доопределение значений узлов сети в момент времени $t-1$ дает входной набор $X(t-1)$. Проверяют наличие состояний $\{Y_H\}_{<(t-1)}$ элементов памяти, а также контурных переменных $\{y_H\}_{<(t-1)}$, для которых необходима предварительная установка в момент времени, меньший $(t-1)$, и выполняют моделирование работы сети на наборе $X(t-1)$. При $X(t-1) = X(t)$ целью моделирования является проверка устойчивости значения $D(\bar{D})$ в контрольной точке γ , а при $X(t-1) \neq X(t)$ — проверка устойчивости исходной фиксации значений в узлах сети для момента времени $t-1$. При отрицательном исходе моделирования ищут новый вариант доопределения для момента времени $t-1$.

При положительном исходе и при условии, что $\{Y_H\}_{<(t-1)} = \emptyset$ и $\{y_H\}_{<(t-1)} = \emptyset$, выполнение алгоритма прекращают — построена входная последовательность $\langle X(t-1), X(t) \rangle$ длины 2. Если же $\{Y_H\}_{<(t-1)} \neq \emptyset$ или $\{y_H\}_{<(t-1)} \neq \emptyset$, то набор $X(t-1)$ запоминается, после чего

выполняется этап доопределения для момента времени $t-2$ и т. д.

В заключение полученную входную последовательность $\langle X(t-l_{\max}), \dots, X(t-1), \dots, X(t) \rangle$, где l_{\max} — максимальное значение l , проверяют на отсутствие недопустимых состязаний методом троичного моделирования.

Детальное изложение алгоритма и пример его применения содержатся в работе [55]. Там же приведены другие методы построения проверяющих последовательностей. Применение аппарата булевых разностей для построения проверяющих последовательностей изложено в работе [9], а аппарата альтернативных графов — в работе [67].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Для построения алгоритмов диагностирования аналоговых объектов используют метод выбора обобщенных диагностических параметров (ОДП) (см. также гл. 2).

Метод выбора обобщенных диагностических параметров. Для того чтобы конкретизировать содержание метода выбора ОДП, рассмотрим его структуру применительно к классу объектов, описываемых системами обыкновенных линейных дифференциальных или разностных уравнений.

Прежде всего рассмотрим метод определения обобщенных диагностических параметров для непрерывной линейной нестационарной системы.

Пусть объект, разделенный на n функциональных элементов (ФЭ), описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\begin{cases} \frac{dY(t)}{dt} = A(t)Y(t) + B(t)X(t), \\ Z(t) = H(t)Y(t), \quad Y(t_0) = Y_0, \end{cases} \quad (19)$$

где $A(t)$ — матрица, определяющая структуру объекта; $Y(t)$ — вектор параметров, представляющих техническое состояние n функциональных элементов; $B(t)$ — матрица, характе-

ризующая связь внешних входных сигналов $X(t)$ с рассматриваемым объектом.

Для определения технического состояния объекта производят измерения сигналов в контрольных точках. Результатом этих измерений является вектор $Z(t)$, связанный с параметрами функциональных элементов с помощью матрицы $H(t)$. Очевидно, что (19) может быть получена при конкретизации зависимостей (1) и (6), приведенных в гл. 2, если задать $f(X, U, t) = A(t)Y(t) + B(t)X(t)$, а $\rho(x, t) = H(t)Y(t)$. Система (19) управляема [33], если существует такой момент $t_0 \in \tau$, для которого

$$\text{rank } Q = \text{rank } (Q_1(t_0), Q_2(t_0), \dots, Q_n(t_0)) = n, \quad (20)$$

где

$$Q_1(t) = B(t), \\ Q_i(t) = -\frac{\partial Q_{i-1}(t)}{\partial t} + A(t)Q_{i-1}(t), \\ i = \overline{2, n}.$$

С помощью приведенного критерия выявляют требования к матрицам $A(t)$ и $B(t)$, а именно необходимость существования производных $n-1$ порядка для каждой из них. В противном случае, начиная с некоторого $j < n$, может оказаться невозможным построение элементов матрицы Q .

Этот критерий позволяет также определить некоторые пути обеспечения нужного ранга. Это сводится к необходимости выбора таких тестовых входных воздействий (или способов их преобразования с помощью матрицы $B(t)$), чтобы их производные были линейно независимы в интервале наблюдения. На практике это приводит либо к выбору входных сигналов соответствующей формы, либо к увеличению числа тестовых сигналов, т. е. использование рангового критерия (20) позволяет предъявлять требования к виду входных тестовых сигналов и проверять, насколько выбранные сигналы пригодны для диагностирования. На основе (20) находят также минимальное число входных сигналов $k^* < n$, входящих в обобщенный параметр, так как входной

вектор $X(t)$ может иметь размерность $k < n$ и обеспечивать полную управляемость в том случае, когда ранг (20) будет равен n при ранге $B(t)$, равном k .

Пусть существует набор входных векторов $\{X_j(t)\}$, для которых при их размерности k_j выполняется условие (20). Выберем $k^* = \min_j \{k_j\}$ таким образом, чтобы условие (20) было еще справедливым. Это и будет означать минимизацию числа тестовых входных воздействий при диагностировании, если используют полную размерность вектора $Y(t)$.

По аналогии можно определить минимальную размерность вектора $Y(t)$, обеспечивающую наблюдаемость системы. При этом необходимо учесть, что система (19) наблюдаема на промежутке τ по вектору $Z(t)$ в случае существования такого момента $t \in \tau$, для которого

$$\text{rank } G = \\ = \text{rank } (G_1^T(t), G_2^T(t), \dots, G_n^T(t)) = n, \quad (21)$$

где

$$G_k(t) = \frac{\partial G_{k-1}(t)}{\partial t} + G_{k-1}(t)A(t), \\ G_1(t) = H(t), \quad k = \overline{2, n}, \quad (22)$$

τ — знак транспонирования.

Приведенные условия управляемости и наблюдаемости можно найти и из общих условий (7) и (8).

Таким образом, применение критериев управляемости и наблюдаемости из общей теории идентификации линейных систем позволяет выяснить вопрос о существовании обобщенного диагностического параметра для данной системы и оценить независимо друг от друга размерность векторов либо входных сигналов, либо измеряемых сигналов. Однако для решения задач диагностирования этого недостаточно.

Так, при определении размерности обобщенного диагностического параметра не учитывают связь между векторами $X(t)$ и $Y(t)$. Например, получение на основе (20) вектора $X(t)$ минимальной размерности и подача соответствующих входных сигналов на

объект означает отсутствие изолированных ФЭ или их совокупностей. Учет этого факта при исследовании системы на наблюдаемость может позволить сократить число измеряемых сигналов в ОДП. Использование рангового критерия вида (20) для определения ОДП сопряжено с точки зрения диагностирования с еще одним недостатком, а именно: можно получить ответ на вопрос об управляемости и наблюдаемости в общем виде — система при таком-то числе входных или измеряемых сигналов управляема (наблюдаема), или наоборот. В случае неуправляемости (ненаблюдаемости) с помощью критерия нельзя ответить на вопрос, какие именно компоненты вектора состояний не управляемы (не наблюдаемы), а также выделить конкретные компоненты $Y(t)$, измерение которых обеспечивает полную наблюдаемость системы. Иными словами, не обеспечивается возможность конкретизации входных и измеряемых компонентов ОДП в смысле их привязки к структуре объекта. Поэтому необходимо разработать способы выполнения требований реального процесса диагностирования.

С этой целью воспользуемся подходом, изложенным в работе [15]. Пусть для каждого входного сигнала, определенного на основе (20), задано уравнение $x_i(t) = x(x_i, t)$, причем $\dot{x}(t)$ существует и $x_i(0) = 1, i = \overline{1, k}$, x_i — параметр. С учетом вектора $X(t)$ расширим матрицу $A(t)$:

$$A_p(t) = \left(\begin{array}{c|cc} A(t) & b_{11}(t) & b_{1k}(t) \\ \hline & b_{k1}(t) & \dots & b_{kk}(t) \\ \hline 0 & x_1 & & x_k \end{array} \right) \cdot (23)$$

При этом вектор $Y(t)$ расширится до

$$Y_p(t) = \{y_1(t), \dots, y_n(t), x_1(t), x_k(t)\}, (24)$$

а матрица $H(t)$ примет вид

$$H_p(t) = \left(\begin{array}{c|c} H(t) & 0 \\ \hline 0 & x_1(t) \\ & \cdot \\ & x_k(t) \end{array} \right), (25)$$

где символ ρ — знак расширения.

В идеальном для решения задач диагностирования случае при заданном $X(t)$ желательно получить блок-матрицу $H(t)$ в матрице $H_p(t)$ с одним ненулевым элементом. Это означает, что при заданном множестве входных сигналов измерение одного компонента ОДП обеспечит проверку технического состояния объекта и выделение неисправных ФЭ.

Найдем матрицу $H_p(t)$, используя критерий вида (21), и обеспечим ранг матрицы G_p , получаемой по типу (22). Ранг матрицы равен $n + k$, где k — размерность вектора входных сигналов $X(t)$ при условии наблюдаемости системы (19).

Алгоритм поиска матрицы $H_p(t)$ состоит в следующем. Выберем матрицу $H_p(t)$ размерности $(n + k) \times (k + 1)$, что соответствует случаю использования только одного измеряемого сигнала, и определим ранг матрицы G_p ; G_p вычисляются по (22) с заменой $G_1(t)$ на $H(t)$ и $A(t)$ на $A_p(t)$. Если ранг G_p меньше $n + k$, то необходимо последовательно увеличивать (за счет выбора значения j) размерность $(n + k) \times (k + j)$ матрицы $H_p, j = \overline{1, n}$ до тех пор, пока ранг G_p не станет равным $n + k$. Минимальное значение j , при котором это условие будет выполнено, определяет минимальное число измеряемых компонентов ОДП, полученное с учетом найденного ранее вектора входных сигналов. Это и решает первую из поставленных задач. Из приведенного рассмотрения ясно, что число измеряемых компонентов ОДП может сократиться.

Определение числа входных и измеряемых компонентов ОДП, а также их конкретизация в соответствии со структурой объекта (т. е. точек подачи входных сигналов и контрольных точек) могут быть выполнены на основе приведения уравнений системы к каноническому виду.

Вначале уравнение (19) приводят к каноническому виду из условия определения входных сигналов (более подробно для случая $A, B, H = \text{const}$ см. работу [15]):

$$\frac{dY(t)}{dt} = A(t)Y(t) + TB^*(t)X(t), (26)$$

где матрица, определяющая входные сигналы,

$$B(t) = TB^*(t). \quad (27)$$

Так как обратная матрица T^{-1} существует, то

$$B^*(t) = T^{-1}B(t). \quad (28)$$

Из (28) следует, что элементы $B^*(t)$ будут отличны от нуля при одном входном воздействии тогда и только тогда, когда в T^{-1} существует по крайней мере один столбец, все элементы которого отличны от нуля. Номер этого столбца (т. е. номер входного сигнала) однозначно определит компонент ОДП, который надо подавать на соответствующий вход объекта.

Однако может возникнуть ситуация, когда такого столбца в T^{-1} нет. Это означает, что один входной сигнал не обеспечит управляемость системы. Тогда в (28) матрица $B^*(t)$ должна иметь более одного столбца, и размерность вектора входных сигналов увеличивается. Для отыскания входных сигналов в матрице T^{-1} выделяют такие столбцы, из которых матрица не будет иметь нулевых строк, а в каждой строке число отличных от нуля элементов минимально. Если имеется несколько групп таких столбцов, то выбор применяемой группы возможен с учетом дополнительных факторов. При таком подходе число конкретных входных сигналов, обеспечивающих управляемость системы, минимально.

Определение набора измеряемых компонентов ОДП с учетом найденного вектора входных сигналов осуществляется следующим образом. Вначале расширяют матрицы $A(t)$, $H(t)$ и вектор $Y(t)$ в соответствии с (23)—(25) и с учетом (28), а затем система уравнений

$$\frac{dY_p(t)}{dt} =$$

$$= -A_p^T(t)Y_p(t) - H_p^T(t)X_p(t) \quad (29)$$

приводится к каноническому виду. В ходе преобразований, аналогичных изложенным выше, вместо B отыскивают H_p^T . Этим завершается отыскание конкретных измеряемых компо-

нентов ОДП, обеспечивающих наблюдаемость системы с учетом найденного ранее минимального числа входных сигналов. Предложенный метод выбора ОДП может быть использован как для линейных стационарных непрерывных систем, так и для линейных дискретных систем.

Для линейной непрерывной стационарной системы уравнения (19) примут вид

$$\frac{dY(t)}{dt} = AY(t) + BX(t), \quad (30)$$

$$Z(t) = HY(t), \quad Y(t_0) = Y_0.$$

Если для установления фактов управляемости и наблюдаемости системы (30) используют ранговые критерии (20) и (21), то эти критерии имеют более простой (и более распространенный) вид:

$$\begin{aligned} \text{rang } Q &= \\ &= \text{rang } (B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B); \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{rang } G &= \\ &= \text{rang } (H^T, A^T H^T, \dots, (A^T)^{n-1} H^T). \end{aligned} \quad (32)$$

Выбор ОДП для этого случая приведен в работе [15].

Для линейной дискретной стационарной системы, получаемой из (30) с периодом дискретизации θ , система разностных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} Y_k = \Phi Y_{k-1} + \Gamma X_{k-1}, \\ Z_k = H Y_k, \end{cases} \quad (33)$$

где $\Phi = I + \theta A$, $\Gamma = \theta B$.

Эта форма записи получается из (30) подстановкой $Y(t) = (Y_k - Y_{k-1})/\theta$ и соответствует случаю, когда матричная экспонента $\exp\{A\theta\}$ аппроксимируется усеченным рядом ее разложения по степеням A и учетом членов, содержащих θ в степени, равной единице и менее.

Решение системы (33) имеет вид [41]:

$$Y_k = \Phi^k Y_0 + \sum_{i=1}^k \Phi^{k-i} \Gamma X_{i-1}. \quad (34)$$

Структура этого уравнения совпадает со структурой уравнения, полу-

ченного при решении системы (30). Оно является дискретным аналогом (30). Система (33) управляема, если n скалярных уравнений, вытекающих из матричного уравнения (34), линейно независимы. А последнее будет обеспечено, если

$$\text{rank} (\Gamma \Phi \Gamma \Phi^2 \Gamma \dots \Phi^{n-1} \Gamma) = n. \quad (35)$$

Условие (35) является критерием управляемости системы (33).

Аналогично можно показать, что условие

$$\text{rank} (H^T \Phi^T H^T (\Phi^T)^2 H^T \dots (\Phi^T)^{n-1} H^T) = n \quad (36)$$

определяет наблюдаемость системы (33).

Уравнения (19) для нестационарной дискретной линейной системы имеют вид [41]

$$\begin{cases} Y_k = \Phi_{k, k-1} Y_{k-1} + \Gamma_{k, k-1} X_{k-1}, \\ Z_k = H_k Y_k, \end{cases} \quad (37)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_{k, k-1} &= I + \theta A [(k-1)\theta], \\ \Gamma &= \theta B [(k-1)\theta]. \end{aligned}$$

Соответственно критерии управляемости и наблюдаемости такой системы для некоторого момента $t_k = t_s$ могут быть записаны как

$$\text{rank} (V_1^{(s)} V_2^{(s)} \dots V_n^{(s)}) = n, \quad (38)$$

где

$$\begin{aligned} V_1^{(k)} &= \Gamma_{k, k-1}; \quad V_i^{(k)} = -\Delta V_{i-1}^{(k)} + \\ &+ \Phi_{k, k-1} V_{i-1}^{(k)}, \quad \Delta V_{i-1}^{(k)} - \text{конечная} \\ &\text{разность функции } V_{i-1}^{(k)}; \end{aligned}$$

$$\text{rank} (W_1^{(s)} W_2^{(s)} \dots W_n^{(s)}) = n, \quad (39)$$

где

$$\begin{aligned} W_1^{(k)} &= H_k; \quad W_i^{(k)} = \Delta W_{i-1}^{(k)} + \\ &+ W_{i-1}^{(k)} \Phi_{k, k-1}. \end{aligned}$$

Подобно тому как при определении управляемости и наблюдаемости системы вида (19) необходимым является существование производных функций $Q_i(t)$ и $G_i(t)$ в (20) и (21), так и для

системы (37) необходимо существование конечных разностей n -го порядка. При поиске входных и измеряемых компонентов для дискретных линейных систем, таких, как (33) или (37), может быть также использован метод нахождения ОДП, изложенный для непрерывной линейной системы. Отличие будет заключаться только в конкретном выражении матриц, входящих в ранговые критерии (35), (36), (38) и (39), являющихся дискретными аналогами соответственно (31), (32) и (20), (21).

Таким образом, для непрерывных и дискретных линейных систем используют метод выбора обобщенных диагностических параметров, единый по структуре, в котором учтены особенности этих систем, форма представления вектора состояний и обеспечено определение совокупности взаимосвязанных входных и измеряемых компонентов ОДП.

Алгоритмы выбора обобщенных диагностических параметров для нелинейных систем имеют похожую структуру, однако в них важным (и очень сложным) дополнительным этапом будет этап установления числа и размера областей, для которых выполняются условия локальной управляемости и наблюдаемости.

Далее приведен порядок выбора ОДП.

Пусть имеется k областей, для каждой из которых найдена совокупность входных и измеряемых сигналов, удовлетворяющих (7) и (8). Если все совокупности одинаковы, то это означает, что любая из них есть обобщенный диагностический параметр для исследуемой нелинейной системы. Если же эти совокупности различаются, то необходимо сначала построить путем выделения всех несовпадающих номеров набор входных сигналов X_1 и для каждой из k областей с учетом найденного набора определить набор измеряемых компонентов ОДП. Если эти наборы одинаковы, то любой из них есть совокупность измеряемых компонентов ОДП. Если нет, то путем выделения всех несовпадающих номеров измеряемых компонентов определяют необходимую их совокупность Y_1 . Объединение наборов входных X_1

и измеряемых Y_1 сигналов дает ОДП для данной нелинейной системы.

Оптимизация выбора обобщенных диагностических параметров. В теории диагностики, в отличие от теории идентификации или теории систем связи, в задачах тестового диагностирования используют детерминированные модели, в которых не учитываются помехи и погрешности измерения. Применение этих моделей обусловлено тем, что все измерения проводят в контролируемых и управляемых условиях, т. е. практически всегда возможно выбором тестовых входных сигналов и средств измерения обеспечить такое отношение сигнал—шум, при котором с достаточной для практики точностью модель объекта можно рассматривать в момент измерения как детерминированную. Однако при использовании этого подхода необходимо проверить инвариантность метода выбора обобщенных диагностических параметров для случая, когда в модели объекта будут учтены сигналы помех и погрешности измерения.

Пусть моделью объекта является векторное дифференциальное уравнение

$$\frac{dY(t)}{dt} = AY(t) + BX(t) + CN_1(t),$$

$$Z(t) = HY(t) + DN_2(t), \quad (40)$$

$$Y(t_0) = Y_0,$$

где $A, B, H, Y(t), X(t), Z(t)$ определены на с. 115, 116; $N_1(t)$ и $N_2(t)$ — векторы соответственно внешних помех и погрешностей измерения.

Решение системы (40) в интервале наблюдения (t_0, t) можно записать в виде

$$Y(t) = \exp\{A(t-t_0)\} Y(t_0) + \int_{t_0}^t \exp\{A(t-\tau)\} [BX(\tau) + CN_1(\tau)] d\tau. \quad (41)$$

По своей структуре (41) подобно решению системы дифференциальных уравнений, в которой отсутствуют шумы. Это подобие объясняется тем, что всегда можно записать

$$BX(\tau) + CN(\tau) = \widehat{B}\widehat{X}(\tau), \quad (42)$$

и (41) принимает вид

$$Y(t) = \exp\{A(t-t_0)\} Y(t_0) + \int_{t_0}^t \exp\{A(t-\tau)\} \widehat{B}\widehat{X}(\tau) d\tau. \quad (43)$$

Критерий управляемости для такой системы требует вычисления ранга матрицы вида

$$\widehat{Q} = (\widehat{B} \ A\widehat{B} \ A^2\widehat{B} \ \dots \ A^{n-1}\widehat{B}). \quad (44)$$

Если $\text{rang } \widehat{Q} = n$, то система (40) управляема, но с помощью суммы сигналов $X(t)$ и $N_1(t)$. Соответственно сохраняется и алгоритм выбора входных сигналов, теперь уже включающих и помеховые составляющие. Более того, теоретически возможны случаи, когда ранг будет равен n при учете только помеховых воздействий, что будет свидетельствовать об отсутствии необходимости использования специальных входных сигналов. В связи с этим возможна некоторая избыточность по входным сигналам. По аналогии с (42) вектор наблюдения можно записать в виде

$$Z(t) = \widehat{H}\widehat{Y}(t), \quad (45)$$

где

$$\widehat{H}\widehat{Y}(t) = HY(t) + DN_2(t).$$

Рассмотрение совокупности измеряемых компонент обобщенного диагностического параметра для системы (40) показывает, что даже в случае $D \equiv 0$ эта совокупность может включать как детерминированные, так и случайные элементы (в силу возможных случайных входных сигналов). Если $D \neq 0$, то воздействие $N_2(t)$ может привести к уменьшению точности результатов анализа обобщенного диагностического параметра, и в конечном итоге — к увеличению общей ошибки диагностирования. При этом подход к установлению наблюдаемости остается прежним: необходимо вычислить ранг матрицы

$$G = (\widehat{H}^T \ A^T \widehat{H}^T \ \dots \ (A^T)^{n-1} \widehat{H}^T).$$

Если $\text{rang } G = n$, то система (40) наблюдаема по $Z(t) = \widehat{H}\widehat{Y}(t)$, т. е. наблюдаема в присутствии помех,

и методика выбора измеряемых компонентов обобщенного диагностического параметра сохраняется такой же, как и для случая детерминированной модели.

Таким образом, для линейных систем рассмотренного класса метод выбора обобщенного диагностического параметра инвариантен к условиям наблюдения. Вместе с тем приведенное рассмотрение позволяет обнаружить и некоторые особенности. Они сводятся к следующему. Метод выбора входных и измеряемых компонентов ОДП имеет ту особенность [15], что «вес» этих компонентов одинаков. Поэтому задача выбора ОДП сводилась к выбору минимального числа входных сигналов, а затем находилась соответствующая совокупность измеряемых компонентов ОДП. Однако на практике реализация одних входных сигналов может быть проще, чем других (особенно, если для последних необходимо удовлетворение специальных требований, например, по независимости их производных высоких порядков и т. п.). По аналогии можно сделать вывод о различной сложности, стоимости, массе, надежности и других характеристиках аппаратуры, решающей задачу измерения и анализа компонентов вектора измеряемых сигналов.

Другая особенность состоит в том, что может существовать избыточность по входным сигналам при учете шумовых компонентов в совокупности входных сигналов, а также может снизиться точность анализа измеряемой части ОДП при учете ошибок измерения. Все это требует оптимального решения задачи выбора ОДП.

Пусть объект описывается уравнениями (40). Предположим, что матрица C задана, т. е. ее элементы фиксированы и определяются характером взаимодействия объекта с внешней средой. Определим, является ли объект полностью управляемым, если используют только сигналы $N_1(t)$. Принимают, что в системе (40) $B = 0$, и определяют ранг матрицы

$$(C \ AC \ A^2C \ \dots \ A^{n-1}C) \quad (46)$$

и приводят систему

$$\dot{Y}(t) = AY(t) + CN_1(t) \quad (47)$$

к каноническому виду:

$$\dot{Y}^*(t) = T_{N_1}^{-1}AT_{N_1}Y^*(t) + T_{N_1}^{-1}CN_1(t), \quad (48)$$

где T_{N_1} — невырожденная матрица.

Если ранг матрицы (46) равен n , то система (47) полностью управляема. Это означает, что для ОД, описываемого системой (47), нет необходимости вводить искусственные входные сигналы, а достаточно воспользоваться реакцией на естественные помехи. Обязательное условие, которое должно быть выполнено, состоит в том, что необходимо знать характеристики помеховых сигналов.

Диагонализация показывает, какие именно помеховые сигналы обеспечивают полную управляемость. Эти сигналы определяют, выделяя в матрице $T_{N_1}^{-1}$ столбец (столбцы), все элементы которого (которых) отличны от нуля. При этом возможна некоторая избыточность по входным сигналам, обеспечивающая такие помеховые сигналы, для которых легче определять характеристики и проще обрабатывать полученные на них реакции.

Однако ранг (46) может оказаться меньшим n . Это означает, что необходимы также и искусственные входные сигналы. Решение задачи определения набора искусственных входных сигналов на основе критерия полной управляемости выполняют по методике, приведенной в работе [15], для чего в системе (40) выбирают $C = 0$. В результате решения получают матрицу T_X^{-1} , свойства которой подобны свойствам матрицы $T_{N_1}^{-1}$, т. е. номера ее столбцов и число элементов в столбце показывают, куда подается входной сигнал и управляемость каких функциональных элементов этот сигнал обеспечивает. Задача определения набора входных сигналов в этом случае сводится к отысканию комбинации искусственных и помеховых сигналов, благодаря которым получают полностью управляемую систему.

Рассмотрим, как определить допустимую комбинацию входных сигналов, для чего поставим матрицам $T_{N_1}^{-1}$ и T_X^{-1} в соответствие матрицы

$\widehat{T}_{N_1}^{-1}$ и \widehat{T}_X^{-1} по правилу: если элемент матрицы $T_{N_1}^{-1}$ или T_X^{-1} отличен от нуля, то в матрице $\widehat{T}_{N_1}^{-1}$ или \widehat{T}_X^{-1} на соответствующем месте проставляется единица; нулевые элементы сохраняются. Введем понятие *формирующий столбец*, под которым будем понимать либо столбец матрицы $\widehat{T}_{N_1}^{-1}$ или \widehat{T}_X^{-1} , если он имеет все элементы 1, n , отличные от нуля, либо объединение группы столбцов матриц $\widehat{T}_{N_1}^{-1}$ и \widehat{T}_X^{-1} такое, при котором охватываются все строки и в каждой строке имеется один элемент, не равный нулю. Построение элементов формирующего столбца проводят по правилу:

$$\begin{cases} 1 \vee 0 = 0 \vee 1 = 1, \\ 1 \vee 1 = 1, \\ 0 \vee 0 = 0, \end{cases} \quad (49)$$

где \vee — знак логического сложения.

Определение формирующего столбца по матрицам $\widehat{T}_{N_1}^{-1}$ и \widehat{T}_X^{-1} равносильно нахождению комбинации входных сигналов, обеспечивающей полную управляемость системы (40).

Введем также понятие *формирующей строки*, под которой будем понимать вектор размерностью n с элементами 1 или 0.

Элемент формирующей строки с номером i равен единице, если i -й столбец матрицы $\widehat{T}_{N_1}^{-1}$ и \widehat{T}_X^{-1} участвует в построении формирующего столбца. На основе (49) определяют все возможные формирующие столбцы, а следовательно, и все формирующие строки. Обозначим формирующую строку через t_k^X , $k = \overline{1, K}$, где K — число допустимых наборов входных сигналов, обеспечивающих полную управляемость. Тогда $\{t_k^X, k = \overline{1, K}\}$ — множество всех допустимых векторов входных сигналов.

Допустимые векторы измеряемых сигналов с учетом множества $\{t_k^X, k = \overline{1, K}\}$ определяют следующим образом. Выберем из множества $\{t_k^X, k = \overline{1, K}\}$ произвольный вектор t_k^X

и используем его для расширения матриц A и H . Увеличение размерности матриц A и H проводят с учетом только единичных компонентов вектора t_k^X . Если, например, вектор t_k^X содержит $l < n$ компонентов, отличных от нуля, то размер расширенных матриц \widehat{A} и \widehat{H} есть $n + l$. Столбцы, расширяющие матрицу A , содержат на местах, совпадающих по номеру с ненулевыми элементами вектора t_k^X , соответствующие элементы матрицы B . Строки, расширяющие матрицу A , имеют ненулевые (произвольные) элементы только на главной диагонали. При расширении матрицы \widehat{H} все дополнительные элементы являются нулевыми, кроме элементов h_{jj} , $j = n + 1, \dots, n + l$. В индексе элементов расширенной матрицы попрежнему стоит знак p .

Дальнейшая процедура нахождения допустимых векторов измеряемых сигналов при выбранном векторе t_k^X основана на построении матрицы

$$\left(\widehat{H}_p^T A_p^T \widehat{H}_p^T \quad (A_p^T)^{n-1} \widehat{H}_p^T \right) \quad (50)$$

и определении ее ранга при условии, что в матрице \widehat{H}_p^T варьируется число строк.

Расчеты начинают со случая, когда используют только один измеряемый сигнал; при этом размер матрицы \widehat{H}_p^T равен $(l + 1) \times (l + n)$. Если ранг (50) равен $n + l$, то при этом варианте обеспечивается полная наблюдаемость. Если ранг (50) меньше $n + l$, то необходимо за счет выбора s увеличивать размерность $(l + s) \times (l + n)$, $s = 1, n$ до тех пор, пока ранг (50) не станет равным $n + l$. Наименьшее значение s , при котором выполняется это условие, определяет наименьшее число измеряемых компонентов при выбранном векторе t_k^X .

Составление номеров измеряемых компонентов контрольным точкам объекта обеспечивается при диагонализации системы уравнений

$$\dot{Y}_p(t) = -A_p^T Y_p(t) - \widehat{H}_p^T \widehat{X}_p(t),$$

где $Y_p(t)$ — вектор $Y(t)$, расширенный за счет введения вектора t_k^x входных сигналов.

Результатом расчетов является матрица T_p^{-1} со свойствами, аналогичными свойствам матриц $T_{N_1}^{-1}$ и T_x^{-1} . Вводя по аналогии формирующие столбцы и строки и преобразовывая столбцы T_p^{-1} , получим допустимые векторы измеряемых сигналов $t_{k_j}^z$. При этом одному допустимому вектору t_k^x может соответствовать один или более векторов $t_{k_j}^z$, $j = \overline{1, J_k}$. Проводя подобные расчеты для каждого вектора t_k^x , $k = \overline{1, K}$, получим соответствующие допустимые наборы измеряемых сигналов. Найденные комбинации векторов входных и соответствующих им измеряемых сигналов образуют допустимое множество обобщенных диагностических параметров

$$U = \{u_s, s \in S\} = \{t_k^x, t_{k_j}^z, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J_k}\}.$$

Оптимизация выбора обобщенного диагностического параметра связана с решением задачи определения экстремума целевой функции (функционала), заданного на множестве U . В зависимости от характера задачи это решение должно отыскиваться с учетом некоторых лимитирующих факторов. Целевая функция и лимитирующие факторы характеризуют область определения задачи оптимизации выбора обобщенного диагностического параметра, а переменными являются элементы векторов t_k^x , $t_{k_j}^z$. Поэтому задачу оптимизации выбора ОДП целесообразно формулировать как задачу целочисленного математического программирования.

Поставим в соответствие каждому элементу векторов t_k^x и $t_{k_j}^z$ числа, которые в зависимости от конкретных условий могут иметь смысл стоимости, времени, массы, вероятности и т. п. Например, при использовании входного сигнала, подаваемого на вход i , для создания средств диагностирова-

ния необходимо затратить стоимость c_i , массу m_i и при этом будет обеспечена достоверность диагностирования p_i при затратах времени θ_i и т. п. Итак, пусть заданы векторы — строки «весов» для входных сигналов

$$\{c_i^X\}, \{m_i^X\}, \{p_i^X\}, \{\theta_i^X\}, i = \overline{1, n} \quad (51)$$

и соответственно для измеряемых сигналов

$$\{c_i^Z\}, \{m_i^Z\}, \{p_i^Z\}, \{\theta_i^Z\}, i = \overline{1, n}, \quad (52)$$

что обозначается индексом Z . Введем норму обобщенного диагностического параметра в виде

$$\|U\| = \{t_k^X\} \{\theta_i^X\}^T + \{t_{k_j}^Z\} \{\theta_i^Z\}^T, \quad (53)$$

где $\{\theta_i^X\}$, $\{\theta_i^Z\}$ — векторы-строки размером n ; T — знак транспонирования.

Выбор обобщенного диагностического параметра состоит в выборе такого набора $\{t_k^X, t_{k_j}^Z\}^*$, для которого

$$\|U\|^* = \{t_k^X\}^* \{\theta_i^X\}^T + \{t_{k_j}^Z\}^* \{\theta_i^Z\}^T = \min_{s \in S} \|u_s\| \quad (54)$$

при условии, что

$$\begin{cases} c = \{t_k^X\} \cdot \{c_i^X\}^T + \{t_{k_j}^Z\} \cdot \{c_i^Z\}^T \leq C; \\ p = \{t_k^X\} \cdot \{p_i^X\}^T + \{t_{k_j}^Z\} \cdot \{p_i^Z\}^T \geq P; \\ m = \{t_k^X\} \cdot \{m_i^X\}^T + \{t_{k_j}^Z\} \cdot \{m_i^Z\}^T \leq M. \end{cases} \quad (55)$$

В зависимости от специфики задачи в качестве целевой функции может быть выбран любой из векторов (51) и (52), а все остальные представлены как ограничения. Если возникает необходимость учета фактора, не вошедшего в (51) и (52), то это достигается расширением (55) за счет введения дополнительного условия.

Введем целочисленные переменные:

$$\omega_s = \begin{cases} 1, & \text{если выбран ОДП с нормой} \\ & \|U_s\|, s \in S, \\ 0 & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases}$$

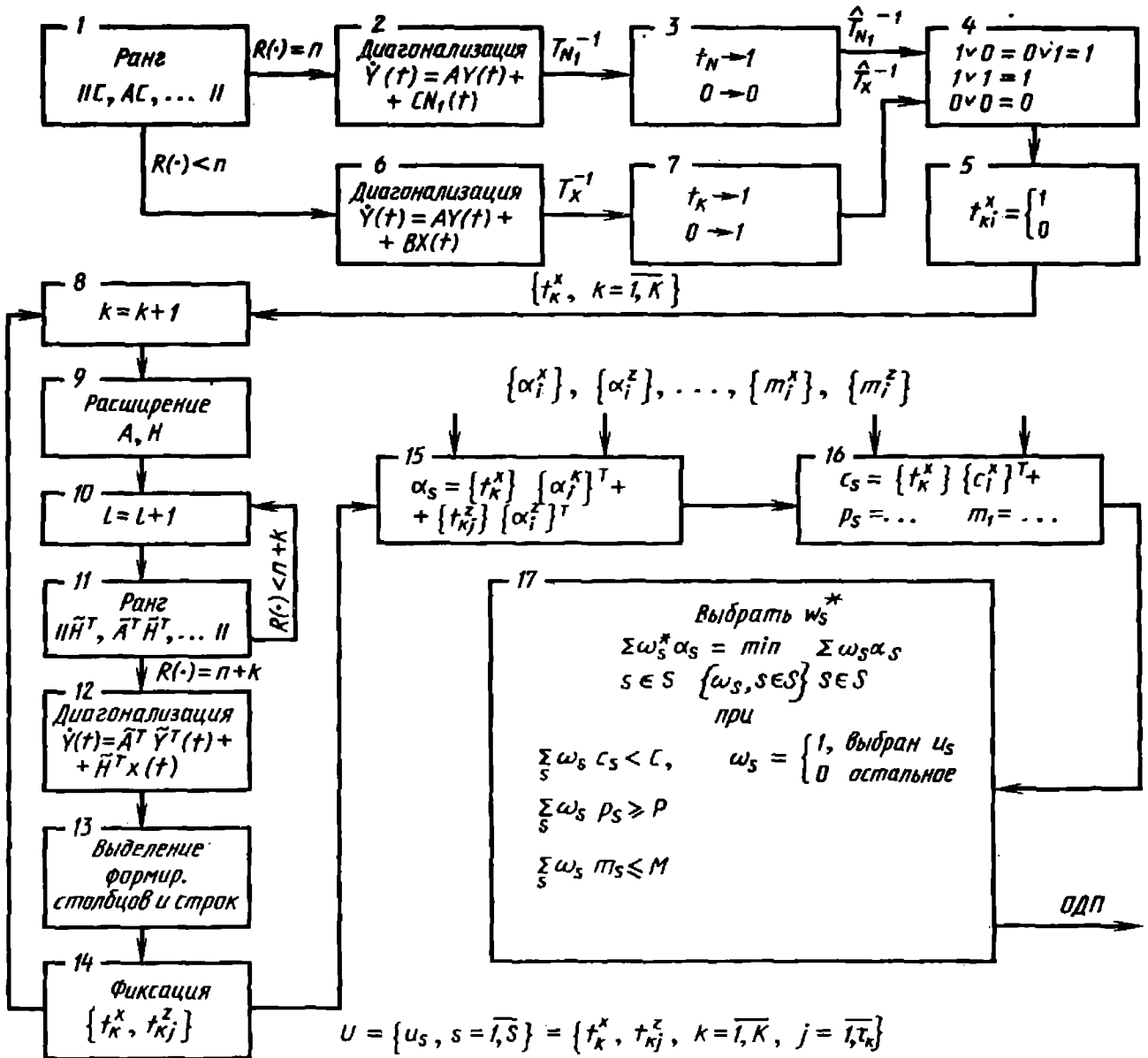


Рис. 11. Структура алгоритма выбора оптимального обобщенного диагностического параметра

Тогда задача определения оптимального обобщенного диагностического параметра сводится к задаче целочисленного математического программирования: выбрать ω_s^* так, чтобы

$$\sum_{s \in S} \omega_s^* \|U_s\| = \min_{s \in S} \left\{ \sum_s \omega_s \|U_s\| \right\} \quad (56)$$

при условиях

$$\begin{aligned} \sum_{s \in S} \omega_s c_s &\leq C, \\ \sum_{s \in S} \omega_s p_s &\geq P, \\ \sum_{s \in S} \omega_s m_s &\leq M. \end{aligned} \quad (57)$$

Методы решения задач такого типа известны [36] и принципиальных трудностей не вызывают.

Структура алгоритма выбора оптимального обобщенного диагностического параметра для линейных или линейризуемых систем приведена на рис. 11. Алгоритм содержит две части. Первая из них включает блок 1—14 и обеспечивает нахождение допустимого множества ОДП. Вторая часть (блоки 15—17) обеспечивает формирование исходных данных для задачи целочисленного программирования и решение задачи выбора оптимального ОДП.

Пример 17. Рассмотрим выбор ОДП для типовой схемы следящего контура.

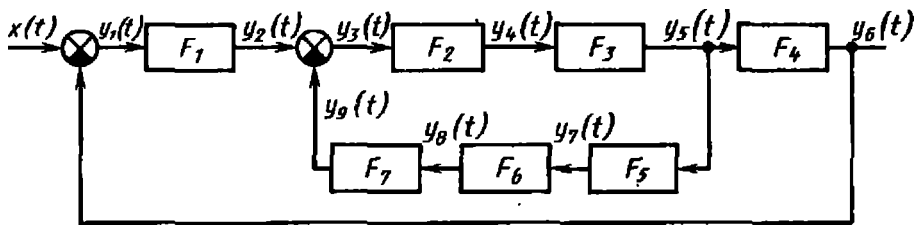


Рис. 12. Исходная структурная схема ОД

где помимо обозначений, использованных в (60), дополнительно приняты обозначения:

$$\begin{aligned}
 D &= F_2 F_3 F_4, & E &= F_2 F_3 F_5, \\
 G &= F_3 F_5 F_6 F_7, & H &= F_1 F_3 F_4, \\
 K &= F_1 F_3 F_5, & L &= F_1 F_2 F_4, \\
 M &= F_2 F_5 F_6 F_7, & N &= F_1 F_2 F_5, \\
 Q &= F_1 F_2 F_3 F_5, & R &= F_2 F_3 F_6 F_7, \\
 S &= F_2 F_3 F_5 F_6, & T &= F_2 F_3 F_5 F_7.
 \end{aligned}$$

Анализ матрицы (61) показывает, что в ней существуют четыре минора ранга $n = 7$, отличные от нуля, что позволяет выделить четыре допустимые комбинации компонентов вектора $Y(t)$, подлежащих измерению:

$$\begin{aligned}
 Y_1(t) &= \{y_2(t), y_4(t), y_5(t), \dots, y_9(t)\}, \\
 Y_2(t) &= \{y_3(t), y_4(t), \dots, y_9(t)\}, \\
 Y_3(t) &= \{y_1(t), y_2(t), y_4(t), y_5(t), \\
 &\quad y_7(t), y_8(t), y_9(t)\},
 \end{aligned}$$

$$Y_4(t) = \{y_1(t), y_3(t), y_4(t), y_5(t), y_7(t), y_8(t), y_9(t)\}.$$

Рассмотрим вариант выбора ОДП для случая, когда измеряемые компоненты принадлежат вектору $Y_1(t)$. Преобразованная структурная схема (см. рис. 12) с учетом размерности вектора $Y_1(t)$ приведена на рис. 13. Усилительные ФЭ, делитель напряжения, масштабирующий ФЭ, потенциометры обратной связи, электродвигатель и тахогенератор имеют передаточные функции вида

$$\begin{aligned}
 F_1(p) &= k_1; & F_2(p) &= k_2; \\
 F_3(p) &= k_3 p^{-1}; & F_4(p) &= k_4; \\
 F_5(p) &= p k_5; & F_6(p) &= k_6; & F_7(p) &= k_7.
 \end{aligned}$$

Векторное дифференциальное уравнение для рассматриваемой системы можно записать как

$$\dot{Y}(t) = \tilde{A}Y(t) + \tilde{B}X(t), \quad Y(t_H) = Y_H,$$

где

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & -k_1 k_3 k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{C}(1 + \tilde{D})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{C} k_3 k_5 (1 + \tilde{D})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{C} k_3 k_5 k_6 (1 + \tilde{D})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 k_3 k_4 \tilde{D} (1 + \tilde{D})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 Y^T(t) &= [\dot{y}_2(t), \dot{y}_4(t), \dot{y}_5(t), \dot{y}_6(t), \\
 &\quad \dot{y}_7(t), \dot{y}_8(t), \dot{y}_9(t)];
 \end{aligned}$$

$$X^T(t) = [\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_4(t), \dot{x}_4(t),$$

$$\dot{x}_5(t), \dot{x}_5(t), \dot{x}_7(t), \dot{x}_8(t), \dot{x}_9(t)]; *$$

* Вид компонентов вектора входных сигналов $X(t)$ выбирался с учетом физики работы объекта и его функциональных элементов.

k_1	0	$\mp k_1 k_3 k_4$	$\mp k_1 k_4$	0	0	0	0
$\frac{k_1 k_2}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_2}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{C}}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_1 k_2 k_4}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_2 k_5 k_6 k_7}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_2 k_7 \tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_2 \tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	
0	0	$\pm k_3$	0	0	0	0	
0	0	$\pm k_3 k_4$	$\pm k_4$	0	0	0	
$\frac{k_1 k_2 k_3 k_5}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_2 k_3 k_5}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{C} k_3 k_5}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{C} k_5}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_5}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_2 k_3 k_5 k_7}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_2 k_3 k_5}{1 + \tilde{D}}$
$\frac{k_1 k_2 k_3 k_5 k_8}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_2 k_3 k_5 k_8}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_3 k_5 k_8}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{C} k_5 k_8}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_5 k_8}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_8}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_2 k_3 k_5 k_8}{1 + \tilde{D}}$
$\frac{k_1 \tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{\tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_1 k_3 k_4 \tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{k_1 k_8 \tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	$\pm \frac{k_5 k_6 k_7}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{D} k_7}{1 + \tilde{D}}$	$\mp \frac{\tilde{D}}{1 + \tilde{D}}$	

$\tilde{B} =$

$$\tilde{C} = k_1 k_2 k_3 k_4; \quad \tilde{D} = k_2 k_3 k_5 k_6 k_7.$$

Дальнейшее решение задачи по выбору ОДП (т. е. определение компонентов векторов $X(t)$ и $Y(t)$, обеспечивающих управляемость и наблюдаемость системы, и конкретизация их порядковых номеров) может быть выполнено на основе приведения вектор-

ного дифференциального уравнения к каноническому виду:

$$\dot{Y}^*(t) = T^{-1} \tilde{A} T Y^*(t) + T^{-1} B X(t)$$

и последующего анализа обратной матрицы T^{-1} , столбцами которой являются собственные векторы A .

Матрица T и обратная ей матрица T^{-1} имеют вид:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1 + \tilde{D}) k_2^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1 + \tilde{D}}{k_1 k_2 k_4} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1 + \tilde{D}}{k_1 k_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & k_3 k_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & k_3 k_5 k_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & k_3 k_5 k_6 k_7 \end{bmatrix};$$

$$T^{-1} = \frac{1}{|T_{ij}|} \begin{bmatrix} -1 & \frac{1 + \tilde{D}}{k_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1 + \tilde{D}}{k_1 k_2 k_4} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1 + \tilde{D}}{k_1 k_2} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 k_5 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & k_3 k_5 k_6 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & k_3 k_5 k_6 k_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

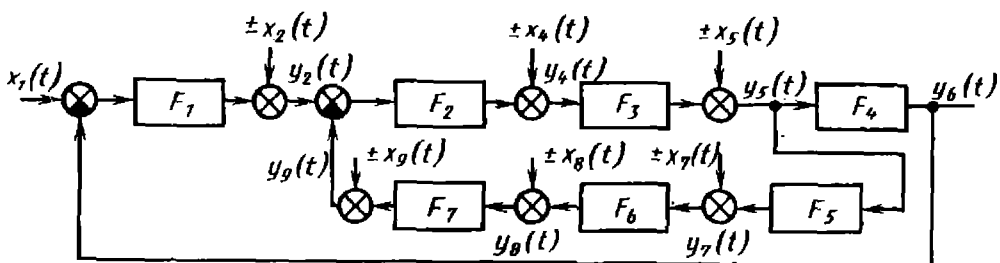


Рис. 13. Преобразованная структурная схема ОД

Анализ обратной матрицы (62) показывает, что в ней существует один столбец (второй), все элементы которого отличны от нуля. Номер этого столбца однозначно определяет компонент вектора $X(t)$, подаваемый на соответствующий вход системы. Таким единственным компонентом, который обеспечивает полную управляемость системы, является $\dot{x}_2(t)$.

Структура входного сигнала может быть различной. Так как входной сигнал требуется один, то из условия технической реализации его структуру целесообразно выбрать как можно более простой. Именно этим требованиям отвечает единичный скачок напряжения $x_2(t) = x(t) = 1(t)$; тогда $\dot{x}(t) = \delta(t)$, где $\delta(t)$ — дельта-функция.

Заключительным шагом при выборе ОДП является минимизация числа компонентов вектора $Y(t)$ с учетом найденного вектора $X(t)$.

Процедура минимизации числа компонентов вектора $Y(t)$ аналогична рассмотренной. В этом случае матрица \tilde{A} расширяется:

$$\tilde{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \tilde{G} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{K} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\tilde{N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta(t) \end{bmatrix},$$

где

$$\tilde{P} = k_1 k_3 k_4; \quad \tilde{E} = \tilde{C}(1 + \tilde{D})^{-1}; \quad \tilde{G} = k_3;$$

$$\tilde{K} = k_3 k_4; \quad \tilde{L} = \tilde{C} k_3 k_5 (1 + \tilde{D})^{-1};$$

$$\tilde{M} = \tilde{C} k_3 k_5 k_6 (1 + \tilde{D})^{-1};$$

$$\tilde{N} = \tilde{P} \tilde{D} (1 + \tilde{D})^{-1}.$$

Собственные векторы матрицы \tilde{A}_p , представленные матрицей T_p , имеют вид:

$$T_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\tilde{P}\tilde{E}^{-1} & \frac{\tilde{G}}{\tilde{E}} & \frac{\tilde{K}}{\tilde{E}} & -\frac{\tilde{L}}{\tilde{E}} & -\frac{\tilde{M}}{\tilde{E}} & -\frac{\tilde{N}}{\tilde{E}} & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\tilde{P}}{\tilde{E}\delta} & -\frac{\tilde{G}}{\tilde{E}\delta} & -\frac{\tilde{K}}{\tilde{E}\delta} & \frac{\tilde{L}}{\tilde{E}\delta} & \frac{\tilde{M}}{\tilde{E}\delta} & \frac{\tilde{N}}{\tilde{E}\delta} & -\frac{1}{\tilde{E}\delta} & 1 \end{bmatrix};$$

обратная матрица:

$$T_p^{-1} = \begin{bmatrix} y_2 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \tilde{P} \frac{\tilde{E}}{\tilde{E}} & (\delta + \tilde{E})^{-1} - \frac{G(2\delta + \tilde{E})}{\tilde{E}\delta(\delta + \tilde{E})} & -\frac{\tilde{G}}{\tilde{E}} & -\frac{\tilde{K}}{\tilde{E}} & \frac{\tilde{L}}{\tilde{E}} & \frac{\tilde{M}}{\tilde{E}} & \frac{\tilde{N}}{\tilde{E}} \\ -\frac{\tilde{P}}{\delta(\delta + \tilde{E})} & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

Анализ T_p^{-1} показывает, что в матрице не существует столбца, все элементы которого отличны от нуля. Поэтому в T_p^{-1} выделяем такие столбцы, матрица из которых не имеет нулевых строк, а в каждой строке число отличных от нуля элементов минимально. Такой выбор столбцов позволяет определить комбинацию компонентов вектора, обеспечивающую полную наблюдаемость $Y(t)$. Исходя из этого, вектор

$$Y(t) = [y_2(t), y_5(t), y_6(t), y_7(t), y_8(t), y_9(t)]. \quad (63)$$

На этом процедура выбора обобщенного параметра заканчивается. Таким образом, для определения технического состояния объекта (см. рис. 12) необходимо при одном тестовом входном сигнале $x_2(t)$ измерять шесть параметров (63), причем проводить такие измерения следует в динамическом режиме.

Контроль правильности функционирования аналоговых объектов. С помощью метода выбора ОДП можно составлять алгоритмы тестовой проверки исправности и (или) работоспособности аналоговых объектов. В задачи функционального диагностирования аналоговых объектов входит проверка правильности их функционирования. Для однорежимных (однофункциональных) избыточных аналоговых объектов проверка правильности функционирования одновременно является также проверкой их работоспособности. Особенность функционального диагностирования состоит в том, что на объект поступают только рабочие воздействия.

Проверять правильность функционирования аналогового объекта можно путем контроля значений выходов специально построенной эквивалентной модели (ЭМ) объекта, входами которой являются внешние входы объекта, а также выходы блоков последнего.

Для объектов, описываемых линейными дифференциальными или разностными уравнениями вида $\frac{d}{dt} Y(t) =$

$= AY(t) + BX(t)$ и передаточными функциями вида

$$W_l(p) = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij} p^j}{\sum_{j=1}^m a_{ij} p^j},$$

ЭМ строят, исходя из следующих соображений: ЭМ должна вырабатывать в любой момент времени совокупность $y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_{n+k}$ сигналов (в пределе — один), которые совместно с выходными сигналами y_1, y_2, \dots, y_n n блоков объекта удовлетворяют соотношениям вида

$$\Delta_i = m_{i1}y_1 + m_{i2}y_2 + \dots + m_{in}y_n + m_{i(n+1)}y_{n+1} + \dots + m_{i(n+k)}y_{n+k}, \quad (64)$$

$i = 1, 2, \dots, l,$

где m_{ij} — коэффициенты; l — число соотношений.

При правильном функционировании объекта соблюдаются условия

$$\Delta_{i3}^H \leq \Delta_i \leq \Delta_{i3}^B, \quad (65)$$

где Δ_{i3}^H и Δ_{i3}^B — соответственно нижние и верхние допустимые значения Δ_i .

Нарушение условия (65) свидетельствует о неправильном функционировании (потере работоспособности) объекта.

Число k сигналов, вырабатываемых ЭМ, которое достаточно для контроля правильности функционирования ОД, определяют по формуле

$$k \geq \max_g \frac{n\rho_g^2}{g(1-\rho_g^2)}, \quad (66)$$

где n — число оцениваемых выходов $y_{\dot{g}}$ объекта; ρ_g — отношение отклонения $y_{\dot{g}}$, $\dot{g} = 1, n$, к предельно допустимому отклонению от номинального значения, достаточное для достоверной оценки состояния объекта.

Вектор сигналов, вырабатываемых ЭМ, определяют по описанию (модели) ОД.

Пример 18. Объект диагностирования (рис. 14) описывается уравнением вида

$$\frac{d^2y}{dt^2} + y = x$$

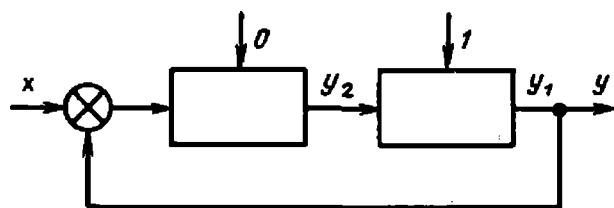


Рис. 14. Структурная схема ОД

при начальных условиях $y(0) = 1$, $\frac{dy(0)}{dt} = 0$. Необходимо построить ЭМ

для функционального диагностирования объекта. Для этого вводим обозначения $y = y_1$, $\frac{dy}{dt} = y_2$ и получаем уравнения

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2; \quad y_1(0) = 1;$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -y_1 + x; \quad y_2(0) = 0.$$

Следовательно, в этом случае объект характеризуется:

вектором состояния $Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix}$;

вектором входных воздействий $X = [x]$;

матрицей коэффициентов

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix};$$

матрицей воздействий $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

Известны допуски на y_1 и y_2 , которые равны $l_1 = l_2 = 0,1$, а чувствительность проверки $\rho_g = 0,7$. Тогда число сигналов, которое должна вырабатывать ЭМ, равно

$$k > \frac{2\rho_g^2}{1-\rho_g^2} = \frac{2 \cdot 0,49}{1-0,49} = 1,92.$$

Таким образом, ЭМ должна вырабатывать два сигнала, которые обозначим y_3 и y_4 .

Разобьем все множество $\{y_{\dot{g}}\}$, $\dot{g} = 1, 4$, на две группы $\{y_1, y_3\}$ и $\{y_2, y_4\}$. Для каждой группы построим соотношения вида (64) при условии, что $m_{ij} = 1$. Получим

$$\Delta_1 = y_1 + y_3; \quad \Delta_2 = y_2 + y_4.$$

Строим матрицу коэффициентов m_{ij} :

$$M = [M_0 | M_{II}] = \left[\begin{array}{c|c} 10 & 10 \\ \hline 01 & 01 \end{array} \right],$$

т. е.

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } M_{II} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В одном случае матрицу M выбирают следующим образом:

если $k = 1$, то $M = [1 \ 1 \ 1]$;
если $k > 1$ и является четным числом, то

$$M = \begin{bmatrix} \sin \varphi & \sin 2\varphi & \dots & \sin (n+k)\varphi \\ \cos \varphi & \cos 2\varphi & \dots & \cos (n+k)\varphi \\ \sin q\varphi & \sin 2q\varphi & \dots & \sin (n+k)q\varphi \\ \cos q\varphi & \cos 2q\varphi & \dots & \cos (n+k)q\varphi \end{bmatrix};$$

если $k > 1$ и является нечетным числом, то

$$M = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & \dots & 1/\sqrt{2} \\ \sin \varphi & \sin 2\varphi & \dots & \sin (n+k)\varphi \\ \cos \varphi & \cos 2\varphi & \dots & \cos (n+k)\varphi \\ \sin q\varphi & \sin 2q\varphi & \dots & \sin (n+k)q\varphi \\ \cos q\varphi & \cos 2q\varphi & \dots & \cos (n+k)q\varphi \end{bmatrix},$$

где $\varphi = \frac{2\pi}{n+k}$; $q = \left[\frac{k}{2} \right]$ — целая часть числа $k/2$.

Находим матрицы коэффициентов A_{II} и управления B_{II} :

$$A_{II} = -M_{II}^{-1} M_0 A = -A = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_{II} = -M_{II}^{-1} M_0 B = -B = - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

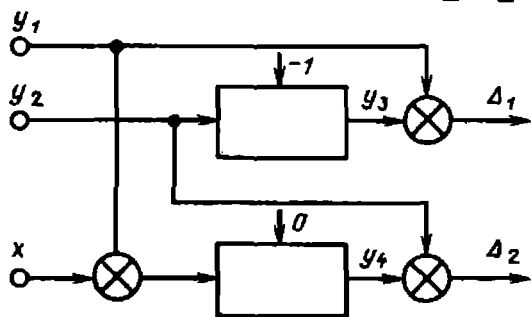


Рис. 15. Схема эквивалентной модели рис. 14.

Следовательно, уравнения будут иметь вид:

$$\frac{dy_3}{dt} = -y_2; \quad y_3(0) = -1;$$

$$\frac{dy_4}{dt} = y_1 - x; \quad y_4(0) = 0.$$

Предельно допустимые верхние значения для Δ_1 и Δ_2 определяем по формуле

$$\Delta_{l_3} = \sqrt{\sum_{i=k}^{n+k} m_{ii}^2 l_i^2}, \quad l = \overline{1, k}.$$

Таким образом,

$$\Delta_{13} = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = 0,14,$$

$$\Delta_{23} = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = 0,14.$$

Нарушение неравенств $\Delta_1 \leq \Delta_{13}$ и $\Delta_2 \leq \Delta_{23}$ будет свидетельствовать о неправильном функционировании объекта. На рис. 15 приведена схема эквивалентной модели.

Контролировать работу объекта в процессе его функционирования можно путем сравнения значений диагностических параметров, получаемых в результате анализа ответов объекта на рабочие воздействия, с заданными их значениями.

Так, если объект диагностирования описывается уравнениями вида

$$\sum_{i=0}^L c_i(t) y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^R D_j(t) x^{(j)}(t), \tag{67}$$

где

$$c_i(t) = f_i(a_{ij}(t), b_{rj}(t));$$

$$i = 1, 2, \dots, L = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^{n_0} l_{0j},$$

$$D_j(t) = f_j(a_{ij}(t), b_{rj}(t)); \tag{68}$$

$$j = 1, 2, \dots, R = \sum_{j=1}^{n_0} l_{0j};$$

l_j и l_{0j} — порядок дифференциального уравнения j -го блока соответственно в прямой цепи и в цепи обратной связи (рис. 16), то о правильности его функционирования можно судить по значениям параметров $a_{ij}(t)$ и $b_{rj}(t)$,

которые определяют в результате идентификации по измерениям, выполняемым на входе и выходе объекта.

Отдельные блоки объекта описываются уравнениями

$$A_i(p, t) = \sum_{j=0}^l a_{ij}(t) p^{(j)}; \quad i = \overline{1, n};$$

$$B_r(t) = \sum_{j=0}^{l_0} b_{rj}(t) p^{(j)}; \quad r = \overline{1, n}.$$

Практически решение задачи сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений (66). Условиями возможности определения параметров a_{ij} и b_{rj} по информации с выхода и входа объекта является соблюдение неравенства

$$l + \sum_{j=1}^{n_0} l_{0j} \geq n + n_0.$$

Если ОД описывается передаточной функцией

$$K(p) = k \frac{\prod_{i=1}^m (p + z_i)}{\prod_{j=1}^n (p + q_j)}, \quad n > m,$$

то о правильности функционирования можно судить по отклонению значения коэффициента усиления k от заданного (номинального) его значения или по перемещению полюсов q_j и нулей z_i .

Пример 19. Объект (рис. 17) представлен передаточной функцией вида

$$K(p) = \frac{k}{p + q}.$$

Соответственно входная $x(t)$ и выходная $y(t)$ функции связаны между собой уравнением

$$\frac{dy(t)}{dt} + qy(t) = kx(t). \quad (69)$$

Необходимо найти диагностические параметры k и q .

Поскольку при технической реализации определенные трудности вызывает операция дифференцирования, то

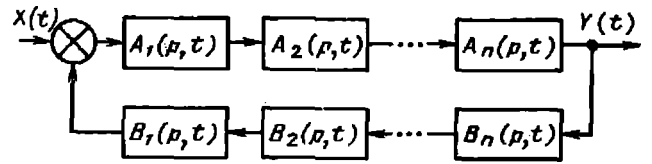


Рис. 16. Пример объекта с обратной связью

уравнение (69) преобразуют в интегральное

$$y(t) - y(0) + q \int_0^t y(t) dt = k \int_0^t x(t) dt,$$

откуда значения k и q могут быть определены следующим образом:

$$k = \frac{q \int_0^t y(t) dt + y(t) - y(0)}{\int_0^t x(t) dt},$$

$$q = \frac{k \int_0^t x(t) dt + y(0) - y(t)}{\int_0^t y(t) dt}.$$

Обрабатывая ответы объекта на входные воздействия, находят текущие временные и частотные характеристики, сравнивая которые с номинальными можно судить о правильности функционирования объекта. Так, импульсную переходную характеристику определяют, решив интеграл свертки

$$y(t) = \int_{-\infty}^t g(t - \tau) x(\tau) d\tau.$$

Решение это обычно осуществляется приближенными методами. Например, можно, осуществив квантование по времени входных и выходных величин, свести решение задачи к анализу системы алгебраических уравнений.

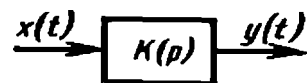


Рис. 17. Схема ОД

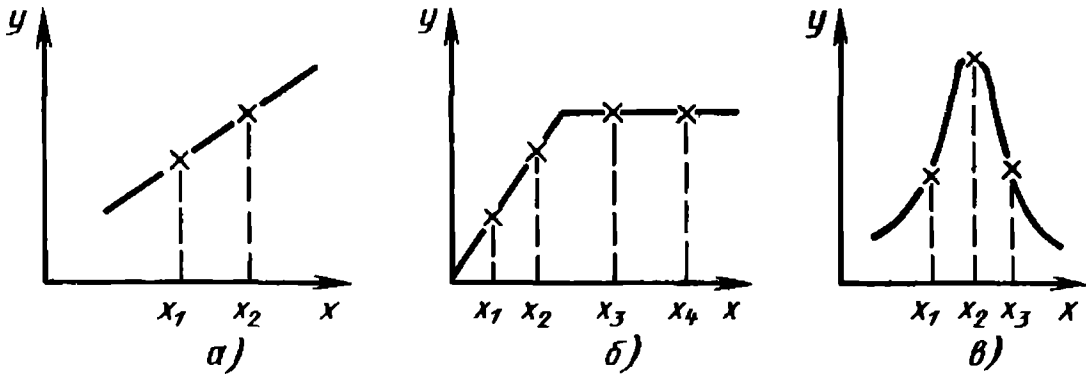


Рис. 18. Динамические характеристики объектов:
 а — линейная; б — кусочно-линейная; в — нелинейная

Особенности проверки работоспособности аналоговых объектов. При тестовом диагностировании работоспособность ОД определяют, анализируя ответы объекта на тестовые воздействия. Для этого могут потребоваться как однократные, так и многократные воздействия на входы объекта. Работоспособность объекта определяют по результатам выполнения статических или динамических проверок, в ходе которых контролируют параметры или статические и динамические характеристики объекта. Для оценки параметров при статических проверках требуется однократное тестовое входное воздействие.

Контроль статических или динамических характеристик при статических проверках требует подачи нескольких входных воздействий. Это объясняется тем, что характеристики оценивают по нескольким точкам: линейные — по двум точкам; кусочно-линейные — по двум точкам на каждом линейном участке; нелинейные — по нескольким характерным точкам (рис. 18). При динамических проверках, как правило, требуется однократное входное воздействие, которое может быть ступенчатым $h(t) = 1$ или импульсным $g(t) = \delta(t)$. При формировании подобных тестовых воздействий возникает техническая задача определения их количественных характеристик. Так, например, воспроизведение единичного импульсного воздействия (импульса бесконечно большого по величине и бесконечно малого по продолжительности) практически неосуществимо. Поэтому на практике на вход объекта подается импульсное воздействие, по

продолжительности не превышающее четверти длительности минимальной из существенных постоянных времени объекта.

Ответ объекта на тестовое воздействие можно оценить по одному (одномерная оценка) или нескольким (многомерная оценка) количественным показателям. Одномерные оценки осуществляются при статических проверках по одному параметру или по одной статической характеристике; при динамических проверках — по одному показателю формы динамической характеристики, например, по максимальному перерегулированию, времени, ошибке регулирования и др.

Многомерная оценка осуществляется при статических проверках по нескольким параметрам или нескольким статическим характеристикам, а при динамических проверках — по нескольким показателям формы динамической характеристики. В этом случае работоспособность определяют по значе-

нию нормы $\|Y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}$ вектора

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, элементами которого являются значения параметров или количественных показателей y_i .

Для решения той же задачи может быть использован метод неподвижной точки. Использование этого метода основано на зависимости

$$y(t) = A(t, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \quad (70)$$

где $y(t)$ — ответ объекта на тестовое воздействие; ξ_i — значение i -го диагностического показателя.

Зафиксировав ответы объекта в каждом из n различных моментов времени,

получают систему из n нелинейных уравнений вида

$$y_i(i) = A_i(t_i, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \quad i = \overline{1, n}. \quad (71)$$

Если каждое уравнение умножить на произвольное вещественное число λ_i , $i = \overline{1, n}$, и прибавить к левой и правой частям значение соответствующего показателя ξ_i , то получим эквивалентную систему

$$\xi_i = \lambda_i A_i(t_i, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) + \xi_i - \lambda_i y_i. \quad (72)$$

Решение полученной системы представляет собой координаты неподвижной точки $z(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ в пространстве Z , если операция p преобразования (72) представляет собой сжатие.

Условия, при которых операция p осуществляет сжатие, имеют вид

$$-\frac{a}{a+b} < \lambda_i < 0 \text{ при } a > 0,$$

$$0 < \lambda_i < \frac{2}{b-a} \text{ при } a < 0,$$

$$p(z_0, p(z_0)) < (1 - \alpha),$$

где

$$a = \frac{\partial A_i}{\partial \xi_i}, \quad b = \frac{\partial A_i}{\partial \xi_j} \Big|_{j \neq i},$$

$$\alpha = \max(|\lambda_i| b + |\lambda_i a + 1|).$$

Координаты неподвижной точки z определяют методом итерации как предел последовательности $\{z_k\}$, где $z_{k+1} = p(z_k)$, $k = 0, 1, \dots$, а z_0 — произвольный элемент из Z .

Многомерная оценка осуществляется и при определении работоспособности многомерных объектов, т.е. объектов, имеющих несколько входов и выходов. Так, для линейного объекта его реакция на произвольное возмущение может быть представлена выражением

$$y_l(t) = \sum_{k=1}^n \int_{t_0}^{\infty} g_{lk}(t, \tau) x_k(\tau) d\tau, \quad l = \overline{1, m},$$

где $g_{lk}(t, \tau)$ — импульсная переходная характеристика объекта, т.е. реакция на l -м выходе объекта в момент времени t на единичное импульсное возмущение, действующее на k -м входе в момент времени τ , а $x_k(\tau)$ — произвольное тестовое воздействие.

Работоспособность объекта, имеющего m входов и n выходов, в этом случае определяют по совокупности импульсных переходных характеристик.

При тестовом диагностировании функционирующих объектов необходимо обеспечить отсутствие влияния тестовых воздействий на выполнение объектом рабочих функций. Такой способ определения работоспособности характерен для регуляторов инерционных объектов, которые вследствие кратковременности тестовых воздействий не успевают реагировать на эти воздействия. Методы определения работоспособности в этом случае не отличаются от методов определения работоспособности нефункционирующих объектов.

При необходимости оценить степень работоспособности объекта определяют расстояние между его текущей характеристикой и эталонными характеристиками, соответствующими различной степени работоспособности объекта.

Математическую задачу формулируют следующим образом: выбрать из семейства функций $\{y_\alpha(x)\}$ функцию $y(x)$, наименее отличающуюся от функции $y_0(x)$. В качестве критерия выбора используется выражение

$$\rho_p(y_0(x), y(x)) = \left(\int_{\Omega} |y_0(x) - y(x)|^p dx \right)^{1/p}, \quad (73)$$

где Ω — множество значений аргумента $\{x_i\}$, на котором задана функция $y(x)$.

На практике эта задача решается вычислением критерия (73) при сравнении данных о текущей характеристике и значений эталонных характеристик, хранящихся в памяти.

1. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ БЕЗУСЛОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Оптимальным называют алгоритм диагностирования, удовлетворяющий экстремальному (часто минимальному) значению некоторой заданной функции, количественно характеризующей качество алгоритма в целом, — *целевой функции оптимизации*. При многошаговых процедурах построения алгоритмов выбор варианта (из числа возможных на данном шаге) частичного решения может осуществляться по экстремальному значению некоторой заданной функции, количественно характеризующей качество частичного решения — *функции предпочтения*.

Алгоритм диагностирования, построенный по некоторой многошаговой процедуре с применением той или иной функции предпочтения, называется *оптимизированным*.

Минимальными алгоритмами диагностирования называют оптимальные алгоритмы, целевой функцией оптимизации которых является число элементарных проверок, а ее экстремумом — минимум этих проверок. Понятие *минимизированного* алгоритма диагностирования аналогично понятию оптимизированного алгоритма с учетом указанной целевой функции.

Наглядным средством построения безусловных алгоритмов диагностирования (особенно минимизированных и минимальных) является аппарат таблиц покрытий.

Построение таблицы покрытий. Понятия, определения и обозначения приведены в гл. 3 при рассмотрении таблиц функций неисправностей.

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

$$a_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } R_j^i \neq R_j^k \\ (\pi_j \text{ различает } e_i \text{ и } e_k), \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Множество элементов a_{jl} обозначим символом A . Для наглядности нули в таблице не проставляем. Построенную таким образом таблицу называют *табл.*

1. Таблица покрытий

A	U				
	u_1	\dots	u_l	\dots	$u_{ U }$
π_1	a_{11}		a_{1l}		$a_{1 U }$
\dots					
π_j	a_{j1}		a_{jl}		$a_{j U }$
\dots					
$\pi_{ \Pi }$	$a_{ \Pi 1}$		$a_{ \Pi l}$		$a_{ \Pi U }$

лицей покрытий. Если $a_{jl} = 1$, то говорят, что строка π_j покрывает столбец e_l .

Пусть Π_l — множество строк таблицы, для которых $a_{jl} = 1$, а π_{hl} , $h = 1, 2, \dots, |\pi_l|$, — его элементы. Логическое условие различения пары технических состояний $u_l = (e_i, e_k)$ хотя бы одной элементарной проверкой $\pi_{hl} \in \Pi_l$ можно записать в виде дизъюнкции:

$$\bigvee_{h=1}^{|\Pi_l|} \pi_{hl} = (\pi_{1l} \vee \pi_{2l} \vee \dots \vee \pi_{|\Pi_l|l}).$$

Тогда условием необходимости различения всех пар состояний множества U является конъюнкция дизъюнкций:

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

Это выражение — логическое произведение логических сумм, и поэтому называется формой ПС. Раскрыв скобки в форме ПС и выполнив все допустимые по правилам булевой алгебры упрощения, получают избыточную форму СП, каждая конъюнкция которой содержит хотя бы по одной переменной из каждой дизъюнкции формы ПС, т. е. представляет своими переменными избыточную совокупность элементарных проверок $\pi_j \in \Pi$, среди которых для каждой пары состояний из U найдется хотя бы одна проверка, различающая эту пару. Любая такая совокупность есть *покрытие таблицы покрытий*.

Операции получения формы СП по форме ПС соответствуют операциям алгоритма A_2 (см. рис. 2, гл. 3).

Таким образом, по таблице покрытий путем получения формы СП можно найти все избыточные (в том числе минимальные) покрытия, представляющие собой проверяющие (при $\lambda = 2$) или различающие ($\lambda > 2$) совокупности элементарных проверок. Совокупность, содержащая r проверок, порождает $r!$ безусловных алгоритмов диагностирования, различающихся

между собой последовательностью реализации элементарных проверок.

В целях сокращения объема вычислений при построении форм ПС и СП первоначально построенную таблицу покрытий по возможности упрощают. Из таблицы могут быть удалены *пустые* строки (соответствующие элементарные проверки не различают ни одной пары состояний) и столбцы (соответствующие пары состояний не различаются ни одной элементарной проверкой). *Сплошная* строка — строка, содержащая 1 во всех столбцах, — является минимальным покрытием, содержащим единственную элементарную проверку. *Сплошной* столбец означает, что соответствующая ему пара состояний различается каждой элементарной проверкой, и поэтому может быть удален из таблицы. *Ядром* покрытия называют совокупность строк, каждая из которых покрывает хотя бы один столбец, содержащий единственное значение 1. Строки ядра входят в любое покрытие таблицы. Все одинаковые строки (столбцы) таблицы могут быть заменены одной любой (одним любым) из них.

Пусть U_j — подмножество столбцов, покрываемых строкой j .

Если для пары строк j и k выполняется условие $U_j \subset U_k$, то строку j называют *поглощаемой*, а строку k — *поглощающей* строкой. Поглощаемые строки могут быть удалены из таблицы. Если для пары столбцов l и s выполняется условие $\Pi_l \supset \Pi_s$, то столбец l является *поглощаемым*, а столбец s — *поглощающим*. Поглощаемые столбцы могут быть удалены из таблицы.

При упрощении таблицы сохраняют информацию об удаляемых строках и столбцах, чтобы не потерять варианты покрытий, равноценных по числу элементарных проверок, но различающихся по их составу.

Оптимальные покрытия. Пусть задана таблица функций неисправностей (табл. 2) некоторого объекта, состоящего из двух блоков 1 и 2, каждый из которых может находиться в одном из двух неисправных состояний. Для блока 1 (2) этим состояниям соответствуют столбцы 1 и 2 (3 и 4) ТФН. Здесь и далее в целях упрощения

2. Таблица функций неисправностей
ОД из двух блоков

R		E				
		e	Блок 1		Блок 2	
			0	1	2	3
П	1	1	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	0
	3	0	0	1	0	0
	4	1	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	1
	6	0	0	0	1	0

элементы множеств E, П и U обозначаются арабскими цифрами. Предположим, что неисправным может быть любой, но только один блок. Столбец 0 представляет исправное состояние объекта. Множество П содержит шесть допустимых элементарных проверок (строки 1—6).

Пример 1. Построить алгоритмы поиска дефектов ОД с глубиной поиска до блока при $\lambda = 3$, $E_1 = \{0\}$, $E_2 = \{1, 2\}$, $E_3 = \{3, 4\}$.

Таблицей покрытий для этих условий является табл. 3 при следующем соответствии между элементами множества U и парами состояний из множеств E_1 , E_2 и E_3 :

1 — (0,1), 2 — (0,2), 3 — (0,3), 4 — (0,4), 5 — (1,3), 6 — (1,4), 7 — (2,3), 8 — (2,4).

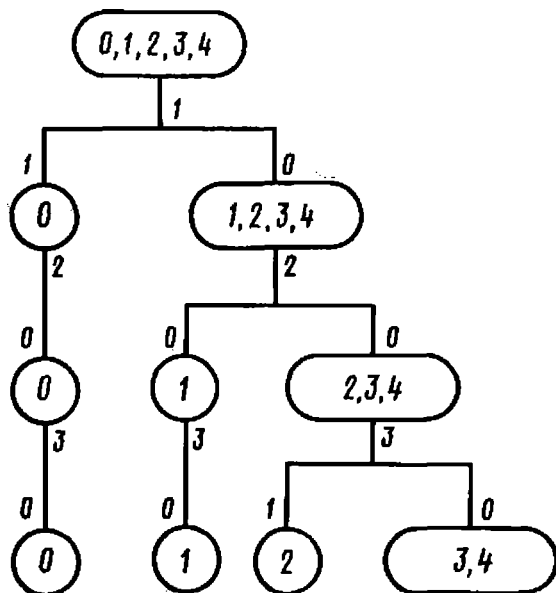


Рис. 1. Безусловный алгоритм с безусловной остановкой

3. Таблица покрытий

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	3
	4	1	1		1	1		1		2
	5				1		1		1	3
	6			1		1		1		1

Табл. 3 нельзя упростить, строки ядра в ней не содержатся.

Исходная форма ПС для табл. 3 имеет вид

$$(1 \vee 2 \vee 4)_1 \cdot (1 \vee 3 \vee 4)_2 \cdot (1 \vee 6)_3 \times \\ \times (1 \vee 4 \vee 5)_4 (2 \vee 4 \vee 6)_5 (2 \vee \\ \vee 5)_6 \cdot (3 \vee 4 \vee 6)_7 \cdot (3 \vee 5)_8.$$

После раскрытия скобок и выполнения поглощений получаем избыточную форму СП

$$123 \vee 145 \vee 156 \vee 456 \vee 2346 \vee 2356,$$

представляющую шесть тупиковых покрытий, из которых первые четыре являются минимальными.

В последнем столбце табл. 3 указаны цены с элементарных проверок. Цены полученных тупиковых покрытий, равные суммам цен входящих в них элементарных проверок, следующие:

$$123 - 7; \quad 456 - 6;$$

$$145 - 7; \quad 2346 - 8;$$

$$156 - 6; \quad 2356 - 9.$$

Минимальными по цене являются покрытия 156 и 456.

Возьмем для построения безусловного алгоритма поиска дефектов покрытие 123, предполагая реализацию его элементарных проверок в последовательности 1, 2, 3. На рис. 1 дан

безусловный алгоритм с безусловной остановкой; на рис. 2 — с условной остановкой. В начальной вершине деревьев указано множество E технических состояний, а в других — его подмножества, получаемые по мере реализации элементарных проверок и в зависимости от результатов последних. У исходящих из вершин дерева дуг (стрелки на дугах опущены) проставлены номера элементарных проверок, а у заходящих дуг — их результаты. По алгоритму (см. рис. 1) диагноз устанавливается после реализации всех его элементарных проверок, — все висячие вершины дерева имеют один и тот же ранг. По алгоритму на рис. 2 диагноз может быть получен после реализации, например, второй элементарной проверки, если объект находится в техническом состоянии 1.

В дереве, представляющем собой алгоритм диагностирования, обозначим длину пути, ведущего от начальной вершины (t_0) до висячей вершины, соответствующей техническому состоянию e_i , записью $l(t_0, e_i)$, а цену такого пути — $c(t_0, e_i)$. Тогда средняя длина алгоритма

$$L(t_0, E) = \frac{1}{|E|} \sum_{i=1}^{|E|} l(t_0, e_i)$$

и средняя цена

$$C(t_0, E) = \frac{1}{|E|} \sum_{i=1}^{|E|} c(t_0, e_i).$$

Для алгоритма на рис. 1

$$L(t_0, E) = 3 \text{ и } C(t_0, E) = 7;$$

для алгоритма на рис. 2

$$L(t_0, E) = 2,4 \text{ и } C(t_0, E) = 5,6.$$

Таким образом, средняя длина или цена алгоритма с условной остановкой меньше длины или цены алгоритма с безусловной остановкой.

С помощью метода, основанного на получении формы, СП для таблицы покрытий, можно получить все оптимальные (минимальные) покрытия. Для получения одного оптимального реше-

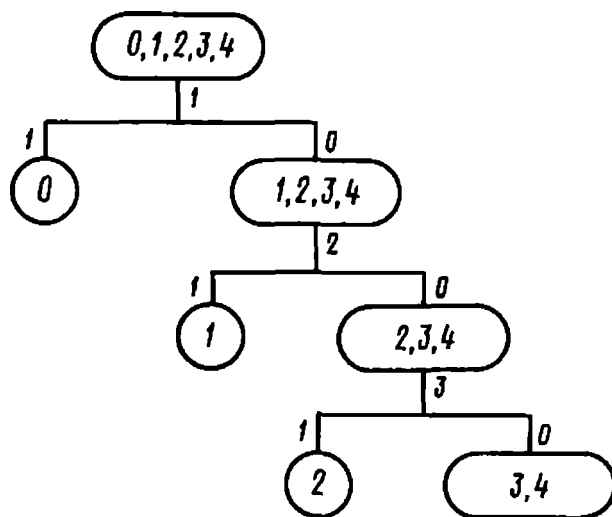


Рис. 2. Безусловный алгоритм с условной остановкой

ния можно воспользоваться методом ветвей и границ [42]. Метод представляет собой пошаговую процедуру, на каждом шаге которой рассматривается некоторая висячая вершина дерева решений, характеризуемая сложностью построенной части решения, а также нижней границей сложности непостроенной части решения. Нижнюю границу сложности непостроенной части решения обозначим как $\lim(g)$, где g — некоторая конкретная целевая функция, относительно которой вычисляют нижнюю границу. Полная нижняя граница $\text{Lim}(g)$ представляет собой сумму сложности построенной части решения и нижней границы сложности непостроенной части решения. На каждом шаге процедуры метода ветвей и границ обрабатывается вершина дерева решений с минимальным значением $\text{Lim}(g)$. Обработка состоит в продолжении построенной части решения возможными вариантами, оценке сложности получаемых новых построенных частей решения и в вычислении новых нижних границ $\lim(g)$ для каждого варианта.

Применяя для решения конкретных задач метод ветвей и границ, находят наиболее простой способ вычисления наиболее точной нижней границы сложности непостроенной части решения.

Построим минимальное покрытие (см. табл. 3) методом ветвей и границ. Нижнюю границу $\lim(g)$ определим следующим образом. Пусть таблица покрытий содержит N столбцов, а ее строка j покрывает n_j столбцов. Рас-

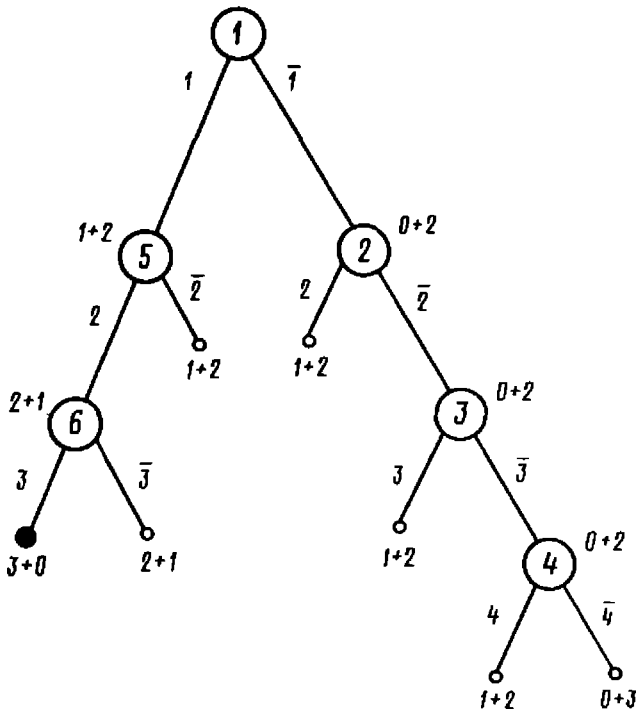


Рис. 3. Дихотомичное дерево решений к примеру 2

положим числа n_j в невозрастающем порядке:

$$n_{j1} \geq n_{j2} \geq \dots \geq n_{jr} \geq \dots$$

Возьмем первые k чисел этого ряда, которые удовлетворяют условиям

$$\sum_{r=1}^k n_{jr} \geq N \text{ и } \sum_{r=1}^{k-1} n_{jr} < N.$$

Число k является нижней границей $\text{lim}(n)$ длины непостроенного покрытия заданной таблицы покрытий, так

4. Таблица покрытий для решения, содержащего строку 1

A_1	U_1				n_j	
	5	6	7	8		
Π_1	2	1	1		2	
	3			1	1	2
	4	1		1		2
	5		1		1	2
	6	1			1	2

5. Таблица покрытий для решения, не содержащего строки 1

A_2	U_2								n_j
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Π_2	2	1			1	1			3
	3		1				1	1	3
	4	1	1		1	1		1	5
	5				1		1		3
	6			1		1		1	3

как любые $k - 1$ ее строк не являются покрытием.

Пример 2. Найти минимальное покрытие табл. 3 методом ветвей и границ. Дихотомичное дерево решений приведено на рис. 3. На этом дереве рядом с его вершинами записаны полные нижние границы $\text{Lim}(n)$ в виде сумм, первые слагаемые которых равны длинам построенных частей решений, а вторые являются нижними границами $\text{lim}(n)$ длин непостроенных частей решений. Номера вершин соответствуют номерам шагов процедуры решения. Левые исходящие дуги соответствуют включению в решение той строки таблицы покрытий, номер которой указан рядом с дугой, а правые — исключению из решения этой дуги.

Шаг 1. Имеется шесть (по числу строк в табл. 3) вариантов выбора частичного решения. Выбираем вариант, определяемый первой строкой. Вычеркнем в табл. 3 строку 1 и столбцы 1—4, покрываемые этой строкой. Получим табл. 4, в последнем столбце которой указаны числа n_j .

Для этой таблицы $N_1 = 4$ и $n_j = 2$ для всех j . Потому $\text{lim}(n)_1 = 2$. Сложность (длина) построенной части равна 1 и $\text{Lim}(n)_1 = 1 + 2$.

Ветви $\bar{1}$ соответствует табл. 5, получаемая исключением строки 1 из табл. 3.

Для табл. 5 $N_2 = 8$, $\text{lim}(n)_2 = 2$ и $\text{Lim}(n)_2 = 0 + 2$. Так как $\text{Lim}(n)_2 <$

$< \text{Lim}(n)_1$, второй шаг процедуры должен выполняться относительно ветви $(\bar{1})$.

Шаг 2. Варианты продолжения решения определяются строками табл. 5. Выберем строку 2. Из таблицы, получаемой вычеркиванием строки 2 и покрываемых ею столбцов 1, 5 и 6, для ветви $(\bar{1}, 2)$

$$N_3 = 5, \text{lim}(n)_3 = 2, \text{Lim}(n)_3 = 1 + 2.$$

Для ветви $(\bar{1}, \bar{2})$ из табл. 5 удаляем строку 2 и получаем

$$N_4 = 8, \text{lim}(n)_4 = 2, \text{Lim}(n)_4 = 0 + 2.$$

Решение продолжают для ветви $(\bar{1}, \bar{2})$, имеющей минимальную полную границу длины.

При дальнейшем решении на шаге 6 для ветви $(1, 2, 3)$ получаем полное минимальное решение, о чем говорит нулевая нижняя граница непостроенной части решения, а также то, что полные нижние границы остальных висячих вершин дерева решений не меньше, чем для ветви $(1, 2, 3)$.

Методом ветвей и границ строят также оптимальные по цене покрытия. Нижнюю границу сложности можно вычислить, взяв из неубывающего ряда цен c_j элементарных проверок $c_{j_1} \leq c_{j_2} \leq \dots \leq c_{j_k} \leq$ первые $k = \text{lim}(n)$ членов и определив их сумму

$$\text{lim}(c) = \sum_{q=1}^k c_{j_q}.$$

Метод ветвей и границ требует запоминания и хранения до конца процедуры всех ветвей и полных нижних границ всех висячих вершин дерева решений, что ограничивает применение этого метода для сложных задач. Этого недостатка лишен метод *обхода дерева решений*. Сущность метода обхода состоит в следующем.

Полное дерево решений есть дерево, пути которого, ведущие из начальной вершины в другие (внутренние и висячие) вершины, представляют все возможные частичные и полные неиз-

быточные и избыточные решения. Для реализации метода обхода нет необходимости хранить полное дерево решений целиком — достаточно иметь ту или иную регулярную процедуру систематического просмотра путей дерева.

Предположим, что известна сложность g некоторого полного решения задачи, называемая *порогом*. Пусть производится обход l -го (по порядку, диктуемому процедурой обхода) пути полного решения в направлении от начальной вершины к висячей. В процессе обхода подсчитывается сложность g_l построенной части решения, соответствующей пройденному участку l -го пути, и сравнивается с порогом. Возможными ситуациями и результатами сравнения, определяющими правила сокращения обхода, являются следующие:

1) построенная часть решения не является полным решением, не достигнута висячая вершина полного дерева решений и $g_l < g$; следует продолжить обход l -го пути;

2) то же, что в п. 1, но $g_l \geq g$; прекращают обход l -го пути и переходят к обходу $(l+1)$ -го пути;

3) построенная часть решения является полным решением и $g_l < g$; необходимо запомнить это решение, принять g_l в качестве нового порога и перейти к обходу $(l+1)$ -го пути;

4) то же, что в п. 3, но $g_l \geq g$; следует перейти к обходу $(l+1)$ -го пути;

5) достигнута висячая вершина полного дерева; переходят к обходу $(l+1)$ -го пути;

6) l -й путь последний; обход прекращают.

Оптимальным решением является решение, представленное путем, для которого зафиксирован последний порог g , являющийся полной нижней границей сложности решения.

Если порог g заранее (до применения процедуры) неизвестен, то в качестве такового принимают сложность первого найденного в процессе обхода полного решения.

Известен другой способ просмотра дерева решений, состоящий в том, что сначала просматриваются все пути

длины 1, затем все пути длины 2, и так далее до получения первого полного решения, являющегося искомым минимальным решением. Такой метод называют *методом проб*. Число просматриваемых путей может быть уменьшено, если известна нижняя граница сложности полного покрытия заданной таблицы покрытий. Пути, длина которых меньше нижней границы, можно не просматривать.

При предварительной комбинаторной обработке таблиц покрытий объем перебора вариантов в методе проб может быть сокращен. Способы такой обработки, а также более детальное изложение приведенных здесь методов содержатся в работе [57].

Оптимизированные покрытия. Методы построения оптимизированных покрытий, как правило, значительно проще методов получения оптимальных покрытий, но при применении методов построения оптимизированных покрытий получение оптимальных решений не гарантировано.

Часто употребляемой функцией предпочтения при построении оптимизированных покрытий является число n_j единиц в строке j таблицы покрытий. Лучшей считается строка с максимальным числом единиц.

Пример 3. Максимальной строкой табл. 3 является строка 4, имеющая 5 единиц. Включим строку 4 в искомое покрытие и удалим из таблицы эту строку и покрываемые ею столбцы 1—5 и 7.

Максимальной в новой таблице является строка 5, покрывающая столбцы 6 и 8.

Оставшийся непокрытым столбец 3 покрывается строками 1 или 6. Получено два полных покрытия 145 и 456.

Условию выбора строк ядра удовлетворяет функция предпочтения, согласно которой сначала выбирается столбец с наименьшим числом единиц, а затем среди строк, содержащих единицу в выбранном столбце, выбирается и включается в искомое покрытие строка с наибольшим числом единиц.

Для получения покрытий, оптимизированных по цене, используют функцию предпочтения, согласно которой

сначала выделяют строки с минимальной ценой, а затем из них выбирают строку с максимальным числом единиц.

Можно пользоваться также функцией предпочтения, являющейся отношением цены c_j строки j к числу n_j покрываемых ею единиц. Лучшей следует считать строку с минимальным значением этого отношения.

Для перечисленных функций предпочтения допускается их адекватная интерпретация на языке таблиц функций неисправностей, что исключает необходимость построения таблиц покрытий. Особенности такой интерпретации, а также сопоставление функции предпочтения, согласно которой лучшим является наиболее «равномерное» разбиение множества столбцов ТФН на классы, с известными функциями предпочтения энтропийного типа, оценивающими обычно приращение информации о техническом состоянии объекта, содержатся в работе [57].

2. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Удобным аппаратом для описания и построения условных алгоритмов диагностирования является аппарат теории вопросников.

Вопросники и алгоритмы диагностирования. Имеется конечное множество E , состоящее из N элементов y_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Элементы $y \in E$ называют *событиями*. Каждому $y \in E$ приписано положительное число $w(y)$, называемое *весом события y* . Зафиксировано разбиение множества E на λ классов E_μ , $\mu = 1, 2, \dots, \lambda$.

Задано также множество T разбиений t_j , $j = 1, 2, \dots, |T|$, множества E на классы. Назовем элементы $t \in T$ — *вопросами*; число $a(t)$, $2 \leq a(t) \leq N$, классов $E_{\gamma(t)}$, $\gamma(t) = 1, 2, \dots, a(t)$, в разбиении $t \in T$ — *основанием вопроса t* ; признаки, по которым выделяют классы событий в разбиении $t \in T$, — *ответами (или исходами) вопроса t* . Каждому вопросу $t \in T$ приписано положительное число $c(t)$ — *цена вопроса*.

Поставить или задать вопрос $t \in T$ относительно множества E — значит разбить множество E на $a(t)$ классов $E_{\gamma(t)}$. Относительно любого из полученных классов $E_{\gamma(t)}$ также можно поставить вопрос из T и получить соответствующие определенные классы его разбиения и т. д.

Цель вопросов — распознавание (идентификация, выделение) подмножеств E_{μ} , $\mu = 1, 2, \dots, \lambda$, т. е. получение $v \geq \lambda$ классов $E_k \subseteq E_{\mu}$, $k = 1, 2, \dots, v$, и таких, что $\bigcup_{k=1}^v E_k = E$.

Для полной идентификации N событий достаточно одного вопроса, если его основание равно N . Если все вопросы из T имеют основание, меньшее N , то одного вопроса недостаточно. Действительно, в этом случае по крайней мере один класс (обозначим его E') любого разбиения множества E будет содержать два или больше событий. Для того чтобы их идентифицировать, необходимо поставить еще хотя бы один вопрос относительно E' .

Первый вопрос всегда ставится относительно множества E . Второй и последующие — относительно классов, полученных в результате постановки предыдущих вопросов. Вопросы прекращаются после того, как все полученные классы окажутся одноэлементными. Когда идентификация закончена, разным событиям соответствуют разные по числу или составу либо по тому и другому вместе последовательности вопросов и ответов.

В задачах неполной идентификации вопросы задаются так же, как и в задачах полной идентификации, однако постановка новых вопросов прекращается при получении классов (не обязательно одноэлементных), удовлетворяющих условию $E_k \subseteq E_{\mu}$.

Совокупность $Q \subseteq T$ вопросов и последовательности, в которых эти вопросы должны быть поставлены для полной (или неполной) идентификации N событий множества E , называют *вопросником для E* .

При одних и тех же множествах E и T могут быть построены разные (по составу и последовательности вопросов) вопросники. Необходимо выбрать оптимальные вопросники.

Вопросник можно представить графом $G = (Z, \Gamma)$

$$Z = \{z/z \in Q \cup E\},$$

$$z = y \in E \rightarrow |\Gamma y| = 0, \quad (1)$$

$$z = x \in Q \rightarrow |\Gamma x| = a(t)$$

с единственной вершиной $x_0 \in Q$, для которой $|\Gamma^{-1}x_0| = 0$.

Множество вершин графа G состоит из двух непересекающихся подмножеств Q и E . Припишем вершинам подмножества E графа G веса $w(y)$, а вершинам подмножества Q цены $c(x)$.

Граф G называют *вопросником для E* ; G является ориентированным графом, содержащим N вершин с нулевой полустепенью исхода. Эти *висячие вершины* называют конечными вершинами, или событиями; каждую вершину $x \in Q$ ($x \neq x_0$) — *внутренней вершиной*, или вопросом; вершину x_0 — *корнем графа G* или *первым вопросом*. Основание вопроса x обозначим $a(x)$. Относительно вершины $z \in Z$ различают множества: Γz — ее *последователей*, $\widehat{\Gamma}z \setminus z = \Gamma z \cup \Gamma(\Gamma z) \cup \dots$ — ее *потомков*, $\Gamma^{-1}z$ — ее *предшественников* и $\widehat{\Gamma}^{-1}z \setminus z = \Gamma^{-1}z \cup \Gamma^{-1}(\Gamma^{-1}z) \cup \dots$ — ее *предков*.

Ценой пути $b z \in Z$ из x_0 является сумма $c(x_0, z) = \sum_{x \in \Gamma^{-1}z \setminus z} c(x)$.

Предположим $c(x_0, x_0) = 0$. Цена пути $c(x_0, y)$ характеризует затраты на идентификацию события $y \in E$. Эти затраты минимально необходимы в том случае, когда путь, ведущий из x_0 в каждое событие $y \in E$ — единственный и не имеет контуров. Поэтому вопроснику для E с минимальными затратами на идентификацию событий соответствует граф типа дерева с корнем x_0 . *Обход графа G* есть совокупность всех путей из x_0 в каждое событие $y \in E$. Определим относительный вес $p(y)$ события $y \in E$ следующим образом:

$$p(y) = \frac{w(y)}{W},$$

где

$$W = \sum_{y \in E} w(y).$$

При $0 < p(y) < 1$ и $\sum p(y) = 1$ есть множество E , которое можно рассматривать как полную систему событий $y \in E$ с вероятностями $p(y)$. Тогда затраты на идентификацию событий по вопроснику в целом определяют как среднюю цену обхода графа G :

$$C(x_0, E) = \sum_{y_i \in E} c(x_0, y_i) p(y_i). \quad (2)$$

В дальнейшем вместо терминов «носительный вес» и «средняя цена обхода» употребляются более короткие термины — «вес» и «цена обхода».

Определим вес $p(x)$ вопроса $x \in Q$ как сумму весов событий, принадлежащих подмножеству $E(x)$ и являющихся потомками вопроса:

$$p(x) = \sum_{y \in \hat{\Gamma}_x \cap E} p(y).$$

Заметим, что $p(x_0) = 1$. Цена обхода может быть определена через цены и веса вопросов:

$$C(x_0, E) = \sum_{x_j \in Q} c(x_j) p(x_j). \quad (3)$$

На языке вопросников можно сформулировать многие теоретические и прикладные задачи, в том числе задачи построения алгоритмов диагностирования. Если цена вопроса есть стоимость или время реализации элементарной проверки, а вес события — вероятность состояния (исправного или неисправного) ОД, то цена обхода равна средней стоимости или среднему времени определения технического состояния любым (условным или безусловным) алгоритмом диагностирования.

Различают вопросники с одинаковыми и неодинаковыми основаниями вопросов. Если все вопросы вопросника имеют одинаковые основания $a(x) = a = \text{const}$, то вопросник называют *однородным*. Если хотя бы для одной пары вопросов $x_i, x_j \in Q, i \neq j$, имеет место неравенство $a(x_i) \neq a(x_j)$, то вопросник называют *неоднородным*.

Если в вопроснике G $c(x) = c = \text{const}$ для всех $x \in Q$, то такой вопросник является вопросником с *равными ценами вопросов*; в противном случае — вопросник с *неравными ценами*.

Наконец, вопросник G , у которого веса всех событий равны, является вопросником с *равными весами* (событий); в противном случае G — вопросник с *неравными весами*. Наиболее просты однородные вопросники с равными ценами и весами. Неоднородные вопросники с неравными ценами и весами называют также *вопросниками общего вида*. В этой главе рассмотрены в основном вопросники общего вида, оптимальные по минимуму цены их обхода.

Назовем рангом вершины $z \in Z$ вопросника G число дуг пути, начинающегося в x_0 и заканчивающегося в z . Минимальный ранг r_0 вопросника G такой, для которого существует хотя бы одно событие ранга r_0 и ни одного события ранга, меньшего r_0 . Максимальным рангом r_M вопросника G является такой ранг, для которого существует хотя бы одна вершина ранга r_M и ни одной вершины ранга, большего r_M .

Обозначим через q_m число вопросов по основанию $a_m, m \in M$ (M — некоторое числовое множество), а через h_l — число вопросов с ценой $c_l, l \in L$ (L — некоторое числовое множество) в вопроснике G . Тогда

$$\sum_{m \in M} q_m = \sum_{l \in L} h_l = |Q|.$$

Число событий N связано с числом q_m вопросов и их основаниями a_m зависимостью

$$N = \sum_{m \in M} q_m (a_m - 1) + 1.$$

Методы построения оптимальных и оптимизированных вопросников. *Оптимальный вопросник G_0* , позволяющий различить N событий с помощью

$$\sum_{m \in M} q_m = \sum_{l \in L} h_l \text{ вопросов, имеющих}$$

основания a_m и цены c_l , есть дерево с корнем x_0 , в котором $N = \sum_{m \in M} q_m \times$

$\times (a_m - 1) + 1$, и его вершинам, расположенным в неубывающем порядке относительно их рангов, приписаны веса в невозрастающем порядке, а цены ведущих к ним из путей — в неубывающем порядке; при этом вопросы

располагаются в невозрастающем порядке относительно их оснований и в неубывающем порядке относительно их цен; среди всех вершин одного и того же ранга r нет ни одной, вес которой превышает сумму весов других a вершин того же ранга, где a — наименьшее из оснований вопросов ранга $r - 1$. Преобразование заданного вопросника в оптимальный можно выполнить по алгоритму A_1 .

А л г о р и т м A_1 . Задан некоторый вопросник G , различающий множество E из N событий y_i с весами $p(y_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, с помощью $|Q|$ вопросов, среди которых q_m вопросов имеют основания a_m , $m \in M$ и h_l вопросов имеют цены c_l , $l \in L$. Преобразовать G в оптимальный вопросник G_0 .

1. Из весов событий и из оснований и цен вопросов вопросника G образуют два списка: список 1 — весов $p(z_k)$, $z_k \in E$, расположенных в неубывающем порядке, $p(z_k) \leq p(z_{k+1})$, $k = 1, 2, \dots, N$, и список 2 — пар оснований и цен вопросов (a_j, c_j) , в котором основания расположены в неубывающем порядке, $a_j \leq a_{j+1}$, а цены — в невозрастающем порядке $c_j \geq c_{j+1}$, $j = 1, 2, \dots, |Q|$.

Принимают $j = 1$.

2. Из списка 2 пару (a_j, c_j) относят к вопросу x_j оптимального вопросника G_0 , т. е. принимают, что $a(x_j) = a_j$ и $c(x_j) = c_j$. Из списка 1 вычеркивают a_j первых весов и принимают их в качестве весов последователей вопроса x_j . Определяют вес

$$\text{вопроса } x_j, p(x_j) = \sum_{k=1}^{a_j} p(z_k).$$

3. Преобразуют список 1, сохраняя в нем невычеркнутые веса и включив в него вес вопроса $p(x_j)$. Эти веса располагают в неубывающем порядке. Проверяют значение j : если $j \leq |Q|$, то увеличивают j на 1 и возвращаются к п. 2; если $j > |Q|$, то переходят к п. 4.

4. Конец построения оптимального вопросника G_0 .

Пример 4. На рис. 4 представлен вопросник G для шести событий y_1, \dots, y_6 . Веса событий и вопросов указаны рядом с соответствующими вершинами

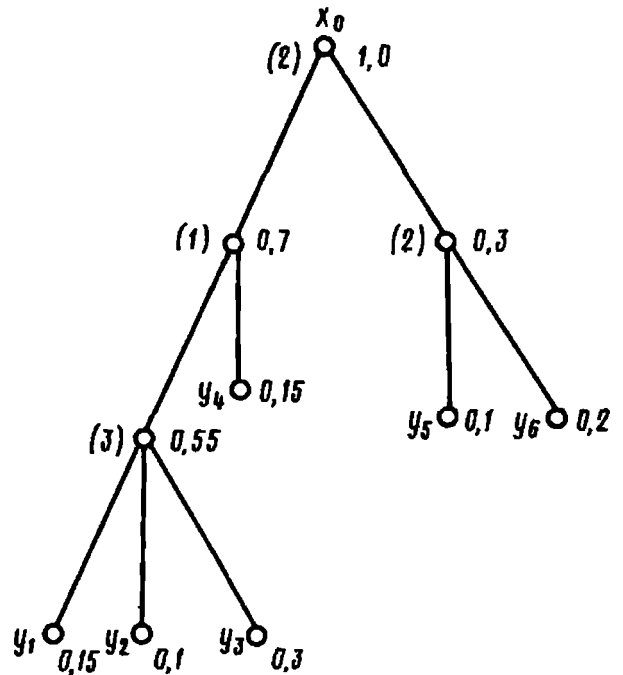


Рис. 4. Вопросник к примеру 4

числами без скобок, а цены вопросов — числами в скобках. Цена обхода вопросника G $C(x_0, E) = 4,95$.

Применим алгоритм A_1 к вопроснику G .

Шаг 1. Список 1:

0,10; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30

и список 2:

(2,3), (2,2), (2,2), (3,1).

Шаг 2. Первой паре из списка 2 ставим в соответствие вопрос x_1 с основанием 2 и ценой 3. Двум последователям вопроса x_1 ставим в соответствие два первых веса из списка 1 (рис. 5, а). Вычеркиваем из списка 1 два первых веса и включаем в него вес $p(x_1) = 0,20$ вопроса x_1 . Новый список 1:

0,15; 0,15; 0,20; 0,20; 0,30.

Шаг 3. По второй паре из списка 2 формулируем вопрос x_2 , для которого $a(x_2) = 2$, $c(x_2) = 2$ и $p(x_2) = 0,15 + 0,15 = 0,30$ (рис. 5, б). Список 1 приобретает вид:

0,20; 0,20; 0,30; 0,30.

Шаг 4. Третья пара из списка 2 образует вопрос x_3 : $a(x_3) = 2$, $c(x_3) = 2$, $p(x_3) = 0,40$ (рис. 5, в). Список 1:

0,30; 0,30; 0,40.

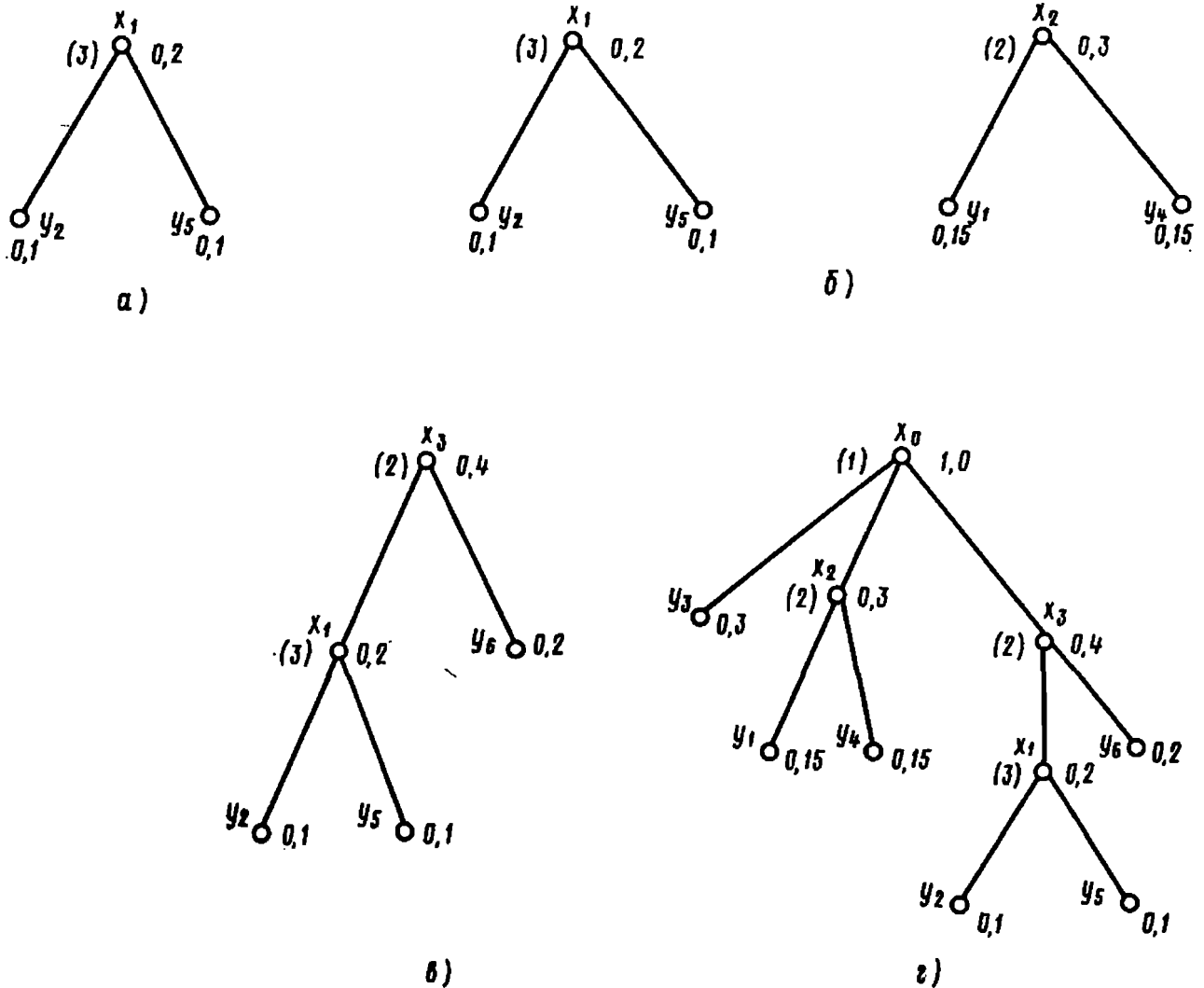


Рис. 5. Промежуточные подвопросники и оптимальный вопросник к примеру 4

Шаг 5. Последняя пара из списка 2 определяет корень x_0 искомого вопросника G_0 : $a(x_0) = 3$, $c(x_0) = 1$, $p(x_0) = 1,00$. G_0 представлен на рис. 5, г; его цена обхода $C_0(x_0, E) = 3,00$.

Алгоритм A_1 предельно прост, так как с его помощью получают оптимальный вопросник без какого-либо перебора вариантов даже частичных решений. Однако этот алгоритм имеет чисто теоретическое значение, так как на практике не соблюдается условие полноты заданного множества вопросов T , т. е. наличия всех возможных допустимых вопросов (допустимых элементарных проверок), и не всем таким вопросам можно произвольно приписать цены (следует обратить внимание на то, что оптимальный вопросник G_0 в примере 1 содержит совсем не те

вопросы, которые содержатся в исходном вопроснике G).

Для практики важна разработка методов построения так называемых реализуемых (оптимальных и оптимизированных) вопросников с учетом конкретных реальных ограничений на множество допустимых вопросов. Реализуемым вопросником называют вопросник, у которого каждый вопрос из Q является вопросом из заданного множества T допустимых вопросов, т. е. для каждого вопроса $x \in Q$ найдется такой вопрос $\tau \in T$, для которого $a(x) = a(\tau)$ и $c(x) = c(\tau)$, или иначе $Q \subseteq T$.

Для построения реализуемых вопросников можно использовать методы динамического программирования и метод ветвей и границ.

В основе методов динамического программирования лежит рекуррентное

вычисление цены обхода вопросника через цены обхода его подвопросников [57].

Для построения реализуемых оптимальных вопросников методом ветвей и границ необходимо уметь относительно просто вычислять нижнюю границу цены обхода реализуемых подвопросников, являющихся непостроенными частями искомого вопросника. С этой целью можно воспользоваться алгоритмом A_1 построения оптимального (не обязательно реализуемого) вопросника.

В задачах полной идентификации в список 1 включают N_α весов событий E_α рассматриваемого подвопросника G_α , а в задачах неполной идентификации — λ_α сумм весов событий подмножеств E_μ , $\mu = 1, 2, \dots, \lambda_\alpha$. Для формирования списка 2 необходимо определить требуемое для оптимального подвопросника G_α , имеющего N_α (или λ_α) висячих вершин, число $|Q_\alpha|$ вопросов с наибольшими основаниями и наименьшими ценами из имеющихся оснований и цен допустимых вопросов из множества T_α . Для этого основания a_i вопросов из T_α располагают в ряд в невозрастающем порядке и из этого ряда выбирают наименьшее число b первых его членов, удовлетворяющих условию

$$N_\alpha \leq \sum_{i=1}^b (a_i - 1) + 1.$$

В случае неравенства последнее из выбранных оснований a_b уменьшается на целое число $d > 0$, такое, при котором имеет место равенство

$$N_\alpha = \sum_{i=1}^{b-1} (a_i - 1) + (a_b - d). \quad (4)$$

После этого для списка 2 выбирают b наименьших цен вопросов из T_α . Очевидно что $|Q_\alpha| = b$.

Оптимальный реализуемый вопросник строят в направлении от корня к висячим вершинам, что соответствует представлению вопросника в виде, показанном на рис. 6. Цену обхода

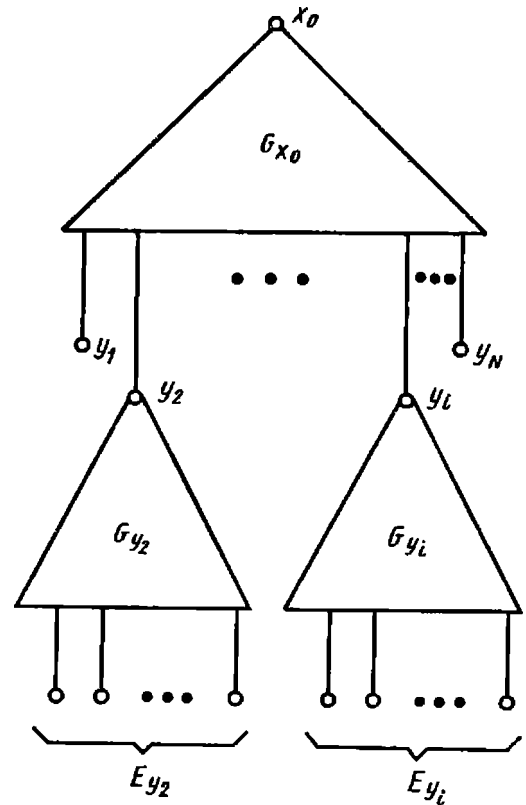


Рис. 6. Разбиение вопросника на подвопросники

такого вопросника можно представить следующим выражением:

$$C(x_0, E) = \sum_{x \in Q_{x_0}} p(x) c(x) + \sum_{y_i \in E_{x_0}} p(y_i) C_{y_i}. \quad (5)$$

Здесь первая сумма является ценой обхода подвопросника G_{x_0} , а вторая — средневзвешенной суммой цен обхода подвопросников G_{y_i} .

Операции алгоритма A_2 построения оптимальных реализуемых вопросников методом ветвей и границ делят на этапы, а этапы — на шаги.

На каждом шаге каждого этапа: строят реализуемый подвопросник G_{x_0} (см. рис. 6) с корнем x_0 и висячими вершинами y_i ; по формуле (3) вычисляют цену C_{x_0} его обхода;

по алгоритму A_1 находят цену C_{y_1} обхода каждого из невырожденных подвопросников G_{y_i} для E_{y_i} , корнями которых являются висячие вершины y_i подвопросника G_{x_0} ; эти цены обхода представляют собой нижние границы цен обхода реализуемых подвопросников G_{y_i} ;

6. Таблица функций неисправностей к примеру 5

R		E						a (t)	c (t)
		1	2	3	4	5	6		
T	0	α_0	α_0	α_0	α_0	β_0	γ_0	3	1
	1	α_1	β_1	α_1	γ_1	α_1	β_1	3	2
	2	α_2	α_2	β_2	γ_2	α_2	α_2	3	2
	3	α_3	α_3	β_3	γ_3	α_3	γ_3	3	3
p (y)		0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1		

по формуле (5) определяется и записывается цена обхода вопросника G для E , состоящего из реализуемого подвопросника G_{x_0} (это построенная часть решения) и из не обязательно реализуемых подвопросников G_{y_i} (непостроенная часть решения); эта цена обхода является полной нижней границей цены обхода реализуемых вопросников для E , содержащих реализуемый подвопросник G_{x_0} .

После выполнения всех шагов на данном этапе проводят:

сравнение хранящихся в памяти полных нижних границ цен обхода реализуемых вопросников G для E , вычисленных как на данном этапе, так и на всех предыдущих этапах;

выбор для продолжения решения (для очередного этапа) среди вопросников G для E вопросника G_0 с минимальной полной нижней границей;

удаление из памяти выбранной минимальной полной нижней границы.

Обозначим реализуемый подвопросник G_{x_0} выбранного вопросника G_0 символом G_{0x_0} , а его висячие вершины y_i — символом y_{0i} .

В начале каждого этапа алгоритма выполняют следующие операции:

проверяют, является ли подвопросник G_{0x_0} вопросником для E ; если да, то полученный подвопросник G_{0x_0} — искомый оптимальный реализуемый вопросник G_0 для E ; в противном случае выбирают любую одну висячую

вершину y_{0i} подвопросника G_{0x_0} , представляющую собой корень невырожденного подвопросника G_{0y_i} (на первом этапе алгоритма единственной вершиной y_{0i} является корень x_0 искомого вопросника):

для подмножества E_{0y_i} событий, соответствующего вершине y_{0i} , определяют множество $T_{y_{0i}}$ допустимых, имеющих смысл вопросов, т. е. таких допустимых вопросов из множества T , которые при разбиении множества E_{0y_i} , или получаемых при этом разбиении его классов, или классов его классов, и так далее, имеют не менее двух исходов (на первом этапе алгоритма $T_{y_{0i}} = T$).

Число вопросов в $T_{y_{0i}}$ определяет число шагов рассматриваемого этапа. Каждый шаг построения реализуемого подвопросника G_{x_0} состоит в добавлении к подвопроснику G_{0x_0} очередного вопроса из $T_{y_{0i}}$ вместо выбранной висячей вершины y_{0i} (на первом этапе реализуемый подвопросник G_{x_0} содержит единственный вопрос из T).

Пример 5. Построить по алгоритму A_2 оптимальный реализуемый вопросник G_0 (оптимальный условный алгоритм диагностирования) для условий, заданных ТФН (табл. 6).

Для наглядности в таблице результаты элементарных проверок (исходы вопросов t_j) обозначены α_j , β_j и γ_j . Этим результатам соответствует разбиение множества E событий (техни-

ческих состояний) на следующие классы:

$$t_0 = \{(1, 2, 3, 4), (5), (6)\},$$

$$t_1 = \{(1, 3, 5), (2, 6), (4)\},$$

$$t_2 = \{(1, 2, 5, 6), (3), (4)\},$$

$$t_3 = \{(1, 2, 5), (3), (4, 6)\}.$$

В правой части таблицы приведены основания и цены вопросов, а в нижней — вероятности событий. Требуется полная идентификация событий (максимальная глубина диагностирования).

Этап 1. Вершиной y_{0i} является корень x_0 искомого вопросника. $E_{y_{0i}} = E$ и $T_{y_{0i}} = T = \{t_0, t_1, t_2, t_3\}$. Следовательно, на этапе 1 имеется четыре шага алгоритма или варианта решений (рис. 7).

Шаг 1—1. Берем в качестве подвопросника G_{x_0} (на рис. 8, а он показан сплошными линиями) вопрос t_0 ;

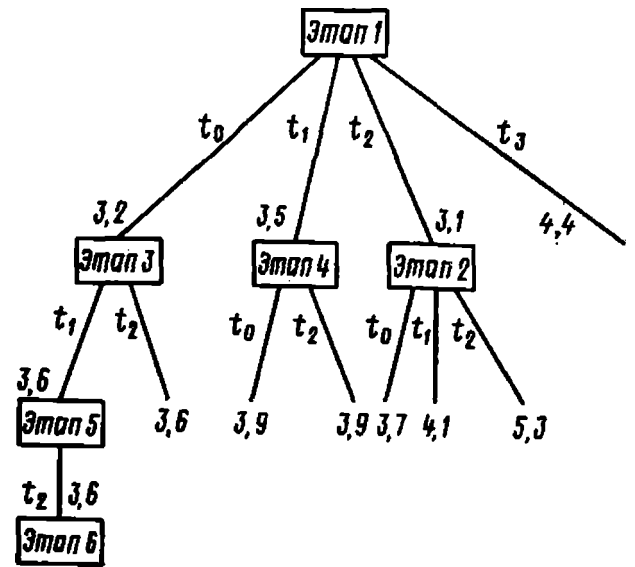


Рис. 7. Дерево решений к примеру 5

цена обхода $C_{x_0} = c(t_0) = 1$. G_{x_0} имеет три висячие вершины y_i , которым соответствуют подмножества событий $E_{y_1} = \{1, 2, 3, 4\}$, $E_{y_2} = \{5\}$, $E_{y_3} = \{6\}$. Только для E_{y_1} подвопросник G_{y_1} невырожденный. Нахо-

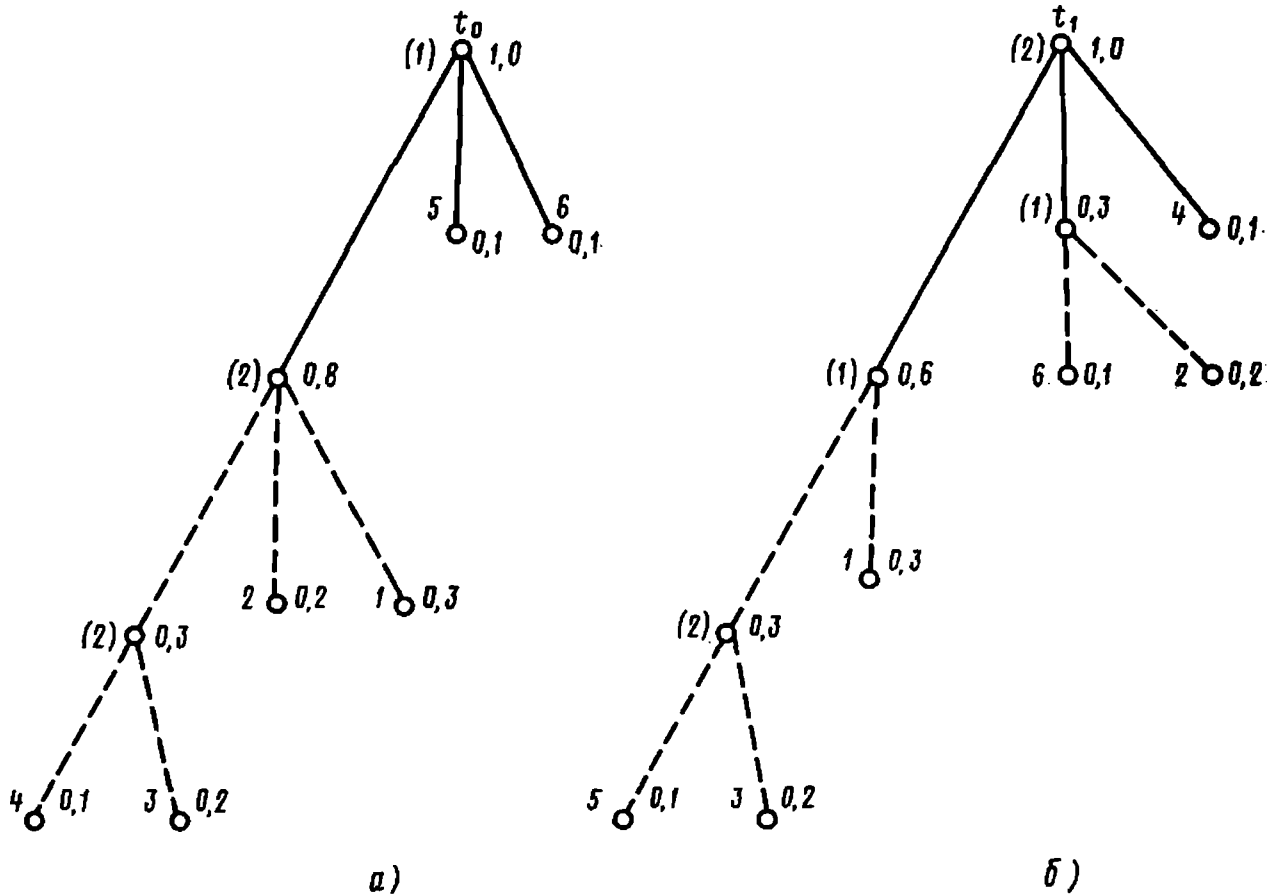


Рис. 8. Промежуточные подвопросники к примеру

дим подмножество T_{y_1} допустимых имеющих смысл относительно E_{y_1} вопросов:

$$t_1 = \{(1, 3), (2), (4)\},$$

$$a_1 = 3, c_1 = 2,$$

$$t_2 = \{(1, 2), (3), (4)\},$$

$$a_2 = 3, c_2 = 2,$$

$$t_3 = \{(1, 2), (3), (4)\},$$

$$a_3 = 3, c_3 = 3,$$

$$t'_1 = \{(1), (2)\}, a'_1 = 2, c'_1 = 2,$$

$$t'_2 = \{(1), (3)\}, a'_2 = 2, c'_2 = 2.$$

В соответствии с формулой (4) для построения оптимального вопросника G_{y_1} для E_{y_1} по алгоритму A_1 необходимы два вопроса с максимальными основаниями 3 и 2. Минимальные цены этих вопросов одинаковы и равны двум. Построенный при этих условиях подвопросник G_{y_1} показан пунктиром на рис. 8, а; цена его обхода $C_{y_1} = 2,75$.

По формуле (5) находим цену вопросника в целом: $C = 1,0 + 0,8 \times 2,75 = 3,2$. Это полная нижняя граница для ветви t_0 дерева решений.

Шаг 1—2. Аналогично рассматриваем вопрос t_1 в качестве подвопросника G_{x_0} , трем висячим вершинам которого соответствуют подмножества событий $E_{y_1} = \{1, 3, 5\}$, $E_{y_2} = \{2, 6\}$, $E_{y_3} = \{4\}$.

Определяем: T_{y_1} для E_{y_1} :

$$t_0 = \{(1, 3), (5)\}, a_0 = 2, c_0 = 1;$$

$$t_2 = \{(1, 5), (3)\}, a_2 = 2, c_2 = 2;$$

$$t_3 = \{(1, 5), (3)\}, a_3 = 2, c_3 = 3;$$

$$t'_0 = \{(1), (5)\}, a'_0 = 2, c'_0 = 1;$$

$$t'_2 = \{(1), (3)\}, a'_2 = 2, c'_2 = 2;$$

T_{y_2} для E_{y_2} :

$$t_0 = \{(2), (6)\}, a_0 = 2, c_0 = 1;$$

$$t_3 = \{(2), (6)\}, a_3 = 2, c_3 = 3.$$

Оптимальные подвопросники для E_{y_1} и E_{y_2} показаны пунктиром на рис. 8, б; цены их обхода соответственно 2,0

и 1,0. Полная нижняя граница равна 3,5.

Шаг 1—3. $G_{x_0} = t_2$, $C = 3,1$.

Шаг 1—4. $G_{x_0} = t_3$, $C = 4,4$.

Все шаги этапа 1 исчерпаны. Сравнение показывает, что минимальную полную нижнюю границу имеет вариант шага 1—3 ($C = 3,1$), который и берется для продолжения решения на этапе 2.

Э т а п 2. Реализуемый подвопросник G_{0x_0} состоит из одного вопроса t_2 и имеет три висячие вершины y_{0i} с множеством событий $E_{y_{01}} = \{1, 2, 5, 6\}$, $E_{y_{02}} = \{3\}$, $E_{y_{03}} = \{4\}$.

Находим $T_{y_{01}}$ для $E_{y_{01}}$:

$$t_0 = \{(1, 2), (5), (6)\}, a_0 = 3, c_0 = 1;$$

$$t_1 = \{(1, 5), (2, 6)\}, a_1 = 2, c_1 = 2;$$

$$t_3 = \{(1, 2, 5), (6)\}, a_3 = 2, c_3 = 3.$$

Шаг 2—1. G_{x_0} состоит из двух вопросов t_2 и t_0 . $C = 3,7$.

Шаг 2—2. G_{x_0} состоит из t_2 и t_1 . $C = 4,1$.

Шаг 2—3. G_{x_0} состоит из t_2 и t_3 . $C = 5,3$.

Сравнение полных нижних границ всех висячих вершин дерева решений показывает, что минимальной ($C = 3,2$) является граница шага 1—1 этапа 1.

Продолжая аналогично, на этапе 6 получим, что подвопросник G_{0x_0} , состоящий из трех вопросов t_0 , t_1 и t_2 , является вопросником для E (всем его висячим вершинам соответствуют вырожденные подвопросники $G_{y_{0i}}$), т. е. представляет собой оптимальный реализуемый вопросник с ценой обхода $C_0 = 3,6$. Полученный вопросник показан на рис. 9.

Пример 5 иллюстрирует работу алгоритма A_2 для случая поиска дефектов с максимальной глубиной.

Изменения, которые необходимо внести в этот алгоритм при его применении для построения условных алгоритмов диагностирования с меньшей глубиной (в том числе алгоритмов проверки исправности или работоспособности), заключаются в том, что вырожденные подвопросники ставят

в соответствие подмножествам событий, представляющих собой технические состояния, не требующие различения. На рис. 10 показан оптимальный реализуемый вопросник, построенный по условиям примера, за исключением того, что требуемая глубина идентификации событий задана разбиением множества E на два класса $E_1 = \{2\}$ и $E_2 = \{1, 3, 4, 5, 6\}$. Цена обхода вопросника $C_0 = 2,3$.

В ряде практических случаев задают ограничения по затратам на реализацию алгоритмов диагностирования (по ценам обхода вопросников). Учесть эти ограничения при использовании алгоритма A_3 можно следующим образом. В процессе работы алгоритма не следует продолжать обработку тех ветвей дерева решений, полные нижние границы которых превышают заданную допустимую цену обхода. Процесс прекращается либо тогда, когда будет получен оптимальный реализуемый вопросник, цена обхода которого удовлетворяет заданному ограничению, либо тогда, когда не останется ни одной висячей вершины дерева решений, допускающей ее обработку с учетом ограничения на цену обхода. В последнем случае следует среди реализуемых подвопросников G_{x_0} , соответствующих висячим вершинам дерева решений, выбрать те, цены обхода которых не превышают допустимую. Из всех таких подвопросников G_{x_0} можно выбрать либо тот, который имеет минимальную цену обхода, либо тот, который лучше других по каким-либо дополнительным соображениям (например, обеспечивает наибольшую глубину идентификации событий). Если ни один из реализуемых подвопросников G_{x_0} не удовлетворяет заданному ограничению, следует перейти к рассмотрению таких подвопросников предыдущих этапов алгоритма.

Пример 6. Пусть для условий предыдущего примера 6 задана допустимая цена обхода $C_{доп} = 3,4$. В соответствии с деревом решений (см. рис. 7) процедуру нужно прекратить после выполнения этапа 3 без получения оптимального реализуемого вопросника, удовлетворяющего заданному ог-

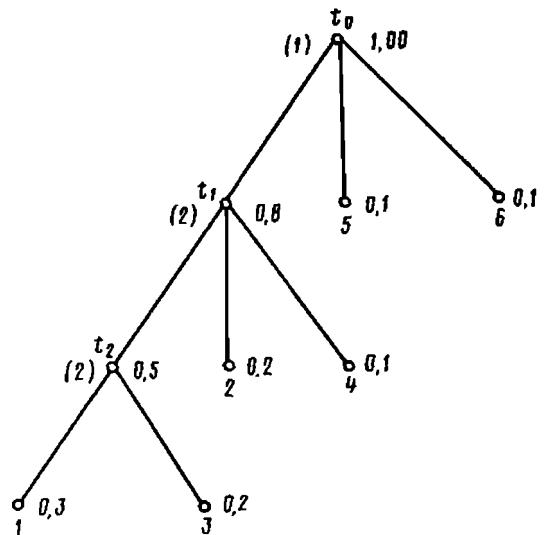


Рис. 9. Оптимальный реализуемый вопросник к примеру 5

раничению. В табл. 7 приведены характеристики реализуемых подвопросников G_{x_0} для каждого из шагов этапов 1, 2 и 3.

Анализ таблицы показывает, что подвопросник G_{x_0} шага 3 этапа 2 не удовлетворяет заданному ограничению ($C = 4,1 > C_{доп}$). Минимальную цену обхода, равную двум, имеет подвопросник шага 2 этапа 1; однако порождаемое им разбиение множества E

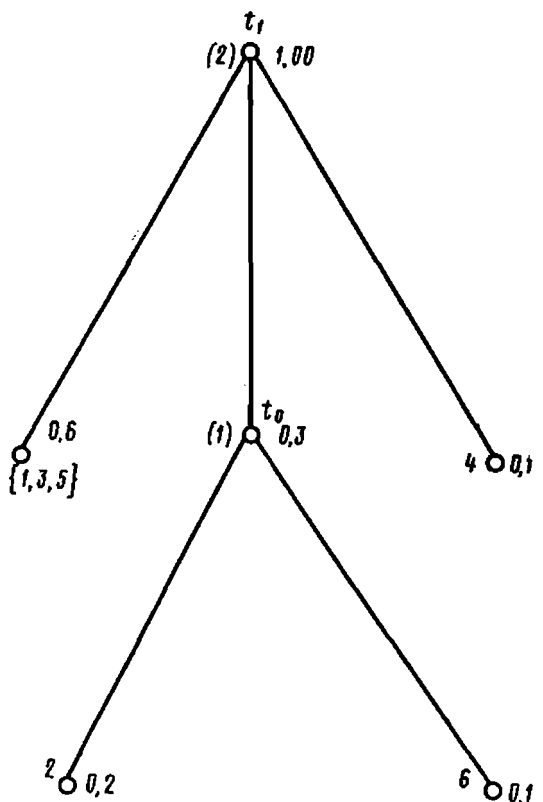


Рис. 10. Пример оптимального реализуемого вопросника при неполной идентификации событий

7. Поэтапные характеристики реализуемых подвопросников G_{x_0}

Этап	Шаг	G_{x_0}	C	Классы множества E
1	2	t_1	2,0	(1, 3, 5), (2, 6), (4)
2	1	$t_2 t_0$	2,7	(1, 2), (3), (4), (5), (6)
	2	$t_2 t_1$	3,4	(1,5), (2,6), (3), (4)
3	3	$t_2 t_3$	4,1	(1, 2, 5), (3), (4), (6)
	1	$t_0 t_1$	2,6	(1,3), (2), (4), (5), (6)
3	2	$t_0 t_2$	2,6	(1,2), (3), (4), (5), (6)

событий существенно хуже по глубине идентификации, чем у других подвопросников. Можно выбрать один из подвопросников этапа 3, у которых цена обхода равна 2,6 и наилучшее разбиение множества E на классы.

Наиболее известными методами построения оптимизированных условных алгоритмов диагностирования при равных ценах элементарных проверок и неодинаковых вероятностях технических состояний являются метод Шеннона-Фано и метод деления поровну. Оба эти метода заимствованы из теории связи, в которой их применяют

для построения кодов переменной длины.

При использовании метода Шеннона-Фано N событий располагают в порядке, например, невозрастания их вероятностей (весов), после чего множество событий делят (без нарушения указанного порядка) на a классов, затем последние — на a подклассов, и так далее до тех пор, пока это можно выполнять с соблюдением условия, при котором суммарные вероятности классов (подклассов) как можно более близки между собой.

Пример 7. Дихотомичный вопросник, построенный по методу Шеннона-Фано для множества E из 10 событий y_1, y_2, \dots, y_{10} с вероятностями $p_1 = 0,24, p_2 = p_3 = p_4 = 0,12, p_5 = 0,10, p_6 = p_7 = 0,8, p_8 = 0,07, p_9 = 0,06, p_{10} = 0,01$, приведен на рис. 11. Первый вопрос x_0 является разбиением множества E на классы $\{y_1, y_2, y_3\}$ и $\{y_4, y_5, \dots, y_{10}\}$ с суммарными вероятностями соответственно 0,48 и 0,52. С помощью вопроса x_1 класс $\{y_1, y_2, y_3\}$ разбивают на подклассы $\{y_1\}$ и $\{y_2, y_3\}$, имеющие одинаковые вероятности 0,24 и т. д. Длина обхода вопросника равна 3,15.

Вопросник на рис. 11 не является оптимальным — перестановка подвопросников с корнями y_6 и y_7 приведет к уменьшению длины обхода. Причина отклонения от оптимальности — неупорядоченность расположения вершин вопросника одного и того же ранга.

В основе метода деления поровну лежит применение функций предпочтения энтропийного вида. Отличие этого метода от метода Шеннона-Фано состоит в том, что при разбиениях множества (классов) событий не требуется соблюдать упорядоченное по весам расположение событий.

Пример 8. Построить методом деления поровну вопросник для тех же данных, что и в примере 7.

Построенный вопросник приведен на рис. 12. Первый вопрос x_0 является разбиением множества E на классы $\{y_1, y_5, y_6, y_8, y_{10}\}$ и $\{y_2, y_3, y_4, y_7, y_9\}$, суммарные вероятности которых равны 0,50. Вопрос x_1 разбивает первый из указанных классов

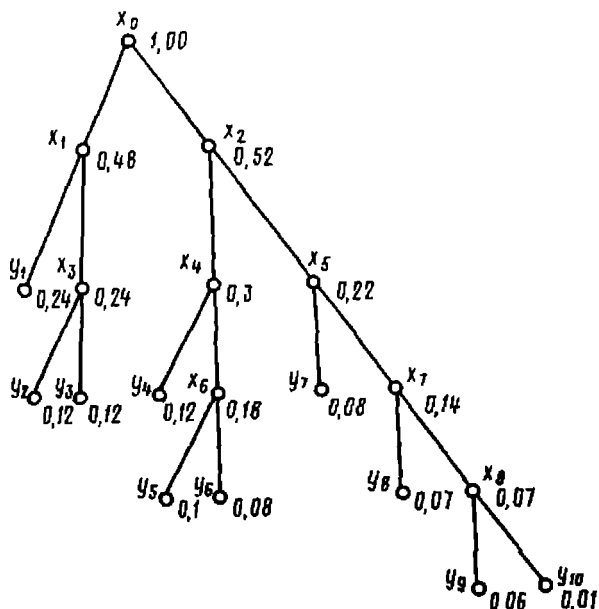


Рис. 11. Вопросник к примеру 8

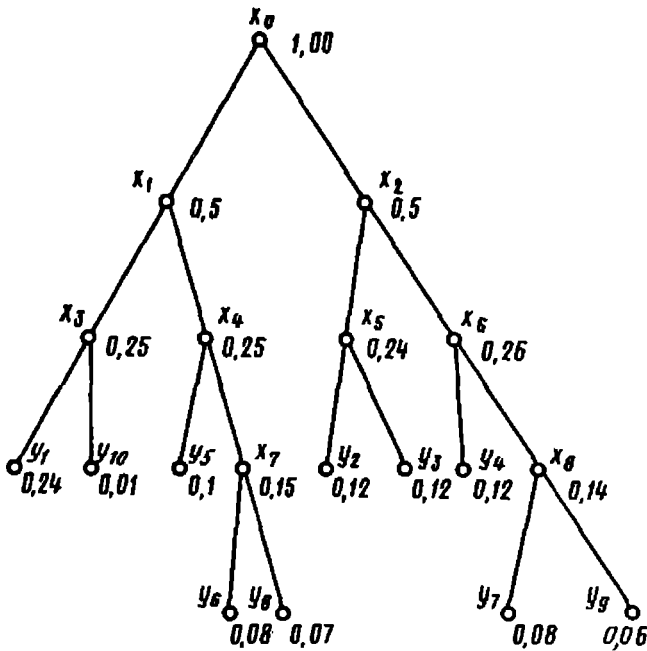


Рис. 12. Вопросник к примеру 9

на подклассы $\{y_1, y_{10}\}$ и $\{y_5, y_6, y_8\}$ с одинаковыми вероятностями 0,25 и т. д. Длина обхода вопросника равна 3,29.

В этом вопроснике на ранге три не соблюдается свойство упорядочения вершин оптимального вопросника. Следовательно, метод деления поровну также не дает оптимальных вопросников. Оптимальный вопросник для примеров 8 и 9 приведен на рис. 13. Длина его обхода равна 3,13.

Очевидно при наличии ограничений на множество допустимых вопросов построенные по методу Шеннона—Фано или методу деления поровну реализуемые вопросники могут оказаться оптимальными только случайно. Тем более нельзя гарантировать получение с помощью указанных

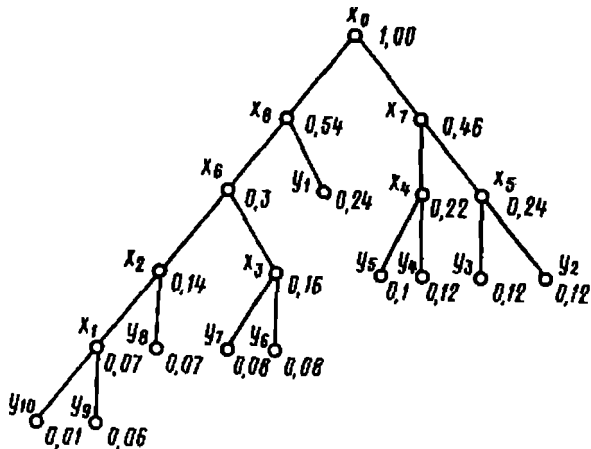


Рис. 13. Оптимальный вопросник к примерам 8 и 9

методов реализуемых оптимальных вопросников при неравных ценах вопросов.

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Необходимость прогнозирования состояния объектов объясняется тем, что технические изделия в процессе хранения и функционирования испытывают воздействие множества разнообразных внешних и внутренних факторов. Это приводит к изменению состояния изделий и в конечном счете к отказу не только изделия, но и системы, включающей в себя эти изделия как составные части. Цена отказа технических объектов может быть высокой, поэтому мероприятия, связанные с предотвращением отказов на основе прогнозирования технического состояния, имеют большое значение.

Решение задач прогнозирования состояния технических объектов важно как для создателей объектов, так и для специалистов, эксплуатирующих их, так как прогнозирование способствует созданию долговечных технических объектов. Этого достигают путем применения прогнозирования на стадии проектирования при введении норм срока службы и прогнозированием при входном и регулярном контроле в процессе эксплуатации. Прогнозирование позволяет также перейти к новому, более рациональному и прогрессивному принципу эксплуатации — эксплуатации объектов по техническому состоянию (в отличие от эксплуатации по ресурсу) путем периодической оценки сроков службы объектов в процессе эксплуатации. С помощью прогнозирования на требуемый интервал времени вперед можно ускоренно оценить работоспособность и сроки службы технических объектов и сократить период разработки изделий за счет сокращения методами прогнозирования сроков продолжительных производственных испытаний.

Задача прогнозирования состояния работоспособности в общем случае заключается в следующем: по результатам диагностирования объекта в предшествующие моменты времени необходимо оценить его работо-

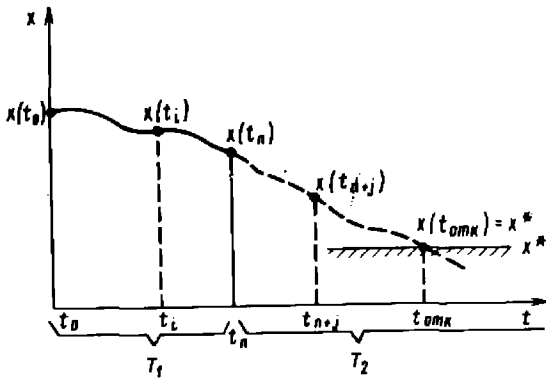


Рис. 14. К постановке задачи определения алгоритма экстраполяции

способность в последующие периоды функционирования. Можно выделить два основных вида алгоритмов прогнозирования, отражающих два различных подхода к процедурам получения прогноза: алгоритмы экстраполяции и алгоритмы статистической классификации.

При использовании алгоритмов экстраполяции (АЭ) задача формулируется следующим образом. Пусть процесс, характеризующий состояние объекта, представлен в виде многомерной функции $Q(\vec{X}, t)$, где $\vec{X}(t) = \{x_1(t), \dots, x_s(t), \dots, x_k(t)\}$, которая наблюдается (дискретно или непрерывно) в период времени $[t_0 - t_n]$ в области T_1 , вследствие чего известны значения этой функции $\vec{X}(t_0), \vec{X}(t), \vec{X}(t_i), \dots, \vec{X}(t_n)$ соответственно в моменты времени $(t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_n) \in T_1$. Необходимо с помощью модели прогнозирования $W(\vec{X}, t)$ по известным значениям $\vec{X}(t_i)$ определить значения функции $\vec{X}(t_{n+1}), \dots, \vec{X}(t_{n+j}), \vec{X}(t_{n+m})$ в моменты времени $(t_{n+1},$

$t_{n+j}, \dots, t_{n+m}) \in T_2$, где T_2 — область моментов времени в будущем. Задача в операторном виде, записываемая как $\vec{X}(t_{n+j}) = W(\vec{X}, t) \vec{X}(t_i); i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$, может решаться как для вектора $\vec{X}(t)$, так и для каждой его координаты $x_s(t)$ (рис. 14); кроме того, в качестве результата прогнозирования прогноза могут быть получены статистические (вероятностные) характеристики $\vec{X}(t_{n+j})$, например, среднее время и вероятность выхода за допустимые пределы \vec{X}^*

Задача, решаемая с помощью алгоритмов статистической классификации (АСК), формулируется следующим образом. Пусть в момент t_0 или в ограниченный начальный период времени получены значения параметров контролируемого объекта $x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_k$ — координаты функции $\vec{X}(t_0)$. Необходимо, используя модель прогнозирования $W(\vec{X}, t)$, по совокупности параметров $\{x_s\}$, $s = \overline{1, K}$ и координат вектора $\vec{X}(t_0)$, принять решение о принадлежности объекта к тому или иному классу R^λ , $\lambda = \overline{1, \mu}$, где R^λ могут быть параметрическими (по состоянию работоспособности): $R_x^1 = x^0 \div x^1, R_x^2 = x^1 \div x^2, \dots$ или временными (по безотказности): $R_T^1 = 0 \div T, R_T^2 = T \div 2T, \dots$ (рис. 15). Здесь $[x^0 \div x^1], [x^1 \div x^2],$ и $[0 \div T], [T \div 2T]$ — установленные интервалы в области работоспособности (в поле допуска) и на временной оси.

Несмотря на принципиальное отличие решения задачи прогнозирования с помощью АЭ и АСК, эти алгоритмы имеют общую процедурную модель процесса прогнозирования (рис. 16), которая содержит три наиболее общих этапа: ретроспектирование, диагностирование и прогнозирование. Содержание этапов состоит в анализе прошлого, определении настоящего и оценке будущего. Содержание этапов в виде совокупности приемов и методов может существенно отличаться в зависимости от области исследования, а также от контролируе-

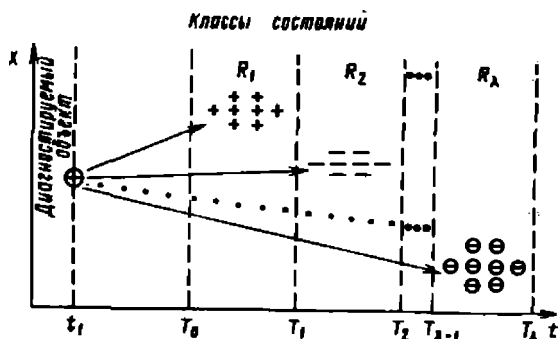


Рис. 16. К постановке задачи определения алгоритма статистической классификации



Рис. 16. Процедурная модель процесса прогнозирования

мых объектов и процессов, сопровождающих их эволюцию.

Назначение каждого этапа модели очевидно из их названия.

Постановка задачи играет большую роль при решении любой задачи, однако в данном случае этот этап особенно важен, так как определяет весь ход решения задачи прогнозирования, выбор алгоритма и конкретного метода, а также получаемый результат.

Анализ объекта прогнозирования предполагает изучение объекта с различных сторон: физической, структурной, функциональной, информационной, диагностической и т. п. Поскольку интерес вызывает изменение технического состояния объекта, то необходимо изучить процессы, характеризующие эти изменения. Процессы исследуют как с физической (фундаментальной), так и статистической (при-

8. Факторы, влияющие на решение задачи прогнозирования

Фактор	Вид фактора	Подвид фактора
Объект	Стадия жизненного цикла Использование Вид контроля Назначение	Проектирование, изготовление, эксплуатация Однократное, многократное Однократный, периодический, непрерывный Автономное использование, производственные процессы, научные исследования
Процесс	Характер протекания Оценивание Характер нестационарности Вид процесса	Монотонный, флюктуационный Одномерное, многомерное Линейный, нелинейный Гауссовский, вейбулловский,
Информация (И)	Объем текущей И Характер поступления Наличие априорной И Вид И	Достаточный, ограниченный Непрерывный, периодический, однократный Имеется, отсутствует Обработанная, необработанная
Модель	Зависимость от коэффициентов Знание закона распределения временных классов Вид модели	Линейная, нелинейная Известен, неизвестен Регрессионная, интерполяционная, ...
Прогноз	Вид Срок Способ	Экстраполяция, статистическая классификация Краткосрочный, долгосрочный Обратный, прямой

кладной) стороны, после чего выбирают показатели (характеристики или параметры), являющиеся наиболее информативными для описания процесса изменения технического состояния объекта. С этой целью используют методы и алгоритмы, позволяющие оценить характер и степень нестационарности процессов изменения состояния объектов.

Сбор априорной информации об изменении работоспособности объекта необходим для решения многих вопросов на стадии обучения модели прогнозирования. Априорная информация может быть получена путем машинного моделирования процессов деградации и старения объектов на ос-

нове знания их физического механизма, по результатам производственных испытаний и по данным эксплуатации этих объектов.

Формализация и анализ априорной информации об изменении состояния объекта требуются для формализованного представления информации (нормирования, обобщения и т. д.). Для этого необходимы методы обработки информации, позволяющие максимально точно оценить работоспособность объекта. *Выбор методов* и разработка алгоритмов прогнозирования зависят от множества факторов, которые сведены в табл. 8. Каждый из приведенных факторов и его варианты по-разному влияют на выбор

метода АЭ или АСК. Однако в полной мере оценить степень влияния факторов можно только после ознакомления непосредственно с методами прогнозирования и накопления определенного опыта.

Обучение моделей прогнозирования по априорной информации требует проверки работы алгоритма по известным процессам изменения состояния объектов. Это позволяет проверить — действительно ли выбранный метод наилучший, и осуществить корректировку вычислительного алгоритма.

Планирование процедуры прогнозирования заключается в выборе плана проведения диагностирования (выборе временных интервалов, числа измерений и т. д.).

К этапу диагностирования в рамках рассматриваемой процедуры не предъявляется каких-либо особых требований. Как и в любой задаче технического диагностирования, здесь необходимо иметь методику диагностирования, средства диагностирования, которые позволяют оценить состояние объекта с необходимой точностью.

Построение выбранной модели и непосредственно прогнозирование по текущим данным осуществляют по алгоритмам, проверенным на стадии обучения по априорным данным. Задача прогнозирования требует *оценки точности* получаемых результатов и *эффективности* прогнозирования.

Математические модели процессов изменения состояния объектов. Любой процесс, протекающий во времени, можно количественно представить в виде временного ряда. Однако на этом сходство между различного рода процессами может окончиться. Интересующие нас временные процессы — это прежде всего случайные процессы, содержащие, как правило, несколько составляющих. Поведение этих составляющих в отдельных временных сечениях (законы распределения), с течением времени (стационарность или нестационарность), их многомерность и тому подобное принципиально влияют на формальное описание процесса.

Процессы изменения технического состояния объектов представляют собой процессы старения и деградации,

приводящие к отказу изделия. Выделим причины, вызывающие отказы и определяющие механизм изменения технического состояния объектов: конструктивные (несовершенство конструкций изделий); технологические (нарушение принятой технологии или ввиду ее неоптимальности); эксплуатационные (нарушение правил эксплуатации); старение и износ, приводящие к тому, что даже изделия высокого качества (с хорошими конструкцией и технологией, правильной эксплуатацией) отказывают с течением времени.

Все эти причины по-разному влияют на характер деградации изделий. По характеру протекания процессы деградации можно разбить на две группы. К первой группе относят процессы, вызывающие внезапное (катастрофическое) изменение технического состояния вследствие резкого изменения условий протекания физических процессов в изделии, приводящего к скачкообразному изменению характеристик объектов; ко второй — процессы, приводящие к постепенному изменению состояния; в этом случае деградационные изменения в материалах с течением времени накапливаются и приводят к дрейфу параметров и потере работоспособности.

В общем случае процесс изменения состояния объекта можно представить в виде

$$\vec{X}(t) = \vec{\xi}(t) + \vec{\eta}(t) + \vec{\zeta}(t), \quad (6)$$

где составляющая $\vec{\xi}(t)$ характеризует в объекте необратимые изменения; $\vec{\eta}(t)$ — обратимые изменения; $\vec{\zeta}(t)$ — погрешность измерительных цепей.

Составляющая $\vec{\xi}(t)$ определяет «тренд» или закономерность изменения процесса, в большей степени детерминированную его часть, а $\vec{\eta}(t)$ и $\vec{\zeta}(t)$ характеризуют стохастическую часть процесса. Составляющие $\vec{\xi}(t)$ и $\vec{\eta}(t)$ в некоторых процессах могут иметь «сезонные» колебания. Для простоты описания $\vec{\eta}(t)$ и $\vec{\zeta}(t)$ можно объединить и процесс (6) записать в виде

$$\vec{X}(t) = \vec{\xi}(t) + \vec{\eta}(t). \quad (7)$$

Таким образом, *деградационным процессом* (ДП) называют функцию $\vec{X} = \vec{X}(t)$ от действительного переменного $t \in T$, значения которой при каждом t являются случайными величинами с детерминированной составляющей (T — область задания процесса).

Процессом постепенного изменения технического состояния объекта будем считать процесс, для которого выполняется соотношение

$$\begin{aligned} \|\xi(t + \Delta t) - \xi(t)\| &\gg \\ &\gg \|\eta(t + \Delta t) - \eta(t)\|, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\|\cdot\|$ — норма вектора; $\Delta t > 0$.

Действительно, чем сильнее неравенство (8), тем ближе процесс $\vec{X}(t)$ к детерминированному, характеризующему постоянные отказы.

При

$$M[\eta(t)] = 0 \quad (9)$$

(где M — оператор математического ожидания) оказывается, что (8) эквивалентно соотношению

$$\begin{aligned} \|X(t + \Delta t) - X(t)\| &\gg \\ &\gg \sqrt{D[X(t + \Delta t)]D[X(t)]} \gg \\ &\gg \text{cov}[X(t + \Delta t)X(t)], \end{aligned} \quad (10)$$

которое является следствием неравенства Коши—Буняковского (здесь D — оператор дисперсии, cov — оператор ковариационного момента).

Деградационные процессы могут быть самыми разнообразными и прежде всего детерминированными и стохастическими (рис. 17).

Детерминированными считают процессы, для которых выполняется условие (9) для (7) и облегчается получение прогноза с высокой точностью. *Стохастические* процессы классифицируются по области определения функций (вещественные, комплексные); по характеру изменения времени (дискретные, непрерывные); по виду приращений [стационарные, ортогональные (независимые), марковские]; по уровню дисперсии (монотонные, флуктуационные, многоэкстремальные); по законам распределения в сечениях функций (гауссовские, вейбулловские и др.) и т. д.

Наиболее характерными моделями для описания детерминированных процессов (ДП) являются следующие.

1. В случае *индивидуальной реализации ДП* используют общую математическую модель

$$X(t) = W[\vec{\beta}(x), t] + \varepsilon(t), \quad (11)$$

где $W[\vec{\beta}(x), t]$ — модель необратимой составляющей, известная с точностью до коэффициентов $\vec{\beta}^* = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_\mu]$; $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ — случайная составляющая, причем $\varepsilon_1(t)$ — ошибка, связанная с колебаниями обратимой составляющей; $\varepsilon_2(t)$ — ошибка, связанная с точностью измерительных цепей; «*» — знак транспонирования.

Статистический анализ ДП существенно зависит от вида $W[\vec{\beta}(x), t]$ и от поведения случайной последовательности $\varepsilon(t)$. При этом выделяют два варианта поведения $\varepsilon(t)$: $\varepsilon(t)$ представляет собой результат независимых случайных отклонений от функции тренда $W(t)$; $\varepsilon(t)$ является последовательностью зависимых случайных величин. Функцию $\varepsilon_2(t)$ можно считать некоррелированной даже за небольшие промежутки времени. Корреляционная функция $\varepsilon_1(t)$ определяется причинами, ее порождающими, т. е. механизмом деградации, и, как правило, период корреляции значительно меньше интервалов контроля и прогнозирования. Выбор вида $W[\vec{\beta}(x), t]$ является наиболее ответственной задачей и зависит от физического анализа механизмов деградации; информации, полученной по предварительным испытаниям, и результатов подгонки экспериментальных данных рядом подходящих функций. В общем случае необходимо использовать всю возможную априорную информацию, комплексно сочетая перечисленные моменты.

2. Если ДП представлен *группой одномерных реализаций*, то для его описания пригодна модель вида

$$X(t) = W[\vec{\beta}(x), t] + V[\vec{\alpha}(\varepsilon), t], \quad (12)$$

где $V[\vec{\alpha}(\varepsilon), t]$ — модель обратимой составляющей, известная с точностью

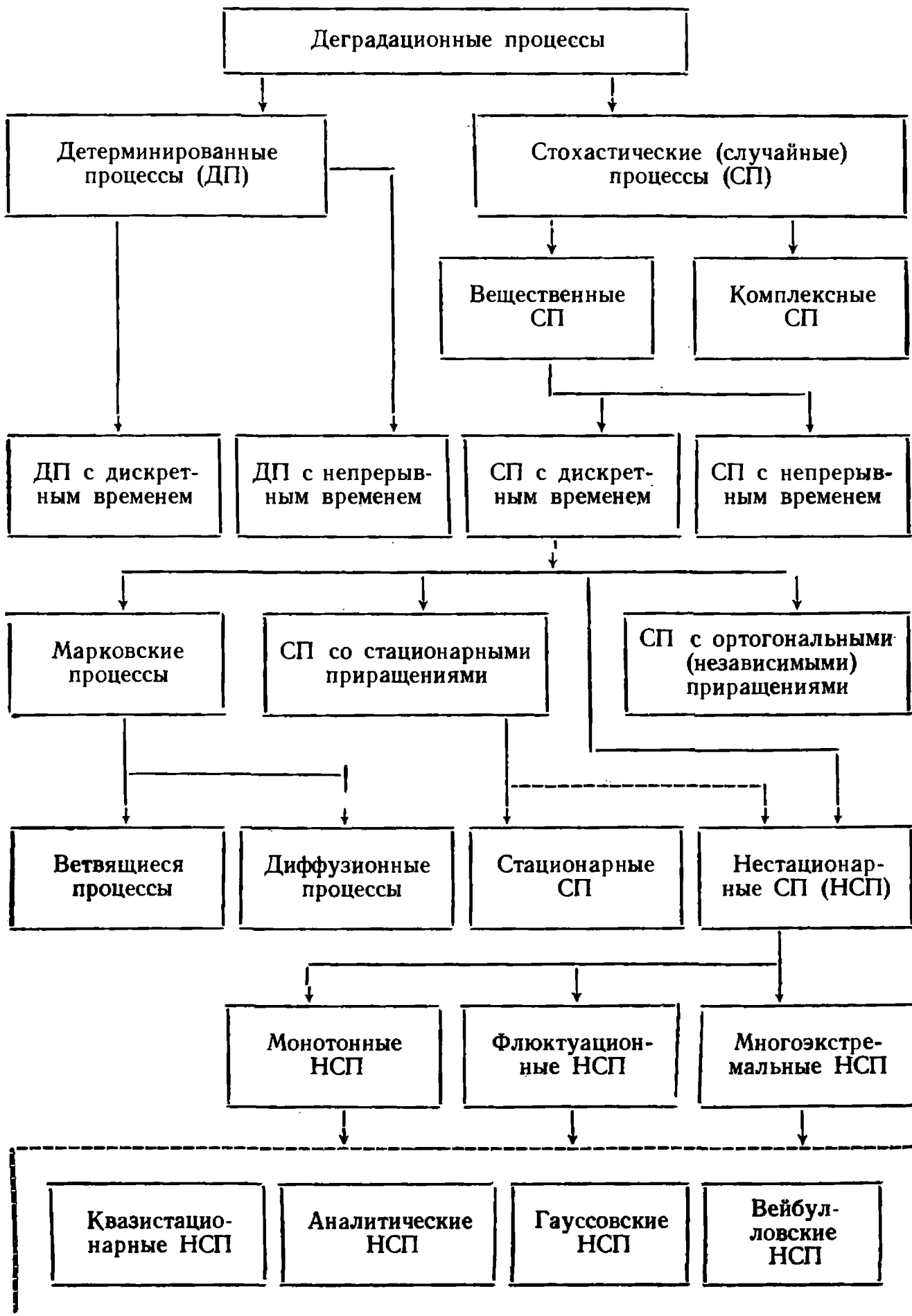


Рис. 17. Классификация деграционных процессов

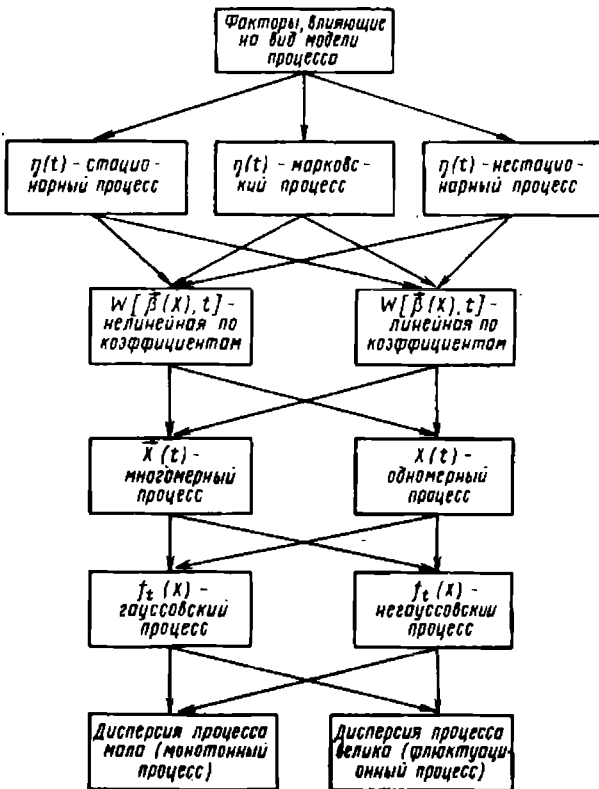


Рис. 18. Классификация факторов, влияющих на вид модели процесса

до коэффициентов $\vec{\alpha}^* = [\alpha_0, \alpha_1, \alpha_v]$.

Выражение (12) является более общей моделью одномерных групповых процессов изменения состояния объектов, и ее анализ зависит не только от вида $W(t)$, но и от вида $V(t)$.

Оба типа моделей могут быть распространены и на многомерный случай, как на более общий по сравнению с одномерным. Тогда индивидуальный многомерный ДП представляется моделью

$$\vec{X}(t) = \vec{W}[\vec{\beta}(x), t] + \vec{E}, \quad (13)$$

где $\vec{X}^* = \|x_1, \dots, x_k\|$ — вектор показателей контролируемого процесса; $\vec{W}^*[\vec{\beta}(x), t] = \|W_1(\vec{\beta}^{(1)} t), W_k(\vec{\beta}^{(k)} t)\|$ — вектор функций времени t и коэффициентов $\vec{\beta}$; $\vec{E}^* = \|e_1, \dots, e_k\|$ — вектор ошибок, возникающих из-за существования случайной составляющей.

В случае многомерных групповых

ДП математическая модель принимает вид

$$\vec{X}(t) = \vec{W}[\vec{\beta}(x), t] + \vec{V}[\vec{\alpha}(\epsilon), t], \quad (14)$$

где $\vec{V}^*[\vec{\alpha}(\epsilon), t] = \|V_1(\vec{\alpha}^{(1)}, t), V_k(\vec{\alpha}^{(k)}, t)\|$ — вектор функций времени t и коэффициентов $\vec{\alpha}$.

Модель (14) является наиболее общей моделью ДП, из которой получают все перечисленные модели как частные случаи. В совокупности эти модели охватывают все возможные варианты встречающихся структур ДП.

В общем случае на конкретный вид математических моделей ДП влияют следующие факторы: характер изменения $\eta(t)$, который может быть стационарным, нестационарным и марковским случайным процессом, что влияет на вид $\vec{V}[\vec{\alpha}(\epsilon), t]$; характер изменения $\xi(t)$, определяющий вид модели $\vec{W}[\vec{\beta}(x), t]$ — линейная она или нелинейная по коэффициентам $\vec{\beta}$; мерность процесса $\vec{X}(t)$, т. е. имеет место одномерный или многомерный ДП; закон распределения значений показателей процесса в каждом временном сочетании $f_t(x)$ — гауссовский или негауссовский, что также влияет на вид $\vec{V}[\vec{\alpha}(\epsilon), t]$; величина дисперсии ДП $D[X(t)]$, влияющая на вид как $\vec{W}[\vec{\beta}(\epsilon), t]$, так и $\vec{V}[\vec{\alpha}(\epsilon), t]$.

На рис. 18 приведена классификация факторов, влияющих на вид модели, а в табл. 9 перечислены 16 моделей, возможных в случае, когда $\eta(t)$ — стационарный случайный процесс. Такое же число моделей существует и тогда, когда $\eta(t)$ — марковский или нестационарный процесс. Очевидно, что для прогнозирования такого множества вариантов процессов необходима совокупность методов, основанная на различном математическом аппарате.

Математический аппарат и основные алгоритмы прогнозирования. Ранее было выделено два основных подхода к процедуре прогнозирования: экстра-

9. 16 моделей для случая, когда $\eta(t)$ — стационарный случайный процесс

Номер модели	Характер изменения $\xi(t)$	Мерность процесса $X(t)$	Закон распределения $f_t(X)$	Процесс в зависимости от дисперсии $D[X(t)]$
1	Линейный	Многомерный	Гауссовский	Монотонный
2				Флюктуационный
3			Негауссовский	Монотонный
4				Флюктуационный
5		Одномерный	Гауссовский	Монотонный
6				Флюктуационный
7			Негауссовский	Монотонный
8				Флюктуационный
9	Нелинейный	Многомерный	Гауссовский	Монотонный
10				Флюктуационный
11			Негауссовский	Монотонный
12				Флюктуационный
13		Одномерный	Гауссовский	Монотонный
14				Флюктуационный
15			Негауссовский	Монотонный
16				Флюктуационный

поляция и статистической классификация.

Экстраполяция ДП. С помощью математического аппарата и методов экстраполяции решают задачу прогнозирования в случае вариантов моделей (11)—(14). Существующие подходы к построению моделей прогнозирования удобно иллюстрировать на одномерном ДП. Первый подход называют *интерполяционным*. В нем использован принцип построения интерполяционных поли-

номов для вычисления модели экстраполяции (прогнозирования). В этом случае реализация ДП $x(t)$ аппроксимируется полиномом степени μ , причем число значений процесса n , полученных в результате контроля в области $[t_0 \div t_n]$, должно быть $n \geq \mu$. Коэффициенты модели определяют из системы уравнений

$$x(t_i) = W[\vec{\beta}(x), t_i], \quad i = \overline{1, \mu}; \quad \mu \leq n, \quad (15)$$

где t_i — моменты контроля ДП.

Основным достоинством такого подхода является простота его реализации и возможность построения модели при малом n . Однако его целесообразно применять при достаточно точных значениях $x(t_i)$, т. е. при малой дисперсии ДП (реализации гладкие и монотонные). При больших дисперсиях необходимо осуществлять преобразования информации в виде операции сглаживания или использовать другой способ построения модели. Кроме того, обычно принимают степень полинома экстраполяции $\mu \leq 3$.

Другой подход применяют в том случае, когда дисперсия ДП или ошибки $\varepsilon(t)$ существенно влияют на характер временного ряда $X(t_i)$, а при построении модели прибегают к минимизации суммы квадратов отклонений:

$$\sum_{i=1}^n \{x(t_i) - W[\vec{\beta}(x), t_i]\}^2 = \min. \quad (16)$$

Исходя из этого условия, можно построить различные модели, но наибольшее распространение данный подход получил как *метод наименьших квадратов* для построения регрессионных моделей. В этом методе в качестве модели, как правило, также используют полином, однако μ заведомо меньше n и при информации во всех точках наблюдения t_i .

В третьем подходе могут быть применены отдельные моменты первых двух подходов. Однако с помощью третьего подхода дифференцированно оценивают значения временного ряда $x(t_i)$, входящие в модель или используемые для ее построения. Подход основан на предположении, что информация, полученная в начальные моменты времени, «стареет» и ей можно давать меньшие «веса», чем информации в последних точках наблюдений. Это используют в методе экспоненциального сглаживания. Кроме того, в моделях Бокса—Дженкинса также осуществляется взвешивание и сглаживание данных контроля.

Таким образом, в качестве математического аппарата экстраполяции используют теорию интерполяции, метод наименьших квадратов, регрессионный анализ, теорию сглаживания, теорию аппроксимации и тому подоб-

ные методы, теории и соответственно модели, встречающиеся там.

Примерный алгоритм построения модели прогнозирования:

1. Составляют план проведения диагностирования состояния объекта в области T_1 и устанавливают моменты $t_i \in T_1, i = \overline{1, n}$.

2. Полученную информацию о процессе $x(t_i)$ обрабатывают и анализируют, в результате чего в соответствии с рассмотренными ранее рекомендациями выбирают модель прогнозирования, наиболее близко соответствующую модели ДП. Модель может быть выбрана и заранее при наличии априорной информации о ДП. Пусть математическая модель прогнозирования $W[\vec{\beta}(x), t]$ линейна по коэффициентам регрессии $\vec{\beta}(x)$ и имеет вид

$$W[\vec{\beta}(x), t] = \sum_{\rho=0}^{\mu} \beta_{\rho}(x) \varphi_{\rho}(t), \quad (17)$$

где $\varphi_{\rho}(t)$ — любая система временных функций, например,

$$\vec{\varphi}_{\rho}^*(t) = \|1, t, t^2, \dots, t^{\mu}\|.$$

3. Обозначают для простоты записи $\varphi_{\rho}(t)$ через τ_{ρ} ; тогда МНК-оценки $\vec{B}^* = \|b_0, b_1, \dots, b_{\mu}\|$ коэффициентов регрессии $\vec{\beta}(x)$ определяется как

$$\vec{\beta} = \|\vec{\tau}^* \vec{c} \vec{\tau}\|^{-1} (\vec{\tau}^* \vec{c} x), \quad (18)$$

где

$$\|\vec{\tau}\| = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & \tau_{11} & \tau_{\mu 1} \\ 1 & \tau_{12} & \tau_{\mu 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \tau_{1n} & \tau_{\mu n} \end{array} \right\|$$

— матрица независимых переменных; n — число измерений параметра X в области $[t_0 \div t_n]$;

$$\|\vec{C}\| = \left\| \begin{array}{ccc} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & c_n \end{array} \right\|$$

— матрица весов размером $n \times n$; $\vec{X}^* = \|x_1, x_2, \dots, x_n\|$ — вектор состояния ДП в момент контроля.

Элементы матрицы весов определяют с помощью выражения

$$c_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2},$$

где σ_i^2 — дисперсия ошибки в произвольный момент времени, обычно $\sigma_0^2 = \min_i \sigma_i^2$; σ_i^2 — дисперсия ошибки $\varepsilon(t)$ при $t = t_i$. При равноточных измерениях σ_i^2 — постоянная величина и \vec{C} — единичная диагональная матрица.

4. Осуществляют прогнозирование на требуемый момент времени $t_{n+j} = T_{\Pi} = \tau_{\Pi}$, так как модель построена по полученным экспериментальным данным.

5. Определяют дисперсию предсказания:

$$\sigma_{\Pi}^2 = \sigma_{\varepsilon}^2(T_{\Pi}) + \sigma_{\text{ср}}^2 \vec{\tau}_{\Pi} \cdot \vec{\tau}_{\Pi} \cdot \vec{C}^{-1} \vec{\tau}_{\Pi}, \quad (19)$$

где $\sigma_{\varepsilon}^2(T_{\Pi})$ — дисперсия ошибки $\varepsilon(t)$ при $t = T_{\Pi}$; $\sigma_{\text{ср}}^2$ — средняя дисперсия экспериментальных данных.

При адекватной модели в качестве $\sigma_{\text{ср}}^2$ можно использовать ее оценку в виде остаточной дисперсии:

$$\sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n - \mu - 1} \sum_{i=1}^n c_i [X(t_i) - \hat{X}(t_i)]^2, \quad (20)$$

где $\hat{X}(t_i)$ — оценка показателя ДП $X(t)$ в момент $t = t_i$ с помощью модели прогнозирования.

Доверительные интервалы для математического ожидания $M[\hat{X}(T_{\Pi})]$ при оценке \hat{X} на момент времени T_{Π} определяются как

$$M[\hat{X}(T_{\Pi})] = \hat{X}(T_{\Pi}) \pm \theta_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_{\Pi}^2, \quad (21)$$

где $\theta_{1-\frac{\alpha}{2}}$ — $(1 - \alpha)$ %-ная квантиль распределения Стьюдента при уровне значимости α и числе степеней свободы $f = n - \mu - 1$.

Следует отметить, что выбранную модель целесообразно проверить на

обучающей априори известной информации, т. е. на реализациях ДП, известных до моментов $t_{n+j} = T_{\Pi}$, $j = \overline{1, m}$. При этом вопросы выбора наиболее информативных параметров для целей прогнозирования решаются именно на обучающих реализациях, если это по другим соображениям не удалось сделать раньше.

Достоинством методов экстраполяции является получение точечной оценки показателя ДП на момент прогнозирования с той или иной точностью.

Статистическая классификация ДП — классификация технических объектов, изменение состояния которых выражается этими ДП. Отличительная особенность методов статистической классификации (МСК) состоит в том, что при использовании этих методов необходимо обязательно иметь обучающую выборку (партию) объектов и ДП до тех моментов T_{Π} , до которых выполняют прогнозирование. При выполнении этого условия с помощью МСК можно решить задачу прогнозирования для всех четырех видов ДП. При осуществлении МСК можно выделить два подхода. Первый из них определяется как *распознавание образов* и заключается в следующем. По обучающей информации формируют и описывают аналитически два или несколько классов ДП, объединяющих объекты с одинаковыми показателями долговечности (временные классы) или работоспособности на заданный момент T_{Π} (классы по состоянию). Вектор показателей ДП $\vec{X} = (x_1, \dots, x_k)$ рассматривается как «образ» объекта. Определение «близости» объекта к какому-либо классу и отнесение его к этому классу — основная задача данного подхода к прогнозированию. Описание классов и оценка близости объекта к этим классам могут быть самыми разнообразными.

Второй подход состоит в *дискриминантном анализе*, т. е. в нахождении функции, разделяющей выделенные классы. В данном случае строят математическую модель поверхности, которая наилучшим образом разделяет (разграничивает) в многомерном про-

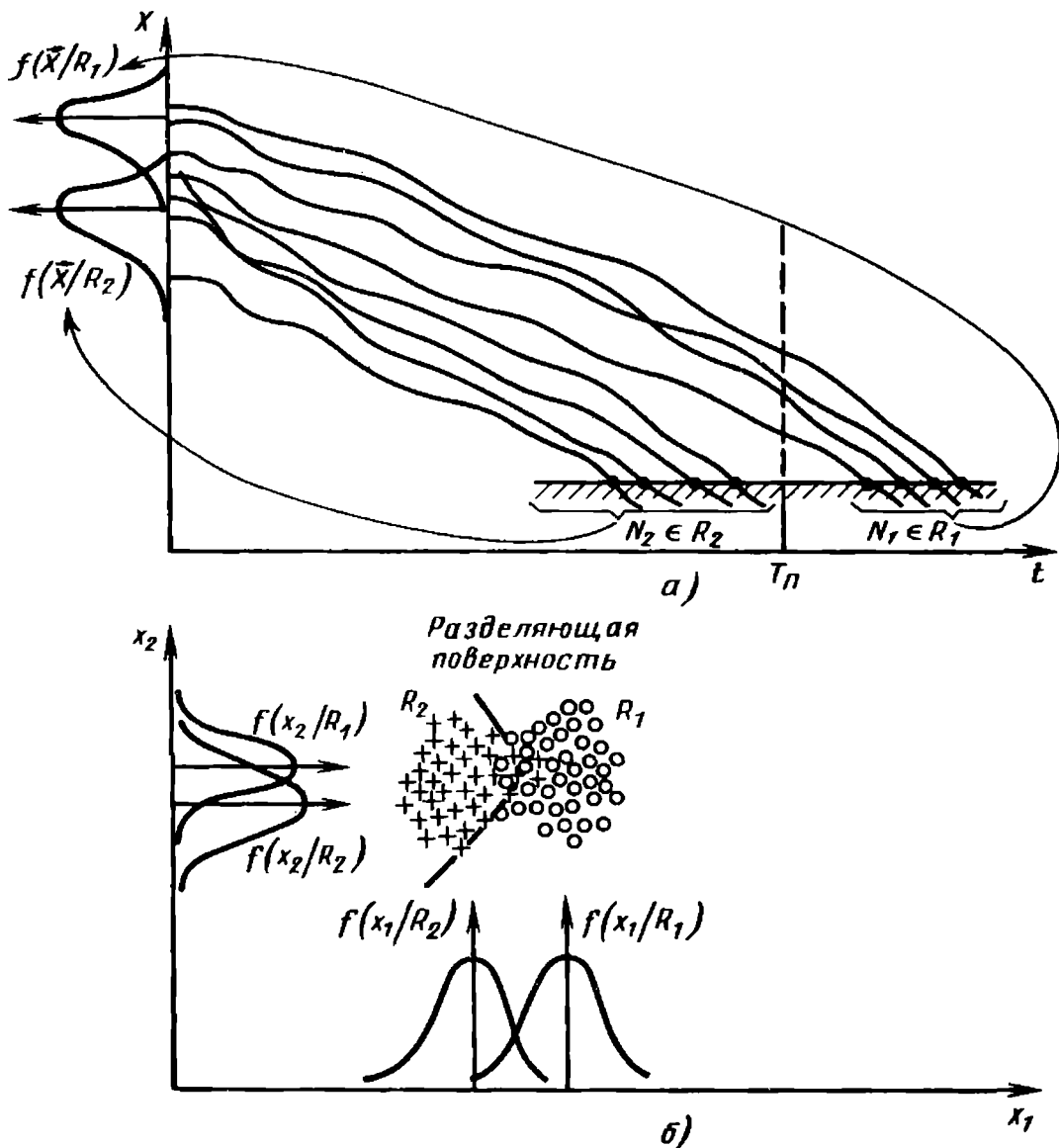


Рис. 19. Формирование классов при статистической классификации:

a — механизм образования классов (плотности распределения) по долговечности объектов; *б* — построение плотностей распределения и дискриминантной поверхности в пространстве параметров

странстве классы. Построение разделяющей поверхности, т. е. модели, осуществляют по обучающей информации. Координаты вектора показателей состояния объекта \vec{X} подставляют в модель и определяют, по какую сторону разделяющей поверхности находится объект, т. е. к какому классу он принадлежит.

Примерный алгоритм статистической классификации рассмотрим применительно к первому подходу, определенному как распознавание образов для одномерного случая ДП (12). При построении модели прогнозирования в алгоритме выделяют два этапа — обучение и экзамен.

Первый этап (обучение)

1. Проводят испытания или пробную эксплуатацию объектов на период до T_{Π} (рис. 19).

2. Формируют (описывают) два или несколько классов R_1 и R_2 , пусть в виде плотностей распределения вероятностей $f(\vec{X}/R_1)$ и $f(\vec{X}/R_2)$ в нулевой момент времени t_0 , причем в первый класс объединяются объекты, у которых срок службы больше T_{Π} , т. е. они отказали до этого момента, а во второй — объекты со сроком службы меньше T_{Π} .

3. Поскольку выбран вероятностный подход к описанию классов, то необходимо определить законы рас-

пределения $f(\bar{X}/R_\lambda)$, $\lambda = 1, 2$. Допустим, что распределение подчиняется нормальному закону

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\lambda} \exp \left[-\frac{(X - \bar{X}_\lambda)^2}{2\sigma_\lambda^2} \right],$$

$$\lambda = 1, 2, \quad (22)$$

где \bar{X}_λ , σ_λ^2 — параметры распределения классов R_1 и R_2 .

4. Для всего диапазона изменения X вычисляют отношение правдоподобия:

$$L(X) = \frac{f(X^*/R_1)}{f(X^*/R_2)}, \quad (23)$$

где $f(X^*/R_1)$ и $f(X^*/R_2)$ — соответствующие ординаты плотностей вероятностей в точке X^* .

Для практических целей удобнее пользоваться логарифмом отношения правдоподобия (освобождаемся от экспоненциальной зависимости)

$$\ln L(X) = \ln \frac{\sigma_2}{\sigma_1} -$$

$$- \frac{(X^* - \bar{X}_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(X^* - \bar{X}_2)^2}{2\sigma_2^2}. \quad (24)$$

5. Вводим порог сравнения Λ , который определяет решающее правило:

$$\ln L(X) < \Lambda, X \in R_1 (T < T_{II});$$

$$\ln L(X) \geq \Lambda, X \in R_2 (T \geq T_{II}). \quad (25)$$

6. Оценивают точность прогноза при выбранном пороге Λ , т. е. вероятность (процент) правильного распознавания:

$$p = n/N, \quad (26)$$

где n — число объектов, правильно распознанных; N — общее число объектов.

Можно оценить ошибки I и II рода:

$$\alpha = \frac{n_{21}}{N_2}; \quad \beta = \frac{n_{12}}{N_1},$$

где n_{21} , n_{12} — соответственно числа объектов II и I классов, неправильно отнесенных к I и II классам; N_1 , N_2 — числа объектов I и II класса.

Второй этап (экзамены). Контролируют в момент t_0 параметр

объекта, срок службы которого необходимо оценить; вычисляют $\ln L_n(X)$ по (24); принимают решение о сроке службы объекта с помощью (25); вероятность правильного распознавания определяют по (26). Очевидно, что модель прогнозирования применима для того же типа объектов, для которых она построена по обучающей выборке. При этом классов может быть несколько.

Модели экстраполяции бывают самыми разнообразными в различных областях науки и техники. Их применяют для прогнозирования состояния множества конкретных объектов. Это объясняется тем, что хотя выделено всего четыре структурных модели ДП, влияние большого числа факторов приводит к необходимости в отдельных случаях искать конкретную модель экстраполяции. Здесь не приводится модель А. Н. Колмогорова, которая открыла целое направление в теории экстраполяции случайных процессов, так как эта модель основывается на знании корреляционной функции процесса, а для ДП технических объектов ее практически не удастся вычислить из-за ограниченного количества информации, и из-за того, что интервалы прогнозирования существенно превышают период корреляции процесса. Поэтому используют модели, с помощью которых можно решить задачу прогнозирования для моделей ДП (11)—(14) в нескольких вариантах.

В а р и а н т I. Модель ДП (11) является наиболее распространенной, и большинство МЭ разработано применительно к ней. В качестве ДП в реальных задачах могут рассматриваться различные показатели работоспособности, функции состояния, обобщенные параметры, параметры распределения, показатели надежности и т. д.

1. Интерполяционный подход в качестве моделей экстраполяции позволяет построить:

преобразованную интерполяционную формулу Лагранжа:

$$W [L(\mu, m), X] = L_{\mu 0} X(t_0) +$$

$$+ L_{\mu 1} X(t_1) + \dots +$$

$$+ L_{\mu i} X(t_i) + \dots + L_{\mu \mu} X(t_\mu), \quad (27)$$

где $t_\mu \in T_1$, $\mu \leq n$,

$$L_{\mu i} = f_i(\mu, m) = \frac{\prod_{j=0}^{j=\mu} (m+j)}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{j=\mu} (i-j)};$$

вторую интерполяционную формулу Ньютона, которая после преобразования имеет вид

$$W[N(m), X] = X(t_n) + \Delta X_{n-1} N_1 + \Delta^2 X_{n-2} N_2 + \Delta^3 X_{n-3} N_3 + \dots \quad (28)$$

где $N_\mu(m) = f(m) = \frac{1}{\mu!} \prod_{k=1}^{k=\mu} (m - 1 + k)$ — коэффициенты Ньютона; $\Delta^k X$ — k -я конечная разность.

Для экстраполяции можно применить комбинированную модель

$$\begin{aligned} \mathscr{W}\{W[\beta(x), t], A\} &= \\ &= \sum_{l=1}^{\mu} \mathscr{A}_l W_l[\beta(x), t], \quad (29) \end{aligned}$$

где A_l — степенные адаптационные коэффициенты соответственно при моделях $W_l[\beta(x), t]$ первого, второго, ..., μ -го порядка. В выражении (29) использовано понятие полиномиального спектра ДП.

2. Метод наименьших квадратов позволяет построить в качестве моделей экстраполяции регрессионные полиномы требуемого порядка:

$$W[\beta(x), t] = \beta_0 + \sum_{l=1}^{\mu} \beta_l t^l, \quad (30)$$

где неизвестные коэффициенты регрессии β_l оценивают с помощью (18). Модели могут быть и нелинейными по коэффициентам:

$$W[\beta(x), t] = \beta_0 t^{\beta_1} \text{ или}$$

$$W[\beta(x), t] = \beta_0 \beta_1^t.$$

Кроме того, МНК дает возможность построить один вид моделей, получивших название регрессионно-временных (РВМ), которые показывают зависимость параметра ДП не только

от времени, но и от внешних и внутренних воздействующих факторов (климатических, механических, электрической нагрузки и т. п.). Модель типа РВМ строят на стадии испытаний объектов и в два этапа. Пусть испытания объектов проводятся при воздействии двух факторов O_1, O_2 и времени t , т. е. необходимо, чтобы модель показывала зависимость работоспособности объекта от O_1 и O_2 , а также от t . Для построения той части модели, которая показывает зависимость только от воздействующих факторов, испытания организуют по специальным планам, существующим в теории планирования эксперимента. Для двух факторных испытаний план 1-го порядка имеет вид

$$\mathscr{P}_n = \begin{pmatrix} O_1 & O_2 \\ -1 & -1 \\ -1 & +1 \\ +1 & -1 \\ +1 & +1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \rightarrow X_1 \\ \rightarrow X_2 \\ \rightarrow X_3 \\ \rightarrow X_4 \end{matrix}, \quad (31)$$

где -1 и $+1$ — верхний и нижний уровни факторов (например, O_{\max} и O_{\min}).

После проведения двухфакторных испытаний в момент t_0 строится МНК-модель, в данном случае первого порядка:

$$\hat{x}_{t_0}(\vec{a}, O) = a_0 + a_1 o_1 + a_2 o_2 + a_{12} o_1 o_2, \quad (32)$$

где a_j — неизвестные коэффициенты регрессии.

Многофакторные испытания продолжают в интервале $[t_0 \div t_n]$ в моменты t_0, t_1, \dots, t_n и получают $\hat{x}_{t_0}(\vec{a}, O), \hat{x}_1(\vec{a}, O), \dots, \hat{x}_{t_n}(\vec{a}, O)$, в которых $a_j = \varphi_j(t)$. Зависимость $a_j(t)$ аппроксимируется известными моделями экстраполяции, например, пусть это будет двучлен $a_j = b_{0j} + b_{1j}t$. Тогда РВМ примет вид

$$\begin{aligned} W[\beta(x), t] &= (b_{00} + b_{10}t) + \\ &+ (b_{01} + b_{11}t) O_1 + (b_{02} + b_{12}t) O_2 + \\ &+ (b_{012} + b_{112}t) O_1 O_2. \end{aligned}$$

Подобная модель позволяет осуществлять прогнозирование в зависимости не только от времени t , но и от изменения воздействующих факторов O_1 и O_2 .

3. Взвешивание и сглаживание оценок временного ряда $X(t_i)$ используется в том случае, когда значения этого ряда, полученные в предыдущие моменты времени, неравнозначно влияют на значения в предсказываемой области. При таком подходе используют метод экспоненциального сглаживания, когда текущей информации даются большие «веса», а предшествующим значениям меньшие. Этот способ называют способом «забывания» информации, поступившей в отдаленном прошлом.

Модель прогнозирования имеет вид рекуррентной формулы

$$S(t_n) = \alpha X(t_n) + (1 - \alpha) S(t_{n-1}), \quad (33)$$

где $S(t_n)$, $S(t_{n-1})$ — значения экспоненциальной средней соответственно в моменты t_n и t_{n-1} ; α — параметр сглаживания; $0 < \alpha < 1$.

Выражение модели можно переписать, если последовательно использовать рекуррентное соотношение (33) для всего временного ряда, начиная с $X(t_0)$, следующим образом:

$$\begin{aligned} S(t_n) &= \alpha X(t_n) + \alpha(1 - \alpha) X(t_{n-1}) + \\ &+ (1 - \alpha^2) X(t_{n-2}) = \dots = \\ &= \alpha \sum_{i=1}^{n-1} (1 - \alpha)^i X(t_{n-i}) + \\ &+ (1 - \alpha)^n S(t_0), \end{aligned}$$

где $S(t_0)$ — некоторая величина, характеризующая начальные условия для первого применения формулы (33). В частном случае $S(t_0) = X(t_0)$ или

$$S(t_0) = 1/m \sum_{i=0}^m X(t_i), \text{ где } m \text{ — число}$$

начальных значений временного ряда.

Модели Бокса—Дженкинса из этого же класса моделей, представляющие собой модели авторегрессии и скользящего среднего, как правило, не используют для долгосрочного прогнозирования.

В а р и а н т II. При использовании модели ДП (12) осуществляют

«групповое» прогнозирование, т. е. по совокупности одномерных реализаций ДП оценивают состояние группы (партии) объектов в требуемый момент времени в будущем или плотность распределения времени безотказной работы этих объектов. Подобная задача встречается при хранении партий однотипных объектов или при их одновременном испытании или эксплуатации.

Для решения задач следует использовать непараметрический матричный метод прогнозирования, содержание которого заключается в следующем. Для осуществления группового прогнозирования исходной информацией в области T_1 является ряд $n_{i\nu}$, $i = \overline{1, n}$, $\nu = \overline{1, \pi}$, где $n_{i\nu}$ — количество объектов (или значений показателей состояния) в i -й момент времени в ν -м интервале на оси X ; $\sum_{\nu=1}^{\pi} n_{i\nu} = N$,

где N — общее число контролируемых объектов. Для непараметрического метода целесообразно информацию представить в виде

$$\vec{n}_i = \| n_{i\nu} \|$$

или

$$\vec{p}_i = \| p_{i\nu} \|, \quad (34)$$

где $p_{i\nu}$ — вероятность ν -го состояния контролируемых объектов; $\sum_{\nu=1}^{\pi} p_{i\nu} = 1$.

Для оценки эволюции состояния объектов необходимо оценить количественно изменения их состояния во времени, т. е. переход от \vec{n}_i к \vec{n}_{i+1} или от \vec{p}_i к \vec{p}_{i+1} . Такой переход удобно описывать вероятностью перехода из одного состояния в другое. Вычислив по экспериментальным данным вероятности перехода из одного состояния в другое, (т. е. из одного интервала в другой), опишем тем самым весь процесс изменения состояния объектов. Матрица вероятностей перехода имеет вид

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1\pi} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2\pi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{\pi 1} & p_{\pi 2} & \dots & p_{\pi \pi} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где p_{lv} — вероятность перехода из v -го состояния в l -е (в марковской матрице наоборот).

Элементы матрицы (35) на практике определяют как

$$p_{lv} = \frac{n_{lv}}{N} \Big|_{t_0 \div t_1, N \rightarrow \infty}$$

или

$$p_{lv} = \frac{\sum_{i=1}^n n_{lvi}}{n \times N} \Big|_{t_0 \div t_n, N - \text{мало,}}$$

где n_{lv} — число объектов, перешедших из интервала v в i -й момент времени в интервал l в $(i+1)$ -й момент времени;

$$\sum_{v=1}^{\pi} p_{lv} = \sum_{l=1}^{\pi} p_{lv} = 1.$$

Пусть a_i — вектор состояния в i -м временном сечении; тогда процедура прогнозирования имеет вид

$$\vec{a}_{n+1} = \vec{P} \vec{a}_n \quad (36)$$

или в общем случае

$$\vec{a}_{n+j} = \vec{P}^j \vec{a}_n, \quad (37)$$

где \vec{P}^j — матрица \vec{P} в j -й степени:

$$\sum_{i=1}^{\pi} a_{li} = N.$$

Если граничные условия работоспособности проходят между первым и вторым, а также между $(\pi-1)$ -м и π -м интервалами, то вероятность отказа $q_{n+j} = (p_1 + p_{\pi})n_{n+j}$, а число отказавших объектов $n_{n+j} = [N(p_1 + p_{\pi})] J_{n+j}$. Поскольку ДП имеет тренд, то для учета его проводят следующие преобразования. Пусть интервалы состояний определяются в соответствии с соотношением

$$I_v(t_i) = \left[\bar{x}(t_i) \pm \left(\frac{\pi}{2} - v \right) \delta \right], \quad v = \overline{1, \pi}, \quad (38)$$

где $\bar{x}(t_i)$ — среднее значение показателя ДП в i -м сечении; δ — ширина интервала состояния.

Таким образом, ДП $X(t)$ заменяют на процесс $[x(t) - \bar{x}(t)]$ для интервалов, построенных в известной области T_1 с помощью соотношения (38), учитывают закономерность процесса $x(t)$, полученную усреднением реализаций ДП. В то же время матрицу \vec{P} строят относительно этих интервалов и тем самым не учитывают тренд, что и требуется для ее построения.

В нестационарной задаче необходимо оценивать момент пересечения границ интервалов (38) с допустимыми границами X^* , определяющими условия работоспособности. В результате строят плотность распределения времени безотказной работы $f_X(t)$. Для этих целей выражение (38) заменяется на модель:

$$I_v(t) = \left[W[\bar{x}, t] \pm \left(\frac{\pi}{2} - v \right) \delta \right], \quad v = \overline{1, \pi}, \quad (39)$$

где $W[\bar{x}, t]$ — модель экстраполяции.

В а р и а н т III. Для модели (13) при описании многомерного индивидуального ДП необходимо в целях осуществления прогнозирования ДП выбрать наилучшую в смысле адекватности модель экстраполяции $W \times \times [\vec{\beta}^{(s)}(x), t]$. В данном случае модели экстраполяции могут быть линейными и нелинейными по коэффициентам.

При линейной модели коэффициенты оценивают с помощью МНК в виде

$$\vec{B} = \vec{K} \left[\sum_{i=1}^n \vec{\Phi}_i \vec{D}^{-1} \vec{X}(t_i) \right], \quad (40)$$

где $\vec{\Phi}_i = \|\varphi_{sr}(t)\|$, $s = \overline{1, k}$; $r = \overline{1, m}$; $\varphi_{sr}(t)$ — простейшие функции времени; $\vec{K} = \|k_{sl}\|$, $s, l = \overline{1, k}$ — дисперсионная матрица оценок коэффициентов, определяемая из выражения

$$\vec{K} = \left[\sum_{i=1}^n \vec{\Phi}_i \vec{D}^{-1} \vec{\Phi}_i^* \right];$$

$\vec{D} = \|d_{sl}\|, s, l = \overline{1, k}$ — дисперсионная матрица ошибок наблюдений, элементы которой вычисляют на стационарном или квазистационарном участке процесса:

$$d_{sl} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{sl} - \bar{X}_s)(X_{li} - \bar{X}_l),$$

где $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$. Распределение оценок коэффициентов в этом случае является нормальным.

При нелинейной по коэффициентам модели оценки коэффициентов при мультипликативной ошибке ϵ рассчитывают методом наименьших квадратов с помощью итерационной процедуры:

$$\hat{B}_v = \vec{K}_v \left[\sum_{i=1}^n \vec{\Psi}_{vi} \vec{D}^{-1} \vec{X}_i \right], \quad (41)$$

где

$$\vec{\Psi}_v = \left\{ \frac{\partial \varphi_1}{\partial B} \Big|_{\hat{B}_{v-1}}, \frac{\partial \varphi_2}{\partial B} \Big|_{\hat{B}_{v-1}}, \dots, \frac{\partial \varphi_m}{\partial B} \Big|_{\hat{B}_{v-1}} \right\};$$

v — номер итерации; φ — простейшие функции времени.

Дисперсионную матрицу \vec{K}_v вычисляют как

$$\vec{K}_v = \left[\sum_{i=1}^n \vec{\Psi}_{iv} \vec{D}^{-1} \vec{\Psi}_{is}^* \right].$$

Распределение оценок коэффициентов является в этом случае асимптотически нормальным.

В а р и а н т IV. Модель ДП (14) настолько сложна для осуществления прогнозирования, что в настоящее время нет более или менее приемлемой модели экстраполяции. Поэтому от этой модели переходят к трем более простым моделям ДП и соответственно к существующим для их прогнозирования моделям экстраполяции.

Модели статистической классификации, объединяемые в два класса, определяют два подхода к решению задачи прогнозирования.

Модели распознавания образов. Среди этих моделей выделяют детерминированные и вероятностные, одномерные и многомерные модели распознавания.

Детерминированные одномерные модели распознавания основываются на следующих общих рассуждениях. Состояние каждого объекта характеризуется совокупностью k параметров, которые являются координатами вектора состояния $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$. На этапе обучения устанавливается, какие объекты формируют класс R_1 с соответствующим сроком службы (запасом работоспособности), какие R_2 и т. д. Осуществляя обработку информации о состоянии объектов, определяют эталонные векторы $\vec{X}^{(1)} \in R_1, \vec{X}^{(2)} \in R_2, \dots$. Существуют различные способы описания классов и определения эталонных векторов $\vec{X}^{(\lambda)}$, однако наиболее часто встречающимся на практике является способ, связанный с вычислением статистических характеристик и описывающий центр соответствующего класса объектов.

Пусть $\bar{x}_s^{(\lambda)}$ характеризует статистически центр λ -го класса по s -му параметру (как правило, это среднее арифметическое). Тогда соотношение между x_s^0 и $\bar{x}_s^{(\lambda)}$, где x_s^0 — параметр диагностируемого прибора, будет говорить о близости объекта к λ -му классу.

Некоторые существующие меры близости:

квадрат расстояния

$$\Omega^{(\lambda)} = \sum_{s=1}^k (x_s^0 - \bar{x}_s^{(\lambda)})^2;$$

скалярные произведения

$$\Omega^{(\lambda)} = \sum_{s=1}^k x_s^0 \bar{x}_s^{(\lambda)};$$

корреляционная

$$\Omega^{(\lambda)} = \left(\sum_{s=1}^k x_s^0 x_s^{(\lambda)} \right) - \frac{1}{k} \left(\sum_{s=1}^k x_s^0 \right) \left(\sum_{s=1}^k x_s^{(\lambda)} \right);$$

с учетом весовых коэффициентов

$$\Omega^{(\lambda)} = \left[\sum_{s=1}^k \alpha_s (x_s^0 - x_s^{(\lambda)})^2 \right]^{1/2},$$

где α_s — весовой коэффициент s -го параметра; $\sum_{s=1}^k \alpha_s = 1$;

с учетом выделенных границ (без определения центра класса) $\Omega^{(\lambda)} = \sum_{s=1}^k \Omega_s$, где

$$\Omega_s = \begin{cases} -1, & x_s^0 < x_{s1}^*, \\ 0, & x_{s1}^* < x_s^0 < x_{s2}^*, \\ 1, & x_s^0 \geq x_{s2}^*. \end{cases}$$

При этом $x_{s1}^* < x_{s2}^*$, а решение принимается, если $\Omega^{(\lambda)} < 0$, $\vec{X} \in R_1$, если $\Omega^{(\lambda)} > 0$, $\vec{X} \in R_2$; если $\Omega^{(\lambda)} = 0$, отказ от принятия решения.

Вероятностные одномерные модели распознавания используют в том случае, когда оценку близости объекта к классу выполняют с помощью вероятностной меры. При наличии помех и преобладании случайной составляющей в ДП объекты различных классов оказываются существенно перемешанными, что затрудняет распознавание. В связи с этим удобнее пользоваться вероятностной мерой близости, которая может выражаться в виде:

а) суммы вероятностей

$$\sum_{s=1}^k P(x_s^0/R_\lambda),$$

где $P(x_s^0/R_\lambda)$ — вероятность принадлежности объекта по s -му параметру к λ -му классу; $\lambda = \overline{1, m}$;

б) произведения вероятностей

$$\prod_{s=1}^k P(x_s^0/R_\lambda), \quad \lambda = \overline{1, m};$$

в) байесовской вероятности с весовыми коэффициентами

$$P(\vec{X}^0/R_\lambda) = \frac{P(R_\lambda) \prod_{s=1}^k [P(x_s^0/R_\lambda)]^{\alpha_s}}{\sum_{\lambda=1}^m P(R_\lambda) \prod_{s=1}^k [P(x_s^0/R_\lambda)]^{\alpha_s}},$$

где $P(R_\lambda)$ — априорная вероятность принадлежности объекта к λ -му классу и α_s — весовой коэффициент; эти величины определяют на этапе обучения;

г) логарифма отношения правдоподобия (24) и (25).

Вероятностную многомерную модель хорошо иллюстрирует модель статистических решений при гауссовой аппроксимации плотностей распределения параметров объектов в классах.

Пусть $f(\vec{X}/R_\lambda) \equiv f_\lambda(\vec{X})$ — плотность распределения вероятностей вектора состояния объектов $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, принадлежащих λ -му классу, и пусть $\lambda = 1, 2$ (случай двух классов — работоспособных и неработоспособных объектов на требуемое время T_{Π}); $P(R_\lambda) \equiv q_\lambda$ — априорные вероятности классов; d_λ — принимаемое решение о принадлежности диагностируемого объекта к λ -му классу; d_0 — решение, означающее отказ от прогнозирования (расознавания класса). Тогда для некоторого диагностируемого объекта \vec{X}^0 оптимальное решающее правило имеет вид

$$\delta(\vec{X}^0) = \begin{cases} d_1, & \text{если } L(\vec{X}^0) \geq \Lambda_1, \\ d_2, & \text{если } L(\vec{X}^0) \leq \Lambda_2, \\ d_0, & \text{если } \Lambda_2 < L(\vec{X}^0) < \Lambda_1, \end{cases} \quad (42)$$

где $L(\vec{X}) = \ln \frac{f_1(\vec{X})}{f_2(\vec{X})}$ — логарифм от-

ношения правдоподобия; $L(\vec{X}^0)$ — значение $L(\vec{X})$ при $\vec{X} = \vec{X}^0$; Λ_1, Λ_2 — пороги сравнения, определяемые априорными вероятностями классов q_1, q_2 и задаваемой матрицей «потерь» $(\omega_{\eta\lambda}), \eta = 0, 1, 2; \lambda = 1, 2$.

При $\omega_{11} = \omega_{22} = 0; \omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0; \frac{1}{\omega_0} \geq \frac{1}{\omega_{12}} + \frac{1}{\omega_{21}}$ пороги Λ_1 и Λ_2 определяют из выражений

$$\Lambda_1 = \ln \left(\frac{q_2}{q_1} \frac{\omega_{12} - \omega_0}{\omega_0} \right);$$

$$\Lambda_2 = \ln \left(\frac{q_2}{q_1} \frac{\omega_0}{\omega_{21} - \omega_0} \right). \quad (43)$$

В частности, пороги Λ_1 и Λ_2 могут быть выбраны равными (решение d_0 отсутствует); тогда $\Lambda = \ln \frac{q_2}{q_1} \frac{\omega_{12}}{\omega_{21}}$.

Довольно часто значение Λ выбирают экспериментально на этапе обучения.

Логарифм отношения правдоподобия (24) для многомерных плотностей вероятностей $f_1(\vec{X})$ и $f_2(\vec{X})$ равен

$$L(\vec{X}) = -\frac{1}{2} (\vec{X} - \vec{\mu}_1)^* V_1^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}_1) +$$

$$+ \frac{1}{2} (\vec{X} - \vec{\mu}_2)^* V_2^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}_2) +$$

$$+ \frac{1}{2} \ln \frac{|V_2|}{|V_1|}, \quad (44)$$

где \vec{X} — вектор-столбец параметров диагностируемого объекта; V_λ — ковариационные матрицы для объектов классов $\lambda = 1, 2; V_\lambda^{-1}$ — обратные матрицы; $|V_\lambda|$ — определители матриц $V_\lambda; \vec{\mu}_\lambda$ — векторы средних значений параметров объектов классов $\lambda = 1, 2; «*»$ — знак транспонирования.

Элементы ковариационных матриц $V = \|\sigma_{sl}\|$ и векторы средних зна-

чений для λ -го класса оценивают на этапе обучения:

$$\hat{\sigma}_{sl}^{(\lambda)} = \frac{1}{N_\lambda - 1} \sum_{i=1}^{N_\lambda} (X_{si}^{(\lambda)} X_{li}^{(\lambda)} - \hat{\mu}_s^{(\lambda)} \hat{\mu}_l^{(\lambda)}),$$

$$\hat{\mu}_s^{(\lambda)} = \frac{1}{N_\lambda} \sum_{i=1}^{N_\lambda} X_{si}^{(\lambda)},$$

где $s, l = \overline{1, k}; k$ — число контролируемых параметров у диагностируемого объекта; N_λ — число объектов обучающей выборки, принадлежащих λ -му классу.

Априорные вероятности классов оцениваются как $\hat{q}_1 = N_1 / (N_1 + N_2); q_2 = N_2 / (N_1 + N_2)$ при условии, что обучающие выборки сформированы случайным образом. Следует учитывать, что N_λ должно быть не меньше числа контролируемых параметров объектов, т. е. $N_\lambda \geq k$, так как оценка ковариационной матрицы V_λ в этом случае не окажется особой матрицей.

Качество решающего правила определяется ожидаемым риском, который при использовании правила (42) равен

$$R = \omega_1 q_1 \alpha + \omega_2 q_2 \beta, \quad (45)$$

где α, β — вероятности ошибок соответственно I и II рода; ω_1, ω_2 — цены ошибок соответственно I и II рода.

При $\omega_1 = \omega_2 = 1$ R есть вероятность ошибочного распознавания. Теоретически определить риск оказывается достаточно сложно, поэтому целесообразно оценивать качество решающего правила эмпирическим путем на материале обучающей (или контрольной) выборки.

Модели дискриминантного анализа (МДА). Для модели статистических решений и ряда других моделей на этапе обучения необходимо построение многомерных плотностей распределения параметров; решающее правило при этом оказывается квадратичным (так как $f_\lambda(\vec{X})$ имеет квадратичную форму). Этих недостатков лишены МДА.

Построение дискриминантной поверхности по МНК. Если каждому объекту \vec{X} на этапе обучения сопоставить какую-то меру (числовое значение) η , существенно различающуюся для объектов разных классов (например, для R_1 принимается $\eta > 0$, а для R_2 — $\eta < 0$), то построение поверхности, разделяющей классы, можно рассматривать как отыскание некоторой аппроксимирующей функции $F(\vec{X})$, приближающейся к η . Для этой цели необходимо выбрать класс аппроксимирующих функций и оценку отклонения $F(\vec{X})$ от η .

Пусть аппроксимирующая функция $F(\vec{B}, \vec{X})$ представлена в достаточно распространенном виде:

$$F(\vec{B}, \vec{X}) = \vec{B}\vec{\varphi}(\vec{X}), \quad (46)$$

где \vec{B} — неизвестный $k + 1$ -й-мерный вектор коэффициентов; $\vec{\varphi}(\vec{X})$ — $k + 1$ -й-мерный вектор-строка линейно независимых функций. В частности, (46) можно представить в виде

$$F(\vec{B}, \vec{X}) = b_0 + \sum_{s=1}^k b_s X_s,$$

где X_s — s -й параметр объекта.

В качестве функций $\varphi_s(\vec{X})$ можно взять более сложные функции. Для оценки и минимизации отклонения $\{\eta - F(\vec{B}, \vec{X})\}$ используют МНК:

$$J(\vec{B}, \vec{X}) = M\{\psi\{\eta - F(\vec{B}, \vec{X})\}^2\} = \min,$$

где M — знак математического ожидания.

Для нахождения коэффициентов разделяющей поверхности (46) можно использовать следующий алгоритм. Пусть N — число объектов в обучающей выборке; при этом N_1 в R_1 , N_2 в R_2 и каждому объекту сопоставляется η следующим образом:

$$\eta = \begin{cases} +1, & \text{если } \vec{X} \in R_1, \\ -1, & \text{если } \vec{X} \in R_2. \end{cases}$$

Отсюда оценкой математического ожидания квадрата отклонения иско-

мой аппроксимирующей функции будет функция

$$J(\vec{B}, \vec{X}) = \frac{1}{N} [\eta - \vec{B}\vec{\varphi}(\vec{X})]^* \times \\ \times [\eta - \vec{B}\vec{\varphi}(\vec{X})].$$

Условие минимума $J(\vec{B}, \vec{X})$ приводит к системе линейных уравнений, решением которых является

$$\vec{B} = (\Phi^* \Phi)^{-1} (\Phi^* \eta),$$

где Φ — матрица значений функций $\varphi_s(\vec{X})$, $s = \overline{1, k}$.

Решающее правило может быть представлено в виде

$$\delta(\vec{X}) = \begin{cases} d_1, & \text{если } F(\vec{B}, \vec{X}) > 0, \vec{X} \in R_1, \\ d_2, & \text{если } F(\vec{B}, \vec{X}) < 0, \vec{X} \in R_2. \end{cases}$$

Оценку точности прогнозирования проводят с помощью (45) на этапе обучения.

Построение дискриминантной поверхности методом математического программирования. Задача прогнозирования интерпретируется в данном случае следующим образом. Необходимо построить разделяющую классы поверхность

$$F(\vec{B}, \vec{X}) = \sum_{s=1}^k b_s X_s, \quad (47)$$

такую, чтобы выполнялась система неравенств

$$\sum_{s=1}^k a_s X_{is} \geq \lambda, \quad i = \overline{1, r}, \quad (48)$$

$$\sum_{s=1}^k a_s X_{is} < \lambda, \quad i = \overline{N-r, N}, \quad (49)$$

где a_s — неизвестные коэффициенты; X_{is} — контролируемые параметры диагностируемых объектов; λ — порог, разделяющий классы; r — число объектов в R_1 .

Неравенства (48) записываются для объектов I класса; (49) — для объектов II класса, и коэффициенты a_s оцениваются на этапе обучения с помощью вычислительных алгоритмов,

принятых в математическом прогнозировании при условии минимизации ошибки прогнозирования. В модель (47) подставляются значения параметров объектов на этапе экзамена (вновь диагностируемые объекты). При этом решающее правило имеет вид

$$\sum_{s=1}^k a_s X_s \geq c, \text{ если } \vec{X} \in R_1,$$

$$\sum_{s=1}^k a_s X_s < c, \text{ если } \vec{X} \in R_2.$$

Оценку точности прогнозирования проводят аналогично методам распознавания образов.

Для современных высоконадежных изделий необходимо использовать комбинированный подход, когда для ускорения обучения МСК следует использовать МЭ, а на этапе экзамена алгоритма статистической классификации. В настоящее время существует пакет прикладных программ, реализующих алгоритмы прогнозирования, и микропроцессорные устройства прогнозирования.

1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Элементы систем диагностирования. В общем случае система диагностирования (СД) состоит из трех элементов: ОД, ТСД и оператора (Оп). Каждый из элементов имеет свои специфические особенности, влияющие на структуру СД и взаимодействие элементов.

Одним из основных элементов в системе диагностирования является ОД. Системы диагностирования изменяются в зависимости от характера (непрерывного или периодического) использования ОД. Периодическое использование может происходить при постоянном периоде (регулярно-периодическое использование) или случайном значении периода (случайно-периодическое использование). В зависимости от назначения, конструктивных особенностей, условий использования и эксплуатации объект в системе диагностирования рассматривают как единое целое или как совокупность структурных единиц (СЕ), объединенных связями. Расчленение объекта на СЕ определяется необходимостью использования различных методов и выполнения вследствие неодинаковых значений показателей надежности диагностирования отдельных частей объекта в различные моменты времени. На рис. 1 приведены возможные способы организации процесса диагностирования объекта, который представляет собой совокупность СЕ, в специальном контрольном режиме (КР). СЕ можно переводить в КР одновременно или в различные моменты времени, что может определяться или показателями надежности СЕ, или организацией использования объекта. СЕ, переведенные в КР,

диагностируются последовательно или параллельно во времени. В некоторых случаях все СЕ могут быть разбиты на группы. СЕ в каждой группе и группы диагностируют последовательно или параллельно во времени. Так, если СЕ в группах диагностируют параллельно, а группы последовательно во времени, то имеет место *последовательно-параллельное* диагностирование; в противном случае — *параллельно-последовательное* диагностирование. В том случае, когда СЕ переводятся в КР неодновременно, организация процесса диагностирования может быть значительно сложнее, чем в том случае, когда все СЕ переводятся в КР одновременно. Это объясняется неоднократным выполнением группирования СЕ, а группы СЕ могут перемешиваться, поскольку в КР одновременно оказываются различные СЕ.

Методы диагностирования СЕ также различны. Одни СЕ диагностируют тестовыми методами, другие — функциональными, что непосредственно влияет на структуру СД.

Вторым элементом СД является ТСД, т. е. совокупность средств, с помощью которых осуществляют оценку состояния объекта. Состав ТСД зависит от метода диагностирования. Так, для проведения функционального диагностирования используют ТСД, основой которых являются средства съема и обработки информации о состоянии объекта. Для осуществления тестового диагностирования в состав ТСД вводят средства, формирующие и стимулирующие тестовые воздействия, подаваемые на объект. Кроме того, в СД, как правило, появляются связи, согласующие тестовые воздействия со средствами обработки информации о состоянии объекта, что необходимо при

оценке реакции объекта на тестовое воздействие. Состав ТСД еще более разнообразен, если в СД часть СЕ объекта диагностируется тестовыми методами, а другая часть — функциональными.

При проектировании состав ТСД может быть изменен в зависимости от задач, которые эти средства решают. Так, ТСД для определения работоспособности отличаются от ТСД, предназначенных для поиска возникшего дефекта или прогнозирования изменения состояния объекта. В связи с этим в состав ТСД вводят специальные устройства для определения работоспособности (УОР), поиска возникшего дефекта (УПД) или прогнозирования (УП), а также устройства универсального назначения для съема информации (первичные датчики), а также обработки, отображения и регистрации диагностической информации. Кроме того, в составе ТСД могут быть устройства генерирования тестовых воздействий, устройства управления, которыми оператор направляет процесс диагностирования в нужную сторону.

К ТСД относят также программные средства, т. е. программы, записанные на носителе (перфоленты, перфокарты и др.). Операции, необходимые для диагностирования, включают в рабочие программы объекта, или эти операции представляют собой программы, специально составленные с учетом требований диагностирования объекта. В первом случае диагностирование осуществляют в процессе использования объекта по его прямому назначению, во втором случае для диагностирования приходится прерывать функционирование объекта и переводить его в специальный КР.

Третьим элементом в СД является человек — оператор (Оп). В самом общем случае Оп в СД выполняет следующие функции:

воспринимает в том или ином виде информацию о ходе диагностирования;

осуществляет анализ поступившей информации;

принимает информацию в виде заданий и указаний от руководителя-оператора;

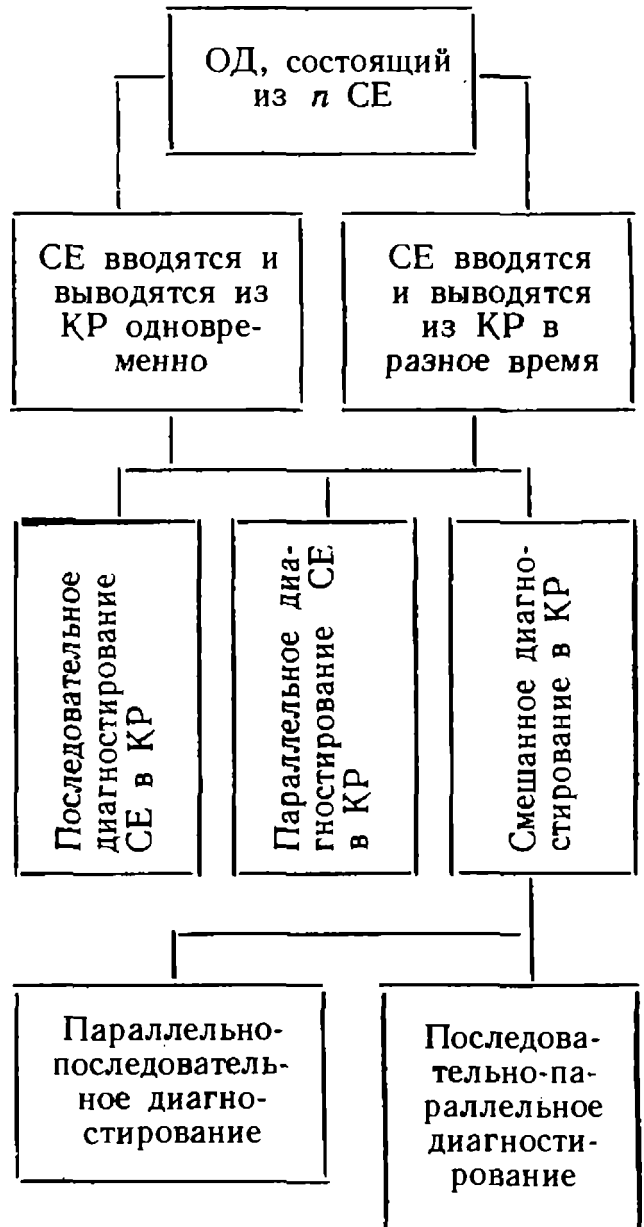


Рис. 1. Способы организации диагностирования

в соответствии с результатами анализа принимает решение, формирует и выдает команды в СД, сообщения руководителю-оператору или указания оператору-исполнителю.

Режим работы Оп в основном определяется соотношением между информационной и управляющими функциями. Оператор может работать либо в условиях информационной перегрузки, либо в условиях информационной недогрузки.

На рис. 2 приведена схема, характеризующая деятельность Оп. Индивидуальные свойства оператора определяются психофизиологическими характеристиками, т. е. характеристиками приемных устройств (ПУ),

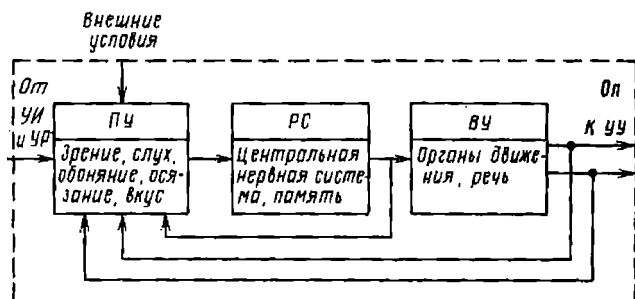


Рис. 2. Схема, характеризующая деятельность оператора:

УИ, УР, ПУ, ВУ и УУ — устройства соответственно индикации, регистрации, приемные, выходные человека-оператора и управления; РС — решающая система

решающей системы (РС) и выходных устройств (ВУ) человека-оператора. Основными средствами приема информации у человека-оператора являются зрение и слух.

С помощью зрения в обычной жизни человек получает 80 % всей информации. Условно все поле зрения глаз человека можно разбить на три зоны: наиболее четкого видения (2°), ясного видения (22° по вертикали и 30° по горизонту), когда при неподвижном глазе можно опознать предмет без различения мелких деталей, и периферического зрения, если предметы не опознаются. Зоны периферического зрения играют важную роль при ориентации во внешней обстановке. Число точечных объектов, которое может быть одновременно воспринято, равно 7. Пропускная способность зрительного канала составляет 20—70 бит/с.

С помощью слуха человек воспринимает 15 % информации. На рис. 3 приведены области восприятия звуковых сигналов. Заштрихованные об-

ласти представляют собой области колебаний верхнего и нижнего порогов слухового канала. Пороговые значения зависят от времени предъявления сигнала, положения человека и изменяются с течением времени для одного и того же человека. Для практической деятельности достаточно 75 % разборчивости речи, что имеет место при превышении громкости голоса над уровнем шума более чем в 6 раз.

Основной характеристикой решающей системы Оп является надежность.

Надежность человека-оператора определяется его способностью сохранять качество работы не ниже допустимого уровня при заданных условиях трудовой деятельности.

Комплексными показателями надежности функционирования являются:

$P = \varphi(A_f/S, F)$ — вероятность безошибочно-безотказного выполнения предписанного способа функционирования A_f при условии, что учитывается возможность возникновения как ошибок (F), так и устойчивых отказов (S), но отсутствует их восстановление;

$P = \varphi(A_f, U_F, U_S/S, F)$ — вероятность правильного выполнения способа функционирования A_f при условии, что учитывается как возможность возникновения ошибок (F) и устойчивых отказов (S), так и возможность их устранения способами U_F и U_S ;

$P = \varphi(A_f, U_F, U_S, \tau_F, \tau_S/S, F)$ — вероятность правильного выполнения способа функционирования A_f при условии, что учитываются как возможность возникновения ошибок (F) и устойчивых отказов (S), так и возможность их устранения с ограничениями на время: τ_F устранения ошибок и τ_S отказов.

Выходными устройствами человека-оператора являются речь и органы движения (см. рис. 2). С помощью речи можно решать только ограниченное число задач. Наиболее эффективным средством является управление движением рук. Руки человека движутся со скоростью 5—800 см/с. Важнейшей чертой двигательного развития человека является функци-

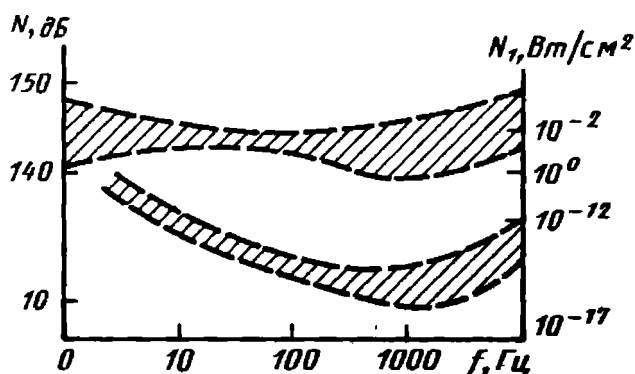


Рис. 3. Области восприятия оператором звуковых сигналов:

N — уровень звука, воспринимаемого человеком; N_1 — интенсивность звука

ональное разделение левой и правой рук. По моторным функциям в 90 % случаев правая рука оказывается ведущей, но по уровню различия статических напряжений и осязанию — левая. Характеристики человека-оператора взаимосвязаны.

Время прохождения сигнала через схему (см. рис. 2) складывается из отрезков времени задержек в каждом элементе

$$T_0 = \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

где τ_i — время задержки в i -м элементе; n — число функционирующих элементов.

Наиболее существенной составляющей в этой сумме является время ответной реакции оператора. Это время складывается из следующих частей: времени от появления сигнала до начала ответного движения и времени ответной реакции. Первая составляющая зависит от того, на какой анализатор оператор воздействует, а также от характера обработки информации оператором. Время же ответной реакции зависит от состояния оператора, его обученности и тренированности. Так, например, на подачу команды голосом после получения сигнала затрачивают 1—2 с, а на подачу команды с помощью механических средств — 0,25 с.

В реальных условиях оператору приходится реагировать на множество сигналов, производя при этом операцию выбора. Время ответной реакции в этом случае увеличивается.

Улучшить характеристики оператора можно путем обучения и тренировок. Эти же меры приводят к сокращению времени ответной реакции и уменьшению ошибок.

При разработке структуры ТСД и организации взаимодействия элементов необходим тщательный учет характеристик оператора.

Организация взаимодействия элементов в системе диагностирования. В зависимости от задач, решаемых в процессе диагностирования, характера использования и эксплуатации, а также конструктивных особенностей ОД элементы в системе диагностиро-

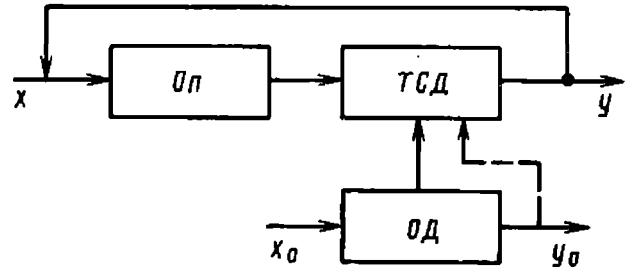


Рис. 4. Схема функционального диагностирования

вания могут иметь различные связи или, иначе говоря, иметь различную структуру. Все известные структуры можно свести к пяти характерным типам.

Наиболее простую структуру имеет система диагностирования (рис. 4), предназначенная для функционального диагностирования. В этом случае объект ОД функционирует, т. е. на него поступают входные воздействия x_0 , на которые он реагирует (реакция y_0). На ТСД с рабочего или контрольных выходов ОД поступают сигналы, несущие информацию о качестве выпускаемой продукции или выполнения ОД своих функций. По этой информации судят о состоянии объекта. Оператор воспринимает с ТСД информацию о состоянии объекта и воздействует на ТСД, уточняя диагноз. Характерной особенностью структуры СД в этом случае является отсутствие связей оператора с объектом и односторонняя связь ТСД с ОД.

Структура системы несколько усложняется (рис. 5), если для целей диагностирования оператор управляет объектом, который находится в КР (в частном случае контрольный режим может совпадать с рабочим). В этом случае в структурной схеме системы диагностирования появляется дополнительная связь оператора с ОД. Наличие связи ОП—ОД расширяет

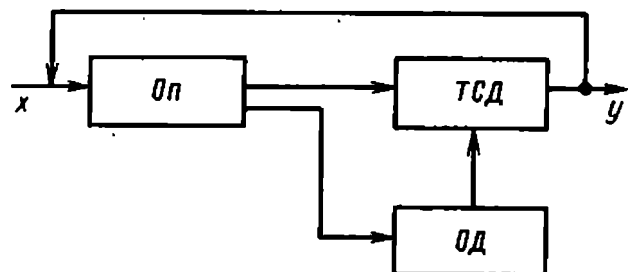


Рис. 5. Схема диагностирования в КР

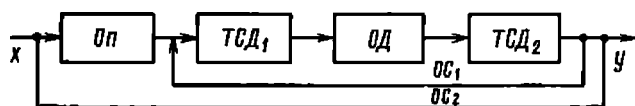
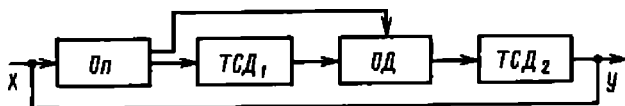
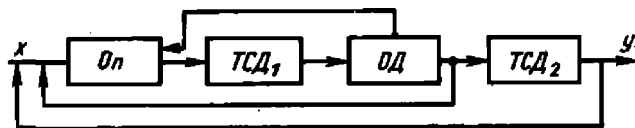


Рис. 6. Схема тестового диагностирования

возможности диагностирования, позволяя выбирать тот режим объекта, при котором будут достигнуты наибольшие достоверность и эффективность диагностирования. Характерным для структур $ТСД$ двух этих типов является отсутствие возможности воздействия на объект с помощью $ТСД$. И в первом и во втором случае $ТСД$ используют лишь для съема и обработки информации о состоянии объекта.

На рис. 6 приведена структурная схема третьего типа, в которой $ТСД$ используются для воздействия на объект с целью осуществления тестового диагностирования. При этом $ТСД$ фактически будут состоять из двух частей: $ТСД_1$ — технических средств, формирующих тестовые воздействия, подаваемые на объект, и $ТСД_2$ — технических средств, с помощью которых осуществляются съем и обработка информации о состоянии объекта с целью формирования диагноза. В этом случае в $ТСД$ появляются два замкнутых контура, образуемых цепями обратных связей: OC_1 — для регулирования воздействий, поступающих на объект с $ТСД_1$, и OC_2 — для передачи оператору, управляющему процессом диагностирования, информации с $ТСД_2$ о состоянии объекта. Характерной особенностью структуры $ОД$ при этом является отсутствие непосредственной связи между оператором и объектом. Связь с $ОД$ оператор осуществляет через $ТСД$.

На рис. 7 и 8 приведены разновидности рассмотренной структуры системы тестового диагностирования. В структурной схеме четвертого типа

Рис. 7. Схема тестового диагностирования при управлении $ОД$ Рис. 8. Схема тестового диагностирования при наличии связи $ОД$ — Op

(см. рис. 7), в отличие от схемы третьего типа (см. рис. 6), существует дополнительная связь между объектом и оператором. Наличие подобной связи обуславливает возможность оператора изменять режим работы при диагностировании. На схеме отсутствует обратная связь в $ТСД$, что говорит о невозможности согласования тестовых воздействий с выходной реакцией объекта.

В структурной схеме пятого типа, приведенной на рис. 8, показана связь выхода объекта с оператором. Эта связь открывает оператору дополнительные возможности получения информации об объекте при анализе его состояния.

Выбор той или иной структуры системы диагностирования в первую очередь связан с особенностями использования и эксплуатации объекта. Так, функциональное диагностирование (первый тип структуры) применяют в том случае, когда необходимо оценить состояние объекта в процессе выполнения поставленных перед ним задач. При этом не допускается вмешательство оператора с целью диагностирования в рабочий режим объекта. Поэтому, наблюдая за объектом в период его функционирования или оценивая качество выпускаемой продукции или выполнения объектом возложенных на него функций, оператор с помощью $ТСД$ определяет состояние $ОД$ и принимает решение о его дальнейшем использовании без вмешательства в рабочие функции.

Структура второго типа, приведенная на рис. 5, характерна для систем диагностирования, предназначенных для использования в процессе подготовки объектов к применению, когда объекты находятся в специальном КР. При этом оператор управляет $ОД$ (включает, выключает, регулирует) и $ТСД$, обеспечивая решение задач диагностирования. Таким образом

организуется диагностирование транспортных средств или других объектов периодического применения по назначению, которые должны проверяться перед использованием.

Системы тестового диагностирования (см. рис. 6—8) используют для оценки состояния ОД, на которые возможна подача стимулирующих (тестовых) воздействий. Анализ реакции на тестовое воздействие позволяет определить, в каком состоянии находится объект или как состояние ОД изменяется со временем.

Элементы в системе диагностирования взаимодействуют в соответствии с принятой организацией. Организация СД, в свою очередь, зависит от организации процесса диагностирования и использования ОД и свойств объекта, а также ТСД.

Диагностирование может выполняться непрерывно или периодически. Периодическое диагностирование, в свою очередь, может быть регулярным, когда интервалы времени между двумя последовательными диагностированиями (период диагностирования) постоянны, или случайно-периодическим, когда интервалы имеют случайную величину.

Для диагностирования объект может переводиться в специальный КР или диагностирование может осуществляться в рабочем (дежурном) режиме [РР (ДР)]. На рис. 9 показаны возможные временные диаграммы диагностирования объекта абсолютно надежными ТСД. Анализ диаграмм показывает, что в процессе диагностирования в КР могут быть решены различные задачи. Так, в КР выполняют только проверку работоспособности (рис. 9, а) или работоспособности и прогнозирования (рис. 9, б). Наконец, в КР могут осуществляться последовательно (рис. 9, в) проверка работоспособности, поиск возникшего дефекта и его устранение. При этом поиск и устранение возникшего дефекта, а также последующую проверку работоспособности объекта обычно объединяют в один процесс восстановления работоспособности объекта.

Организация взаимодействия элементов в СД должна учитывать возможные ситуации, возникающие на

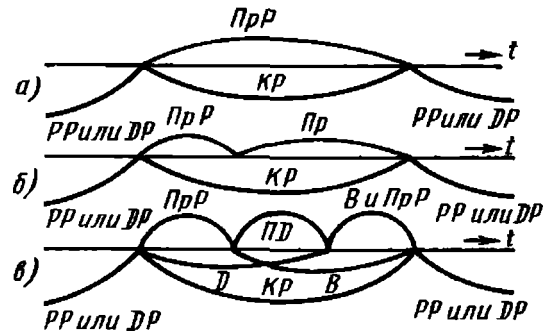


Рис. 9. Временная диаграмма диагностирования:

ПрР — проверка работоспособности; Пр — прогнозирование; ПД — поиск дефекта; Д — диагностирование; В — восстановление; t — время

практике, в зависимости от соотношения величин периодов диагностирования и использования ОД. На рис. 10 приведены типичные ситуации в системе диагностирования в зависимости от моментов прихода заявок на использование или диагностирование объекта случайно-периодического использования.

Если объект регулярно-периодического использования (диагностируется случайно-периодически), то в отличие от объекта случайно-периодического использования заявка на диагностирование, пришедшая во время РР (использования), теряется, а заявка на использование объекта, поступившая в процессе КР, прерывает его без последующего возобновления.

Подобные ситуации не могут возникнуть, если объект регулярно-периодического использования диагностируется регулярно-периодически, поскольку период диагностирования, длительность использования и перерывы между последовательными использованиями постоянны.

Из свойств объекта и ТСД при организации взаимодействия элементов в системе диагностирования в первую очередь необходимо учитывать их надежность, т. е. возможность возникновения дефектов и отказов технических средств диагностирования в процессе диагностирования, что может привести к ошибочным оценкам состояния объекта. На рис. 11 приведены возможные на практике ситуации, в которых ТСД можно рассматривать как идеальные, т. е. не учитывать возможность возникновения де-

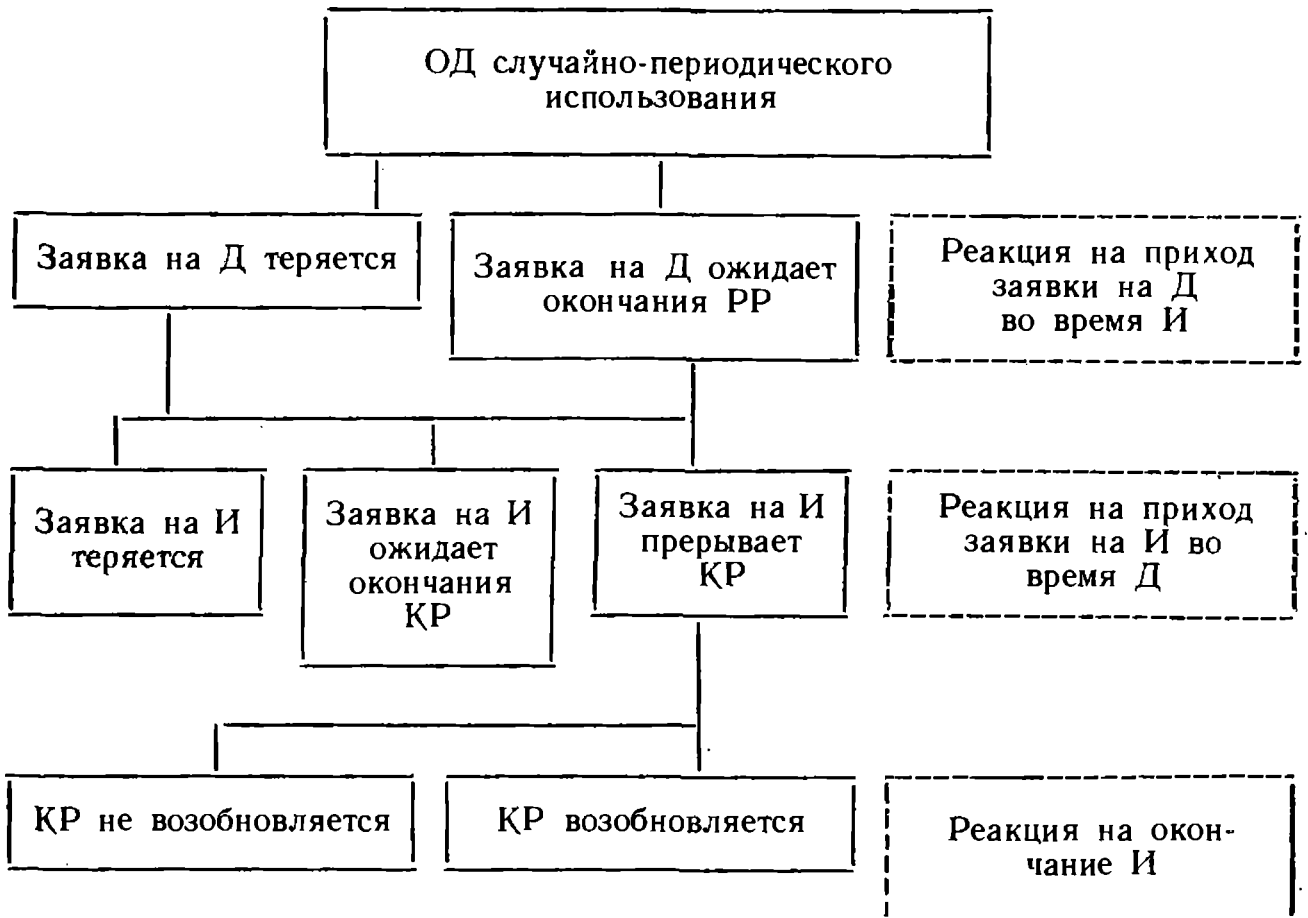


Рис. 10. Типичные ситуации при диагностировании ОД

фектов или отказов в процессе диагностирования. Такой подход возможен только в том случае, когда ТСД высоконадежны, а длительность КР мала. То же самое справедливо и для устройств самоконтроля в ТСД. Следует учитывать также организацию самоконтроля ТСД, который может выполняться до или после диагностирования объекта или как до, так и после диагностирования.

Оптимизация организации системы диагностирования. Для решения задачи организации взаимодействия элементов в ТСД необходимо выбрать критерий, по которому можно было бы оценить организацию СД или сравнить различные системы диагностирования.

В выбранном критерии K необходимо учесть основные свойства элементов СД, такие, как безотказность (Б), контролепригодность (Кп), ремонтпригодность (Рп) объекта и технических средств диагностирования, а также показатели Оп, организации диагностирования (Ор) и использова-

ния И объекта, т. е. критерий K можно представить в виде зависимости

$$K = K(B, Kп, Рп, Оп, Ор, И). \quad (1)$$

При этом задача организации взаимодействия элементов системы диагностирования формулируется следующим образом:

найти максимальное значение критерия K_{\max} , которое может быть достигнуто при заданных значениях показателей $B_3, Kп_3, Рп_3, Оп_3, Ор_3, И_3$; или

найти значения показателей Б, Кп, Рп, Оп, Ор, И, обеспечивающих достижение заданного значения критерия K_3 . Могут решаться также и частные задачи, когда заданы значения или ограничения на некоторые из показателей, характеризующих свойства ОД, ТСД и Оп. Задачи организации СД могут быть решены, если предположить, что система диагностирования может находиться в конечном множестве состояний, а процесс перехода из состояния в состояние рассматривать как случайный марковский

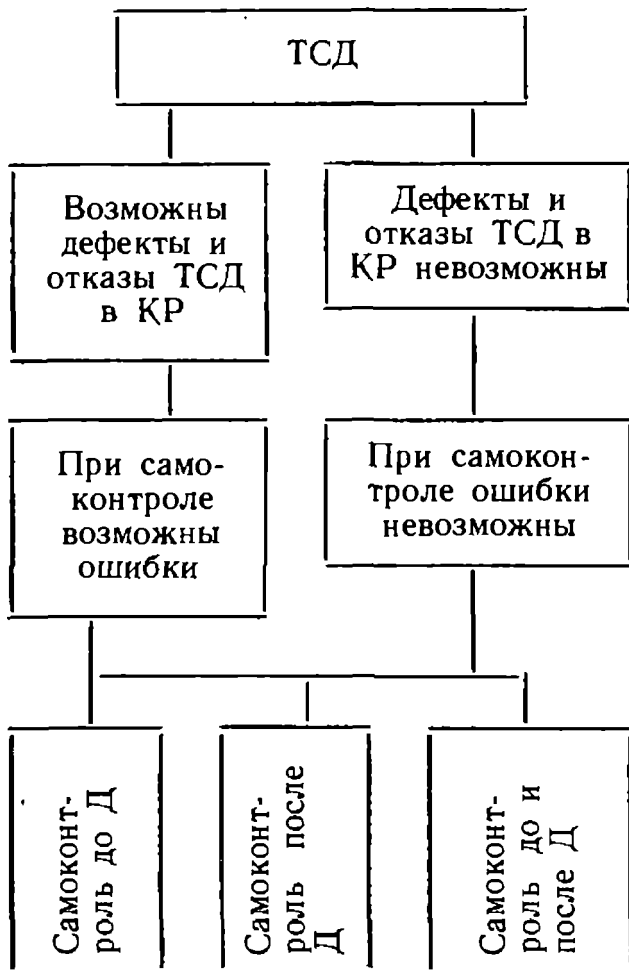


Рис. 11. Ситуация в СД при учете дефектов в ТСД:
И — использование ОД; Д — диагностирование

или полумарковский процесс. При этих предположениях получают аналитическое выражение для показателя K_r готовности ОД (вероятности отсутствия дефекта в объекте в заданный момент времени), который может рассматриваться в качестве критерия организации системы диагностирования для большого числа разнообразных технических объектов.

На рис. 12 приведен обобщенный алгоритм построения аналитического выражения для K_r , в котором предусмотрено последовательное выполнение следующих операций:

- определение множества E обобщенных состояний;
- составление графа переходов для обобщенных состояний;
- разметка графа переходов (обозначение вершин и др.);
- составление по графу системы алгебраических уравнений;

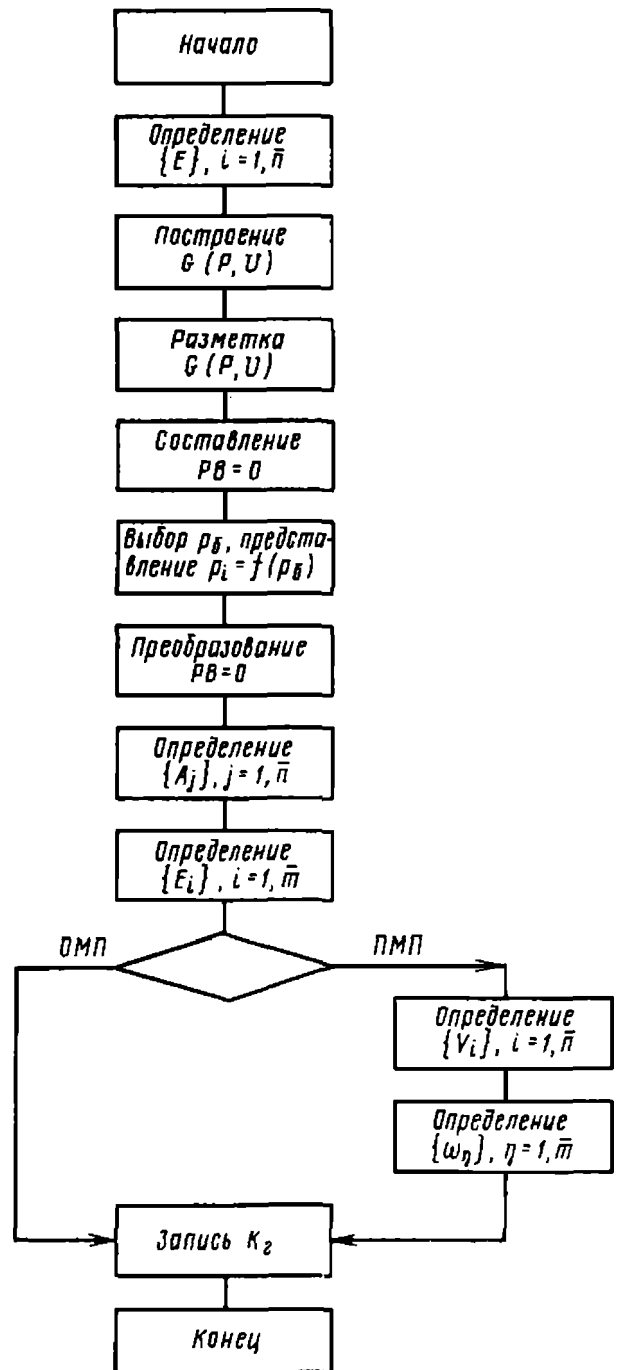


Рис. 12. Обобщенный алгоритм построения выражения для K_r

выбор базовой вероятности p_B и выражение вероятностей p_i через p_B ;

преобразование системы алгебраических уравнений с учетом p_B ;

решение полученной системы уравнений относительно коэффициентов $A_j, j = 1, n$;

выбор совокупности интересующих состояний;

при использовании аппарата однородных марковских процессов (ОМП) записывается выражение для показателя готовности K_r ;

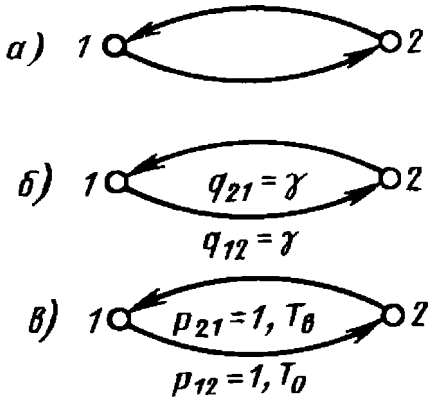


Рис. 13. Графы переходов для двух состояний СД:

а — общий случай; б — марковский процесс; в — полумарковский процесс

при использовании аппарата полумарковских процессов (ПМП);
 определение среднего значения безусловной длительности пребывания СД в каждом состоянии e_i ;
 определение безусловной длительности отсутствия дефектов при нахождении ОД в каждой из выбранной совокупности состояний;
 запись выражения для показателя готовности K_r .

Пример 1. Система диагностирования может находиться в двух состояниях

$$E = \{e_1, e_2\} \quad (n = 2),$$

из которых: первое — ОД функционирует, его работоспособность непрерывно определяется; второе — ОД восстанавливается непосредственно после возникновения дефекта.

Необходимо получить аналитическую зависимость вида (1).

Решение:

1. Составляют граф переходов СД из состояния в состояние. Граф, приведенный на рис. 13, а, будет различным для процессов переходов однородного марковского (рис. 13, б) и полумарковского (рис. 13, в) при средних длительностях пребывания СД в состоянии e_i до перехода $T_0 = 1/\lambda$, $T_в = 1/\gamma$. Переход из состояния e_i в состояние e_j осуществляется мгновенно.

2. Используя известные правила, по графу переходов составляют систему алгебраических уравнений для определения стационарных вероят-

ностей пребывания СД в состояниях e_i $i = \overline{1, n}$.

Если процесс переходов однородный марковский, то

$$P_1 \lambda = P_2 \gamma$$

(в рассматриваемом случае одно уравнение при $P_1 + P_2 = 1$, где λ и γ — интенсивности соответственно отказа и восстановления).

Если процесс переходов полумарковский, то

$$\pi_1 = P_{21} \pi_2; \quad \pi_2 = P_{12} \pi_1 \quad \text{и} \quad \pi_1 = \pi_2$$

при $\pi_1 + \pi_2 = 1$, где π_i — стационарная вероятность пребывания СД в состоянии e_i без учета средней длительности V_i пребывания в этом состоянии, а P_i — стационарная вероятность пребывания СД в состоянии e_i с учетом V_i , $i = 1, 2$.

3. Выбирают базовую вероятность и выражают стационарную вероятность через $P_б$.

Если процесс переходов однородный марковский, то

$$P_1 = A_1 P_б; \quad P_2 = A_2 P_б.$$

Если процесс переходов полумарковский, то

$$\pi_1 = A_1 \pi_б; \quad \pi_2 = A_2 \pi_б.$$

4. Используя обозначения $P_б$, преобразуют уравнение.

Если процесс переходов однородный марковский, то

$$\lambda = A_1 \gamma; \quad P_б = A_1 P_б.$$

Если процесс полумарковский, то

$$\pi_1 = A_1 \pi_б; \quad \pi_2 = A_2 \pi_б.$$

5. Определяют A_i , решая преобразованные уравнения для процессов переходов:

однородного марковского

$$A_1 = 1; \quad A_2 = \frac{\lambda}{\gamma};$$

полумарковского

$$A_1 = 1; \quad A_2 = 1.$$

6. В качестве интересующего нас состояния выбираем $E = \{e_1\}$.

7. Строят алгебраическое выражение, описывающее K_r , для процессов переходов:

однородного марковского

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{A_1}{A_1 + A_2} = \\ = \frac{1}{1 + \lambda/\gamma} = \frac{\gamma}{\lambda + \gamma};$$

полумарковского; в этом случае алгоритм продолжается.

Далее определяют средние значения безусловной длительности пребывания СД в каждом из e_i состояний:

$$V_i = \sum_{j=1}^l P_{ij} M(\tau_{ij}),$$

и, следовательно, $V_1 = T_0$, $V_2 = T_B$.

8. Находят значения безусловного времени ω_i отсутствия дефектов в ОД на отрезке времени V_i :

$$\omega_i = T_0.$$

9. Выполняют построение аналитического выражения для K_{Γ} .

Для полумарковского процесса переходов

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n A_i V_i} = \frac{A_1 \omega_1}{A_1 V_1 + A_2 V_2} = \\ = \frac{1 T_0}{1 T_0 + 1 T_B} = \frac{T_0}{T_0 + T_B} = \\ = \frac{1}{1 + \lambda/\gamma}.$$

Вероятность

$$P_i = \frac{A_i V_i}{\sum_{i=1}^n A_i V_i},$$

т. е. переход от однородного марковского процесса к полумарковскому процессу осуществляется при определении стационарной вероятности умножением A_i на длительность V_i .

Разметка графа соответствует составлению матриц

$$\bar{P} = \| P_{ij} \| \text{ и } \bar{F} = \| F_{ij} \|$$

и решению системы $\bar{P} - \bar{P}\bar{P}$.

Если на графе проставляют математическое ожидание $M(\tau_{ij})$ случайных значений времени τ_{ij} перехода из состояния e_i в состояние e_j , то матрица \bar{F} , используемая для определения

$$M(\tau_{ij}) = \int_0^{\infty} \tau_{ij} dF_{ij}(\tau_{ij})$$

с учетом закона распределения τ_{ij} , не нужна.

При решении задачи организации СД рассмотрение процесса переходов СД из состояния в состояние как марковского процесса позволяет использовать более простой математический аппарат. Но при этом принимают, что все случайные величины, используемые в процессе расчета, подчиняются простейшему экспоненциальному закону распределения. Если же законы распределения случайных величин отличны от экспоненциального, то процесс переходов СД из состояния в состояние рассматривают как полумарковский, что усложняет выполненные расчеты.

Пример 2. Получить формальные условия выбора математического аппарата марковского или полумарковского случайного процесса построения аналитического выражения для K_{Γ} .

Предполагаем, что СД может находиться в четырех состояниях:

ОД функционирует при отсутствии в нем дефекта;

ОД функционирует, но в объекте возник дефект;

ОД диагностируется; дефект в объекте отсутствует;

в ОД возник дефект; объект диагностируется и восстанавливается.

Построим граф переходов, предполагая, что имеет место однородный марковский процесс (рис. 14). Воспользовавшись этим графом, составим систему уравнений:

$$P_1(v + \lambda) = P_3 q_{\Gamma} + P_4 q_{\Gamma},$$

$$P_3 q_{\Gamma} = v P_1, \quad P_2 v = \lambda P_1, \quad P_4 q_{\Gamma} = P_2 v.$$

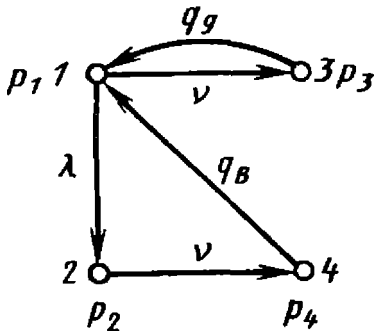


Рис. 14. Граф переходов для четырех состояний СД

Выбрав в качестве базовой вероятность P_1 , определим показатель готовности, как вероятность нахождения СД в состоянии 1:

$$K_{\Gamma} = \frac{A_1}{\sum_{i=1}^4 A_i}$$

Поскольку $A_1 = 1$; $A_2 = \frac{\lambda}{\nu}$; $A_3 = \frac{\nu}{q_{\text{Д}}}$; $A_4 = \frac{\lambda}{q_{\text{В}}}$, то

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\nu} + \frac{\nu}{q_{\text{В}}} + \frac{\lambda}{q_{\text{В}}}}$$

или, учитывая, что

$$\lambda = \frac{1}{T_0}; \quad \nu = \frac{1}{T_{\text{Д}}}; \quad q_{\text{Д}} = \frac{1}{\tau_{\text{Д}}};$$

$$q_{\text{В}} = \frac{1}{T_{\text{В}}},$$

имеем

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0 T_{\text{Д}}}{T_0 T_{\text{Д}} + T_{\text{Д}}^2 + T_0 \tau_{\text{Д}} + T_{\text{Д}} T_{\text{В}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{Д}}$ — период диагностирования.

Рассматривая процесс переходов как полумарковский процесс, объединяют первое и второе состояния СД и

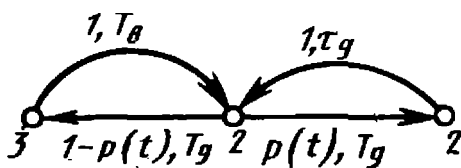


Рис. 15. Граф переходов для трех состояний СД

ограничиваются анализом графа с тремя состояниями (рис. 15):

ОД, в котором возможен дефект, функционирует;

ОД диагностируется при отсутствии в нем дефекта;

в ОД возник дефект, объект диагностируется и восстанавливается.

Поскольку

$$P(t) = e^{-\frac{T_{\text{Д}}}{T_0} t}$$

и все длительности подчиняются экспоненциальному закону распределения, показатель готовности будет определяться из выражения

$$K_{\Gamma}^* = \frac{\omega_1}{T_{\text{Д}} + e^{-\frac{T_{\text{Д}}}{T_0} \tau_{\text{Д}}} + \left(1 - e^{-\frac{T_{\text{Д}}}{T_0} \tau_{\text{Д}}}\right) T_{\text{В}}}$$

где ω_1 — время, в течение которого в ОД, находящемся в состоянии 1, отсутствует дефект;

$$\omega_1 = \int_0^{\infty} \left[\int_0^t e^{-\lambda t} dt \right] f(t) dt, \quad (3)$$

где плотность распределения $f(t) = \nu e^{-\nu t}$

Преобразуя (3), получим

$$\omega_1 = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right) \nu e^{-\nu t} dt = \frac{1}{\lambda} + \frac{\nu}{\lambda(\lambda + \nu)} e^{-(\lambda + \nu)t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda + \nu}$$

или

$$\omega_1 = \frac{T_0 T_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} + T_0}. \quad (4)$$

Таким образом, показатель готовности в данном случае будет определяться из следующего выражения:

$$K_{\Gamma}^* = \frac{T_0 T_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}}^2 + T_0 T_{\text{Д}} + T_{\text{Д}} T_{\text{В}} + T_0 \tau_{\text{Д}} + \tau_{\text{Д}} \left[T_0 - e^{-\frac{T_{\text{Д}}}{T_0} \tau_{\text{Д}}} (T_{\text{Д}} + T_0) \right]} \quad (5)$$

Если обозначить $T_0 T_d = a$, $T_0 T_d + T_d^2 + T_0 \tau_d + T_d T_B = b$,

$$\tau'_d \left[T_0 - e^{-\frac{T_d}{T_0}} (T_d + T_0) \right] = \Delta, \quad (6)$$

то выражения (2) и (5) примут вид

$$K_\Gamma = \frac{a}{b} \quad (7)$$

и

$$K_\Gamma^* = \frac{a}{b + \Delta}. \quad (8)$$

Следовательно, при $\Delta = 0$ показатель готовности имеет одну и ту же величину при использовании аппаратов марковского и полумарковского процессов, т. е. $K_\Gamma = K_\Gamma^*$. Соответственно, если $\Delta > 0$, то $K_\Gamma > K_\Gamma^*$, если $\Delta < 0$, то $K_\Gamma < K_\Gamma^*$.

Таким образом, исследовав Δ , можно получить ответ на интересующий нас вопрос. Поскольку $\tau'_d > 0$, то отношение между величинами K_Γ и K_Γ^* определяется выражением в скобках в формуле (6), т. е.

$$T_0 - e^{-\frac{T_d}{T_0}} (T_d + T_0).$$

Случай, когда $\Delta = 0$, справедлив при

$$T_0 = e^{-\frac{T_d}{T_0}} (T_d + T_0),$$

или

$$\frac{T_0}{T_d + T_0} = e^{-\frac{T_d}{T_0}},$$

или, наконец,

$$B_1 = 1 + \frac{T_d}{T_0} = e^{-\frac{T_d}{T_0}} = c. \quad (9)$$

Графическое изображение условия (9) приведено на рис. 16.

Таким образом, при $T_d/T_0 = 0$ $K_\Gamma = K_\Gamma^*$; при $T_d/T_0 > 0$ $K_\Gamma > K_\Gamma^*$, т. е. значение показателя готовности, определяемого с помощью аппарата марковских процессов, больше показателя готовности, определяемого с помощью аппарата полумарковских

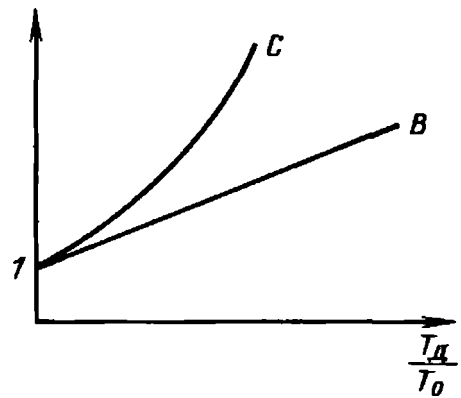


Рис. 16. Графическое изображение условия (9)

процессов. Это различие между K_Γ и K_Γ^* уменьшается с уменьшением величины T_d/T_0 и при $T_d/T_0 = 0,1$ не превышает 0,5%. Равенство показателей готовности K_Γ и K_Γ^* при $T_d/T_0 \rightarrow 0$ позволяет по величине ω_1 определить влияние закона распределения отрезков времени между последовательными диагностированиями на показатель готовности объекта. Так, если $T_d = \text{const}$, то в соответствии с (3)

$$\omega'_1 = \int_0^{T_d} e^{-\frac{t}{T_0}} dt = T_0 \left(1 - e^{-\frac{T_d}{T_0}} \right),$$

и если разложить экспоненту в ряд, получим

$$\omega'_1 \cong T_0 \frac{T_d}{T_0} = T_d.$$

С другой стороны, в соответствии с (4)

$$\omega_1 = \frac{T_d}{1 + \frac{T_d}{T_0}}.$$

Следовательно, $\omega'_1 > \omega_1$.

Однако, чем меньше T_d/T_0 , тем ω'_1 ближе к ω_1 .

Если T_d случайная величина, подчиняющаяся закону Рэлея, то в соответствии с (3)

$$\omega'_1 = T_d \exp \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_d}{T_0} \right)^2 \times \left[1 - \Phi \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_d}{T_0} \right) \right],$$

где

$$T_d = \int_0^{\infty} t_d f_p(t_d) dt_d, \quad \Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \int_0^x e^{-x^2} dx.$$

Разложив экспоненту в ряд и отбросив члены высшего порядка малости, а также приняв во внимание, что $\Phi(x) \cong x$ при малых x , получим

$$\omega_1'' \cong T_d \left[1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_d}{T_0} \right)^2 \right] \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_d}{T_0} \right).$$

Сравнивая величины ω_1 и ω_1'' , определим

$$\frac{\omega_1''}{\omega_1} = \left[1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_d}{T_0} \right)^2 \right] \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{T_d}{T_0} \right) \left(1 + \frac{T_d}{T_0} \right).$$

Из формулы следует, что при $T_d/T_0 = 0,01$ $\omega_1'' > \omega_1$ на 0,4%, при $T_d/T_0 = 1$ — примерно на 4% и при $T_d/T_0 = 0,5$ — на 56%.

Полученные результаты позволяют прийти к выводу, что при малых значениях отношения T_d/T_0 готовность объекта не зависит от закона распределения отрезков времени между последовательными диагностированиями. Поэтому в этих условиях можно использовать аппарат однородных марковских процессов, с помощью которого достаточно просто получают решение поставленной задачи.

Если закон распределения моментов возникновения дефектов отличен от простейшего, то использование аппарата однородных марковских процессов при решении задач организации дает значительные погрешности.

Действительно, если закон экспоненциальный и $T_d = \text{const}$, то $\omega_1' \cong T_d$, а если закон Рэлея, то $\omega_1''' = T_0 \Phi(0,5\sqrt{\pi} T_d/T_0)$. В случае,

если $T_d/T_0 \ll 1$, то $\omega_1''' = T_0 \cdot 0,5 \times \sqrt{\pi} T_d/T_0 = T_d \cdot 0,5\sqrt{\pi}$.

Таким образом, отношение

$$\frac{\omega_1'''}{\omega_1} = \frac{0,5\sqrt{\pi} T_d}{T_d} = 0,5\sqrt{\pi} \cong 0,886,$$

т. е. допустимая при этом погрешность составляет примерно 12%.

Поскольку из рассмотренного графа (см. рис. 15) можно получить (с помощью надстройки) графы более сложных ситуаций, то полученные результаты имеют общий характер.

Наличие аналитической зависимости (1) позволяет решить задачу организации систем диагностирования в сформулированном ранее виде. Так, если $B = \lambda(T_0)$; $Op = \nu(T_d)$; $K_{\Pi} = \mu(\tau_{\mu})$, где μ — интенсивность возвращения из состояния проверки в рабочее состояние; $\tau_{\mu} = 1/\mu$; $P_{\Pi} = \gamma(\tau_{\gamma})$ и $K = K_{\Gamma}$, то, используя зависимость (4), можно, взяв, в частности, производную $\partial K_{\Gamma}/\partial \nu$ и приравняв ее к нулю, получить значение ν_0 , соответствующее $K_{\Gamma \text{ max}}$. Подставив ν_0 в (4), получим

$$K_{\Gamma \text{ max}} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\lambda}{\mu} + \left(1 + \frac{\lambda}{\gamma}\right)}}$$

или

$$K_{\Gamma \text{ max}} = \frac{T_0}{(1 + \tau_{\gamma}) + 2\sqrt{T_0 \tau_{\mu}}}$$

2. ВСТРОЕННЫЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Общие сведения. Обеспечение требуемых показателей надежности сложных объектов достигается проведением многих мероприятий, в том числе выбором, отбором и тренировкой компонент, элементов, узлов и объектов в целом, облегчением нагрузочных режимов их работы, снижением влияния внешних вредных воздействий и помех, введением аппаратурной и информационной избыточности, организацией тестового и функционального диагностирования, организацией процедур восстановления и обслуживания и т. д.

Если в задачу диагностирования входит лишь обнаружение существенных дефектов (неисправностей, нарушающих функционирование системы), то по отношению к ОД процесс диагностирования является пассивным актом. В этом случае на надежность системы влияет только процесс восстановления ОД по результатам диагностирования. Если в задачу диагностирования входит поиск дефектов, не влияющих в данный момент на функционирование системы (обнаружение несущественных для данного режима функционирования неисправностей), то это повышает надежность системы. Иначе неизбежно происходит накопление необнаруживаемых (скрытых) дефектов, что в конечном итоге ухудшает такой основной показатель надежности, как безотказность.

В системах функционального диагностирования специальные тестовые воздействия подают на объект (т. е. на объект поступают только рабочие воздействия, предусмотренные рабочим алгоритмом функционирования объекта). Системы функционального диагностирования используют для решения задач проверки правильности функционирования и поиска дефектов, нарушающих нормальное функционирование. Эти системы работают в том случае, когда объект непосредственно реализует предписанный ему алгоритм функционирования (объект применяется по назначению). Возможно также использование систем функционального диагностирования перед или после применения объекта по назначению. Однако при этом может потребоваться имитация режима функционирования ОД (в частности, имитация рабочих воздействий).

Аппаратурные средства системы функционального диагностирования, как правило, конструктивно сопряжены с ОД. При этом каждый ОД имеет встроенные аппаратурные средства диагностирования, которые применительно к устройствам вычислительной техники носят название схем встроенного контроля (СВК), применительно к подвижным объектам — бортовых средств контроля и применительно к технологическим объектам — средств оперативного (цен-

трализованного) контроля и т. д.

Первоисточником нарушений нормальной работы ОД или ухудшения тех или иных его характеристик являются физические дефекты компонент для элементов объекта, а также связей между ними. *Неисправностью* называют формализованное представление факта проявления дефекта в виде неправильных значений сигналов на входах и выходах элементов объекта; *ошибкой* — неправильные значения сигналов на внешних выходах рассматриваемого объекта, вызываемые неисправностями.

Одиочная неисправность элемента или связи может привести к кратной ошибке на внешних выходах объекта. Причем для многовыходных объектов кратность ошибок обычно тем выше, чем больше «расстояние» в направлении распространения сигналов от места возникновения неисправности объекта до его внешних выходов, а также чем больше период времени работы неисправного объекта от момента возникновения неисправности до момента контроля ошибок на внешних выходах объекта.

Математической моделью неисправностей и ошибок в дискретных и некоторых непрерывных объектах являются логические, в частности константные неисправности. При разработке систем тестового диагностирования чаще всего используют модель константных неисправностей. Для систем функционального диагностирования дискретных объектов более распространена модель логических неисправностей, с помощью которой учитывают кратковременные дефекты, неисправности и ошибки типа сбоев.

Применение самопроверяемых схем контроля принципиально необходимо в вычислительных системах с динамической избыточностью, когда состав находящегося в работе оборудования является неизбыточным. В объектах с динамической избыточностью аппаратура, находящаяся в резерве, включается в работу лишь при необходимости замещения находящихся в работе (обычно неизбыточных) частей объекта (или объекта в целом) при появлении в них устойчивых неисправностей или систематических сбоев. С по-

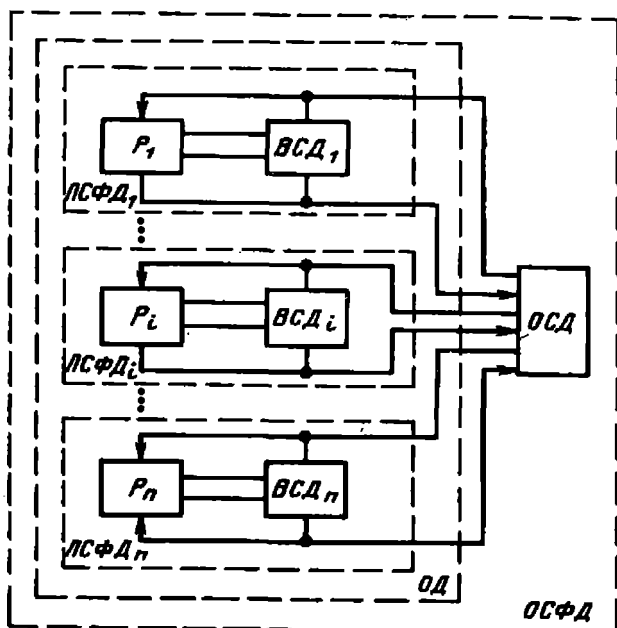


Рис. 17. Структура системы функционального диагностирования

мощью самопроверяемых СВК получают экономные реализации так называемого ядра вычислительной машины или системы — той части аппаратурных и программных средств, работоспособность которых должна быть гарантирована для того, чтобы тестовое диагностирование (точнее, самодиагностирование) технического состояния остальной части машины или системы было возможным и достоверным.

Дискретные объекты могут быть как аппаратурно избыточными, так и с аппаратурной статической или динамической избыточностью. Избыточные объекты содержат минимум аппаратуры, необходимой для выполнения исправным объектом заданных функций. Объекты со статической избыточностью имеют дополнительную резервную аппаратуру, находящуюся под нагрузкой всегда, когда работает объект. Характерным примером объектов со статической избыточностью являются объекты с *мажоритарным резервированием* (в частности, трюированием) на уровне отдельных элементов, узлов или объектов в целом.

Система функционального диагностирования технического состояния объектов всех трех видов (неизбыточных, со статической и динамической избыточностью) должна решать задачи проверки правильности функциони-

рования и поиска дефектов (неисправностей, ошибок).

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 приняты системы, подсистемы, функциональные устройства, агрегаты, блоки, сменные узлы и т. п. Эти части называют сменными блоками, подразумевая при этом, что в каждом конкретном случае сменный блок может состоять как из одного, так и из нескольких съемных конструктивных узлов. При делении 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. 17 приведена структура системы функционального диагностирования технического состояния сложного ОД. Связи, существующие между сменными блоками $P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$, на рисунке не приведены. Каждый сменный блок P_i объекта имеет в общем случае свои встроенные средства диагностирования (ВСД), 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.

Приведенная на рис. 17 общая схема может быть использована как для непрерывных, так и для дискретных объектов. Средства ЛСФД для непрерывных объектов представляют собой устройства, задающие предельные допустимые значения контролируемых параметров и сравнивающие эти значения с фактическими. Для дискретных объектов средства ЛСФД реализуются в виде средств встроенного контроля (СВК).

Далее будут рассматриваться принципы организации системы функционального диагностирования применительно к непрерывным объектам.

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

При первом подходе встроенные в каждый сменный блок локальные средства диагностирования проводят сравнение контролируемых параметров с допустимыми значениями и формируют обобщенный результат в виде «годен — не годен». В ОСД поступают обобщенные сведения о техническом состоянии сменных блоков. При возникновении дефектов ОСД определяют неисправный сменный блок, место дефекта с указанием его оператору и, возможно, запасной режим работы объекта.

При втором подходе каждый сменный блок снабжают лишь элементами, необходимыми для нормализации контролируемых параметров. Значения параметров в виде аналоговых сигналов поступают на ОСД, в которых осуществляется аналого-цифровое преобразование параметров, сравнение их значений с допустимыми значениями, выработка обобщенных сигналов о техническом состоянии объекта, а также операции по поиску и указанию мест дефектов и изменению режимов работы. СД, соответствующие первому подходу, имеют более развитые ЛСФД по сравнению с системами, соответствующими второму подходу. Однако ОСД, используемые при втором подходе, сложнее ОСД, используемых при первом подходе.

Для описания первого подхода организации систем функционального диагностирования рассмотрим некоторый сменный блок P_i (рис. 18), имеющий входы y_{i1}, \dots, y_{it_i} и выходы z_{i1}, \dots, z_{it_i} . С помощью методов, изложенных в гл. 2, найдем для этого блока минимальную совокупность выходов, характеризующую правильное функционирование блока в одном из режимов работы объекта.

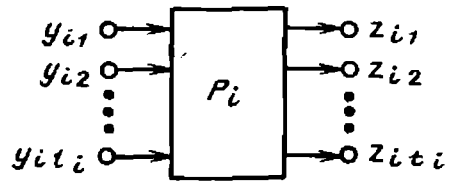


Рис. 18. Сменный блок объекта диагностирования

Пусть в эту совокупность входят выходы $z_i^1, z_i^2, \dots, z_i^{r_i}$, где $\{z_i^1, z_i^{r_i}\} \subseteq \{z_{i1}, z_{it_i}\}$. 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 проводят с помощью устройств сравнения $УС_1, \dots, УС_{r_i}$ (рис. 19). Допустимые значения (верхний предел «>» и нижний предел «<») параметров формируются в устройстве задания уставок (УЗУ) для блока P_i . Изменение значений уставок (настройка) в зависимости от режима работы объекта происходит по командам управления, поступающим из ОСД.

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 объ-

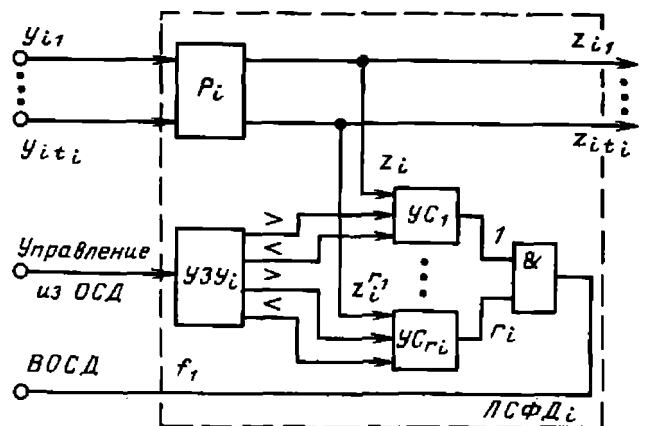


Рис. 19. Локальная система функционального диагностирования

екта, 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.

При возникновении дефекта в каком-либо сменном блоке P_i на выходах блока возникают недопустимые сигналы, которые являются входными сигналами сменных блоков. С этими блоками связаны выходы блока P_i . В результате может оказаться, что недопустимые выходные сигналы появятся на выходах других сменных блоков. Если каждый сменный блок имеет свою ЛСФД, то сигналы, равные нулю, появятся на выходах схем совпадения нескольких блоков. В связи с этим необходимо выявить первоисточник возникновения недопустимых сигналов, т. е. выявить сменный блок (или группу сменных блоков, охваченных обратными связями), в котором недопустимые выходные сигналы появились из-за имеющегося в нем дефекта, а не из-за поступления на его вход недопустимых входных сигналов. Решение этой задачи возлагается на 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 с помощью логического элемента I 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 $P_{\Sigma i}$ 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 $P_{\Sigma i}$ блоков) или его СД $_i$ гарантированно неисправны, если соответствующая функция f_i (функция $f_{\Sigma i}$) равна нулю и, кроме того, каждая из функций f_{i1}, \dots, f_{il_i} , соответствующих пред-

шественникам блока P_i (группы $P_{\Sigma i}$ блоков), равна единице. Аналитически эти условия можно представить в виде логической функции φ_i ($\varphi_{\Sigma i}$) неисправности блока P_i (группы $P_{\Sigma i}$ блоков):

$$\varphi_i = \bar{f}_i f_{i1}, \dots, f_{il_i};$$

$$(\varphi_{\Sigma i} = \bar{f}_{\Sigma i} f_{i1}, \dots, f_{il_i}).$$

Для получения общего сигнала φ неисправности объекта достаточно функцию φ_i ($\varphi_{\Sigma i}$) подать на логический элемент ИЛИ.

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 алгоритм на ЭВМ.

Для описанной ОСФД возможны параллельная и последовательная аппаратные реализации. При последовательной реализации требуется установка коммутаторов для опроса выходов f_i ЛСФД $_i$, а также введение в схемы блоков Q_i запоминающих элементов на входах f_i .

Системы функционального диагностирования, соответствующие второму подходу (когда сравнение значений параметров осуществляется в ОСД), представляют собой при последовательной аппаратной реализации известные системы оперативного контроля (СОК) с развитыми устройствами аналого-цифрового преобразования и сравнения. Подход, при котором средствами СОК (как общими средствами диагностирования) осуществляется также поиск дефектов, состоит в следующем.

Пусть ОД представлен совокупностью функционально связанных между собой сменных блоков. С помощью методов, приведенных в гл. 2, найдем минимальные или минимизированные совокупности контрольных точек для проверки правильности функционирования и поиска дефектов для каждого режима работы ОД. С помощью СОК (циклически и по вызову) осуществляют опрос контрольных точек, характеризующих правильность

функционирования объекта, проводят аналого-цифровое преобразование параметров и сравнение преобразованных величин с допустимыми значениями. При выходе какого-либо параметра из области допустимых значений СОК переключаются на контроль параметров, предназначенных для поиска дефектов. Результаты этого контроля должны быть обработаны с помощью алгоритма поиска дефектов.

Проведем сравнительную оценку СФД, построенных в соответствии с первым и вторым подходами.

Системы, соответствующие первому подходу, имеют следующие достоинства:

- децентрализацию СД за счет встраивания средств ЛСФД в каждый сменный блок;

- существенное упрощение структуры ОСФД;

- уменьшение требований к быстродействию ОСД, поскольку диагностирование технического состояния объекта проводится независимо от ЛСФД каждого сменного блока.

Преимущества СФД, соответствующих второму подходу:

- меньший объем СД за счет централизации операций сравнения;

- дополнительные возможности унификации СД.

Встроенные средства диагностирования ЭВМ. К современным ЭВМ предъявляют высокие требования по надежности (времени восстановления, достоверности, ремонтпригодности). Методами и средствами функционального диагностирования определяют правильность функционирования объекта и места неисправностей, нарушающих нормальную работу объекта в текущий момент. Функциональное диагностирование обычно осуществляют аппаратурными встроенными средствами.

Снижение стоимости микрокомпонент привело к увеличению объема дополнительной аппаратуры встроенного контроля и определило новый подход к аппаратурным средствам диагностирования — создание полностью самопроверяемых (ПСП) ЭВМ. В ПСП ЭВМ в процессе функционирования обнаруживаются все неисправности заданного класса как в основной,

так и дополнительной аппаратуре (аппаратуре встроенного контроля).

Метод построения самопроверяемых схем встроенного контроля (ССВК) состоит в следующем. В этих схемах имеются два выхода f_1 и f_2 , в отличие от несамопроверяемых схем встроенного контроля (СВК) с одним выходом. В ССВК любая неисправность из заданного множества обнаруживается на выходах f_1 и f_2 в процессе правильного функционирования контролируемой аппаратуры. Можно строить полностью или частично самопроверяемые (ЧСП) блоки, состоящие из некоторого функционально законченного дискретного устройства (ДУ) и ССВК. Чаще всего в качестве таких ДУ используют арифметико-логические устройства, блоки памяти, регистры, дешифраторы, мультиплексоры, счетчики и т. п. Отличительная особенность такого ПСП блока в том, что любая его неисправность из заданного множества обнаруживается на выходах ССВК в момент ее первого проявления на выходах ДУ. Использование ССВК, ПСП и ЧСП дискретных блочных устройств позволяет построить самопроверяемую ЭВМ.

В самопроверяемой ЭВМ обнаруживаются все неисправности из заданного множества в момент их первого проявления на контролируемых выходах, что гарантирует от нежелательных последствий.

Поскольку в самопроверяемой ЭВМ все средства встроенного контроля выполнены самопроверяемыми, то нет необходимости в их дополнительной проверке (в отличие от ЭВМ с несамопроверяемыми средствами встроенного контроля, в связи с использованием которых возникает проблема «сторожа над сторожем»).

ЭВМ — это сложная система взаимосвязанных блоков, и построение тестов для всей ЭВМ представляет очень сложную задачу. Если в самопроверяемой ЭВМ в качестве контролируемых выходов рассматривать только выходы f_1 и f_2 ССВК, то тест для всей ЭВМ — это просто сумма тестов ее блоков. Проверяющий тест самопроверяемой ЭВМ одновременно является и тестом поиска дефектов с глубиной поиска до блока. При проведении тестовой

проверки не требуется хранить эталонные значения выходных сигналов блоков ЭВМ.

СВК для *избыточных кодов* представляет собой комбинационное устройство, выполняющее функцию контроля принадлежности слова кодовому или некодовому множеству. Если на входах присутствует некодовое слово, то СВК должна выдать сигнал об ошибке.

Определим формально функцию, выполняемую СВК. Пусть X — все возможные слова длины n ; $A \subset X$ — некоторое подмножество слов, называемое кодом. Для того чтобы код обнаруживал ошибки, необходимо соблюдение условия $X \setminus A \neq \emptyset$. Обозначим выход СВК для входного слова a и отсутствие неисправностей в СВК через $C(a, \emptyset)$.

Комбинационное устройство называют схемой встроенного контроля, если

$$\forall a \in A, C(a, \emptyset) \in B$$

и

$$\forall a \notin A, C(a, \emptyset) \notin B,$$

где B — выходные кодовые слова СВК.

СВК может иметь один выход. При этом множество выходных кодовых слов СВК состоит из одного элемента, т. е. $B = \{(1)\}$. ССВК должна иметь по крайней мере два выхода. В настоящее время во всех ССВК принято, что $B = \{(01), (10)\}$, а некодовые выходные слова ССВК принадлежат множеству $\{(00), (11)\}$.

Теперь перейдем к формальным определениям ССВК. Пусть S_c — множество рассматриваемых неисправностей СВК. В качестве S_c чаще всего принимаются одиночные константные неисправности входов и выходов логических элементов, составляющих СВК. Для некоторых СВК в множество S_c удастся включить также и кратные однонаправленные неисправности.

СВК может быть:

защищенной от неисправностей множества S_c , если для всех неисправностей из S_c и для всех кодовых входных слов выход СВК является или правильным словом, или некодовым словом, т. е. $\forall a \in A, \forall s \in S_c, C(a, s) = C(a, \emptyset)$ или $C(a, s) \notin B$;

самотестируемой по отношению к множеству неисправностей S_c , если для каждой неисправности из S_c существует по крайней мере одно кодовое входное слово, которое приводит к появлению на выходах СВК некодового слова, т. е. $\forall s \in S_c, \exists a \in A$, такое, что $C(a, s) \notin B$;

полностью самопроверяемой по отношению к множеству неисправностей S_c , если она защищена от неисправностей и самотестируема.

В дальнейшем, говоря о самопроверяемых СВК, будем подразумевать полностью самопроверяемые СВК.

Свойство защищенности обеспечить достаточно просто. Для этого необходимо строить СВК с отдельной реализацией выходов, т. е. таким образом, чтобы не было ни одного логического элемента, от выхода которого существует путь к обоим выходам СВК. Свойство самотестируемости зависит от структуры СВК и состава множества A входных кодовых слов. Если A включает в себя тест относительно всех неисправностей из S_c , то СВК будет самотестируемой. В противном случае необходимо менять состав множества A , если это возможно, или строить иную структуру СВК. Общей методики построения самотестируемых СВК пока не существует.

Существует ряд методов построения ССВК для таких широко используемых в вычислительной технике кодов, как коды с проверкой на нечетность (четность), двухпроводные, делимые, равновесные.

Код с проверкой на нечетность обладает минимальной избыточностью. Для его построения необходим всего один дополнительный разряд. Любое кодовое слово кода с проверкой на нечетность имеет нечетное число единиц. Код с проверкой на нечетность обнаруживает все одиночные ошибки и кратные ошибки с нечетной кратностью.

Все разряды кодового слова произвольным образом разбиваются на два непересекающихся подмножества. Каждое подмножество объединяется одной схемой свертки по модулю 2. СВК для кодов с проверкой на нечетность приведена на рис. 20. СВК для кодов с проверкой на четность строится

аналогично. При этом на одном из выходов f_1 или f_2 ставится инвертор. Для любого $a \in A$, где A — слова с нечетным числом единиц, $C(a, \emptyset) \in \{(01), (10)\}$. Всякое некодовое входное слово СВК, т. е. слово, содержащее четное число единиц, будет давать на выходах СВК соответствующее некодовое выходное слово. СВК (см. рис. 20) защищена от всех одиночных неисправностей логических элементов, составляющих схемы свертки по модулю 2, поскольку СВК имеет отдельную реализацию. Если A включает в себя все слова с нечетным числом единиц, т. е. $|A| = 2^{n-1}$, то обеспечивается самотестируемость СВК относительно ее одиночных константных неисправностей. Если $|A| < 2^{n-1}$, то самотестируемость СВК не всегда может быть обеспечена.

Двухпроводный код представляет собой код, у которого каждый информационный разряд дополняется одним разрядом, причем значение сигнала на дополнительном разряде противоположно значению сигнала на информационном. Таким образом, для двухпроводного кода кодовыми словами A являются слова, у которых каждый информационный разряд и соответствующий ему дополнительный разряд имеют противоположные значения, т. е. (01) или (10). Некодовым является слово, у которого может быть найдена по крайней мере одна пара разрядов (информационный и дополнительный), на которой присутствуют совпадающие значения сигналов, т. е. (00) или (11).

ССВК строится из одинаковых ячеек k_i (рис. 21, а). Каждая ячейка имеет четыре входа: a_{i1} , a_{i2} , b_{i1} , b_{i2} и два выхода: f_{i1} , f_{i2} . Ячейка k_i функционирует следующим образом:

если $(a_{i1} \neq a_{i2} \text{ и } b_{i1} \neq b_{i2})$, то $f_{i1} \neq f_{i2}$;

если $(a_{i1} \neq a_{i2} \text{ и } b_{i1} = b_{i2})$, или $(a_{i1} = a_{i2} \text{ и } b_{i1} \neq b_{i2})$, или $(a_{i1} = a_{i2} \text{ и } b_{i1} = b_{i2})$, то $f_{i1} = f_{i2}$.

Одна из возможных реализаций ячейки k_i приведена на рис. 21, б. Эта ячейка является защищенной по отношению ко всем своим одиночным константным неисправностям, поскольку

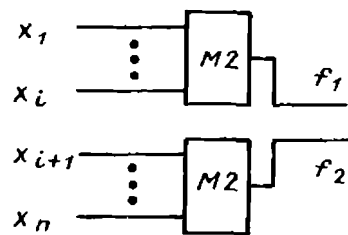


Рис. 20. ССВК для кода с проверкой на нечетность

функции f_{i1} и f_{i2} имеют отдельную реализацию. Множество входных кодовых слов ячейки k_i $\{(01, 10); (01, 01) (10, 10); (10, 01)\}$ обеспечивают самотестируемость ячейки k_i .

Многоразрядную СВК для двухпроводного кода строят как каскадное соединение элементарных ячеек k_i . На рис. 22, а дана древовидная реализация СВК, на рис. 22, б — пирамидальная. СВК в этом случае является защищенной от неисправностей и самотестируемой.

Защищенность СВК по отношению к одиночным константным неисправностям можно проследить на двух последовательно соединенных ячейках k_i и k_{i+1} . Пусть пара выходов f_{i1} , f_{i2} подается на одну из пар входов ячейки k_{i+1} . Ячейка k_i является защищенной по отношению к одиночным константным неисправностям. Причем любая такая неисправность проявляется на выходах f_{i1} , f_{i2} ячейки k_i в виде совпадающих значений сигналов, т. е. $f_{i1} = f_{i2}$. По алгоритму функционирования ячейки k_{i+1} появление на одной из ее пар входов совпадающих значений сигналов в свою очередь приводит к появлению совпа-

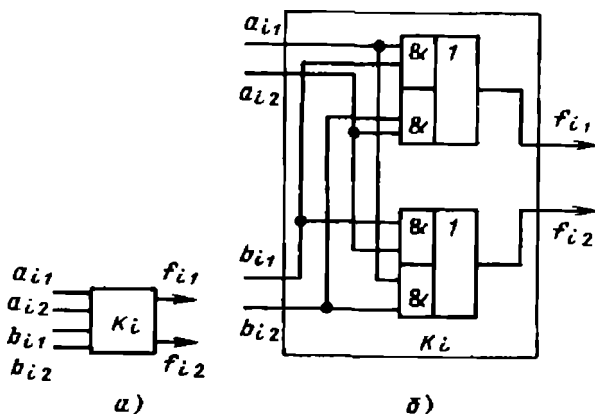


Рис. 21. ССВК (схема сжатия) для двухпроводных кодов:

а — условное обозначение; б — логическая схема

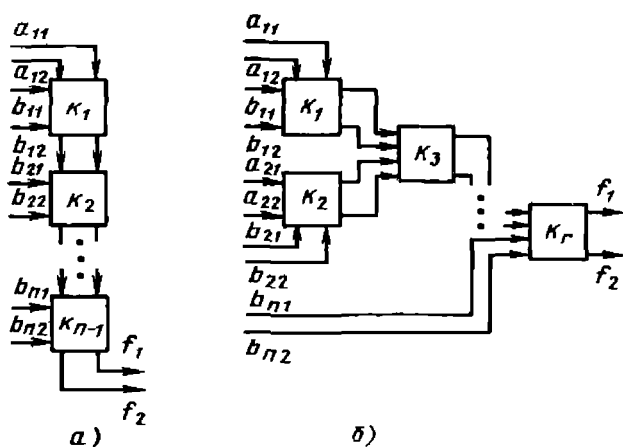


Рис. 22. Многоразрядная схема сжатия: а — древовидная реализация; б — пирамидальная реализация

дающих значений сигналов на выходах $f_{(i+1)1}$, $f_{(i+1)2}$. Таким образом, значения сигналов на выходах f_1 , f_2 всей СВК совпадают. Отсюда следует, что СВК для двухпроводных кодов является защищенной по отношению к одиночным константным неисправностям.

Если на входы СВК поступают все $|A| = 2^n$ кодовых слов, то на каждую ячейку поступают четыре слова $\{(01, 10); (01, 01); (10, 10); (10, 01)\}$, что достаточно для проверки в ячейке на ее выходах f_{i1} , f_{i2} . Следовательно, все одиночные константные неисправности ячейки k_i будут обнаружены на выходах f_1 , f_2 . Отсюда понятно, что любая одиночная константная неисправность СВК при поступлении на ее входы 2^n слов будет обнаружена на выходах f_1 , f_2 , т. е. СВК самотестируема. Таким образом, СВК, представленная на рис. 22, является самотестируемой для двухпроводных кодов.

Разделимые коды — это такие коды, в которых можно выделить информационные и контрольные разряды.

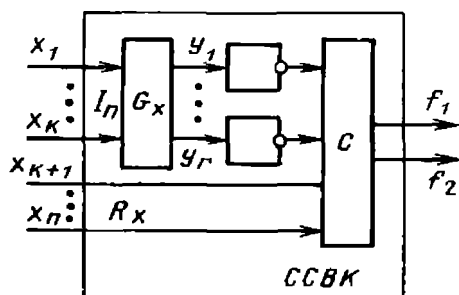


Рис. 23. ССВК для разделимых кодов

К классу разделимых кодов относят коды: Бергера, Хемминга, остаточные, с проверкой на нечетность (четность), двухпроводные и др.

Структурная схема ССВК для всех разделимых кодов приведена на рис. 23, где I_x — информационные разряды кода; R_x — контрольные разряды кода; G_x — схема формирования контрольных разрядов; C — ССВК для двухпроводных кодов.

Схема G_x формирует контрольные разряды. Для кодов Бергера G_x — комбинационный сумматор числа нулей в информационном слове кода; для остаточных кодов G_x — сумматор по модулю p числа единиц в информационном слове. Суммирование может проводиться в предположении, что все разряды информационного слова имеют одинаковый вес, равный единице, или разные веса. В случае кодов Хемминга G_x состоит из нескольких схем свертки по модулю 2.

Сформулируем условия, при которых СВК, представленная на рис. 23, будет самопроверяемой относительно множества одиночных константных неисправностей S_c . Разделимый код называют *полным*, если каждое из 2^{n-k} слов появляется на контрольных разрядах R_x . В противном случае разделимый код является *неполным*. Если разделимый код полный, то СВК самопроверяема для множества S_x неисправностей.

Рассмотрим два важных класса разделимых кодов: коды Бергера и остаточные коды. Код Бергера — это такой разделимый код, в котором R_x есть двоичное представление числа нулей в I_x . Код Бергера называют *максимальным кодом Бергера*, если число информационных разрядов k равно $2^i - 1$, $i \geq 1$. В противном случае код Бергера является *немаксимальным*.

Максимальный код Бергера — полный разделимый код. Следовательно, СВК для максимального кода Бергера будет самопроверяемой. Большинство кодов Бергера *немаксимальны*, и, следовательно, СВК для них не будет самопроверяемой.

Разделимый код называют *остаточным*, если R_x есть двоичное пред-

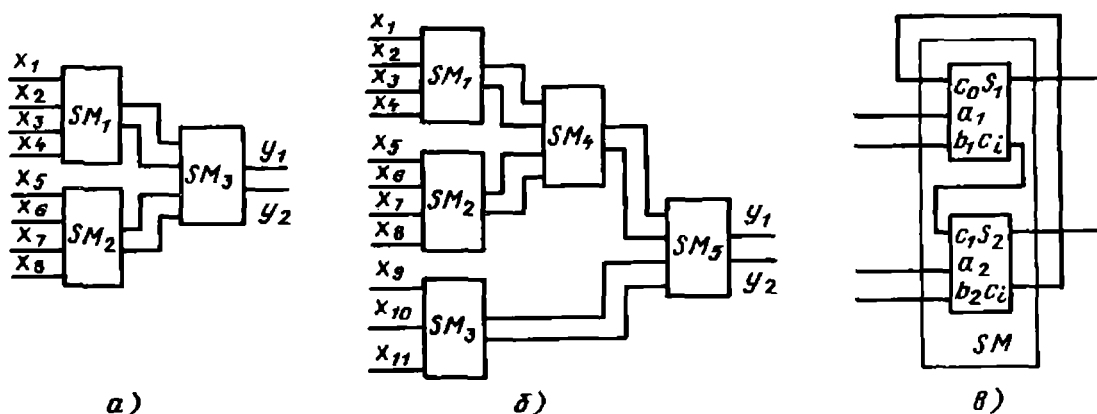


Рис. 24. Самопроверяемая схема G_x формирования контрольных разрядов:

а — для восьми информационных разрядов; б — для одиннадцати информационных разрядов; в — логическая схема сумматора

ставление остатка от деления десятичного эквивалента I_x на целое число p .

При $p = 2^b$, $b \geq 1$ остаточный код будет полным разделимым, но такие коды не позволяют обнаружить одиночные ошибки, что является их существенным недостатком. Поэтому рассмотрим коды с $p = 2^b - 1$, $b \geq 2$, которые нашли широкое применение в вычислительной технике для контроля арифметических операций.

Схема G_x может иметь вид древовидной структуры на основе двухразрядных сумматоров с циклическим переносом. На рис. 24 приведен пример схемы G_x для случая, когда $p = 3$ и разделимый код имеет восемь (рис. 24, а) и одиннадцать (рис. 24, б) информационных разрядов. Сумматоры SM_i состоят из двух одноразрядных сумматоров с цепью циклического переноса (рис. 24, в).

Равновесный, или m/n -код, — это код, у которого все кодовые слова A содержат m единиц при длине кодовых слов, равной n . Число кодовых слов m/n -кода равно $C_n^m = n! / (m! (n - m)!)$. С помощью равновесных кодов обнаруживается любая ошибка, изменяющая вес кодового слова. В частности, любая однонаправленная ошибка изменяет вес слова. Под *однонаправленной ошибкой* понимают ошибку, в которой при переходе от правильного слова к ошибочному не происходит одновременного изменения единиц и нулей. Например, ошибка 001100 \rightarrow 001111 является однонаправленной, а ошибка 001100 \rightarrow 000011 — неодно-

направленной. Однонаправленные ошибки, называемые также асимметричными, наиболее вероятны в дискретных устройствах. К классу неразделимых кодов, т. е. кодов, у которых нельзя выделить информационные и контрольные разряды, относят m/n -коды. Существует достаточно много методов построения ССВК для m/n -кодов. Кратко остановимся на одном из них.

В общем случае ССВК для m/n -кодов состоит из трех последовательно соединенных трансляторов (рис. 25, а). Транслятор T_1 преобразует слова m/n -кода в $1/C_n^m$ -код; транслятор T_2 — слова $1/C_n^m$ -кода в $p/2p$ -код; транслятор T_3 — слова $p/2p$ -кода в $1/2$ -код. Для T_1 , T_2 и T_3 характерно свойство самопроверяемости, и они являются разделителями кодов. Отсюда следует, что СВК (рис. 25, а) удовлетворяет свойству самопроверяемости.

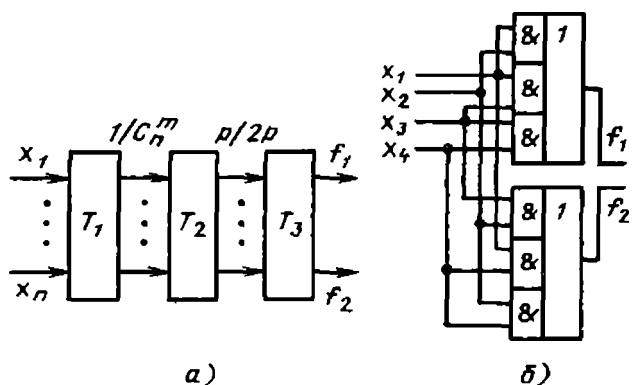


Рис. 25. ССВК для равновесных кодов: а — общая структура; б — самопроверяемый декодер для $2/4$ -кода

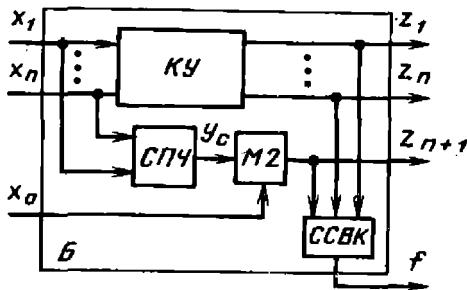


Рис. 26. Одновыходная ССВК

В качестве примера на рис. 25, б представлена ССВК для 2/4-кода.

Одновыходные схемы встроенного контроля не обнаруживают своих собственных константных неисправностей одного класса ($\equiv 0$ или $\equiv 1$) выхода f , а также всех эквивалентных им неисправностей. Как уже отмечалось, необходимым условием самопроверяемости является наличие по крайней мере двух выходов f_1 и f_2 . Однако при практической реализации ССВК с двумя выходами встречаются следующие трудности:

большая задержка сигналов на выходах f_1 и f_2 в многокаскадных самопроверяемых схемах; для вычислительных систем высокого быстродействия и производительности такая задержка может оказаться недопустимой;

в ССВК не фиксируются некоторые ее двойные неисправности (например, двойная неисправность $f_1 \equiv 1$ и $f_2 \equiv 0$ или $f_1 \equiv 0$ и $f_2 \equiv 1$) при обнаружении всех ее одиночных неисправностей.

Разработан метод построения одновыходных ССВК, которые лишены в некоторой степени этих недостатков.

На рис. 26 приведена структура ПСП блока (Б), состоящего из комбинационного устройства (КУ), схемы предсказания четности (СПЧ), логического элемента М2, производящего суммирование по модулю 2. На вход x_0 , называемый управляющим, подается сигнал, принимающий как логическое значение 0, так и 1. Значение сигналов на информационных входах x_1, \dots, x_n не зависит от значения сигналов на управляющем входе x_0 . В синхронных объектах на вход x_0 можно подавать сигнал синхронизации, а в объектах без сигнала синхронизации — сигнал от некоторого встроенного датчика временных интервалов. Сигнал на входе x_0 задает режим работы СВК. При

$x_0 = 0$ $f = 1$, поскольку схема СПЧ на каждом выходном слове КУ дополняет число единиц на выходах z_1, \dots, z_n до нечетного. Наличие на выходах z_1, \dots, z_n, y_0 одиночной ошибки или кратной ошибки с нечетной кратностью приводит на выходе схемы встроенного контроля $f = 0$. Этот сигнал свидетельствует об ошибке на выходах z_1, \dots, z_n, y_0 .

Аналогично при $x_0 = 1$ $f = 0$ — сигнал об отсутствии ошибок. Появление же сигнала $f = 1$ говорит об ошибке нечетной кратности на выходах z_1, \dots, z_n, y_0 . Таким образом, зная значение управляющего сигнала на входе x_0 и значение сигнала на выходе f схемы встроенного контроля, можно однозначно определить наличие ошибок на выходах z_1, \dots, z_n, y_0 . Следовательно, для того, чтобы предлагаемая схема встроенного контроля обеспечивала полную проверяемость КУ и СПЧ, необходимо, чтобы любая их неисправность из заданного множества давала ошибки только нечетной кратности.

Одновыходную СВК (см. рис. 26) называют самопроверяемой по отношению к заданному множеству неисправностей S_c , если любая неисправность из S_c обнаруживается на выходе f в процессе правильного функционирования КУ и СПЧ.

Предполагается, что в процессе правильного функционирования управляющий сигнал на входе x_0 принимает значение 0 и 1.

Дискретный блочный объект — это некоторый функционально законченный дискретный узел, выполняющий обработку цифровой информации, например, процессор или часть процессора ЭВМ. Поскольку дискретный блочный объект — достаточно сложное устройство, содержащее большое число логических элементов, то построение его полностью самопроверяемым является трудной задачей. Поэтому в объекте выделяют блоки (сумматоры, дешифраторы, счетчики, регистры, распределители импульсов и т. п.), с помощью которых выполняются некоторые элементарные функции. Для таких блоков методами, описанными выше, можно построить ССВК, обеспечивающую полную проверяемость.

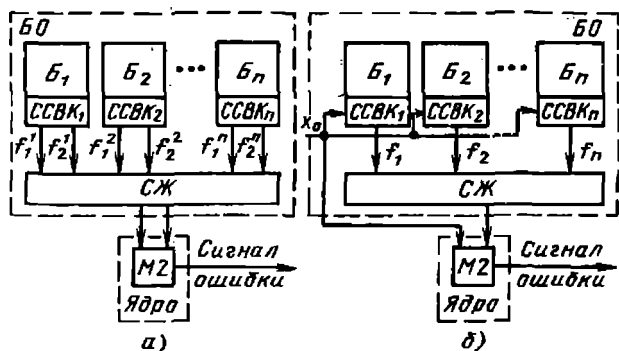


Рис. 27. Структура полностью самопроверяемого дискретного объекта:

а — с двухвыходными ССВК; б — с одновыходными ССВК

Пусть задан дискретный блочный объект (БО) (рис. 27), состоящий из полностью самопроверяемых блоков B_1, B_2, \dots, B_n , каждый из которых имеет свою ССВК. На рисунке для простоты не показаны связи между блоками. Необходимо объединить выходы всех ССВК $_i$, $i = 1, \dots, n$ (рис. 27, а) таким образом, чтобы появление сигнала ошибки, по крайней мере на одной из пар выходов f_1^i, f_2^i ($i = 1, \dots, n$), передавалось на выходы f_1, f_2 . Такую функцию выполняет схема сжатия (СЖ) сигналов ССВК, которая также является самопроверяемой. При отсутствии ошибок на всех выходах f_1^i, f_2^i ($i = 1, \dots, n$) и при отсутствии неисправностей в СЖ на выходах f_1, f_2 возникают сигналы 01 или 10. При наличии сигнала, по крайней мере на одном из выходов f_1^i, f_2^i , или неисправности в СЖ на выходах f_1, f_2 появляются сигналы 00 или 11. Функции самопроверяемой СЖ сигналов ССВК может выполнять ССВК для двухпроводных кодов. Таким образом, СЖ на рис. 27, а представляет собой ССВК для двухпроводных кодов. Если все ССВК одновыходные (рис. 27, б), то ССВК для двухпроводных кодов не может выполнять функции СЖ. Для таких ССВК может быть использована простая СЖ (рис. 28), основное достоинство которой — малая задержка сигнала. Однако такая схема не обладает свойством самопроверяемости. В ней не проверяются константные неисправности входов логических элементов И-НЕ и ИЛИ. Поэтому с целью маскирования этих

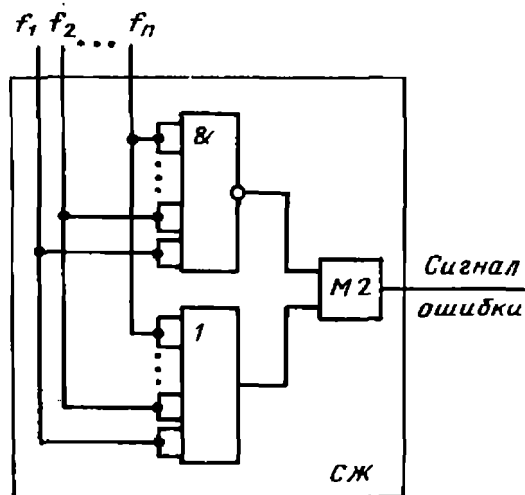


Рис. 28. Схема сжатия для одновыходных ССВК

неисправностей входы логических элементов задублированы.

Таким образом, обеспечивая полную самопроверяемость блоков, из которых состоит блочный объект, и сжатие сигналов всех ССВК, достигают полной самопроверяемости всего блочного объекта.

3. ВНЕШНИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Внешними средствами диагностирования называют СД, выполненные отдельно от конструкции ОД.

Существующие в настоящее время внешние ТСД отличаются большим разнообразием, которое определяется областью применения и технической реализацией.

Средства диагностирования можно классифицировать. Основными классификационными признаками являются: степень воздействия на объект, способы обработки и представления информации о состоянии объекта, методы диагностирования, степень автоматизации, степень надежности и универсальности.

По степени воздействия на объект внешние средства могут быть активными и пассивными. Активные ТСД воздействуют на объект, подавая на отведенные для целей диагностирования входы сигнал, стимулирующий реакцию объекта, которая затем оценивается. Эти средства содержат в своем составе генераторы стимули-

ющих воздействий, формирующих импульсные, ступенчатые, синусоидальные сигналы, цифровые коды и т. д. *Пассивные* ТСД служат для обработки и оценки диагностических признаков, характеризующих состояние объекта путем анализа информации, поступающей от него в процессе диагностирования.

По способу получения информации о состоянии объекта внешние средства диагностирования можно разделить на средства: определяющие состояние по совокупности параметров и служащие для оценки состояния по реакции на выходе объекта. В первом случае обрабатывается информация, снимаемая в контрольных точках объекта. Во втором случае для возможности оценки реакции на рабочих выходах объекта в состав средств включают эквивалентную модель объекта, а диагноз устанавливают путем сравнения реакций модели и объекта на одинаковые входные воздействия.

При тестовом диагностировании в составе внешних средств, кроме устройств для съема и обработки информации, обязательно предусматривают генераторы различных тестовых воздействий.

Внешние средства диагностирования подразделяют по решаемым ими задачам. Различают средства: для определения работоспособности, поиска возникшего дефекта, прогнозирования изменения состояния и проверки исправности объекта.

По степени автоматизации средства диагностирования разделяются на ручные, автоматизированные и автоматические.

Средства, требующие активного участия оператора при их использовании, относят к *ручным*. Такими средствами являются все широко используемые измерительные приборы (осциллографы, генераторы синусоидальных и импульсных сигналов и др.). Средства, при использовании которых роль оператора сводится к выполнению отдельных, достаточно простых операций (включение, переключение, выключение и др.), относят к *автоматизированным*. *Автоматическими* ТСД называют средства, которые функционируют без участия оператора. Если

время на автоматическое выполнение операций меньше или равно $0,1\tau_g$, то средства считают ручными: если время на автоматические операции $\geq 0,9\tau_g$, то средства считают автоматическими.

Внешние средства диагностирования могут быть выполнены переносными, передвижными и стационарными. *Передвижные ТСД*, как правило монтируют на подвижных самоходных или несамоходных транспортных средствах. *Стационарные ТСД* чаще всего размещаются на диагностических станциях, а также в испытательных и контрольных центрах. В отдельных случаях стационарные средства диагностирования могут быть применены на подвижных объектах (судах, самолетах и др.).

По степени универсальности внешние средства диагностирования разделяют на специализированные и универсальные.

Специализированными средствами диагностирования называют средства, предназначенные только для однотипных объектов диагностирования. В состав таких средств могут входить унифицированные блоки, мини-ЭВМ и микропроцессоры.

Специализированные ТСД обеспечивают высокую производительность при выполнении операций диагностирования и высокую степень достоверности диагноза.

Состав специализированных внешних ТСД изменяется в зависимости от характера объекта, метода диагностирования и задач, решаемых в процессе диагностирования.

Универсальными ТСД называют средства, предназначенные для объектов диагностирования различного конструктивного выполнения и (или) функционального назначения. Универсальные ТСД могут предназначаться для сдачи объектов после изготовления и в период их эксплуатации. Такие средства часто строятся на основе использования ЭВМ. В этом случае переход от одного типа объектов к другому типу объектов осуществляется путем смены внешней программы диагностирования без изменения структуры средств. Универсальные средства, как правило, проектируют с «от-

крытыми входами под унифицированные или неунифицированные сигналы первичных измерительных преобразователей. Для универсальных ТСД характерна гибкость, т. е. возможность ввода новых программ диагностирования. Проектирование систем диагностирования с универсальными средствами позволяет сократить сроки ввода ОД, поскольку при этом исключается необходимость проектирования средств диагностирования. Однако следует иметь в виду, что универсальные ТСД сложны, дороги и для их обслуживания требуются специалисты высокой квалификации.

4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТСД

Определение требований по безотказности, ремонтпригодности и контролепригодности ОД и ТСД является частной задачей организации взаимодействия элементов системы диагностирования.

Если известна зависимость между критерием организации диагностирования и показателями, характеризующими безотказность, ремонтпригодность и контролепригодность ОД и ТСД, деятельность оператора, организацию использования и диагностирования объекта, то задача сводится к определению значений показателей B , R_p , K_p при заданных значениях показателей O_p , O_r , I и K . Таким образом решается задача определения численных значений показателей безотказности, ремонтпригодности и контролепригодности объекта (B_1, R_{p1}, K_{p1}) и технических средств (B_2, R_{p2}, K_{p2}), когда известны показатели, характеризующие оператора O_p , организацию использования I и диагностирования O_r объекта, для обеспечения требуемого значения критерия K организации взаимодействия элементов системы диагностирования.

Значения показателей $B_1, B_2, R_{p1}, R_{p2}, K_{p1}, K_{p2}$ можно найти из уравнения

$$K = K(B_1, B_2, R_{p1}, R_{p2}, K_{p1}, K_{p2}, O_p, I, O_r) \quad (10)$$

при учете соответствующих ограничений на интервалы изменения показателей:

$$\begin{aligned} B_{1H} &\leq B_1 \leq B_{1B}; & B_{2H} &\leq B_2 \leq B_{2B}; \\ R_{p1H} &\leq R_{p1} \leq R_{p1B}; \\ R_{p2H} &\leq R_{p2} \leq R_{p2B}; \\ K_{p1H} &\leq K_{p1} \leq K_{p1B}; \\ K_{p2H} &\leq K_{p2} \leq K_{p2B}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $B_{1H}, R_{p1H}, K_{p1H}, B_{2H}, R_{p2H}, K_{p2H}$ и $B_{1B}, R_{p1B}, K_{p1B}, B_{2B}, R_{p2B}, K_{p2B}$ — соответственно нижние и верхние граничные (допустимые) значения искомым показателей безотказности, ремонтпригодности и контролепригодности ОД и ТСД.

Из множества комбинаций значений показателей безотказности, ремонтпригодности и контролепригодности ОД и ТСД может существовать по крайней мере одна комбинация, которая является решением поставленной задачи, т. е. обеспечивает заданный уровень организации взаимодействия элементов системы диагностирования. Однако прямой перебор с дискретными шагами по искомым показателям B, R_p и K_p не всегда может обеспечить требуемую точность решения задачи. Поэтому сформулированную задачу целесообразно рассматривать как задачу оптимизации.

Поскольку сходимость итерационного процесса при использовании целевой функции в виде квадрата отклонения выше, чем при любом другом задании, то в качестве целевой функции используют выражение вида $[K - K_{TP}]^2$, где K_{TP} — требуемое значение критерия организации взаимодействия элементов СД.

Задачу оптимизации в этом случае можно сформулировать следующим образом: найти

$$\min [K - K_{TP}]^2$$

в случае

$$\{B_1, B_2, R_{p1}, R_{p2}, K_{p1}, K_{p2}\} \in N \quad (12)$$

при ограничениях на N согласно (11).

Таким образом, для решения задачи необходимо найти зависимость вида

$$K = K(B_1, B_2, R_{p1}, R_{p2}, K_{p1}, K_{p2}), \quad (13)$$

которая может быть получена специально для решения сформулированной задачи или заимствована из условий решения задачи организации взаимодействия элементов системы диагностирования.

При определении зависимости (13) необходимо на основании изучения условий использования и эксплуатации ОД и ТСД найти конечное дискретное множество $E = (e_1, e_n)$ всех возможных несовместных состояний, в которых может находиться СД в процессе взаимодействия ОД и ТСД. Для полученного множества строят ориентированный граф $G(P, Q)$ возможных переходов СД из состояния в состояние. Вершины графа P характеризуют возможные несовместные состояния, ветви Q — возможные переходы СД из состояния в состояние.

Затем для построенного графа находят аналитическое выражение

$$K = K(B_1, B_2, P_{п1}, P_{п2}, K_{п1}, K_{п2}, O_{п}, I, O_{р}) \quad (14)$$

для критерия организации взаимодействия элементов СД. Если дальше в выражение (14) подставить известные значения показателей, характеризующих оператора Оп, организацию использования (И) и диагностирования Ор объекта, то получим искомую зависимость (13).

На основании условий эксплуатации ОД и ТСД и возможностей производства устанавливают нижние ($B_{1н}, B_{2н}, P_{п1н}, P_{п2н}, K_{п1н}, K_{п2н}$) и верхние ($B_{1в}, B_{2в}, P_{п1в}, P_{п2в}, K_{п1в}, K_{п2в}$) граничные (допустимые) значения искомых показателей $B_1, B_2, P_{п1}, P_{п2}, K_{п1}$ и $K_{п2}$.

Для решения задачи вводят обозначения: $\bar{X}(B_1, B_2, P_{п1}, P_{п2}, K_{п1}, K_{п2})$ — вектор-столбец искомых показателей; $\hat{X}(\hat{B}_1, \hat{B}_2, \hat{P}_{п1}, \hat{P}_{п2}, \hat{K}_{п1}, \hat{K}_{п2})^T$ — вектор-столбец, обеспечивающий минимум функции (12) при ограничениях (11). Знак «Т» означает операцию транспортирования.

Задача условной минимизации с ограничениями (12) сводится к задаче безусловной минимизации без ограничений некоторой другой функции

$\Phi(\bar{X})$, называемой штрафной функцией.

Функцию $\Phi(\bar{X})$ составляют следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{X}) = & [K(B_1, B_2, P_{п1}, P_{п2}, \\ & K_{п1}, K_{п2}) - K_{тр}]^2 + c_1 \{ |B_1 - B_{1н}| - \\ & - [B_1 - B_{1н}] \} + c_2 \{ |B_{1в} - B_1| - \\ & - [B_{1в} - B_1] \} + c_3 \{ |B_2 - B_{2н}| - \\ & - [B_2 - B_{2н}] \} + c_4 \{ |B_{2в} - B_2| - \\ & - [B_{2в} - B_2] \} + c_5 \{ |P_{п1} - P_{п1н}| - \\ & - [P_{п1} - P_{п1н}] \} + c_6 \{ |P_{п1в} - P_{п1}| - \\ & - [P_{п1в} - P_{п1}] \} + c_7 \{ |P_{п2} - P_{п2н}| - \\ & - [P_{п2} - P_{п2н}] \} + c_8 \{ |P_{п2в} - P_{п2}| - \\ & - [P_{п2в} - P_{п2}] \} + c_9 \{ |K_{п1} - K_{п1н}| - \\ & - [K_{п1} - K_{п1н}] \} + c_{10} \{ |K_{п1в} - K_{п1}| - \\ & - [K_{п1в} - K_{п1}] \} + c_{11} \{ |K_{п2} - K_{п2н}| - \\ & - [K_{п2} - K_{п2н}] \} + c_{12} \{ |K_{п2в} - K_{п2}| - \\ & - [K_{п2в} - K_{п2}] \}, \quad (15) \end{aligned}$$

где $c_1 \div c_{12}$ — положительные вещественные числа, влияющие на скорость поиска минимума функции (15) и выбираемые так, чтобы при нарушении принятых ограничений значения штрафов были соизмеримы со значениями минимизируемой функции (13). Таким образом, задача сводится к задаче безусловной минимизации: найти

$$\bar{X} = [\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{P}_{п1}, \tilde{P}_{п2}, \tilde{K}_{п1}, \tilde{K}_{п2}],$$

при котором

$$\Phi(\tilde{X}) = \min \Phi(\bar{X}). \quad (16)$$

Если функция \tilde{X} удовлетворяет задаче (16), то она удовлетворяет и исходной задаче (12), т. е. представляет оптимальное решение.

По построению функция (15) не дифференцируема в области допустимых значений \tilde{X} . В связи с этим для решения (16) целесообразно использовать метод прямого поиска, который в отличие от градиентных методов оптимизации не требует вычисления частных производных. Алгоритм решения задачи (16) этим методом приведен на рис. 29.

В соответствии с алгоритмом вначале задают начальные значения $\bar{X}_1^{(0)}, \bar{X}_2^{(0)}, \dots, \bar{X}_m^{(0)}$ и приращения $\Delta X_i^{(0)}$, $\Delta X_m^{(0)}$ всех элементов вектора \bar{X} . Затем вычисляют значение целевой функции $\Phi(\bar{X})$ в начальной (базовой) точке с координатами $X_1^{(0)}, \dots, X_m^{(0)}$. Последовательно (по одной) переменным X_i дают приращения ΔX_i и определяют значение целевой функции, которое сравнивают с начальным значением $\Phi(X^{(0)})$. Если изменение $X_i^{(0)}$ на $\pm \Delta X_i^{(0)}$ не «улучшает» функцию, то величину оставляют без изменения и дают приращение следующей переменной $X_{i+1}^{(0)}$, и т. д. Если на каком-либо шаге $\Phi(\bar{X})$ «улучшается», то ее значение заменяется новым, т. е. переходят к следующей базовой точке. Эта процедура, называемая «последующий поиск типа 1» продолжается до тех пор, пока все переменные не получат приращение. Если вводится новая базовая точка $\bar{X}^{(k)}$, то проводят «поиск по образцу» и находят точку $\bar{X}^{(k+1)}$ в соответствии с правилом $\bar{X}^{(k+1)} = 2\bar{X}^{(k)} - \bar{X}^{(0)}$.

Вектор $\Delta \bar{X}^{(k)} = \bar{X}^{(k-1)} - \bar{X}^{(k)}$ перехода из точки $\bar{X}^{(k)}$ в точку $\bar{X}^{(k+1)}$ указывает направление возможной оптимизации.

В дальнейшем из точки $\bar{X}^{(k+1)}$ осуществляют «исследующий поиск типа 2» и определяют успешность «поиска по образцу». Для этого полученное в результате выполнения поиска 2 значение $\Phi(\bar{X}^{(k+2)})$, «лучшее», чем $\Phi(\bar{X}^{(k+3)})$, сравнивают с $\Phi(\bar{X}^{(k)})$. Если $\Phi(\bar{X}^{(k+3)})$ окажется «лучше», чем $\Phi(\bar{X}^{(k)})$, то «поиск по образцу» признают успешным и в дальнейшем проводят «поиск по образцу» с базовой точкой $\bar{X}^{(k+2)}$. Процедуру заканчивают в тот момент, когда при выполнении очередного «исследующего поиска типа 2» значение функции окажется «хуже», чем в последней базовой точке. В этом случае из базовой точки проводят «исследующий поиск типа 1» для определения нового

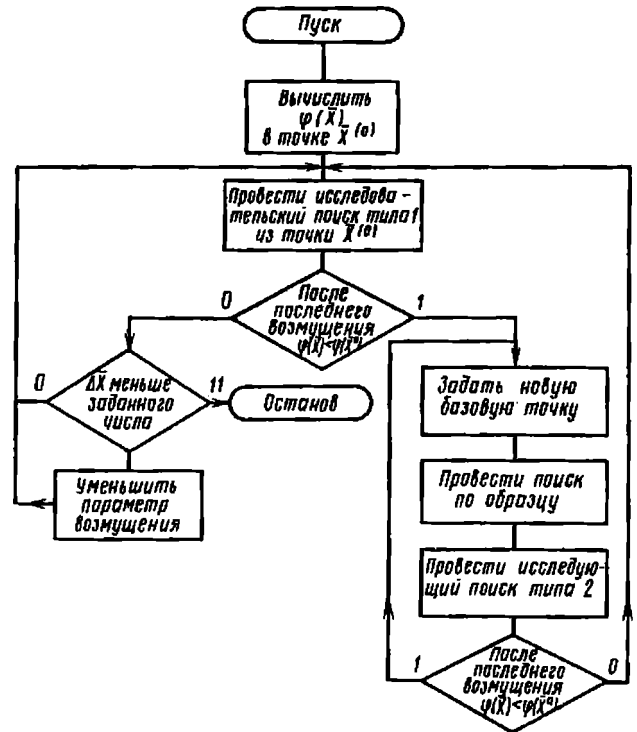


Рис. 29. Схема алгоритма решения задачи оптимизации

направления поиска. Если такое направление не удастся отыскать, то последовательно уменьшают приращение переменных до обнаружения нового перспективного направления или до момента, когда приращение переменной достигнет заранее установленного минимального значения $\Delta X_i \min$. При этом считается, что оптимизация выполнена. Таким образом, выполнение алгоритма, приведенного на рис. 29, позволяет получить вектор \bar{X} , компоненты которого $B_1, B_2, Pp_1, Pp_2, Kp_1, Kp_2$ рассматривают как требуемые значения показателей, характеризующих безотказность, ремонтпригодность и контролепригодность ОД и ТСД.

Основные элементы ТСД. В состав ТСД включают: генераторы стимулирующих сигналов (при тестовом диагностировании), а также средства съема и первичного преобразования информации о состоянии объекта, обработки информации, коммутации и отображения информации.

Генератор стимулирующих сигналов (ГСС) вырабатывает тестовые воздействия. К ГСС предъявляют жесткие требования по формированию сигналов, стимулирующих у ОД реакцию, изменение которой свидетельствует об изменении состояния объекта.

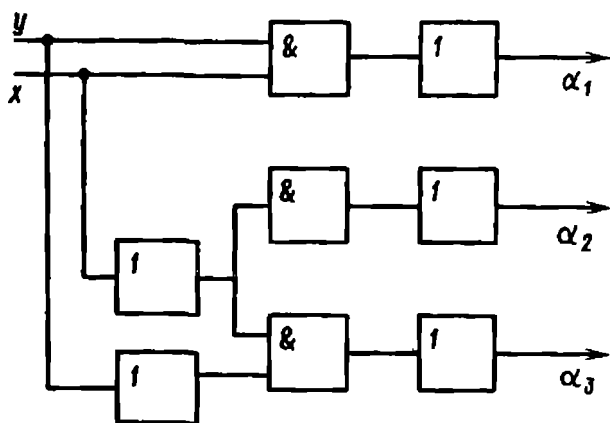


Рис. 30. Схема формирования дискретных сигналов

При диагностировании дискретных объектов для формирования тестовых воздействий используют фазоимпульсную и амплитудно-импульсную модуляции.

На рис. 30 приведена схема формирования дискретных сигналов, модулированных по фазе и амплитуде. Схема реализована на базе И-НЕ и предназначена для формирования четырех различных последовательностей импульсов: $\alpha_1 = XY$, $\alpha_2 = \bar{X}Y$, $\alpha_3 = \bar{X}\bar{Y}$, $\alpha_4 = X\bar{Y}$, где X — двоичный код; Y — сигнал тактовой частоты.

На рис. 31 приведена временная диаграмма, поясняющая работу схемы; на рис. 32 — схема генератора, вырабатывающего тестовые сигналы в широком диапазоне частот. Генератор вырабатывает видеоимпульс частотой 0—4 ГГц, представляющий собой переход напряжения с длительностью фронта 100 Нс в короткий видеоимпульс, получаемый дифференци-

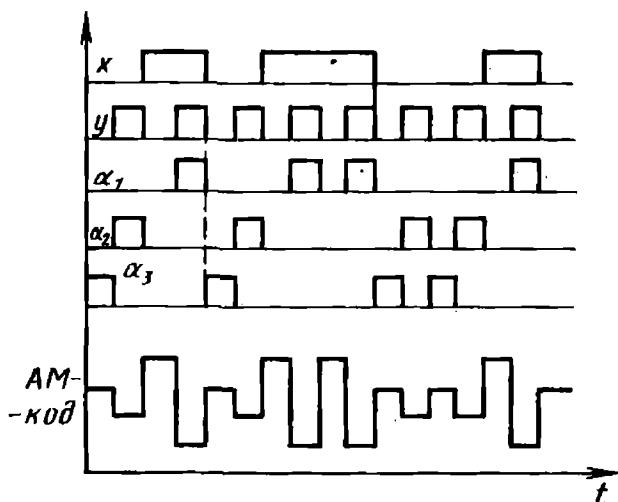


Рис. 31. Временная диаграмма

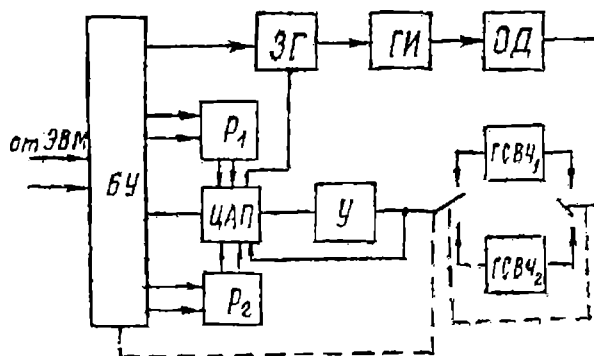


Рис. 32. Схема генератора тестов

рованием этого перехода. Информацию о частотных характеристиках, которые используются как диагностические показатели, получают в результате применения в ЭВМ алгоритма быстрого преобразования Фурье к преобразованным цифроаналоговым преобразователям сигналов переменного тока.

Генератор видеоимпульсов (ГИ) состоит из транзисторной схемы, формирующей видеоимпульс амплитудой 1,5 Нс. Частота следования импульсов в автоматическом режиме плавно регулируется в пределах 1—100 кГц. Электрические управляемые генераторы ГСВЧ₁ и ГСВЧ₂, выполненные на диоде Ганка, вырабатывают частоты в диапазоне 4—12 ГГц. В генераторе предусмотрена возможность сканирования частоты в любом из диапазонов работы СВЧ, для чего от ЭВМ подаются и запоминаются в регистрах памяти P_1 и P_2 восьмизначные слова, указывающие начальную и конечную частоты диапазона сканирования. Цифровой счетчик по команде от ЭВМ или внутреннего задающего генератора ЗГ изменяет свое содержимое в пределах, задаваемых P_1 и P_2 . Дискретный сигнал от счетчика с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) преобразуется в аналоговый сигнал, усиливается усилителем У и используется для управления частотой генератора. Стимулирующие сигналы поступают на выход генератора через электромеханические переключатели, управляемые ЭВМ.

Разнообразные средства съема информации представляют, по существу, преобразователи различных физиче-

ских величин (давления, тока, температуры и др.) в какую-либо одну унифицированную величину (например, напряжение постоянного тока) или в две-три величины, удобные для ввода в средства обработки (например, напряжение постоянного тока и частоту следования импульсов).

Используя средства съема (датчики), по одной величине y судят о другой величине x . При этом стремятся обеспечить постоянство коэффициента пропорциональности между y и x .

Средства съема информации подразделяют на две группы: преобразователи электрических величин (напряжение, ток, сопротивление) и преобразователи неэлектрических величин (температура, расход, состав и др.) в электрические.

В случае, если входную величину преобразовать в электрическую невозможно, применяют неэлектрические преобразователи (упругие элементы, рычаги, редукторы и др.).

Средства обработки информации обычно выполняют следующие функции: преобразование измеряемых или контролируемых величин из одной формы в другую, выполнение логических операций по сравнению измеряемой или контролируемой величины с эталонными значениями, выдача соответствующих сигналов по результатам сравнения в управляющее устройство для принятия решения о прекращении диагностирования или его продолжении, выдаче рекомендаций по устранению дефектов или аварийному использованию ОД. Структурная схема средств обработки информации определяется формой (аналоговой или цифровой), в которой производится обработка измеряемых или контролируемых величин.

Основное достоинство аналоговых средств — их простота при качественной оценке контролируемых величин. Однако эти средства обладают малой универсальностью, и их сложность возрастает с увеличением числа обрабатываемых величин, а также при необходимости выполнить не только качественную, но и количественную оценку.

Универсальность аналоговых средств обработки информации можно повы-

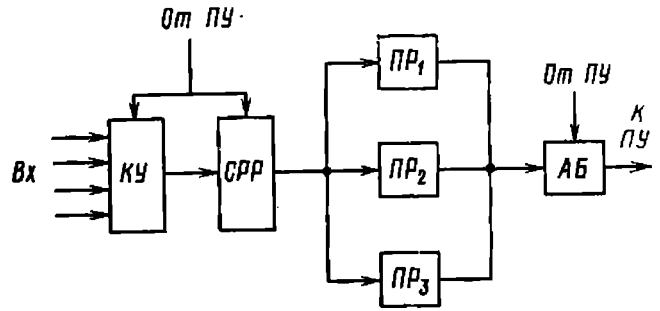


Рис. 33. Схема средств цифровой обработки результатов измерений

сить за счет применения специальных датчиков-преобразователей первичных физических величин в определенном образом калиброванные напряжения, которые подаются в средства обработки. Но создание таких датчиков-преобразователей затруднено тем, что в них необходимо иметь высококачественные усилители со стабильным коэффициентом усиления.

К недостаткам аналоговых средств обработки информации относят также сложность и неуниверсальность программирующих, запоминающих и регистрирующих устройств. Для сложных средств обработки, в которых требуется программирование, обработка и регистрация большого числа значений, целесообразно выбирать схемы, составленные по цифровому принципу.

В этом случае средства обработки информации содержат специальные преобразователи, с помощью которых различные физические величины непосредственно переводятся в цифровой код или напряжения, преобразуемые в код. Цифровые средства обеспечивают количественную оценку измеряемых величин и большую универсальность отдельных блоков. При этом также становятся универсальными средства индикации и регистрации, данные которых могут быть использованы для дальнейшей обработки в специализированных цифровых вычислительных машинах без дополнительного преобразования.

Схема средств обработки результатов измерений, построенных по цифровому принципу, приведена на рис. 33.

Данные, поступающие от первичных датчиков информации, установленных на ОД, в аналоговой форме преобразуются в дискретную форму специаль-

ными преобразователями ПР, преобразующими в коды: ПР₁ — напряжение, ПР₂ — частоту, ПР₃ — время и т. д. Арифметический блок АБ в зависимости от конструкции обеспечивает количественную оценку измеряемых величин или качественную по принципу «годен — не годен, не годен выше — не годен ниже». По результатам оценки вырабатываются соответствующие команды для управления средствами регистрации и индикации. Режимы и диапазоны работы ПР устанавливаются и регулируются дистанционно средствами программного управления (ПУ) через селектор режима и диапазона СРД.

Подключение первичных датчиков информации осуществляется по командам ПУ средствами коммутации КУ.

Цифровые преобразователи, используемые в средствах обработки информации, подразделяют на преобразователи: аналог — код, код — аналог и двухсторонние универсальные преобразователи. Вместе с тем преобразователи отличаются: принципами преобразования, видом кода, методами ввода информации и др.

Для преобразователей аналог — код могут быть использованы следующие методы преобразования: последовательного счета, сравнения и вычитания, считывания и сравнения и вычитания с обратной связью.

Метод последовательного счета заключается в том, что входная аналоговая величина разбивается на большое число элементарных приращений, равное выбранной дискретности преобразования, фиксируемых отсчетным устройством. Различают две разновидности подобных преобразователей:

циклические преобразователи, в которых происходит преобразование всей измеряемой величины за один цикл, после чего отсчетное устройство возвращается в нулевое положение;

накапливающие преобразователи, в которых суммируются приращения и величина, измеренная за предыдущий цикл.

Метод сравнения и вычитания заключается в сравнении входной величины с суммой эталонных значений, вырабатываемых внутри преобразователя. Цифровой код, соот-

ветствующий сумме эталонных значений, снимаемых с выхода преобразователя в момент равенства входной величины (с заданной точностью) и суммы эталонных значений, будет соответствовать входной величине.

Преобразователи, построенные на основе использования метода сравнения и вычитания, могут быть построены по разомкнутой схеме или по замкнутой схеме с обратной связью, охватывающей весь преобразователь.

Преобразователи без обратной связи, в свою очередь, подразделяют на многоэталонные и одноэталонные.

Метод считывания состоит в промежуточном преобразовании входной величины в такие аналоговые величины, которые можно непосредственно отсчитывать по соответствующим шкалам, кодовым маскам и т. п.

Промежуточная величина является, как правило, угловым или линейным перемещением. Поэтому метод считывания используют для преобразования угловых величин в цифровой код.

В преобразователях напряжений в цифровой код, построенных по методу считывания, используются специальные электронные трубки и кодовые маски. Таким преобразователям (использующим механические перемещения) присущи громоздкость, низкая точность и малое быстродействие.

Метод сравнения и вычитания с обратной связью реализуется в преобразователе цепью обратной связи, по которой сигнал, вырабатываемый преобразователем, подается на схему сравнения для сравнения с входной величиной. В момент, когда разность сигналов достигнет значения, соответствующего требуемой точности преобразования в отсчетном устройстве значения обратной связи, установится цифровой код, соответствующий входной величине.

Поскольку в преобразователях с обратной связью имеется устройство обратного преобразования, эти устройства применяют как двухсторонние универсальные преобразователи.

Преобразователи отличаются схемами преобразования аналоговой величины в код (с использованием счетчика или с поразрядным кодированием)

и преобразования кода в аналоговую величину (суммирование аналоговых величин с учетом веса разрядов кода или суммирование единичных аналоговых величин, число которых соответствует входному коду).

Преобразователи этого типа универсальны, обладают высокими точностью (0,05—0,1 %), скоростью преобразования (10—20 мкс) и надежностью. Их используют в следящем режиме с выдачей сигналов при отклонении контролируемых параметров от их заданного значения.

Контроль временных интервалов в средствах обработки информации осуществляют с помощью преобразования их в цифровой код методом последовательного счета импульсов тактового генератора, укладываемых в преобразуемом интервале времени. На рис. 34 приведена схема подобного преобразователя.

В момент появления старт-импульса, соответствующего началу измерительного интервала времени, триггер (Т) опрокидывается и через схему совпадения (И) импульсы с тактового генератора (ГИ) с периодом $T_{ГИ}$ поступают в счетчик. Стоп-импульс, соответствующий концу интервала времени, возвращает Т в исходное состояние, и схема И прекращает пропускать импульсы ГИ. Число импульсов, записанных в счетчике, соответствует измеряемому интервалу времени. При поступлении импульса считывания выходные вентили В открываются, и код со счетчика передается для дальнейшей обработки. Точность преобразования определяется дискретностью преобразования, а также стабильностью работы ГИ и величиной несоответствия начала Δt_H и конца Δt_K работы ГИ началу и концу измеряемого интервала времени.

Средства коммутации, используемые в составе ТСД, характеризуются следующими основными параметрами:

числом входов и выходов;

числом каналов (под каналом понимают часть коммутатора, обеспечивающего одно или несколько устройств ОД);

временем переключения одного канала — временем от момента подачи командного сигнала для переключения

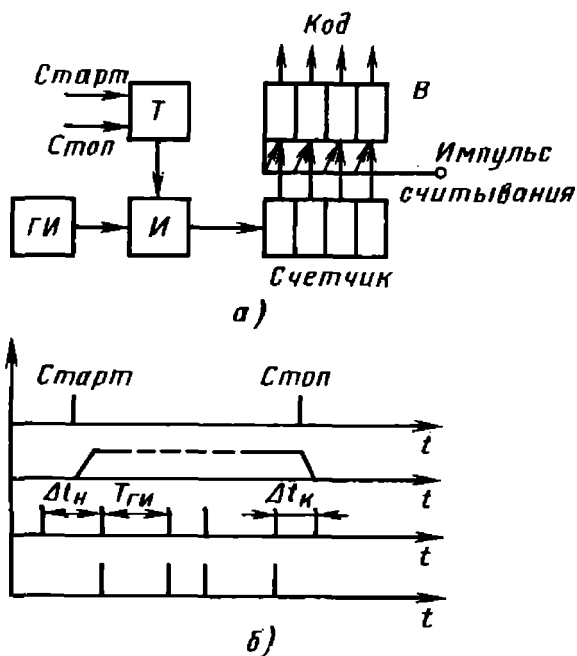


Рис. 34. Схема преобразования в цифровой код:

а — схема средств преобразования; б — временная диаграмма

на другой канал до установления нового уровня коммутированного сигнала с заданной погрешностью;

абсолютной погрешностью $\Delta U = U_{вх} - U_{вых}$, где $U_{вх}$ и $U_{вых}$ — величины входного и выходного сигналов средства коммутации;

относительной погрешностью

$$\delta = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{U_{вх}};$$

приведенной погрешностью

$$\delta_{пр} = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{U_{вх \max}}.$$

По своей структуре средства коммутации подразделяют на специализированные и универсальные. На рис. 35 приведена классификация средств коммутации, используемых в составе ТСД. Универсальным коммутаторам присуще свойство полнодоступности, т. е. способности соединять любой вход с любым выходом. Специализированные средства коммутации таким свойством не обладают, поэтому имеют ярко выраженное свойство канальности.

В качестве средств индикации в составе ТСД используют самые разнообразные приборы и устройства (лампы накаливания, световые табло, газо-

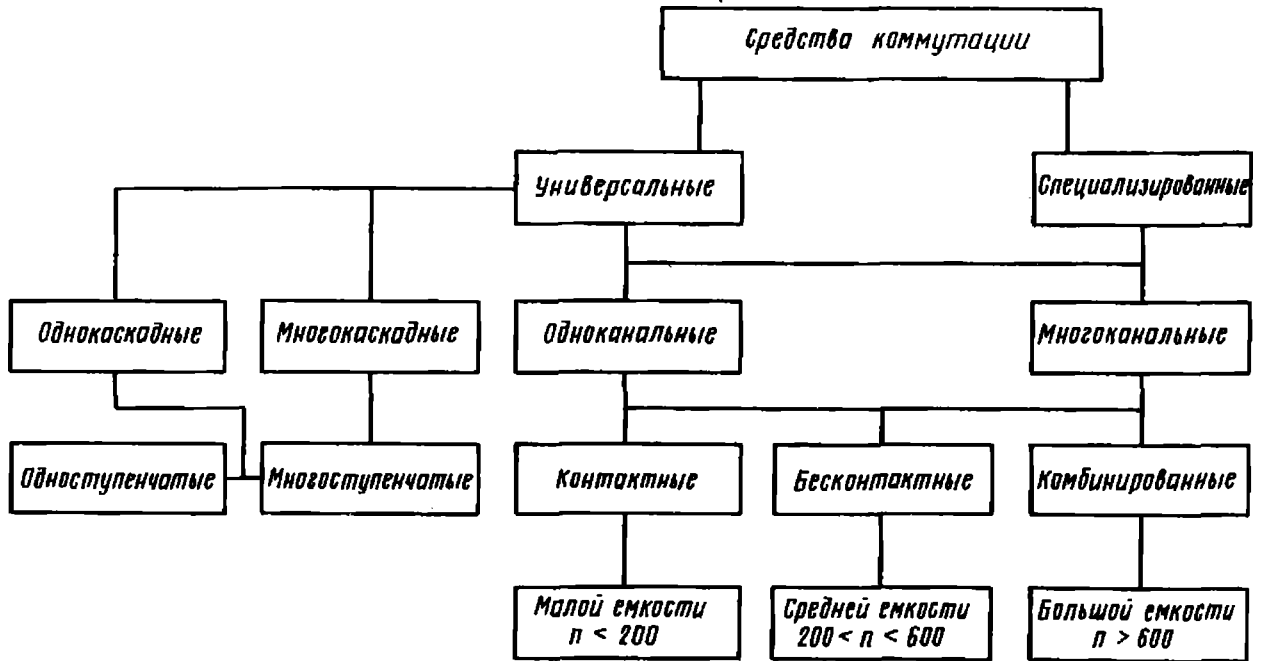


Рис. 35. Классификация средств коммутации

разрядные приборы, электронно-лучевые трубки, плазменные индикаторные панели, индикаторы на жидких кристаллах, электролюминесцентные и полупроводниковые приборы).

Элементная база и конструкция ТСД. Элементная база определяет основные технические характеристики ТСД: надежность, массу, габаритные размеры и др. Использование современных микроминиатюрных элементов позволяет значительно повысить надежность разрабатываемых средств при снижении их массогабаритных характеристик.

При проектировании ТСД в основном используют полупроводниковые интегральные схемы (ИС) и электромагнитные элементы.

В зависимости от технологии изготовления ИС подразделяют на *полупроводниковые* и *гибридные*. Элементы полупроводниковых ИС формируются в объеме и на поверхности полупроводникового материала. В зависимости от применяемых активных элементов их подразделяют на микросхемы на основе *униполярных* и *биполярных* структур. По технологическим методам изоляции элементов полупроводниковые ИС подразделяются на микросхемы с изоляцией *диффузионными p-n-переходами* и с изоляцией *диэлектриком*.

Элементы гибридных ИС выполняют в виде пленок, наносимых на поверхность диэлектрического материала (подложки), и самостоятельных конструкций, крепящихся на поверхности подложки.

В зависимости от толщины пленки и методов напыления на поверхность подложки гибридные ИС подразделяются на *толстопленочные* и *тонкопленочные*.

По числу входящих элементов различают полупроводниковые и гибридные ИС *малой* (10—30 элементов), *средней* (40—150 элементов), *большой* (более 150—200 элементов) и *сверхбольшой* (более 10 000 элементов) интеграции.

Наконец, по функциональному назначению ИС подразделяются на логические (цифровые) и линейные (аналоговые).

Логические ИС используют при дискретной обработке информации (активные элементы работают в режиме ключей); линейно-импульсные ИС — для усиления сигналов низкой и высокой частоты, видеоусиления, генераторов, смесителей, детекторов и других устройств (активные элементы работают в линейном или нелинейном режимах преобразования входных сигналов).

Из электромагнитных элементов в ТСД наиболее широко применяют *механические и бесконтактные электромагнитные релейные устройства*.

По принципу действия электромеханизмы делят на нейтральные постоянного тока, нейтральные переменного тока, а также реализующие полярность или фазу.

Задачу выбора одной из многих электрических цепей выполняют *шаговые электромагнитные механизмы*.

В настоящее время изготавливают «шаговые реле», несущие небольшую контактную нагрузку, состоящую из одного ряда контактов, по которому перемещается щетка, и более сложные устройства, содержащие до десяти рядов контактов.

Шаговые искатели бывают прямого и обратного хода. У искателей обратного хода тяговая характеристика лучше согласована с нагрузкой, что позволяет уменьшить размеры электромагнита и снизить расход энергии.

Шаговые искатели четко работают со скоростью 15—30 шагов/с. Время срабатывания электромагнита 7—10 мс; время отпуска 4—7 мс; время прохождения щетки между контактами 0,5—2 мс; потребляемая электромагнитом мощность приблизительно равна 50 Вт. В режиме самохода искатель работает со скоростью до 60 шагов/с.

Бесконтактные электромагнитные релейные устройства имеют ряд преимуществ перед электромеханическими.

Значительное распространение получили *дроссельные магнитные реле*, которые осуществляют коммутацию одной цепи. Выбор схемы реле обуславливается требованиями, предъявляемыми условиями работы реле (использование переменного или постоянного тока, вариации нагрузки, стабильности питания и т. д.).

Релейный эффект достигается *трансформаторными бесконтактными магнитными реле* при параллельном соединении нагрузки и дросселя или использовании эквивалентного трансформаторного усилителя. Подобные реле в отличие от дрессельных обеспечивают разделение цепей нагрузки и питания, а также коммутацию одновременно нескольких цепей.

На использовании явления феррорезонанса построены *феррорезонансные реле*, которые обладают большим коэффициентом усиления по мощности и сравнительно малой продолжительностью переходного процесса (время срабатывания составляет не более одного—пяти периодов напряжения питания рабочих обмоток). Применение сердечников из ферритов позволяет с помощью этих реле фиксировать и преобразовывать информацию на частотах 10—100 кГц.

Для преобразования и передачи информации используют *управляемые трансформаторы*, которые могут работать на постоянном или переменном токе.

В целях ускорения и удешевления проектирования ТСД применяют наборы базовых узлов (агрегатов). Номенклатура различных групп агрегатов:

1-я — датчики, нормирующие преобразователи, формирующие унифицированный сигнал, и другие измерительные устройства, несущие информацию о контролируемой (измеряемой) величине. К этой же группе относят устройства формирования алфавитно-цифровой информации, вводимой оператором вручную или автоматически;

2-я — коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, шифраторы и дешифраторы, согласующие устройства;

3-я — анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические устройства, устройства памяти, регуляторы, программные задатчики, а также управляющие вычислительные устройства;

4-я — исполнительные устройства — электрические, пневматические, гидравлические или комбинированные исполнительные механизмы, усилители мощности, и вспомогательные устройства, а также устройства представления информации.

В настоящее время наибольшее распространение получили агрегатные комплексы:

широкого применения: АСВТ — средств вычислительной техники; АкЭСР — аналоговых электрических средств регулирования на микроэлектронной базе; «Старт» — агрегатный комплекс щитовых пневматических

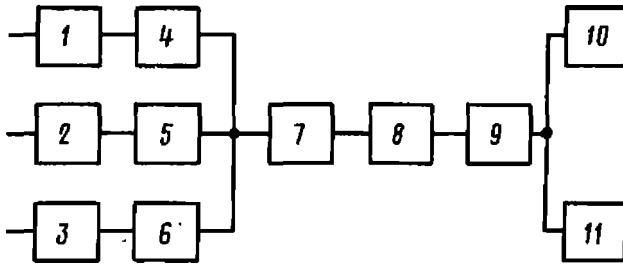


Рис. 36. Схема ТСД

средств регулирования; «Центр» — агрегатный функционально-аппаратурный комплекс пневматических средств; «Цикл» — агрегатно-модульный комплекс пневматических средств цикловой автоматики; КТСЛИУС — комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем; АСТТ — агрегатный комплекс средств телемеханической техники; АКЭИМ — агрегатный комплекс электрических исполнительных механизмов; АСПИ — агрегатный комплекс средств сбора и первичной обработки дискретной информации; АСКР — агрегатный комплекс средств контроля и регулирования; «Каскад» — агрегатный комплекс щитовых электрических средств регулирования; АСЭТ — агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники;

специализированные: АСАТ — агрегатированный комплекс средств аналитической техники; АСИМ — агрегатный комплекс средств измерения и дозирования масс; АСИВ — агрегатный комплекс средств измерения вибраций; АСНҚ — агрегатный комплекс средств неразрушающего контроля.

При выборе элементной базы в процессе проектирования необходимо рассмотреть все множество Y унифицированных стандартизованных элементов, которые имеются в распоряжении. Каждый из элементов множества Y характеризуется набором из N показателей B , определяющих безотказность, быстродействие, точность, объем, габариты, стоимость и др.

Задача выбора элементной базы может быть формализована. Для этого из множества $Y = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{ij},$

$y_{nm})$, где $i = \overline{1, n}$ — номер функционального элемента ТСД (коммута-

1. Значения показателей $b_{ij}^1, b_{ij}^2, b_{ij}^3$ и b_{ij}^4

Показатель	Номер элемента	Номер модификации		
		1	2	3
$b_{ij}^1 = \lambda_{ij} = 10^{-6}$	1	5	8	2
	2	18	25	32
	3	7	5	4
	4	20	23	25
	5	8	18	6
	6	8	12	5
	7	7	13	10
	8	12	16	11
	9	10	14	17
	10	13	15	9
	11	3	1	5
$b_{ij}^3 = t_{ij} \cdot 10$	1	5	2	10
	2	21	15	10
	3	4	6	8
	4	20	17	25
	5	15	12	18
	6	2	1	3
	7	20	13	15
	8	5	3	7
	9	13	11	9
	10	5	2	6
	11	5	3	1
$b_{ij}^2 = \sigma_g^2 \cdot 10^{-4}$	1	12	24	6
	2	8	11	13
	3	5	5	5
	4	8	10	6
	5	3	5	2
	6	2	2	2
	7	7	5	4
	8	2	2	2
	9	8	12	5
	10	2	2	2
	11	0	0	0
$b_{ij}^4 = V_{ij}$	1	7	10	4
	2	22	27	38
	3	9	7	6
	4	22	25	17
	5	12	20	8
	6	10	16	8
	7	9	15	12
	8	14	18	13
	9	12	16	19
	10	16	18	12
	11	7	5	9

тор, компаратор и др.); $j = \overline{1, m}$ — номер модификации или варианта исполнения функциональных элементов ТСД, выбирают такой набор функциональных элементов, который для одного из показателей удовлетворял бы условию

$$B_K = \min \sum_{ij} b_{ij}$$

или

$$B_K = \max \sum_{ij} b_{ij},$$

где b_{ij} — значение показателя, по которому оптимизируют задачу выбора.

На значения других показателей вводятся ограничения $B_p \cong B_{pтр}$.

Эта задача может быть решена направленным перебором множества Y с отсеиванием на каждом шаге вариантов, не удовлетворяющих поставленным условиям.

Пример 3. Выбрать вариант набора элементов для объекта (рис. 36), обеспечивающего минимальный объем, т. е.

$$\lambda_{ij} = \bar{b}_{ij}^1 = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 4 & 5 & 7 \\ 2 & 5 & 8 \\ 5 & 8 & 12 \\ 7 & 10 & 13 \\ 9 & 13 & 15 \\ 11 & 12 & 16 \\ 10 & 14 & 17 \\ 6 & 8 & 18 \\ 15 & 20 & 23 \\ 18 & 25 & 32 \end{vmatrix}; \quad \sigma_d^2 = \bar{b}_{ij}^2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 5 \\ 5 & 5 & 5 \\ 6 & 8 & 10 \\ 5 & 8 & 12 \\ 8 & 11 & 13 \\ 4 & 7 & 15 \\ 6 & 12 & 24 \end{vmatrix}; \quad \bar{b}_{ij}^3 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 5 \\ 2 & 5 & 6 \\ 3 & 5 & 7 \\ 4 & 6 & 8 \\ 2 & 5 & 10 \\ 9 & 11 & 13 \\ 12 & 15 & 18 \\ 13 & 15 & 20 \\ 10 & 15 & 21 \\ 17 & 20 & 25 \end{vmatrix}.$$

Набор элементов обозначим n -мерным вектором P , элементы которого представляют выбранные модификации функциональных элементов, и определим граничные значения показателей. Для этого определим вектор P_k при последовательном изменении первого элемента (первая строка матрицы b_{ij}^1). В первом столбце замену осуществляют до тех пор, пока не будут

$B_K = V = \min \sum_{ij} v_{ij}$ при ограничениях на другие показатели:

$$\sum_{ij} \lambda_{ij} \leq \lambda_{тр}, \quad \tau_d = \sum_{ij} t_{ij} \leq \tau_{дтр},$$

$$\sum_{ij} \sigma_{ij}^2 \leq \sigma_d^2,$$

где t_{ij} — время преобразования информации функциональным элементом; σ_d^2 — требуемое значение дисперсии суммарной погрешности ТСД. Известно, что $\lambda_{тр} = 1,63 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; $\sigma_d = 115 \cdot 10^{-4}$; $\tau_{дтр} = 60$ с.

Каждый элемент схемы представлен тремя модификациями, значения показателей которых приведены в табл. 1.

Решение. Для выбора элементов на основании данной таблицы строим упорядоченную матрицу, в которой элементы в каждой строке (номер элемента) располагаются в порядке возрастания, а строки в порядке возрастания последнего элемента. Для показателей $b_{ij}^1, b_{ij}^2, b_{ij}^3$ получим упорядоченную матрицу в следующем виде:

удовлетворены заданные ограничения. Соответственно получим: $P = (1 \ 1 \ 1 \times 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) = 88$; $P = (2 \ 1 \times 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) = 90$; $P = (3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1) = 92$. Затем проведем вычисления для третьего столбца, заменяя также первый элемент. Получим $P = (1 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \times 3 \ 3 \ 3 \ 3) = 162$; $P = (2 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \times 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3) = 164$. Следующая заме-

на даст величину заведомо большую, чем установлено требованием, поскольку $164 > 163$, поэтому дальнейшая замена не требуется. Таким образом, требованию по λ удовлетворяют векторы $P = (1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div P = (1\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3)$.

Для определения нижней границы n -ю строку делим пополам и определяем сумму элементов. Если при этом искомая сумма не удовлетворяет ограничению, то деление n -й строки про-

должается до получения первой модификации. Подобные операции выполняют последовательно с $n - 1$, $n - 2$ и так далее строками.

Поскольку $n = 11$, а середина — вторая модификация, то рассчитываем вектор $P = (2\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3 \times 3\ 3\ 2) = 157$, который является нижней границей области допустимых значений показателей. Действуя аналогично, находим область допустимых значений R_1 по ограничению на λ :

$$R_1: \begin{aligned} &(1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (1\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3); \\ &(2\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (2\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3); \\ &(3\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (3\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 2). \end{aligned}$$

С учетом исходной матрицы, заданной табл. 1, векторы перекодируются, т. е. $(1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (3\ 1\ 3\ 3\ 3\ 3\ 1\ 3\ 1\ 3\ 2)$ и т. д.

Соответственно для показателей $b_{ij}^2 = \sigma_d^2$ и $b_{ij}^3 = \tau_d$ получаем область допустимых значений:

$$R_3: \begin{aligned} &(1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (1\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 2\ 2\ 2\ 2); \\ &(2\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (2\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 2\ 2\ 2\ 2); \\ &(3\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 2\ 2\ 2\ 2); \end{aligned}$$

$$R_2: (1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) \div (3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3).$$

Используя полученные данные, определим область возможных значений, удовлетворяющих требованиям по трем показателям:

$$R^* = R_1 \cap R_2 \cap R_3.$$

Для этого строим упорядоченную матрицу по $b_{ij}^4 = V_{ij}$:

$b_{ij}^4 = V_{ij} =$	5	7	9
	6	7	9
	4	7	10
	9	12	15
	8	10	16
	12	16	18
	13	14	18
	12	16	19
	8	12	20
	17	22	25
22	27	38	

и выбираем вектор $P = (1\ 1\ 1\ 1\ 1 \times 1\ 1\ 1\ 1\ 1)$, соответствующий максимальному объему.

Строим вектор с учетом исходной матрицы, приведенной в табл. 1, $P = (3\ 1\ 3\ 3\ 3\ 3\ 1\ 3\ 1\ 3\ 2)$, и проверяем условие $P_i \in R^*$. Если это условие выполняется, то выбранный набор элементов является оптимальным, если — нет, то выбирается вектор $P = (2\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1)$, и процедура продолжается до получения решения.

Вектор $P = (3\ 2\ 3\ 11\ 3\ 3\ 3\ 2\ 3\ 2)$ дает $V = 131$ и соответствует оптимальному набору элементов.

Таким образом, оптимальным вариантом набора элементов является следующий: первый функциональный элемент третьей модификации; второй — второй модификации; третий, шестой, седьмой, восьмой и десятый — третьей модификации; четвертый, пятый — первой модификации; девятый, одиннадцатый — второй модификации.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Технические средства диагностирования (ТСД) относят к измерительно-информационным системам и используют для определения состояния технических систем. Они включают аппаратные средства, программные средства и эксплуатационно-техническую документацию.

ТСД предназначены для решения следующих задач:

определения работоспособности (исправности, правильности функционирования);

поиска дефектов;

прогнозирования изменения состояния.

Отказы или неисправность определяют по различным признакам.

По физической природе различают: скачкообразные отказы (сбои), которые проявляются в потере элементом некоторых функций только на очень короткий период времени, причем после отказа элемент немедленно возвращается к своим номинальным характеристикам;

постоянные отказы, которые проявляются в потере некоторых функций системы и устраняются только заменой отказавшей части.

Постоянные отказы подразделяют, в свою очередь, на полные отказы, которые приводят к полной потере работоспособности системы, и на частичные отказы, ведущие к потере только некоторых функций системы.

Причинами отказов могут быть как эксплуатационные факторы, так и не-

совершенство проектирования, производства и монтажа оборудования. В качестве примера на рис. 1 приведены причины отказов для судового оборудования.

Для предупреждения отказов необходимо исследовать состояние объекта измерением его диагностических параметров.

Задача выбора измеряемых диагностических параметров состоит в определении из множества принципиально возможных параметров некоторого ограниченного числа параметров для исследования информативности признаков, сформированных на этих параметрах. Затем на основании информативности признаков выбирают окончательный состав измеряемых параметров, которые используют в дальнейшем для диагноза неисправных состояний.

С усложнением современного оборудования, повышением его качества и надежности число необходимых технических параметров диагностирования увеличивается. В табл. 1 перечислены основные технические параметры диагностирования легковых автомобилей и ряда механизмов.

Наименования, число контролируемых объектов и среднее число наименований параметров на разных стадиях производства самолета приведены в табл. 2.

Если учесть широчайшую номенклатуру изделий современной техники и принять во внимание их специфические индивидуальные особенности, то даже перечислить все известные технические диагностические параметры представляет необычайную трудность.

Базу для логической процедуры диагноза составляет совокупность фи-

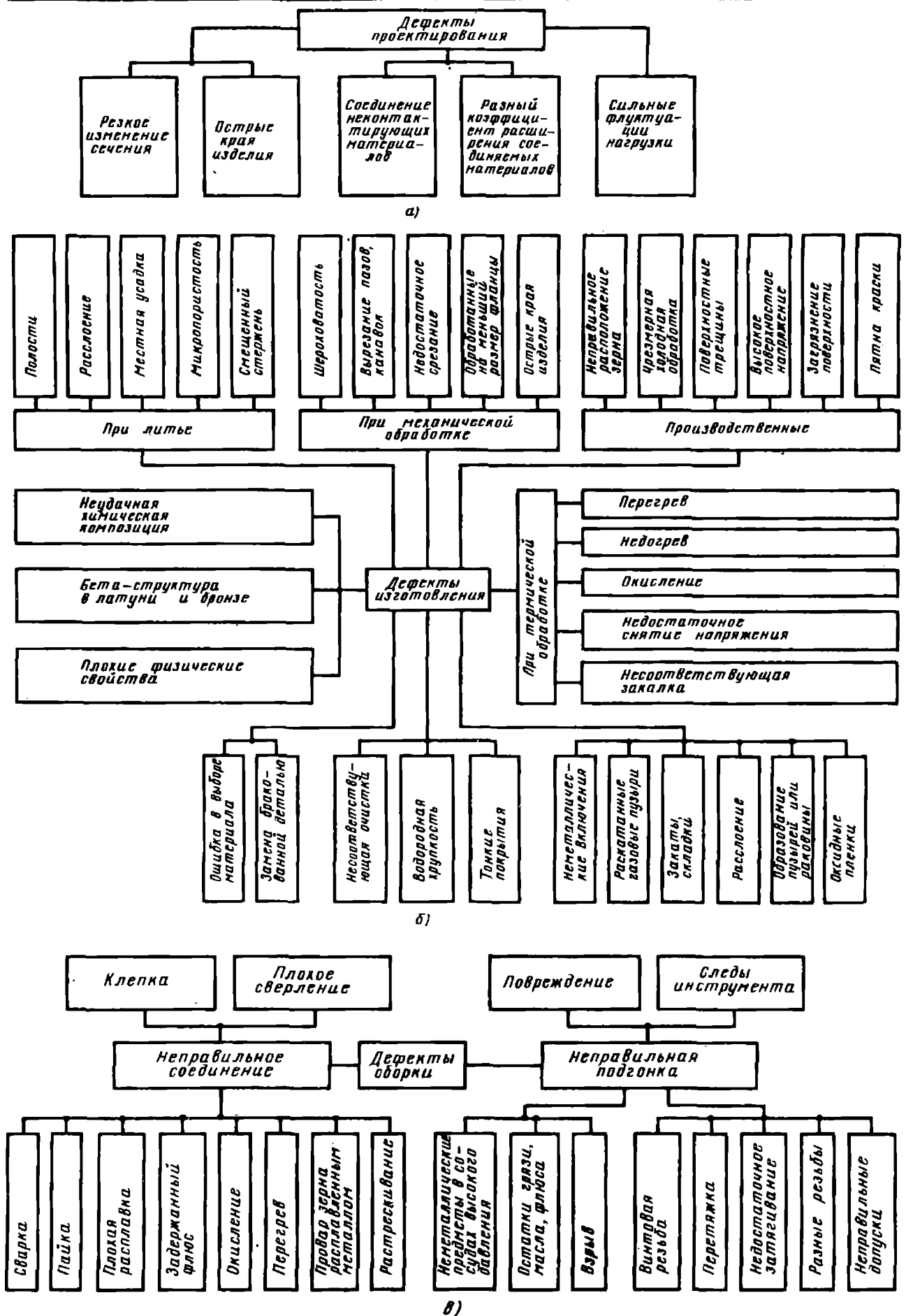


Рис. 1. Ряд причин отказов для судового оборудования:

а — дефекты проектирования; б — дефекты изготовления; в — дефекты сборки

1. Основные параметры диагностирования легковых автомобилей

Объект диагностирования	Параметры
Автомобиль в целом	Контрольный расход топлива, время разгона автомобиля с места на горизонтальном прямом участке сухой дороги до скорости 100 км/ч, максимальное замедление автомобиля при торможении, тормозной путь, эффективность действия ручного тормоза
Двигатель в целом	Эффективная мощность, крутящий момент, ускорение частоты вращения коленчатого вала, характеристики вибрации и шума, давление масла в главной масляной магистрали, удельный расход топлива, содержание оксида углерода в отработавших газах
Цилиндро-поршневая группа	Характеристики вибраций, давление газов, прорывающихся в картер, расход или падение давления сжатого воздуха, подаваемого в цилиндры, расход масла на угар, давление в цилиндрах в конце такта сжатия, содержание оксида углерода в отработавших газах, количественный и качественный состав элементов износа в масле
Кривошипно-шатунный механизм	Характеристики вибраций, давление масла в главной масляной магистрали, количественный и качественный состав элементов износа в масле, свободный ход поршня относительно оси коленчатого вала
Система зажигания и электрооборудования	Угол опережения зажигания, угол замкнутого состояния контактов прерывателя распределителя зажигания, зазор между контактами прерывателя, характеристики напряжения в первичной и вторичной цепях, изменение тока и напряжения на выходе генератора при изменении частоты вращения коленчатого вала, прогиб ремня привода вентилятора, падение напряжения на контактах прерывателя, зазор между электродами свечей зажигания, напряжение на клеммах аккумуляторной батареи, сила тока, потребляемая стартером в режиме вспомогательного хода, сила тока, потребляемая стартером в режиме полного торможения, напряжение реле обратного тока, напряжение, поддерживаемое регулятором напряжения, электрическое сопротивление выпрямительного блока в прямом и обратном направлениях, частота вращения коленчатого вала при запуске двигателя, характеристики вибраций стартера при запуске двигателя, направление и сила света фар, число миганий указателей поворота в минуту
Трансмиссия	Свободный и рабочий ход педали сцепления, усилие, необходимое для полного нажатия на педаль сцепления, зазор в сопряжениях кинематических пар коробки передач и главной передачи, характеристики нагрева при постоянном режиме нагружения

Продолжение табл. 1

Объект диагностирования	Параметры
Механизм газораспределения	Характеристики вибраций, давление масла в главной масляной магистрали, расход или падение давления сжатого воздуха, подаваемого в цилиндры, характеристика изменения разрежения во впускном трубопроводе
Система питания	Удельный расход топлива, содержание оксида углерода в отработавших газах, уровень топлива в поплавковой камере, производительность топливного насоса, давление топлива после насоса, разрежение во впускном трубопроводе
Смазочная система	Давление масла в главной масляной магистрали, производительность масляного насоса, перепад давления на фильтре, давление срабатывания предохранительного и перепускного клапанов
Система охлаждения	Установившаяся температура охлаждающей жидкости, производительность водяного насоса, перепад температур на входе и выходе теплообменника, скорость падения давления сжатого воздуха в системе охлаждения, утечка охлаждающей жидкости, разрежение срабатывания предохранительного клапана, давление срабатывания парового клапана теплообменника, плотность охлаждающей жидкости, количественный и качественный состав элементов износа в масле, уровень рабочей жидкости в питательном бачке главного цилиндра выключения сцепления
Ходовая часть, рулевое управление и подвеска	Зазор рулевого колеса, усилие вращения рулевого колеса, сходжение колес, развал колес, поперечный и продольный углы наклона шкворня, величина бокового увода, давление воздуха в шинах, глубина протектора шин, осевой зазор в подшипниках ступиц колес, разность базы левых и правых колес, отклонение от параллельности передней и задней осей
Тормозная система	Максимальные тормозные силы на колесах, время срабатывания тормозного привода, усилие нажатия на педаль тормоза, разность тормозных сил на колесах одной оси, эллипсность тормозных барабанов, свободный ход педали тормоза, износ (интенсивность изнашивания) тормозных накладок, износ (интенсивность износа) тормозного барабана, уровень тормозной жидкости в питательном бачке главного тормозного цилиндра, перемещение органа управления стояночного тормоза до достижения максимальной тормозной силы на колесах автомобиля, усилие перемещения органа управления стояночного тормоза, падение давления в системе гидропривода, перепад давления, создаваемого гидравлическим усилителем, разность времени снижения и нарастания деформации тормозного барабана

2. Характеристика самолета как объекта контроля качества на стадиях основного производства

Стадия производства	Конструктивно-технологические элементы		
	Наименование	Число на одно изделие	Среднее число наименований параметров и признаков качества на одно изделие
Литейная	Литые заготовки и детали: металлические	1 700	16
	резиновые	500	14
	пластмассовые	130	20
Кузнечная	Горячештампованные заготовки, поковки, детали	3 600	20
Заготовительно-штамповочная	Оригинальные детали	20 000	12
	Профили холодноштампованные	76 000	14
	Нормализованные детали	130 000	8
	Заклепки	900 000	6
	Трубы	3 500	20
Механосборочная	Оригинальные детали	40 000	22
	Нормализованные	220 000	8
	Монолитные панели	20	30
	Агрегаты	280 наименований	50
Термическая обработка	Детали, узлы	5 000	26
Нанесение покрытий, химическая и электрохимическая обработка	Детали, узлы	81 000	24
Агрегатная сборка	Агрегаты	28	50
	Сборочные узлы	2800 наименований	39
	Сварные узлы	2000 наименований	
Общая сборка и монтаж	Длина, м:		
	герметичных швов	400	10
	трубопроводов	540	28
	электропроводов	130 000	40
	Готовые изделия	21 000	114
Типовые системы	9 наименований	48	
Испытания	Типовые системы	9 наименований	32
	Бортовое оборудование	10 наименований	

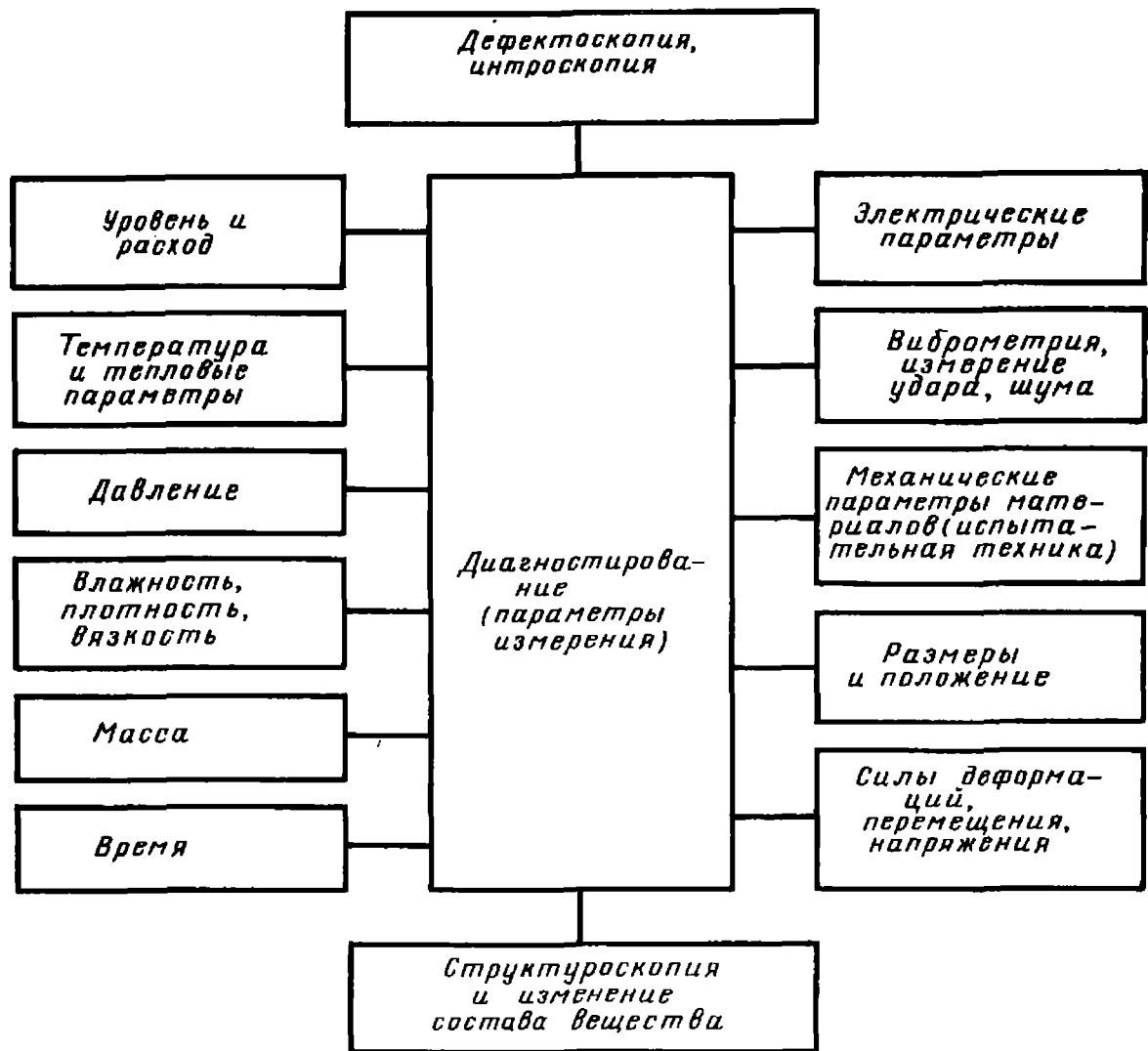


Рис. 2. Виды измерений диагностических параметров

зических параметров, через измерение которых можно определить технические диагностические параметры.

В табл. 3 представлены известные физические параметры. Очень важно, что их число ограничено и не превышает 200.

Представляющие наибольший практический интерес параметры назначения и надежности объектов являются функцией от измеряемых физических параметров. Например, дефект в виде трещины может быть определен через измерение магнитной проницаемости, коэрцитивной силы и магнитной индукции ферромагнитного материала (при использовании магнитных методов исследования или через измерение температуропроводности), теплоемкости и теплопроводности материала (при использовании тепловых методов исследования) или через измерение модуля упругости, плотности и удель-

ного волнового сопротивления материала (при применении акустических методов) и т. д.

На измерении физических параметров основаны различные методы и средства технического диагностирования, с помощью которых анализируют и оценивают сложное техническое состояние объекта.

Для исследования этого состояния применяют все известные виды электромагнитного излучения: низкочастотное ($0-13^3$ Гц); радиоволны (10^4-10^{10} Гц); инфракрасное ($10^{11}-4 \times 10^{14}$ Гц); видимое ($4 \cdot 10^{14}-7,5 \times 10^{14}$ Гц); ультрафиолетовое ($7,5 \times 10^{14}-3 \cdot 10^{16}$ Гц); рентгеновское ($3 \times 10^{16}-3 \cdot 10^{20}$ Гц); гамма-лучи ($3 \times 10^{19}-3 \cdot 10^{22}$ Гц); космические лучи ($3 \cdot 10^{21}$ Гц). Широкое применение получили многочисленные акустические, звуковые и вибрационные методы исследования, а также корпускулярные

3. Параметры диагностирования (физические)

Вид параметров	Параметры
Кинематические	Время, скорость, ускорение, угловая скорость, угловое ускорение, период, частота периодического процесса, фаза, объемный расход, плотность объемного расхода, градиент скорости
Геометрические	Длина, площадь, объем, плоский угол, телесный угол, кривизна линии, кривизна поверхности, моменты плоских фигур, момент сопротивления плоской фигуры, осевой и полярный моменты инерции площади плоской фигуры
Статические и динамические	Масса, сила, импульс силы, количество движения, давление, градиент давления, работа, энергия, плотность, мощность, коэффициент трения, коэффициент сопротивления, коэффициент упругости, момент силы, момент инерции, массовый расход, массовая скорость потока, затухание, добротность
Механические и молекулярные свойства вещества	Плотность, удельный объем, удельный вес, количество вещества, относительная молекулярная масса, молярная масса, мерный объем, коэффициент продольного растяжения, модуль продольной упругости, коэффициент всестороннего сжатия, твердость, ударная вязкость, динамическая вязкость, текучесть, кинематическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, размерность частицы, концентрация, коэффициент диффузии, функции распределения
Тепловые	Температура, количество теплоты, температурный градиент, тепловой поток, поверхностная плотность теплового потока, энтропия, теплоемкость (объемная и удельная), теплота фазового превращения, теплота сгорания топлива, теплопроводность, коэффициент теплопередачи, коэффициент температуропроводности, температурные коэффициенты
Акустические	Звуковое давление, объемная скорость, звуковая энергия, плотность звуковой энергии, поток звуковой энергии, интенсивность звука, акустическое сопротивление; удельное акустическое сопротивление, механическое сопротивление, уровни интенсивности звука и звукового давления, высота звука, тембр звука, громкость звука, акустический коэффициент отражения, акустический коэффициент поглощения, акустическая проницаемость перегородки, время реверберации

Продолжение табл. 3

Вид параметров	Параметры
Электрические и магнитные	Электрический заряд, поверхностная плотность заряда, напряженность электрического поля, электрическое смещение, поток электрического смещения, потенциал, электрический момент диполя, емкость, поляризованность, диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая восприимчивость, сила тока, плотность тока, электрическое сопротивление, электрическая проводимость, удельное электрическое сопротивление, удельная проводимость, магнитная индукция, магнитный поток, напряженность магнитного поля, магнитный момент, магнитодвижущая сила, магнитное сопротивление, индуктивность, взаимная индуктивность, намагниченность, магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость
Параметры излучений	Поток излучения, поверхностная плотность потока излучения, интенсивность излучения, энергетическая освещенность, энергетическое количество освещения, энергетическая сила света, энергетическая яркость, объемная плотность энергии излучения, спектральная плотность потока излучения по длине волны, спектральная плотность потока излучения по частоте, световая энергия, светимость, интенсивность светового потока, освещенность, яркость, освечивание, световая экспозиция, видимость, относительная видимость, оптическая сила, главное фокусное расстояние, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент рассеяния, коэффициент поглощения, коэффициент пропускания, постоянные вращения плоскости поляризации
Параметры атомной физики	Момент количества движения, дипольный момент, поляризуемость, время жизни, эффективные сечения взаимодействия, поглощенная доза излучения, экспозиционная доза излучения, физический эквивалент единицы дозы излучения, единицы радиоактивности, коэффициент ионизации, коэффициент рекомбинации, коэффициент подвижности
Универсальные физические постоянные	Скорость света в вакууме, число частиц в поле вещества (число Авогадро), гравитационная постоянная, заряд электрона, масса покоя электрона, масса покоя протона, масса покоя нейтрона, число Фарадея, постоянная Планка, постоянная тонкой структуры, отношение заряда электрона к его массе, комптоновская длина волны, постоянная Ридберга, радиус Бора, магнетон Бора, магнитный момент электрона, нормальный объем газа, универсальная газовая постоянная, постоянная Больцмана

излучения (нейтронов, протонов, электронов, позитронов) и электростатические поля. Большой класс методов и средств диагностирования радиоэлектронной аппаратуры основан на измерении электрических параметров. Ряд методов для измерений использует разнообразные физические эффекты, например, капиллярное проникновение специальных дефектоскопических материалов в полость дефекта и наблюдение контраста в оптическом преломлении, магнитопорошковые и другие методы.

Для диагностирования объектов применяют широкую номенклатуру испытательной техники, в том числе приборы для определения твердости и упругих констант материалов, исследования воздействия климатических факторов, машины для испытания материалов на растяжение и сжатие, изгиб, износ, удар, срез, кручение и т. д.

Перспектива развития методов и средств технического диагностирования связана с оптимальным применением для измерений характеристик известных физических явлений и эффектов. Виды измерения диагностических параметров, представленные на рис. 2, можно отнести к наиболее существенным и часто встречающимся в практике технического диагностирования объектов.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИЙ, УДАРА И ШУМА

Измерение вибраций машин. Диагностирование состояния машин и оценка степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации — один из наиболее эффективных методов повышения надежности и долговечности оборудования.

Виброизмерительная аппаратура служит для исследования механического состояния оборудования с целью обнаружения дефектов на ранних стадиях их возникновения. Наблюдая за изменением параметров вибрации в характерных для данного вида оборудования точках, можно определить вид и местоположение дефекта, оценить степень его опасности, а следовательно,

и необходимость останова оборудования для предупреждения аварийной ситуации.

Виброизмерительную аппаратуру используют при эксплуатации роторных машин всех типов (авиационных двигателей, турбин, насосов, компрессоров, вентиляторов), применяют для контроля качества сборки и наладки объектов, определения состояния инструмента в станках и многих других случаях.

Степень эффективности применения штатной виброизмерительной аппаратуры и расширение ее функций возрастают по мере накопления данных анализа вибрации машин на различных стадиях обработки и эксплуатации объектов.

Простейшей формой вибрации является гармоническое колебание тела, которое как функция времени представляет собой синусоиду. Более распространенная форма вибрации — квазигармоническая с непрерывным изменением частоты. Наибольшая часть колебаний, встречающихся на практике, имеет форму искаженной синусоиды. Для описания этой формы вибрации используют метод преобразования Фурье, заключающийся в том, что любую периодическую зависимость рассматривают как комбинацию ряда гармонических колебаний с взаимозависимыми частотами. Если функция $x(t)$ может быть представлена рядом Фурье $x(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \lambda \omega t + \dots$ то параметры $A_1, \omega; A_2, \lambda, \omega_i \dots$ называют амплитудами и частотами (первой, второй и т. д.) соответствующих гармонических составляющих.

Гармонические составляющие определяют частотный спектр вибрации, который представляется графически набором дискретных линий.

К параметрам линейной вибрации относят перемещение, скорость, ускорение, резкость, силу и мощность. К параметрам угловой вибрации относят угол поворота, угловую скорость, угловое ускорение, угловую резкость, момент сил. К параметрам обоих видов вибраций относят также фазу, частоту и коэффициент нелинейных искажений. Мгновенное значение координаты положения точки

при колебательном движении называют перемещением и обозначают $s(t)$.

Первую производную перемещения по времени называют скоростью $v =$

$$= \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s}; \text{ вторую — ускорением}$$

$$a = \frac{d^2s(t)}{dt^2} = \ddot{s} \text{ и третью — резкостью,}$$

$$u = \frac{d^3s(t)}{dt^3} = \overset{\cdot}{\ddot{s}}.$$

Описание ряда вибрационных процессов представлено в табл. 4.

Перемещение как диагностический параметр представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение объекта или деформацию. Если исследуют эффективность вибрационных машин, а также воздействие вибраций на организм человека, то изучают скорость вибрации, поскольку именно она определяет импульс силы и кинетическую энергию. Основным измеряемым параметром является ускорение, однако в ряде случаев исследователей интересует и резкость вибраций.

Измеряют мгновенные, амплитудные (пиковые), действующие и средние значения параметров вибрации.

Периодическую вибрацию разделяют на гармоническую и полигармоническую.

Полигармонический процесс состоит из постоянной x_0 и бесконечного множества синусоидальных гармоник с амплитудами x_n и начальными фазами φ . При этом частоты всех гармоник кратны основной частоте f_1 , что видно из спектра полигармонического процесса без учета начальных фаз (см. табл. 4).

При исследовании полигармонических вибраций целесообразно использовать параметры, непосредственно связанные с энергосодержанием колебаний. В этом случае наиболее важными характеристиками являются среднее арифметическое, среднеквадратичное и пиковое значения колеблющегося параметра.

Если физическое содержание задачи позволяет разделить рассматриваемый диапазон на участки, то их называют поддиапазонами или полосами частот. Ширину полосы выражают в интер-

валах; при этом интервал, для которого $f_{\text{в}} = 2f_{\text{н}}$, называют октавой.

Непериодические вибрационные процессы разделяют на почти периодические и переходные.

Почти периодические процессы могут быть описаны функцией времени, приведенной в табл. 4, где не все отношения представляют собой рациональные числа. Такие процессы чаще встречаются при суммировании двух или большего числа независимых гармонических процессов. Частоты гармоник такого процесса несоизмеримы.

При почти периодических вибрациях измеряемыми параметрами являются действующие и пиковые значения параметров вибрации и форма колебаний.

Переходные непериодические процессы многочисленны и разнообразны. Основное их отличие заключается в том, что они не могут быть представлены в виде дискретного спектра.

Процесс, для которого изменение физической величины во времени происходит случайным образом, называется случайным. Такой процесс характеризуется случайной функцией времени $x(t)$, которую можно рассматривать как бесконечную совокупность или множество функций $\{x(t)\}$, называемых выборочными, каждая из которых представляет одну из возможных реализаций случайной функции. Случайный процесс можно описать в любой момент времени усреднением вероятностных характеристик по множеству выборочных функций.

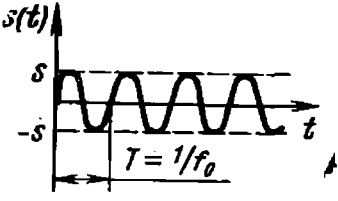
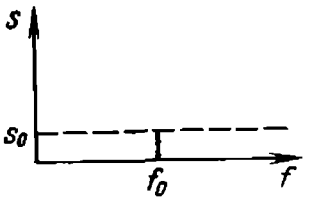
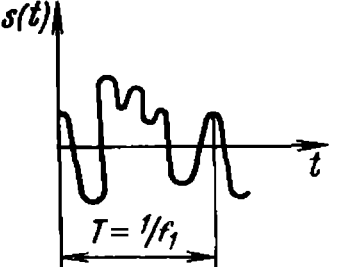
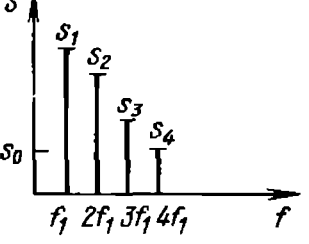
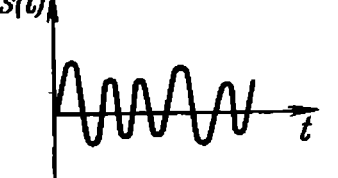
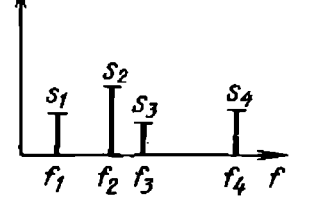
Для измерения параметров вибрации используют различные физические принципы преобразования механических колебаний в электрический сигнал.

По принципу работы преобразователи абсолютной вибрации разделяют на генераторные и параметрические измерительные преобразователи (ИП) (рис. 3).

Генераторные ИП осуществляют прямое преобразование механической энергии в электрический сигнал. К ним относят ИП, действие которых основано на эффекте Холла, пьезоэлектрические, индукционные и др.

Параметрические ИП представляют собой устройства, в которых под дей-

4. Периодические и непериодические вибрационные процессы

Вид процесса	Функция времени	Форма	Частотный спектр
Гармонический	$s(t) = s \sin(\omega t + \varphi)$ $s(t) = s \sin 2\pi f_0 t$		
Полигармонический	$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_1 t + b_n \sin 2\pi n f_1 t)$ $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \times \cos 2\pi n f_1 t dt$ $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \times \sin 2\pi n f_1 t dt$ $s(t) = s_0 + \sum_{n=1}^{\infty} s_n \times \cos(2\pi n f t - \varphi_n)$ $s_0 = \frac{a_0}{2}$ $s_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $\varphi_n = \arctg(b_n/a_n)$		
Почти периодический	$s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} s_n \times \sin(2\pi f_n t + \varphi)$		

Продолжение табл. 4

Вид процесса	Функция времени	Форма	Частотный спектр
Переходной	$s(t) = \begin{cases} Ae^{-at} \cos bt & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ $= \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt$		

Примечание: $s(t)$ — значение перемещения в момент времени t ; s — амплитуда; $\omega = 2\pi f_0$ — угловая частота; f_0 — частота колебаний; φ — начальная фаза колебаний, рад; f — основная частота полигармонического процесса; a_n, b_n — коэффициенты Фурье.

ствием измеряемых входных механических параметров изменяются электрические параметры схем: сопротивление, емкость, частота и т. д.

К параметрическим ИП относят резисторные, реостатные, тензорезисторные, емкостные, индуктивные, трансформаторные, магнитоупругие, вихре-

токовые, вибрационно-частотные, электронно-механические и др.

Из всего многообразия существующих ИП наибольшее распространение получили преобразователи с пьезоэлектрическим, тензорезистивным, электромагнитным (индуктивным), емкостным и струнным чувствительными

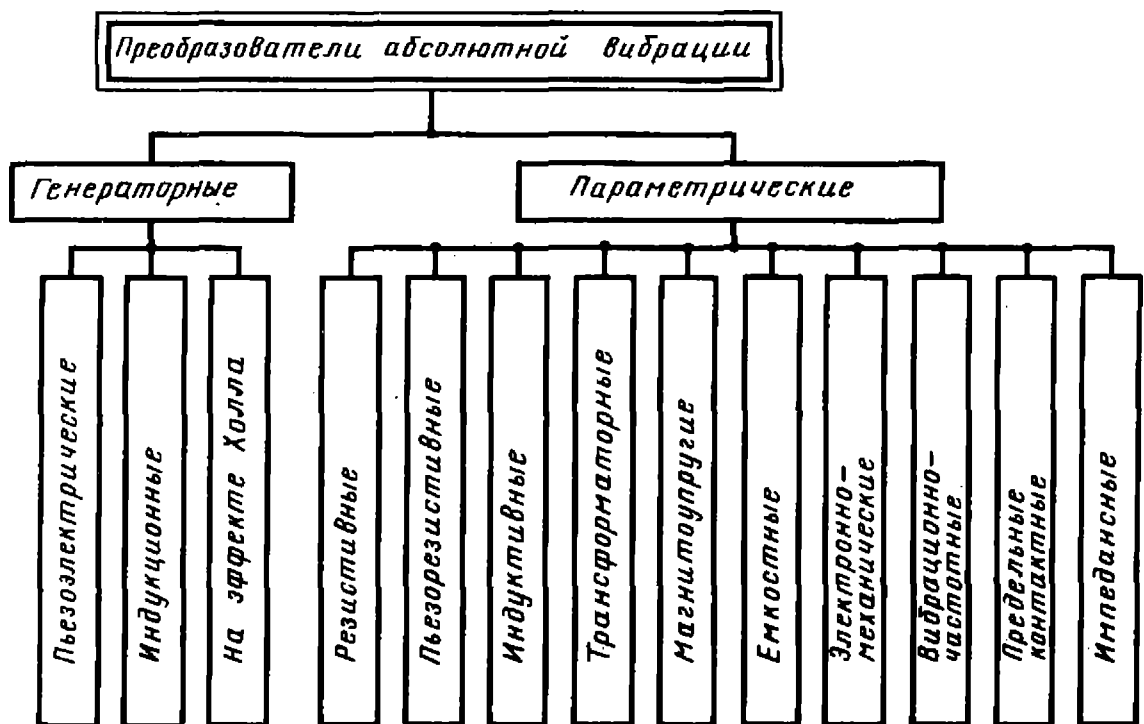


Рис. 3. Классификация преобразователей абсолютной вибрации

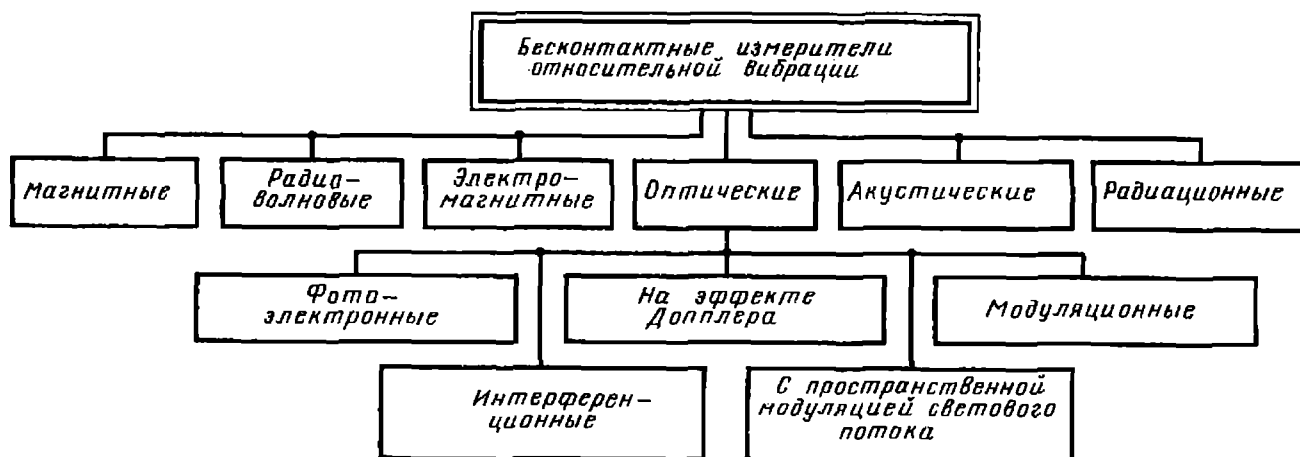


Рис 4. Классификация измерителей относительной вибрации

элементами. Каждый из перечисленных ИП имеет свою область рационального применения. Так, пьезоэлектрические ИП наиболее целесообразно использовать при наличии в динамическом процессе широкого спектра частот (до нескольких десятков тысяч герц) и больших значений ускорений. Тензорезистивными, индуктивными, емкостными и вибрационно-частотными ИП целесообразно одновременно измерять переменную и постоянную составляющие динамического процесса. Рассматриваемые ИП являются контактными, их закрепляют на исследуемом объекте и кабелем соединяют с контрольно-измерительной аппаратурой.

Преимущества бесконтактных измерителей вибрации заключаются в возможности проведения измерений с повышенной точностью в труднодоступных местах в условиях высоких температур и агрессивных сред при наличии различных внешних физических полей.

В бесконтактных измерителях реализуется кинематический принцип измерения параметров относительных вибраций и используются оптические, радиоволновые, акустические, радиационные, электромагнитные и магнитные методы (рис. 4).

Оптические методы измерения параметров вибрации по способу выделения информации об измеряемом параметре делят на амплитудные и частотные. К амплитудным методам измерений относят фотоэлектронные, дифракционные и интерференционные методы измерения, а также методы с исполь-

зованием пространственной модуляции светового потока.

Измерение параметров вибрации, основанное на изменении частоты излучения оптического генератора, отраженного от объекта, производят измерительными устройствами, действие которых основано на использовании эффекта Доплера.

Метод измерения выбирают с учетом конкретной задачи, а также возможности обеспечения необходимой погрешности измерения, чувствительности метода, диапазона измеряемых параметров и т. д.

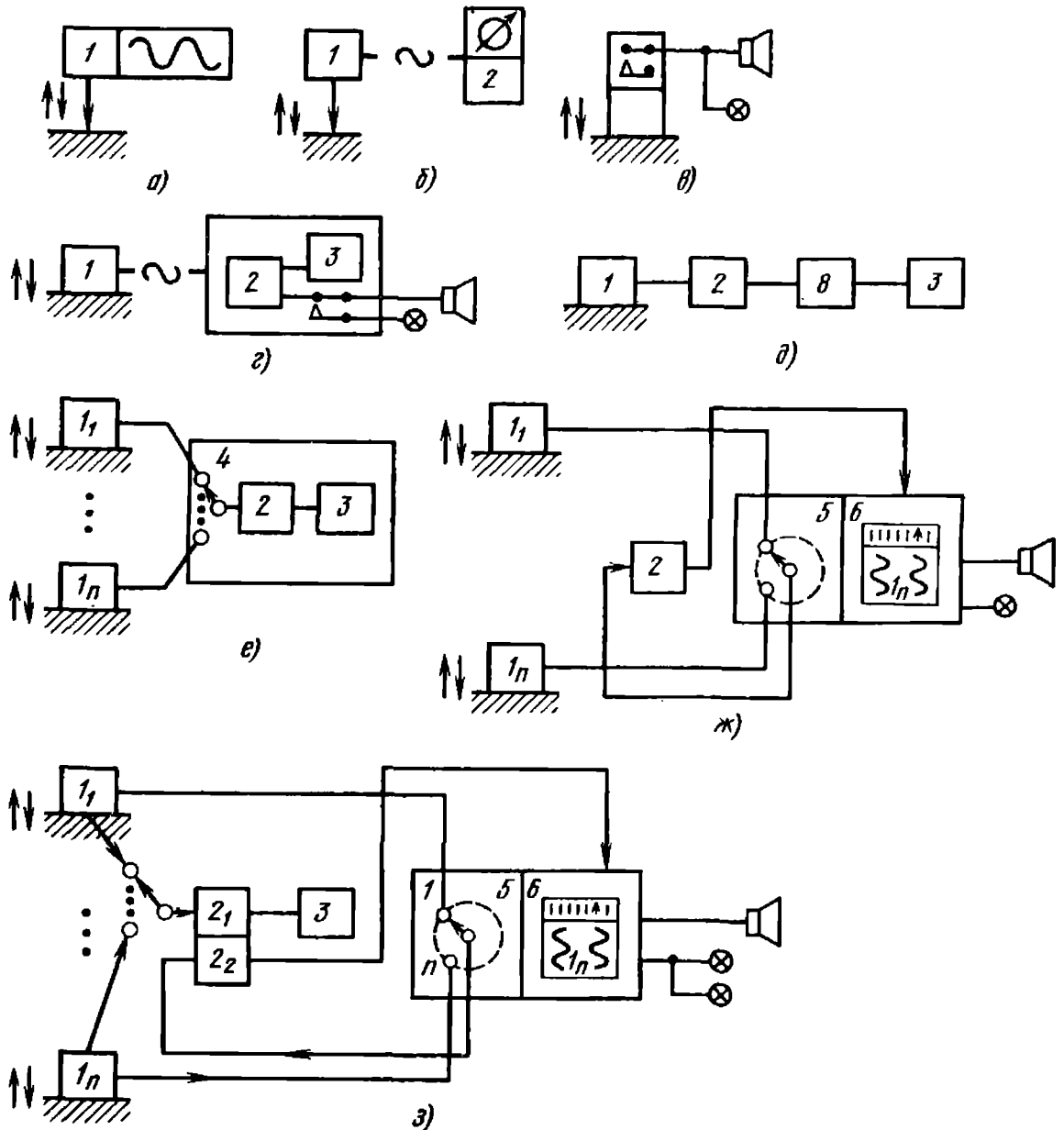
По степени функциональной и конструктивной сложности аппаратуру для контроля вибрации оборудования можно разделить на следующие группы:

ручные вибрографы рычажного типа с записью на бумаге контролируемой вибрации (рис. 5, а);

портативные виброметры (вибротестеры) с выносным виброизмерительным преобразователем в виде виброщупа и измерительным усилителем со встроенным индикатором (рис. 5, б);

стационарные одноканальные приборы, содержащие виброизмерительный преобразователь предельного типа и контактную систему, заключенные в одном корпусе, жестко закрепляемом на объекте контроля (предельный акселерометр), выдающие сигнал о превышении допустимого уровня вибрации (рис. 5, в);

стационарные одноканальные приборы, состоящие из выносного виброизмерительного преобразователя, устанавливаемого на объекте, и измери-



тельного усилителя, имеющего индикатор и контакты для подключения звуковой или световой сигнализации или исполнительных механизмов (рис. 5, в);

одноточечную аппаратуру с анализатором спектра и указателем амплитуд гармоник на выходе (рис. 5, д);

стационарную многоточечную аппаратуру, состоящую из выносных виброизмерительных преобразователей, устанавливаемых на контролируемом объекте, и измерительного усилителя со встроенным указателем и ручным переключателем, коммутирующим виброизмерительные преобразователи на входе измерительного усилителя (рис. 5, е);

стационарную многоточечную аппаратуру с записью контролируемых

параметров вибрации (размаха виброперемещения, среднеквадратичного значения виброскорости, пикового значения ускорения) на самописец с автоматическим переключением выносных виброизмерительных преобразователей на входе одноканального измерительного усилителя (рис. 5, ж);

стационарную многоточечную аппаратуру с выборочным контролем по указателю и автоматической регистрацией самописцем параметров вибрации, состоящую из выносных виброизмерительных преобразователей, двухканального измерительного усилителя, на входе одного из каналов которого виброизмерительные преобразователи коммутируются переключателем с целью измерения оператором параметров вибрации, а на входе другого —

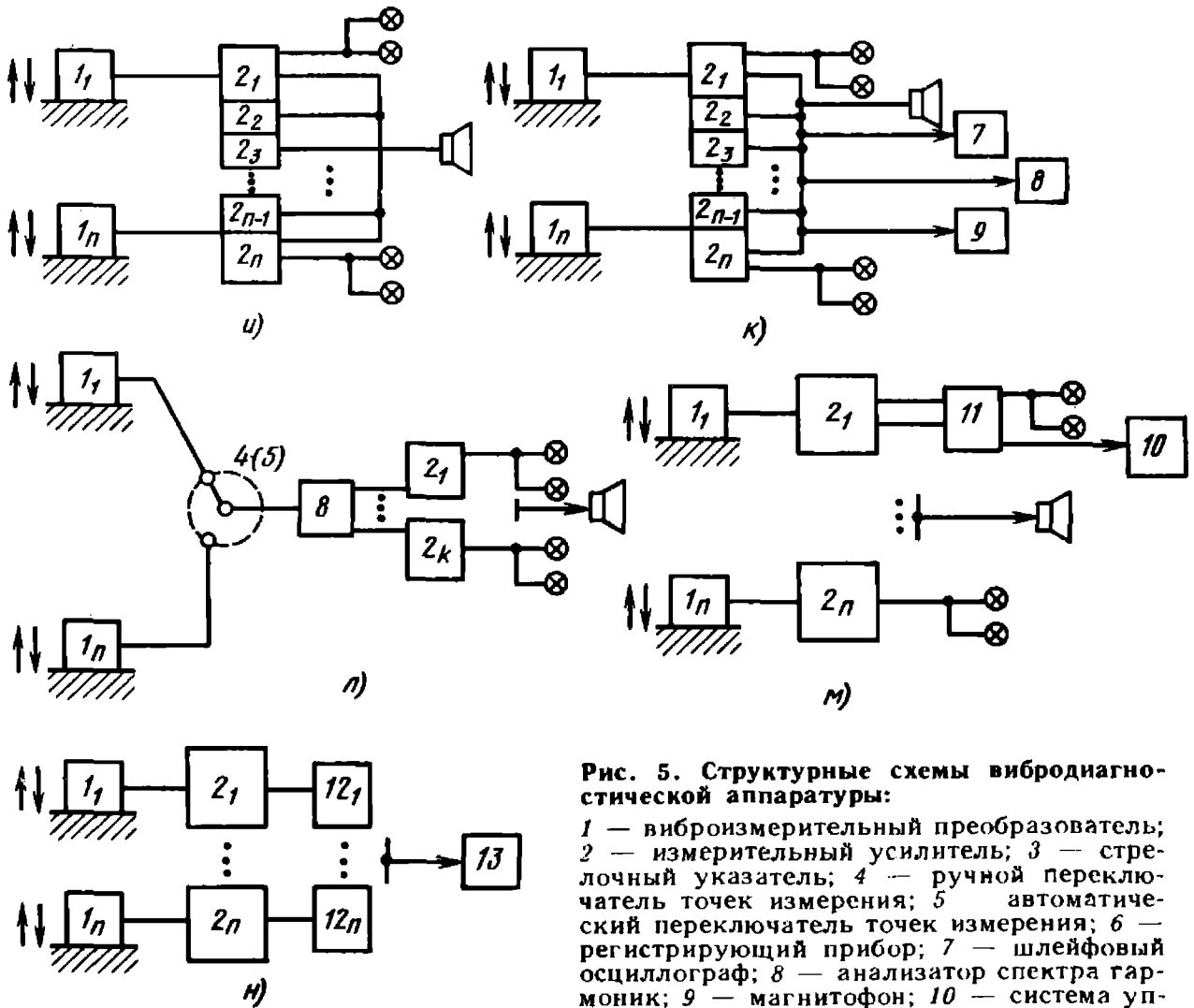


Рис. 5. Структурные схемы вибродиагностической аппаратуры:

1 — виброизмерительный преобразователь; 2 — измерительный усилитель; 3 — стрелочный указатель; 4 — ручной переключатель точек измерения; 5 — автоматический переключатель точек измерения; 6 — регистрирующий прибор; 7 — шлейфовый осциллограф; 8 — анализатор спектра гармоник; 9 — магнитофон; 10 — система управления; 11 — схема сравнения; 12 — нормирующий преобразователь; 13 — электронная управляющая машина

автоматически переключаются для выдачи предупредительного и аварийного сигналов о превышении допустимого уровня вибрации в любой из контролируемых точек (рис. 5, з);

многоканальные системы контроля вибрации, осуществляющие одновременный контроль заданного параметра вибрации во всех контролируемых точках с выдачей предупредительного и аварийного сигналов о превышении допустимого уровня вибрации в любой из контролируемых точек; системы состоят из виброизмерительных преобразователей и измерительных усилителей, по одному на каждый ИП; устройство, выдающее сигнал предупредительной и аварийной сигнализации, может быть в каждом из каналов или общим для группы каналов (рис. 5, и);

многоканальные системы контроля с выдачей предупредительного и аварийного сигналов и подключением к каналу, на выходе которого сигнал достиг предельно допустимого значения, регистрируемого осциллографом, магнитофоном или анализатором. Последний позволяет определить спектральный состав вибрации, на основании анализа которого можно установить причину механической неисправности контролируемого оборудования (рис. 5, к);

одно- и многоканальные системы, осуществляющие спектральный анализ по всем каналам измерения и сигнализирующие о превышении допустимого значения амплитуды гармонических составляющих спектра (рис. 5, л);

многоканальные системы защиты оборудования при вибрации, превы-

шающей допустимое нормами значение, с выдачей сигнала в систему управления защиты оборудования, содержащие с целью повышения надежности дублирующие каналы (рис. 5, м);

многоканальные системы, имеющие унифицированный выход для ввода информации о вибрации защищаемого оборудования в ЭВМ (рис. 5, н).

В основу выбора виброизмерительной аппаратуры должны быть положены результаты анализа вибрации данного класса оборудования и сведения об амплитудно-частотном составе вибрации и характере его измерения в связи с возникновением различных видов неисправностей, опасных для функционирования машины. Чем больше число однотипных машин обследовано и больший объем данных подвергнут статистической обработке, тем достовернее сведения о характере вибрации машины и его изменении при возникновении дефектов.

При выборе аппаратуры в первую очередь следует установить местоположение точек контроля, необходимое и достаточное число контролируемых точек, число измеряемых компонентов в каждой точке измерения, контролируемый параметр вибрации, диапазон частот, в котором возникновение характерного и опасного дефекта приводит к изменению амплитуд отдельных гармонических составляющих спектра или общего уровня вибрации.

Механическое состояние работающей машины оценивают наблюдением за одним из параметров, характеризующих общий уровень вибрации: размахом виброперемещения, среднеквадратичным значением виброскорости, пиковым значением виброускорения.

Размах виброперемещения контролируют на машинах с малой рабочей частотой вращения ротора (до 1000 об/мин) и в области средних частот (до 50 Гц), если вибрация близка к моногармонической.

Вибрацию большинства роторных машин, как правило, определяют по размаху виброперемещения подшипников. Для машин со сложным спектром вибрации следует использовать аппаратуру, имеющую в рабочем диапазоне частот равномерные амплитуд-

но-частотную и пропорциональную (или нулевую) фазочастотную характеристики.

Среднеквадратичное значение виброскорости рекомендуется выбирать в качестве контролируемого параметра для машин с рабочей частотой вращения ротора 1000—10 000 об/мин и сложным частотным спектром вибрации, когда одинаково опасным для работы машины является возникновение дефектов, характеризующихся изменением амплитуды различных гармонических составляющих: с оборотной частотой; частотой, равной половине оборотной; удвоенным; утроенным и т. д. ее значением. В этом случае среднеквадратичное значение виброскорости является параметром, позволяющим надежно оценить опасность работы оборудования при возникновении различного рода неисправностей, а следовательно, дающим наиболее достоверную информацию о механическом состоянии машины.

Параметр среднеквадратичного значения скорости принят в качестве нормирующего для оценки вибрационного состояния турбоагрегатов тепловых и атомных электростанций, электрических машин различной массы и другого оборудования.

Пиковое значение виброускорения контролируют в высокооборотных машинах с рабочей частотой вращения ротора 6000—10 000 об/мин.

Виброускорение характеризует силы, действующие в машине, поэтому позволяет судить о безопасности дальнейшей работы машины.

По изменению одного из рассмотренных выше диагностических параметров вибрации можно судить о возникновении неисправности. Для определения характера дефекта, возникшего в машине, проводят спектральный анализ вибрации.

Статистическая обработка материалов вибрационных исследований машин позволяет составлять карты распознавания дефектов.

По этим данным можно судить о признаках дефектов и выбрать частотный диапазон аппаратуры, необходимый для обнаружения характерных неисправностей машины. Во всех случаях верхняя граница частотного диапазона

не должна быть ниже удвоенной рабочей частоты вращения ротора.

Для измерения и анализа вибрации аналоговыми способами, обработки результатов цифровыми способами и получения на выходе гистограмм распределения уровней вибрации, фазовых диаграмм, частотной и временной зависимости уровня или фазы вибрации используют многофункциональные системы.

В этих системах предусмотрены различные варианты дистанционного и автоматического управления приборами, что расширяет диапазон возможных комбинаций отдельных приборов для создания автоматических и полуавтоматических измерительных комплексов.

Автоматизированные системы подразделяют на три основные группы. В первой группе систем для оперативной обработки сигналов используют ЭВМ. Во второй группе ЭВМ обрабатывает сигналы и выдает сигнал корреляции при изменении режима испытаний. К третьей группе относят полностью автоматизированные системы, в которых ЭВМ включена в цепь обратной связи. Такие системы используют для обработки, анализа и управления всем режимом работы по программе исследований. Простейшие автоматизированные системы оперативно измеряют и анализируют характерные вибрации и сличают их с эталонными.

Для расшифровки результатов диагностирования и принятия решения о состоянии механизма система должна располагать информацией о поведении правильно и дефектно функционирующего механизма. В ряде случаев достаточно задания допустимых значений контролируемых параметров. Главное правило — превышение диагностического признака или расстояния его от эталона некоторого уровня, величина которого зависит от типа механизма и определяется экспериментально на этапе обучения системы.

В случае превышения порогового уровня система характеризует механизм как неисправный. При желании диагностирование может быть продолжено, и более тонкий анализ позво-

ляет не только обнаружить, но и локализовать, а в ряде случаев и идентифицировать дефект. Но при этом требуется формирование нового алгоритма диагностирования.

Так, например, исходя из знания характерной области частот исследуемого механизма, проводится частотная селекция. Стробирование (временную селекцию) применяют для выделения периодического процесса, жестко связанного с определенной фазой кинематического цикла механизма. Синхронное накопление позволяет выделить периодическую компоненту на фоне аддитивной шумовой помехи. Если дефект связан с появлением амплитудной или фазовой модуляции, то прибегают к исследованию огибающей процесса. Этапы диагностического анализа вибросигналов представлены на рис. 6.

Измерение акустического шума. Акустический шум представляет собой случайный процесс, и поэтому при его измерении используют такие же энергетические величины, как при измерении случайных вибраций.

Основные величины, которые определяют при акустических исследованиях, — это звуковое давление, интенсивность или мощность звука, коэффициент направленности.

Максимальное изменение давления в среде при распространении звуковых волн по сравнению с давлением в среде при отсутствии волн называют звуковым давлением. При исследовании акустических шумов измеряют среднеквадратичное значение звукового давления p , определяемого из выражения

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt},$$

где p — мгновенное значение звукового давления; T — время интегрирования.

Энергию, переносимую волной за секунду через единицу поверхности, называют интенсивностью волн. Интенсивность звуковых волн называют силой звука. Интенсивность J звуковой волны в точке, находящейся на расстоянии R от источника звука,

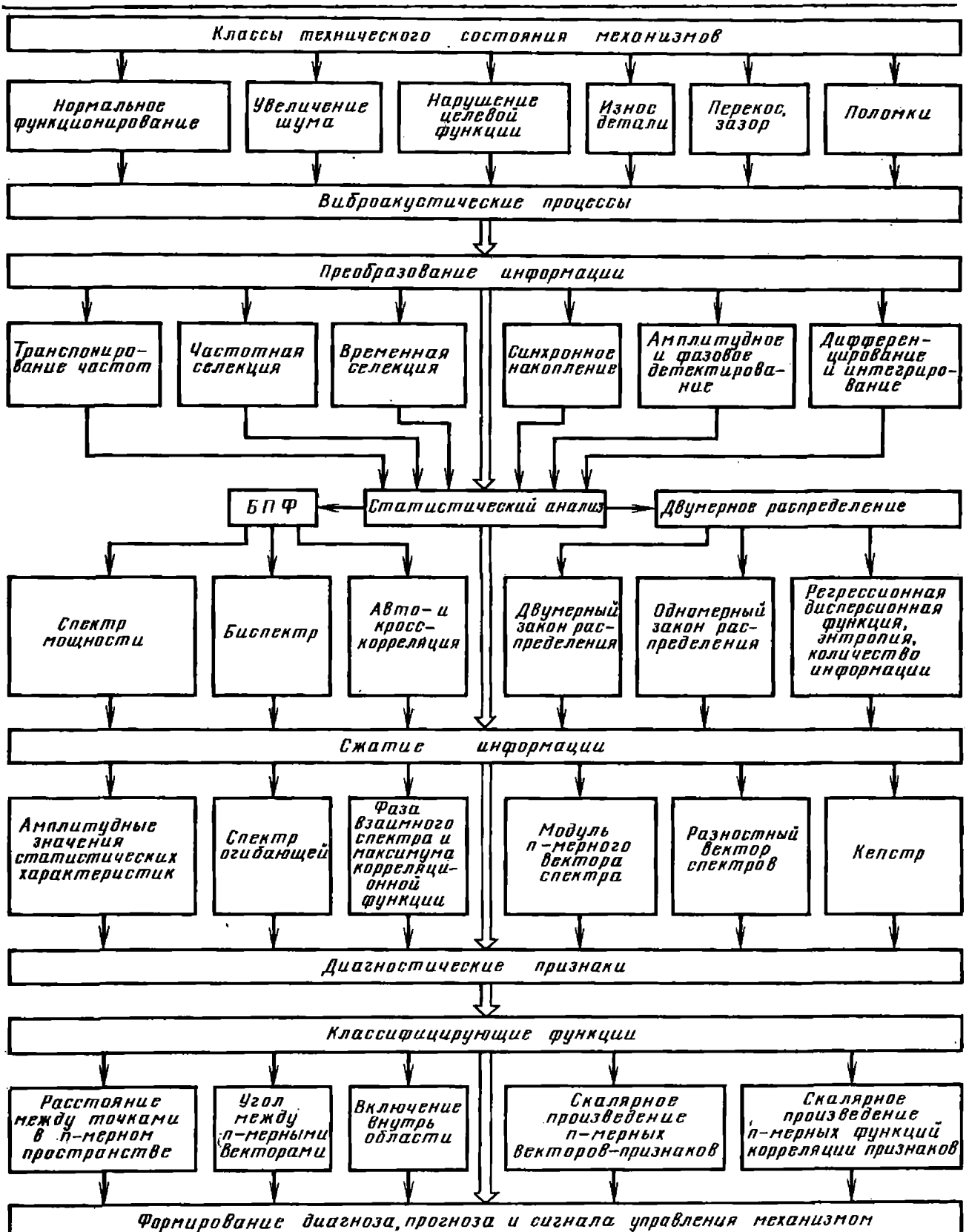


Рис. 6. Этапы диагностирования технического состояния механизма

излучающего звуковую энергию E , определяется из выражения

$$J = \frac{E}{4\pi R^2}.$$

Так как на достаточном расстоянии от источника средняя интенсивность

J звука пропорциональна квадрату звукового давления p в точке на расстоянии R , то $p = \text{const } 1/R$. Это соотношение называют законом обратных радиусов, которому подчиняется свободное распространение звука в дальнем акустическом поле звукового источника.

Интенсивность акустической волны характеризует мощность звука.

В простейшем случае измеряют полный уровень звукового давления акустического шума. Однако такое измерение не дает представления ни о распределении частот шума, ни о его восприятии человеком. Поэтому в аппаратуру для измерения акустического шума вводят корректирующие фильтры, частотные характеристики которых обозначаются буквами *A*, *B*, *C* и *D*. Характеристика *A* в наибольшей степени приближает измерение акустического шума к восприятию звука человеком. Характеристика *B* более расширена в области низких частот. Характеристика *C* в незначительной степени зависит от частоты в области слышимых частот. Частотная коррекция с помощью характеристики *D* предназначена для измерения авиационного шума.

Для измерения акустического шума применяют измерительные микрофоны.

Микрофон — электроакустический преобразователь, с помощью которого акустические колебания в воздушной среде преобразуются в электрический сигнал.

В состав микрофона входят чувствительный элемент — капсюль, согласующий элемент — предусилитель, соединительные кабели, а также микрофонный усилитель и блок питания.

Наибольшее распространение получили измерительные микрофоны конденсаторной, пьезоэлектрической и электродинамической системы.

Действие конденсаторного микрофона основано на преобразовании звукового давления, поступающего на его мембрану, в изменение емкости конденсатора, образуемого мембраной, неподвижным электродом и воздушным зазором между ними.

Действие пьезоэлектрического микрофона основано на возникновении переменного электрического потенциала на пьезоэлектрической пластине при воздействии на нее звукового давления. Возникающее на выходных зажимах напряжение поступает на вход усилителя.

Капсюль пьезоэлектрического микрофона состоит из диафрагмы из металлической фольги; неподвижной

пластины с отверстиями, служащими для демпфирования основного резонанса диафрагмы и пьезоэлектрической пластины; пьезоэлектрической двухслойной пластины в виде балки прямоугольного сечения с металлизированными обкладками для снятия напряжения; капиллярной трубки для выравнивания статического давления снаружи и внутри капсуля; контакта для электрического соединения капсуля с усилителем; защитной сетки, предохраняющей от повреждения; корпуса капсуля из никелевого сплава.

Электродинамические микрофоны имеют малое внутреннее сопротивление, поэтому соединительный кабель незначительно влияет на характеристики микрофона. Микрофон имеет низкий уровень собственного шума и дешев в изготовлении.

При воздействии звукового давления на диафрагму микрофона связанная с ней звуковая катушка перемещается в радиальном поле постоянного магнита, и в катушке индуцируется ЭДС. Напряжение со звуковой катушки подается на вход усилителя непосредственно или через трансформатор.

С помощью микрофонов методом свободного звукового поля измеряют уровень шумов машин, транспорта, частотные характеристики измерительной и вещательной аппаратуры. При этом микрофон располагают в контрольной точке поля или в точках поля, равномерно распределенных на измерительной поверхности. Контроль звукового поля проводят измерением зависимости звукового давления от расстояния до акустического центра источника и сравнивают измеренную зависимость с теоретической зависимостью.

Методом диффузионного (или отраженного) звукового поля измеряют уровни шумов машин, звукоизоляции ограждающих конструкций, звукопоглощения материалов, характеристики акустической аппаратуры по диффузному полю. Микрофон располагают в нескольких точках области диффузного поля и определяют среднее по объему значение уровня звукового давления в октавной или третьоктавной полосе частот.

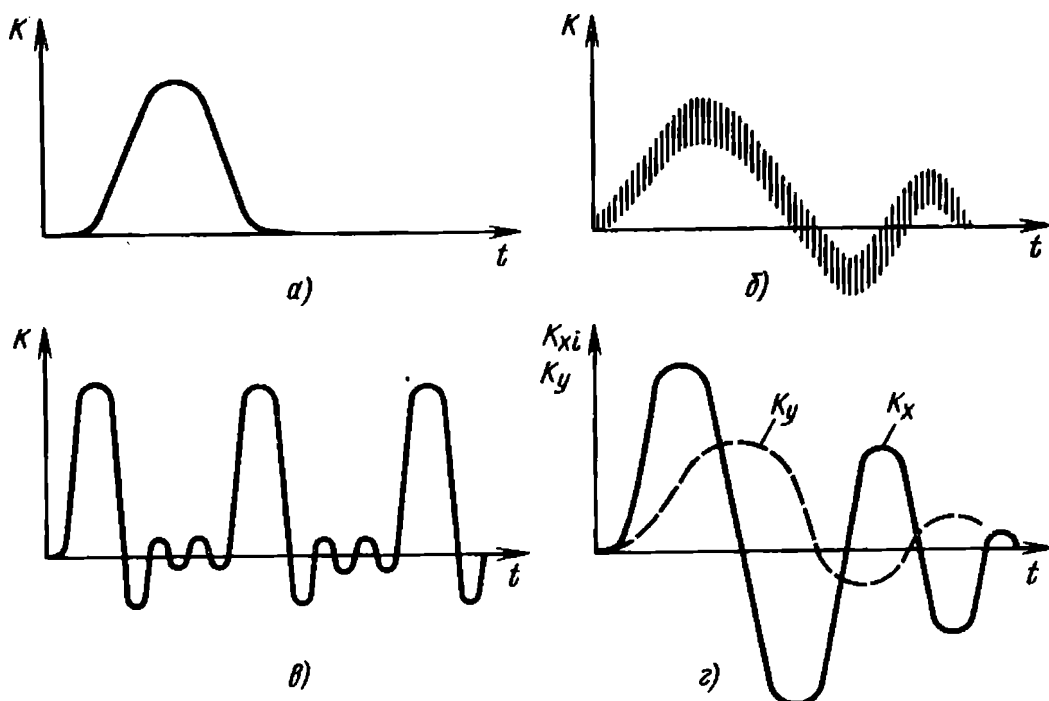


Рис. 7. Формы ударных импульсов:

a — простой одиночный ударный импульс; *б* — сложный одиночный ударный импульс; *в* — многократно повторяющееся ударное воздействие; *г* — комплексный ударный процесс

Методом измерения в резонансных трубах, каналах, полостях определяют коэффициент звукопоглощения материалов при нормальном падении звуковой волны, характеристики акустических фильтров, глушителей шума, уровень звукового давления чистых тонов или полос шума, а также распределение уровня звукового давления по сечению и вдоль канала.

Прибор для измерения уровня шума состоит из измерительного микрофона, усилителя, корректирующих цепей, детектора и индикатора, шкала которого проградуирована в децибеллах относительно среднеквадратичного уровня звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м².

Для быстрого измерения уровня шума предназначены миниатюрные шумомеры. Конструкторские решения миниатюрных шумомеров отличаются корректирующей характеристикой и запоминающими схемами. Их используют с конденсаторными и пьезоэлектрическими микрофонными капсулями.

Для измерения импульсных шумов применяют импульсные шумомеры, отличительными особенностями которых являются широкий частотный и динамический диапазон, возможность удерживания пикового и среднеквадра-

точного значений сигнала, наличие корректирующих схем.

Уровень шума, производимого машиной или механизмом, зависит от многих причин, поэтому рекомендуется измерять шум в акустически заданных (определенных) условиях.

Измерение параметров ударных процессов (импульсов). Ударные импульсы могут быть одиночными, многократными и комплексными (рис. 7). Одиночные и многократные ударные импульсы могут воздействовать на объект в горизонтальной, вертикальной и наклонной плоскостях. Комплексные ударные импульсы оказывают воздействие на объект в двух или трех взаимно перпендикулярных плоскостях одновременно. На рис. 7, *a* приведен простой одиночный ударный импульс, который используют при проведении ударных испытаний в лабораторных условиях. На рис. 7, *б* показан сложный одиночный ударный импульс, наиболее часто встречающийся в реальных условиях. Как правило, такие импульсы представляют собой сочетание простого ударного импульса с наложенными колебаниями. На рис. 7, *в* приведен пример многократно повторяющегося удар-

ного воздействия, которое наиболее часто встречается при транспортировании объектов. На рис. 7, з показан комплексный ударный импульс, воздействующий на объект в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Основными диагностическими параметрами, характеризующими ударный процесс, являются ускорение, скорость, перемещение, деформация рассматриваемой точки тела при ударном воздействии. Взаимосвязь перемещения, скорости и ускорения определяется соотношениями кинематики поступательного движения, которое для случая ударного ускорения имеет вид

$$a = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ a(t) & \text{при } 0 \leq t \leq t_K; \\ 0 & \text{при } t \geq t_K; \end{cases}$$

$$v = \begin{cases} v_0 & \text{при } t \leq 0; \\ v_0 + \int_0^t a(t) dt & \text{при } 0 \leq t \leq t_K; \\ v_0 + \int_0^{t_K} a(t) dt & \text{при } t \geq t_K; \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} s_0 & \text{при } t \leq 0; \\ s_0 + \int_0^t v dt & \text{при } 0 \leq t \leq t_K; \\ s_0 + \int_0^{t_K} v dt & \text{при } t \geq t_K, \end{cases}$$

где a — линейное ускорение, м/с^2 ; v — линейная скорость, м/с ; s — линейное перемещение, м ; t_K — длительность ударного импульса по ускорению на нулевом уровне, с .

По результатам измерений можно оценить акустическую мощность шума, производимого механизмом.

В полевых условиях часто используют запись акустического шума на магнитную ленту с помощью портативных магнитофонов. Запись калибруют с помощью эталонного сигнала, создаваемого пистон-фоном или акустическим калибратором. С целью по-

лучения оперативной информации о частотном составе исследуемого шума часто проводят спектральный анализ шума октавными или третьоктавными фильтрами.

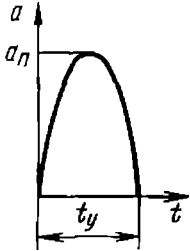
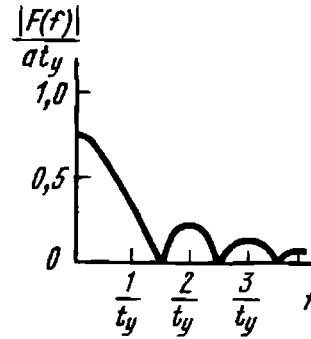
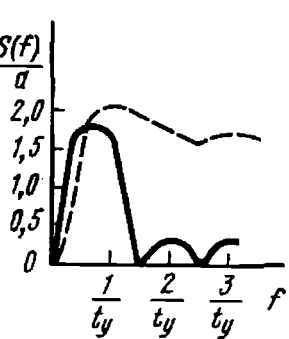
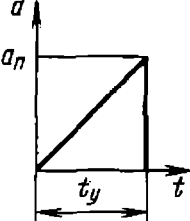
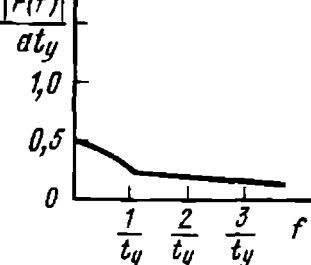
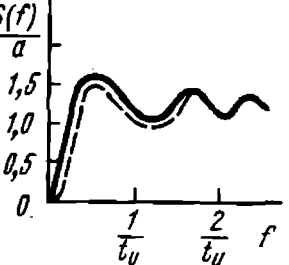
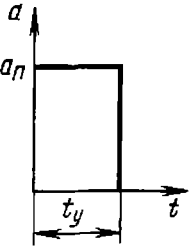
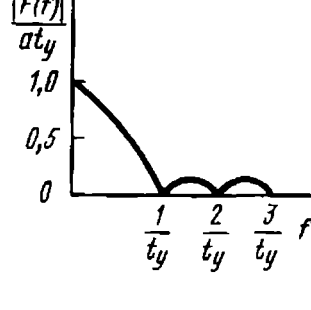
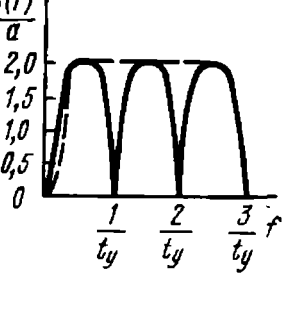
Система измерения уровня шума с измерительным усилителем и набором полосовых фильтров позволяет произвести более точные измерения и анализ шума в стационарных условиях.

Для исследования статистического распределения уровней шума во времени, а также вероятности обнаружения шума в заданном интервале уровней или превышения заданного уровня в шумоизмерительной системе используют анализатор статистического распределения, который совместно с самописцем уровня позволяет получить гистограммы акустического шума.

Для измерения мощности звука, производимого машинами и механизмами, используют многоканальные системы. Микрофоны устанавливают вокруг исследуемой машины в расчетных точках и через переключатель каналов подключают последовательно к анализатору в реальном масштабе времени, а результаты записывают регистратором или анализируют с помощью ЭВМ. В результате определяют средние значения звукового давления и вычисляют мощность звука в отдельных частотных полосах.

Помимо этого, ударный процесс может характеризоваться ударным спектром, представляющим отклики на данное ударное возбуждение ряда резонаторов в виде функции пиковых ускорений, скорости, перемещения от собственных частот резонаторов. При этом под резонатором понимают линейную консервативную колебательную систему с одной степенью свободы. Различают текущий ударный спектр, определяемый по откликам резонаторов во время ударного воздействия, и ударный спектр после действия, определяемый по откликам резонаторов во время ударного воздействия, и ударный спектр после действия, определяемый по откликам резонаторов после окончания ударного воздействия. Ударные спектры дают приемлемую возможность сравнения

5. Ударные импульсы, их частотные и ударные спектры

Импульс	Функция времени	Преобразование Фурье	Частотный спектр	Ударный спектр
Полусинусоидальный		$F(f) = \frac{2at_K}{\pi} \left \frac{\cos \pi f t_K}{1 - 4f^2 t_K^2} \right $		
Пилообразный		$ F(f) = \frac{at_K}{2} \left[\frac{1}{\pi f t_K} \times \sqrt{1 - \frac{1}{\pi f t_K} \sin 2\pi f t_K + \frac{1}{\pi f t_K} \sin \pi f t_K} \right]$		
Прямоугольный		$ F(f) = at_K \left \frac{\sin \pi f t_K}{\pi f t_K} \right $		

Примечание. Сплошными линиями показан ударный спектр после действия, штриховыми — ударный спектр текущий.

степени опасности различных форм ударных импульсов.

Форма ударного импульса имеет важное значение. Преобразование Фурье ударной временной функции может быть представлено в виде

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) l^{-s\omega t} dt.$$

В табл. 5 приведены примеры ударных импульсов полусинусоидальной, пилообразной и прямоугольной формы, соответствующие им выражения преобразования Фурье, частотные спектры и спектры удара. Из таблицы видно, что ударные импульсы содержат энергию во всей полосе частот от нуля до бесконечности, их частотные спектры непрерывны, без дискретных частотных составляющих. Величины спектров при низких частотах равны площади ударного импульса независимо от его формы. Это означает, что при длительности ударного импульса меньше периода собственных колебаний возбуждаемой системы его воздействие на систему определяется площадью ударного импульса.

Основными измеряемыми параметрами, характеризующими ударный процесс, являются пиковые ударные ускорения, скорость, перемещение, деформация; длительность действия ударного ускорения, скорости, перемещения, деформации; длительность фронта ударного ускорения, определяемая интервалом времени от момента появления ударного ускорения до момента, соответствующего пиковому значению ускорения, скорости, перемещения, деформации; коэффициенты наложенных колебаний ударного ускорения, скорости, перемещения, деформации, определяемые отношением полной суммы абсолютных значений приращений между смежными экстремальными значениями измеряемых ударных значений параметров к удвоенному пиковому значению того же измеряемого значения; импульс ударного ускорения, определяемый как интеграл от ударного ускорения за время, равное длительности его действия.

При измерении параметров удара в качестве измерительных преобразо-

6. Измерительные преобразователи для измерения параметров удара

ИП	Верхняя граница частотного диапазона, Гц	Пиковое ударное ускорение, м/с ²
Реостатный	20—30	150—300
Индуктивный	До 500	400—500
Тензорезистивный	10—15 кГц	До 10 ⁶
Пьезоэлектрический	100 кГц	—

вателей наибольшее распространение находят преобразователи следующих типов (табл. 6).

В ряде случаев при измерениях параметров ударных процессов достаточно знать пиковое значение ударного ускорения (хотя этой информации недостаточно для полного описания движения, вызванного ударом).

Измерение пикового значения ускорения может быть основано на методе непосредственного отслеживания значения измеряемого сигнала с помощью сравнивающих устройств и обратной связи, в которую входит цифроаналоговый преобразователь. Определение длительности ударных процессов производится путем заполнения временных промежутков импульсами кварцево-стабилизированной частоты.

Подобным прибором измеряют пиковое значение и длительность как одиночных, так и многократных ударов.

Наряду с приборами, имеющими стрелочную или цифровую форму индикации параметров удара, широко распространены приборы, позволяющие, помимо этого, наблюдать форму ударных импульсов.

Для частотного анализа механических ударов многократно воспроизводят запись механического удара с магнитной ленты измерительного магнитофона или цифрового записывающего устройства.

Механические удары измеряют одновременно в нескольких точках исследуемого объекта; при этом исполь-

зуют многоканальную запись механических ударов и сравнение с принятым за эталон образцовым ударом.

3. ДЕФЕКТОСКОПИЯ И ИНТРОСКОПИЯ

Дефектоскопия. Дефектоскопия (Д) — совокупность методов и средств неразрушающего контроля, предназначенных для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности и неоднородности в материалах и изделиях. В основе Д лежит измерение изменений физико-механических свойств (магнитных, электрических, акустических, теплофизических, плотности, прочности, пластичности и др.) при нарушении сплошности и неоднородности материала. Для измерения используют электромагнитные и акустические поля, вещества, проникающие в полость дефекта, а также различные физические эффекты.

В зависимости от опасности дефекты разделяют на малозначительные (допустимые) и критические (недопустимые).

К недопустимым дефектам относят те, которые подлежат незамедлительному устранению или исправлению.

Дефекты типа нарушения сплошности металла являются следствием несовершенства его структуры и возникают на разных стадиях технологического процесса. К дефектам тонкой структуры относят дислокации — особые зоны искажений атомной решетки. Прочность деталей резко падает при определенном числе дислокаций в единице объема кристалла. Субмикроскопические трещины (размером порядка нескольких микрометров) образуются в процессе обработки детали (например, шлифования) и резко снижают ее прочность, особенно при работе в условиях сложного напряженного состояния или воздействия поверхностно-активных сред. Если поврежденный поверхностный слой удалить, например, путем электрического растворения, то прочность детали существенно повышается. Наиболее грубыми дефектами являются макроскопические, в ряде случаев видимые невооруженным глазом де-

фекты, представляющие собой нарушения сплошности или однородности металла, особенно резко снижающие прочность детали. Эти дефекты образуются в металле вследствие несовершенства технологического процесса и низкой технологичности многокомпонентных сплавов, при обработке которых требуется особенно точно соблюдать режимы технологии на каждом этапе, а также вследствие усталости металла при эксплуатации машин.

Встречающиеся в металлических изделиях и полуфабрикатах дефекты различаются по размерам и расположению, а также по природе и происхождению. Они могут образоваться в процессе плавки и литья (раковины, поры, зоны рыхлости, включения, ликвационные зоны, горячие трещины, неслитины и т. д.), обработки его давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, пресс-утяжины, рванины, заковы, закаты, пленки, флокены и т. д.), термической и химико-термической обработки (зоны грубозернистой структуры, перегрева, пережога, термические трещины, несоответствие толщины закаленного, цементированного, азотированного и других слоев, несоответствие толщины слоя гальванического покрытия и т. д.), механической обработки (шлифовочные трещины, прижоги), сварки, пайки, склеивания (непровар, трещины, непропай, непрочлей), хранения и эксплуатации (коррозионные поражения, усталостные трещины, трещины термической усталости, ползучести и т. д.).

Основными методами Д являются: магнитный, электрический, вихре-токовый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающих веществ.

Выбор метода Д зависит от материала изделий, характера технологического процесса, типа дефектов, условий их обнаружения. Наилучшим образом задачи контроля качества решаются при комплексном использовании различных методов Д.

Магнитная Д основана на исследовании искажения магнитного поля, возникающего в местах дефектов в изделиях из ферромагнитных материа-

лов. Индикатором может служить магнитный порошок (закись-оксид железа) его или суспензия в масле с дисперсностью частиц 5—10 мкм. При намагничивании изделия порошок оседает в местах расположения дефектов (магнитопорошковый метод). Поле рассеяния можно фиксировать на магнитной ленте, которую накладывают на исследуемый участок намагниченного изделия (магнитографический метод). Используют также малогабаритные преобразователи, которые при движении по изделию в месте дефекта указывают на изменения магнитного поля (феррозондовый, индукционный, эффекта Холла, магниторезистивный методы).

Чувствительность метода магнитной D зависит от магнитных характеристик материалов, применяемых индикаторов, преобразователей, режимов намагничивания и др.

Методом магнитной D можно обнаруживать макродефекты — трещины, раковины, непровары, расслоения на глубине до 10 мм с минимальным размером более 0,1 мм.

Электрическая D основана на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля. Наиболее распространен электроемкостный метод, определяющий дефекты диэлектрических материалов по изменению емкости при введении объекта в электрическое поле конденсатора.

Термоэлектрический метод основан на измерении электродвижущей силы (термоЭДС), возникающей в замкнутой цепи при нагреве места контакта двух разнородных материалов. Если один из этих материалов принять за эталон, то при заданной разности температур горячего и холодного контактов величина и знак термоЭДС будут определять неоднородность и химический состав второго материала.

Электростатический метод основан на использовании электростатического поля, в которое помещают изделие. Для обнаружения поверхностных трещин изделия из неэлектропроводных материалов (фарфора, стекла, пластмасс), а также из металлов, покрытых теми же материалами, опыляют тонким порошком мела из пульвериза-

тора с эбонитовым наконечником (порошковый метод). При этом частицы мела получают положительный заряд. В результате неоднородности электростатического поля частицы мела скапливаются у краев трещин.

Электростатический метод применяют для определения глубины трещин по искажению электрического поля при обтекании дефекта током. Обычно используют четырехэлектродный преобразователь, два электрода которого служат для подвода тока к контролируемому участку, а два других — для измерения электрического потенциала. Вместо измерительных электродов могут применяться датчики Холла, феррозонды и др. Диапазон измеряемой глубины трещин токопроводящих материалов от 0,5 до 100 мм и более.

Электроискровой метод основан на возникновении электрического разряда в месте нарушения сплошности. Применяют для контроля качества неэлектропроводных защитных покрытий (лакокрасочных, эмалевых и других изоляционных покрытий) на трубах и различных деталях из металла. Используемое напряжение между электродами устанавливаемого на покрытие щупа и электропроводящей поверхностью металла — до 40 кВ; при этом максимальная толщина контроля покрытия равна 10 мм.

Вихрековая D основана на анализе изменения в месте дефекта поля вихревых токов, наводимых в электропроводящем объекте электромагнитным полем преобразователя. Диапазон используемой частоты поля — 5 Гц—10 МГц. В качестве преобразователя применяют питаемые переменным током индукционные катушки накладного типа, которые устанавливают торцовой частью на объект; проходного типа, которые проходят либо снаружи, либо внутри объекта или погружают в жидкий объект; экранного типа, у которых возбуждающая электромагнитное поле и измерительная катушка преобразователя разделяются контролируемым объектом. Поле вихревых токов зависит от изменения удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости материала в месте де-

фекта, а также от выбранной конструкции преобразователя. Вихретоковую Д применяют для обнаружения поверхностных дефектов — трещин, раковин, волосовин глубиной более 0,1 мм, металлических изделий (труб, прутков, листов и др.), а также для обнаружения более грубых подповерхностных дефектов, расположенных на глубине до 8—10 мм.

Радиоволновая Д основана на регистрации результатов взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля. Как правило, используют СВЧ диапазон радиоволн (длины волн от 1 до 100 мм). Применяется для обнаружения и регистрации внутренних дефектов в неметаллических материалах (полимерах, композитах, резине, стекле, керамике, строительных материалах и т. п.), а также поверхностных дефектов металлов. В качестве источников излучения применяют генераторы на диодах Ганна, лавинно-пролетных диодах, СВЧ транзисторах, клистронах, магнетронах, с мощностью излучения до 1—10 Вт. Передача СВЧ энергии производится с помощью закрытых (металлические волноводы) и открытых (диэлектрические волноводы, полосковые линии, лучеводы) канализирующих систем. Для излучения и приема применяют слабонаправленные (срез волновода) и направленные (рупор, линза, отражатель) антенны. Непосредственная регистрация СВЧ излучения производится с помощью кристаллических СВЧ диодов или поглотителей СВЧ энергии (термисторы, болометры, жидкие кристаллы и т. д.). Для выявления дефектов (воздушных и инородных включений, расслоений, непроклеев, трещин, влажности, плотности, пористости) используют преимущественно методы отраженного радиоволнового излучения.

Минимальный размер выявляемого дефекта в диэлектрических материалах достигает 0,01 длины волны при дифракционном методе и 0,5 длины волны при остальных методах радиоволновой Д.

Тепловая Д основана на регистрации температурных полей объекта контроля (длина волны от 1 мм до 0,76 мкм).

В качестве приемников излучения используют фотосопротивления, фотодиоды, фототриоды, фотоумножители, ЭОП, болометры, термоиндикаторы, термометры, термопары, пирометры и др. Объект контроля может подвергаться воздействию внешнего источника тепловой энергии — плазмотрона, лампы накаливания, оптического квантового генератора (активный метод); при этом измеряют изменение прошедшего через объект или отраженного от него теплового излучения. Наиболее распространены пассивные тепловые методы без использования внешнего источника нагрева, такие, как тепловизионный метод получения и анализа изображения температурного поля дефекта с помощью сканирования поверхности объекта узким оптическим лучом, метод термокрасок, цвет которых зависит от температуры поверхности изделия, и др.

Тепловую Д применяют для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов (трещин, расслоений, пор и др.) изделий из теплопроводных материалов.

Оптическая Д основана на анализе взаимодействия оптического излучения (длина волны 0,4—0,76 мкм) и объекта контроля. Наиболее простым является визуальный метод обнаружения поверхностных дефектов или дефекта внутри прозрачных для оптического диапазона волн материалов. Для получения увеличенного изображения дефекта используют проекторы и микроскопы. Для контроля шероховатости поверхности применяют интерферометры, в том числе голографические, сравнивающие световые волны при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхности. Для обнаружения поверхностных дефектов (царапин, трещин, коррозионных пятен, выбоин и др.) размером более 0,01 мм в труднодоступных местах применяют эндоскопы, позволяющие с помощью специальной оптической системы и волоконной оптики передавать оптическое изображение на расстояние до нескольких метров.

Радиационная Д основана на регистрации и анализе ионизирующего излучения после взаимодействия с

контролируемым объектом. Широко используют рентгеновское, гамма-, нейтронное, альфа- и бета-излучение. В качестве источников излучения применяют рентгеновские аппараты, радиоактивные изотопы, линейные ускорители, бетатроны, микротроны. Преобразователями ионизирующего излучения в оптическое видимое изображение и электрический сигнал служат рентгеновские пленки, люминесцентные экраны, сцинтилляционные счетчики, ионизационные камеры, ксерографические пластины, рентгеновские ЭОПы, рентгеновидиконы и др. Принцип основан на прохождении излучения через объект и преобразовании радиационного изображения дефекта в радиографический снимок (радиография), в электрический сигнал (радиометрия) и в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя или прибора (радиационная интроскопия, радиоскопия).

Радиационная Д обеспечивает выявление дефектов (раковин, пор, расслоений, непроваров, инородных включений и др.) с чувствительностью (отношение протяженности дефекта в направлении просвечивания к толщине стенки детали) 1—5 %. Широко применяется для контроля качества сварных швов.

Акустическая Д основана на анализе изменений из-за появления дефектов, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте в диапазоне частот от 50 Гц до 50 МГц упругих колебаний. Применяют для объектов из металла и диэлектриков, для контроля качества сварных швов, полуфабрикатов и готовой продукции. Для регистрации колебаний используют пьезоэлектрические, а также электромагнитно-акустические и магнитострикционные преобразователи. Основные методы акустической Д следующие: эхометод, теневой, резонансный, велосимметрический, импедансный, свободных колебаний, акустико-эмиссионный.

Наиболее универсальный эхометод основан на анализе параметров акустических импульсов, отраженных от дефекта. Он позволяет обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты

с различной ориентацией, отражающая поверхность которых может иметь площадь порядка 1 мм² и более.

При теневом методе о наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды или изменению фазы ультразвуковых колебаний, огибающих дефект.

Резонансный метод основан на определении собственных резонансных частот упругих колебаний при возбуждении их в изделии. Применяют для определения коррозионного повреждения или утонения стенки изделия с погрешностью около 1 %.

Велосимметрический метод основан на анализе изменения скорости распространения упругих волн в зоне расположения дефектов. Используют для контроля качества многослойных конструкций и обнаружения зон нарушения сплошности между слоями металла.

Импедансный метод основан на измерении механического сопротивления (импеданса) изделия преобразователем, сканирующим поверхность и возбуждающим в изделии упругие колебания звуковой частоты. Этим методом можно выявлять дефекты клеевых, паяных и других соединений между тонкой обшивкой и элементами жесткости или заполнителями в многослойных конструкциях. Обнаруживаемые дефекты площадью порядка 15 мм² и более.

Метод свободных колебаний основан на анализе спектра свободных колебаний контролируемого изделия, возбужденного ударом. Применяют для обнаружения зон нарушения соединений между элементами в многослойных клеевых конструкциях значительной толщины из металлических и неметаллических материалов.

Акустико-эмиссионный метод основан на анализе параметров упругих волн акустической эмиссии, возникающих в результате локальной перестройки структуры материала при образовании и развитии дефектов.

Он широко применяется для диагностики сосудов высокого давления, корпусов атомных реакторов, трубопроводов и др. Позволяет определить координаты, параметры и скорость роста дефекта, установить величину пластической деформации материала.

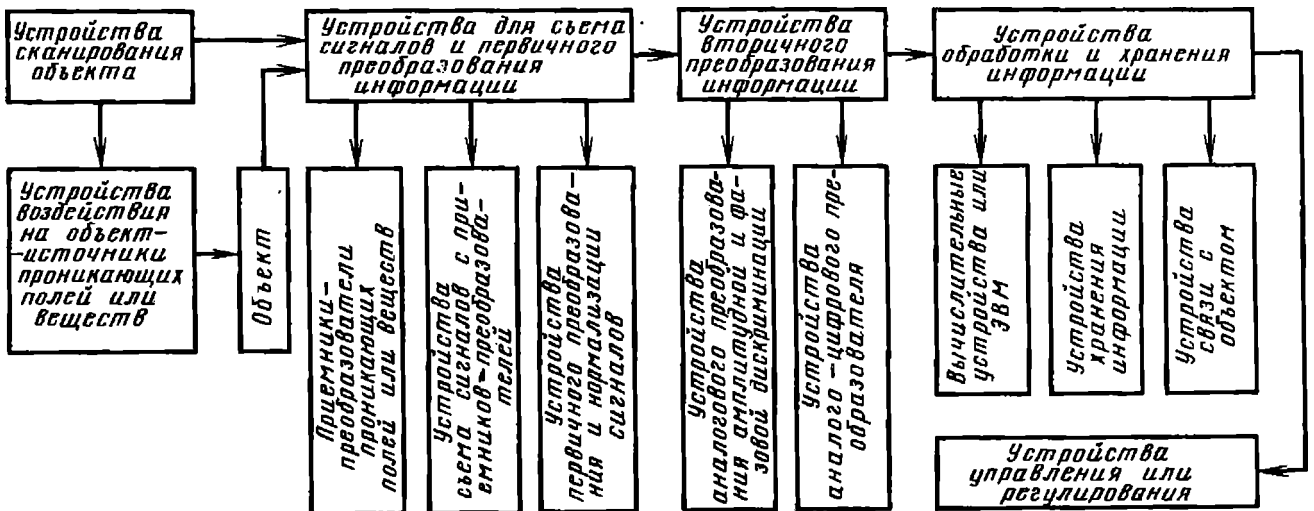


Рис. 8. Обобщенная схема средств дефектоскопии и интроскопии

Акустическая Д наиболее универсальна и безопасна в эксплуатации.

Д проникающими веществами основана на проникновении веществ в полости дефектов объекта контроля. Для выявления поверхностных дефектов с помощью жидких веществ применяют капиллярную Д. Искусственное повышение контрастности достигается за счет нанесения материалов, заполняющих дефекты под действием капиллярных сил. Эффект обнаружения дефектов усиливается с помощью люминесцирующего в ультрафиолетовом излучении (УФ) вещества (люминесцентный метод) или контрастирующего цветного вещества (цветной метод). В качестве индикаторных пенетрантов используют различные составы на основе органических растворителей, поверхностно-акустических веществ и др., окрашенных органическими люминофорами и красителями. Следы дефектов усиливают проявителями (сорбционными и диффузионными). Для люминесцентного метода применяют специальные типы УФ облучателей. Капиллярную Д широко применяют для обнаружения мельчайших поверхностных дефектов глубиной более 10 мкм и шириной раскрытия более 1 мкм на деталях из металлов, пластмасс, керамики и композитных материалов различных машин, механизмов и устройств.

Д течеисканием основана на проникновении газообразных и жидких веществ через сквозные дефекты с целью определения степени герметич-

ности изделий, которая определяется потоком газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером пятна и пр.

Различают газовые, газожидкостные и жидкостные методы контроля герметичности. Газовые методы основаны на регистрации парциального или общего давления, создаваемого потоком пробного вещества в изделиях или в барокамере (масс-спектрометрический, галогенный, каторометрический, манометрический и другие методы). На основе газовых методов создают высокочувствительные течеискатели.

При жидкостных испытаниях изделия заполняют жидкостью (вода, керосин, раствор люминофора) и определяют степень герметичности по появлению капель и пятен жидкости или светящихся точек на поверхности (компрессионный, керосиновый, люминесцентный методы).

Газожидкостные методы основаны на создании внутри изделия повышенного давления газа и погружения его в жидкость или обмыливания мест течи. Степень герметичности определяется по пузырькам газа.

Д течеисканием широко применяют для контроля герметичности сосудов высокого давления, сварных швов, многослойных изделий и др. Минимальный размер выявляемого сквозного дефекта порядка 0,001 мкм и более.

Обобщенная схема средств дефектоскопии и интроскопии представлена на рис. 8.

ющие сетки и анод. Электронное управление сетками обеспечивает попеременное включение то одной, то другой половины трубки.

Так как электронные пучки попадают на анод в различных точках под разными углами, то изображения, фиксируемые передающей системой, оказываются расположенными под различными углами зрения. Специальная система электронного управления, синхронизированная с системой управления сетками трубки, разделяет сигналы от передающей ТВ-трубки по двум каналам. На одном ТВ-приемнике фиксируется изображение от одной половины рентгеновской трубки, на другом — от второй. При совместном наблюдении двух экранов видеоконтрольных устройств телевизионной системы достигается стереоскопический эффект.

Рентгеновская вычислительная томография — новое направление в рентгенодиагностической технике. Оно основано на принципе получения изображений, заключающемся в послойном поперечном сканировании объекта коллимированным рентгеновским пучком; измерении излучения за объектом детекторами с линейной характеристикой; синтезе полутонового изображения по совокупности измерительных данных, относящихся к просканированному слою, и в построении этого изображения с помощью ЭВМ на экране электронно-лучевого индикатора (дисплея).

В ходе измерения интенсивности излучения, прошедшего сквозь объект при движении сканирующего устройства, в памяти ЭВМ накапливается массив данных, по которым вычисляются коэффициенты ослабления излучения или значения плотности материала во всех элементарных ячейках слоя. По рассчитанным коэффициентам ослабления на экране и формируется двумерное полутоновое изображение исследуемого сечения объекта.

Фундаментальным отличием является то, что томографическое изображение не связано непосредственно с принятым излучением, а является результатом точных измерений и вычислений, использующих данные, относящиеся только к выбранному слою.

Высокая точность измерений и вычислений позволяет при анализе изображений различать вещества или ткани, весьма мало отличающиеся друг от друга по плотности. Объем информации по плотности, содержащейся в томограмме, при прочих равных условиях примерно в 100 раз больше, чем в обычной рентгенограмме.

Известны системы томографии четырех поколений. Они отличаются друг от друга характером движения устройства «излучатель—детекторы» при сканировании, видом пучка излучения, типом и числом детекторов.

В системах первого поколения осуществляется быстрое поступательное движение устройства «излучатель—детекторы» относительно объекта и затем шаговое вращательное движение на 180° с шагом 1° . Объем сканируется одиночным коллимированным лучом. Полный цикл сканирования составляет 3—5 мин.

В системах второго поколения устройство «излучатель—детекторы» совершает те же движения. Однако для ускорения исследования сканирование осуществляется расходящимся пучком, состоящим в среднем из пятнадцати коллимированных лучей. Вращательное движение осуществляется на 180° с шагом $10\text{—}15^\circ$. Цикл сканирования составляет 20—40 с.

В системах третьего поколения сканирование объекта осуществляется пучком веерообразной формы, полностью перекрывающим объект; в результате исключается поперечное поступательное движение устройства «излучатель—детекторы», которое совершает только непрерывное вращение вокруг объекта на 360° . Излучатель работает в импульсном режиме, а излучение за объектом измеряется большим числом (250—500) малоинерционных детекторов. Длительность импульсов 1—5 мс; цикл сканирования одного слоя не превышает 5 с.

Системы четвертого поколения отличаются от систем третьего поколения использованием еще большего числа (500—1000) неподвижных детекторов, расставленных по окружности, и непрерывного излучения, также полностью охватывающего объект. Дли-

Номенклатура средств дефектоскопии достигает нескольких сотен типов приборов. Наибольшее применение для выявления дефектов, расположенных на поверхности изделий, получают вихретоковые дефектоскопы с накладными и проходными преобразователями, магнитные и капиллярные дефектоскопы, оптические эндоскопы и бороскопы. Для обнаружения дефектов внутри металла наиболее часто используют акустические эхоимпульсные дефектоскопы и радиографическую технику.

Интроскопия. Методы и средства интроскопии (внутривидения) основаны на визуализации электромагнитных и акустических полей при взаимодействии их (прохождении, отражении, рассеянии и т. п.) с материалом и конструкцией объекта диагностирования. Наиболее часто используется визуализация рентгеновского изображения. Принципиальная схема рентгеновизуальной диагностической установки основана на прохождении рентгеновского излучения через диагностируемый объект и преобразовании излучения на входном экране в световой, электронный или потенциальный рельеф, соответствующий рентгеновскому изображению объекта.

Полученный рельеф можно или непосредственно воспринимать, если он световой, или через систему электронно-оптического усиления и преобразования, которая переводит этот рельеф в усиленное изображение на выходном экране.

Самым простым методом рентгеновской интроскопии является *флюороскопия*, при которой прошедшее через изделие излучение регистрируется на флюороскопический экран.

Чувствительность флюороскопии определяется энергией и интенсивностью излучения, эффективностью его регистрации рентгеновским экраном, толщиной и плотностью контролируемого объекта и спектральным составом свечения экрана.

В рентгенотелевизионных флюороскопах рентгеновское изображение просвечиваемого объекта преобразуется в видимое входным рентгеновским экраном и проецируется с помощью светосильной оптики на фото-

катод передающей телевизионной трубки. В передающей трубке изображение преобразуется в видеосигнал, который после обработки в блоке телевизионного канала снова преобразуется в видимое изображение на видеоконтрольном устройстве.

Рентгеновидиконные телевизионные установки разработаны на базе рентгеновидиконных передающих трубок. Они применяются, когда размер контролируемого поля не превышает по диаметру 20 мм.

Ксерорентгенографический метод контроля основан на преобразовании рентгеновского изображения просвечиваемого объекта в скрытое электростатическое изображение на селеновой пластине, которое затем переносится на бумагу.

Метод флюорографии основан на фоторегистрации оптического изображения с люминесцентного рентгеновского экрана.

Основными преимуществами метода являются способность накапливать информацию о рентгеноскопическом изображении просвечиваемого объекта, усиление контраста изображения, высокая чувствительность (1—2%), сокращение времени экспозиции и обработки пленки, относительно низкая стоимость фотопленки по сравнению с рентгенопленкой.

В промышленной и медицинской рентгенодиагностике часто возникает необходимость трехмерного изображения просвечиваемого объекта. Например, при производстве электротехнических, радиотехнических, электронных приборов и устройств проверяется, не соприкасаются ли скрещивающиеся проводники, достаточен ли зазор между проводниками, проводниками и другими деталями изделия и т. д.; нередко контролируется глубина расположения какой-нибудь детали или определяется положение дефекта.

Основное назначение рентгеновских стереоскопов — получение объемных изображений просвечиваемых объектов.

Для получения стереоскопического эффекта при рентгеновских исследованиях используют рентгеновскую трубку, имеющую два катода, две управля-

тельность цикла сканирования уменьшается до 2,5 с.

Применение метода вычислительной томографии, сочетающего предельные информационные возможности традиционных методов радиометрии, радиографии и радиоскопии, с одной стороны, и новейшие достижения в области реконструкции и цифровой обработки изображений — с другой создают принципиально новые возможности улучшения метрологических и диагностических характеристик радиационных средств диагностики промышленных изделий. Важно, что томографы позволяют решать одновременно задачи дефектоскопии, структуроскопии и измерения размеров изделий сложного профиля.

Роботизированные технологические комплексы неразрушающего контроля. В настоящее время бурное развитие получает роботизация различных технологических процессов. На операциях штамповки, сварки, литья, сборки, окраски и др. активно применяют промышленные роботы.

Самой массовой технологической операцией является контроль качества, на выполнение которого нацелен большой штат контролеров отделов технологического контроля предприятий. Результаты контрольных операций в большей степени зависят от квалификации, опыта, самочувствия и других субъективных качеств и возможностей работающего. Многократно повысить качество контроля, увеличить его производительность и высвободить большое число трудовых кадров позволяют автоматизированные средства неразрушающего контроля (СНК).

Наиболее трудоемкими и наименее надежными механизмами автоматизированных СНК, как правило, являются устройства сканирования. В процессе сканирования должен поддерживаться постоянный зазор между преобразователем, источником поля и контролируемым изделием. Движение преобразователя и контролируемого изделия относительно друг друга может быть поступательным, вращательным, сложным возвратно-поступательным и т. п. Особенностью систем сканирования СНК является высокая точность их изготовления. Они могут

быть электромеханическими, гидравлическими, пневматическими и т. д., но, главное, они должны быть высокоскоростными и надежными.

Различают многоэлементные и одноэлементные системы сканирования. Многоэлементные системы состоят из ряда неподвижных входных преобразователей, расположенных относительно друг друга линейно, матрично и т. д. Они отличаются большой скоростью получения информации с определенной площади контролируемого объекта, так как размеры объекта значительно превосходят размеры площади, контролируемой многоэлементной системой преобразователей.

Более простыми, надежными и более чувствительными являются одноэлементные системы сканирования. Они содержат один или несколько (до десяти) преобразователей, перемещающихся относительно контролируемой поверхности объекта. Каждый преобразователь контролирует определенную часть поверхности объекта. За счет перемещения преобразователя информация о дефекте является непрерывной функцией. Недостатком одноэлементных систем является их малая производительность.

Особую сложность представляют системы сканирования СНК, применяющиеся в особо ответственных агрегатах, таких, как атомные электростанции, изделия авиационной и космической техники, где невозможна разборка конструкции и затруднен доступ к контролируемой поверхности сложной конфигурации. В этих случаях приходится создавать специализированные самоходные установки, способные следить за изменением профиля контролируемой поверхности и перемещаться внутри агрегата или по его поверхности.

Многообразие специализированных систем сканирования, связанное с большим различием объектов контроля, до последнего времени не позволяло решить проблему создания и широкого внедрения унифицированных автоматизированных СНК для различных отраслей народного хозяйства. Масовое производство промышленных роботов и манипуляторов устранило препятствия на этом пути, позволив в ка-

честве главного элемента систем сканирования автоматизированных СНК использовать серийный робот-манипулятор и создать на этой основе широкую гамму роботизированных технологических комплексов неразрушающего контроля (РТК НК). В основу идеологии создания РТК НК положена совокупность серийно выпускаемых приборов неразрушающего контроля, промышленных роботов, выполняющих функции перемещения датчика прибора относительно объекта контроля и разбраковки изделий, а также специализированных устройств связи прибора, робота и объекта контроля между собой. РТК НК имеют выход на микроЭВМ и могут управляться по определенным программам контроля (пуск, останов, сортировка, перемещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях, поворот, позиционирование и т. д.), без чего невозможно создание гибких автоматизированных производств.

Примером дефектоскопических РТК НК могут служить комплексы, предназначенные для автоматизированного обнаружения поверхностных дефектов типа трещин, волосовин, закатов и других несплошностей на плоских изделиях из ферромагнитных и неферромагнитных материалов.

Важно отметить, что дефекты могут быть обнаружены под слоем неэлектропроводящего, в частности лакокрасочного, покрытия толщиной до 1 мм. Это очень существенный факт, поскольку применение визуально-оптических методов контроля таких дефектов не дает положительного результата.

В состав РТК НК входят вихревой дефектоскоп с вращающимися накладными преобразователями, промышленный робот, устройства связи прибора с роботом и объектом.

Наименьшие размеры выявляемых дефектов по протяженности — 10 мм, по глубине — 0,5 мм; производительность — 1200 операций/ч; максимальное перемещение датчика в горизонтальной плоскости — 105 мм, в вертикальной плоскости — 50 мм, угловое перемещение в пределах 180°.

При дефектоскопии плоских объектов больших размеров или сложной

конфигурации циклическое или непрерывное перемещение механической части РТК НК по соответствующим направляющим и направлениям осуществляется с помощью дополнительных специализированных приводных устройств.

Во многих случаях целесообразно объединение функций роботизированных систем сканирования РТК НК и широко распространенных в настоящее время разнообразных устройств перемещения объектов в зоне контроля.

Технический уровень и возможности РТК НК в равной степени зависят от уровня используемых приборов неразрушающего контроля и уровня промышленных роботов. Для диагностирования быстро развиваются системы технического зрения (СТЗ) с цифровой обработкой изображения.

СТЗ, установленная на промышленный робот с позиционной системой управления, имеющий пять степеней подвижности, грузоподъемность 10 кг и возможность вращения, качения, сгиба и поворота кисти с закрепленным на нем датчиком или деталью в диапазоне расстояний до 1250 мм, представляет новый качественный уровень РТК НК. Подобные контрольно-измерительные роботы могут одновременно выполнять часть функций сборочных, покрасочных, сварочных и других автоматизированных технологических агрегатов. На рис. 9 показан РТК НК, в состав которого входят оптическая система ОТ-10МФ и промышленный робот ТУР-10. РТК НК может быть использован для полной автоматизации магнитопорошкового, капиллярного, радиографического и оптического методов дефектоскопии.

СТЗ предназначена для обработки визуальной информации посредством преобразования плоского оптического изображения рабочей сцены в бинарную матрицу (цифровые коды).

Она осуществляет ввод данных в ЭВМ, где в соответствии с программой обработки проводится идентификация интересующих объектов, определение их координат, габаритов, ориентации и т. п. СТЗ используется для контроля наличия изделий на рабочей сцене при линейных скоростях движения объекта в поле зрения датчика до

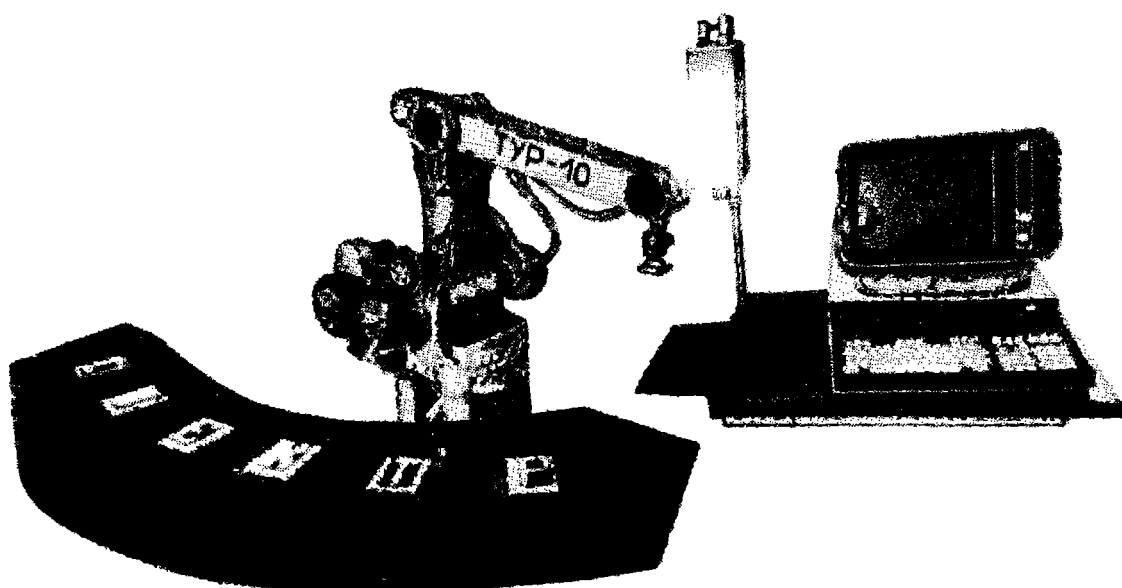


Рис. 9. РТК контрольных и сборочных операций

10 м/с. Преобразователем является фотодиодная матрица, которая включена в режиме накопления и осуществляет преобразование оптического сигнала в электрический аналоговый пропорционально величине светового потока за время накопления.

Результат обработки изображения в цифровой форме выдается через выходной буфер ЭВМ в систему управления роботом.

4. СТРУКТУРОСКОПИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ВЕЩЕСТВА

Структуроскопия металлов. Одним из важнейших показателей качества кристаллических материалов, в частности металлов, является их структура, определяющая во многих случаях прочностные характеристики изделий.

Для определения состояния структуры материалов применяют в основном акустические, магнитные, электромагнитные и радиационные методы измерения.

Применение акустических средств контроля свойств материалов (величины зерна, модулей упругости, твер-

дости, текстуры, прочности и т. п.) основано на связи этих свойств с акустическими характеристиками материалов (скоростями распространения и коэффициентами затухания упругих волн, характеристическими импедансами и т. п.). Величина зерна определяется как средний диаметр зерна и оценивается в номерах шкалы (баллах).

Наибольшее влияние величины зерна на коэффициент α затухания ультразвука наблюдается при $s \leq \lambda/D \leq 15$, где λ — длина волны ультразвука; D — средний диаметр зерна. Распределение величины затухания, полученное при контроле изделия в различных точках, подчиняется логарифмически нормальному закону и характеризует параметры распределения величин зерен исследуемого металла.

Для измерения затухания наибольшее применение получил импульсный (эхо- или теневой) метод, основанный на сравнении амплитуд двух или нескольких ультразвуковых сигналов. Структуру материала оценивают путем сопоставления данных, полученных на контролируемом изделии и на образцах, с известной средней величиной зерна.

В структуромерах используют относительный метод контроля структуры, основанный на прозвучивании металла на различных частотах. При этом одну из частот (опорную) выбирают низкой, так что затухание УЗК в небольшой степени зависит от структурных составляющих. Другие частоты (рабочие) соответствуют рэлеевской области рассеяния. Отношения амплитуд донных сигналов, соответствующих рабочим и опорной частотам, называемые структурными коэффициентами, определяют на исследуемом изделии для различных рабочих частот и сравнивают со структурными коэффициентами, полученными на образцах. Контроль проводят, используя продольные и сдвиговые волны. При частоте 0,65—10 МГц можно оценить величину зерна от 1 до 7 баллов.

Один из перспективных способов оценки структуры материала связан с анализом спектра донных сигналов (спектроскопический метод).

В материалах, содержащих включения веществ с резко различными акустическими характеристиками (например, в высокопрочных чугунах с пластинчатыми или сфероидальными графитными включениями), наблюдается зависимость скорости c ультразвука от формы включений. Подобная зависимость может быть получена также путем измерения коэффициента α затухания на различных частотах. Для некоторых сплавов разрешающую способность определения структуры повышают путем измерения отношения α/c .

Степень поражения металла межкристаллитной коррозией контролируют, сравнивая амплитуды сигналов, прошедших один и тот же путь через образец до и после поражения коррозией.

Относительный метод с использованием двух различных частот применяют также для определения межкристаллитной коррозии сталей и их склонности к межкристаллитной коррозии.

Точные измерения скоростей ультразвуковых волн дают возможность определить упругие постоянные высшего порядка зависимости деформаций

от напряжений. Такие измерения скорости могут коррелировать с напряжениями растяжения или сжатия, а также с величиной упругой анизотропии, вызванной внутренними напряжениями или текстурой материала.

В резьбовых деталях (болтах, шпильках) напряжение измеряют через время пробега волн до и после затяжки соединения. В упругой области увеличение времени пробега пропорционально напряжению. Простые приборы, построенные с использованием этого принципа, обеспечивают точность определения напряжений ± 10 МПа.

Стеклопластики являются ортотропными материалами, прочностные и упругие свойства которых зависят от направления армирующих волокон. Прочность стеклопластиков, применяемых для изготовления корпусов судов, проверяют акустическим импульсным методом (несущие частоты импульсов 100—150 кГц). При этом измеряют два параметра материала — скорость c звука и коэффициент α затухания.

Широкое распространение для диагностирования получил метод акустической эмиссии.

Акустическая эмиссия, или эмиссия волн напряжения, — явление, заключающееся в генерации упругих волн в твердых телах при их деформации. Главными источниками эмиссии считают процессы скольжения и разрушения в кристаллах и скоплениях кристаллов, трения поверхностей разрыва друг о друга, движения дислокаций и изломов, релаксации упругой матрицы при движении дислокаций. Моменты излучения волн эмиссии распределены статистически во времени, и возникающие при этом дискретные импульсы — вспышки имеют широкий частотный диапазон (от десятков килогерц до сотен мегагерц, в зависимости от материала).

Основными параметрами, характеризующими эмиссию, являются следующие:

1) число импульсов N — общее число импульсов, зарегистрированных за время наблюдения при определенном пороговом уровне чувствительности аппаратуры;

2) интенсивность \dot{N} — число импульсов, зарегистрированных за 1 с;

3) амплитуда сигнала V — максимальное значение огибающей принятого сигнала;

4) амплитудное распределение сигналов — закон распределения по амплитудам сигналов, принятых за определенный интервал времени или за время наблюдения;

5) пиковая амплитуда сигналов — максимальное значение амплитуды за определенный интервал времени;

6) энергия эмиссии — сумма квадратов амплитуд сигналов, принятых за определенный интервал времени.

В материалах с хорошо выраженной площадкой текучести на диаграмме напряжение—деформация кривая зависимости интенсивности эмиссии от приложенного напряжения имеет один максимум, соответствующий пределу текучести материала σ_T . На кривой зависимости пиковой амплитуды от напряжения имеется три максимума, последний из которых совпадает с пределом прочности σ_B , и не более двух минимумов, совпадающих обычно с пределом упругости σ_y и текучести. Начальная амплитуда сигналов V_0 зависит, в частности, от уровня остаточных напряжений в материале.

Перед контролем изделия нагружают до напряжения, несколько превышающего рабочее, вследствие чего при повторном нагружении бездефектного изделия до рабочей нагрузки сигналы эмиссии не возникают. Их появление служит предупреждением о развивающихся дефектах.

Эмиссия, связанная с деформацией кристаллической решетки, проявляется в виде сигналов небольшой амплитуды с характеристиками, близкими к белому шуму. Разрывы материалов в области, испытывающей напряжения, превышающие предел упругости, вызывают появление импульса эмиссии с большой амплитудой. Каждый канал аппаратуры акустической эмиссии включает, как правило, преобразователь, предварительный усилитель сигнала, блок фильтров и основной усилитель. Блоки обработки сигналов производят счет принимаемых сигналов по каналам за корот-

кий интервал времени (например, 0,1 с) и суммарную обработку сигналов от всех каналов многоканальной системы. Они исследуют также амплитудное распределение принимаемых сигналов и энергию эмиссии за единицу времени или за весь период испытаний.

Блок определения местоположения источника сигналов использует информацию от нескольких (не менее трех) преобразователей, расположенных в различных местах поверхности изделия. Когда сигнал достигает ближайшего к источнику преобразователя, начинается отсчет времени. Затем измеряется запаздывание Δt того же сигнала еще на два—три преобразователя. В блоках, осуществляющих измерения, предусматриваются пороговые устройства.

Для контроля крупногабаритных объектов применяют многоканальные устройства. Необходимость использования большого числа каналов вызвана быстрым затуханием волн и усложнением картины принятых сигналов с удалением от источника эмиссии. Число и расположение датчиков диктуется выбранной методикой локализации, формой и размерами изделия, коэффициентом затухания, состоянием поверхности и др. Например, в многоканальных системах контроля цилиндрических сосудов преобразователи обычно располагаются в вершинах треугольников, квадратов или правильных многоугольников, покрывающих всю поверхность изделия с расстоянием между искателями 200—500 мм.

Электромагнитные структуроскопы позволяют оценивать степень химической чистоты электропроводящих материалов; сортировать полуфабрикаты и изделия по маркам (химическому составу) материала, по твердости, прочности и т. д. Они могут выявлять неоднородные по структуре зоны, например, мягкие пятна, оценивать глубину и качество механической, термической и химико-термической обработки на разных стадиях технологического процесса производства. С помощью структуроскопов можно определять степень механических напряжений, выявлять зоны усталости, конт-

ролировать качество поверхностных слоев.

Непроизводительные и дорогостоящие механические, металлографические и химические испытания можно заменить неразрушающим электромагнитным методом только при установлении корреляционных связей между физико-химическими свойствами материала и сигналами преобразователя. Эти связи проявляются через электрофизические свойства материала, т. е. через удельную электрическую проводимость и магнитные характеристики.

Электромагнитные структуроскопы разделяют на приборы для контроля объектов в низкочастотных полях большой напряженности, в высокочастотных полях малой напряженности и в двух- и многочастотных полях.

Низкочастотные структуроскопы позволяют анализировать форму кривой напряжения измерительной обмотки проходного преобразователя, возбуждаемого током регулируемой амплитуды. Чаще используется промышленная частота 50 Гц и сравнительно сильное задающее магнитное поле. В ряде случаев применяют специальные генераторы с набором частот от одного до сотен герц. Измерение производят по кривой разностного напряжения, полученного при встречном включении обмоток двух преобразователей, в одном из которых находится контролируемый объект, а в другом — стандартный образец. По результатам статистической обработки результатов экспериментов выбирают намагничивающий ток и режим настройки блока автоматики.

К этой же группе приборов относят и многочисленные устройства с мостовыми схемами контроля, в которых исследуемое изделие перемагничивается в одном из плеч моста, а анализ напряжения проводится по характеру фигуры Лиссажу на экране ЭЛТ.

Высокочастотными структуроскопами контролируют качество ферромагнитных материалов при их поверхностном упрочнении, к которому относят наклеп (нагартовка), поверхностную высокочастотную закалку и химико-термическую обработку.

При высокочастотном поле малой напряженности детали можно контро-

лировать только по двум параметрам: удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости материала. Дополнительные возможности появляются при перемагничивании изделий одновременно низкочастотным полем большой амплитуды и высокочастотным полем малой амплитуды. При этом на выходе преобразователя наблюдается модулированное высокочастотное напряжение, характеризующее ряд контролируемых параметров, в том числе глубину обезуглероженного слоя.

Структуроскопия изделий из ферромагнитных электропроводящих материалов основана на измерении и оценке изменений удельной электрической проводимости.

Удельная электрическая проводимость ρ металлических материалов определяется температурой, давлением, относительной концентрацией исходных элементов. При небольших концентрациях примесей значение ρ обратно пропорционально их количеству. Для некоторых алюминиевых сплавов найдена связь между ρ и прочностью на разрыв. Для ряда сплавов определены значения ρ , выше которых не может быть пережога.

Для измерения удельной электрической проводимости деталей из ферромагнитных материалов с плоскими поверхностями применяются приборы с накладными вихретоковыми преобразователями.

Определение содержания ферритной фазы производят с помощью приборов, измеряющих магнитную проницаемость.

Разработаны и другие методы определения содержания ферритной составляющей (α -фазы), такие, как пондеромоторный, основанный на измерении силы или момента силы, действующей на образец в постоянном магнитном поле, или силы отрыва постоянного магнита или электромагнита от испытуемой детали, или крутящего момента образца; магнитоэлектрический, основанный на измерении изменения магнитной проницаемости испытуемого материала; индукционный, основанный на измерении комплексного сопротивления или индуктивности измерительной катушки, и т. п.

Форма и размеры петли гистерезиса (точнее — их семейства) зависят от таких свойств материала, как химический состав, определяющий особенности межспиновых взаимодействий, а следовательно, обменную энергию; кристаллографическая анизотропия; наличие и расположение примесей и атомов легирующих элементов; микро- и макронапряжения и неоднородности; наличие и расположение дислокаций, размеры зерен и т. п.

В связи с этим широкое применение получили магнитные коэрцитиметры с приставными электромагнитами, с помощью которых производится плавное намагничивание и размагничивание контролируемого участка до момента исчезновения магнитного потока в материале. Аналогичный принцип используют, когда участок детали намагничен локально с помощью цилиндрического постоянного магнита или электромагнита. В этом случае остаточная индукция и пропорциональная ей нормальная составляющая локального магнитного поля участка детали становятся мерой коэрцитивности материала. Согласно этому принципу разработана серия коэрцитиметров «с точечным полюсом», служащих для структурного анализа (контроль твердости, режимов, термообработки и т. п.).

Измерение состава вещества. Большую группу приборов составляют газоанализаторы, измеряющие различные физические и физико-химические свойства газовых смесей: теплопроводность, коэффициент преломления, плотность, способность давать окрашенные соединения с растворами, вязкость, способность к сорбции, поглощение излучения и др.

На основе классических методов газового анализа работают термоманитные, термокондуктометрические, термохимические, оптико-акустические и фотоколориметрические газоанализаторы. Наряду с классическими методами газового анализа развиваются электрохимические и ионизационные методы, методы газового анализа на основе хемилюминесценции, плазменной фотометрии, спектрофотометрии, сорбционных эффектов на полупроводниках, фотометрические мето-

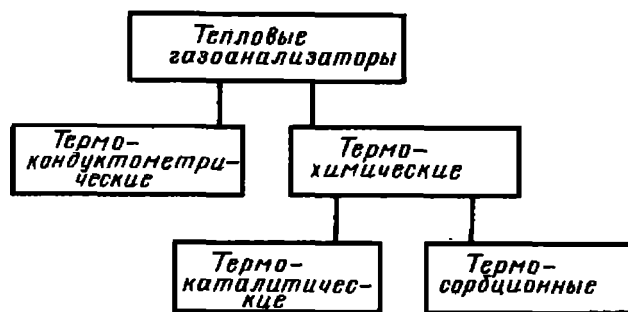


Рис. 10. Классификационная схема тепловых газоанализаторов

ды с использованием лазерных излучений и др.

Газоанализаторы, основанные на термокондуктометрическом, термоманитном и термохимическом методах измерения, имеют большое практическое значение и отличаются прежде всего простотой, надежностью и сравнительно низкой стоимостью.

Классификационные схемы тепловых и магнитных газоанализаторов показаны на рис. 10 и 11.

Оптические газоанализаторы нашли широкое применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) химических, металлургических и других производств. Они используют абсорбционные (исследование спектров поглощения) и эмиссионные (исследование спектров излучения) оптические методы в следующих диапазонах: ближней, средней и дальней инфракрасной (ИК) области ($\lambda = 0,7 \div 2,5$;

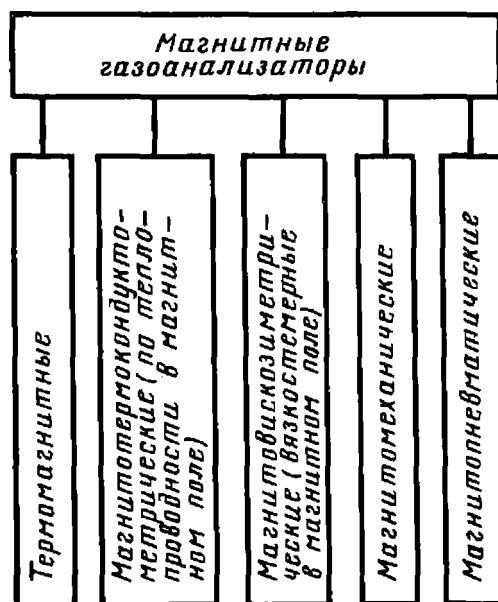


Рис. 11. Классификационная схема магнитных газоанализаторов

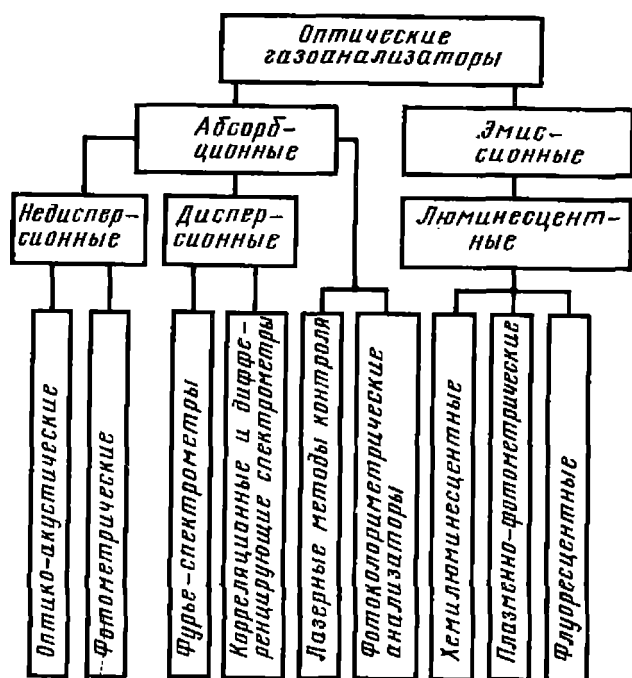


Рис. 12. Классификационная схема оптических газоанализаторов

2,5 ÷ 50; 50 ÷ 100 мкм соответственно), дальней (вакуумной) и ближней ультрафиолетовой (УФ) области ($\lambda = (10 \div 185) 10^{-3} + (185 \div 400) 10^{-3}$ мкм соответственно), видимой области спектра ($\lambda = 0,4 \div 0,7$ мкм).

Классификационная схема оптических газоанализаторов, основанных на различных методах, приведена на рис. 12.

Среди оптических анализаторов газообразных веществ наиболее универсальными и наиболее распространенными являются спектроабсорбционные. Они используют прямой метод измерения по спектрам поглощения определяемого вещества: спектры по-

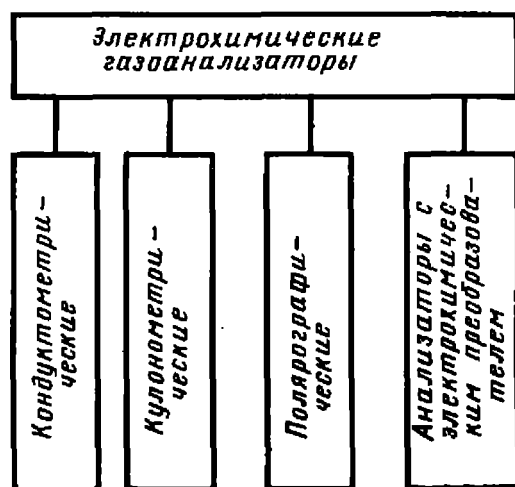


Рис. 13. Классификационная схема электрохимических газоанализаторов

глощения в инфракрасной (колебательно-вращательные спектры), в ультрафиолетовой и реже в видимой (электронные спектры) областях.

Все более широкое развитие получают лазерные методы измерения загрязнений атмосферы. Регистрируя и расшифровывая следы взаимодействия лазерных импульсов с атмосферными слоями, можно получить информацию о давлении, плотности, температуре, концентрации различных газовых составляющих атмосферы и о других параметрах.

Возросло значение анализаторов атмосферных загрязнений, использующих не поглощение, а эмиссию излучения анализируемым компонентом. Для анализа используют как спектры теплового излучения нагретых газов — загрязнителей, так и их молекулярную люминесценцию.

Одним из новейших типов электрохимических газоанализаторов являются анализаторы с электрохимическими преобразователями, классификационная схема которых представлена на рис. 13. Чувствительный элемент такого прибора представляет собой слоистую систему типа «сэндвич» с гелеобразным («твердым») электролитом, заполняющую пространство между чувствительным и счетным электродами.

Экспрессные методы, как и большинство обычных методов анализа воздушной среды, — колориметрические. В основе каждого из них лежит цветная реакция, протекающая в различных средах — в растворах, на реактивной бумаге или на твердых сорбентах.

Среди аналитических приборов значительное место занимают анализаторы состава жидких сред. Класс этих приборов отличается многообразием групп, основанных на различных физических законах и методах измерений, и имеет наибольший удельный вес в аналитическом приборостроении.

Классификация анализаторов жидких сред охватывает оптические, полярографические, кулонометрические, вискозиметрические и целый ряд других групп анализаторов. Доминирующую группу представляют оптические анализаторы.

Рентгеновский структурный анализ представляет совокупность методов исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рентгеновского излучения, рассеянного на анализируемом объекте.

Наряду с нейтронографией и электрографией рентгеноструктурный анализ является дифракционным методом, основанным на взаимодействии рентгеновского излучения с электронами вещества. Дифракционная картина зависит от длины волны рентгеновских лучей и строения вещества. Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны примерно 10^{-4} мкм, т. е. порядка размеров атомов.

Методами рентгеноструктурного анализа изучают металлы, сплавы, минералы, неорганические и органические соединения, полимеры, аморфные вещества, жидкости и газы, молекулы белков, нуклеиновых кислот и т. д. При этом определяют минералогический (фазовый) качественный и количественный состав, ориентацию и размеры кристаллитов и коллоидных частиц, строение аморфных и полуморфных материалов, атомную структуру кристаллов; измеряют внутренние напряжения, коэффициенты термического расширения; исследуют твердые растворы и превращения, происходящие в материалах под влиянием температуры, давления, влажности и т. д.

В основе метода рентгеноструктурного анализа лежит явление дифракции рентгеновских лучей, т. е. рассеяния их кристаллами (или молекулами жидкостей и газов). В результате взаимодействия первичного рентгеновского пучка с электронами вещества возникают вторичные отклоненные пучки с той же длиной волны, направление и интенсивность которых зависят от строения вещества. Дифрагированные лучи составляют часть всего рассеянного вещества рентгеновского излучения.

Способ регистрации дифракционной картины (с помощью фотопленки или счетчика квантов) определяет функциональный состав и конструктивные особенности рентгеноструктурного аппарата.

Источник излучения в сочетании с рентгеновскими камерами называют рентгеноструктурным аппаратом с фоторегистрацией.

Совокупность источника излучения и рентгеновского гониометра со счетчиком называют рентгеновским дифрактометром.

Непосредственной функцией дифрактометра является измерение интенсивности и направления рентгеновского излучения, дифрагированного на кристаллическом образце. При этом интенсивность дифрагированного излучения измеряется с точностью до десятых долей процента, а углы дифракции — до сотых и тысячных долей градуса.

Создание конструкционных материалов с заданными механическими свойствами, прогнозирование их прочностных характеристик, определение исходного и остаточного ресурсов конструкций и причин их разрушения невозможно без глубокого изучения структуры материалов на макро- и микроуровнях, без исследования распределения химического состава микровключений, динамики изменения структурных параметров в процессе нагружения материалов. Между структурой и механическими свойствами материалов имеется определенная взаимосвязь. Это позволяет судить об их прочностных характеристиках по результатам исследования структуры, не прибегая к измерениям механических параметров.

Количественная металлография (стереометрическая металлография) — система методов микроскопического исследования, позволяющих количественно оценить геометрические параметры пространственного микроскопического строения металлов и сплавов.

Количественную металлографию эффективно используют для получения таких данных о строении материала (металлов, сплавов, металлокерамики и др.), как величина зерна, удельная поверхность границ зерен, число микрочастиц в единице объема сплава, форма и характер распределения микрочастиц в сплаве, структурный (фазовый) объемный состав сплава.

Количественные металлографические исследования проводят на ме-

таллографических микроскопах. Предметный столик микроскопа должен обеспечивать плавное перемещение шлифа в плоскости столика в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Значительным прогрессом в аппаратном обеспечении количественной металлографии явилось создание приборов, действие которых основано на принципе сканирования микроструктуры световым лучом.

Основной задачей тепловой микроскопии является исследование структурных изменений в поверхностных слоях материалов непосредственно в охлажденном или нагретом состоянии — от криогенных температур до температур, близких к температуре плавления.

Тепловая микроскопия получила развитие благодаря разработке устройств, позволяющих осуществить прямое наблюдение микроструктуры металлов и сплавов в процессе пластического деформирования при нагреве (охлаждении) и механическом нагружении.

5. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

При диагностировании объектов параметром измерения часто является линейный размер детали или узла — ширина, длина, высота, расстояние или зазор между элементами. Во многих случаях представляет интерес изменение формы поверхности в процессе эксплуатации изделия, положения детали и т. п.

В машиностроении контроль размеров составляет около 90 % всех операций производственного контроля.

Для контроля геометрии микро- и макрообъектов используют оптический проекционный метод сравнения или измерения, который заключается в получении увеличенного изображения изделия на экране с последующим его сравнением с изображением, принятым за эталонное.

Существуют два основных способа проектирования в отраженных и проходящих лучах (эпи- и диапроекции).

Большинство современных проекторов обладает измерительными функ-

циями. Измерения производят при сравнении изображения контролируемого изделия с его чертежом или шаблоном, выполненным в масштабе проекции и закрепленным на экране, или при перемещении предметного стола микровинтами до совмещения изображения контуров детали с меткой на экране.

По типу оптической схемы проекторы разделяют на следующие группы: 1) подобного увеличения; 2) сведенного изображения; 3) совмещенного и стереоскопического изображения; 4) светового сечения; 5) контактно-проекционные; 6) телевизионные.

Проекторы подобного изображения наиболее многочисленны. Их используют для контроля размеров изделий в процессе изготовления (станочные проекторы) и после изготовления.

Проекторы сведенного (двойного) изображения применяют при массовом контроле однотипных деталей. Оптические схемы проекторов показаны на рис. 14.

Оптические компараторы применяют для контроля деталей методом сравнения с эталонным изделием. Применяя светофильтры, ошибки разного знака можно характеризовать различными цветами. С помощью специальной осветительной системы можно получить объемное изображение изделия и контролировать его по трем координатам.

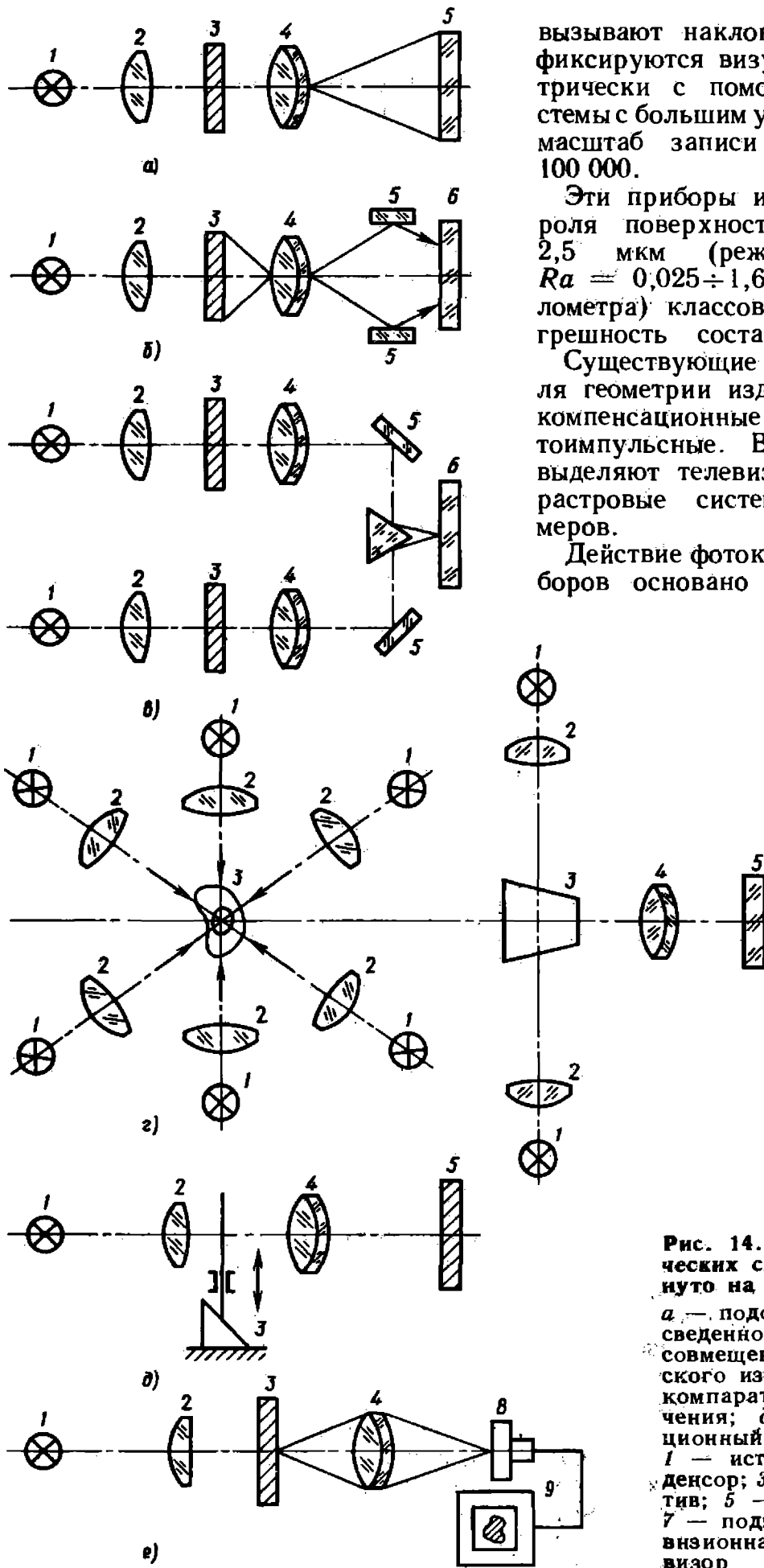
Проектор светового сечения позволяет получить на экране изображение профиля изделия сложной формы, освещаемого с боков плоскими пучками объектива.

Для определения неровностей поверхности с $Ra = 0,4 \div 12,5$ мкм применяют оптический профилометр Ю. В. Коломийцева, представляющий собой сочетание микроинтерферометра с двойным микроскопом.

Поверхности с малыми неровностями (до 0,002 мкм) контролируют методом многократного отражения лучей.

Профилографические методы контроля шероховатости основаны на регистрации перемещений специальной иглы, находящейся в контакте с исследуемой поверхностью.

Для измерения перемещения иглы используют принцип оптического рычага. Смещения измерительного щупа



вызывают наклоны зеркала, которые фиксируются визуально или фотоэлектрически с помощью оптической системы с большим увеличением. При этом масштаб записи может быть более 100 000.

Эти приборы используют для контроля поверхности с $Ra = 0,08 \div 2,5$ мкм (режим профилографа), $Ra = 0,025 \div 1,6$ мкм (режим профилометра) классов шероховатости. Погрешность составляет около 10 %.

Существующие приборы для контроля геометрии изделий делят на фотокомпенсационные, фотоследящие и фотоимпульсные. В отдельную группу выделяют телевизионные, лазерные и растровые системы измерения размеров.

Действие фотокомпенсационных приборов основано на сравнении двух

Рис. 14. Основные типы оптических схем проекторов (повернуто на 90°):

а — подобного увеличения; б — сведенного изображения; в — совмещенного и стереоскопического изображения (оптический компаратор); г — светового свечения; д — контактно-проекционный; е — телевизионный; 1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — изделие; 4 — объектив; 5 — экран; 6 — зеркало; 7 — подвижный щуп; 8 — телевизионная трубка; 9 — телевизор

световых потоков, один из которых частично перекрывается контролируемым изделием, а другой — подвижной заслонкой-эталоном, положение которой при равенстве потоков характеризует размер изделия.

При контроле фотоследящим методом положение каждой границы изделия определяется бесконтактно-следящей системой.

Фотоимпульсные приборы наиболее распространены. Их действие основано на применении развертки изображения при образовании светового импульса, длительность которого определяется размером изделия.

Действие фотоимпульсного измерителя диаметров основано на развертке оптического изображения контролируемой трубы с помощью цилиндрического непрозрачного вращающегося барабана с щелями и определении длительности образующихся при этом импульсов света.

С помощью телевизионных проекторов можно легко автоматизировать процесс измерений и контроля и выдавать результаты на ЭВМ, а также производить различные преобразования изображения и их цифровую обработку.

Наиболее распространена схема проектора с передающей телевизионной трубкой. Она включает источник света, объектив, передающую трубку, видеотракт с блоком усиления и обработки сигнала и видеоконтрольное устройство. Для управления процессом контроля и запоминания информации могут быть использованы ЭВМ и видеоманитофоны.

Известен широкий класс приборов толщинометрии, использующих проникающие электромагнитные и акустические поля.

Большую группу составляют толщинометры покрытий пондеромоторного действия, работа которых основана на измерении силы отрыва или притяжения постоянных магнитов и электромагнитов к контролируемому объекту.

Магнитные толщинометры калибруются с помощью рабочих образцов, изготовленных из той же стали, что и контролируемые детали, с покрытиями известной толщины.

Действие приборов магнитостати-

ческого типа основано на определении вариации напряженности магнитного поля (с помощью датчиков Холла, феррозондов, рамки с током, магнитной стрелки и т. п.) в цепи электромагнита или постоянного магнита при изменении расстояния между ним и ферромагнитным изделием из-за наличия немагнитного покрытия.

Наиболее распространенным способом получения информации о толщине покрытия является размещение магниточувствительных элементов в магнитной нейтрали либо непосредственно у полюсов магнита с использованием дифференциального включения магниточувствительных элементов, что обеспечивает работу преобразователя в режиме «нулевого» начального сигнала.

Для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе широкое распространение получили индукционные толщинометры, действие которых основано на определении изменения магнитного сопротивления (проводимости) магнитной цепи.

Для увеличения точности измерений в индукционных приборах электромагнитное поле локализовано с помощью удлиненного ферромагнитного стержня и шарикового наконечника. Это позволяет измерять толщину в пятне контроля площадью 1 мм².

К неэлектропроводящим покрытиям на электропроводящем основании относят различные оксидные, фосфатные, лакокрасочные, керамические, эмалевые, пластмассовые и другие покрытия на ферро- и неферромагнитных металлах и сплавах. Толщинометры неэлектропроводящих покрытий на электропроводящем основании часто представляют собой вихретоковые измерители зазора.

К электропроводящим покрытиям относят различные виды гальванических покрытий и плакировки. Покрытия могут быть как ферромагнитными (например, никелевые), так и неферромагнитными (например, медные, цинковые, золотые, серебряные и т. д.).

Материал основания может быть ферро- и неферромагнитным. Многообразие комбинаций покрытий и оснований приводит к необходимости при-

менения специальных приборов и сложных методик контроля, которые заключаются в предварительных градуировках приборов по стандартным образцам.

Большинство толщиномеров — специализированные вихретоковые приборы, предназначенные для контроля строго определенных сочетаний материалов покрытия и основы.

Электромагнитные толщиномеры применяют для контроля электропроводящих слоев толщиной не более 5—10 мм. Эти приборы особенно эффективны для измерения толщин менее 0,3 мм.

Радиоволновыми методами измеряют толщину диэлектрического слоя, расположение одного диэлектрического слоя над другим, диэлектрического слоя на металле и толщину тонкого металлического листа.

Измерения можно проводить в технологическом процессе изготовления измеряемого слоя (лист стекла, асбестолита, термозащитного покрытия и т. п.), последовательно контролируя толщину по всей поверхности или в отдельных точках и выдавая соответствующие сигналы на исполнительные механизмы.

Средства измерения толщины с помощью радиоволн обеспечивают быстрое действие, зависящее только от средств индикации, высокую точность измерения (до долей процентов), высокую плотность отсчетов, возможность дистанционного контроля, проведение измерений при одно- и двустороннем доступе к контролируемым поверхностям.

Информация о толщине может быть заложена в амплитуде, фазе, смещении резонансной кривой, времени распространения импульса, положении максимума отраженной СВЧ-волны и т. п.

В наиболее распространенных методах толщинометрии сигнал, являющийся основой для градуировки индикаторного прибора в значениях геометрической толщины, является функцией двух переменных: геометрической толщины и диэлектрической проницаемости материала контролируемого изделия. Поэтому точность измерения толщины определяется степенью

однородности материала: чем более однороден материал, тем выше точность измерения толщины.

Широкое применение для измерения толщины получили следующие акустические приборы:

1) импульсные, в которых толщина измеряется по времени прохождения ультразвукового импульса в изделии или слое;

2) импульсные или с непрерывным излучением, в которых толщина определяется по амплитуде прошедших через изделие ультразвуковых волн;

3) с непрерывным излучением, в которых толщина измеряется по фазе прошедших через изделие ультразвуковых волн;

4) резонансные, в которых для измерения толщины используется резонанс контролируемого изделия или другие интерференционные явления, возникающие при распространении акустических волн в изделии.

По способу передачи упругих колебаний различают приборы контактные, иммерсионные и бесконтактные.

Самые распространенные акустические толщиномеры — эхоимпульсные, позволяющие контролировать изделие с гладкой и грубой поверхностью (корродированные или полученные способом горячей прокатки). Резонансные толщиномеры применимы только для контроля изделий с относительно чистыми (не ниже $Ra = 6,3 \div 12,5$ мкм), параллельными (угол клина меньше $2/3^\circ$) поверхностями, изготовленными из материалов с небольшим затуханием ультразвуковых волн.

Диапазон измеряемых акустическими приборами толщин 0,25—500 мм, погрешность до $\pm 1,5\%$.

Контроль длины проводится и локационным эхометодом.

Для измерения толщины листов и металлических полос применяют также рентгеновские и изотопные приборы. Высокая точность измерений (0,5—1% от измеряемого значения), бесконтактность, хорошая помехоустойчивость и надежность отличают их от других типов толщиномеров. Принцип работы большинства рентгеновских измерителей толщины листа в диапазоне 0,2—20 мм основан на сравне-

нии остаточной интенсивности прошедшего через измеряемую полосу рентгеновского излучения от рабочего источника с остаточной интенсивностью рентгеновского излучения от компенсирующего источника, прошедшего через образец переменного сечения — компенсирующий клин.

Толщину стальной полосы в диапазоне 0,5—4000 мкм с погрешностью 1,5—5 % от измеряемого значения определяют с помощью бета-толщиномеров.

Обеспечение надежного функционирования рабочих органов многих машин, в том числе и роботов, реализуется с помощью измерителей угловых и линейных перемещений кодовых, импульсных и других датчиков.

Основной особенностью кодовых датчиков является выдача информации непосредственно в двоичном коде с абсолютным отсчетом от начала координат.

Основным узлом, обеспечивающим высокую точность отсчета кодовых датчиков, является цифровой кодирующий преобразователь угла. Оптимальный вариант исполнения связан с использованием фотоэлектрической системы считывания. Кодирующие диски содержат прозрачные участки в непрозрачной подложке; считывание осуществляется линейкой расположенных вдоль радиуса фоточувствительных элементов.

Кодирующие диски могут изготавливаться с системами штрихов как по двоичному, так и по циклическому коду.

Импульсные (фотоэлектрические) датчики в отличие от кодовых, являющихся датчиками абсолютного значения угла поворота, дают информацию об относительных угловых перемещениях и требуют фиксации точки отсчета в начале рабочего цикла. Тем не менее, благодаря более простой технологии их изготовления и меньшей стоимости, по сравнению с кодовыми, импульсные датчики находят широкое применение. Они выполняются в виде двух дисков, один из которых устанавливается на вращающемся валу, а второй закрепляется неподвижно. На вращающемся диске вдоль окружности изготавливают два ряда концентриче-

ски располагаемых прозрачных участков, причем эти ряды смещены по углу относительно друг друга. На неподвижном диске вдоль окружности также имеется ряд прозрачных прямоугольных участков, по размерам несколько превышающие участки вращающегося диска. С помощью фотоэлектрических приемников, регистрируя количество световых импульсов, возникающих при вращении подвижного диска за один оборот, можно определять угол поворота, скорость вращения и направление вращения вала.

Применяемые для станков с ЧПУ импульсные датчики обеспечивают получение 1024 импульса (2^{10}) на 1 оборот.

Принцип действия индуктосинов (угловых и линейных) аналогичен используемому в сельсинах. Статорная обмотка формирует протяженную плоскую шкалу с системой проводников. Сканирующая головка имеет две одинаковые обмотки меньших размеров. Обмотки головки связаны индуктивно с обмоткой шкалы.

Шаг укладки проводников обмоток статора и головки постоянен. Обмотки сканирующей головки смещены относительно друг друга на 0,25 шага.

Обмотки головки играют роль первичной обмотки, а обмотка статора — вторичной обмотки. Питание обмоток головки — синусоидальные напряжения, обычно частоты 400 Гц, сдвинутые по фазе на 90° . Если расстояние подвижной части от сканирующей головки не изменяется, то на обмотке статора суммируются синусоидальные напряжения, созданные на обмотках сканирующей головки. При смещении сканирующей головки, в зависимости от величины смещения, происходит изменение фазы и амплитуды напряжения на обмотке шкалы.

На основе этого же принципа функционируют и круговые индуктосины, используемые для измерения относительных угловых перемещений.

Для получения напряжения, линейно изменяющегося в функции угла поворота, применяют одно- и многооборотные потенциометры.

В последнее время широкое применение получают управляемые от ЭВМ координатные измерительные машины

и центры с шуповой головкой, позволяющей производить «ощупывание» деталей в разных направлениях одновременно несколькими щупами. Благодаря возможности приспособлять расположение щупов к любому объекту измерительные машины являются универсальными метрологическими устройствами. Вычислительное устройство рассчитывает дифференциальные координаты и деформирование щупов, выполненных, как правило, на индуктивном принципе.

При соприкосновении с определенным усилием шупового шара с деталью шуповая головка управляется до тех пор, пока не будет достигнута индуктивная нулевая точка, после чего вычислительное устройство определяет координаты, направление, ось и плоскость измерения. В координатных измерительных машинах используется также и бесконтактный оптико-электронный метод. Основой системы линейного измерения являются специальная шкала на стекле и матрица световодов, позволяющие получить разрешение до 1 мкм. Особое значение имеет механическая стабильность и точность изготовления механических устройств (направляющие, привод и др.) измерительной машины.

Измеренные значения могут выводиться на дисплей и графопостроитель, а также храниться в памяти.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Измерение температуры. Температура — один из основных параметров диагностирования многих объектов. Приборы для измерения температуры разделяют на два класса — контактного и неконтактного действия.

К первым относятся жидкостные манометрические термометры, термпары, термометры сопротивления, термоиндикаторы.

К приборам неконтактного действия относятся пирометры различных типов.

Действие жидкостных термометров основано на термическом расширении жидкости, заключенной в капилляре термометра.

Наиболее точными являются лабораторные ртутные термометры. Диапазон их измерения 0—500 °С, погрешность 0,05 °С при температуре 60 °С и 1,2° при температуре 500 °С.

Действие термометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления веществ (металлов и их оксидов, солей и т. д.) в зависимости от температуры. Наиболее чувствительными являются полупроводниковые термометры сопротивления, имеющие диапазон измерения до 150 °С.

Работа термоэлектрических термометров основана на термоэлектрическом эффекте, возникающем в термопаре, представляющей собой цепь из двух разнородных электрических проводников (термоэлектродов). При наличии разности температур в местах соединения термоэлектродов в цепи генерируется термоЭДС.

Наиболее известные материалы термоэлектродов — платина, железо, молибден, вольфрам, медь, манганин, платинородий, хромель, копель, алюмель, константан.

Конструктивное оформление термпар разнообразно и должно соответствовать условиям их эксплуатации. Часто рабочие концы помещают в защитные оболочки из фарфора или другого материала.

Преимущества термоэлектрических термометров — линейность в широком диапазоне температур, чувствительность и стабильность показаний. Диапазон измеряемых ими температур до 2500 °С, чувствительность более 0,1 мВ/°С. Для регистрации ЭДС применяют стандартные пирометрические вольтметры, показывающие или самопишущие, класса точности 0,2—1,0.

В системах дистанционного измерения температур находят широкое применение электронные автоматические потенциометры и мосты класса точности 0,5—1,0.

Действие термоиндикаторов основано на изменении состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. Преимуществом термоиндикаторов является запоминание распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность.

Существуют термоиндикаторы трех основных типов: 1) термоиндикаторы, меняющие цвет при определенной температуре, называемой критической или температурой перехода; 2) термоиндикаторы, плавящиеся при определенной температуре; 3) люминофоры, меняющие яркость или цвет при нагреве.

Приборы для неконтактного измерения температуры разделяют по характеру получения информации на пирометры для локального измерения температуры в данной точке объекта и пирометры для анализа температурных полей (тепловизоры). По принципу действия различают яркостные, цветовые и радиационные пирометры.

Яркостные визуальные пирометры применяют для измерения яркостных температур выше 600°C . Принцип их действия основан на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры.

Яркостные пирометры с электронно-оптическими преобразователями и специально передающими телевизионными трубками (видеоконами) чувствительны в ИК-области спектра и позволяют измерять температуру в диапазоне $200\text{—}600^{\circ}\text{C}$.

Действие цветовых пирометров основано на сравнении интенсивности излучения объекта в двух спектральных диапазонах. Логарифм их отношения обратно пропорционален цветовой температуре объекта. Оптическая схема цветового пирометра обычно содержит два цветных фильтра, через которые с помощью модулятора поток излучения от объекта попеременно направляется на фотоприемник.

Метод цветовой пирометрии может быть распространен на инфракрасную область спектра при соответствующем подборе приемника излучения и материалов проекционной оптики и светофильтров.

Нижний предел температурного диапазона может быть расширен до $20\text{—}50^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура 2800°C .

Действие радиационных пирометров основано на использовании закона Стефана—Больцмана, выражающего зависимость излучаемой телом энергии от его температуры.

Приборы этого типа широко используют для измерения низких температур ($20\text{—}100^{\circ}\text{C}$). Приемниками излучения служат термодатчики или болометры. Применяют также термобатареи, представляющие собой последовательно соединенные термодатчики. В последнее время находят применение пироэлектрические детекторы.

Существенное влияние на показания радиационного пирометра оказывает состояние поверхности контролируемого объекта, поскольку оно связано с его излучательной способностью.

Для определения распределения температуры по поверхности объекта вдоль заданной линии развертки эффективно применяют радиационные пирометры с оптико-механической системой линейного сканирования — термопрофили. Диапазон регистрируемых температур $20\text{—}600^{\circ}\text{C}$. Минимальная регистрируемая разность температур $0,1^{\circ}\text{C}$.

Структурная схема тепловизора включает приемную оптическую систему, детектор ИК-лучей, сканирующую систему, обеспечивающую последовательный просмотр объекта по заданному закону, усилитель, систему развертки и синхронизации и кинескоп.

Принцип действия тепловизора заключается в просмотре по заданному закону движения поверхности объекта узким оптическим лучом, сформированным системой объектив—приемник. Обзор происходит в пределах угла поля зрения за время кадра.

Тепловизионные приборы разделяют на три группы:

1) собственно тепловизоры, в которых тепловое поле преобразуется в черно-белое (или цветное) видимое изображение на экране электронно-лучевой трубки;

2) термографы, представляющие собой тепловое поле контролируемого изделия в виде изображения, фиксированного на каком-либо носителе информации (например, электробумаге), причем изображение содержит полутона;

3) тепловизионные микроскопы, характеризующиеся наличием инфракрасного микрообъектива и предназначенные для анализа температурных

7. Сравнительные технические характеристики * наиболее часто применяемых измерительных преобразователей давления

Измерительные преобразователи	Диапазон измерения, кПа		Точность измерения, %	Температура окружающего воздуха, °С	Масса, кг
	абсолютного давления	разности давлений			
С силовой компенсацией	1,0—7000		0,25—0,5	—40 ÷ +100	8—25
С магнитной компенсацией	7,7—2800	0,25—70 000	0,5	—40 ÷ +80	6—27
Тензометрические	0,75—70 000		0,2—0,5	—40 ÷ +120	0,3—18
Емкостные	1,0—42 000	0,1—70 000	0,25	—30 ÷ +105	2,7—12,5

* Предельно допускаемое рабочее избыточное давление 42 МПа; по требованию потребителя —70 МПа.

полей микрообъектов. Диапазон их измерения — 30 ÷ + 2000 °С. Минимальная обнаруживаемая разность температур до 0,1 °С.

Измерение давления. Давление является также широко распространенным параметром диагностирования машин. Для измерения разности давлений и преобразования абсолютного давления в стандартный электрический сигнал наибольшее распространение получили измерительные преобразователи, основанные на методе силовой компенсации, тензометрическом и емкостном методах. Другие методы измерения (магнитная компенсация, вибро-частотный, дитрансформаторный) используются реже. Сравнительные технические характеристики наиболее часто применяемых измерительных преобразователей давления представлены в табл. 7.

Метод силовой компенсации заключается в компенсации усилия, развиваемого на чувствительном элементе измерительного преобразователя под действием измеряемого параметра, элементом обратной связи. Энергия на элемент обратной связи поступает от внешнего источника питания через выходной усилитель пропорционально измеряемому параметру. Компенсация усилия на чувствительном элементе

позволяет уменьшить его деформацию и тем самым существенно повысить его метрологические характеристики.

Все более широкое распространение получают тензорезисторные измерительные преобразователи, обладающие высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Непосредственное преобразование деформации упругого чувствительного элемента в электрический сигнал, осуществляемое тензочувствительными элементами, дает возможность значительно уменьшить габаритные размеры приборов, повысить их точность, надежность, долговечность, быстродействие, стойкость к внешним дестабилизирующим воздействиям. Принцип действия этих приборов основан на преобразовании деформации упругих элементов в изменение сопротивления тензорезисторов. Тензорезистор воспринимает деформацию либо от манометрического упругого элемента, либо от консольной балочки, работающей на изгиб, либо от стержня, работающего на сжатие под действием усилия, возникающего в чувствительном элементе при воздействии измеряемого параметра. Полупроводниковые тензорезисторы в отличие от металлических проволочных и фольговых тензорезисторов обладают на два порядка

большей чувствительностью. Для повышения стабильности датчиков применяют диффузионные и эпитаксиальные тензорезисторы.

В кремниевую монокристаллическую подложку p - или n -типа проводимости, защищенную маской монооксида кремния, проводят диффузию примесей соответственно n или p -типа проводимости и получают резистор требуемых форм и геометрии в виде диффузионного слоя. В том месте подложки, где концентрация диффундирующих примесей равна концентрации примесей подложки, образуется p — n -переход, который изолирует резистор от подложки. Если же затем в соответствующих местах резистора нанести металлические контакты, между которыми параллельно плоскости p — n -перехода пропускать ток, то собственное сопротивление резистора будет зависеть от величины и вида деформации подложки. Такой тензорезистор называют планарным диффузионным. Если на кремниевой монокристаллической подложке одного типа проводимости нарастить эпитаксиальный слой (напылить тонкую пленку другого типа проводимости), в котором травлением образовать резистор требуемых форм и геометрии с металлическими контактами, то получают мезоструктурный эпитаксиальный тензорезистор.

Диффузионные и эпитаксиальные тензорезисторы в отличие от наклеиваемых полупроводниковых тензорезисторов позволяют создавать монокристаллический упругий элемент с высокими метрологическими характеристиками (например, кремний деформируется упруго без гистерезиса и ползучести вплоть до температуры 600 °С, причем максимальное значение упругой деформации достигнет 2,6 %). Между рабочим телом тензорезистора и подложкой отсутствует клеевой слой, что, во-первых, снижает число преобразований в измерительной цепи деформация — электрический выходной сигнал и тем самым повышает точность измерений; во-вторых, позволяет полностью передавать рабочему телу тензорезистора возникающие в подложке деформации, поскольку связь между рабочим телом тензорезистора и подложкой атомарная и идеально упругая; в-третьих,

полностью исчезают гистерезис и ползучесть, присущие клеевому слою. Диффузионные и эпитаксиальные тензорезисторы дают возможность получить преобразователи с весьма малой базой — до сотен микрометров. В качестве материалов их подложки используют кремний и сапфир.

Их достоинствами являются: искробезопасное исполнение с повышенным уровнем взрывозащиты, коррозионная стойкость в различных агрессивных средах, виброустойчивость, пыле- и водозащищенность, высокие метрологические, динамические характеристики и надежность, малые габаритные размеры и масса; стандартный выходной сигнал в виде силы постоянного электрического тока. Подобные приборы могут работать в различных климатических условиях.

Например, комплекс «Сапфир-22» состоит из 38 моделей датчиков, позволяющих контролировать в широких пределах абсолютное и избыточное давление, разрежение, разность давлений, расход жидкостей и газов, уровень химически активных, вязких и кристаллизующихся жидкостей, плотность жидких сред и другие параметры, связанные с давлением. Их точность достигает $\pm 0,1$ %.

Принцип действия емкостных преобразователей основан на изменении емкости конденсатора, образованного проводящей поверхностью изолированного электрода и поверхностью чувствительного элемента при воздействии на последний измеряемого давления. Изменение емкости с помощью электронной схемы преобразуется в унифицированный электрический сигнал. Емкостные преобразователи выполняют в виде плоского или плоскосферического конденсатора. Чувствительным элементом, воспринимающим давление, чаще всего является мембрана, которая либо сама является частью конденсатора, либо непосредственно соединена с обкладкой конденсатора, например, штоком. Зависимость величины емкости от давления в емкостных преобразователях носит нелинейный характер. Уменьшение нелинейности достигается благодаря введению в зазор конденсатора специального диэлектрика, что повышает чувствительность

преобразователя и позволяет работать при меньшем ходе мембраны, а также с помощью электронной схемы с таким коэффициентом преобразования, что суммарный коэффициент преобразования всей системы получается достаточно линейным. К преимуществам емкостных преобразователей следует отнести высокую чувствительность и хорошие динамические свойства, высокую точность (порядка 0,25 %) и сравнительно малые габаритные размеры и массу.

Специфической областью применения емкостных преобразователей является измерение низких давлений, а также давления в быстроменяющихся процессах.

Метод магнитной компенсации заключается в преобразовании перемещения постоянного магнита, жестко связанного с чувствительным элементом, в изменение магнитного потока в сердечнике магнитомодуляционного преобразователя. Появляющийся при этом сигнал рассогласования управляет выходным усилителем, который, в свою очередь, выдает выходной сигнал постоянного тока в линию дистанционной передачи и параллельно в обмотку обратной связи. Последняя создает магнитный поток обратной связи для компенсации входного управляющего воздействия. Измерительные преобразователи, основанные на компенсации магнитных потоков, отличаются малой чувствительностью к вибрации и тряске и высокой надежностью работы в экстремальных условиях.

Виброчастотный метод измерения основан на принципе возникновения колебательных процессов в динамических системах, содержащих инерционный элемент, способный накапливать энергию (индуктивность, массу), и элемент, накапливающий потенциальную энергию (емкость; пружину). В данных преобразователях упругий чувствительный элемент, например, тонкостенная труба или натянутая струна, включается в резонансный контур. Колебания упругого элемента на резонансной частоте определяют частоту колебаний контура. Изменение резонансной частоты упругого элемента, а следовательно, и контура под влиянием изменения давления есть мера измеряемого давления.

Для контроля и автоматизации технологических процессов в металлургической, нефтяной, нефтехимической, химической и других отраслях промышленности наряду с электрическими и электронными датчиками широкое распространение находят пневматические измерительные преобразователи абсолютного давления и перепада давления.

Наиболее широкое применение пневматические измерительные преобразователи нашли во взрыво- и пожароопасных производствах, где применение электрических приборов в обычном исполнении по требованиям техники безопасности недопустимо. Используют пневматические датчики, основанные на принципе силовой или частичной силовой компенсации, а также перемещения чувствительного элемента. Пневматические измерительные преобразователи выпускают с единым диапазоном выходного сигнала 20—100 кПа при давлении питания 140 кПа.

Пределы измерения пневматических измерительных преобразователей перепада давления находятся в диапазоне от 0— $2,1 \cdot 10^5$ до 0— 10^7 кПа, абсолютного давления от 0— $1,2 \cdot 10^4$ до 0— $7 \cdot 10^7$ кПа.

Точность измерения до $\pm 0,25$ %.

Измерительные преобразователи, основанные на принципе силовой компенсации, состоят в основном из трех блоков: измерительного узла, силового преобразователя и усилителя.

Принцип силовой компенсации заключается в том, что измеряемый параметр, воздействуя на чувствительный элемент измерительного блока, преобразуется в пропорциональное ему усилие, которое через рычажную систему силового преобразователя уравновешивается усилием элемента обратной связи. При изменении измеряемого параметра происходит незначительное перемещение рычажной системы и связанного с ней управляющего органа индикатора рассогласования. Последний преобразует перемещение в управляющий сигнал, который поступает на вход усилителя. Выходной сигнал усилителя подается в линию дистанционной передачи и одновременно в элемент обратной связи, где преобразуется в пропорциональное усилие. Мерой

измеряемого давления является величина выходного сигнала датчика, которая необходима для создания уравновешивающего усилия обратной связи.

Принцип частичной силовой компенсации отличается тем, что перемещающийся чувствительный элемент создает на дополнительном упругом элементе усилие, которое преобразуется в пневматический выходной сигнал с помощью преобразователя, работающего по принципу силовой компенсации. Таким образом, усилием обратной связи уравновешивается лишь часть усилия, развиваемого чувствительным элементом под действием измеряемого параметра.

Датчики с силовой компенсацией имеют высокую точность измерения за счет глубокой отрицательной обратной связи, охватывающей всю схему измерения, включая чувствительный элемент. Они обладают повышенной чувствительностью, возможностью охвата нескольких пределов измерения без замены деталей и узлов и высокой степенью конструктивной унификации.

Пневматические измерительные преобразователи, использующие преобразование перемещения чувствительного элемента, работают на принципе, когда измеряемый перепад давления, воздействуя на чувствительный элемент измерительного блока, вызывает перемещение связанного с ним управляющего органа (заслонки) относительно сопла.

Это приводит к изменению давления в линии сопла, а следовательно, и на выходе усилителя, управляемого этим давлением. Изменение давления на выходе усилителя вызывает перемещение элемента обратной связи и связанного с ним сопла до тех пор, пока не наступит положение равновесия. В качестве чувствительного элемента используют сильфонный элемент, обеспечивающий высокую точность преобразования разности давлений в перемещение.

7. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ И РАСХОДА

Измерение уровня. Разнообразие методов контроля уровня связано с различием контролируемых сред по физическим, химическим и электромагнитным свойствам, требований защиты от воздействия контролируемой и окружающей сред, условий эксплуатации, метрологических характеристик и т. д.

Наиболее распространены поплавковый, буйковый, емкостный и ультразвуковой методы контроля уровня, основные характеристики которых показаны в табл. 8.

Кондуктометрический и тензометрический методы используют преимущественно только для жидких сред.

Широкое применение приборов, основанных на поплавковом методе, обус-

8. Основные технические характеристики методов, применяемых для контроля уровня

Параметр	Методы измерения			
	поплавковый	буйковый	емкостный	ультразвуковой
Погрешность	0,2 мм	0,5 %	1,0 %	0,5 %
Диапазон измерения, м	50	20	45	50
Температура контролируемой среды, °С	-130 ÷ +450	-210 ÷ +450	-60 ÷ +280 (по заказу 600)	-210 ÷ +250
Давление контролируемой среды, кПа	$2,1 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$ (по заказу $5 \cdot 10^4$)	$5 \cdot 10^3$ (по заказу $3 \cdot 10^4$)	105
Температура окружающего воздуха, °С	-20 ÷ +70	-60 ÷ +80	-40 ÷ +70	-50 ÷ +70

ловлено, в первую очередь, простотой их конструкции и настройки.

Наиболее часто поплавковый метод используют для измерения уровня жидкости в больших открытых резервуарах, а также в закрытых резервуарах с низким давлением.

Из множества поплавковых уровнемеров в промышленности применяют в основном уровнемеры с механической связью поплавка с измерительной схемой, причем связь может быть как гибкой (нить, трос, лента), так и жесткой (рычаг, рейка).

Высокая точность поплавкового метода объясняется малой зависимостью погрешности от диапазона измерения. Так, поплавковый уровнемер с мерной лентой позволяет достичь точности измерения порядка ± 1 мм в диапазоне измерения 15—20 м и до десятых долей миллиметра (0,2 мм) в диапазоне до 30 м.

Одним из способов построения поплавкового уровнемера с гибкой связью, обеспечивающего герметичность сосуда, является замена жесткого соединения гибкого элемента с поплавком магнитной связью.

Известны сигнализаторы и регуляторы уровня, чувствительным элементом в которых служит свободный поплавок с расположенным на нем возбуждающим элементом — магнитом. Первичный преобразователь выполняется в виде герметизированной трубы, внутри которой устанавливается измерительное устройство для контроля положения поплавка. Труба служит направляющей поплавка. Силовые линии магнита, встроенного в поплавок, замыкают или размыкают герконы при перемещении перед ними магнита вверх или вниз.

Применение магнитной связи, позволяющей герметизировать вывод движущегося элемента из резервуара, упростить конструкцию, повысить надежность, измерять уровень в резервуарах под давлением, является перспективным направлением развития поплавкового метода измерения уровня.

Буйковый метод также отличается простотой и широко применяется для измерения уровня жидких и сыпучих сред.

Принцип действия буйковых приборов основан на измерении выталкивающей силы, действующей на боек, погруженный в контролируемую жидкость.

Буйковый метод является одним из наиболее часто применяемых для измерения уровня однородных, в том числе агрессивных жидкостей, находящихся при сравнительно больших статических давлениях (до $2,5 \cdot 10^4$ кПа) и высоких температурах (от -200 до $+400$ °С), так как чувствительный элемент буйковых приборов не совершает больших перемещений. Главной особенностью буйкового метода является возможность измерения уровня границы раздела двух жидкостей.

Многие буйковые приборы построены на принципе силовой компенсации, что обеспечивает высокую точность и большую надежность. По этому принципу работает пневматический уровнемер, в котором передаточным звеном между давлением и внешней атмосферой служит торсионная трубка.

Дальнейшее совершенствование буйковых приборов идет в основном за счет применения тензометрических преобразователей «сила — сигнал», которые в сочетании с гидростатическими чувствительными элементами позволяют улучшить метрологические характеристики, упростить конструкцию, снизить габариты и повысить надежность приборов.

Наиболее перспективным среди электрических методов контроля уровня жидких и сыпучих сред является емкостный метод, который основан на использовании зависимости электрической емкости датчика, установленного в сосуде, от величины контролируемого уровня. Достоинством устройств, основанных на емкостном методе, являются: простота конструкции измерительного прибора и отсутствие движущихся частей в датчике, возможность изменения уровня в сосудах под давлением, вакуумом и при высоких и низких температурах.

Основным направлением развития и совершенствования емкостного метода явилось создание новых типов уровнемеров с автоматической коррекцией погрешности от изменения диэлектрической проницаемости ϵ контролируе-

мой среды. Применение компенсационного метода позволило расширить эксплуатационные возможности емкостных приборов и повысить их класс точности.

Другим направлением является развитие емкостно-импульсного метода контроля уровня, который обеспечивает преобразование электрической емкости первичного преобразователя в электрические импульсы, следующие с определенной частотой и длительностью, в соответствии с величиной измеряемого уровня. Он позволяет создать высокоточные и высоконадежные уровнемеры с большим техническим ресурсом для контроля уровня различных жидкостей, в том числе криогенных.

К волновым методам контроля относятся ультразвуковой, резонансный, радиоинтерференционный, радиолокационный и радиоизотопный методы.

Ультразвуковой метод является самым распространенным в группе волновых методов контроля уровня. Он основан на различии акустического сопротивления сред, т. е. произведения плотности среды на скорость распространения в ней ультразвука.

Вследствие свойства адеструктивности, т. е. возможности передавать и принимать ультразвуковые колебания через металлические стенки резервуара, этот метод позволяет создавать цельносварную конструкцию измерительного элемента, чем обеспечиваются герметичность и высокая надежность метода и прибора.

В ультразвуковых уровнемерах используется метод локации ультразвукового импульса (свойство ультразвуковых колебаний отражаться от границы раздела двух сред) через жидкость или через газ. Мерой уровня служит время распространения импульса до границы раздела фаз и обратно.

Перспективно использование способа сигнализации об уровне жидкости с помощью волн Лэмба, возбуждаемых в стенке резервуара по горизонтали в контролируемой области.

Для увеличения чувствительности приборов целесообразно возбуждать в твердом теле поверхностные волны (волны Рэлея), так как им свойственно небольшое взаимодействие с окружающей средой, потому что вся их энер-

гия колебаний сосредоточена в поверхностном слое. Используя свойство поверхностных колебаний распространяться по криволинейным поверхностям, а также отражаться от двугранного угла, можно выполнять разнообразные конструкции волноводов в зависимости от конфигурации контролируемых объектов, требований к точности приборов контроля уровня и т. п.

Высокочастотный резонансный метод является одним из перспективных в группе радиоволновых методов измерения уровня. Он разработан для решения задач дискретного и непрерывного измерения различных сред и для определения границы раздела различных жидких сред.

Существующие резонансные измерители и сигнализаторы позволяют контролировать уровень сред с произвольными электромагнитными свойствами; при этом погрешность составляет не более 1 %.

В качестве чувствительных элементов в резонансных уровнемерах используют отрезки однородных и неоднородных длинных линий, емкостные и индуктивные датчики, включенные в колебательный контур, а также в ряде случаев объемные резонаторы. Наиболее высокоточными и перспективными из резонансных уровнемеров, с точки зрения их применения, являются высокочастотные резонансные уровнемеры с датчиками в виде отрезков однородной или неоднородной длинной линии.

В резонансных уровнемерах с емкостными и индуктивными датчиками при изменении уровня емкость или индуктивность датчика изменяются, перестраивая резонансную частоту контура генератора. Таким образом, по резонансной частоте контура определяют высоту уровня в датчике.

Для расширения области применения резонансного метода измерения и распространения его на среды с малой удельной электропроводностью предложены так называемые резонансные системы, в которых внутренний электрод покрыт изолирующей оболочкой, что позволяет измерять уровень сред с любыми электромагнитными свойствами. Систему можно также применять для контроля уровня раздела

двух сред, из которых верхняя — диэлектрик, а нижняя — проводник.

Известен волновой метод измерения уровня как электропроводящих, так и диэлектрических сред. Особенностью этого метода является то, что с контролируемой средой взаимодействует энергия высоких частот (до 30 МГц), которая передается от генератора в объект контроля и выводится наружу через немагнитные металлические стенки, не нарушая цельнометаллической структуры объекта.

Применение радиолокации при измерении уровня жидкости основано на явлении отражения электромагнитных волн от границы раздела двух сред, отличающихся различными скоростями распространения в них электромагнитных волн.

Локация через газ предпочтительней, так как диэлектрические проницаемости всех газов незначительно отличаются друг от друга, что делает показания уровнемера практически независимыми от свойств жидкости. Радиолокационные уровнемеры применяют для сравнительно больших диапазонов изменения уровня.

В последние годы применяют лазерные уровнемеры, обладающие большой чувствительностью (0,0001 %) к малейшим изменениям уровня жидкости и имеющие высокую точность.

Измерение расхода. Для измерения расхода применяют расходомеры переменного перепада давления (дифманометры-расходомеры), ротаметры, крыльчаточахметрические турбинные расходомеры и счетчики объемного типа.

Как основное общепромышленное средство измерения расхода однофазных сред — жидкостей, газов и паров — наибольшее распространение получили дифманометры-расходомеры, работающие по принципу измерения перепада давления, создаваемого в зависимости от расхода жидкости, газа или пара с помощью сужающего устройства, трубного сопротивления, напорного устройства или напорного усилителя. В качестве измерительного прибора используется дифманометр, градуированный в единицах расхода.

Для измерения расхода различных агрессивных сред применяют ротаметр,

являющийся основным представителем обширного класса расходомеров системы обтекания. Конструктивно он состоит из расширяющейся конической трубки и заключенного в ней поплавка. С изменением расхода потока поплавок перемещается, что служит мерой величины расхода, которая измеряется с помощью магнитного или индуктивного преобразователя положения поплавка в электрический сигнал.

Среди множества типов измерителей расхода жидкостей и газов наиболее полно отвечают современным требованиям эксплуатации скоростные турбинные расходомеры и измерители количества (счетчики), имеющие существенные преимущества перед другими приборами аналогичного назначения.

Обобщенные данные по расходомерам турбинного типа приведены в табл. 9.

В турбинных расходомерах в качестве чувствительного элемента первичного преобразователя расхода применяют крыльчатки аксиального или тангенциального типа.

Конструктивная схема турбинного расходомера следующая. В корпусе по пути движения потока измеряемой среды последовательно расположены передний струевыпрямляющий аппарат, крыльчатка (винтовая или прямолопастная) и задний (выходной) выпрямляющий аппарат. На корпусе с внешней стороны устанавливается тахометрический индукционный (индуктивный) преобразователь оборотов крыльчатки в электрический импульсный сигнал.

Принцип действия прибора заключается в том, что при взаимодействии проходящего через прибор потока с крыльчаткой последняя вращается со скоростью, пропорциональной скорости (объемному расходу) протекающего вещества.

Измерение количества жидкости осуществляют прямым и косвенным методами. К средствам прямого измерения относят приборы, основанные на методах непосредственного сравнения прошедшего через прибор количества жидкости с объемом мерного устройства этого прибора.

К средствам косвенного измерения относят приборы, основанные на мето-

9. Основные характеристики газовых и жидкостных турбинных расходомеров и счетчиков

Показатели	Для жидкостей	Для газов
Пределы измерения, м ³ /ч	0,1—4000	40—30 000
Диаметр условного прохода, мм	6—500	32—500 («погруженные» — диаметры более 500)
Класс точности	1,5—0,5	2—2,5 ÷ 1
Температура среды, °С	0—150 (специсполнение — 260 ÷ +370)	0—100 (специсполнение — 20 ÷ +350)
Давление, МПа	До 20	До 8
Измеряемые среды	Чистые жидкости и газы (специсполнение — сырая нефть, дымовые газы с пылью и т. п.)	

дах измерения косвенных величин, связанных с измеряемым количеством веществ известной функциональной зависимостью.

В диапазоне расходов от $0,003 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$) до $320 \text{ м}^3/\text{ч}$ наибольшее распространение в практике автоматического контроля протекающего количества вещества получили объемные счетчики с кольцевым поршнем, овально-шестеренные и лопастные.

Принцип действия различных типов объемных счетчиков идентичен и заключается в том, что определенная доза поступившей в измерительную камеру жидкости отсекается чувствительным элементом прибора и выталкивается им в выходную часть прибора. Число доз суммируется.

Счетчики конструктивно состоят из следующих функциональных узлов: первичного измерительного преобразователя объемного количества (расхода), чувствительного элемента и механизма счетного указателя, связанного с чувствительным элементом измерителя с помощью жесткого или магнитного вала.

В лопастных счетчиках в качестве чувствительного элемента используют обычно четыре лопасти, вращающиеся вокруг кулачка со специальным профилем за счет действия на лопасть перепада давления до и после прибора. При вращении лопасти поочередно захватывают во входной полости из-

мерительной камеры калиброванные объемы и перемещают их в выходную; при этом в соответствии с профилем кулачка лопасти выдвигаются или вдвигаются в направляющие пазы.

Наиболее многочисленную группу среди объемных счетчиков составляют счетчики с овальными шестернями, в которых в качестве чувствительного элемента используется пара овальных шестерен, постоянно находящихся в зацеплении и вращающихся под действием на них разности давлений.

К приборам, принцип действия которых основан на новых физических методах, следует отнести электромагнитные, ультразвуковые, ядерно-магнитные, лазерные, вихревые, корреляционные расходомеры и др.

С помощью электромагнитных расходомеров измеряют расход щелочей, кислот, растворов солей, различных вязких веществ, суспензий, пульп, бумажной массы, цементных шламов и т. д.

Измерение объемного расхода жидкости электромагнитными расходомерами осуществляется путем прямого преобразования скорости потока в электрический сигнал. В электропроводящей жидкости, пересекающей магнитное поле преобразователя расхода, индуцируется ЭДС, величина которой не зависит от параметров контролируемой жидкости (вязкости, температуры, химического состава, плотности) при весьма широких пределах их измере-

10. Технические характеристики газовых расходомеров различных принципов действия

Расходомеры	Погрешность измерения, %	Диапазон измерения	Измерение расходов		Рабочее положение	Постоянная времени
			больших	малых		
Дифманометрические	2—2,5	1 3; 1 5	Обеспечивается	Не обеспечивается	Любое	0,1—1
Ротаметры	2,5—4	1 10	Не обеспечивается	Обеспечивается	Вертикальное	1—3
Турбинные	0,5—1	1 10; 1 30	Обеспечивается	Не обеспечивается	Любое (предпочтительно горизонтальное)	0,05—0,001
Вихревые	0,5—1	1 10; 1 : 50	То же	То же	Любое	—
Тепловые	1—2	—	Не обеспечивается	Обеспечивается	Любое (предпочтительно горизонтальное)	От 30 с до нескольких минут

ния и пропорциональна средней скорости жидкости или расходу. ЭДС вызывает на введенных в трубу преобразователя электродах напряжение, являющееся мерой расхода жидкости.

В большинстве электромагнитных расходомеров для измерения ионных жидкостей применяют переменное магнитное поле. Электромагнитные расходомеры могут использоваться в очень большом диапазоне скоростей измеряемой среды — от 1 см/с до десятков метров в секунду. Они широко применяются в атомной промышленности для измерения расхода теплоносителей атомных реакторов и, кроме того, в химической и металлургической промышленности.

Технические характеристики газовых расходомеров различных принципов действия представлены в табл. 10.

Среди многочисленных типов измерителей расхода и количества газов скоростные турбинные расходомеры и объемные ротационные счетчики находят наибольшее применение.

Принцип действия турбинного расходомера состоит в преобразовании в датчике расхода скорости газа в скорость вращения чувствительного эле-

мента (крыльчатки, турбинки) с последующим преобразованием частоты его оборотов в частоту следования электрических импульсов, суммирования (для счетчика) или преобразования их в аналоговый сигнал (для расходомера).

Основными достоинствами турбинных расходомеров являются высокая точность измерения (до $\pm 0,5\%$ и выше) и повторяемость показаний ($0,1-0,2\%$), широкий диапазон измерения (1 : 10 и более), возможность измерения практически при любых давлениях различных по агрессивности газов.

Газовые турбинные расходомеры могут измерять расходы 10—420 000 м³/ч с диаметрами условного прохода 10—300 мм и с погрешностью не более $\pm 1\%$.

Вихревые расходомеры развиваются по двум направлениям: используется процессия вихрей, возникающих при закручивании потока, когда движение вихрей по винтообразной траектории с постоянным шагом контролируется подогреваемым термоэлементом, генерирующим один импульс при проходе каждого вихря; принцип действия вих-

ревых расходомеров, получивших наибольшее распространение, основан на контроле частоты следования вихрей, возникающих с двух сторон тела, помещенного в поток.

В зависимости от способа формирования вихрей и измеряемых параметров вихревые расходомеры делят на три группы: с образованием поступательно-вращательного потока и измерением его параметров; с обтеканием потока неподвижного тела и измерением при этом частоты пульсации давления потока за этими телами; с образованием колеблющейся струи и измерением при этом частоты пульсации вихрей.

Приборы первой группы применяют для измерения средних величин расходов; второй — для больших расходов газов и в трубах больших диаметров, а также для измерения скоростей потоков в точке обтекания; третьей — для жидкостей и газов в области малых расходов.

В вихревых расходомерах с телом обтекания для образования вихрей в поток устанавливаются плохо обтекаемые тела различных форм: цилиндр, призмы треугольного, трапециoidalного и Т-образного сечения, кольцо, пластина, струна.

Тепловые расходомеры основаны на принципе нагрева потока газа или жидкости посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и расхода тепла в нагревателе.

8. ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ

Испытательная техника. Современные машины, агрегаты и приборы эксплуатируют в сложных условиях, характеризующихся большим диапазоном режимов нагрузок, температуры, давления, уровней радиации, непрерывным ростом скоростей и длительности эксплуатации. Задача испытательной техники заключается в том, чтобы максимально приблизить условия испытаний изделий и материалов к экстремальным условиям их эксплуатации и количественно определить изменение в этих условиях их механических свойств.

Основные параметры, характеризующие механические свойства материалов, — прочность, пластичность, твердость, ударная вязкость и выносливость. Прочность металлов и сплавов оценивают по следующим характеристикам.

Физический предел упругости σ_x — максимальное напряжение, до которого металл деформируется упруго без остаточных деформаций.

Условный предел упругости $\sigma_{\text{усл}}$ — максимальное напряжение, при котором в металле появляются остаточные деформации наперед заданной величины.

Физический предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ — максимальное напряжение, до которого между напряжениями и деформациями в металле сохраняется прямая зависимость.

Условный предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц. усл}}$ — максимальное напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости деформаций от напряжений соответствует наперед заданной величине.

Физический предел текучести σ_T — максимальное напряжение, при котором металл пластически деформируется без увеличения напряжений.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ — максимальное напряжение, при котором остаточная деформация металла достигает наперед заданной величины (обычно 0,2 %).

Предел прочности σ_B (или временное сопротивление) — напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, выдерживаемой образцом.

Сопротивление разрушению S_R (или истинное сопротивление разрыву) — напряжение, действующее в образце в момент его разрушения.

Свойство металлов и сплавов пластически деформироваться принято оценивать относительным удлинением δ (%) и относительным сужением ψ (%) после разрыва. Под относительным удлинением понимают абсолютное увеличение длины образца после разрыва, отнесенное к его первоначальной длине. Под относительным сужением — абсолютное уменьшение площади поперечного сечения образца после разрыва, отнесенное к его первоначальной площади.

Твердость металлов и сплавов — мера сопротивления их пластической деформации.

Ударная вязкость характеризует динамическую прочность металлов и сплавов, т. е. их способность сопротивляться разрушению при динамическом приложении нагрузок.

Выносливость материала — способность сопротивления действию циклических нагрузок. Она характеризуется пределом выносливости, под которым понимается наибольшее напряжение, которое может выдерживать материал без разрушения заданное число циклов нагружения.

Наиболее распространенный метод измерения механических свойств материалов — испытания на растяжение при одноосном нагружении, когда растягивающая нагрузка (до 10^8 Н и более) равномерно распределена по всему поперечному сечению образца.

Испытания, при которых изучают поведение материала при одноосном сжатии, можно рассматривать как обратные испытания на растяжение.

Машины для испытаний на растяжение-сжатие разделяют по назначению на машины широкого применения, специализированные и целевые. Конструкция их позволяет реализовать разнообразные режимы испытаний и испытывать образцы различных конфигураций, размера, разных материалов при расширении рабочего диапазона силовых, частотных и деформационных параметров.

Испытания образцов для определения прочностных характеристик материалов обычно проводят в одном из двух режимов — эластичного или жесткого нагружений.

Первый режим характеризуется заданной скоростью возрастания нагружающей силы, а второй — заданной скоростью деформирования испытуемого образца. В обоих случаях в элементах испытательной машины (колоннах, траверсах, рамах) вследствие их упругой деформации накапливается потенциальная энергия, которая при достижении материалом образца предела текучести приводит к нарушению режима испытаний и быстрому разрушению образца.

Машины для испытания на растяжение-сжатие с гидравлическим приводом охватывают наиболее широкую область испытаний при длительном, статическом, циклическом, динамическом (скоростном) приложении нагрузок. Диапазоны значения последних распространяются от десятков ньютонов до ста миллионов ньютонов. Предельная частота (Гц) приложения переменных нагрузок: 150—200 — для машин малых мощностей; 5—20 — для машин больших и средних мощностей. Максимальные перемещения активного захвата 2 м; максимальные скорости перемещений 10 м/с. Реализуемые в процессе испытания мощности достигают 5 МВт.

Машины для испытания на кручение выпускают как с маятниковыми, так и с электронными (малоинерционными) моментоизмерителями.

Для стандартных испытаний строительных материалов на изгиб применяют изгибные прессы, которые снабжают приспособлениями для испытаний на трех- и четырехточечный изгиб, плитами для испытаний на сжатие, устройствами для испытаний на растяжение и т. п.

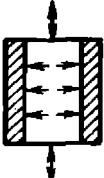
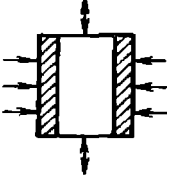
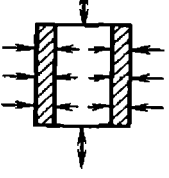
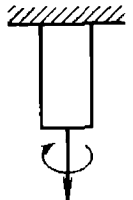
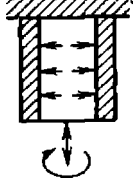
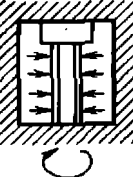
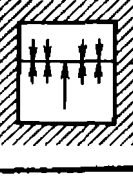
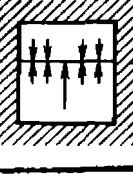
На практике обычно имеют дело со сложным нагружением, при котором на изделие воздействует комплекс механических нагрузок — статических и динамических. Характер, величина, направление и распределение усилий, напряжений и других факторов могут изменяться во времени. Испытательное оборудование разделяют по виду создаваемого напряженно-деформированного состояния в соответствии со схемами неодноосного нагружения, представленными в табл. 11.

Сложность процессов, происходящих при контактных взаимодействиях твердых тел в условиях внешнего трения и приводящих к разрушению поверхности трения, привела к созданию обширного класса специализированных устройств измерения.


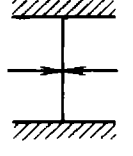
Средства испытаний материалов на трение и износ разделяют на группы лабораторных машин и специализированных стендов для испытания узлов трения.

Типоразмер машин зависит от нагрузки на образец в диапазоне 0—

11. Схемы создания неодноосного нагружения в испытательных установках

Схема	Условия нагружения
	Осевое нагружение + давление (ОНД) Внутреннее давление + осевое нагружение
	Внешнее давление + осевое нагружение
	Внутреннее и внешнее давление + осевое нагружение
	Осевое нагружение + кручение (ОНК)
	Осевое нагружение + кручение + давление (ОНКД)
	Внутреннее давление + кручение + осевое нагружение
<i>Специальные виды испытаний</i>	
	Кручение в камере высокого давления
	Изгиб в камере высокого давления

Продолжение табл. 11

Схема	Условия нагружения
	Нагружение свободной круглой пластины в центре
	Изгиб пластин сосредоточенной силой

5000 Н и скорости относительного движения образца и контртела в пределах 0—200 м/с.

Конкретные модели машин могут иметь комплекс устройств, предназначенных для осуществления различных видов контакта (сменные зажимы), создания дополнительных движений образца или контртела (удар, вибрация), для температурных испытаний (термо- и криокамеры); для испытания в различных средах (вакуум, масло, абразив); для измерения и регистрации параметров испытаний (сила трения, температура, износ), для автоматизации испытаний.

Твердость измеряют условно двумя методами: динамическим — нанесением царапины на поверхность испытуемого тела; статическим — образованием вмятины на поверхности тела.

Наибольшее распространение в настоящее время получили статические методы. Классификация методов определения твердости показана на рис. 15.

Сущность метода Бринелля состоит в том, что шарик определенного диаметра в течение установленного времени вдавливаются с определенной силой в испытуемый образец. После удаления нагрузки измеряется диаметр отпечатка, оставшийся на поверхности образца.

Одним из наиболее распространенных методов технологического контроля твердости металлических деталей является метод Роквелла.

Твердость по Роквеллу (HR), выражаемая в условных единицах, вычисляют как условную линейную функцию разности глубин, на которые вдавли-

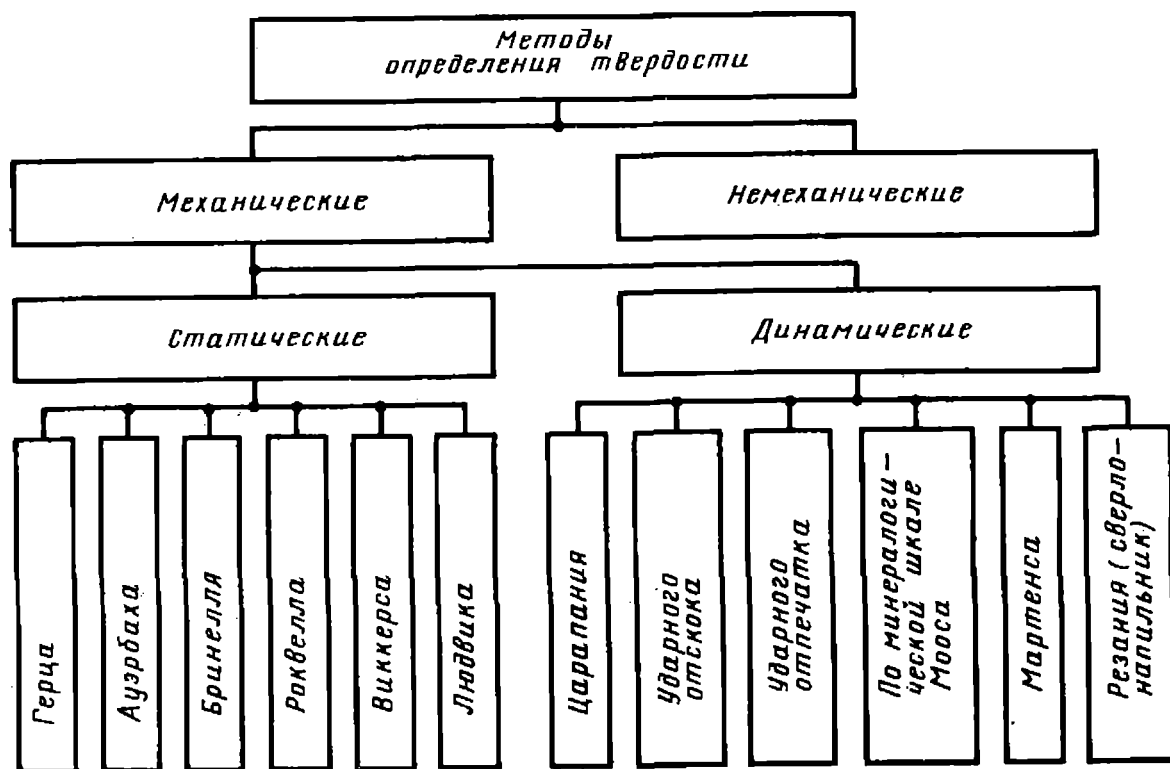


Рис. 15. Классификация методов определения твердости

вается наконечник под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной P_0 и общей P , которая равна сумме предварительной и основной P_1 нагрузок.

Если невозможно выдержать восьмикратный запас по толщине или контролируемая поверхность слишком мала, применяют метод Роквелла при малых нагрузках (супер-Роквелла).

Твердость по методу Виккерса измеряют так же, как и по методу Бринелля. Различие заключается в том, что шарик заменяют алмазной пирамидой.

Вместе со статическими методами измерения твердости в промышленности применяют и динамические методы, когда индентор воздействует на испытуемую поверхность, падая с определенной высоты или под действием ударной нагрузки. Различают методы упругого отскока (упругодинамический метод) и ударного отпечатка (пластико-динамический метод). Кроме этих методов применяют еще маятниковые методы (Менделеева, Ребиндера, Кузнецова), метод резания и др. Наибольшее распространение получили два первых метода.

Так как эти методы по сравнению со статическими менее точны, то их в ос-

новном применяют для определения сравнительной твердости, при предварительной сортировке материалов, для определения равномерности по твердости. Наибольшее распространение получил метод упругого отскока бойка по Шору.

Измерение сил, деформаций и перемещений. Большинство силоизмерительных устройств состоит из силовоспринимающей и измерительной части. Силовоспринимающая часть содержит элементы для восприятия реакций механической системы и передачи измеряемой силы на динамометр — основной элемент измерительной части, содержащей датчик силы, преобразующие, измерительные и регистрирующие блоки. В месте установки датчика возникает сила, противодействующая измеряемой, — сила реакции датчика.

По способу создания реакции выделяют датчики трех типов:

с электрически неактивным упругим элементом, у которого реакция создается в результате деформации упругого электрически неактивного элемента. — датчик раздельного преобразования;

с электрически активным упругим элементом, у которого реакция соз-

дается деформацией упругого электрически активного элемента, — датчик совмещенного преобразования;

с силовым уравновешиванием, у которого реакция создается силовозбуждающим устройством механическим или электромеханическим путем.

Наиболее распространенными являются датчики силы первого типа, у которых процессы деформирования и преобразования происходят в различных элементах. К ним относят датчики с механическими, тензорезисторными, индуктивными или емкостными преобразователями деформации в электрический сигнал.

Датчиками совмещенного преобразования являются угольные, пьезоэлектрические и магнитоанизотропные датчики.

К датчикам третьего типа относят датчики с электродинамическим уравновешивающим силовозбуждающим устройством. Датчики этого типа нашли применение преимущественно при измерении малых сил.

В табл. 12 приведены основные типы датчиков силы и их основные достижимые параметры. Из таблицы видно, что наиболее точными являются виброчастотные датчики с электромеханическими резонаторами — струнные и вибростержневые, и тензорезисторные с металлическими преобразователями, которые являются наиболее распространенными. Преимущества магнитоупругих силоизмерителей — их простота, дешевизна, надежность в эксплуатации. Пьезоэлектрические и емкостные датчики силы применяют в основном в лабораторной практике для динамических измерений силы.

Датчики силы со струнными преобразователями используют частотные методы измерения. Существенным преимуществом этих датчиков является высокая помехоустойчивость при передаче информации по каналам связи.

Датчики силы с компенсационными преобразователями или с силовым уравновешиванием применяют в основном в аналитических весах.

Принцип действия этих датчиков состоит в том, что измеряемая сила воздействует на силовводящий элемент (рычаг, коромысло и т. д.), связанный с преобразователем, реагирую-

щим на измерительный ход появлением сигнала, который затем усиливается и вводится в обратный преобразователь — силовой компенсатор, создающий нужную противодействующую силу для уравновешивания силовводящего элемента. Электрический параметр (напряжение или сила тока), преобразуемый силовым компенсатором, служит мерой измеряемой силы.

Механические, механогидравлические и гидравлические силоизмерительные устройства являются наиболее надежными средствами метрологического обеспечения испытательной техники. В них действующее на изделие усилие сопоставляется через систему передач с гравитационной или упругой силой. Система сравнения включает следующие функциональные элементы: датчик силы, действующей на изделие, передаточную систему, элемент сравнения и регистрирующее устройство. По типу конструкции, используемой для восприятия силы, различают датчики гравитационные, механические и гидравлические.

Гравитационные датчики используют в испытательных машинах с непосредственным приложением к образцу грузов, значения которых определяют действующую на образец силу.

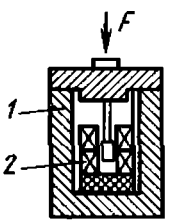
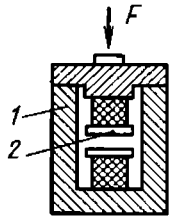
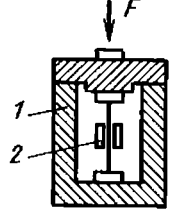
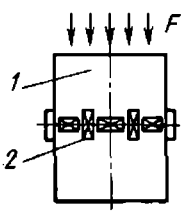
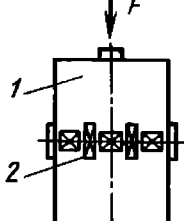
Механические датчики обычно используют в сочетании с рычажно-весовыми, рычажно-коромысловыми и рычажно-маятниковыми измерительными устройствами.

Гидравлическим датчиком силы служит упругий объем сжатой жидкости, заключенной в специальных камерах.

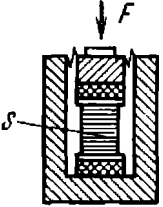
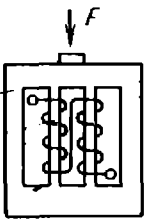
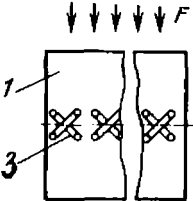
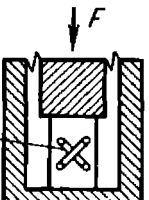
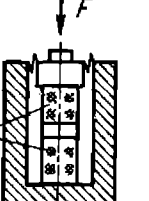
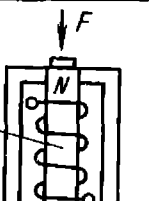
При измерении напряженно-деформированных состояний деталей и агрегатов при их эксплуатации используют ряд методов тензометрии, в основу которых положены различные физические принципы измерений. Существуют рентгеновские методы, методы фотоупругости, муаровых полос, хрупких покрытий, гальванических покрытий и методы с использованием тензометрических преобразователей (рис. 16).

Сущность рентгеновского метода измерения основана на явлении интерференции рентгеновских лучей, проходящих через кристаллическую решетку исследуемого материала.

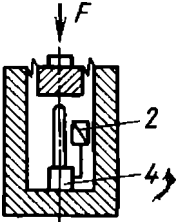
12. Основные типы и параметры датчиков силы

Структурная схема	Датчик	Диапазон измеряемых сил, кН	Деформация упругого элемента, мм	Достижимый класс точности в диапазоне температур от -10 до 40 °С
<i>Параметрический с отдельным преобразованием</i>				
	Индуктивный	$10^{-5} - 10^4$	0,05—0,5	0,1—1
	Емкостный			0,25—1
	Виброчастотный	$0,1 - 5 \cdot 10^3$	0,1—0,25	0,01—0,25
	Тензометрический. Металлические тензорезисторы	—	0,05—0,3	0,25—0,6
	Тензометрический. Полупроводниковые тензорезисторы	$10^2 - 5 \cdot 10^4$	0,02—0,1	0,4—1
	Тензометрический. Металлические тензорезисторы		0,05—0,5	0,01—0,06
	Тензометрический. Полупроводниковые тензорезисторы	$0,1 - 5 \cdot 10^3$	0,02—0,2	0,1—0,25

Продолжение табл. 12

Структурная схема	Датчик	Диапазон измеряемых сил, кН	Деформация упругого элемента, мм	Достижимый класс точности в диапазоне температур от -10 до 40 °С
<i>Параметрический с совмещенным преобразованием</i>				
	Резистивный с угольным столбиком	$10^{-3}-10^4$	0,05—0,2	10
	Магнитоупругий. Изменение проницаемости	$1-5 \cdot 10^3$	0,02—0,2	1—2,5
	Магнитоупругий. Анизотропные	$0,5-5 \cdot 10^4$	0,02—0,3	0,4—2,5
	Пьезоэлектрический	$1-5 \cdot 10^2$	0,03—0,5	0,1—0,6
<i>Генераторный с совмещенным преобразованием</i>				
	Пьезоэлектрический	$1-5 \cdot 10^2$	0,005—0,05	1,0
	Магнитоупругий	$1-10^2$	0,005—0,05	2,5—10

Продолжение табл. 12

Структурная схема	Датчик	Диапазон измеряемых сил, кН	Деформация упругого элемента, мм	Достижимый класс точности в диапазоне температур от -10 до 40 °С
	Компенсационный Силовое уравнивание	10^{-7} — 10^{-2}	0,1—1,0	0,025—0,06

Примечания: 1. Верхний предел рабочей частоты датчиков всех типов с максимально допустимой для них присоединенной массой не превышает 20—50 Гц.

2. Нижний предел рабочей частоты пьезоэлектрических датчиков генераторного типа с совмещенным преобразованием 10^{-3} Гц, магнитоупругих 1—10 Гц.

3. На структурных схемах в таблице обозначено: 1 — упругий элемент датчика; 2 — преобразователь деформации упругого элемента в электрический сигнал; 3 — упругий и чувствительный элементы датчика; 4 — силовозбудитель.

В основу метода хрупких покрытий положен эффект образования трещин под действием приложенных нагрузок. Покрытия предварительно наносят на объект исследования, и после высыхания в этом покрытии образуются остаточные напряжения, которые и способствуют, даже при незначительных деформациях, образованию трещин.

Метод гальванических покрытий основан на образовании темных пятен на медном гальваническом покрытии, нанесенном на исследуемый объект. При известном числе циклов нагружения, модуле упругости материала объекта и химическом составе гальванического покрытия определяют минимальное значение напряжения, при

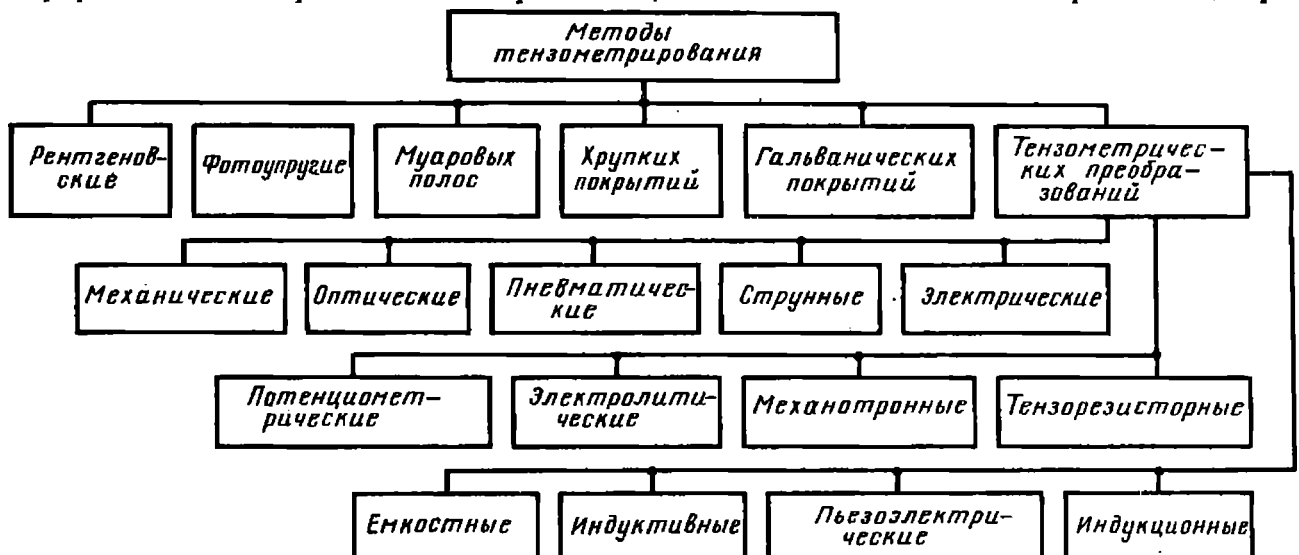


Рис. 16. Классификация методов тензометрирования

котором появляются темные пятна на гальваническом покрытии.

Метод фотоупругости основан на использовании явления двойного лучепреломления у прозрачных материалов под действием механических напряжений. При этом величина двойного лучепреломления пропорциональна значениям деформации объекта, которая определяется порядком интерференционных полос при просвечивании материала поляризованным светом.

В основе метода муаровых полос лежит муаровый эффект, суть которого заключается в появлении чередующихся темных и светлых полос при наложении одной на другую двух или более растровых сеток. Шаг муаровых полос определяется параметрами исходных растров и условиями их освещения. Одни из растров наносят на испытуемый объект и деформируют вместе с ним. Муаровая картина несет информацию о характере деформирования раstra и деформированного состояния образца. При незначительных относительных деформациях, линейных и угловых перемещениях сеток наблюдаются большие изменения шага, направления и положения возникающих муаровых полос.

При измерении полей деформаций с помощью метода оптически активных (фотоупругих) покрытий приборы, используемые для измерения разности хода лучей в покрытии (т. е. для измерения разности главных деформаций и для определения направлений главных осей), называют полярископами одностороннего действия.

Для измерения полей малых перемещений точек поверхности материалов и элементов конструкций эффективно применяют метод голографической интерферометрии, основанный на использовании когерентных источников света.

Установки указанных типов со сложными системами антивибрационной изоляции позволяют вести исследования объектов как в проходящем, так и в отраженном свете; они оснащены оптическими компонентами, необходимыми для проведения голографических исследований.

Применение голографии с импульсным лазером с весьма малой длитель-

ностью импульса (20—30 нс) позволяет устранить влияние вибрации как при голографии с помощью одиночного импульса, так и при работе по схеме с двумя экспозициями.

Для измерения напряжений наибольшее распространение получили тензометры, основанные на использовании тензометрических преобразователей: механические, оптические, пневматические, струнные (акустические) и электрические.

Действие механических тензометров основано на масштабном преобразовании деформаций с помощью механической передачи до величины, удобной для регистрации. Для этой цели используют рычажные и рычажно-зубчатые передачи.

В оптических тензометрах, применяемых для измерения сравнительно больших деформаций, используют оптический луч и фотоэлектрические датчики.

Действие пневматического тензометра основано на изменении расхода воздуха через измерительное сопло. Деформация поверхности исследуемого объекта воспринимается опорными призмами и через рычаг механической передачи изменяет величину сечения сопла.

В струнных (акустических) тензометрах используют изменение частоты собственных колебаний струны при деформации объекта.

Струна связана с объектом исследований, и при деформации объекта меняется величина напряжения струны. Измеряя частоту колебаний струны, можно судить о деформации объекта.

В основу работы электрических тензометров положен принцип измерения изменения параметров электрической цепи, например, сопротивления, индуктивности или емкости. Электрические тензометры делят на тензометры сопротивления, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические, индукционные.

Известен большой класс тензометров, действие которых основано на принципе изменения сопротивления металлов или полупроводников под действием деформаций. Чувствительными элементами таких тензометров являются тензорезисторы, которые обычно

наклеивают на упругие элементы, преобразующие измеряемую механическую величину в деформацию упругого элемента.

В практике измерений получили распространение проволочные фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

Для измерения больших перемещений, а также прогибов элементов машин и механизмов применяют электромеханические прогибомеры. Прогибомеры снабжают сменными упругими чувствительными элементами. С их помощью измеряют прогибы от 2,5 до 25,0 мм.

9. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ПЛОТНОСТИ

Измерение влажности. Влажность веществ является одним из важных диагностических показателей качества, поскольку стоимость, технологические и физические свойства веществ и материалов, способность их к хранению, производительность оборудования в большой степени зависят от влажности сырья и полуфабрикатов.

Многочисленные методы определения влажности жидких и твердых материалов (рис. 17) подразделяют на прямые, в основе которых лежит разделение исследуемого вещества или материала на влагу и сухой остаток, и косвенные, когда влажность вещества или материала измеряют по физическим свойствам или параметрам, функционально с ней связанным.

Среди прямых методов измерения влажности наиболее распространенными в различных отраслях промышленности является термогравиметрический метод — воздушнотепловое высушивание пробы исследуемого вещества или материала до постоянной массы. Точность его довольно высока, поэтому он используется для метрологического обеспечения новых разработок влагомеров.

В последнее время широкое распространение получили полуавтоматические и автоматические сушильные шкафы.

К прямым методам определения содержания влаги относят также дистилляционные методы. В основу их поло-

жено нагревание образца исследуемого вещества или материала в сосуде с жидкостью, которая не разлагается при нагревании и не смешивается с влагой образца. В качестве таких жидкостей используют обычно бензол, толуол, минеральные масла. Пары воды, выделяющиеся при нагревании, подвергаются отгонке и, проходя через холодильник, конденсируются в измерительном сосуде, где затем измеряется объем или масса влаги в образце.

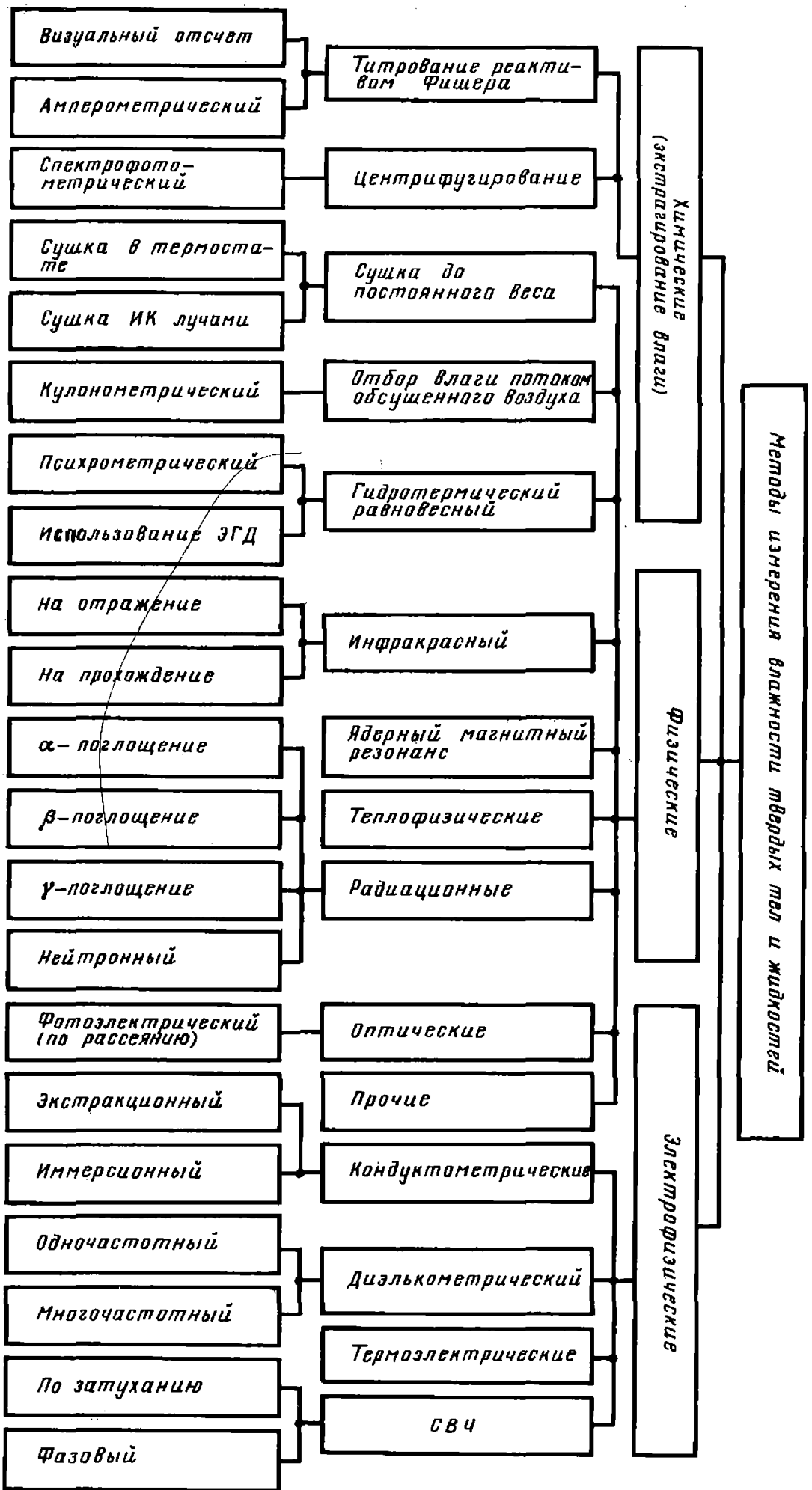
Экстракционные методы основаны на использовании реагентов, взаимодействующих с влагой, содержащейся в образце исследуемого вещества или материала. В качестве реагентов применяются водопоглощающие жидкости типа спирта или диоксана. После экстрагирования влаги образца определяют характеристики жидкого экстракта, зависящие от влагосодержания: диэлектрическую проницаемость (тангенс угла диэлектрических потерь), плотность, температуру кипения и т. п.

При химических методах измерения влажности образец исследуемого вещества обрабатывается реагентом, вступающим в химическую реакцию только с влагой, которая содержится в образцах. Количество влаги определяется по количеству жидкого и газообразного продукта реакции. На практике для предварительного (грубого) определения содержания влаги в веществе или материале используют карбид кальция. Давление газа, выделившегося в результате реакции материала образца и карбида кальция, измеряют манометром, проградуированным в процентах влажности. Погрешность измерения содержания влаги манометрическими карбидными влагомерами составляет около $\pm 1\%$.

Для точных (лабораторных) измерений применяют метод Фишера, в основу которого положена реакция реактива Фишера (раствор металлического йода, безводного пиридина и сухого сернистого ангидрида) с влагой образца исследуемого вещества или материала.

Все прямые методы определения содержания влаги требуют длительного времени измерения и достаточно громоздкого и сложного оборудования, однако эти методы обладают ма-

Рис. 17. Методы измерения влажности твердых материалов и жидкостей



лой погрешностью измерения, что обуславливает их применение в качестве лабораторных и образцовых влагомерных методов.

Известно, что содержание влаги в веществе определяет его физические свойства — тепловые, оптические, механические, электрофизические и т. д. Функциональная связь этих свойств с содержанием влаги служит основой построения различных типов влагомерных устройств, работающих по принципу косвенного определения влажности материалов и веществ.

Наиболее простыми из косвенных методов измерения влажности являются механические, основанные на изменении механических свойств исследуемых веществ и материалов, коэффициента трения, сопротивления резанию, сжатию, уплотнению, вдавливанию штампа и т. д. в зависимости от содержания влаги.

Пикнометрический метод определения влажности основан на зависимости плотности исследуемого вещества или материала от содержания влаги. Подобные влагомерные устройства работают по принципу непрерывного взвешивания вещества постоянного объема. Характерной их особенностью является постоянное сечение трубопровода первичного преобразователя, по которому с высокой скоростью движется исследуемое жидкое вещество или продукт. Пьезометрические влагомеры также используют зависимость между плотностью контролируемого вещества и его влажностью. Измерение производится путем сравнения гидростатических давлений исследуемого материала и воды.

В основе теплофизических методов лежит зависимость таких параметров, как теплопроводность, удельная теплоемкость, температуропроводность, от содержания влаги в исследуемых капиллярно-пористых веществах и материалах. Указанные параметры с увеличением содержания влаги монотонно и нелинейно увеличиваются, поэтому большинство теплофизических влагомеров используют зависимость динамических характеристик охлаждения или нагревания тел малой теплоемкости (например, плоской хромель-копелевой спирали) от содержания влаги

исследуемого вещества или материала, находящегося в тепловом контакте с данным телом.

Калориметрический метод применяется для измерения малых содержаний влаги (до 6%). Сущность его состоит в определении изменения температуры пробы исследуемого сыпучего вещества в процессе десорбции влаги в вакууме. Десорбция приводит к резкому понижению температуры вещества, причем градиент температуры, как показывают эксперименты, пропорционален начальному влагосодержанию.

Калориметрический метод позволяет определять содержание влаги в многокомпонентных жидких системах по температурному скачку, имеющему место при кристаллизации компонентов смеси. Понижение температуры смеси достигается за счет тепловых эффектов десорбции в вакууме.

Высокая чувствительность термовакуумного метода объясняется тем, что процессы фазового перехода веществ сопровождаются значительным выделением или поглощением тепла. Удельное количество теплоты испарения воды, например, составляет около 2400 кДж/кг.

Термографический метод определения содержания влаги движущихся сыпучих материалов основан на измерении количества теплоты, затраченного на испарение влаги из контролируемого вещества. Поток тепла, передаваемый веществу нагревателем, стабилизирован. Уменьшение влажности вызывает меньший расход энергии на испарение и больший — на нагревание сухого материала.

Электрические методы измерения влажности основаны на зависимости электрофизических свойств исследуемых материалов и веществ — диэлектрической проницаемости, удельной электрической проводимости, тангенса угла диэлектрических потерь и т. д. — от содержания в них влаги. Среди известных электрических методов наибольшее распространение получили в настоящее время кондуктометрический, диэлькометрический, емкостный и метод полной проводимости.

В кондуктометрическом методе оценка влагосодержания производится по

результатам измерения электрического сопротивления (объемного или поверхностного) или проводимости влажного материала на постоянном токе или токе промышленной частоты. Как правило, кондуктометрический метод применяют для определения влажности от 2 до 30 %.

Диэлькометрический метод измерения влажности предполагает оценку влагосодержания по диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь влажных материалов и веществ в широком диапазоне частот — от звуковых до СВЧ.

Наиболее перспективными считают следующие схемы емкостных влагомеров: резонансные, дифференциальные, с модуляцией параметров измерительного контура, на базе мостов с тесной индуктивной связью, двух- и многочастотные.

СВЧ методы определения влагосодержания отличаются большей чувствительностью и точностью. Основные модификации этих методов — волноводный, резонаторный и метод измерений в свободном пространстве. В качестве информативного параметра используется амплитуда, фаза или угол поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной плоской электромагнитной волны.

Физической основой нейтронных методов является замедление ядрами водорода, содержащегося во влажном исследуемом веществе или материале, быстрых нейтронов, которые при этом теряют часть своей энергии и превращаются в медленные или тепловые со значительно меньшей энергией. В качестве источников быстрых нейтронов используют изотопные источники.

К преимуществам нейтронного метода следует отнести возможность измерения влажности в широком диапазоне (до 100 %), нечувствительность к распределению влаги, минералогическому составу и плотности.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) в настоящее время является одним из эффективных методов анализа состава веществ животного и растительного происхождения. Основу метода ЯМР составляет резонансное поглощение радиочастотной энергии ядрами водорода воды при внесении влажного

вещества или материала в постоянное магнитное поле. Контролируемое вещество или материал помещают в цилиндрическую катушку, ось которой перпендикулярна к направлению поля, и пропускают по катушке переменный ток высокой частоты. Катушка находится между полюсами постоянного магнита. Резонанс достигается двумя способами: изменением частоты высокочастотного поля при постоянной напряженности постоянного поля или изменением напряженности постоянного поля при постоянной частоте высокочастотного поля.

При резонансе имеет место максимальное поглощение радиочастотной энергии.

Действие оптических влагомеров, работающих в видимой области спектра, основано на способности некоторых веществ изменять свою окраску и коэффициент отражения в зависимости от содержания влаги.

Среди оптических приборов для измерения влажности наибольший интерес представляют инфракрасные фотометрические влагомеры, в основу действия которых положено измерение избирательного поглощения влагой инфракрасного излучения определенной длины волны, либо отраженного поверхностью исследуемого вещества или материала, либо проходящего через вещество. ИК спектральные методы влагометрии применимы для широкого класса анализируемых веществ и материалов. Диапазон влажностей, измеряемых ИК влагомерами, от 10^{-4} до 100 %.

Если при прямых методах измерения непосредственно проба контролируемого вещества или материала, то при использовании комбинированных (косвенных) методов ИК влагометрии влага из анализируемого вещества тем или иным способом переводится в другую среду — жидкую или газообразную. Перевод в жидкую среду осуществляется с помощью экстракции воды из вещества или его растворения, перевод в газообразную фазу — путем термического испарения влаги или другим известным методом.

Ультразвуковые методы измерения влажности используют зависимость характеристик ультразвуковых колеба-

ний от свойств и состава среды, а именно зависимость скорости (поперечной или продольной) распространения ультразвуковых колебаний от содержания влаги в исследуемом материале.

Основная область применения ультразвуковых влагомерных устройств — определение содержания влаги в агрессивных средах и керамических массах.

Определение количества водяного пара в газе или воздухе носит название гигрометрии, а приборы или устройства, предназначенные для подобных измерений, называются гигрометрами. Для количественной оценки влажности газов используются следующие характеристики:

абсолютная влажность, определяемая массой водяного пара, содержащегося в единице объема газа (имеет тот же физический смысл, что и плотность водяного пара);

упругость или парциальное давление водяного пара в газовой смеси, выраженная в паскалях;

влагосодержание — отношение массы водяного пара к массе сухого газа в том же объеме (иногда используют удельную влажность, характеризующуюся отношением массы водяного пара к массе влажного газа);

объемное влагосодержание — отношение объема водяного пара к объему газа (как и влагосодержание, используется для характеристики микро- и макроконцентраций водяного пара);

температура точки росы, т. е. температура, выраженная в градусах Цельсия, при которой данное количество водяного пара становится насыщенным;

относительная влажность — отношение абсолютной влажности к массе насыщающих газ паров при данной температуре.

Существующие в настоящее время методы измерения влажности газов представлены на рис. 18.

Среди методов гигрометрии самыми распространенными являются адсорбционные и хроматографические методы. Адсорбционные методы основаны на переносе влаги из газа в различные пористые тела с последующим определением параметров этих тел в зависимости от содержания влаги или же

на измерении теплового эффекта сорбции влаги с поверхности твердого адсорбента.

Адсорбционный кулонометрический метод измеряет количество электричества, израсходованного в процессе электролиза воды, перенесенной из исследуемого газа в сильнодействующий химический поглотитель влаги — фосфорный ангидрид P_2O_5 .

Адсорбционно-частотный принцип действия основан на измерении частоты кварцевого резонатора, покрытого тонким слоем гигроскопического вещества, при изменении влажности контролируемой газовой смеси. Прибор сравнивает частоты двух кварцевых резонаторов, и результирующая разность этих частот дает информацию о влажности газа.

В основе электросорбционного метода лежит принцип измерения поверхностной проводимости пленки оксида алюминия при адсорбции на ней паров воды.

Гигрометры с датчиками подогревного типа используют зависимость максимальной упругости водяного пара над поверхностью насыщенного раствора гигроскопической соли от температуры. Состояние равновесия с окружающей средой достигается изменением температуры (нагревом) чувствительного элемента, характеризующей влажность анализируемой газовой среды.

Метод точки росы является одним из основных конденсационных методов контроля влажности воздуха и газовых смесей. Он основан на экспериментальном определении температуры, соответствующей полному насыщению газа парами воды и появлению жидкой фазы. Момент насыщения определяют визуально или фотозлектрически по изменению интенсивности отраженного от поверхности конденсации светового потока в момент выпадения капель росы.

Перспективным методом является хроматографический метод, позволяющий с высокой точностью определять влажность газов, содержащих множество других мешающих компонентов.

Измерение плотности. Плотность — отношение массы m тела к его объему

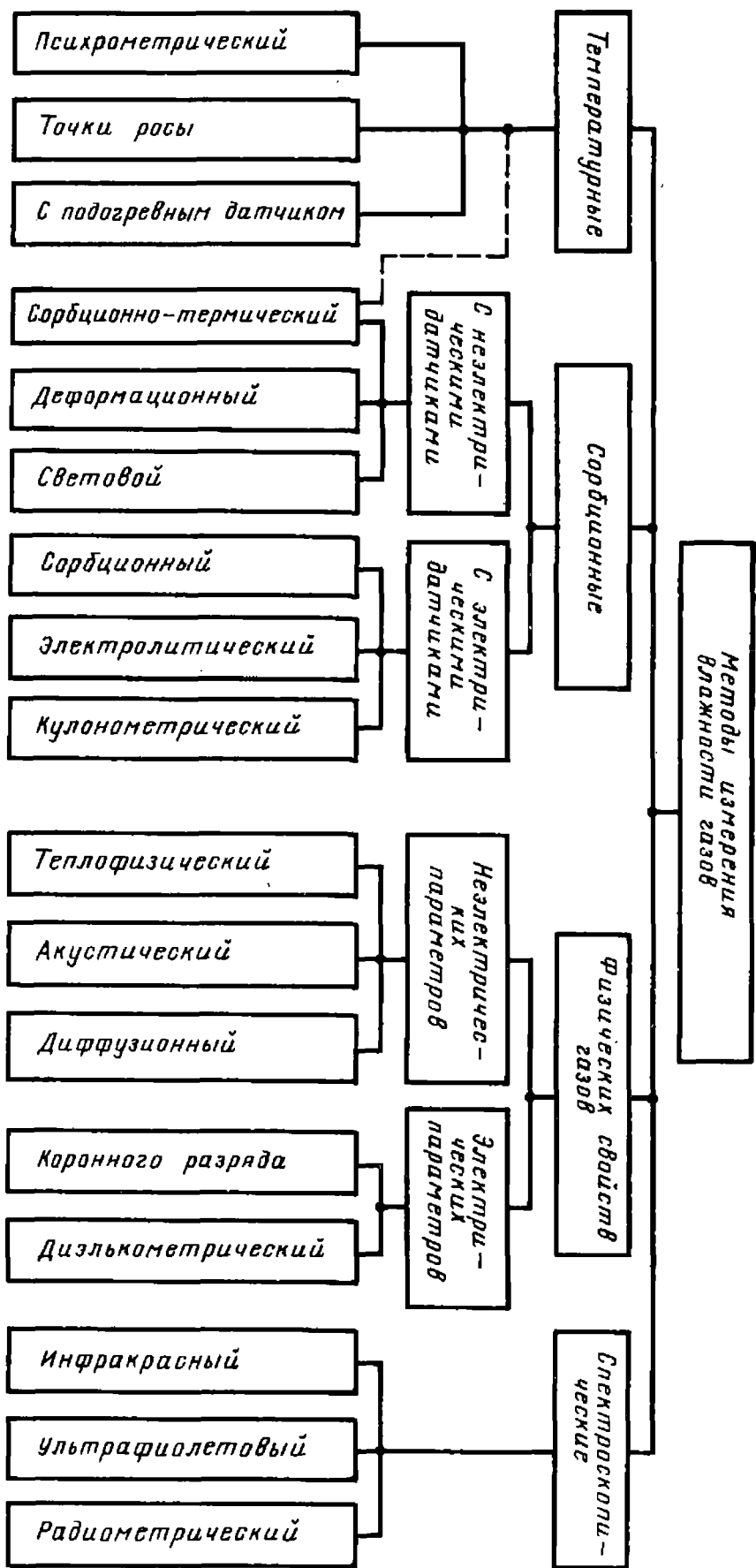


Рис. 18. Методы измерения влажности газов

V , т. е. масса единицы данного вещества

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Приборы для измерения плотности жидкости разделяют на две группы: приборы прямых методов измерений — аргометрические, весовые и гидростатические плотномеры, и приборы косвенных методов измерений, основанные на использовании физических явлений, зависящих от плотности жидкости.

Методы прямого измерения основаны на законах гидростатики или на принципе непосредственного взвешивания определенного объема жидкости.

На рис. 19 представлены методы измерения плотности жидкости, нашедшие практическое использование в лабораторной и промышленной практике. Для разработки универсальных плотномеров находят применение прямые методы измерений. Наибольшее распространение в этом классе приборов получили поплавковые и в особенности вибрационные плотномеры.

В поплавковых приборах измеряется разность удельных весов поплавок и жидкости. При этом регистрируется степень погружений поплавок в жидкость (конструкции с плавающим поплавком) или выталкивающая сила (конструкции с погруженным поплавком). Лучшие плотномеры, использующие принцип уравнивания выталкивающей силы, обладают погрешностью, не превышающей сотых, а иногда и тысячных долей процента.

С помощью вибрационных плотномеров измеряется собственная частота механических колебаний упругого элемента или резонансная частота колебаний участка трубопровода, по которому протекает жидкость.

Для универсальных средств измерений плотности жидкости используют времяимпульсный метод, имеющий высокую точность измерения и возможность преобразования информации в цифровую форму.

Принцип импульсного измерения плотности жидкости состоит в определении параметров кратковременного поступательного движения тела в жидкости, которое начинается из состояния покоя и является ускоренным.

Особенность этого метода, его отличие от существующих состоит в том, что измерение таких параметров, как скорость, ускорение, время, сопротивление движению, функционально связанных с плотностью жидкости, производится в процессе неустановившегося движения, в то время как известные методы основаны на работе в установившихся режимах.

Такой подход дает возможность увеличить быстродействие измерительных преобразователей плотности и расширить число информационных параметров.

Наиболее перспективным является временной параметр, поскольку время перемещения тела на заданном участке пути может быть измерено с большой степенью точности, а аппаратура, применяемая для его регистрации, наиболее надежна. Кроме того, простота преобразования временного интервала в код исключает применение промежуточных преобразователей в цепи плотности — код и позволяет достаточно легко создавать средства измерений плотности с цифровым отсчетом.

Наибольшее развитие получили гидростатические (пьезоэлектрические) плотномеры, различие которых по принципу действия показано на рис. 20.

Гидростатический метод основан на измерении давления столба жидкости определенной высоты. Пневматические плотномеры измеряют давление сжатого воздуха или газа в трубке, погруженной в контролируемую среду. Давление является функцией сопротивления столба жидкости или ее плотности.

Колокольный плотномер, измеряющий давление под колоколом, погруженным в жидкость с постоянным уровнем, представляет собой наиболее простой измерительный прибор этого направления. Мембранные пневматические плотномеры с воздушным заполнением применяют при специальном методе заполнения системы воздухом и определенных условиях деформации мембранных колпаков от давления жидкости.

Акустические плотномеры используют функциональную связь между скоростью распространения, степенью поглощения ультразвуковых волн в

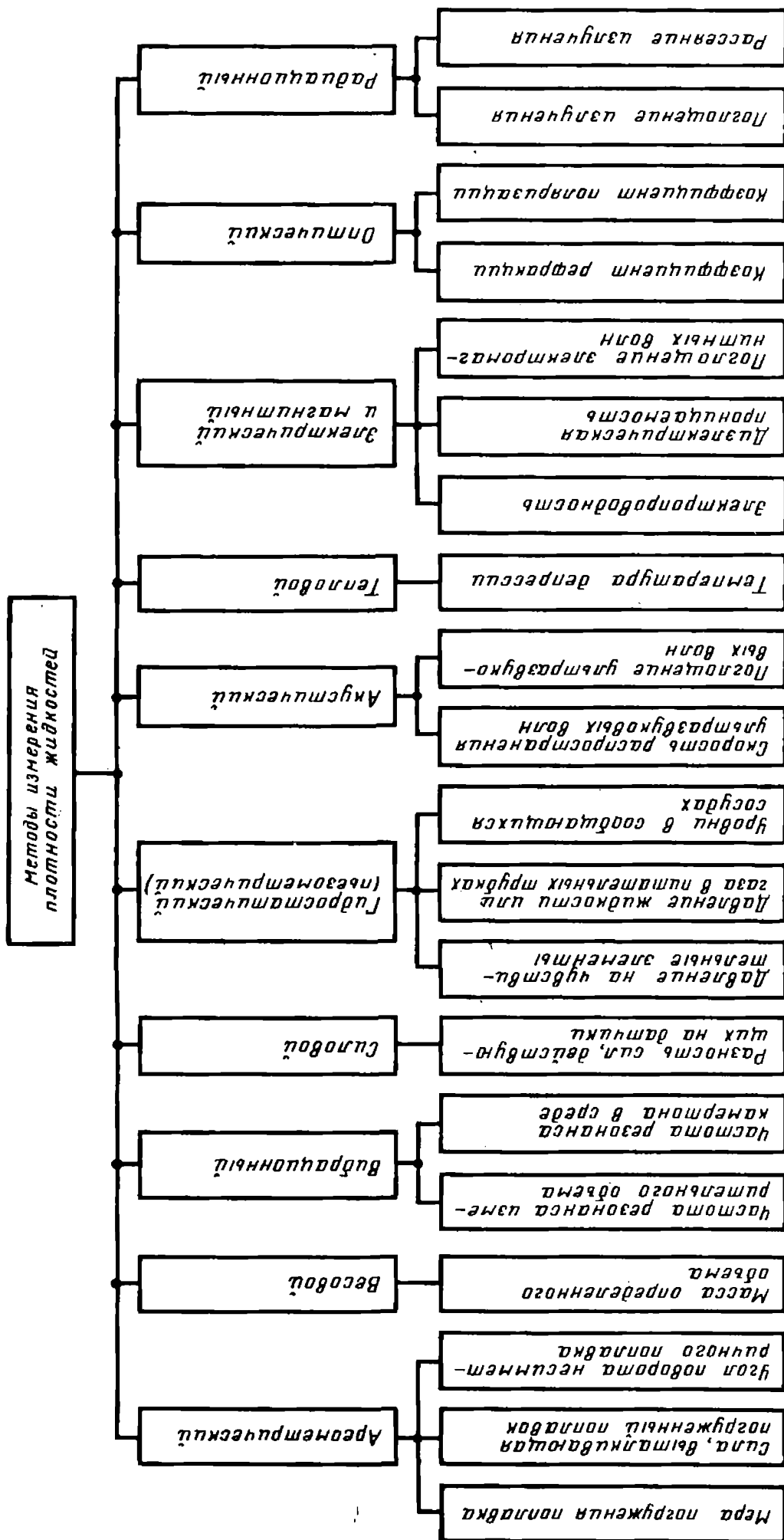


Рис. 19. Классификация методов измерения плотности жидкости

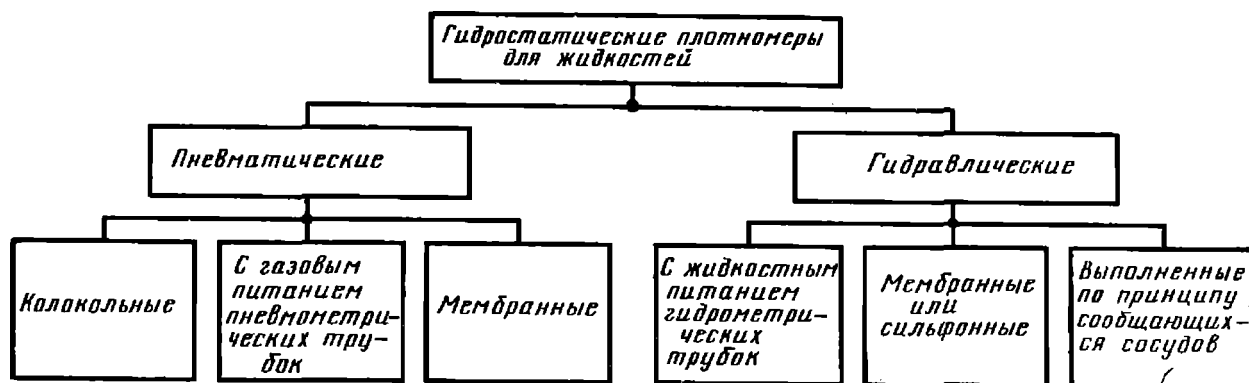


Рис. 20. Классификация плотномеров для жидкости

жидкости и плотностью. Тепловой метод измерения разности температур кипящей жидкости и конденсата вторичного пара также однозначно характеризует плотность исследуемой жидкости.

Электрические методы измерения плотности основаны на измерении удельной электрической проводимости, диэлектрической проницаемости и коэффициента поглощения электромагнитного поля, проходящего через исследуемую жидкость, которые находятся в корреляционной связи с определяемой плотностью.

Оптические методы измеряют плотность жидкости по значению показателя преломления света при переходе его из среды одной плотности в другую. Показатели преломления определяют спектрометрическим и интерференционным методом или методом полного внутреннего отражения. Автоматические плотномеры — рефрактометры подразделяют на приборы с изменением отклонения луча после прохождения через контролируемую жидкость и приборы, измеряющие угол полного внутреннего отражения. Поляриметрический метод измерения плотности основан на свойстве оптически активных веществ вращать вправо или влево плоскость поляризации проходящего через них поляризованного луча. Радиационный метод определяет плотность жидкости за счет измерения интенсивности рассеянного или поглощенного гамма- или рентгеновского излучения. Наиболее точным и распространенным является способ регистрации поглощенного ионизирующего излучения.

10. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ

Измерение массы. Приборы для измерения массы называют весами. Измерение массы основано на использовании закона всемирного тяготения, согласно которому гравитационные поля Земли притягивают массу с силой, пропорциональной этой массе. Силу притяжения сравнивают с известной по величине силой различными способами. В качестве уравнивающей силы используют груз известной массы, деформацию упругого элемента, усилие пневматического, гидравлического или электродинамического устройства, усилия при погружении тела в жидкость и др. По принципу действия различают механические, электромеханические, оптико-механические и радиоизотопные весы (рис. 21).

Механические весы основаны на принципе сравнения масс при помощи рычагов, пружин, поршней и чашек весов. В электромеханических весах усилие, развиваемое взвешиваемой массой, измеряется через деформацию упругого элемента с помощью тензорезисторных, индуктивных, емкостных и пьезоэлектрических преобразователей. Радиоизотопные преобразователи основаны на измерении интенсивности ионизирующего излучения, прошедшего через измеряемую массу. У преобразователя абсорбционного типа интенсивность воспринимаемого излучения уменьшается с увеличением толщины материала, а у преобразователя рассеянного излучения интенсивность воспринимаемого рассеянного излучения

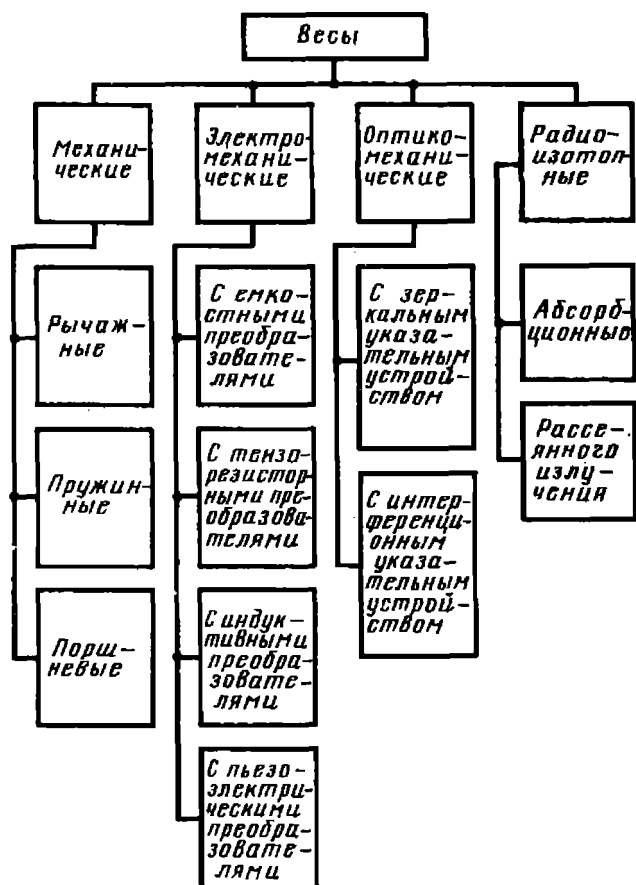


Рис. 21. Классификация весов

ния растет с увеличением толщины материала.

Основные технические характеристики механических рычажных весов

13. Механические рычажные весы

	Коромысловые равноплечные	Гирные	Коромысловые с передвижными гирями	Квадратные	Весовые дозаторы
Параметр					
Пределы измерений, кг	$10^{-6} - 10^3$	$10^{-6} - 10^3$	$10^{-4} - 10^6$	$10^{-3} - 10^4$	$10 - 10^3$
Погрешность измерения, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$

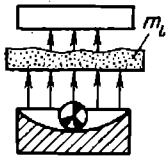
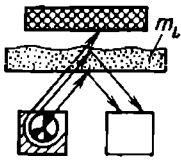
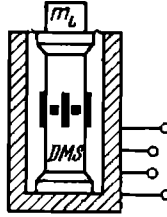
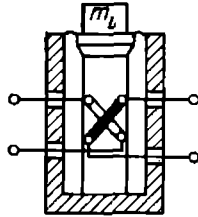
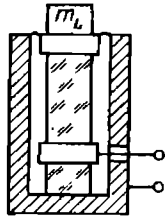
представлены в табл. 13, а радиоизотопных и электромеханических — в табл. 14.

Преимуществом коромысловых равноплечных и гирных весов являются их высокая точность и независимость показаний от места измерения. Коромысловые весы с передвижными гирями и квадратные весы отличаются удобством эксплуатации. Дозаторы позволяют автоматизировать и повысить производительность процессов взвешивания. Отличием радиоизотопных весов являются малые измеряемые усилия, универсальность и нечувствительность к высоким температурам, а электромеханических весов с тензометрическими преобразователями — дешевизна и высокая точность измерения. Электромеханические весы с индуктивными преобразователями могут работать без усилителя, а с пьезоэлектрическими преобразователями имеют широкий диапазон измерений и температурный диапазон.

По назначению весоизмерительные и весодозирующие устройства разделяют на следующие шесть групп:

1) весы дискретного действия; 2) весы непрерывного действия; 3) дозаторы дискретного действия; 4) дозаторы

14. Радионуклидные и электромеханические весы

	Абсорбционные	Рассеянного излучения	С тензорезисторными преобразователями	С индуктивными преобразователями	С пьезоэлектрическими преобразователями
Параметр					
Пределы измерений, не более	10^2 кг/м ²	10^2 кг/м ²	10^6 кг	10^8 кг	10^4 кг
Погрешность измерения, %	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm (0,1 \div 1,0)$	$\pm (0,5 \div 1,0)$	$\pm 1,0$

непрерывного действия; 5) образцовые весы, гири, передвижные весопроверочные средства; 6) устройства для специальных измерений.

К первой группе относят лабораторные весы различных типов, представляющие отдельную группу весов с особыми условиями и методами взвешивания, требующих высокой точности показаний; весы настольные с наибольшим пределом взвешивания (НПВ) до 100 кг, весы платформенные передвижные и врезные с НПВ до 15 т; весы платформенные стационарные, автомобильные, вагонеточные, вагонные (в том числе и для взвешивания на ходу); весы для металлургической промышленности (к ним относятся системы шихтоподачи для питания доменных печей, электровагон-весы, углезагрузочные весы для коксовых батарей, весовые тележки, весы для жидкого металла, весы для блюмов, слитков, проката и т. д.).

Весы первой группы изготавливают с коромыслами шкального типа, циферблатными квадратными указателями и цифропоказывающими и печатающими указательными приборами и пультами. Для автоматизации взвешивания применяют печатающие ап-

параты автоматической записи результатов взвешивания, суммирования итогов нескольких взвешиваний и аппараты, обеспечивающие дистанционную передачу показаний весов.

Ко второй группе относят конвейерные и ленточные весы непрерывного действия, ведущие непрерывный учет массы транспортируемого материала. Конструктивно конвейерные весы отличаются от ленточных непрерывного действия тем, что их выполняют в виде отдельного весового устройства, устанавливаемого на определенном участке ленточного конвейера. Ленточные весы непрерывного действия представляют собой самостоятельные ленточные конвейеры небольшой длины, оснащенные весоизмерительным устройством, ведущим непрерывный учет массы материала, который проходит через весы.

К третьей группе относят дозаторы для суммарного учета (порционные весы) и дозаторы для фасовки сыпучих материалов, используемых в технологических процессах различных отраслей народного хозяйства, а также специальные комплексы и линии автоматического дозирования для производства бетона, асфальтобетона, стекольной шихты, комбикормов и т. д.

К четвертой группе относят дозаторы непрерывного действия, используемые в различных технологических процессах, где требуется непрерывная подача материала с заданной производительностью.

Принципиально дозаторы непрерывного действия выполняют с регулированием подачи материала на конвейер или с регулированием скорости ленты.

Пятая группа включает метрологические весы для проведения поверочных работ, а также гири и передвижные средства поверки.

Шестая группа включает различные весоизмерительные устройства, служащие для определения не массы, а других параметров (например, подсчета равновесных деталей или изделий, определения крутящего момента двигателей, процентного содержания крахмала в картофеле и т. д.).

Измерение времени. По функциональному признаку приборы времени разделяют на пять групп:

1) измерители текущего времени, показывающие текущее время в часах, минутах и секундах. Это самая распространенная и многономенклатурная группа приборов времени;

2) измерители интервалов времени — секундомеры, реле времени и др.;

3) измерители физических характеристик (часовые тахометры, счетчики оборотов и др.), показывающие среднюю угловую скорость и среднюю линейную скорость;

4) программно-временные задатчики интервалов времени и временных программ. К ним относят бытовые и служебные таймеры, будильники, процедурные часы, часовые механизмы для программного управления различными процессами в производстве, научных и специальных исследованиях;

5) датчики равномерной скорости — часовые механизмы самопишущих приборов, стабилизаторы частоты вращения электродвигателей, приставные спусковые регуляторы и т. п.

Классификация приборов для измерения времени по принципу действия показана на рис. 22.

Механические колебания в приборах времени реализуются с помощью систем с накопителями энергии (маятник, пружина), имеющими положение

равновесия, при отклонении которого возникают силы, возвращающие их в это положение.

Электрические колебательные системы этих приборов используют колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, в которых возбуждаются электрические колебания.

В кварцевых генераторах при механической деформации кристаллов кварца или турмалина возникают электрические заряды и, наоборот, под действием электрического поля происходит их механическая деформация (прямой и обратный пьезоэлектрический эффект). При прикладывании к кристаллу периодически изменяющегося электрического поля кристалл начинает колебаться с частотой возбуждающего поля, если частота его собственных колебаний с ней совпадает. Амплитуда собственных колебаний зависит от структуры кристалла, его размеров и температуры.

В атомных колебательных системах при переходе от возбужденного состояния в исходное атомы дают излучение с характеристической частотой. При этом обеспечивается высокая стабильность частоты и однозначное фиксирование излучения перехода.

Молекулярная колебательная система содержит молекулы аммиака NH_3 , имеющие пирамидальную структуру. Атом азота периодически колеблется между двумя состояниями равновесия. При этом обеспечивается достижение частоты 23 870 МГц с высокой степенью стабильности.

Механические меры времени колебательной системы используют массу (объем) вытекающей (втекающей) воды или песка (водяные, песочные часы). Вытекающая масса зависит от диаметра выходного отверстия и давления у выхода из отверстия. В качестве меры времени в механотермических часах могут использоваться процессы горения масляных ламп, свечей, поджигаемых шнуров, фитилей.

Длительность процесса горения зависит от химического состава сгораемого вещества, подвода кислорода и структуры горелки.

Электрические меры времени без колебательной системы используют

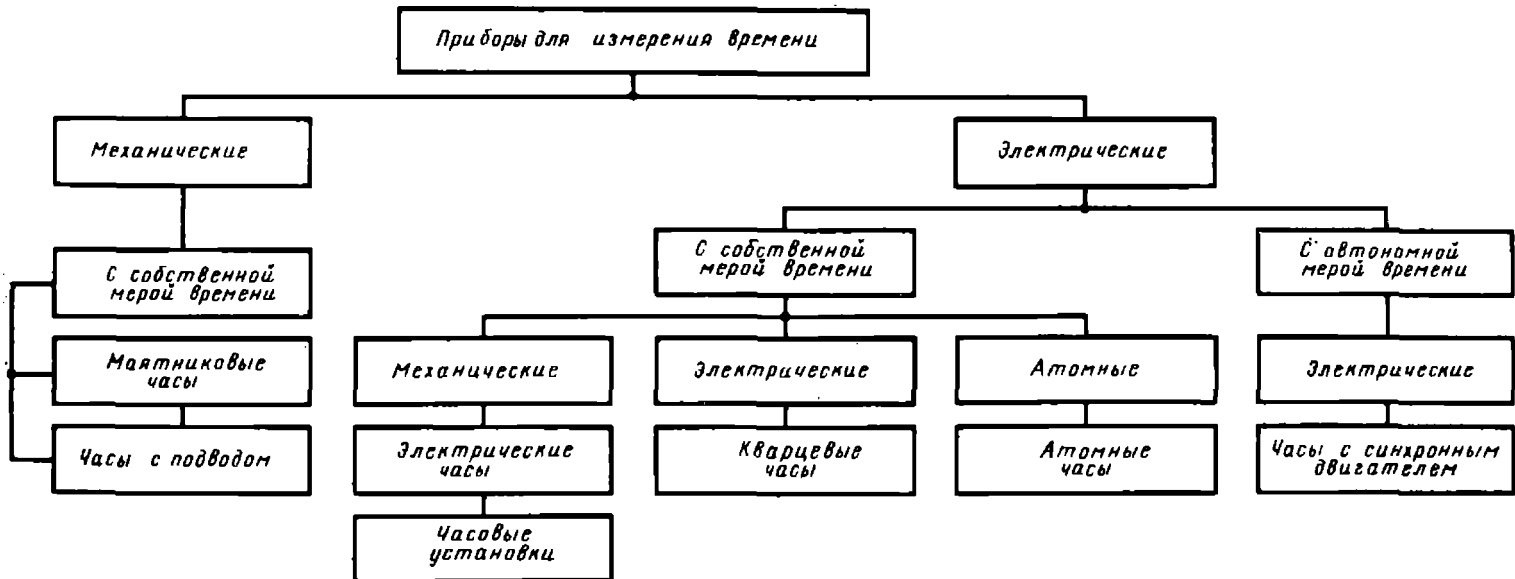


Рис. 22. Приборы для измерения времени

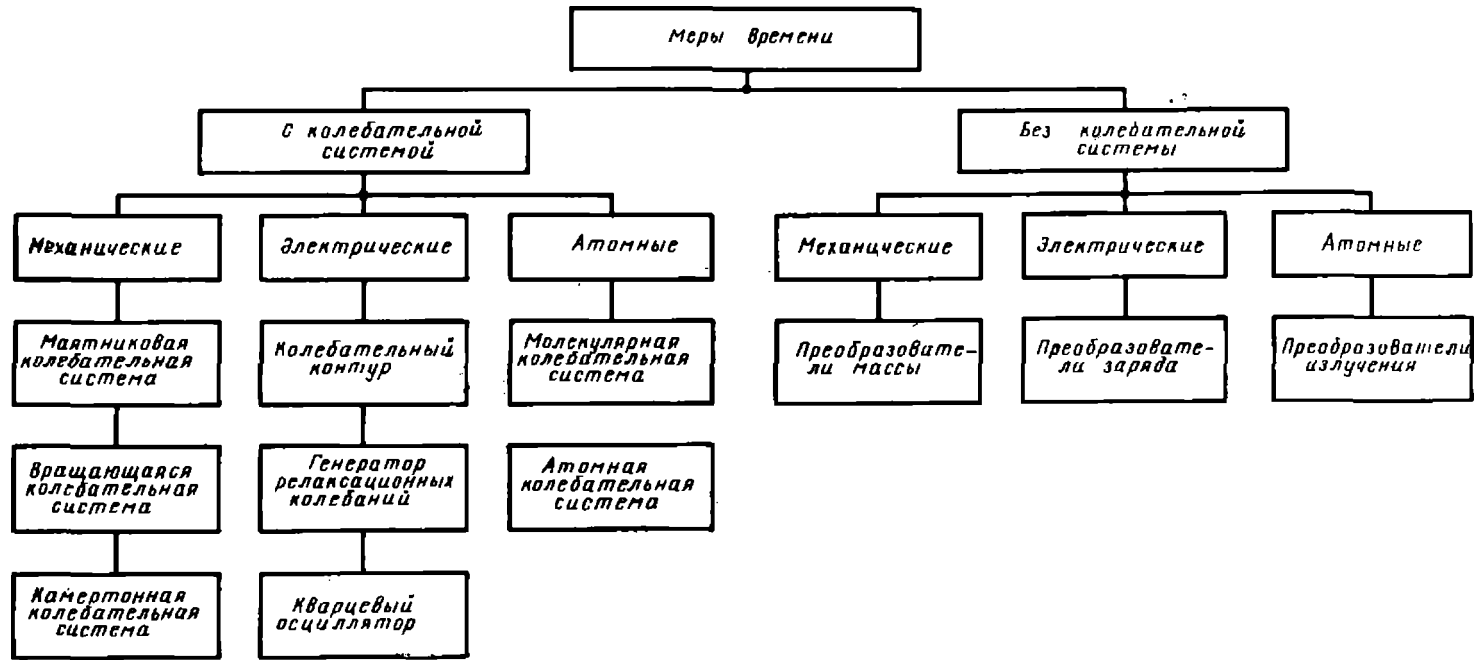
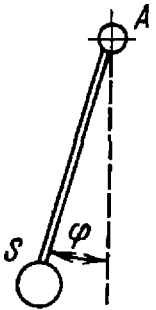
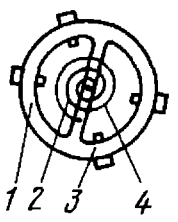
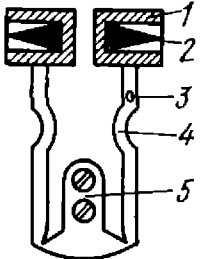
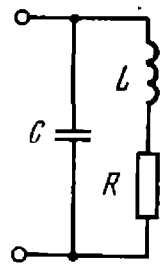
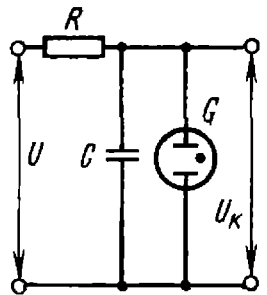
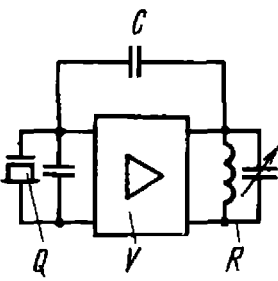
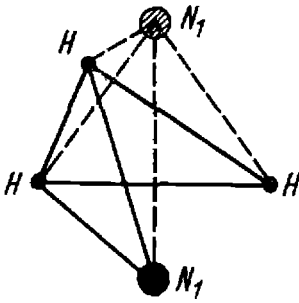
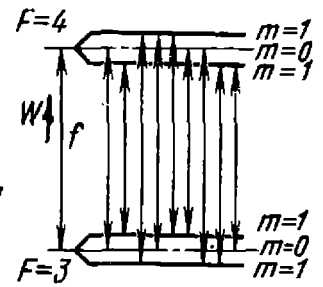


Рис. 23. Меры времени

15. Меры времени с колебательной системой

Механические меры времени			Электрические меры времени			Атомные меры времени	
Маятниковая колебательная система	Вращающаяся колебательная система	Камертонная колебательная система	Колебательный контур	Генератор релаксационных колебаний	Кварцевый осциллятор (генератор)	Молекулярная колебательная система; колебательная система на молекулах аммония	Атомная колебательная система
							
<p>A — ось маятника; S — центр тяжести маятника; φ — угол поворота</p>	<p>1 — вибрирующее кольцо; 2 — спиральная пружина; 3 — винт для уравнивания; 4 — ось подшипника</p>	<p>1 — ярмо; 2 — постоянный магнит; 3 — штифт для собачки храповика; 4 — камертон; 5 — крепление</p>	<p>C — емкость конденсатора; L — индуктивность катушки; R — сопротивление катушки и проводников</p>	<p>G — лампа тлеющего разряда; R — резистор; C — конденсатор; U_K — релаксационное напряжение; U — напряжение питания</p>	<p>C — конденсатор с обратной связью; Q — кварцевый осциллятор; R — резонансный контур; V — усилитель</p>	<p>H — атом водорода; N_1 — первое положение атома азота; N_2 — второе положение атома азота</p>	<p>W — энергия; f — частота перехода 9192 МГц</p>

16. Меры времени без колебательной системы

Механические меры времени		Тепловые меры времени		Электрические меры времени	Атомные меры времени
Водяные часы	Песочные часы	Свеча	Запальный шнур	Контур RC	Углерод C_{14}

1 — стеклянный сосуд; 2 — уровень воды; 3 — вода; 4 — шкала времени; 5 — слив	—	—	—	R — резистор; C — конденсатор	N — число активных ядер; t_H — период полураспада
---	---	---	---	--------------------------------------	--

процесс заряда (разряда) конденсаторов через резисторы, который происходит по экспоненциальному закону. Их применяют для измерения очень коротких промежутков времени.

Атомные меры времени без колебательной системы для определения длительных промежутков времени используют радиоактивные процессы распада.

В органических веществах с помощью изотопа углерода C_{14} с периодом полураспада 5760 лет можно определить их «возраст» до 40 000 лет. Классификация мер времени представлена на рис. 23 и в табл. 15 и 16.

Обычно основными элементами часов являются следующие: источник энергии; колебательная система (осциллятор); счетчик, выходное устройство (с предварительным декодированием).

Характеристики основных типов часов представлены в табл. 17

Широкое применение получили программно-временные задатчики — технические устройства, построенные на базе часов и воспроизводящие в виде тех или иных сигналов требуемую временную программу управления.

Программно-временные задатчики охватывают самые различные типы хронизаторов (тактовых генераторов, синхронизаторов, задатчиков меток времени и др.), временных приводов (задатчиков равномерного движения, задатчиков часового угла и др.), реле времени (таймеров, мультитаймеров, устройств задержки и др.), программных реле времени (программаторов, программных часов, программных таймеров и др.), временных командоаппаратов (задатчиков аналоговых программ, программно-временных контроллеров и др.). Их применяют в качестве основных приборов управления типовыми технологическими процессами, массовым промышленным оборудованием, научной аппаратурой, навигационной аппаратурой и средствами управления движением и т. д.

Обобщенная структурная схема автоматической системы временного программного управления состоит из объекта управления и управляющей системы, осуществляющей управление этим объектом по требуемой временной программе. В состав такой управ-

17. Характеристики основных типов часов

Тип конструкции	Источник энергии	Осциллятор		Элементы управления
		Тип	Частота, кГц	
Механический	Спиральная пружина, гири и т. п.	Баланс-маятник	$(1 \div 6) 10^{-3}$	Механическое арретирование
Электро-механический	Батарея	Камертон	0,3—0,7	Магнитное арретирование Ключевые схемы цифровой электроники
Пьезоэлектрический	То же	Пьезокварц	100—5000	
Электронно-резонансный	Аккумуляторы, электрическая сеть	Электрон между двумя уровнями	$9,192 \times 10^6$ (CS)	То же
Молекулярно-резонансный	То же	Атом внутри молекулы	23×10^6 (NH ₃)	»

ляющей системы программно-временной задатчик задает временную программу управления в виде программного сигнала для системы воспроизведения, предназначенной для обеспечения требуемой программы поведения объекта управления, т. е. обеспечения требуемого закона изменения обобщенных координат объекта управления, что достигается путем изменения управляющих параметров объекта управления.

К наиболее сложным и наиболее мощным по своим функциональным возможностям комплексным средствам измерения времени относят хронометрические системы (ХС). Хронометрическая система — это совокупность средств хронометрической техники: мер времени, хронометрических приборов и преобразователей и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки хронометрической информации, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

При этом под хронометрической информацией понимают все многообразие сведений о количественных характеристиках времени (моментов

и интервалов времени) — как о их размерах, так и о числовых значениях.

Классификация хронометрических систем представлена на рис. 24.

По характеру выполняемых функций различают информационно-распределительные ХС и информационно-измерительные ХС.

Информационно распределительные ХС — это системы распределения хронометрической информации с целью обеспечения ее единства и унификации на всех обслуживаемых объектах.

Наиболее распространенным типом таких ХС являются системы единого времени.

Информационно измерительные ХС — хронометрические системы получения, сбора и обработки хронометрической информации с целью нахождения требуемых (часто — обобщенных) количественных временных характеристик объектов измерения. Сжатие и обобщенное компактное представление полученной и собранной хронометрической информации достигается путем ее специальной обработки (систематизации, отбора, статического анализа и т. п.) и специальных форм представления (цифровых таблиц, таблиц, графиков, многомерных схем) и т. п.

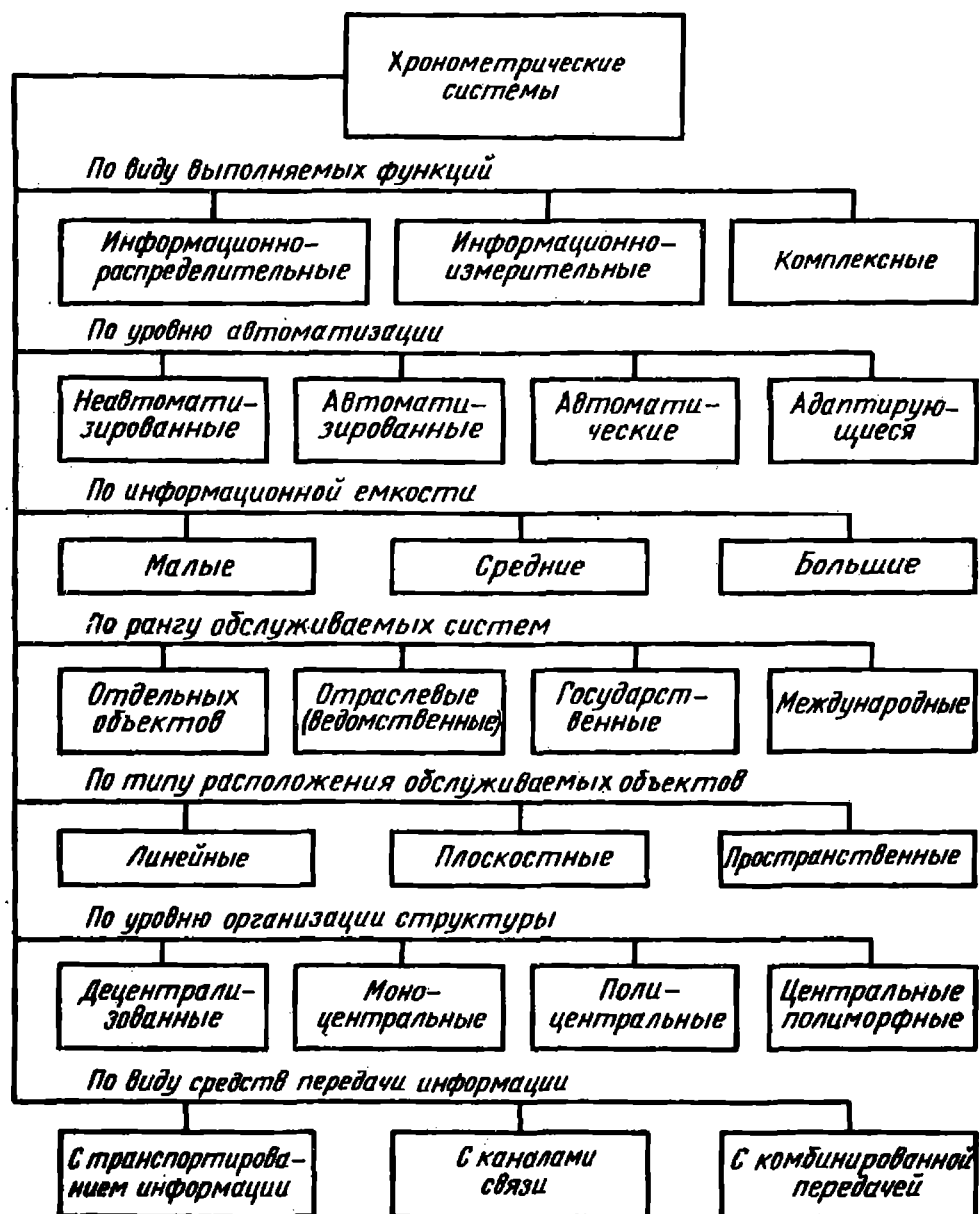


Рис. 24. Классификация ХС

Кроме двух рассмотренных основных видов ХС, часто используют комплексные хронометрические системы, которые представляют собой комбинацию информационно-измерительных и информационно-распределительных ХС. Назначение комплексных ХС определяется информационно-измерительной системой, а единство измерений обеспечивается информационно-распределительной ХС.

11. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Измерение электрических параметров является самым распространенным видом измерения.

Электроизмерительная техника характеризуется неуклонной тенденцией к усложнению и росту многообразия измерительной аппаратуры для сбора, преобразования, измерения и представления измерительной информации.

Число типов электроизмерительных приборов превышает 1500.

На рис. 25 представлена классификация электрических параметров.

Электроизмерительные приборы (ЭИП) по виду измеряемого параметра делят на шесть больших подгрупп: вольтметры; амперметры; измерители параметров электрических цепей; приборы частотно-временной группы; комбинированные приборы; фазометры.

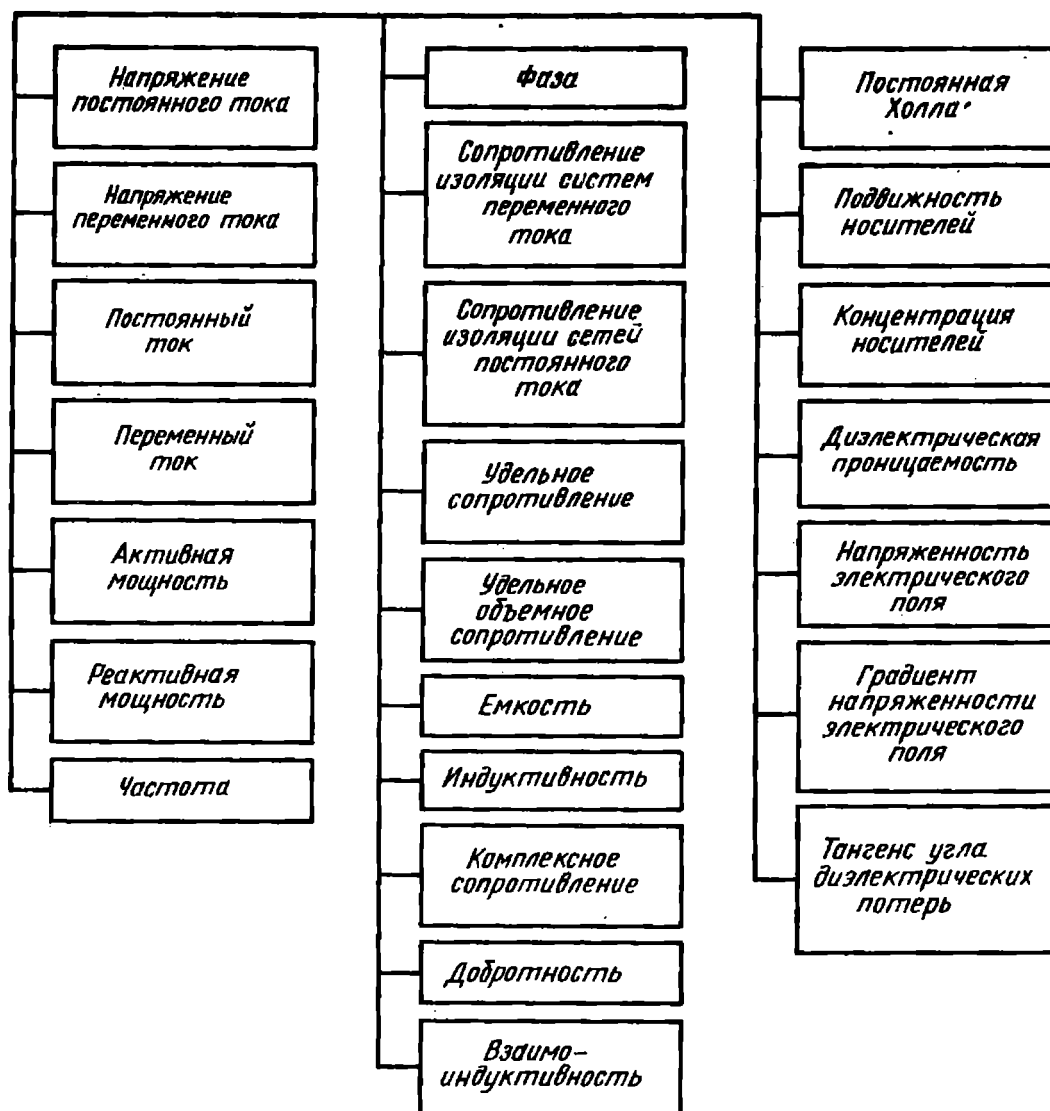


Рис. 25. Классификация измеряемых электрических параметров

Вольтметры и амперметры, в свою очередь, подразделяют по характеру измеряемого параметра на приборы постоянного и переменного тока. Вольтметры также могут производить измерения амплитуды импульсов.

Измерители параметров электрических цепей подразделяют на омметры и процентные омметры; измерители емкости; измерители индуктивности; универсальные измерители комплексного сопротивления. Как правило, измерители емкости и индуктивности позволяют измерять тангенс угла потерь. Универсальные измерители комплексного сопротивления, кроме емкости и индуктивности, могут измерять также сопротивление, проводимость, тангенс угла потерь, процентное отклонение, постоянную времени цепи.

Вольтметры и омметры могут дополнительно производить измерения отношений напряжения и сопротивления.

Приборы частотно-временной группы подразделяют на частотомеры, универсальные частотомеры и счетчики импульсов. Частотомеры, кроме измерения частоты, позволяют производить измерения периода и промежутка времени между импульсами либо процентное отклонение частот.

Универсальные частотомеры, кроме вышеуказанных операций, могут выполнять измерение длительности импульсов, отношения частот, деление частоты.

Счетчики импульсов, как правило, дают возможность производить прямой, реверсивный и с предварительной установкой счет импульсов, а также деление частот.

Комбинированные приборы представляют собой широкую гамму приборов, обеспечивающих измерение двух и более параметров, как на постоянном, так и на переменном токе.

ЭИП строят по двум основным параметрам — пределам измерения и основной погрешности.

Принципиальные схемы электро-механических приборов показаны в табл. 18.

Магнитоэлектрические измерительные приборы. (ЕМ — измерительные приборы, QM — приборы для измерения отношения).

Наиболее массовыми приборами являются аналоговые электроизмерительные приборы тока и напряжения, основные технические характеристики которых представлены в табл. 19.

Ниже приведены основные технические характеристики цифровых ЭИП.

Погрешность измерения, %:	
напряжения постоянного тока	0 0,025 0,001
напряжения переменного тока	0,05/0,002
сопротивления	0,003
индуктивности	0,05
емкости	0,02
аналого-цифрового преобразователя (АЦП)	0,01
Пределы измерения:	
напряжения постоянного тока, В	10^{-3} — 10^3
напряжения переменного тока, В	10^{-2} — 10^3
сопротивления, Ом	10^{-3} — 10^{14}
индуктивности, Гн	10^{-6} — 10^3
емкости, Ф	10^{-14} — 10^{-2}
Чувствительность:	
по напряжению постоянного тока, мкВ	0,1
по напряжению переменного тока, мкВ	10
по сопротивлению, мкОм	1,0
по индуктивности, мкГн	0,01
по емкости, пФ	0,001

Для измерения силы тока в диапазоне 10^{-17} — 10^{-8} А применяют усилители постоянного тока с высоким входным сопротивлением, малым уровнем собственных помех и большим коэффициентом усиления входного сигнала, охваченные отрицательной обратной связью по напряжению. В цепь обратной связи включается пассивный электрометрический преобразователь измеряемого тока в напряжение: высокоомный резистор, конденсатор по-

стоянной емкости, логарифмирующий элемент.

Мощность измеряют в диапазоне 10^{-16} — 10^{-9} Вт в цепях постоянного и переменного тока высокой частоты, в импульсных цепях.

В цепях постоянного тока мощность P потребления нагрузки R определяют произведением силы I тока в нагрузке на падение напряжения U на ней:

$$P = UI = I^2R.$$

В цепях переменного тока мгновенное значение мощности потребления

$$p = ui.$$

Если напряжение u и сила тока i — периодические функции времени с периодом T , то среднее значение мощности потребления за период называют мощностью или активной мощностью P .

В цепях однофазного синусоидального тока измеряют активную P , реактивную Q и полную S мощности:

$$P = UI \cos \varphi = I^2R;$$

$$Q = UI \sin \varphi = I^2X;$$

$$S = UI = I^2Z,$$

где U , I — среднеквадратичные значения напряжения и силы тока в цепи; φ — сдвиг по фазе между напряжением и током в нагрузке; R , X , Z — соответственно активное, реактивное, полное сопротивления нагрузки.

Частоту, которая является одной из важнейших характеристик периодического процесса, определяют числом полных циклов (периодов) измерения сигнала в единицу времени.

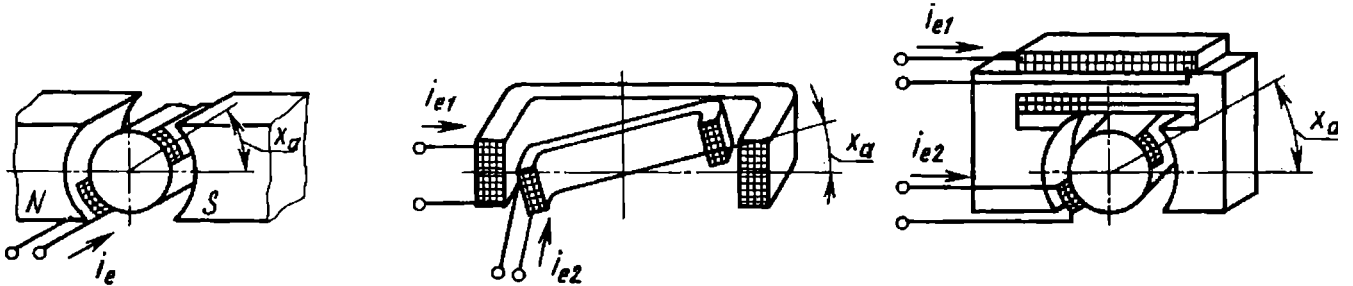
Диапазон используемых частот в измерительной технике — от инфранизких до сверхвысоких частот, т. е. от долей герца до тысячи гигагерц.

Измерение частоты электрических сигналов производится методами непосредственной оценки и сравнения. Методом непосредственной оценки измеряют электрическими частотомерами с логометрическими механизмами, конденсаторными, цифровыми.

Измерение частоты сигналов методом сравнения производят с помощью осциллографа, частотно-зависимого моста переменного тока, частото-

18. Магнитоэлектрические измерительные приборы

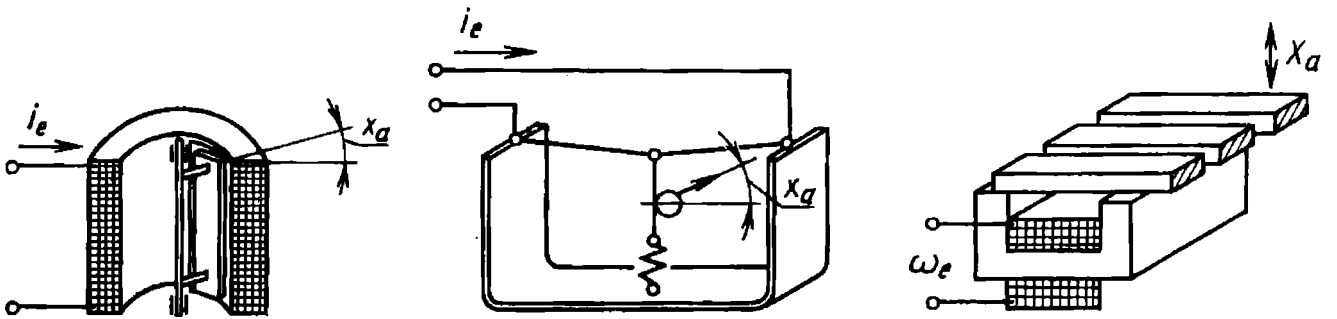
Приборы магнитоэлектрической системы	Электродинамические приборы	Электродинамические приборы (с замкнутой магнитной цепью)
--------------------------------------	-----------------------------	---



Символическое изображение



Электромагнитные приборы	Приборы с нагреваемой нитью	Вибрационные приборы
--------------------------	-----------------------------	----------------------



Символическое изображение



Примечание: EM — измерительные приборы, QM — приборы для измерения отношения.

19. Основные технические характеристики аналоговых ЭИП

Параметр	Щитовые приборы		Переносные и лабораторные	
	постоянного тока	переменного тока	постоянного тока	переменного тока
Погрешность, %	0,5—4,0	0,5—4,0	0,05	0,05
Предел измерения тока	Св. 0,2 мкА	Св. 10 мкА	$0,5 \cdot 10^{-9}$ — $0,3 \cdot 10^2$ А	$0,1 \cdot 10^{-7}$ — $0,3 \cdot 10^3$ А
Предел измерения напряжения, В	Св. 0,5 мВ	Св. 0,5	$5 \cdot 10^{-8}$ — $3 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^{-7}$ — $0,3 \cdot 10^6$

меров гетеродинных, резонансных и др.

Наиболее широкое распространение получили цифровые частотомеры, которые применяют для точных измерений частоты гармонических и импульсных сигналов в диапазоне 10—15 ГГц; для измерения отношения частот, периода, длительности импульсов, интервалов времени и т. п.

Измерение сдвига по фазе между входным и выходным напряжением любого четырехполюсника (усилителя, фильтра, трансформатора, устройства автоматики и др.) в заданном диапазоне частот, а также определение зависимости изменения фазы от частоты зависят от диапазона частот, уровня, формы сигнала и требуемой точности измерения.

В диапазоне частот от нескольких герц до десятков мегагерц при точных измерениях сдвига по фазе используют аналоговые и цифровые электронные фазометры.

В основу работы двухканального аналогового электронного фазометра положен принцип преобразования сдвига по фазе между двумя синусоидальными напряжениями в интервал времени между импульсами с последующим преобразованием в ток, среднее значение которого пропорционально измеряемому сдвигу по фазе.

В цифровых фазометрах синусоидальные напряжения, сдвиг по фазе между которыми следует измерить, преобразуются в последовательность импульсов, привязанных к определенной фазе входного напряжения. В результате импульсы одной последова-

тельности оказываются сдвинутыми относительно импульсов другой последовательности на измеряемое время, пропорциональное сдвигу фаз.

Для наблюдения и исследования формы электрических сигналов в диапазоне частот от постоянного тока до десятков мегагерц путем визуального наблюдения и измерения их временных и амплитудных значений применяют электронный осциллограф.

Основной элемент электронного осциллографа — электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) с электрическим управлением луча и люминесцирующим экраном. Для преобразования исследуемого сигнала в видимое изображение на экране вертикально и горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ перемещают электронный луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

По числу одновременно наблюдаемых сигналов осциллографы делят на одно-, двух- и многоканальные.

Моноблочные осциллографы общего назначения имеют наибольшее распространение и применяются для исследования низкочастотных процессов, импульсных сигналов, проверки радиоэлектронной аппаратуры. Полоса пропускания у этих осциллографов — от постоянного тока до 100 МГц; диапазон амплитуд исследуемых сигналов — от единиц милливольт до сотен вольт.

Полоса пропускания у универсальных осциллографов — от постоянного тока до сотен мегагерц; диапазон амплитуд исследуемых сигналов — от десятка микровольт до сотен вольт.

Скоростные осциллографы предназначены для наблюдения и регистрации однократных и повторяющихся импульсных сигналов и периодических колебаний в полосе частот порядка единиц гигагерц.

В этих осциллографах применяют ЭЛТ с волоконно-оптическими экранами, а также квадрупольную фокусировку системой магнитных линз, позволяющую за счет лучшей фокусировки увеличить скорость записи при фоторегистрации.

Для регистрации повторяющихся сигналов в широкой полосе частот — от постоянного тока до нескольких гигагерц, с амплитудным диапазоном от единиц милливольт до единицы вольт используют стробоскопические осциллографы.

Регистрацию однократных и редко повторяющихся сигналов осуществляют с помощью запоминающих осциллографов. Полоса пропускания — до 100 МГц при скорости записи до 4000 км/с при уровнях сигналов десятки милливольт — сотни вольт.

Осциллографический анализатор спектра представляет собой устройство, с помощью которого можно наблюдать на экране ЭЛТ спектр частот исследуемого сигнала в виде вертикальных линий в прямоугольной системе координат.

Разложение в ряд Фурье сигнала сложной формы позволяет представить его в виде гармоник, каждая из которых имеет свое максимальное значение, частоту и фазу. Совокупность этих гармоник определяет полный спектр сигнала. Наиболее полное представление о спектральном составе сигнала дает распределение амплитуд или мощности по частотам.

Различают два метода анализа спектров: одновременный (параллельный) и последовательный.

При одновременном анализе спектра используют совокупность идентичных узкополосных фильтров, каждый из которых настроен на разные достаточно близкие частоты: f_1, f_2, f_3 . При одновременном воздействии исследуемого сигнала на все фильтры каждый фильтр выделяет соответствующую его настройке составляющую спектра.

При последовательном анализе спектра исследуемый сигнал воздействует на один узкополосный фильтр, который последовательно перестраивается в широкой полосе частот. Наибольшее распространение получили осциллографические анализаторы спектра, где вместо перестраиваемого фильтра применяют один узкополосный фильтр с фиксированной настройкой и используется гетеродинный принцип преобразования частоты. Гетеродин позволяет весь спектр частот исследуемого сигнала перемещать по отношению к фиксированной частоте фильтра.

Наиболее распространенными регистрирующими устройствами являются самопишущие приборы (одно- и двухкоординатные), светолучевые осциллографы и магнитографы.

Самопишущие приборы прямого преобразования предназначены для записи относительно медленно изменяющихся процессов с частотой изменений измеряемого параметра, как правило, не превышающей 1 Гц.

В самописцах прямого преобразования измеряемый параметр подается на измерительный механизм, преобразующий его в пропорциональное механическое перемещение. В качестве измерительного механизма используют магнитоэлектрические, электромагнитные, индукционные и электродинамические системы. Погрешность достигает 0,2 %, чувствительность — 1 мкВ.

Компенсационные самопишущие приборы обладают рядом метрологических, конструктивных и эксплуатационных преимуществ: отличаются более высокими точностью (до $\pm 0,1$ %) и чувствительностью.

Способы записи можно разделить на три основные группы: нанесением слоя вещества на бумагу или другие носители; снятием слоя вещества; изменением состояния вещества носителя.

К первой группе относятся непрерывная запись чернилами со свободной подачей чернил; капиллярной подачей чернил под действием силы тяжести; запись пастами, волоконным пером; цветная печать посредством печатающей головки или падаю-

щей дужки, а также запись через копировальную бумагу.

К второй группе относятся способы, которые сводятся к снятию слоя вещества, нанесенного на бумагу (воск, парафин) резцом, стальной иглой, нагретым током стержнем.

К третьей группе относятся электротермический (тепловой) способ записи четкой темной линии на электротермической бумаге электрически нагреваемым пером, которое расплавляет чувствительный к температуре слой на бумаге; электроискровой способ, дающий точечную линию записи, получаемую прожиганием (пробиванием) бумаги искрой между двумя электродами, к которым подводится электрическое напряжение.

В настоящее время ультрафиолетовый способ записи применяют практически во всех типах светолучевых осциллографов. При этом способе получение видимого изображения достигается воздействием на экспонированный носитель потоком света малой интенсивности (200—500 лк) продолжительностью 5—40 с.

Разовый носитель — ультрафиолетовая сенсibilизированная (УФС) бумага, позволяет вести регистрацию информации не только с помощью ртутной лампы, но и с помощью лампы накаливания.

С помощью источников света мощностью порядка 100 Вт максимальная скорость регистрации на этом носителе записи может достигать: для ртутной лампы 2500 м/с, для лампы накаливания — 400 м/с.

Магнитографы составляют группу приборов, у которых в качестве носителя информации используется магнитная лента.

Наиболее часто применяемые в настоящее время способы магнитной записи — аналоговый и цифровой. При аналоговой записи эффективность использования носителя, определяемая числом периодов информационного сигнала, записанного на единице длины носителя, выше, чем при цифровой. На точность цифровой записи процесс магнитной записи — воспроизведения — по существу не влияет, она зависит лишь от точности аналого-

цифрового и цифроаналогового преобразователей.

В магнитографах используются различные виды аналоговой записи: прямой (ПЗ) с высокочастотным подмагничиванием; с амплитудной модуляцией (АМ); с частотной модуляцией (ЧМ); с фазовой модуляцией (ФМ), с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Основными параметрами магнитографа являются максимальное значение частотного диапазона канала регистрации (воспроизведения) до 2,5; 2,501—5; 5,01—10; 10,01—20; 20,01—40; 40,01—80; 80,01 кГц и более) и число одновременно регистрируемых сигналов (до 4, 5—8; 9—16; 17—32; 33 канала).

Основные технические данные регистрирующих приборов следующие.

Самопишущие щитовые и переносные приборы следящего преобразования

Погрешность измерения, %	0,3
Пределы измерения, В	$5 \cdot 10^{-5} - 10^3$
Чувствительность, мм/мВ	2000
Число каналов	6

Быстродействующие приборы

Погрешность измерения, %	1,5
Пределы измерения, В	0,02—10
Частотный диапазон, Гц	0—250
Число каналов	8
Скорость регистрации, м/с	10

Двухкоординатные приборы

Погрешность измерения, %	0,2
Пределы измерения, В	$10^{-4} - 3 \cdot 10^2$
Чувствительность, мм/мВ	2000
Скорость регистрации, м/с	1,5

Светолучевые осциллографы

Число каналов	36
Скорость записи (луча), м/с	2500
Скорость перемещения носителя, мм/с	0,1—10 000
Частотный диапазон, кГц	До 20

Измерительные магнитографы

Число каналов	16
Частотный диапазон, кГц	40
Отношение сигнал/шум, дБ	43
Метод записи	ЧМ, ПЗ, ШИМ

Измерительные информационные системы (ИИС) и измерительные комплексы представляют собой высший уровень интеграции электроизмерительной техники. ИИС — это совокупность средств измерений (мер, измерительных преобразователей, приборов), средств вычислительной техники, автоматики и других вспомогательных средств, соединенных каналами связи

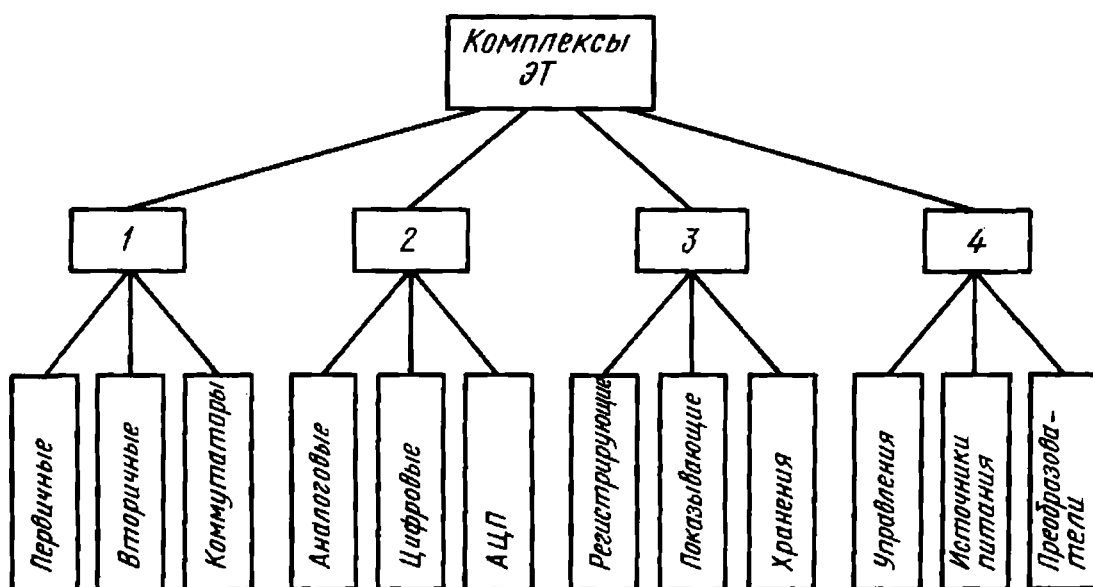


Рис. 26. Структура комплекса средств электроизмерительной техники (ЭТ)

и имеющих общее управление. Они предназначены для выполнения измерительных, информационных, логических и вычислительных функций посредством автоматического получения сигналов измерительной информации об измеряемых физических параметрах непосредственно от объекта, преобразования этой информации, передачи, обработки по определенному алгоритму в логических либо вычислительных устройствах, представления в требуемом виде и (либо) ввода в автоматизированную систему управления для осуществления управляющих функций.

По назначению различают:

измерительные ИИС, выполняющие прямые, косвенные совокупные измерения с соответствующей математической обработкой;

ИИС автоматизированного контроля, предназначенные для получения информации об отклонениях контролируемых параметров от установленных нормальных значений;

ИИС технической диагностики, дающие информацию о неисправностях и повреждениях какой-либо системы, на основании которой решается задача отыскания места повреждений и установления причин этих повреждений и неисправностей.

По функциональному принципу комплексы электроизмерительной техники можно представить в виде основ-

ных укрупненных групп: средств сбора и преобразования информации; средств измерения; средств представления информации; вспомогательных средств и средств управления.

Структура комплекса средств электроизмерительной техники представлена на рис. 26.

Первичный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, реализующий определенную функциональную зависимость между входным значением физического параметра и выходным значением электрического параметра.

Вторичный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, реализующий определенную функциональную зависимость между входным и выходным значениями электрических унифицированных параметров.

Отличие первичного ИП от вторичного следующее: в первом при любом входном значении физического параметра унифицируется лишь выходное значение электрического параметра; во втором — входной и выходной параметры — электрические и унифицированные. Вторичные ИП обеспечивают сопряжение между собой других технических средств, являющихся элементами структуры измерительной части информационных систем, части представления информации и формирования управляемых воздействий.

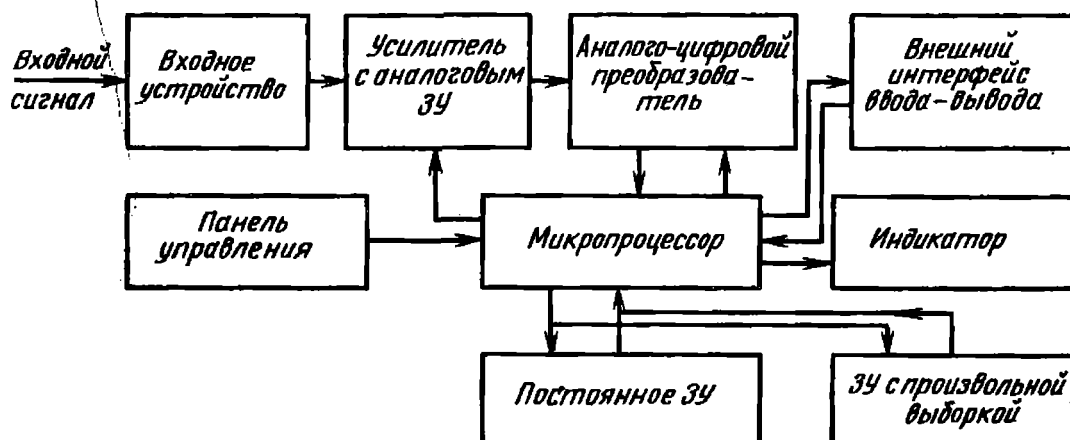


Рис. 27. Схема измерительного прибора с микропроцессором

К первичным ИП электрических параметров относятся преобразователи, входными сигналами которых могут быть: постоянный ток, частота, напряжение переменного тока, мощность и т. д.

Основное назначение коммутаторов — переключение цепей передачи измерительной информации в соответствии с командами. Основными их параметрами являются: конечные значения сигналов переключаемых ИП; основная приведенная погрешность; время переключения; число каналов.

Контактные коммутаторы позволяют получить малую погрешность коэффициента передачи, но имеют относительно большое время переключения (до 100 мкс).

Бесконтактные коммутаторы позволяют получить малое время переключения (до 0,1 мкс), но имеют сравнительно большое переходное сопротивление.

Средства измерения выполняют операцию измерения (сравнения с мерой) и представления результатов измерения в форме, удобной для восприятия. К ним относят аналого-цифровые преобразователи (АЦП) напряжения переменного тока, постоянного и переменного тока, частотного сигнала.

Средства представления информации разделяют на регистрирующие, показывающие и средства для хранения.

Вспомогательные средства составляют источники питания, сравнивающие устройства (аналоговые и цифровые), блоки формирования и задания уставок, блоки самоконтроля устройств и т. д. В группу управления могут

входить цифроаналоговые преобразователи и другие специальные устройства.

Большие перспективы по созданию интеллектуальных измерительных приборов открыло использование интерфейсов (систем сопряжения между устройствами и ИИС), а также микропроцессоров (функциональных устройств с фиксированным интерфейсом).

Дополнение прибора микропроцессором (МП) дает ряд преимуществ: сопряжение с клавиатурой, позволяющее вводить числа посредством цифровых клавиш; сопряжение с дисплеем, обеспечивающее считывание текста с ЭЛТ; обновление отсчетов результатов измерений, введение масштабных множителей; выполнение обычных вычислений, связанных с изменением масштаба сигнала, а также с вычислением показателей, находящихся в функциональной зависимости от измеряемого параметра; управление и координирование работы узлов прибора; сопряжение с другими приборами посредством согласующего канала; автокалибровка и др.

На рис. 27 показана схема измерительного прибора с МП.

Выполненный по данной схеме цифровой мультиметр (автометр) с МП измеряет напряжение постоянного и переменного тока (отсчет в среднеквадратичных значениях) с чувствительностью 1 мкВ, а также сопротивление; результаты измерений отображаются на светодиодном табло. Результаты измерения обрабатываются по нескольким фиксированным про-

граммам, хранимым в памяти микропроцессора и позволяющим:

1) умножать каждый отсчет на константу, вводимую с помощью клавиатуры с цифрами;

2) вычислить процентное отклонение от номинального значения, введенного с помощью клавиатуры с цифрами;

3) вычитать из каждого отсчета заданное начальное значение;

4) вычислить отношение с заданной константой;

5) запомнить максимальное и минимальное значения в серии отсчетов;

6) сравнить отсчеты с заданными верхними и нижними предельными значениями;

7) вычислить различные статистические характеристики; например, среднеквадратичное значение переменного напряжения любой формы, среднеквадратичное отклонение, дисперсию;

8) вычислить корректирующие коэффициенты к результатам измерений.

Один из наиболее быстро развивающихся разделов современной техники составляют измерения вероятностных характеристик случайных процессов (статистические измерения).

Появление анализаторов функций распределения вероятностей, коррелометров, измерителей математического ожидания, дисперсиометров и других видов измерителей вероятностных характеристик открыло новые возможности в области создания современной информационной и управляющей техники.

При измерении математического ожидания результатом измерения служит среднее значение параметра по времени или по совокупности мгновенных значений реализаций исследуемого случайного процесса.

1. ТСД ЭВМ И ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

В общем случае объектом диагностирования в ЭВМ, приборах и средствах автоматизации являются аппаратура, линии связи, программное и информационное обеспечение. С помощью ТСД обнаруживаются и классифицируются ошибки, а также выполняется поиск места неисправности и создаются условия для предотвращения увеличения числа отказов. Для тестового диагностирования ЭВМ применяют схемы с централизованным встроенным проверяющим устройством — ядром, централизованным внешним ядром и распределенным встроенным ядром.

Под *ядром* понимают совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающих хранение или оперативную генерацию входных воздействий, подачу их на проверяемую машину, получение реакций и сравнение их с эталонными, переход к выбору следующего набора и останов. Ядро может быть полностью аппаратным (жестким), программным, микропрограммным, комбинированным и, в свою очередь, организовываться по определенным принципам. Под *переменным* понимают такое ядро, в котором дополнительно к заранее выделенному проверяющему устройству, включающему программные и аппаратные средства, добавляются некоторые устройства из числа проверенных.

При централизованной организации проверок это ядро поочередно проверяет все блоки, при распределенной — каждое ядро может проверять другое.

При использовании централизованного ядра ЭВМ может быть представ-

лена в виде двух частей: одна часть соответствует ядру, другая — объекту диагностирования. Эту схему применяют в машинах систем ИБМ-360, БИМ-370, а также ЕС ЭВМ.

Каждый блок ЭВМ является объектом диагностирования, и в функции ядра входит также обеспечение блокировки воздействий от непроверенных блоков. В целях экономии аппаратурных затрат выполняют проверки способом «раскрутки», когда ранее проверенные блоки используются для проверки последующих.

Известны различные процедуры диагностирования, среди которых можно выделить:

процедуру «дерево», при которой поиск начинается с большого числа функциональных блоков и на каждом шаге проверяется «успех» либо «неуспех» прохождения теста; в случае «неуспеха» переходят к более подробному анализу подозреваемых блоков, в которых предполагаются неисправности; процедуру начинают с «малого», т. е. проверяют вначале малую часть, а затем при небольших приращениях — остальную часть машины;

процедуру «пересечение», при которой после анализа серии результатов тестов выделяют «подозреваемые» на неисправность блоки.

Схема тестового диагностирования предполагает также выбор одного из способов (автоматического, ручного, микропрограммного) подготовки тестовых последовательностей для проверки отдельных устройств ЭВМ и способов построения словарей неисправностей.

Схемы тестового диагностирования, применяемые в современных ЭВМ, показаны на рис. 1. Внешний аппарат-

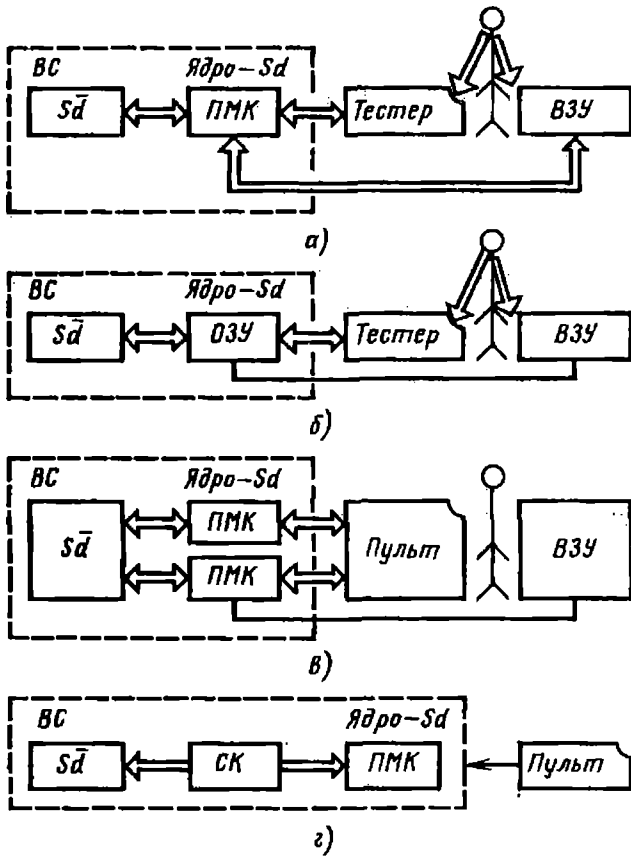


Рис. 1. Схемы тестового диагностирования ЭВМ:

ПМК — память микрокоманд; ВЗУ — внешнее запоминающее устройство; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; СУ — схема контроля; ВС — встроенная схема тестового диагностирования

ный тестер, называемый *консольным файлом*, загружает микропрограммную память и начинает микродиагностирование. Микродиагностическая программа (резидент) контролирует устройство управления и арифметико-логический блок; остальные микропрограммы проверяют память. Используемая стратегия заключается в

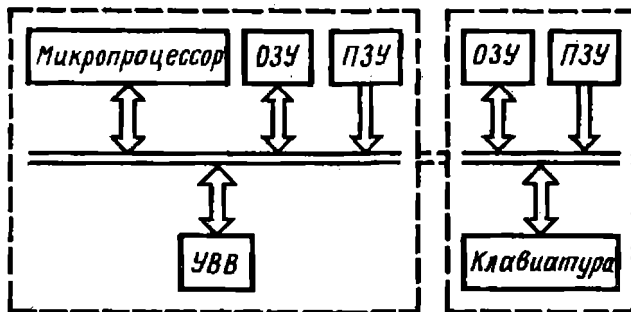


Рис. 2. Схема тестового диагностирования ЭВМ с шинной организацией:

ПЗУ — память запоминающего устройства; УВВ — устройство ввода-вывода; ОЗУ — см. рис. 1

тестировании малых частей аппаратуры с постепенным расширением области проверок при использовании ранее проверенной аппаратуры. Схема, показанная на рис. 1, б, отличается от схемы на рис. 1, а наличием оперативного запоминающего устройства, являющегося ядром. Оператор снабжается технической документацией — *словарем*, а также специальными средствами для проверки внешнего тестера. На схеме, показанной на рис. 1, в, в качестве ядра используют два блока памяти микрокоманд. На рис. 1, г приведена схема организации тестового диагностирования, в которой блок памяти микрокоманд проверяется с помощью схем контроля, и если перед обнаружением ошибки блок ведет себя как исправный, то его сразу используют для проверки подозреваемого оборудования. Такая организация характерна для отечественной ЭВМ М-4030.

Для мини- и микроЭВМ применяют шинную организацию тестового диагностирования, которое может быть выполнено по схеме, приведенной на рис. 2. Режим работы устанавливается с помощью клавиатуры, и блок памяти последовательно загружается тестовыми программами. При этом обеспечивается обнаружение и поиск относительно простых неисправностей.

В схеме организации диагностирования, изображенной на рис. 3, предполагается дублирование основных блоков и адресных шин. В случае несоответствия выходных сигналов при работе вырабатывается сигнал ошибки, который анализируется специальным устройством.

Среди автоматизированных методов проведения проверок ЭВМ выделяют метод анализа логических состояний. Логические анализаторы, используемые при этом методе, позволяют проводить измерения и запоминают состояния устройств ЭВМ. С помощью логических анализаторов можно следить, например, за состоянием счетчика микрокоманд, прохождением управляющих команд, за работой системы прерывания и интерфейса, измерять временные параметры, а также следить за функциональным состоянием испытуемой схемы, индицируя в двоичной

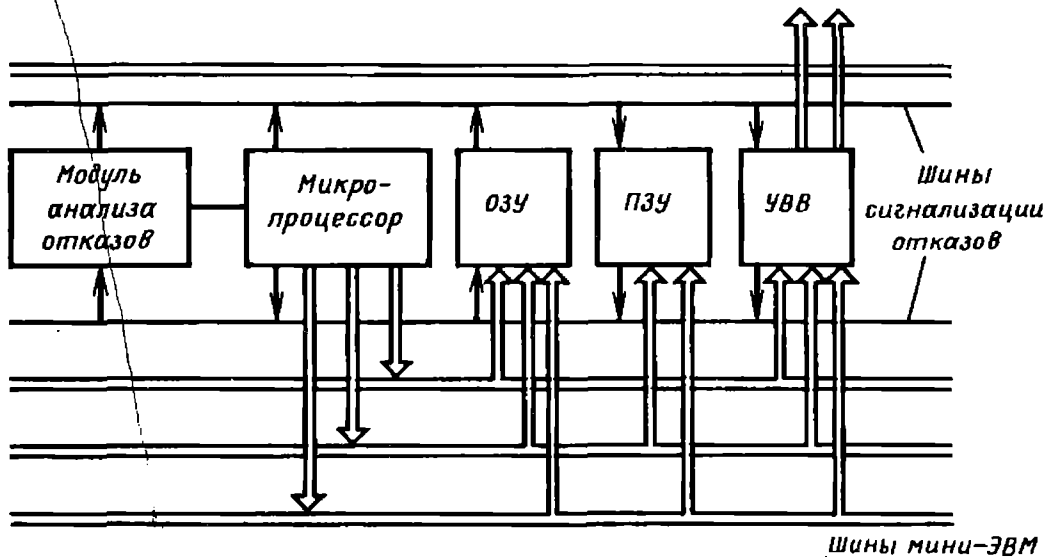


Рис. 3. Схема диагностирования ЭВМ с дублированием. Сокращения см. в подписях к рис. 1 и 2

форме состояния различных регистров.

Другой тип приборов (например, анализатор логических временных диаграмм) воспроизводит на экране одной электронно-лучевой трубки обычные временные диаграммы изменения значений до 12-ти входных и выходных логических сигналов.

Особенно важно организовать тестирование программного обеспечения: операционных систем и прикладных программ.

Тестирование операционных систем, включающее тестирование всех ее элементов, проводится как с помощью программ пользователя, так и специальными методами, которые рассчитаны на проверку работы системы прерывания, диспетчеризации.

Для организации тестирования программ применяют восходящее и нисходящее тестирование. *Восходящее тестирование* состоит в тестировании модулей, подсистем и систем, а также включает в себя приемосдаточные испытания.

При *нисходящем тестировании* выделяется основная программа и один—два уровня подпрограммы в качестве ядра системы, затем проверяется само ядро системы. После установления работоспособности ядра эта система наращивается путем добавления к ней по одному из новых модулей, которые проверяются отдельно.

При этих процедурах применяют различные методы построения тестов про-

грамм. Одним из таких методов является построение всех возможных путей в программе и подбор входных данных, обеспечивающих проверку этих путей.

Организацию проверок приборов и отдельных блоков ЭВМ осуществляют либо на стадии производства, либо на стадии эксплуатации с помощью специального оборудования.

При проверках отдельных схем и элементов обычно выделяют три типа тестирования:

статическое — частота смены тестовых наборов на входе проверяемого устройства и частота съема реакций значительно ниже, чем при работе устройства в реальных условиях;

параметрическое — проверяются динамические параметры и предполагается измерение уровней напряжения и силы тока, задержек и др.;

динамическое — подаются входные наборы и анализируются входные реакции проверяемого устройства на максимальных для данного устройства частотах.

Эти типы тестирования осуществляют различными средствами. Аппаратуру для испытания блоков условно делят на три группы:

1 — ручные тестеры, используемые как технологическое и сервисное оборудование;

2 — автоматические тестеры с элементами программирования;

3 — сложные программные автоматические системы на базе ЭВМ, имею-

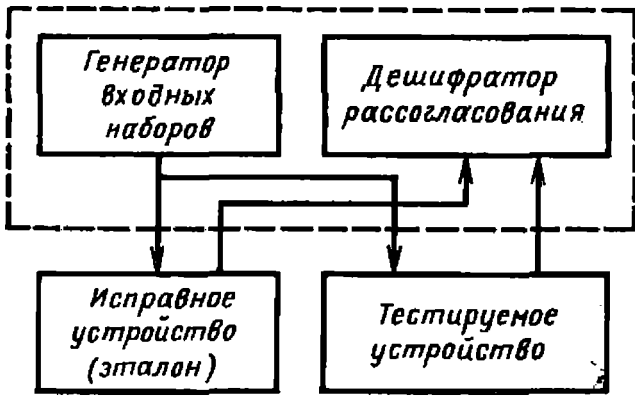


Рис. 4. Схема контактного тестирования

щие возможность накопления нескольких полных проверенных программ в памяти ЭВМ и проведения серии проверок без вмешательства оператора. Использование ЭВМ дает возможность повысить скорость, точность и достоверность проверок. Эти системы наиболее универсальны.

Оборудование для функциональных и статических проверок по принципу действия подразделяют на два основных класса. К первому классу относят сравнивающее контрольное оборудование (сравнение с эталоном), по второму (программное тестирование) — оборудование с хранимой программой. Эти классы оборудования отличаются способами получения и подачи входных воздействий, а также способами сравнения реакций. Для оборудования первого класса, как правило, применяют псевдослучайные генераторы входных воздействий, реализо-

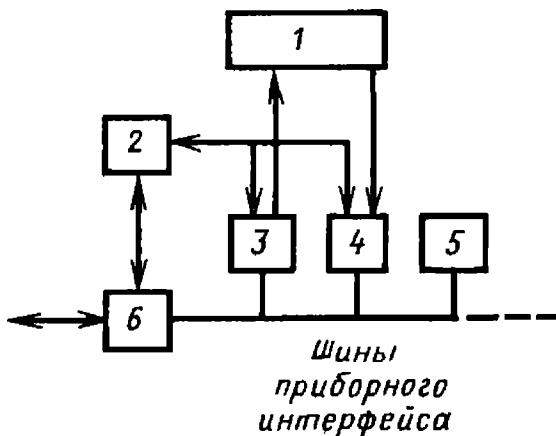


Рис. 5. Схема тестирования с хранимой программой:

1 — объект диагностирования; 2 — пульт управления и индикации; 3 — генератор испытательных последовательностей; 4 — блок логического анализа; 5 — дисплейный модуль ДМ-500; 6 — контроллер

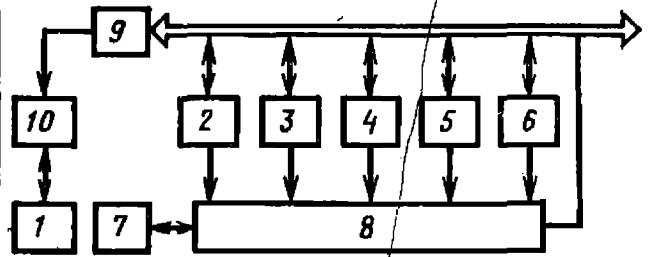


Рис. 6. Структурная схема типового варианта проверки статистических параметров:

1 — устройство ввода-вывода; 2 — источник питания; 3 — генератор входных воздействий; 4 — блок нагрузки; 5 — цифровой вольтметр; 6 — цифровой амперметр; 7 — объект диагностирования; 8 — матричный коммутатор; 9 — интерфейс; 10 — ЭВМ

ванные аппаратно. Входные воздействия подаются на тестируемое устройство с очень высокой частотой, например, 1—40 МГц. Неисправность на выходе тестируемого устройства можно обнаружить, используя схему, показанную на рис. 4. Оба устройства — тестируемое и эталон — помещают в установку контроля. Затем генератор подает входные наборы сигналов сразу на тестируемое устройство и эталон, после чего результаты сравниваются в дешифраторе рассогласования.

Вместо физического эталона можно использовать моделирующую программу или записывать результаты испытаний эталона в специальный блок (рис. 5).

Типовой вариант системы для проверки статических параметров может быть представлен структурной схемой (рис. 6). В состав системы помимо ЭВМ со стандартными устройствами ввода-вывода 1 входят следующие блоки: источник питания объекта диагностирования (ИПП), генератор входных воздействий (ГВВ), блок нагрузки (БН), цифровой вольтметр (ЦВ), цифровой амперметр (ЦА) и матричный коммутатор. Все указанные блоки и приборы через интерфейс связаны с ЭВМ магистральной линией, по которой передается информация из ЭВМ к ОД и осуществляется ввод информации в ЭВМ. Для функционирования системы достаточно вводить информацию в ЭВМ только с измерительных приборов, однако для обеспечения

самоконтроля системы и отдельных блоков необходима двусторонняя связь всех блоков с ЭВМ. Разрешение обращения к блокам системы при обмене информацией с ЭВМ поступает по адресной шине. Код адреса может передаваться по магистральной линии связи. В этом случае дешифрация кода осуществляется либо самим блоком, либо по радиальной линии связи (функции дешифрации возлагаются на интерфейс).

Типовой вариант схемы автоматической системы тестового контроля отличается от системы параметрического контроля отсутствием в ней измерительных приборов и дополнительных блоков, обеспечивающих формирование входных воздействий импульсного и потенциального типов. К этим блокам относятся формирователи тестовых наборов эталонных реакций и уровней логических сигналов. Для фиксации состояний выходов в заданные моменты времени используют анализатор уровней логических сигналов, который стробируется импульсами, вырабатываемыми формирователем. Формирователь импульсов необходим для обеспечения контроля функционирования ОД, так как на входах и выходах ОД необходимо согласовать моменты подачи входных воздействий и моменты фиксации в анализаторе выходных логических сигналов.

Автоматическое тестовое оборудование предназначено для выполнения двух основных функций — контроля исправности по принципу «годен—негоден» и локализации места неисправностей.

Для решения задач обнаружения и локализации используют словарные и зондовые организации поиска неисправностей. При *словарной организации*, как правило, предусматривается автоматический режим диагностики. В простейшем случае смысл словарного поиска состоит в определении реакции устройства на выбранный набор тестовых сигналов.

При *зондовой организации* поиска (одно- и многоконтактной) применяют полуавтоматический диалоговый режим проверки с участием инженера-оператора. Задача регулировщика заключается в подключении щупа к ми-

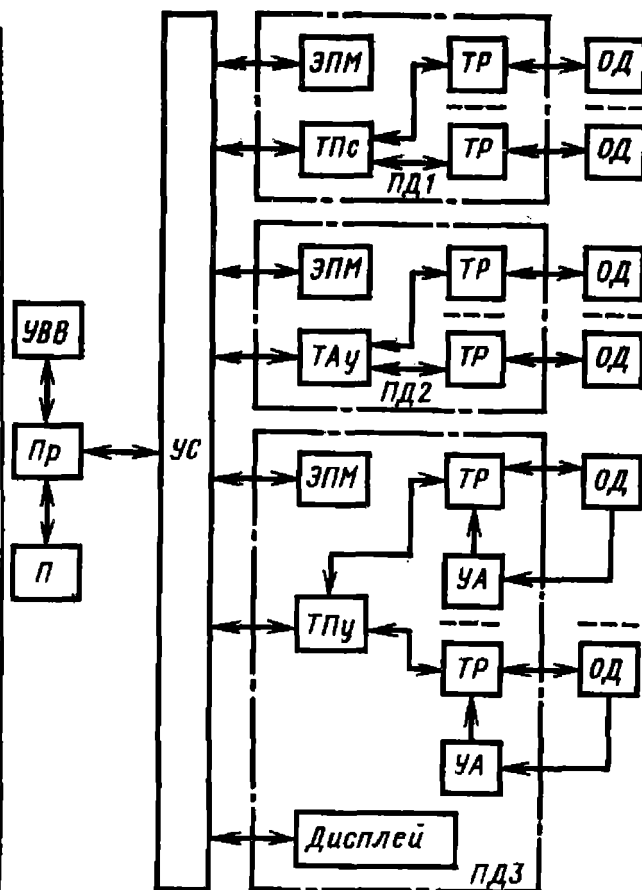


Рис. 7. Организация внешних средств тестового диагностирования

кросхемам (очередность подключения задается автоматически). Поиск неисправности осуществляется в статическом режиме.

Для современной аппаратуры, проектируемой на основе микропроцессоров, перспективным является использование бесконтактных зондов.

В условиях производства электронной аппаратуры можно выделить два основных типа ОД: соединители и дискретные устройства. К *соединителям* относятся: печатный монтаж плат, проводной монтаж каркасов, шкафов и стоек, кабельные соединения между шкафами и стойками. К *дискретным устройствам*: типовые элементы, субблоки, блоки и более сложные единицы.

Для соединителей и дискретных устройств рекомендуется организация внешних средств тестового диагностирования в соответствии с блочной схемой, приведенной на рис. 7.

Процессор (Пр), снабженный устройствами ввода-вывода (УЭВ), оперативным и долговременным запоминаю-

щими устройствами (памятью П), через устройства связи (УС) кабельными каналами связан с периферийными устройствами, расположенными на постах диагностирования (ПД1, ПД2, ПД3).

Активные диагностические терминалы (ТА) осуществляют операции по запоминанию алгоритмов диагностирования, анализу фактических результатов элементарных проверок реализуемых алгоритмов диагностирования и выработке диагноза.

Функции *пассивных диагностических терминалов* (ТП) ограничены запоминанием только одной элементарной проверки алгоритма диагностирования и анализом фактических результатов одной этой проверки. На рис. 7 показан один пассивный терминал для диагностирования соединителей (ТПс), а также один активный и один пассивный терминалы для диагностирования дискретных устройств (соответственно ТАу и ТПу). Вместе с диагностическими терминалами на рабочих местах оператора устанавливают электрифицированные пишущие машины (ЭПМ), а также дисплеи.

Каждый диагностический терминал связан с несколькими технологическими разделами (ТР), при помощи которых ОД подключаются к терминалам. В ряде случаев для увеличения глубины поиска дефектов дискретных устройств необходимы управляемые адаптеры (УА), подключающие диагностический терминал к внутренним электрическим точкам дискретного устройства, а также, возможно, определяющие характеристики сигналов в этих точках.

По ходу процесса диагностирования поступающая с ОД информация после промежуточного запоминания и обработки (например, после сравнения или после измерения и преобразования в дискретную форму) в диагностическом терминале передается в память процессора. В процессоре эта информация может подвергаться той или иной обработке, например, в целях определения направления условного перехода, выработки команд управления для оператора, определения состава мест неисправностей объекта (путем обращения к диагностическому

словарю или по алгоритмам выделения подозреваемых неисправностей), выработки диагноза и т. п.

Укрупненная блок-схема алгоритма, определяющего основные операции по проверке исправности и поиску дефектов дискретных устройств, показана на рис. 8. Алгоритм предназначен для проведения средствами тестового диагностирования, в состав которых входят вычислительная машина и пассивный диагностический терминал с управляемым адаптером, поиска дефектов (ДУ) с глубиной до узла (входа или выхода ДУ или его компоненты).

Создано большое число универсальных (работающих по сменной программе) внешних средств тестового диагностирования, электронных приборов и средств автоматизации, например, проверочная универсальная машина ПУМА, структурная схема которой приведена на рис. 9.

Принцип работы этой машины заключается в подаче на вход контролируемого объекта стимулирующих сигналов и оценке электрических величин, характеризующих реакцию объекта. На вход объекта подаются как электрические стимулирующие сигналы (непосредственно от устройства электрических воздействий 1 или через преобразователь электрических воздействий 2), так и неэлектрические стимулирующие сигналы, формируемые в устройстве неэлектрических воздействий 3, которое управляется электрическими сигналами от устройства 1. Связь ОД с устройствами машины осуществляется через устройство коммутации 4.

Неэлектрические параметры предварительно преобразуются преобразователем неэлектрических параметров 5, а электрические преобразователем 14. Устройство измерений 6 содержит преобразовательные и измерительные устройства, входы которых подключены к коммутационному устройству. Измерительные устройства предназначены для количественной и качественной оценки омических сопротивлений, напряжений постоянного и переменного тока, частот, числа импульсов, интервалов времени и других электрических и временных параметров. Качественная оценка осуществляется

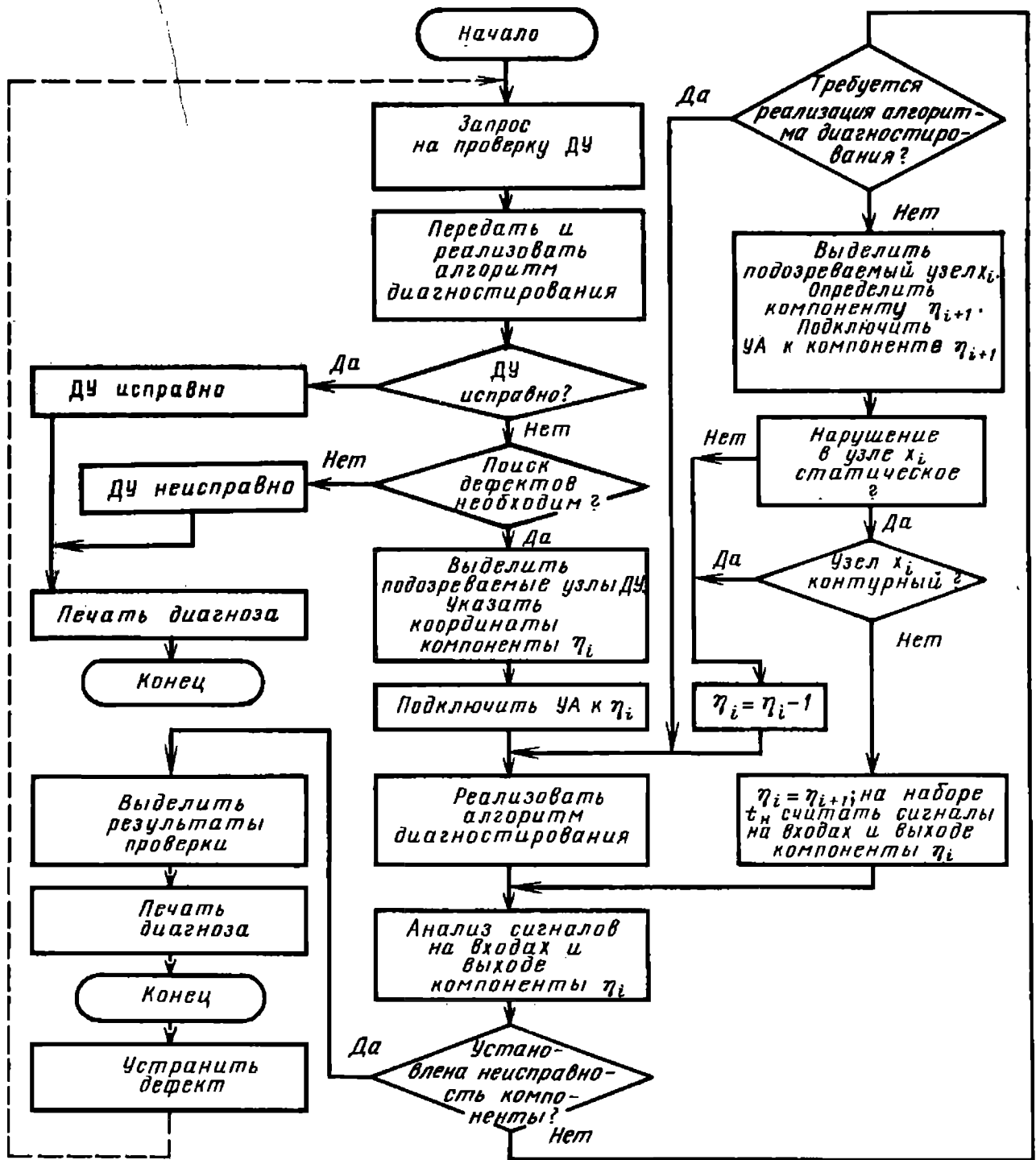


Рис. 8. Алгоритм проверки исправности и поиска дефектов ДУ с максимальной глубиной поиска

по принципу «да—нет», а количественная оценка предусматривает представление измеряемой величины параметра в дискретной форме. Оценку по принципу «да—нет» выполняют с помощью пороговых устройств и нуль-органов. При этом в электрических цепях проверяют наличие или отсутствие напряжения, а также определяют полярность напряжения (тока). Закодированные результаты качественной и

количественной оценок параметров или показателей характеристик объекта поступают в блок выходных устройств 7 для индикации световыми сигналами и сравнения с заданными программой возможными исходами отдельных операций. Результаты сравнения поступают в устройства управления 8 и определяют выбор очередной операции из программы или прекращения проверки объекта. Программа диагностики

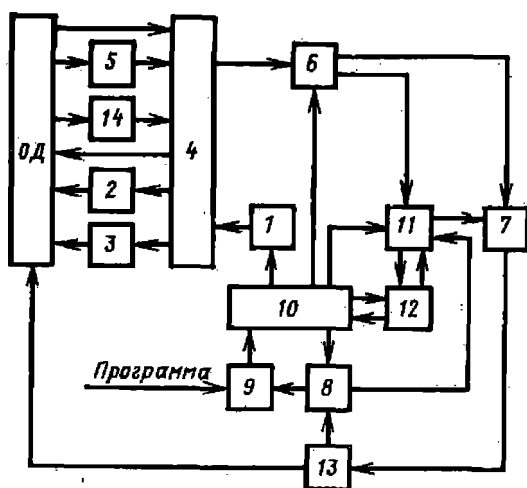


Рис. 9. Универсальная проверочная машина типа ПУМА

объекта, поступающая через программное устройство 9, расшифровывается в устройстве дешифрации 10. Команды, предусмотренные программой, поступают на следующие устройства: коммутации для образования необходимых соединений, электрических воздействий для формирования требуемых воздействий, измерения для настройки измерительных устройств на требуемые диапазоны и допуски, обработки данных (устройство 11) для задания требуемого (нормального) поведения объекта, управления (устройство 8) для перестройки работы устройства в зависимости от характера и результатов проверки на том или ином шаге, оперативной памяти (устройство 12) для запоминания той информации, которая по каким-либо причинам не может быть получена в нужный момент непосредственно с программносителя. Оператор 13, получая информацию о процессе диаг-

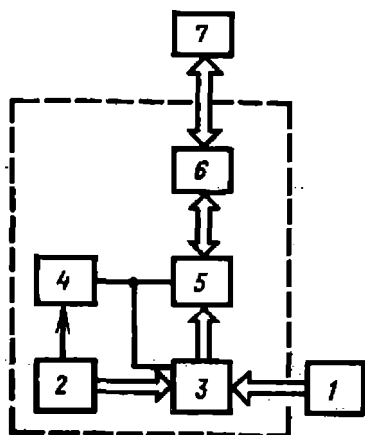


Рис. 10. Схема установки тестового диагностирования

ности от блока выходных устройств, может воздействовать через устройство управления на машину и на СД непосредственно.

Число электрических точек связи машины с объектом, а также с преобразователями электрических и неэлектрических параметров и воздействий, подключаемых к объекту, может быть до десятков тысяч кратным 100.

При диагностировании измеряются параметры:

Напряжение:		
постоянного тока, В	0—500	
переменного тока (амплитудные значения), В	0—500	
Омическое сопротивление, кОм	0—10	
Отрезки времени, с	0—1000	
Частота следования импульсов, кГц	0—10	
Пороговые значения медленно изменяющихся напряжений в одной и двух точках кривой, В	0—10	
Сопротивление изоляции, МОм	1—100	
Электрическая прочность изоляции (при напряжениях до 650 В)	—	
Целость электрических цепей и полярность напряжений	—	

На рис. 10 приведена схема установки тестового диагностирования (проверки исправности) цифровых узлов (устройств, ячеек, ТЭЗ), имеющих до 144 входов и выходов (выведенных на разъем) в условиях опытного и мелкосерийного производства.

Тестовая программа с фотосчитывающего устройства 1 или ручного кнопочного поля пульта управления 2 через устройство ввода 3 по сигналу устройства управления 4 поступает в устройство контроля функционирования 5 и через подключающее устройство 6 на входы проверяемого изделия 7. Информация с выходов последнего в блоке 5 сравнивается с контрольной. При несовпадении информации устройство управления прерывает контроль, и на световом табло появляются слово «брак», номер набора тестпрограммы и номер канала (номера выходов проверяемого изделия, на которых обнаружено несовпадение).

На рис. 11 приведена структурная схема автоматического определения работоспособности электронных приборов большой мощности, работающих

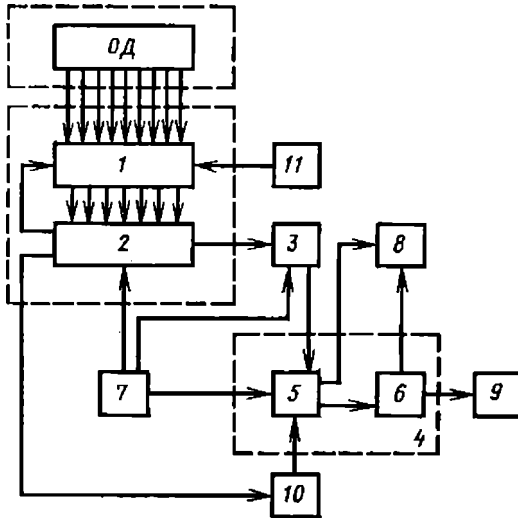


Рис. 11. Схема автоматического определения работоспособности электронных приборов большой мощности:

1 — коммутатор объектов; 2 — коммутатор параметров; 3 — преобразовательное устройство; 4 — устройство логической обработки; 5 — арифметический блок; 6 — логический блок; 7 — программное устройство; 8 — регистрирующее устройство; 9 — индикаторное устройство; 10 — формирователь эталонов; 11 — устройство самоконтроля

в ускорителе элементарных частиц. Коммутатор объектов рассчитан на семь контролируемых параметров мощных электронных усилителей. Коммутация осуществляется в две ступени.

Математическая и логическая обработка контрольной информации, осуществляемая устройством логической обработки, позволяет по величинам отклонений параметров от номинальных значений оценивать степень работоспособности контролируемого объекта, что может быть использовано для решения задачи прогнозирования.

Устройство логической обработки состоит из арифметического и логического блоков и выполняет функции по определению величины и знаков отклонений контролируемых параметров от номинальных значений, а также относительное отклонение каждого параметра от номинального значения.

Арифметический комбинированный блок позволяет согласовывать действия устройств, несущих информацию в параллельном коде, с действиями выходного устройства, последовательно (поразрядно) регистрирующего контрольную информацию.

Результаты контроля оцениваются в логическом блоке и записываются в дискретной форме, причем отклонения от эталонного значения классифицируются по двум зонам: зона А — отклонения от номинального значения до 5%, зона Б — 5—15%. Последовательность выполнения всех операций обеспечивается специальным программным устройством, которое задает «жесткую» программу.

Значение и характер изменения контролируемого параметра в поле допуска оцениваются путем сравнения его с номинальным (эталонным) значением. Эталоны хранятся в формирователе эталонов с внутренней памятью, который задает кодовые комбинации эталонных параметров в соответствии с выбранным алгоритмом.

Комплекс обеспечивает оценку действительного состояния 50-ти электронных приборов большой мощности, работающих в ускорителе элементарных частиц.

2. ТСД СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В зависимости от ситуации в условиях судна структуры систем диагностирования сводятся к пяти типовым структурам. На рис. 12, а показана схема системы диагностирования объекта в период его функционирования. Подобная структура характерна для функционального диагностирования.

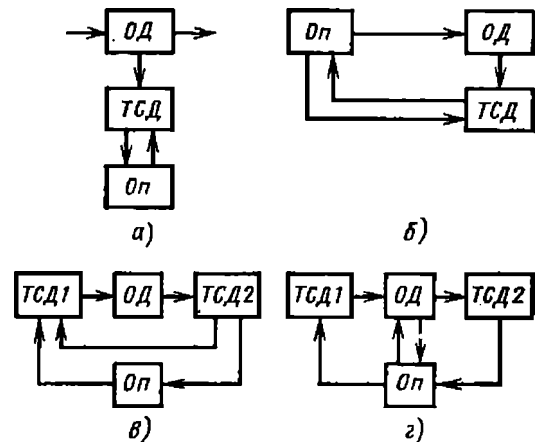


Рис. 12. Структурные схемы систем:

а — функционального диагностирования; б — диагностирования ОД в контролируемом режиме; в — тестового диагностирования; г — тестового диагностирования при наличии связи ОД-О

ТСД играют пассивную роль в процессе диагностирования: они только воспринимают информацию от ОД, характеризующую качество выполнения им рабочих функций. Оператор не имеет непосредственного контакта с объектом. Он только взаимодействует с техническими средствами, управляя процессом обработки информации и воспринимая информацию о состоянии объекта.

Такую структуру СД имеет в тех случаях, когда объект расположен в труднодоступных местах или когда доступ к объекту невозможен и нельзя вводить в объект стимулирующие воздействия с целью его диагностирования.

На рис. 12, б приведена структура СД, которая характерна для выполнения диагностирования объекта в специальном контрольном режиме. В этом случае оператор имеет доступ к объекту для его включения и выключения, а также выполнения соответствующих переключений в объекте в процессе диагностирования.

Как и в схеме, приведенной на рис. 12, а, ТСД участвуют в процессе диагностирования пассивно, выполняя функции переработки информации о состоянии ОД. Оператор имеет двустороннюю связь с техническими средствами: воспринимает информацию и управляет процессом диагностирования. Объект при диагностировании не выполняет своих рабочих функций.

Такую структуру используют для объектов, которые диагностируются либо до или после использования, либо в ходе использования, когда имеются отрезки времени, в течение которых объекты могут быть переведены в специальный контрольный режим. К такого рода объектам на судах относятся электроприводы различного назначения, работающие периодически или в повторно-кратковременном или кратковременном режиме.

На рис. 12, в показана структура СД, в которой, в отличие от предыдущих случаев, ТСД подразделяются на две характерные части:

ТСД1 — активные средства — генераторы тестовых воздействий, которые по команде оператора или по заданной

оператором программе вырабатывают сигналы, поступающие в объект и вызывающие его реакцию; тестовые воздействия могут копировать рабочие воздействия, обычно поступающие в объект при его функционировании, или быть специфическими, предназначенными только для диагностирования объекта;

ТСД2 — пассивные средства, выполняющие функции восприятия и обработки информации о состоянии объекта, заключенной в реакции объекта на стимулирующие сигналы.

Связь между ТСД1 и ТСД2 обеспечивает согласование режимов работы средств диагностирования. Оператор не имеет контакта с объектом, он только управляет активными средствами диагностирования и воспринимает информацию о состоянии объекта от пассивных ТСД. Структура СД, в которой предусмотрена подача на объект стимулирующих воздействий, характерна для тестового диагностирования. Такие СД создают для объектов, расположенных в труднодоступных местах судна. Для диагностирования СД могут быть переведены в специальный контрольный режим.

Структура системы диагностирования, в которой оператор имеет возможность управлять объектом в процессе диагностирования, приведена на рис. 12, г. Такая структура системы диагностирования целесообразна, если оператор имеет доступ к управлению объектом в процессе оценки его состояния. Наличие непосредственного контакта оператора с объектом исключает необходимость в связи между ТСД различного назначения. С помощью штриховой стрелки на рис. 12, г показана связь между ОД и оператором, введение которой образует пятую возможную структуру системы диагностирования судового оборудования. Введение связи ОД—Оп целесообразно только в том случае, когда оператор имеет возможность получать непосредственно от объекта информацию, полезную для получения диагноза. Такая структура характерна для объектов, размещенных на судах в легкодоступных местах, поскольку только в этом случае можно осуществить двустороннюю связь между объ-

ектом и оператором при условии сохранения связей Оп—ТСД1 и ТСД2—Оп.

Приведенные выше структуры СД охватывают практически все возможные типы ТСД, которые используют при диагностировании судового оборудования. Для повышения надежности судового оборудования и обеспечения эффективности профилактических ремонтов на судах используют ТСД, с помощью которых измеряют параметры вибрации оборудования.

В этом случае за основу принимают измерения в октавных полосах вибрационной скорости на корпусах подшипников. Поскольку каждый тип механизма при нормальных условиях работы имеет характерный спектр, состояние машины определяется путем сравнения результатов измерения вибрации с исходным спектром. В ряде случаев можно принять, что нормальному состоянию механизма соответствует уровень вибрации, превышающий среднее значение не более, чем на 6 дБ. При увеличении общего уровня более чем на 6 дБ проводят анализ вибрации в активных полосах и по результатам анализа назначают ремонт механизма. Перед заводским ремонтом судна октавный анализ вибрации выполняют во всех контрольных точках. Внедрение подобной системы позволяет сократить расходы на ремонт судов в 2 раза при одновременном увеличении межремонтного периода эксплуатации на 25 %.

Систему контроля теплотехнических и вибрационных параметров проектируют исходя из следующих допущений: каждый механизм имеет индивидуальные характеристики при исправном техническом состоянии;

значения измеряемых параметров существенно зависят от состояния моря и условий работы судовой энергетической установки;

характеристики механизмов постоянно ухудшаются, и это изменение можно наблюдать и измерять;

единственная требуемая информация для диагностирования состояния машин — анализируемые рабочие характеристики;

оценка вибрационного состояния является одной из основных составных частей программы работы системы.

Подобная система может иметь более 100 датчиков-акселерометров, установленных на подшипниках главной линии вала, турбины, редуктора, а также подшипниках некоторых вспомогательных механизмов. Анализ вибрации проводят в определенных полосах частот, большинство которых содержат 1/3-октавные полосы до 5 кГц включительно.

Работа системы осуществляется автоматически, обработка данных ЭВМ производится в реальном масштабе времени.

Система работает в двух режимах: определения исходных данных и оперативном. Определение исходных данных осуществляется в период испытаний судна и состоит в накоплении данных для различных нагрузочных режимов работы энергетической установки.

На каждом из нагрузочных режимов определяют осредненные для каждой полосы частот абсолютные значения ускорений вибрации каждого датчика.

В определенном режиме работы системы каждый час осуществляется опрос всех вибропреобразователей и индикация (в случае превышения пороговых значений). Все вычисления текущих значений проводят после установления фактической нагрузки и определения тем самым нужной базовой линии, с которой выполняется сравнение измеренных уровней вибрации. Поскольку интерес представляют как текущие уровни вибрации (контроль предаварийного состояния), так и тенденция их увеличения (оценка остаточного ресурса), данные, полученные в результате анализа спектра вибрации, группируются в центральном процессоре с целью формирования для каждого датчика групповых и районных векторов идентификации.

Групповой вектор идентификации суммирует показания уровней вибрации в определенном образом выбранных полосах частот, характеризующих предполагаемый вид дефекта (группы тревоги).

Районный вектор идентификации объединяет уровни вибрации в диапазоне частот, характеризующихся монотонным повышением вибрации вследствие износа.

Особенностью некоторых судовых механизмов является явно выраженный цикл их работы и жесткая последовательность контакта для большинства кинематических пар. Вибрация таких механизмов представляет собой последовательность импульсов со значительной амплитудой, малой длительностью (в сравнении с циклом работы механизмов) и высокочастотным заполнением. При анализе вибрационных сигналов циклических механизмов наиболее эффективным является амплитудно-временной метод анализа.

Наличие простой однозначной зависимости отдельных параметров временной реализации вибрационных сигналов механизмов от его структурных параметров обеспечивает относительную простоту аппаратной реализации этого метода при максимальной глубине диагностирования (до отдельной кинематической пары). При этом выделение информативных параметров сигналов предполагает соответствующую их предварительную обработку, учитывающую особенности формирования этих сигналов и связи их информативных параметров с техническим состоянием механизма.

Наличие прямой пропорциональной зависимости между импульсом динамической силы в рабочем узле и амплитуде огибающей вибрации позволяет использовать параметры интенсивности последней в качестве информативных. Кроме того, от геометрических размеров элементов кинематической пары и зазора между ними зависят также время начала и длительности их взаимодействия. Измерение указанных информативных параметров вибрации механизма предполагает их предварительную обработку, связанную с выделением соответствующего вибрационного импульса из смеси импульсов и шумов. Выделение информативных параметров сигнала (сжатие информации) осуществляют с помощью средств аналоговой техники, а последующую (вторичную) обработку информации — с помощью средств вычислительной техники.

Наиболее распространенным методом выявления источников колебаний и виброакустической диагностики со-

стояния механизмов является метод спектрального анализа. В этом случае с помощью ТСД обеспечивается возможность проведения многочисленных измерений спектральных характеристик вибрации с выполнением многоканального синхронного и синфазного анализов. Это позволяет, во-первых, по распределению в пространстве амплитуды вибрации на исследуемой частоте проводить локализацию интенсивного источника, так как обычно около такого источника уровни вибрации имеют большие значения; во-вторых, получать информацию о фазовых и корреляционных соотношениях между колебаниями различных точек или силами, действующими в различных узлах. Эта информация дает возможность выявить особенности динамических процессов в механизме и формы его колебаний, а также построить математическую диагностическую модель.

Указанные исследования могут быть выполнены измерительным комплексом, структурная схема которого представлена на рис. 13. Спектральная обработка пространственных сигналов возможна аналоговыми (рис. 13, а) и цифровыми (рис. 13, б) средствами. В устройстве (см. рис. 13, а) предусмотрены многоканальный синхронный спектральный анализ и многоканальная магнитная запись.

Применение магнитофонов особенно продуктивно при виброакустическом контроле механизмов в кратковременных динамических режимах, когда затруднительно провести обработку большого объема информации во время работы механизма.

С помощью блоков умножителей определяют комплексные взаимные спектры вибрационных процессов. В схеме предусмотрены среднеквадратичные детекторы и анализаторы огибающих для измерения модуляционных характеристик вибрации.

Для оперативного накопления и обработки информации о состоянии механизмов необходимо применение ЭВМ и специализированных цифровых устройств. В комплексе предусмотрена связь с ЭВМ.

В результате обработки информации на универсальных вычислительных ма-

шинах либо с помощью специализированных малых ЭВМ и микроЭВМ удается получить:

распределение мгновенных значений напряжений с преобразователей;
усредненный по точкам частотный спектр;

максимальные значения спектральных составляющих и спектров в каждой контролируемой точке;

дисперсии амплитуд вибрации по точкам на механизме;

закономерности изменения вибрационных характеристик на различных режимах работы механизма;

спектры вибрации установки при поочередном пуске отдельных механизмов; сравнение этих частных спектров между собой и со спектром установки при работе всех механизмов позволяет локализовать механизмы-источники вибрации на отдельных частотах;

корреляционные и регрессивные характеристики случайных процессов.

Логические алгоритмы диагностики причин повышенной вибрации механизмов основаны на использовании связи особенностей рабочих процессов и состояния деталей со спектром колебаний. В памяти ЭВМ могут храниться образцы сигналов (по наиболее информативным параметрам) — эталонов технического состояния механизмов. Сравнение этих сигналов с фактическими позволяет выявить причины повышенной вибрации механизмов и состояние их узлов.

Причиной повышенной вибрации механизмов и конструкций может быть не только значительная вибрационная интенсивность рабочих процессов механизмов, но и наличие резонансных явлений, и податливость конструкций силовым воздействиям. В связи с этим при проведении виброакустических исследований и диагностики важное место занимают исследования динамических характеристик конструкций и выявление их влияния на величины вибрации.

Для измерения частотных характеристик модуля $|Z|$, действительной ReZ и мнимой ImZ частей механического сопротивления по отношению к усилию, а также угла сдвига фаз

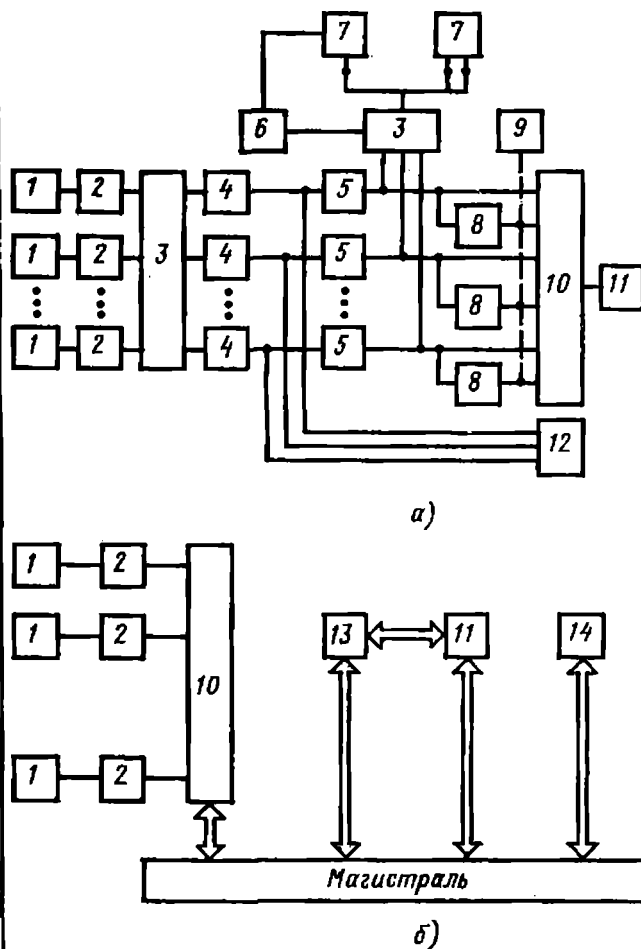


Рис. 13. Структурная схема установок с аналоговой (а) и цифровой (б) обработкой спектральных характеристик вибрации пространственных систем:

1 — датчик; 2 — предварительные усилители; 3 — коммутаторы; 4 — измерительные усилители; 5 — анализаторы; 6 — фазовращатель; 7 — измерители взаимных спектров; 8 — среднеквадратичные детекторы; 9 — анализатор огибающих; 10 — многоканальный преобразователь: аналог-код; 11 — ЭВМ; 12 — многоканальный магнитофон; 13 — блок памяти; 14 — блок управления

между усилием и колебательной скоростью необходимо:

воздействовать на исследуемые конструкции гармонической силой во всем исследуемом диапазоне частот;

получить информацию на каждой частоте о действующей силе и скорости возбуждаемых колебаний;

определить модуль отношения сигнала, пропорционального силе, к сигналу, пропорциональному скорости, с записью частотной характеристики этого отношения;

определить угол сдвига фаз между силой и скоростью;

провести умножение на каждой частоте сигнала, пропорционального мо-

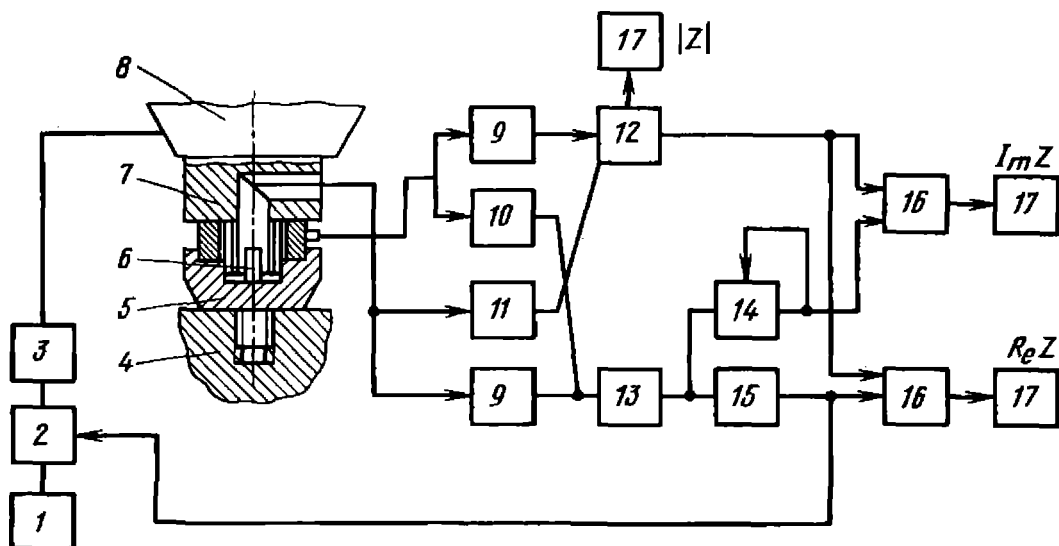


Рис. 14. Структурная схема измерителя механических сопротивлений:

1 — генератор; 2, 14 — блоки компрессии; 3 — усилитель мощности; 4 — исследуемая конструкция; 5 — переходник; 6 — датчик ускорения; 7 — датчик силы; 8 — вибратор; 9 — предварительные усилители; 10, 11 — корректирующие усилители; 12, 13 — измерительные усилители силы и ускорения; 15 — измерительный интегрирующий усилитель; 16 — множители; 17 — самописцы

дулю сопротивления, на косинус и синус угла сдвига фаз между силой и скоростью и зафиксировать частотные характеристики этих произведений.

На рис. 14 представлена структурная схема устройства, позволяющего измерять значения механических сопротивлений с применением электродинамических, пьезоэлектрических или электромагнитных вибраторов.

Электрический сигнал с генератора звуковой частоты через блок компрессии и усилитель мощности поступает на вибратор. Частота сигнала изменяется плавно, а напряжение регулируется блоком компрессии таким образом, что уровень скорости возбуждаемых колебаний поддерживается постоянным во всем частотном диапазоне. В таком случае силовое воздействие пропорционально модулю сопротивления исследуемых конструкций, и записанная на регистраторе частотная характеристика действующего усилия соответствует частотной характеристике модуля сопротивления. Произведение сигналов силы U_F и скорости U_r с учетом косинуса угла α сдвига фаз между ними пропорционально действительной части сопротивления ReZ , а произведение сигналов силы и скорости с учетом си-

нуса угла сдвига фаз — мнимой части сопротивления ImZ .

Сигнал ускорения с помощью интегрирующего усилителя преобразуется в сигнал, пропорциональный вибрационной скорости, и операцию умножения U_F , U_r и $\cos \alpha$ выполняет электронное умножающее устройство. Постоянная составляющая напряжения на выходе умножающего устройства пропорциональна величине $U_F U_r \cos \alpha$ и записывается на ленту самописца, т. е. автоматически фиксируется частотная характеристика действительной части сопротивления.

С помощью аналогичного умножения определяется и мнимая часть сопротивления, для чего перемножаются сигнал силы и сдвинутый на 90° сигнал скорости, получаемый с помощью блока компрессии, на вход которого поступает напряжение, пропорциональное вибрационному ускорению. Напряжение с умножителя записывается на самописец, снабженный линейным потенциометром для определения знака мнимой части.

На рис. 15 приведена схема еще одной системы диагностирования судового оборудования.

Устройство сопряжения обеспечивает согласование ТСД с объектом диагностирования I и включает переход-

ный коммутатор 2 и блок искателей 3. ОД через это устройство подключается к адаптеру 4, на котором с помощью проводного монтажа задана постоянная часть программы проверки группы ОД. Варьируемый комплект стандартных приборов обеспечивает визуальный контроль, измерение параметров и задание входных воздействий, соответствующих условиям функционирования ОД. Комплект состоит из частотомера 5, осциллографа 6, измерителя параметров импульсов 7, цифрового мультметра 8, генератора импульсов 9 и генератора гармонических сигналов 10.

Через специализированное устройство осуществляется информационная совместимость ОД с ТСД и включаются: блоки задания уровней логических сигналов 11 и электронной нагрузки 12, программируемый источник питания 13, источник переменного напряжения 14, источник питания 15, измерительный блок 16, который обеспечивает коммутацию в ТСД некоторых типов специализированных устройств и комплектов стандартных приборов. В состав специализированного устройства входят: функциональный генератор 17, преобразующий входной код в сигнал (сигнал может иметь одну из следующих форм: импульсную, треугольную, пилообразную, синусоидальную); преобразователь «код—проводимость» 18 и блок пассивной сильноточной нагрузки 19.

В системе предусматривается возможность ручного и автоматического выполнения основных операций. При ручном режиме работы используют специальный блок коммутации 20; при автоматическом режиме работы комплекс ТСД сопрягается с ЭВМ любого типа с помощью соответствующей интерфейсной карты 21.

При изучении виброакустических сигналов и источников их возникновения для диагностики судового оборудования часто необходима информация о труднодоступных или недоступных для кабельных систем точках, а также подвижных или вращающихся узлах. В этом случае могут быть использованы автономные микроэлектронные блоки съема информации с памятью, которые располагают около

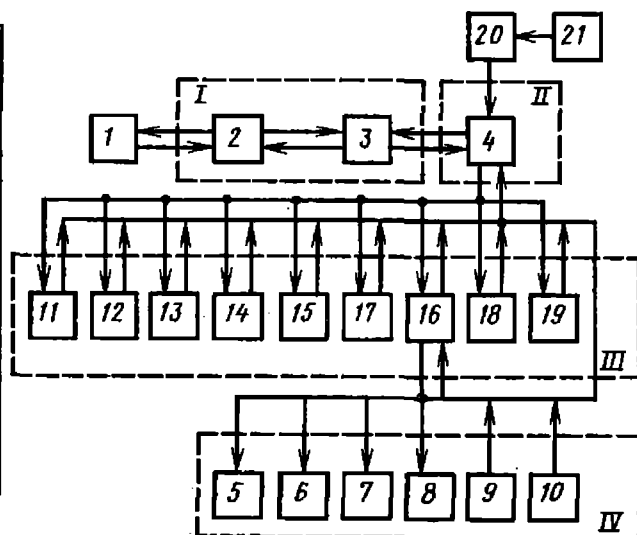


Рис. 15. Структурная схема системы диагностирования судового оборудования:

I — устройство сопряжения; *II* — комплект адаптеров; *III* — специализированное устройство; *IV* — варьируемый комплект стандартных приборов

датчика виброакустической информации. Информация в форме дискретных отсчетов значений виброакустического сигнала накапливается в памяти на больших интегральных схемах. После заполнения памяти и остановки механизма эта информация может быть проанализирована обычными методами.

На рис. 16 приведена структура построения автономного блока с памятью для съема и хранения информации о вибросигнале. Сигнал, поступающий с датчика D_i через усилитель U_i , преобразуется, например, в семиразрядное слово $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, q_i$, с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и заносится в регистр памяти слова. Слова формируются с периодом T_0 , зависящим, согласно теореме Котельникова, от ширины спектра преобразуемого сигнала ($T_0 \geq 16$ мкс при ширине спектра вибросигналов 0—20 кГц). Для управления работой АЦП необходим формирователь тактовых сигналов с периодом T_0 .

Информация из регистров памяти слова вводится в запоминающие устройства (ЗУ). Возможны два способа организации блока ЗУ: каждому разряду слова соответствует свой кристалл (микросхема) ЗУ; слово записывается в одну микросхему ЗУ.

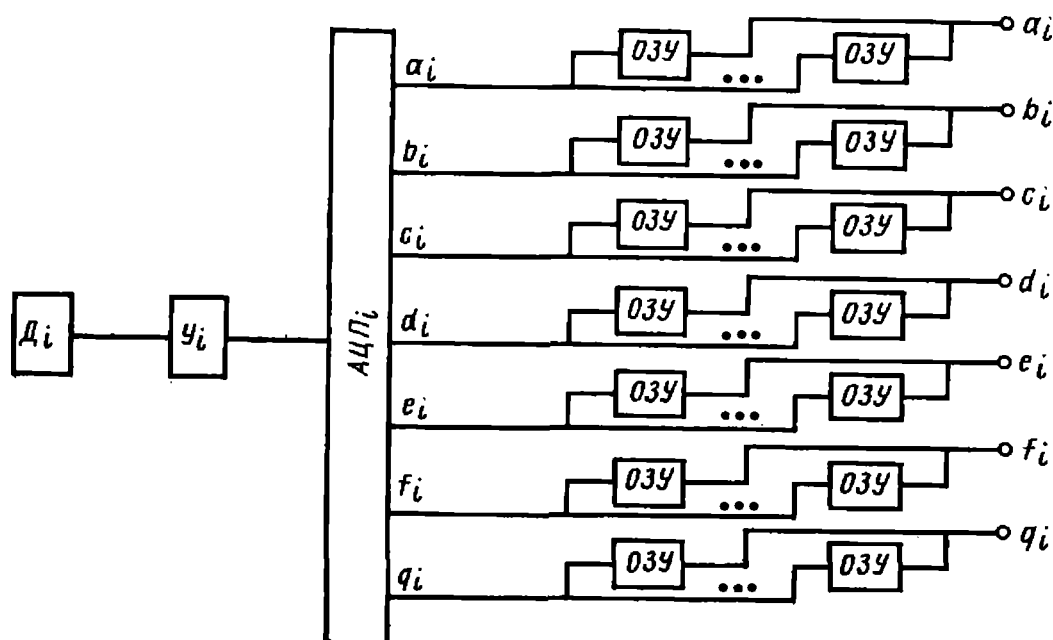


Рис. 16. Структура автономного блока с памятью и параллельным съемом информации для съема и хранения информации о вибросигнале

Первый способ соответствует параллельному вводу информации в соответствующие ЗУ. Каждый разряд слова записывается в свое оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), что обеспечивает возможность параллельного ввода разрядов слова в устройство системы обработки вибросигналов при выводе из блока ОЗУ. При емкости ОЗУ, равной 16 К байт, и $T_0 = 16$ мкс время накопления информации одним кристаллом ОЗУ составляет примерно 0,25 с. Непрерывное время сбора информации может быть увеличено за счет наращивания числа кристаллов ОЗУ на разряд слова. При этом информационные входы (и выходы) ОЗУ, относящиеся к одному разряду слова, соединяются параллельно. Коммутация ОЗУ производится по шине «выбор кристалла».

Из статистических параметров вибрации, применяемых для диагностирования состояния узлов механизмов и машин, применяют функцию корреляции, спектр, биоспектр и законы распределения вероятностей амплитуды вибрации.

3. ТСД АВТОТРАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для поиска и предупреждения отказов автомобилей применяют специализированные стационарные стенды

и переносные приборы: стенды и приборы для диагностирования системы электрооборудования; газоанализаторы; специализированные приборы для проверок состояния кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов, систем питания, охлаждения, смазочной системы.

Методы диагностирования этих систем и механизмов подразделяют на комплексные (функциональные) и поэлементные. *Комплексное диагностирование* осуществляют по тягово-экономическим параметрам (мощность, крутящий момент, расход топлива), шумам и стукам, составу отработавших газов; *поэлементное диагностирование* — по выходным параметрам периодически повторяющихся процессов, виброакустическим параметрам, герметичности рабочих объектов, давлению, производительности, температуре масла и топлива, а также анализу состава отработавших газов и др.

Особую актуальность в связи с возникшими проблемами экономии топлива и охраны окружающей среды приобрели ТСД двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Номенклатуру диагностических параметров двигателей внутреннего сгорания регламентирует ГОСТ 23435—79. Проверку работоспособности двигателя выполняют по пяти структурным пара-

метрам: эффективной мощности двигателя, давлению масла в главной масляной магистрали, удельному расходу топлива, содержанию оксида углерода и дымности отработавших газов дизелей. Кроме этого, регламентированы структурные параметры для поиска локальных дефектов двигателей в их составных частях. При диагностировании цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма к контролируемым параметрам относят также зазоры в элементах этих составных частей ДВС.

Состояние механизма газораспределения оценивают по фазам газораспределения и зазорам в элементах механики; состояние систем питания карбюраторных ДВС — по удельным расходам топлива через жиклеры, уровню топлива в поплавковой камере карбюратора, производительности топливного насоса и давлению на выходе насоса. Установлены структурные параметры для систем смазывания и охлаждения. Состояние систем зажигания карбюраторных двигателей и электрооборудования ДВС оценивают по углу установки зажигания и его изменению от действия регуляторов, зазору между контактами прерывателя, асинхронизму искрообразования в цилиндрах, зазорам между втулкой и валиком распределителя, радиальным биением кулачка прерывателя, электрическим параметрам катушки зажигания, конденсатора и проводов высокого напряжения, а также по зазорам между электродами свечей, электрической мощности генератора, напряжению, поддерживаемому регулятором, характеристикам диодов генератора, электрической и механической мощности стартера, состоянию аккумуляторных батарей.

Все это множество структурных параметров ДВС может быть определено в результате измерения следующих диагностических параметров:

частоты вращения коленчатого вала двигателя;

момента на коленчатом валу;

параметров вибрации составных частей (виброперемещения, виброскорости и виброускорения);

временных интервалов или угловых

перемещений коленчатого вала в функции времени;

давления и разрежения жидкостей и газов (средние значения или кривые изменения давлений во времени);

расхода жидкостей и газов;

содержания CO , CO_2 и углеводородов в отработавших газах, дымности газов;

температуры и перепадов температур;

напряжения и тока в первичных или вторичных цепях системы зажигания или в цепях электрооборудования (средние значения или изменения во времени);

степени загрязненности масла или химического состава загрязнения.

Диагностирование ДВС осуществляют с помощью приборов по герметичности рабочих объемов, функциональным параметрам, параметрам рабочих процессов, структурным параметрам, виброакустическими методами, по концентрации продуктов износа и т. п.

По *функциональным параметрам* определяют мощность и крутящий момент двигателя; подачу топливного насоса, частоту вращения коленчатого вала и др. По изменению *виброакустических параметров* оценивают техническое состояние двигателей и их систем, агрегатов трансмиссии, подшипников и других деталей и сопряжений.

Концентрацию продуктов изнашивания в масле определяют методами спектрального анализа. С помощью этих методов устанавливают пригодность масла к дальнейшему использованию и степень износа (или интенсивность изнашивания) отдельных сопряжений кривошипно-шатунного механизма, цилиндропоршневой группы двигателя, износ сопряжений агрегатов, трансмиссии и т. д.

По *структурным параметрам* определяют техническое состояние отдельных систем, агрегатов и сопряжений автомобиля. К этим параметрам относят, например, зазоры в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала и клапанном механизме, углы установки управляемых колес, свободный и рабочий ходы тормозной педали и др.

Диагностирование *мощностных показателей* двигателей непосредственно

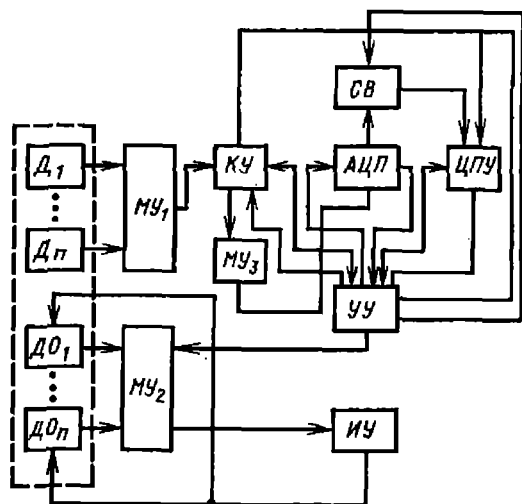


Рис. 17. Система диагностирования оборудования автомобилей

на автомобиле осуществляют на специальных тормозных стендах с беговыми барабанами или бестормозными методами с помощью малогабаритных приборов.

Стенд с беговыми барабанами состоит из роликового узла (беговых барабанов, тормозных устройств, инерционных масс), колонки с контрольно-измерительной аппаратурой и установки для отсоса отработавших газов. Дополнительно в состав стенда могут входить: вентилятор, расходомер топлива, самописец для записи диаграммы силы или мощности, развиваемой автомобилем на ведущих колесах. На стендах воспроизводят режимы работы двигателя и трансмиссии, близкие к дорожным.

С помощью бортовых систем контроля автомобиля измеряют уровни: тормозной жидкости, электролита в аккумуляторной батарее, охлаждающей жидкости, жидкости в бачке стеклоомывателя и масла в картере двигателя, а также температуру охлаждающей жидкости и тормозных накладок, износ тормозных накладок, напряжение в контрольных точках системы электрооборудования, разрежение в вакуумном усилителе тормозного механизма и давления масла в главной масляной магистрали двигателя и воздуха в шинах.

На рис. 17 приведена схема системы диагностирования оборудования автомобилей для оценки (измерения) линейных и угловых перемещений, а также ряда других неэлектрических

параметров. На диагностируемые узлы оборудования автомобиля устанавливают датчики (\$D_1, D_2, \dots, D_n\$), сгруппированные в функциональные группы. При диагностировании по команде устройства управления (УУ) исполнительное устройство (ИУ) воздействует на узлы оборудования, вызывая их реакции. Реакции фиксируются датчиками отклика (\$DO_1, DO_2, \dots, DO_n\$), масштабируются и воздействуют на УУ, которое запускает коммутационное устройство (КУ). Коммутационное устройство переключает датчики \$D_1, D_2, \dots, D_n\$. После каждого переключения на выходе КУ формируется импульс «конец измерения» и номер подключенного канала в двоично-десятичном коде. Импульс «конец измерения» включает аналого-цифровой преобразователь (АЦП), на выходе которого в двоично-десятичном коде формируется сигнал, поступивший с датчика. При измерении зазоров в рулевом управлении это соответствует выборке зазора в кинематической паре в одну сторону. Через УУ сигнал «конец измерения» синхронизирует регистр памяти в сумматоре-вычислителе (СВ), и одновременно УУ через масштабирующее устройство МУ2 вновь запускает исполнительное устройство. Применительно к измерению зазоров в рулевом устройстве это соответствует выборке зазоров в противоположную сторону. Коммутационное устройство вновь воздействует на датчики. С АЦП на сумматор-вычислитель поступают коды новых значений измеряемой величины, соответствующие повторной выборке зазоров. На выходе СВ появляется код разности, соответствующий измеряемой величине.

Цифропечатающее устройство (ЦПУ) регистрирует в десятичной системе номер и величину оцениваемого параметра. После регистрации значения последнего параметра в группе устройство управления выдает сигнал на оценку очередной группы параметров.

Современные средства диагностирования системы электрооборудования и зажигания двигателей позволяют производить диагностирование автомобилей, оснащенных и не оснащенных системой встроенных датчиков и конт-

рольных точек. Средства диагностики укомплектовываются дополнительно стробоскопом, навесными датчиками первого цилиндра и высокого напряжения, а также газоанализаторами.

Частоту вращения коленчатого вала определяют с помощью электрического тахометра (рис. 18) по частоте следования импульсов первичного тока. Импульсы первичного тока, снимаемого с прерывателя-распределителя, управляют моностабильным (колебательным) контуром, который пропускает ток в течение определенного времени после размыкания контактов прерывателя-распределителя, а затем по прошествии этого времени возвращается в исходное токонепроводящее состояние. После каждого размыкания контактов моностабильный контур создает электрический импульс определенной продолжительности.

Моностабильный контур управляет запирающим блоком прибора. Интегрирующий блок выдает на показывающий прибор среднее значение силы тока, пропорциональное частоте вращения коленчатого вала.

Структурная схема прибора для измерения угла опережения зажигания (рис. 19) состоит из датчиков первого цилиндра и стробоскопа (или датчика верхней мертвой точки), мультивибратора и индикатора. Мультивибратором задается величина рассогласования между выходным сигналом датчика первого цилиндра и управляющим импульсом стробоскопа. Если установить величину рассогласования выходного сигнала по сравнению с управляющим импульсом, например 0,17 рад, то лампа вспышкает после того, как коленчатый вал повернется на этот угол. Таким образом, при наличии одной подвижной и одной неподвижной меток можно определить угол опережения зажигания в диапазоне функциональных возможностей прибора.

Для диагностирования системы оборудования легковых автомобилей применяют стационарные и передвижные стенды. В комплект стенда входят: осциллограф, прибор измерения угла замкнутого состояния контактов прерывателя-распределителя и угла опережения зажигания, прибор измере-

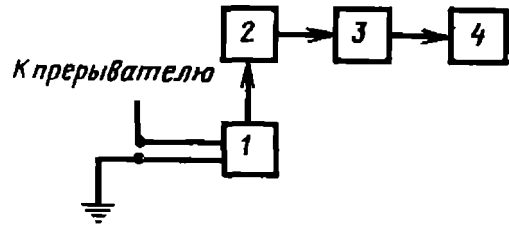


Рис. 18. Структурная схема прибора для измерения частоты вращения коленчатого вала:

1 — моностабильный колебательный контур; 2, 3 — блоки соответственно запорный и интегрирующий; 4 — показывающий прибор

ния частоты вращения коленчатого вала и относительной мощности, газоанализатор, авометр, блок измерения давления, разрежения и потерь давления (мановакуумметр), стробоскоп, зонд газоанализатора.

Из числа простейших переносных приборов используют приборы, состоящие из тахометра, вольтметра, и измерителя угла замкнутого состояния контактов прерывателя-распределителя зажигания.

Для измерения угловых и линейных зазоров применяют дифференциальные индуктивные преобразователи. Структурная схема устройства для дифференциального измерения угловых зазоров в многоступенчатых зубчатых передачах показана на рис. 20. Электродвигатель 1 привода мощностью (0,001—0,05) N (N — номинальная мощность, передаваемая диагностируемым редуктором) через волновой редуктор 2 с передаточным числом 1000—3000 механически соединен с выходным валом диагностируемого редуктора 4 через муфту 3, включающую в себя тензорезисторный преобразователь крутящего момента. Мостовая схема из тензорезисторов, наклеенных на преобразователе, соединена через

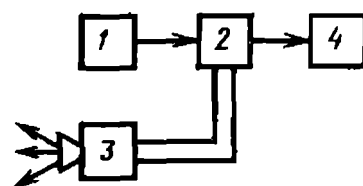


Рис. 19. Структурная схема прибора для измерения угла опережения зажигания:

1 — датчик первого цилиндра; 2 — ждущий мультивибратор; 3 — стробоскоп; 4 — индикатор

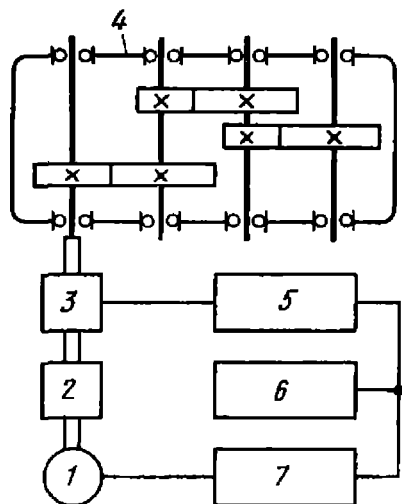


Рис. 20. Схема устройства для дифференцированного измерения угловых зазоров многоступенчатого редуктора

токоъемное устройство или гибкий кабель с тензометрическим усилителем 5. Для регистрации момента к выходу тензометрического усилителя подключен быстродействующий самописец 6. К этому же выходу подключено пороговое устройство 7 предельного момента для отключения приводного электродвигателя устройства при достижении предельного значения момента на валу.

Процесс диагностирования сводится к следующему. Вначале включают приводной электродвигатель. Вал диагностируемого редуктора поворачивается до выбора всех зазоров. Дальнейшее увеличение момента сопротивления вызывает (при определенном значении момента) срабатывание порогового устройства. Контакты реле порогового устройства обеспечивают реверсирование электродвигателя, в результате чего происходит последовательный выбор зазоров в диагностируемом редукторе. При входе в зацепление каждой последующей пары сопряжений осуществляется ступенчатое измерение момента сопротивления.

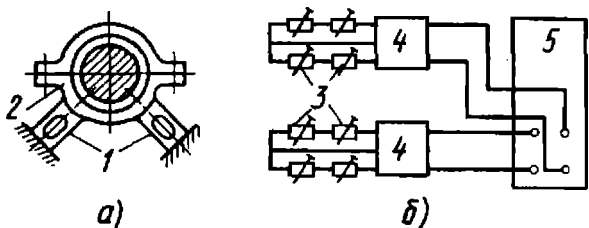


Рис. 21. Тензометрические стержневые силоизмерители для измерения сил, действующих на опоры подшипников

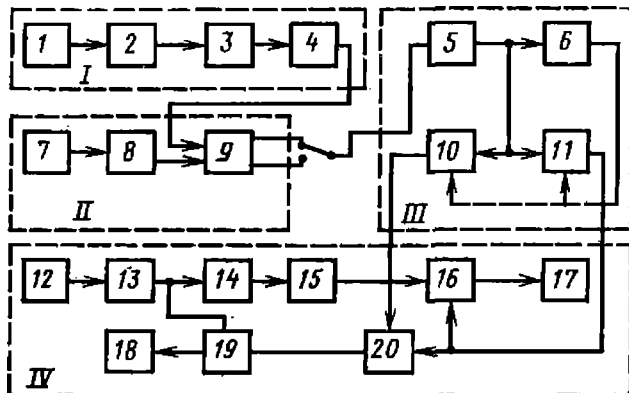


Рис. 22. Структурная схема прибора для диагностирования тракторных двигателей на основе измерения фазовых параметров вибрации:

1 — вибропреобразователь; 2 — фильтр резонансной частоты вибропреобразователя; 3 — усилитель; 4 — пороговая схема; 5 — генератор пилообразного напряжения; 6 — схема запоминания; 7 — преобразователь опорной точки; 8 — усилитель-формирователь; 9, 16 — триггеры; 10, 11 — схемы сравнения; 12 — вибропреобразователь; 13 — фильтр резонансной частоты вибропреобразователя; 14 — усилитель; 15 — пороговая схема; 17 — измеритель фазы; 18 — измеритель максимальной амплитуды; 19 — схема совпадения; 20 — триггер строб-импульса

Запись изменения момента сопротивления во времени используют в качестве исходной диагностической информации.

Для измерения сил, действующих на опоры подшипников, в двух взаимноперпендикулярных плоскостях применяют различные типы силоизмерителей. Тензометрические стержневые силоизмерители показаны на рис. 21. Опора 2 подшипника (рис. 21, а) присоединена к станине через два стержневых силоизмерителя 1. Для снижения погрешности измерения сил за счет деформаций изгиба силоизмерительные стержни изготавливают с двутавровым сечением. С этой же целью на противоположные стенки стойки двутавра наклеено по два тензорезистора (рис. 21, б). Тензорезисторы каждой пары соединены последовательно и включены в одно из плеч полумостовых схем, которые соединены с усилителями 4 и регистратором 5.

Структурная схема прибора для диагностирования тракторных двигателей на основе измерения параметров вибраций показана на рис. 22.

С помощью прибора определяют следующие параметры технического состояния двигателя: угол опережения подачи топлива по всем секциям, состояние форсунок, тепловые зазоры в газораспределительном механизме, фазы газораспределения, зазоры между поршнем и гильзой цилиндра и частоту вращения коленчатого вала.

Прибор состоит из четырех функциональных узлов-каналов: синхронизации (I), опоры (II); формирования стробирующего импульса (III); измерительного (IV). Канал синхронизации служит для формирования импульса синхронизации с частотой следования, равной частоте циклов работы двигателя.

Канал опоры предназначен для формирования импульса, который на временном интервале связан с угловым положением коленчатого вала двигателя. Канал состоит из индуктивного преобразователя, усилителя-формирователя импульса и триггера для выделения отметки верхней мертвой точки.

Канал формирователя строб-импульса служит для формирования импульса определенной длительности и фазы по углу поворота коленчатого вала в течение цикла работы двигателя независимо от частоты вращения. Положение стробирующего импульса соответствует моменту появления виброударного импульса от проверяемого механизма двигателя. Канал состоит из генератора пилообразного напряжения, период которого равен периоду малой амплитуды; в канале применен отдельный измеритель, включенный через схему совпадения, выделяющую соответствующий вибрационный импульс.

На постах диагностики автомобильных двигателей системы «Сельхозтехника» используют диагностические мотор-тестеры. Тестер обеспечивает проверку следующих параметров двигателя: частоту вращения коленчатого вала от 0 до 5000 об/мин, максимальную мощность, расход топлива, давление в топливной системе, диагностические параметры системы зажигания и электрооборудования и работоспособность каждого цилиндра. В устройство мотор-тестера входит ряд измерительных приборов. В измерительном

блоке установлены осциллограф, блок питания, 14 электронных блоков, которые, обрабатывая сигналы с датчиков, выполняют измерения параметров двигателя. Частота вращения и мощность, развиваемая двигателем, фиксируются постоянно, а все остальные параметры — только при установке соответствующих переключателей на заданный параметр измерения.

В комплект мотор-тестера входят следующие датчики: первого цилиндра (датчик представляет собой трансформатор тока, первичная обмотка которого включается в цепь высокого напряжения свечи зажигания, вторичная подключается к мотор-тестеру), емкостной топливной системы (датчики расхода топлива, давления и разрежения топливновоздушной смеси во впускном трубопроводе).

Техническая характеристика мотор-тестера

Диапазон измерения:	
частоты вращения, об/мин	400—5000
разрежения, кПа	0—6,7
количества картерных газов, л/мин	15—150
расхода топлива, см ³ /мин	150—700
давления топлива, кПа	0—100
угла опережения зажигания, п. к. в.	0—60
напряжения постоянного тока, В	0—4; 0—15
сопротивления, Ом (кОм)	0—100 (0—100)
емкости конденсатора, мкФ	0—0,5
Погрешность измерения, %:	
напряжения	2
частоты вращения, разрежения, расхода топлива, давления топлива, угла опережения зажигания	3
мощности двигателя, количества картерных газов, угла замкнутого состояния контактов	5
сопротивления и емкости	10
Напряжение питания (частота)	220 В ± 10 % или 12 В ± 10 % (50 Гц)
Потребляемая мощность, Вт	Не более 70
Габаритные размеры, мм:	
длина	550
ширина	900
высота	1490
Масса, кг	100

Большинство ТСД гидравлических приводов основаны на измерениях параметров установившегося потока рабочей жидкости (статопараметриче-

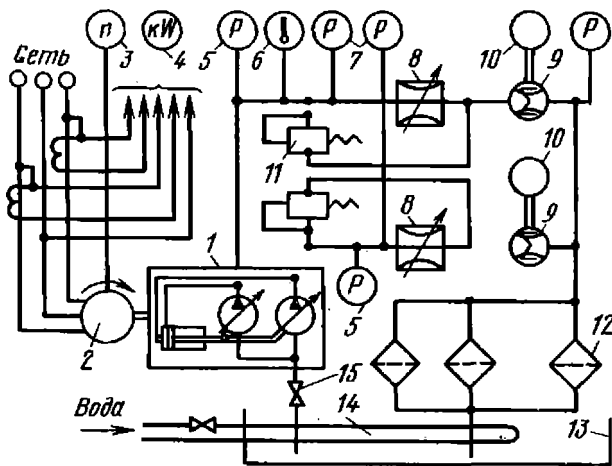


Рис. 23. Схема гидромеханической части диагностического стенда

ский метод). Эти средства позволяют осуществлять общее диагностирование гидравлических систем и их составных частей. Структурные и диагностические параметры, определяемые ими, соответствуют номенклатуре оценочных параметров, установленных стандартами на правила приемки и методы испытаний основных составных частей гидроприводов. Недостаток этих средств — необходимость рассоединения гидросистем при диагностировании, что снижает надежность соединений и создает возможность загрязнений рабочих жидкостей.

Одна из важнейших задач развития ТСД гидроприводов — создание средств, не требующих рассоединения гидросистемы. Эта задача может быть решена применением встроенных преобразователей или встроенных переходных устройств, а также реализацией методов диагностирования, не требующих последовательного включения в гидросистемы преобразователей и нагружающих устройств. К числу таких методов относят виброакустические и термодинамические методы диагностирования. Для локализации дефектов перспективны средства, основанные на анализах виброакустических, гидродинамических и переходных процессов ОД.

В связи с повышением требований к надежности гидроприводов и переходом на более высокие рабочие давления постоянно растут требования к чистоте рабочих жидкостей. Контроль чистоты жидкостей требует специальных приборных средств.

Объемный КПД, коэффициент подачи и полный КПД составных частей гидравлического привода можно определить с помощью комплектов отдельных приборов или испытательных стендов.

На рис. 23 показана схема части стенда для диагностирования двухсекционного насоса. Привод диагностируемого насоса 1 осуществляется с помощью электродвигателя 2. Всасывающая магистраль насоса через вентиль 15 соединена с баком 13. Бак установлен выше уровня всасывающей магистрали и оборудован лабиринтной системой пеногашения 12 и системой охлаждения жидкости с радиатором 14. Напорные магистрали диагностируемого насоса соединяют с баком через последовательно включенные дроссели 8, расходомеры 9 и систему фильтров 10. Для защиты системы перед дросселями устанавливают предохранительные клапаны 11, отрегулированные на максимальное давление для диагностируемого насоса. Контроль давления осуществляют с помощью манометров 7, включенных параллельно предохранительным клапанам.

Для точного измерения среднего значения давления и параметров пульсаций давления в напорных магистралях установлены тензорезисторные преобразователи давления 5, имеющие линейную частотную характеристику в полосе 0—10 кГц. Измерение температуры рабочей жидкости осуществляется термисторным термометром 6, установленным в одной из секций до дросселя.

В качестве расходомеров для измерения подачи применены гидромоторы с индукционными преобразователями 10, генерирующими электрические импульсы при проходе каждого шлица выходного вала гидромотора вблизи магнитопровода преобразователя.

Контроль частоты вращения вала приводного двигателя при равных режимах нагружения диагностируемого насоса и изменениях напряжения питающей сети осуществляется с помощью фотоэлектрического преобразователя 3, установленного на валу электродвигателя. Для измерения мощности, потребляемой электродвигателем, установлен килваттметр 4.

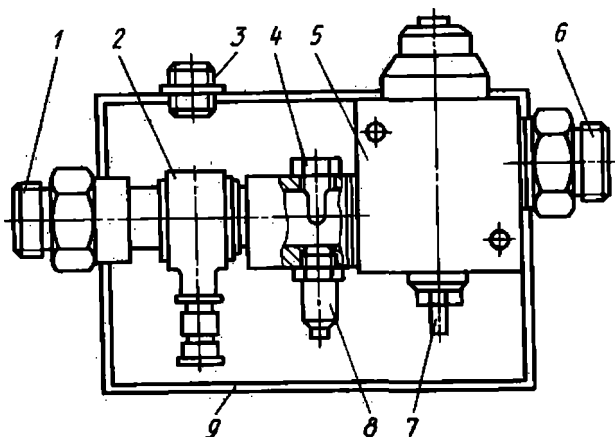


Рис. 24. Блок преобразователей гидротестера ГТ-2:

1, 6 — входной и выходной штуцеры; 2 — турбинно-тахометрический преобразователь расхода; 3 — штепсельный разъем; 4 — термисторный преобразователь температуры; 5 — дроссель; 7 — дренаж дросселя; 8 — тензорезисторный преобразователь давления; 9 — корпус блока

Гидротестеры представляют собой комбинацию преобразователей и приборов, предназначенных для измерения параметров при диагностировании составных частей гидравлического привода.

Гидротестер для диагностирования односекционных насосов и других элементов гидроприводов состоит из двух частей — блока преобразователей и блока приборов. Блок преобразователей состоит из турбинно-тахометрического преобразователя расхода, тензорезисторного преобразователя давления, термисторного преобразователя температуры и регулируемого дросселя.

Конструкция блока преобразователей гидротестера ГТ-2 показана на рис. 24.

При диагностировании составных частей гидросистем с различными номинальными давлениями и подачей насосов применяют несколько типовых размеров блоков преобразователей.

4. ТСД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Состояние технологических комплексов может быть оценено по параметрам технологического процесса, ка-

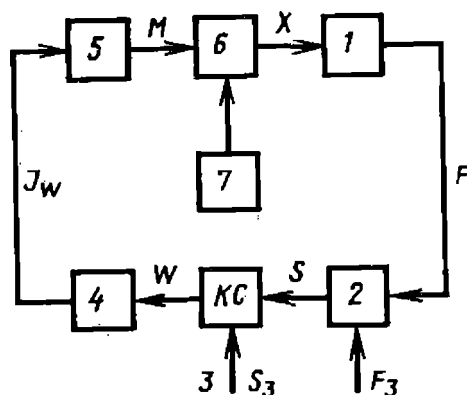


Рис. 25. Схема системы диагностирования технологического комплекса

честву выпускаемой продукции и непосредственно диагностированием технологического оборудования. Выбор того или иного принципа в основном определяет структуру системы диагностирования и состав технических средств.

Система диагностирования образует первый замкнутый контур в автоматизированной системе обеспечения и поддержания требуемого уровня надежности технологических установок (ТУ) непрерывного действия в процессе их функционирования. В качестве критерия оптимизации управления надежностью ТУ используют относительную меру потерь их эффективности функционирования.

В состав СД входит управляющая ЭВМ, с помощью которой осуществляется выбор инструкции по устранению возникшего дефекта и выдача сигналов о состоянии и необходимости ручного ввода.

На рис. 25 приведена схема системы диагностирования, состоящая из блоков:

1 — формирования сигналов; в блоке осуществляется преобразование множества параметров X , характеризующих состояние и режим работы объекта, в множество сигналов F ;

2 — формирования признаков; блок преобразует множество сигналов в множество признаков состояний S путем сравнения текущего значения F с эталонным $F_э$.

3 — классификации; путем сравнения S с $S_э$ блоком устанавливается идентичность состояния объекта одному из множеств W , заданных заранее;

4 — информации; блоком выдаются сообщения J_w , характеризующие состояние объекта, и определяется программа действий по защите технологического процесса или восстановлению работоспособности технологической установки;

5 — восстановления; реализует рекомендации, поступающие от блока 4, подавая управляющие воздействия M на объект 6.

В схеме предусмотрен также генератор тестов 7, стабилизирующий режимы работы технологической установки или генерирующий по заданной программе тестовые воздействия.

Для описания управления, осуществляемого с помощью СД, используется табличная модель, задающая однозначный способ управления в зависимости от состояния ТУ. При этом способе задания вычисления исключаются и осуществляется поиск решения среди хранящихся в таблице в готовом виде.

Определение состояния технологического процесса через измерение качества выпускаемой продукции встречается наиболее часто в автоматизированном производстве, например, при изготовлении труб, прутков, листов и других подобных изделий.

В трубопрокатные станы 140 встраивается линия комплексного контроля качества труб. В состав линии входят два комплекса приборов, средств механизации, технологической автоматики и вычислительной техники.

Приборная система содержит приборы: электромагнитный для выявления труб из стали незапланированной марки; электромагнитно-акустический для контроля толщины стенки труб; магнитный феррозондовый для обнаружения в трубах дефектов типа нарушения сплошности; оптические для контроля наружного диаметра, выявления дефектов на внутренней поверхности труб, а также измерения длины и учета числа годных труб. В линии имеется система сопровождения и сортировки труб по результатам контроля, вычислительный комплекс и пульт управления.

В состав механической части линии входят транспортирующие рольганги, устройства для центрирования труб,

продувочная машина, станок для клеймения; переключатели, сбрасыватели и перекрыватели карманов.

В помещении поста оператора размещается вся электронная часть комплекса средств контроля, пульт управления участком контроля, ЭВМ и другая аппаратура. Линия обеспечивает контроль труб в автоматическом режиме при скорости до 3 м/с. Информация о результатах контроля каждой трубы и исправности устройств, входящих в систему, подается на пульт оператора и в ЭВМ. После статистической обработки информации ЭВМ корректирует технологический процесс прокатки по результатам контроля качества продукции.

Для управления технологическим процессом сварки при производстве труб большого диаметра (400—2000 мм) на металлургических заводах совмещают автоматический акустический и рентгенотелевизионный контроль дефектов сварных швов.

Акустический контроль проводят непосредственно после сварки на расстоянии 1—3 витков от последней сварочной головки. Максимальная скорость контроля 30 м/мин. По сигналу выявляемые дефекты эквивалентны сквозному отверстию диаметром 3,2 мм.

В качестве контактной жидкости используют воду. Температура в месте контакта трубы с искателем на расстоянии 100 м с обеих сторон от шва 100 °С.

Рентгенотелевизионный контроль сварного шва осуществляют на выходе трубы из стана.

В состав оборудования радиационного контроля входят транспортное устройство, позволяющее располагать сварной шов в зоне контроля, рентгеновский аппарат (фокусное пятно 1,5×1,5 мм, напряжение до 150 кВ, ток 10 мА) и телевизионная система с полем контроля 130 мм и видеоконтрольным устройством с экраном 47 см.

На входе телевизионной системы используется рентгеновский электроно-оптический преобразователь (РЭОП) теневого рентгеновского изображения в видимое для энергии порядка 100/130 кэВ. Для передачи изображе-

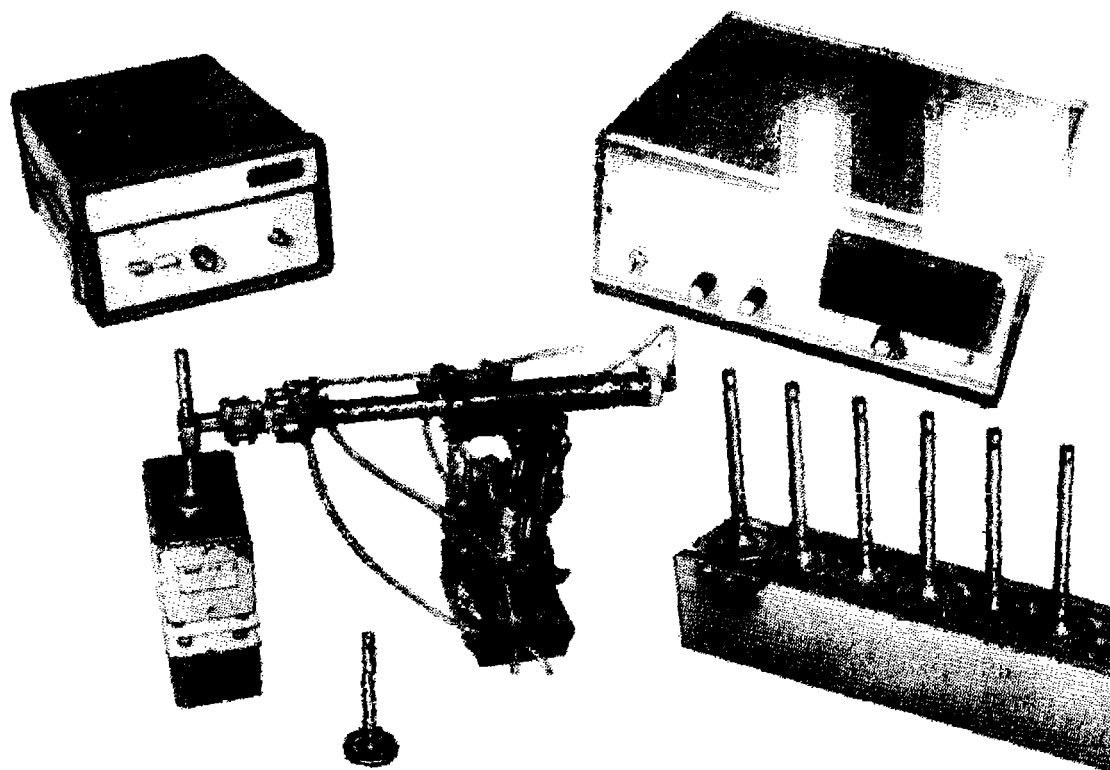


Рис. 26. РТК НК качества клапанов

ния с выходного экрана РЭОП на вход телевизионной системы применяют специальную светосильную оптику. Выявление в процессе производства дефектов сварных швов позволяет ввести обратную связь и корректировать технологический процесс автоматической сварки труб большого диаметра.

В процессе производства широкое применение начинают получать *контрольно-измерительные роботы (КИР)*, представляющие собой совокупность приборов неразрушающего контроля качества продукции, промышленных роботов, выполняющих функции перемещения датчика прибора относительно ОД и разбраковки изделий, а также специализированных устройств связи прибора, робота и объекта, по схеме аналогичной КИР, показанному на рис. 26.

Развитие робототехники и ГПС требует создания методологической и технической баз, способных обеспечить качественные испытания, контроль и диагностирование промышленных роботов (ПР) в производственных условиях.

Робот как объект исследования представляет собой технологическую машину-автомат, обладающую собственной программируемой замкнутой системой управления, поэтому при проведении испытаний, с одной стороны, имеется возможность реализации большого числа разнообразных режимов работы, а с другой стороны, существует явление маскирования неисправностей системы управления дефектами механизмов робота, и наоборот. Последнее существенно осложняет на практике диагностирование ПР и требует сбора и обработки большого количества информации в реальном масштабе времени.

Эти вопросы успешно решаются на основе использования в качестве технического базиса измерительных информационных систем (ИИС) и вычислительных комплексов (ИВК) и совокупности различных квалиметрических оценок и параметров и процедур их получения в качестве методического базиса эксперимента.

Обобщенная схема проведения автоматизированных испытаний ПР по одному параметру (при движении по

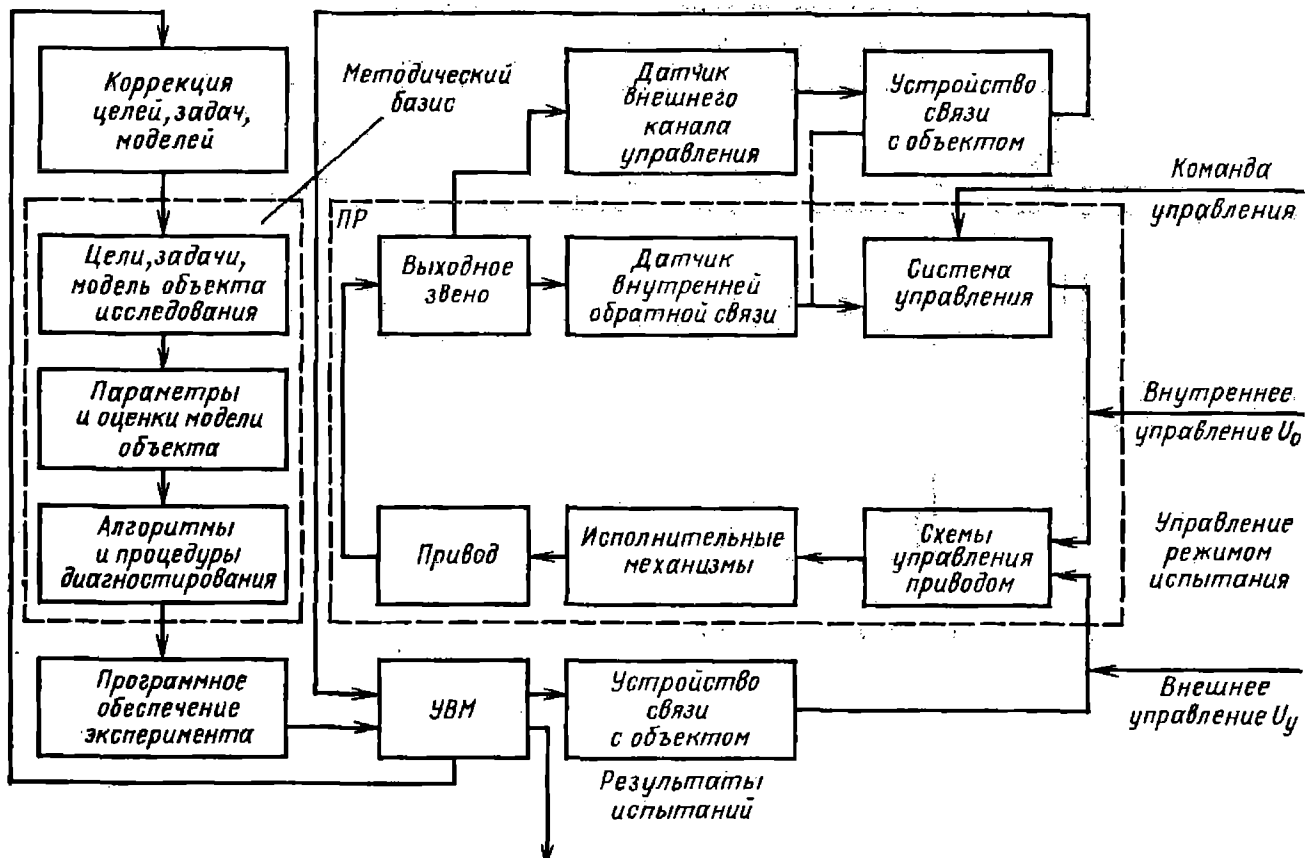


Рис. 27. Обобщенная схема проведения автоматизированных испытаний промышленного робота по одной координате

одной координате) (рис. 27) состоит из собственно промышленного робота, структура которого приведена на рисунке, датчика внешнего канала управления, измеряющего выбранный выходной параметр объекта, управляющей вычислительной машины (УВМ), устройства связи машины с объектом и методического базиса, реализующего метрологическое, информационное и программное обеспечение.

Схема представляет замкнутую самообучающуюся информационную систему, имеющую как минимум два канала управления выходным звеном ПР. ИИС подключается параллельно системе управления ПР таким образом, что образуется независимый канал управления.

Глубина диагностирования может быть увеличена, если использовать соответствующую обработку выходного сигнала датчика внутренней обратной связи, сигналов управления или выходных реакций отдельных элементов привода. В последнем случае необходимо использование дополнительных датчиков контроля.

В связи с ростом числа применяемого в технологических процессах автоматического оборудования, увеличением его сложности и, как следствие, повышением трудовых затрат на его содержание актуальным становится применение для такого оборудования специализированных методов и средств диагностирования. Одной из известных систем диагностирования технологического оборудования является система «эталонных осциллограмм», применяемая для механизмов прерывистого движения типа поворотных столов, барабанов, каруселей и др. На рис. 28 приведены диагностические параметры механизмов поворотных столов и барабанов агрегатных станков с различным типом привода.

В качестве диагностических выбирают параметры, которые несут наибольшую информацию о состоянии механизмов.

Эталонными осциллограммами служат записи параметров, проведенные во время сдачи оборудования в эксплуатацию. Граничные значения контролируемых параметров получают рас-



Рис. 28. Классификация диагностических параметров

четным путем. В комплект диагностической аппаратуры входят датчики давления, виброускорения, скорости, потребляемой активной мощности, крутящего момента и светолучевые и электронно-лучевые осциллографы.

Для токарных многошпиндельных горизонтальных автоматов и полуавтоматов в качестве диагностического параметра принимают крутящий момент на распределительном валу. В результате осуществляется сравнение измеряемых параметров с эталонными осциллограммами крутящих моментов, динамограммами дефектов и значениями дефектных карт для различных моделей станков.

По мере накопления необходимого статистического материала по величинам динамических нагрузок для различных состояний автоматов и закономерностям протекания износа их деталей метод используют для выявления более мелких дефектов.

Исполнительные механизмы ПР являются типичными позиционными механизмами, предназначенными для перемещения определенной массы на заданное расстояние с заданной точностью за минимальное время.

Циклограммы движения этих механизмов включают большое число разбегов, выбегов, остановок, резких изменений скоростей и направлений перемещений, что существенно сказывается на надежности их работы. По-

вышение требований к надежности функционирования ПР обуславливает необходимость создания более совершенных методов их контроля, проверки и диагностирования.

Один из подходов к диагностированию подобных механизмов основан на использовании объективных оценок их состояния, рассчитываемых по значениям основных кинематических и динамических параметров и других характеристик. Каждое техническое состояние ПР характеризуется своим эталоном выбранного диагностического параметра и допуском на отклонение от него. В качестве диагностического параметра ПР используют скорость, ускорение, усилие, давление и т. п. Задача определения технического состояния сводится к задаче отнесения получаемой текущей реализации диагностического параметра к одному из эталонов.

Решение задачи *распознавания контуров машиностроительных деталей* в значительной степени зависит от выбора признаков идентификации, который выполняется на этапе разработки алгоритма по виду представленных к распознаванию объектов. Всегда имеющаяся при таком подходе неоднозначность между любой сверткой первичной информации (полученной, например, с рецепторного поля) в выбранный признак и самим контуром разрешается, как правило, увеличением

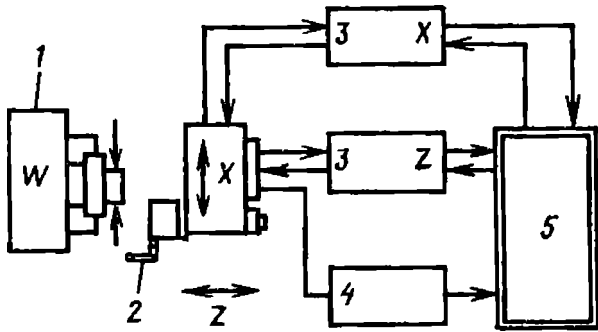


Рис. 29. Структурная схема системы взаимодействия узлов пайки при измерении:

1 — патрон с обрабатываемой деталью; 2 — измерительная головка; 3 — приводы с датчиками перемещений; 4 — сигнал, поступающий с измерительной головки; 5 — система управления станком

числа признаков. При этом всегда вероятно, что при увеличении числа распознаваемых объектов принятый набор признаков будет одинаково определять какие-либо два объекта (или более) из заданной совокупности. В этом случае необходимо найти новые признаки идентификации и переработать на их основе алгоритм распознавания.

Одной из важных задач в распознавании образов является разработка алгоритмов и программ, позволяющих автоматически формировать признаки идентификации независимо от числа объектов в совокупности и их геометрических параметров. Эта задача решается с применением теории моментных инвариантов, согласно которой соблюдается, во-первых, однозначное соответствие между последовательностью двумерных моментов некоторой функции от координат накрытых объектов точек и конфигурацией данного объекта, а во-вторых, инвариантность моментов к плоскому переносу объекта, его повороту и масштабным преобразованиям.

Одним из требований, предъявляемых к автоматизированному технологическому комплексу, является обеспечение автоматического измерения размеров обрабатываемой детали непосредственно на станке. В связи с этим большое распространение получили координатные измерительные устройства, смонтированные в инструментальной оправке. Измерительный индуктивный щуп, отклоняющийся на

некоторую величину от среднего положения в радиальном и осевом направлениях, передает сигнал в момент его контакта с поверхностью детали, который запоминается, и с помощью устройств обратной связи вычисляются координаты X , Y точки касания. Производится сравнение измеренной величины с величиной, установленной программой обработки детали. После этого подается команда либо на продолжение технологического процесса, либо на его корректирование. Поскольку центр щупа датчика и ось шпинделя могут не совпадать, измеряемая величина усредняется после измерений до и после перемещения шпинделя.

Станок из орудия обработки превращается в измерительную машину, точность которой определяется точностью систем координатного перемещения станка. Программирование измерительных процессов включается в программу обработки детали; точность измерения достигает 1 мкм.

Все больше совершенствуются также средства автоматизированного измерения размеров детали вне станка. Для этой цели используют роботы с измерительными щупами. Эти роботы с большой скоростью измеряют деталь по трем координатам. Применяемые методы диагностирования параметров процессов обработки резанием через измерения инструмента и режимов станка приведены в табл. 1.

На рис. 29 показано взаимодействие основных узлов станка при проведении процесса измерений. Сигнал измерительной головки передается в систему управления станком по каналу инфракрасного излучения, а передача энергии в измерительную головку осуществляется индуктивно. Такая система измерения и корректирования обеспечивает точность (в мкм) обработки диаметральных размеров $5 \pm 0,03D$, где D — диаметр обрабатываемой заготовки, мм.

Широкое внедрение робототехнических комплексов (РТК) в большой степени зависит от эффективного использования специализированных средств получения информации об объекте производства, особенностях технологического процесса, состоянии

1. Методы диагностирования параметров процессов обработки резанием

Объект измерения	Метод	Измеряемый параметр	Аппаратура
Инструмент	Прямой	Геометрия инструмента	Микроскоп, фотоматричный измеритель
	Косвенный	Сила резания	Динамометр, тензометрический измеритель силы
Точность изготовления, шероховатость поверхности Шум при резании Температура резания		Индуктивный, оптический и пневматический измеритель диаметра и шероховатости Шумомер Термопара, термопрофиль, тепловизор	
Станок		Зазор между инструментом и деталью	Пневматический, электромагнитный или оптический микрометр
		Радиоволновое излучение	Дозиметр
		Сила резания	Электромагнитный, тензометрический измеритель вращающего момента
		Потребляемая мощность Вибрация	Ваттметр Акселерометр

отдельных узлов и рабочих органов РТК, окружающей обстановки и т. д. В настоящее время известно сравнительно большое число разнообразных средств получения информации в РТК, называемых *датчиками оцувствления роботов* (ДОР).

По назначению ДОР разделяют на пять основных групп: локационные, силомоментные, тактильные, технического зрения и внутренней информации о параметрах рабочих органов РТК.

Локационные ДОР предназначены для определения координат объекта в пространстве, а также скорости его перемещения относительно РТК. Наибольшее число задач локации может быть решено с помощью электромагнитных и акустических дальномеров. Для измерения малых расстояний до токопроводящих объектов применяют вихретоковые ДОР, которые позволяют контролировать расстояния 0—5 мм с погрешностью 5 %.

Вихретоковый ДОР используют также для слежения за стыковым сварочным швом и измерения отклонения сварочной головки от разделки шва на расстоянии 0—10 мм с относительной погрешностью 5 %.

Для измерения расстояний 10—200 и 100—10 000 мм используют ультразвуковые дальномеры, определяющие расстояние по времени прохождения зондирующего импульса от измерителя до объекта и обратно с погрешностью не более 5 %.

На базе локационных дальномеров могут быть построены двухканальные системы измерения углового отклонения объекта от некоторого заданного направления.

Для измерения скорости 0,5—50 м/с движения объекта относительно РТК может быть применен электромагнитный радиоволновый скоростемер, в котором использован эффект Доплера.

Силомоментные ДОР предназначены для измерения сил и моментов сил, возникающих при взаимодействии рабочего органа РТК с объектом. Основным датчиком, выполняющим функцию силоизмерения, является тензорезистор, сопряженный с упругим элементом.

Число измеряемых компонент у шестикомпонентного датчика, устанавливаемого в запястье сборочного робота, — три силы и три момента; у пятикомпонентного датчика — три силы и два момента; у трехкомпонентного датчика — три силы. Диапазон измерения силы 0—100 Н, момента 0—1 Нм; точность измерения 5 %.

В качестве *тактильных датчиков* давления, касания и проскальзывания используют матричные системы из токопроводящей резины, пьезоэлектрических преобразователей и контактных выключателей. Тактильные ДОР могут содержать $(3 \div 5) \times (6 \div 10)$ чувствительных элементов, реагирующих на давление. Часть чувствительных элементов может реагировать на низкие давления, а другая часть — на более высокие давления, необходимые, как правило, для надежного удерживания объекта в рабочем органе РТК. Более простые конструкции тактильных ДОР содержат одиночные концевые микро-выключатели или электрические магнитоуправляемые контакты. Для контроля проскальзывания применяют вращающиеся роликовые системы.

Наиболее сложными ДОР являются *датчики технического зрения* (ДТЗ). В качестве ДТЗ используют промышленные телевизионные установки ПТУ с автоматизированной системой обработки изображения (АСОИЗ). В ДТЗ применяют камеры; телевизионную видиконную, с фотодиодной матрицей и приборами с зарядовой связью (с ПЗС-структурой). Удаление от объекта 0,05—10 м. В АСОИЗ необходимо предусматривать автоматическое измерение интересующих областей, площадей, периметров, выделение интересующих фрагментов с заданными свойствами, фильтрацию помех, препарирование изображения, сегментирование и т. п.

Датчики внутренней информации применяют для контроля функционирования основных рабочих органов

РТК и обеспечения точности управления системой приводов через линейные и угловые измерения. В цепях обратных связей позиционных и контурных систем управления наиболее широко применяют электромеханические и фотоэлектрические кодовые датчики. В качестве электромеханических датчиков внутренней информации используют двухотсчетные и одноотсчетные преобразователи индукционного типа, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, сельсины и др.

5. ТСД ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

Своевременная диагностика дефектности металла элементов оборудования в процессе эксплуатации является важнейшим фактором обеспечения надежной и безопасной работы АЭС.

Металл для изготовления оборудования АЭС характеризуется физико-механическими свойствами, которые зависят от химического состава, способа плавки и условий получения слитка, технологии полуфабриката, структуры на субмикро-(атомном), микро- и макроуровне и методов определения свойств.

Повреждения металла конструкции вызываются внешними воздействиями на него. Тепловое воздействие определяется: источником нагрева и условиями охлаждения, характером изменения температур во времени, уровнем температур и распределением температур по объему детали; коррозионное — химическим составом среды, ее агрегатным состоянием, скоростью потока (перемещения среды) и давлением; радиационное — типом облучения и его энергетическим спектром, интенсивностью и характером распределения в пространстве.

Воздействие механических напряжений складывается из напряжений, вызванных силовым нагружением и температурным полем, местных напряжений, обусловленных наличием концентраторов напряжения; остаточных напряжений после технологических операций обработки металла давлением или резанием, монтажных и сварочных работ. Напряженное состояние может быть одно-, двух- или трехосным.

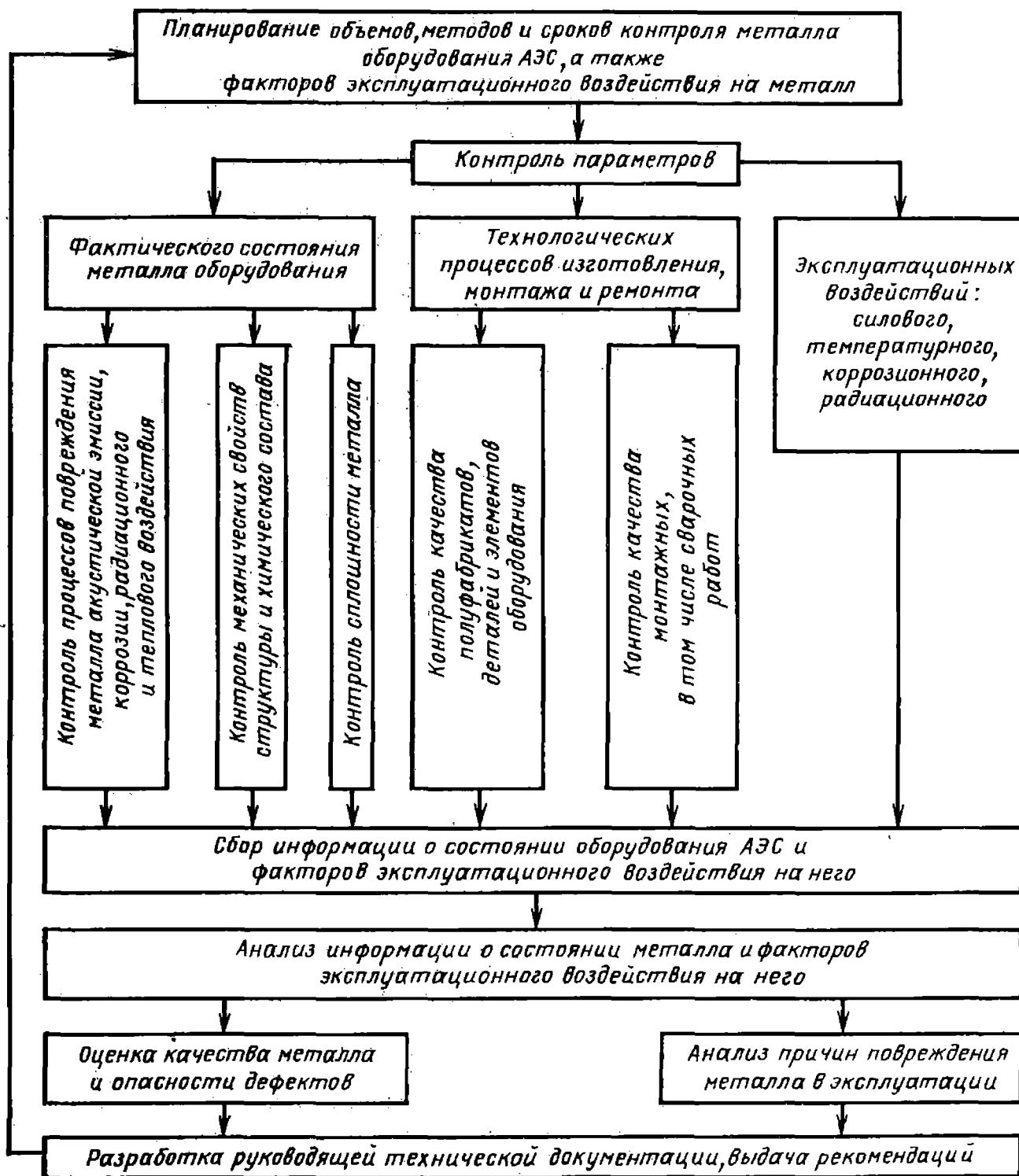


Рис. 30. Схема комплексной системы эксплуатационного контроля металла оборудования АЭС

Необходимо учитывать характер его распределения в объеме деталей и изменение во времени.

Комплексная система эксплуатационного контроля металла оборудования АЭС показана на рис. 30. В качестве основных контролируемых используют

следующие параметры: определяющие фактическое состояние металла; технологических процессов изготовления, монтажа и ремонта; эксплуатационного воздействия.

Высокий уровень контроля качества монтажных и сварочных работ яв-

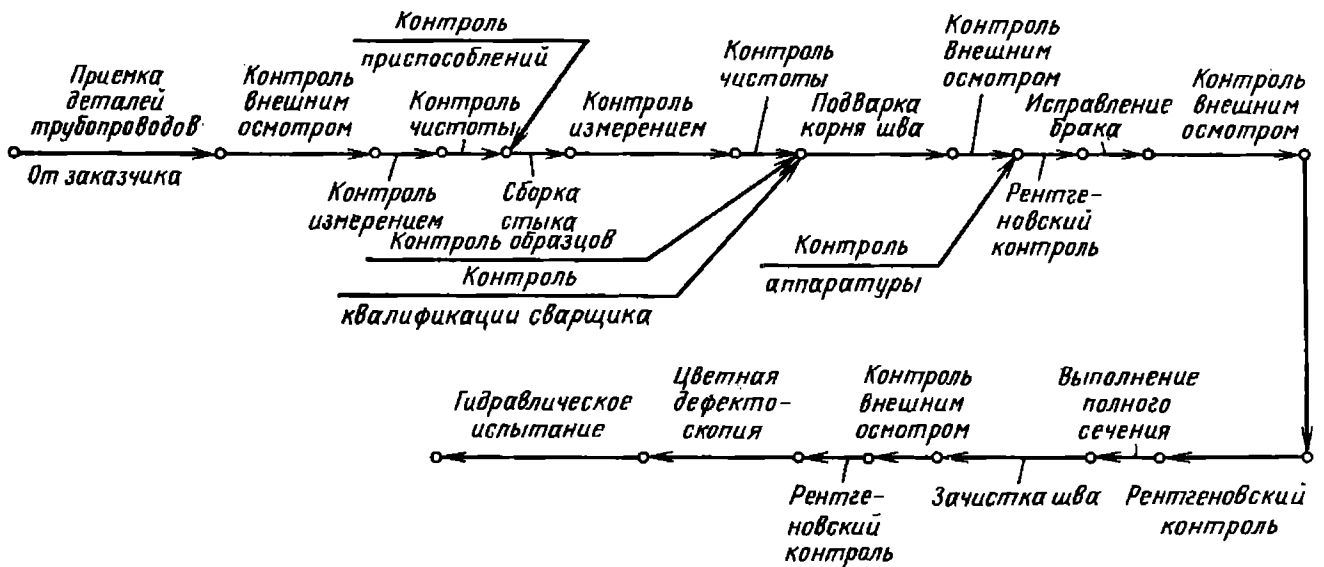


Рис. 31. Технологическая последовательность монтажных, сварочных и контрольных операций при сборке и сварке стыков трубопроводов ($D_y = 500$ мм) первого контура на АЭС с реактором ВВЭР-440

ляется обязательным условием обеспечения надежности и безопасности эксплуатации АЭС.

При монтаже одного блока АЭС с реактором РБМК-1000 службе технического контроля необходимо проконтролировать: ультразвуковой дефектоскопией — 8000 сварных стыков труб и 1500 м швов соединений металлоконструкций; цветной дефектоскопией — 4600 сварных стыков труб и 4200 м швов соединений металлоконструкций; выполнить около 6500 операций по гелиевому контролю, проконтролировать 150 000 м² поверхностей внутренних полостей оборудования и трубопроводов на чистоту; выполнить 19 000 операций контроля геометрических размеров и т. п. При радиографическом контроле должно быть сделано около 480 000 снимков.

Как правило, число контрольных операций при сборке и сварке ответственных конструкций и трубопроводов АЭС превышает число монтажных и сварочных операций (рис. 31).

При сборке, сварке и монтаже одного стыка трубопровода первого контура из плакированной стали с $D_y = 800$ мм и толщиной стенки 38 мм реактора РБМК-1000 из общей усредненной продолжительности работ, равной 236 ч, расходуется: на монтажные операции 104 ч; на сварочные операции 80 ч, на контрольные операции 52 ч.

Все контрольные операции, применяемые в процессе монтажа оборудования АЭС, классифицируются по назначению и методам контроля и по времени их выполнения в технологической последовательности монтажных работ.

В зависимости от назначения применяемых методов испытаний различают: контроль: качества входящей технической документации, идентификации материалов, соответствия строительных конструкций и сооружений, передаваемых на монтаж, требованиям действующей документации; принимаемых на монтаж от заказчика оборудования и трубопроводов; квалификации персонала, качества исходных материалов, сборочно-сварочных приспособлений, оборудования и аппаратуры: внешним осмотром монтируемого оборудования и трубопроводов, геометрических размеров, соблюдения технологических процессов, чистоты внутренних поверхностей трубопроводов и оборудования; прочности трубопроводов и оборудования; внешним осмотром и измерением сварных соединений; сварных соединений труб прогонкой металлического шарика; радиографический (методами с использованием рентгеновского и гамма-излучения); герметичности;

дефектоскопию: капиллярную (цветовую, люминесцентную) и ультразвуковую;

испытания: механических свойств, стойкости против межкристаллитной коррозии и склонности металла к образованию горячих трещин;

металлографические исследования; определение содержания ферритной фазы;

химический анализ;
спектральный анализ.

Контроль производится до начала работ (предварительный контроль), в процессе производства работ (операционный контроль) и после окончания работ (окончательный контроль) (рис. 32).

Контрольные операции являются неотъемлемой частью технологического процесса монтажа оборудования.

Одним из наиболее часто применяемых методов контроля прочности (и герметичности) трубопроводов и оборудования АЭС, работающих под давлением, является метод гидравлических испытаний.

Допускается совмещать гидравлические испытания отдельных деталей и узлов с гидравлическими испытаниями укрупненных узлов, блоков или изделия в целом, если отдельные детали и узлы подвергались 100 %-ному контролю методами ультразвуковой дефектоскопии или 100 %-ному контролю радиографическим методом.

Контроль качества сварных соединений и антикоррозийных покрытий при монтаже технологического оборудования и трубопроводов АЭС осуществляют:

внешним осмотром и измерениями сварных соединений;

прогонкой металлического шарика через соединения труб;

капиллярной (цветовой и люминесцентной) и магнитопорошковой дефектоскопией;

радиографическим методом (с использованием рентгеновского излучения и гамма-излучения);

ультразвуковой дефектоскопией;

течискателями, с применением воздуха или керосина и другими методами проверки герметичности соединений;

лабораторными методами (механические испытания, металлографическое исследование и др.);

спектральным анализом (стилоскопированием).

Контроль геометрических размеров осуществляется традиционными способами, используемыми в машиностроении и строительстве. При этом применяют многочисленные измерительные инструменты и оптические приборы.

Для ревизии состояния корпуса водо-водяных реакторов применяют специализированные комплексы ТСД с использованием дистанционных капиллярных, ультразвуковых и телевизионных методов дефектоскопии.

Контролю подвергают сварные соединения корпуса, основной металл в активной зоне, металл патрубков диаметром 850, 500 и 250 мм. Температура в зонах контроля не должна превышать 40 °С. При контроле должно быть установлено, что усиление на всех сварных швах снято заподлицо с основным металлом и поверхность шва обработана; внутренняя поверхность корпуса имеет такую же шероховатость, как и наружная.

Контроль патрубков затруднен, так как доступ в зону контроля ограничен повышенным радиационным фоном.

Система контроля корпуса реактора ВВЭР-404 состоит из трех подсистем: наружного контроля, внутреннего контроля и контроля зоны патрубков (рис. 33). Подсистема наружного контроля содержит поворотную платформу 1, установленную под корпусом 2 и жестко связанную с поворотной защитой 3. В верхней части телескопического подъемника 4 устанавливают зачистные устройства, телевизионную камеру и ультразвуковые головки с несколькими ультразвуковыми пьезопреобразователями. Ультразвуковой дефектоскоп, телевизионная аппаратура и шкаф управления располагаются в специальном помещении 5. Это оборудование связано с датчиками и механизмами колебания.

Подсистема внутреннего контроля состоит из платформы 6, установленной на верхнем фланце корпуса реактора, штанги 7, предназначенной для перемещения телевизионной камеры 8 или перископа. Пульт управления и видеоконтрольное устройство располагаются в реакторном зале. В эту же подсистему входит гамма-графическая установка 9, которая обеспечивает доставку источников ионизирующего

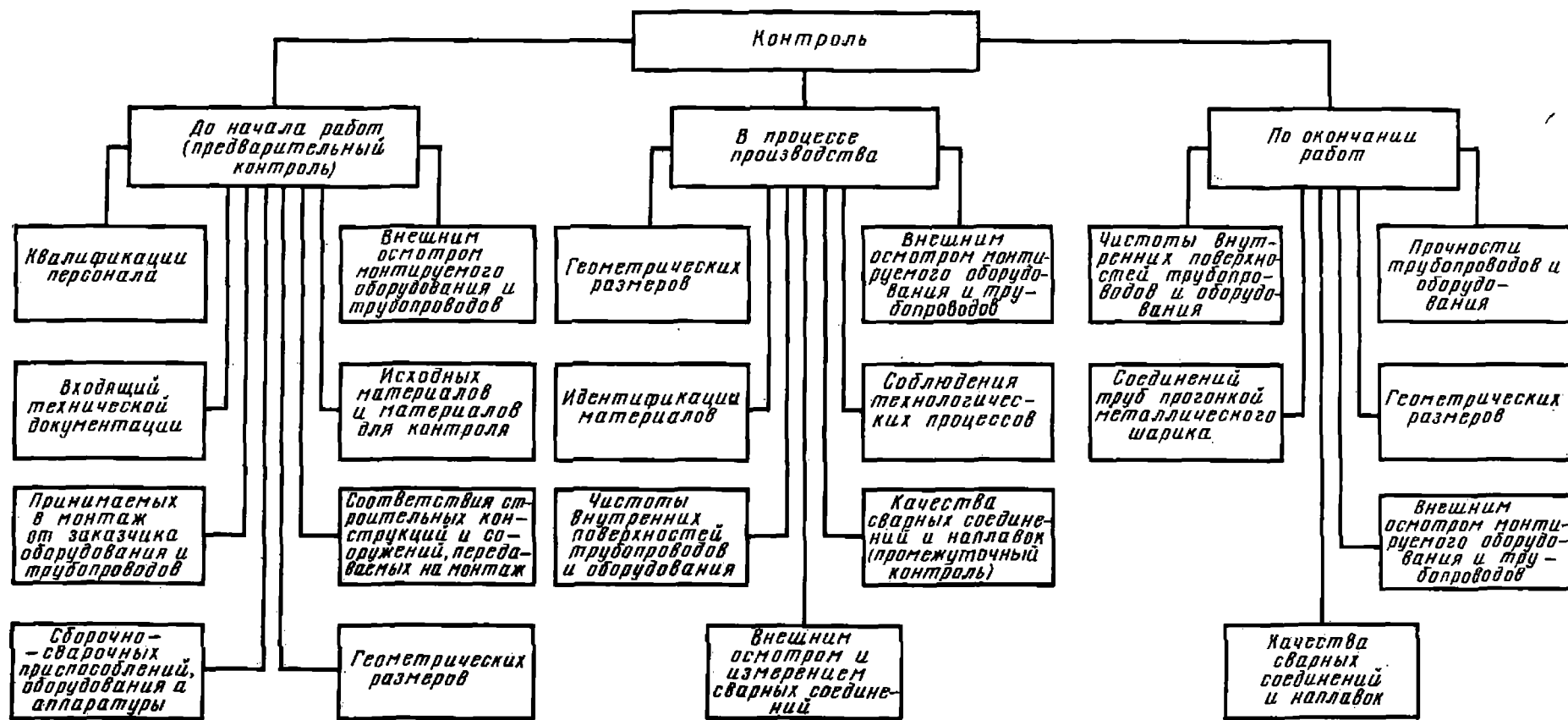


Рис. 32. Классификация контрольных операций

излучения ^{60}Co и ^{192}Ir в патрубки для панорамного просвечивания сварных соединений. В подсистему контроля зоны патрубков входят устройства ультразвукового контроля основного металла патрубков с D_y , равным 250 и 500 мм, и сварных соединений корпуса реактора в этой зоне. Ультразвуковой дефектоскоп, стойка управления и регистратор дефектов находятся в специальном пультовом помещении 10.

Внешний осмотр внутренней и наружной поверхностей корпуса осуществляют с помощью телевизионной аппаратуры. Отдельные участки внутренней поверхности корпуса осматривают также с помощью перископического смотрового прибора с разрешающей способностью 6 линий/мм. Осмотр внутренней поверхности осуществляется через слой дистиллированной воды. Телевизионная аппаратура состоит из герметичной телевизионной камеры и видеоконтрольного устройства. Изображение контролируемого участка наблюдается на экране телевизионного приемника. С помощью аппаратуры на экран выводится алфавитно-цифровая информация о координатах наблюдаемого объекта, для чего служат постоянное запоминающее устройство и три входных счетчика.

Для определения параметров положения камеры в пространстве используют четырехдекадные счетчики.

Телевизионная аппаратура обеспечивает выявление трещин раскрытием 0,1 мм при длине не менее 20 мм. Углы изображения камеры в вертикальной плоскости составляют 16° , в горизонтальной — 20° .

Ультразвуковой контроль проводят с целью обнаружения трещин, расслоений и отрыва аустенитной наплавки эквивалентной площадью 75 мм^2 и более. Чувствительность поиска 38 мм^2 . Прозвучивание металла корпуса реактора осуществляют поочередно в двух направлениях: вдоль образующей корпуса и вдоль окружности. Искатели подсоединены к шестнадцатиканальному дефектоскопу. С выхода дефектоскопа снимаются сигналы, пропорциональные амплитуде эхо-сигнала от дефекта и глубине его залегания. Искательная головка перемещается по за-

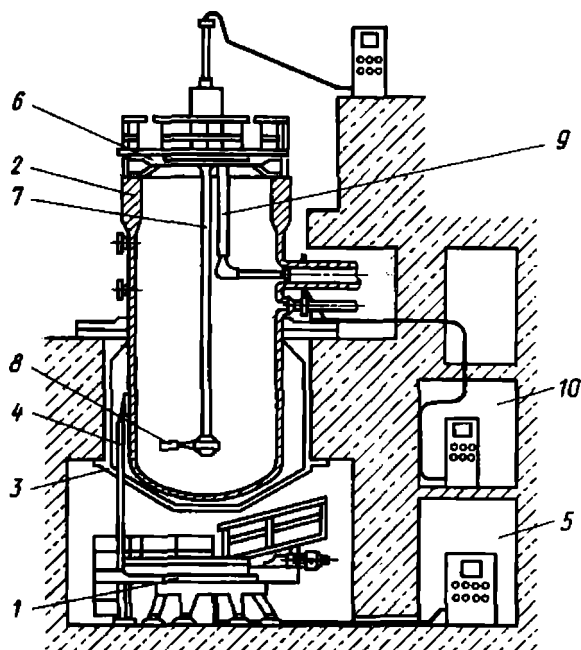


Рис. 33. Общая схема контроля корпуса реактора ВВЭР-440

данной программе со скоростью до 1000 мм/мин. В случае обнаружения дефекта механизм останавливается, и оператор выключает режим «исследование» и сканирует интересующее место в более медленном темпе.

В процессе работы реактора возможны различные повреждения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), что препятствует их нормальной эксплуатации и вызывает преждевременный выход элементов из строя. Контроль состояния работающих ТВЭЛов осуществляют измерением их температуры и проверкой герметичности.

Для контроля герметичности ТВЭЛов широко используют гелиевые течеискатели, имеющие высокую чувствительность к гелию; они обнаруживают присутствие $10^{-5}\%$ гелия в воздухе, что соответствует при нормальных температуре и давлении утечке гелия менее 1 см^3 в год. Использование гелия для обнаружения негерметичности удобно по следующим причинам: гелий легко проникает в мельчайшие отверстия и поры, в силу своей инертности не реагирует с другими газами и материалами ТВЭЛов, не присутствует в заметных количествах в атмосфере, что повышает чувствительность испытания.

Известен метод так называемого сухого извлечения газовых осколков,

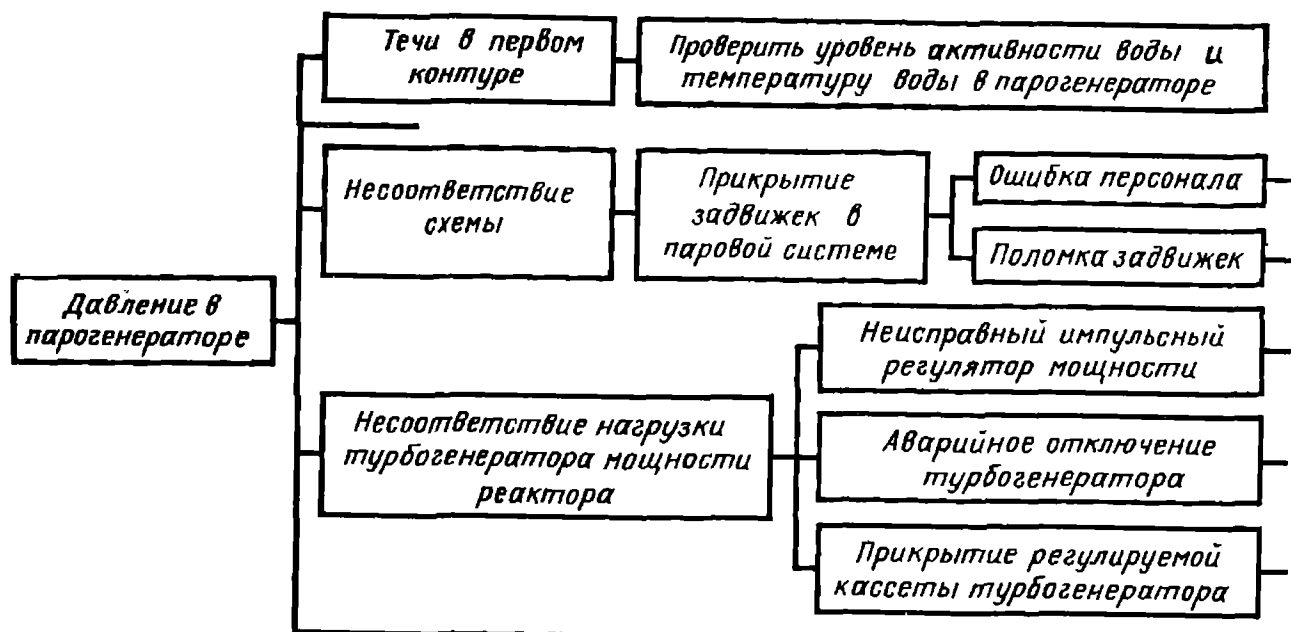


Рис. 34. Алгоритм диагностирования неисправности парогенератора

состоящий в следующем: извлеченную из реактора топливную сборку устанавливают в приспособлении, представляющем собой колпак без дна. Вода из канала выдавливается посредством создания небольшого избыточного давления азота в колпаке. Топливо выдерживается сухим расчетное время и разогревается за счет остаточного тепловыделения. При неплотной оболочке газы выделяются и собираются под колпаком. Обратным наполнением водой активные газы выдавливаются в трубопровод и исследуются при прохождении датчика радиометра.

После нахождения дефектов неисправные твэлы выгружают из реактора обычным способом, заменяют новыми, монтируют крышку реактора со всеми механизмами и приборами и осуществляют пуск реактора.

Температурный уровень твэлов при работе их в реакторах контролируется либо непосредственно замером температуры оболочки или сердечника твэлов, либо косвенно — замером температуры теплоносителя.

При непосредственном замере температуры твэлов, работающих в реакторе, в качестве температурных датчиков в большинстве случаев используют термоэлектрические термометры (термопары).

В состав системы поканальной температуры теплоносителя реактора первого блока Белоярской АЭС входят:

чувствительные элементы температуры: хромель-копелевые термопары — 268 шт.; поверхностные платиновые термометры сопротивления — 730 шт.; блоки автоматической сигнализации и выборочного измерения температуры на выходе из пароперегревательных каналов (6 шт.), каждый из которых рассчитан на подключение 50 термопар; сигнальное мнемотабло; переключающее устройство; автоматические электронные показывающие приборы: потенциометры для работы с термопарами — 3 шт.; мосты для работы с термометрами сопротивления — 3 шт.

Термопара установлена в паропроводах от пароперегревательных каналов к сборному коллектору. Термопары сопротивления размещаются на трубопроводах, отводящих пароводяную смесь от испарительных каналов к сепараторам.

Блоки автоматической сигнализации обеспечивают подачу сигналов при повышении температуры пара на выходе любого из 268 контролируемых каналов с уставкой в пределах 350—550 °С. Схема сигнализации работает по принципу сравнения двух сигналов, поступающих на вход усилителя и направленных навстречу друг другу. Один сигнал — ЭДС термопары, другой — потенциал задачи. Если ЭДС термопары превысит потенциал задачи, загорится сигнальная лампа на свето-

вом мнемотабло (номер лампы соответствует номеру канала).

Абсолютное значение температуры перегретого пара измеряют соответствующей термпарой, подключением ее к двухпредельному показывающему потенциометру (шкала 0—400 °С и 300—600 °С) через переключающее штепсельное устройство.

Для построения алгоритма диагностирования необходимо выявить и установить связь между отклонениями параметров и причинами, вызвавшими эти изменения. Иными словами, нужно разработать структурно-иерархическую модель в виде дерева. Технологическое дерево отказов отражает суть изменений технологических процессов, происходящих в объекте при появлении нарушения. В узлах такого дерева размещают информацию о работе технологических линий, отдельных агрегатов, локальных участков и т. п. Оканчивается технологическое дерево неисправностями.

После построения моделей составляют таблицу допустимых технологией отклонений параметров, классифицируют неисправности по трудности их распознавания, выявляют неисправности, не поддающиеся автоматическому распознаванию. Далее формируют алгоритм диагностирования неисправностей на основе собранной информации. На рис. 34 приведен фрагмент структурно-иерархической модели в виде технологического дерева.

6. ТСД ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Одним из главных функциональных устройств летательных аппаратов является двигатель, который можно рассматривать как единую физическую систему с неизвестной структурой, подверженную воздействию внешних и внутренних возмущений. По выходным сигналам можно установить его состояние без указания места и причины неисправности. Такая интегральная диагностика иногда может быть применена при эксплуатации. При обслуживании двигателя по фактическому состоянию требуется поставить диагноз с глубиной поиска до съемного узла. Двигатель

представляют в виде совокупности взаимосвязанных узлов, по результатам диагностирования которых ставят общий диагноз.

На этапах проектирования, производства и эксплуатации необходим диагноз с указанием неисправного элемента (детали) и причины неисправности. Для диагностирования с глубиной до детали узел можно представить как совокупность взаимосвязанных деталей, являющуюся трехступенчатой моделью «двигатель—узел—деталь».

При эксплуатации авиационных двигателей контролируется 20—40 параметров, причем показания приборов имеют три уровня информации: индикация в кабине летчика; регистрация на борту самолета; наземные проверки.

В кабине летчика по показаниям приборов определяют важнейшие параметры (например, уровень вибрации двигателей), сведения о которых необходимы для правильного пилотирования самолета. Во всех случаях, когда значения параметров достигают предельно допустимых, используется дополнительная сигнализация (световая или звуковая). Значительное количество информации регистрируется на борту самолета с помощью специальных записывающих устройств с последующим хранением информации на магнитных лентах.

Ряд диагностических признаков выявляют при наземной проверке (визуальные осмотры, проверка фильтров и т. п.).

Основные параметры диагностирования: температура газов за турбиной и компрессором, частота вращения вала компрессора и вентилятора, давление за вентилятором и компрессором, вибрация в зонах вентилятора, компрессора и на корпусах подшипников. Регистрируют также количество и температуру масла, показания детекторов стружки в откачивающей магистрали, перепад давления на маслофильтре, минимальное давление масла. Контролю подвергают и параметры топливной системы, системы пуска, отбора воздуха и других систем.

Большинство параметров записывают 1—2 раза за полет (давление, уровень вибрации, частота вращения) и направляют в диагностический центр для ана-

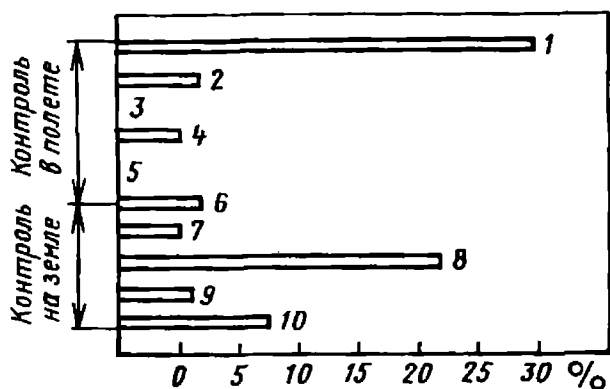


Рис. 35. Диаграмма эффективности различных методов диагностирования. Число двигателей, досрочно снятых с эксплуатации из-за неисправностей, обнаруженных:

1 — вибродиагностикой; 2 — контролем параметров; 3 — контролем системы охлаждающего воздуха; 4 — сигнализацией перегрева или пожара; 5 — контролем неравномерности температуры газа на выходе; 6 — контролем давления или расхода масла; 7 — детектором магнитной стружки; 8 — визуальным осмотром; 9 — прибором для осмотра полостей (интроскопом); 10 — контролем масляного фильтра

лиза. В результате анализа и сопоставления с предыдущими показаниями принимается решение о продолжении нормальной эксплуатации либо о дополнительном осмотре, замене детали, узла или снятии двигателя с эксплуатации.

Эквивалентные испытания авиационных двигателей показали, что наибольшие повреждения, особенно деталей горячей части, происходят при работе на наиболее тяжелом (взлетном) режиме.

В ряде двигателей устанавливают счетчик ресурса, учитывающий суммарную длительность наработки на тяжелых режимах и число полетных циклов.

На рис. 35 дана диаграмма эффективности различных методов диагностирования на примере двигателей «Конуэй».

Наиболее эффективной является вибродиагностика, позволяющая обнаруживать неуравновешенность вращающихся деталей, дефекты подшипников, зубчатых передач, насосов, форсунок камер сгорания, повреждения и обрывы рабочих лопаток, износ деталей, погрешности сборки различных узлов, прогары камер сгорания,

повышенные пульсации давления в газозоудном тракте, вибрационное горение, помпаж и т. д.

Вибрация двигателя может изменяться по мере наработки вследствие ряда необратимых процессов, происходящих в двигателе: роста усталостных повреждений в деталях, испытывающих динамические нагрузки; ползучести материала сильно нагруженных элементов; износа взаимодействующих кинематических пар; эрозионного износа деталей; изменения демпфирования колебаний; перераспределения внутренних напряжений; коробления деталей и пр.

Спектры вибраций современных газотурбинных двигателей (ГТД) часто содержат вибрационный шум и ряд дискретных компонент, поэтому сигнал с первичного вибропреобразователя перед подачей на анализирующее или регистрирующее устройство подвергается предварительной обработке с целью усиления полезного сигнала и уменьшения уровня помех. В качестве устройства предварительной обработки используют многоканальную аппаратуру, выполняющую относительно простые линейные и нелинейные преобразования вибрационного сигнала, например, интегрирование или фильтрацию. Затем сигнал обрабатывается с помощью универсальных аналоговых или цифровых устройств. Успешное решение диагностической задачи в значительной степени определяется выбором места установки вибропреобразователя. Для диагностирования используют внешние вибропреобразователи, располагаемые на корпусе двигателя, и внутренние вибропреобразователи, которые устанавливают внутри наиболее ответственного узла двигателя, например, в подшипниковую опору.

При диагностике двигателей часто измеряют акустический шум, пульсации давлений в газозоудном тракте, динамические деформации и вибрации деталей и корпусов ГТД. В качестве первичного преобразователя акустического шума используют широкодиапазонные микрофоны с различной диаграммой направленности. При выборе микрофона учитывают интенсивность и частотный диапазон измерений,

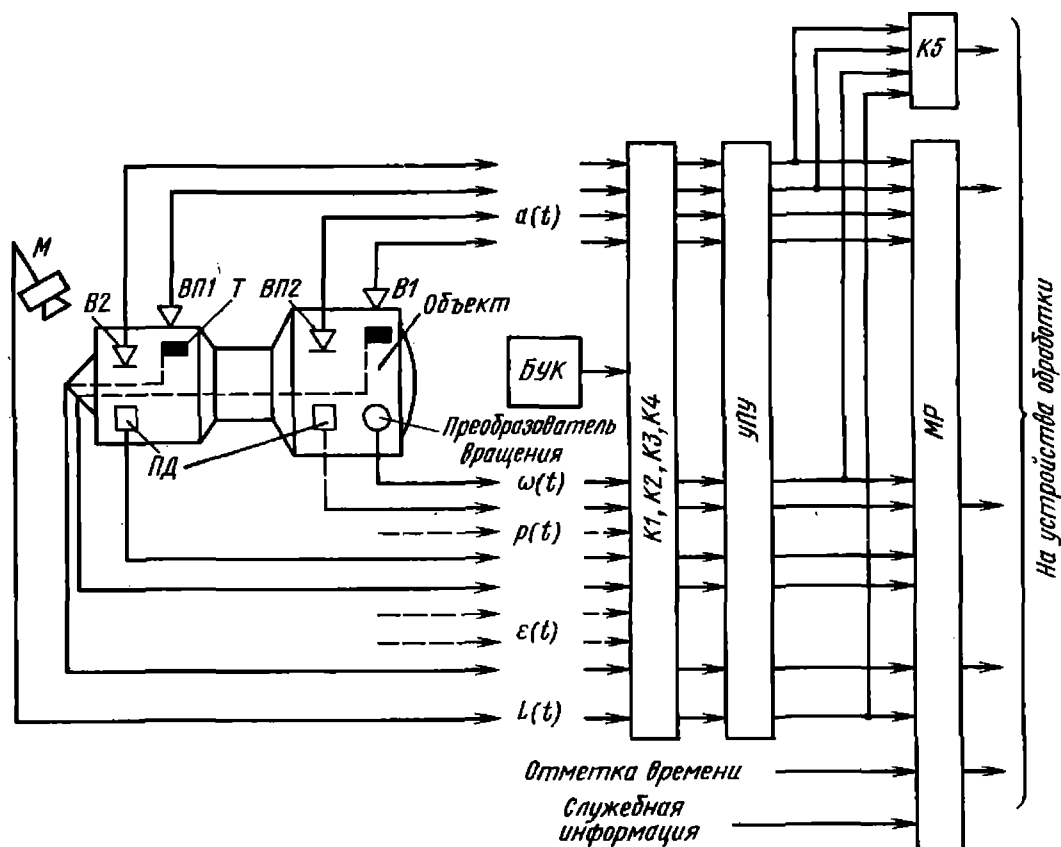


Рис. 36. Структурная схема виброакустической системы диагностирования авиационных двигателей

а также влияние внешней окружающей среды, например, температуры, влажности и т. п.

Методами акустического контроля двигателя в эксплуатации выявляют попадание посторонних предметов в компрессор, дисбаланс роторов, обрыв рабочих лопаток; выкрашивание на беговых дорожках обойм подшипников, их несоосность, увеличение зазоров в подшипниках; выкрашивание и износ зубьев шестерен; несоосность установки вспомогательных агрегатов; увеличение зазоров в сочленениях и течь в них.

Структурная схема виброакустической системы диагностирования авиационных двигателей приведена на рис. 36.

Сигналы акустического шума $L(t)$ с микрофонов M , вибраций $a(t)$ с внешних $B1$ и $BП1$ и внутренних $B2$ и $BП2$ вибропреобразователей, пульсаций давления $p(t)$ с преобразователей $ПД$, динамических деформаций $\varepsilon(t)$ с тензорезисторов T через свои коммутаторы $K1—K4$ поступают на усилительно-преобразующее устройство $УПУ$.

Коммутаторы $K1—K4$ управляются с помощью блока $БУК$. Подвергнутые предварительной обработке в $УПУ$ вибрационные сигналы поступают на магнитный регистр $МР$ или же в темпе испытаний через дополнительный коммутатор $K5$ могут подаваться на вторичные анализирующие устройства. Одновременно с вибрационным сигналом на магнитный регистратор или устройства анализа подаются сигналы отметки времени, скорости $\omega(t)$ вращения ротора и служебная информация о режимах работы испытуемого двигателя. Сигнал скорости $\omega(t)$ используют для временной селекции отдельных участков вибрационных сигналов, синхронной перестройки следящих фильтров, взаимокорреляционного анализа, а также для отметки частоты вращения вала двигателя при записи процессов с помощью магнитоэлектрического осциллографа.

Полученную информацию подвергают спектральному, корреляционному или вероятностному анализу. Наибольшее распространение, особенно на первом этапе исследований, получил

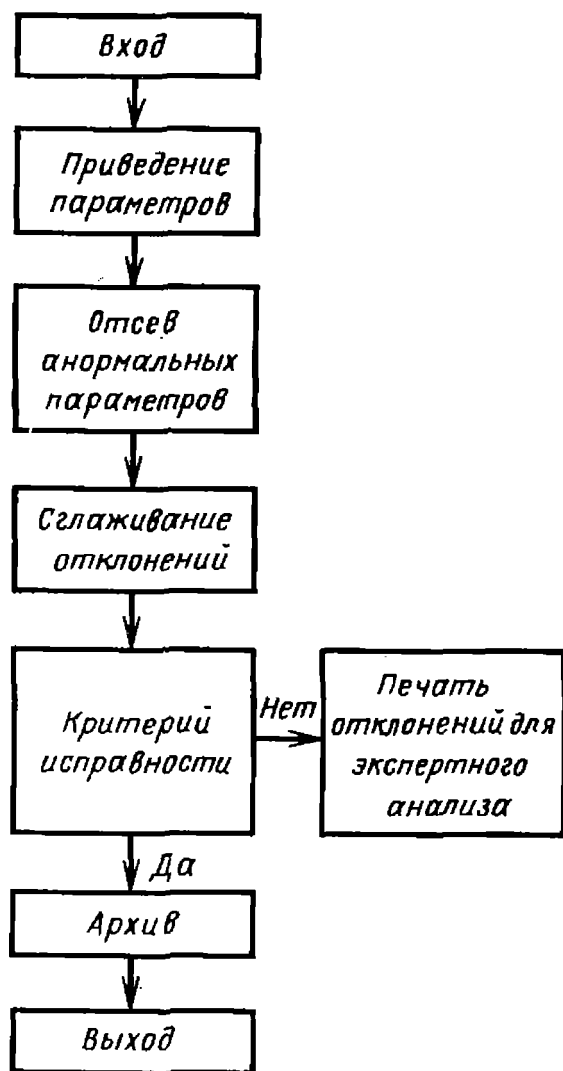


Рис. 37. Укрупненная схема алгоритма диагностирования термогазодинамических параметров ГТД, регистрируемых в полете

спектральный анализ вибрационных сигналов, поскольку огибающая распределения мощности или амплитуд по частоте дает наиболее полное представление об амплитудно-частотном составе анализируемого сигнала.

Широкое распространение получили универсальные специализированные аналого-цифровые устройства обработки, которые позволяют измерять не только спектральные характеристики в реальном масштабе времени, но и проводить корреляционный и вероятностный анализ длительных реализаций в широком диапазоне частот. В качестве примера такой аппаратуры можно привести систему обработки, которая содержит блоки фильтров нижних частот, коммутатор на восемь каналов, быстродействующий аналого-цифровой преобразователь, специальное вычис-

лительное устройство, цифроаналоговый преобразователь, устройства задания программы вычислений и отображения.

С помощью электронно-лучевой трубки в виде графика представляется вычисленная функция и в виде цифр — значения ее основных параметров. Эти данные можно подать на двухкоординатный самописец, цифropечатающее устройство и на ЭВМ для обобщения. Высокое быстродействие системы позволяет проводить спектральный, корреляционный и вероятностный анализ вибрационных процессов в реальном масштабе времени в диапазоне частот 0,02—100 000 Гц.

Основой диагностирования по термогазодинамическим параметрам является известная в теории и подтвержденная практикой эксплуатации зависимость значений этих параметров от состояния элементов проточной части ГТД. В процессе наработки 3—7 тыс. ч, вследствие износа значения термогазодинамических параметров исправных двигателей изменяются на 1—3%. При возникновении неисправности такие изменения происходят в течение нескольких десятков или сотен часов, что и используется для ранней диагностики.

Укрупненная схема алгоритма диагностической обработки термогазодинамических параметров ГТД приведена на рис. 37. На вход схемы поступают значения следующих термогазодинамических параметров: температуры газов за турбиной, расхода топлива, частоты вращения роторов и параметры наружных условий; температуры и давления заторможенного потока. Для исключения грубых ошибок регистрации назначают диапазоны физически возможных значений измеренных параметров, что позволяет отбраковать грубые ошибки регистрации перед началом обработки.

Регламентирование условий испытаний (высоты, скорости полета и др.) и приведение параметров к стандартным атмосферным условиям позволяют исключить влияние изменения наружных условий на контролируемые параметры.

Независимые и зависимые параметры характеризуют изменения в различных

термодинамически связанных частях двигателя. Схема алгоритма диагностирования газового тракта показана на рис. 38.

Структурная схема автоматизированного комплекса диагностирования бортового оборудования самолета приведена на рис. 39.

Программа диагностирования считывается устройством 1 и подается в программирующее устройство 2. Предельные значения контролируемых показателей в двоичной форме из программирующего устройства подаются в коммутатор 3. Преобразование аналоговых величин в дискретные осуществляется с помощью системы преобразователей 9. Адрес и соответствующая команда поступают в коммутатор 4, который обеспечивает выбор необходимого для контроля показателя. Программирующее устройство выдает следующую команду только после подключения требуемого показателя.

Релейная аппаратура последовательно подключает генераторы 5 стимулирующих сигналов к проверяемым цепям оборудования самолета. Логическое устройство и схемы, необходимые для определения результатов измерений и соответствия их установленным допускам, расположены в компараторе, который в данном случае представляет собой блок, выполняющий функции запоминания, принятия решения и выработки команд.

Предлагаемые значения контролируемых показателей вводятся в компаратор из блока 6 эталонных сигналов и сосредотачиваются в запоминающем устройстве программатора. Это позволяет при подаче к компаратору измеряемой величины сравнивать ее с установленными предельными значениями, в результате чего вырабатываются сигналы «больше—норма—меньше». Сигнал «норма» вызывает переход к последующей операции. Если же контролируемый показатель вышел за пределы допуска, то он печатается красным шрифтом на ленте регистрирующего устройства 7. Одновременно срабатывают схемы сигнальных устройств, и процесс проверки приостанавливается. Синхронизация программы выполняется специальным устройством 11. Визуальный индикатор 8 фиксирует

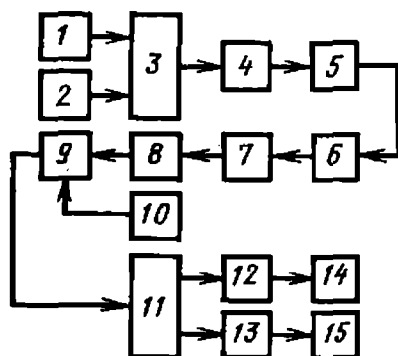


Рис. 38. Схема алгоритма диагностирования газового тракта:

1 — определение независимых параметров X_1, X_2, \dots, X_N ; 2 — определение зависимых параметров Y_1, Y_2, \dots, Y_N ; 3 — решение термодинамических уравнений двигателя (по всем частям газового тракта); 4 — вычисление зависимости между каждой ΔX_N и каждой ΔY_N при условии, что все остальные параметры постоянны; 5 — формирование матрицы коэффициентов связи с помощью принципа суперпозиции; 6 — оценка коэффициентов на проектных режимах двигателя; 7 — вычисление X_{Ns}

для соответствующих отдельных случаев; 8 — измерение такого же числа параметров Y_{Ns} ; 9 — вычисление ΔY_{Ns} ; 10 — эталонные величины измеренных Y_{Ns} ; 11 — вычисление ΔX_{Ns} ; 12 — определение технического состояния; 13 — программа прогнозирования; 14 — выработка рекомендаций по эксплуатации; 15 — выдача прогноза

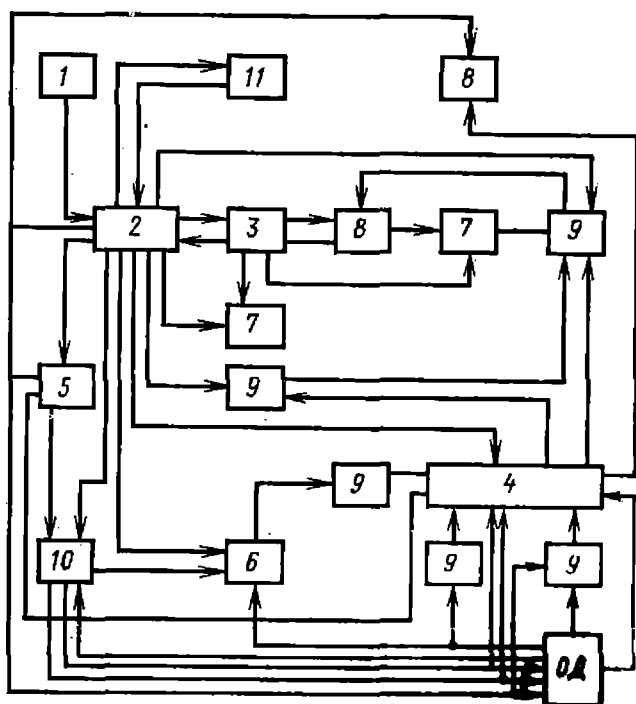


Рис. 39. Структурная схема автоматизированного комплекса диагностирования бортового оборудования самолета

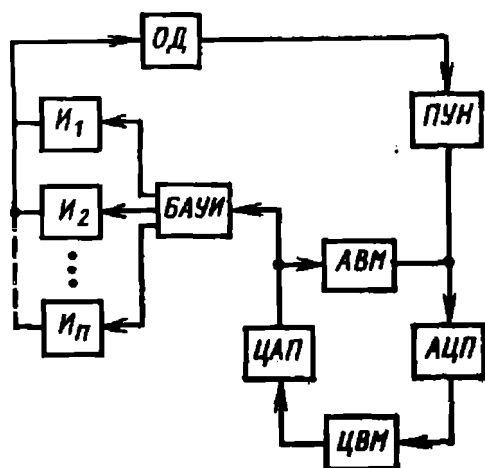


Рис. 40. Система диагностирования бортовых автоматических систем управления самолетом

номер проверяемого показателя, значение измеренной величины (в десятичной форме) и результат оценки компаратором «больше — норма — меньше». При наличии неисправности в бортовом оборудовании объекта диагностирования (ОД) на индикаторе появляются буквы, обозначающие блок, узел и элемент. Одновременно загорается сигнальная лампа и подается звуковой сигнал.

Результаты диагностирования непрерывно регистрируются регистрирующим устройством.

Для калибровки и самоконтроля применяются специальная программа и дополнительный канал. Самоконтролю подвергаются генераторы стимулирующих сигналов, компараторы и другие наиболее важные устройства комплекса диагностирования.

Схема системы диагностирования бортовых автоматических систем управления самолетом показана на рис. 40.

В состав технических средств диагностирования системы входят: цифровая вычислительная машина (ЦВМ); логические аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи; аналоговая вычислительная машина АВМ; имитаторы (I_1, I_2, \dots, I_n); многоканальный преобразователь «угол — напряжение» (ПУН); блок автоматического управления индикаторами (БАУИ).

Технические средства диагностирования взаимодействуют в зависимости от режима работы систем управления.

Например, при автоматическом полете в режиме стабилизации барометрической высоты работает продольный канал. Сигнал отклонения от заданной высоты поступает от корректора высоты. Текущие значения угла тангажа и его производной подаются в продольный канал системы управления от центральных гировертикантов и блока демпфирующих гироскопов. Вычислительное устройство в канале по этим сигналам определяет текущий угол отклонения руля высоты. Это значение преобразуется ПУН в напряжение, которое через АЦП поступает в ЦВМ. ЦВМ решает систему дифференциальных уравнений, описывающих автоматический полет со стабилизацией высоты, с учетом величины отклонения руля высоты. В результате решения уравнений определяется новое угловое положение самолета. В соответствии с выработанными сигналами, пропорциональными новым значениям угла тангажа и его производной, БАУИ изменяет положение трехкоординатного стенда, имитирующего угловое положение самолета в пространстве. Сигнал от I_2 используется в имитаторе корректора высоты для получения нового рассогласования по высоте.

Среди различных типов двигателей летательных аппаратов жидкостный ракетный двигатель (ЖРД) занимает особое место.

Высокая стоимость современных космических аппаратов, движение которых обеспечивается ЖРД, определила повышенные требования к их надежности. Одним из способов улучшения качества изготовления и повышения надежности ЖРД является совершенствование существующих и разработка новых методов диагностирования на всех этапах производства двигателей, их хранения и эксплуатации. Для построения систем функционального диагностирования (СФД), предназначенных для контроля и диагноза состояния двигателя в процессе функционирования (т. е. работающего двигателя), используют функциональные методы.

Особенность СФД состоит в том, что для работы этой системы на двигатель не оказываются никакие воздействия от средств диагностирования (как, на-

2. Исходный состав измеряемых параметров (датчиков)

Измеряемый параметр	Ранг параметра
Давление:	
в камере сгорания	1
в газогенераторе	4
на выходе из насоса окислителя	11
на выходе из насоса горючего	13—14
перед форсунками горючего камеры сгорания	10
на входе в насос окислителя	12
на входе в насос горючего	13—14
газа в газоведе	7
Частота вращения ротора ТНА	2
Температура газа:	
в газогенераторе	3
в газоведе	8
Расход:	
окислителя в газогенераторе	6
горючей смеси в газогенераторе	5
горючей смеси в камере сгорания	9

пример, в системах тестового диагноза), а исходной информацией, которая используется для диагноза, являются такие параметры двигателя, как давление, температура и расход компонентов топлива в различных точках гидравлических и газовых трактов, частота вращения ротора турбонасосного агрегата (ТНА), измеренные при его работе.

Перечень измеряемых параметров ЖРД с указанием их ранга приведен в табл. 2.

Некоторые параметры хотя и являются информативными, часто не могут быть измерены либо по причине снижения надежности двигателя, что может быть вызвано установкой датчиков для измерения этих параметров, либо в силу конструктивных особенностей ЖРД (например, установка на подсоединительной трубке датчика дав-

ления в камере сгорания для некоторых двигателей недопустима). Помимо диагностирования неисправных состояний, при испытании ЖРД часто приходится решать задачу контроля внешних факторов. Поэтому датчики, измеряющие внешние параметры, могут устанавливаться на двигатель независимо от степени полезности внешних факторов для диагноза неисправных состояний.

Некоторые параметры двигателя не могут быть измерены из-за отсутствия соответствующих датчиков.

Применительно к задаче диагноза неисправного состояния ЖРД задача функционального контроля состоит в том, чтобы установить момент возникновения неисправности на работающем двигателе и подключить СФД для диагноза этой неисправности.

Один из возможных способов контроля состояния ЖРД заключается в следующем. В процессе работы двигателя (либо после окончания его работы) контролируются значения выходных параметров. При выходе всех (либо нескольких заранее выбранных) контролируемых параметров ЖРД за допустимые пределы их изменения фиксируется факт появления неисправного состояния. Пределы допустимого изменения параметров задаются заранее до начала процедуры контроля; значения этих пределов определяются с помощью машинной модели двигателя с использованием данных, содержащихся в технической документации на двигатель и информационно-измерительную систему, а также с учетом результатов статистической обработки данных испытаний, если конструктор системы контроля располагает такими результатами.

Измеренные выходные параметры двигателя — случайные величины. Случайный характер этих величин определяется допустимым в соответствии с технической документацией разбросом значений параметров агрегатов двигателя, изменением внешних факторов, погрешностью информационно-измерительной системы и колебаниями параметров двигателя, которые вызваны внутривыкательными процессами.

Номенклатура контролируемых параметров двигателя зависит от значе-

ния СФД, предполагаемых в двигателе неисправностей, характеристик информационно-измерительной системы, возможностей ЭВМ, которая используется в системе функционального контроля.

При работе СФД в реальном масштабе времени ставится задача обнаружения и диагноза неисправности как можно раньше с тем, чтобы успеть, например, предотвратить ее дальнейшее развитие. Поэтому, если позволяют возможности ЭВМ, целесообразно в процессе работы двигателя контролировать все выходные параметры, которые используются в дальнейшем для СФД, а решение о возникновении

неисправности принимать при выходе за допустимые пределы изменения значений параметров n из N измеряемых ($n < N$). Обычно состав выходных параметров двигателя, используемых в СФД, достаточно полно отражает состояние всех его агрегатов. При этом каждая конкретная неисправность проявляется прежде всего в изменении тех выходных параметров двигателя, которые наиболее чувствительны именно к этой неисправности, т. е. всякий раз система функционального контроля как бы сама выбирает состав параметров контроля (из N измеряемых) для обнаружения каждой конкретной неисправности.

Список литературы

1. **Автоматизированное проектирование цифровых устройств** /С. С. Бадудин, Ю. М. Барнаулов, В. А. Бердышев и др.; Под общ. ред. С. С. Бадудина. М.: Радио и связь, 1981. 238 с.
2. **Аксельрод З. М.** Проектирование часов и часовых систем. Л.: Машиностроение, 1981. 328 с.
3. **Аринин И. Н., Плеханов А. А., Сергеев А. Г.** Автоматизированные диагностические системы // Обеспечение надежности и качества систем методами технической диагностики. Челябинск: ЧПИ, 1979. С. 13—16.
4. **Атамаян Э. Г.** Приборы и методы измерения электрических величин. М.: Высшая школа, 1982. 224 с.
5. **Барзилович Е. Ю., Воскобоев В. Ф.** Эксплуатация авиационных систем по состоянию. М.: Транспорт, 1981. 198 с.
6. **Барзилович Е. Ю., Коштан В. Л.** Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. М.: Сов. радио, 1975. 231 с.
7. **Барлоу Р., Крошан Ф.** Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. М.: Наука, 1984. 234 с.
8. **Берлинер М. А.** Измерение влажности. М.: Энергия, 1979. 110 с.
9. **Бессонов А. А., Стешкович Н. Т., Турчина Е. Д.** Автоматизация построения контролируемых тестов. Л.: Энергия, 1976. 222 с.
10. **Биргер И. А.** Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
11. **Богомоллов А. М., Баршко А. С., Грунский Н. С.** Эксперименты с автоматами. Киев: Наукова думка, 1973. 144 с.
12. **Брилинджер Д.** Временные ряды. Обработка данных и теория. М.: Мир, 1980. 304 с.
13. **Вибрация в технике: Справочник: В 6 т** /Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 5: Измерения и испытания /Под ред. М. Д. Генкина, 1981. 496 с.
14. **Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов** /Под ред. М. Д. Генкина. М.: Наука, 1984. 192 с.
15. **Воскобоев В. Ф., Кузьмин А. Б.** Метод выбора обобщенных параметров при диагностировании состояния технических систем /Основные вопросы теории и практики надежности. Минск: Наука и техника, 1982. С. 244—255.
16. **Гилл А.** Введение в теорию конечных автоматов. М.: Наука, 1966. 272 с.
17. **Гирнис В. В., Корольков П. М.** Контроль качества монтажных и сварочных работ на АЭС. М.: Энергия, 1980. 95 с.
18. **Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.** Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 361 с.
19. **Гольдман Р. С., Чипулис В. П.** Техническая диагностика цифровых устройств. М.: Энергия, 1976. 224 с.
20. **Гонек А. Ф.** Манометры. Л.: Машиностроение, 1979. 176 с.
21. **Горский Л. К.** Статистические алгоритмы исследования надежности. М.: Наука, 1970. 219 с.
22. **Гребенников В. В., Лебедев Н. Е.** Дистанционные средства неразрушающего контроля корпусных реакторов АЭС // Энергомашиностроение, 1984. № 11. С. 18—20.

23. Грундспенькис Я. А., Маркович З. П., Осис Я. Я. Построение топологической модели объекта // Кибернетика и диагностика. Рига: Зинатне, 1972. Вып. 5. С. 19—35.
24. Гуляев В. А. Техническая диагностика управляющих систем. Киев: Наукова думка, 1983. 207 с.
25. Диагностика автотракторных двигателей / Под ред. Н. С. Ждановского. Л.: Колос, 1977. 165 с.
26. Диагностирование машин-автоматов и промышленных роботов // Под ред. Е. Г. Нахапетяна. М.: Наука, 1983. 184 с.
27. Диагностирование оборудования комплексно-автоматизированного производства / Под ред. Е. Г. Нахапетяна. М.: Наука, 1984. 196 с.
28. Дорошко С. М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам. М.: Транспорт, 1984. 167 с.
29. Измерение в промышленности: Справочник. Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. М.: Металлургия, 1980. 268 с.
30. Испытательная техника: Справочник: В 2 кн. / Под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1. 528 с. Кн. 2. 560 с.
31. Калявин В. П., Мозгалевский А. В. Технические средства диагностирования. Л.: Судостроение, 1984. 227 с.
32. Кибернетика и диагностика. Рига: Зинатне. Вып. 3, 4, 5. 1970—1972.
33. Ковалев А. М. Нелинейные задачи управления и наблюдения в теории динамических систем. Киев: Наукова думка, 1980. 174 с.
34. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования. Л.: Судостроение, 1980. 236 с.
35. Коллеров Д. К. Газоанализаторы. М.: Изд-во стандартов, 1980.
36. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 368 с.
37. Костыркин А. И. Логический контроль релейно-константных схем. М.: Связь, 1970. 88 с.
38. Кочинский М. П., Жуков М. В., Андреев А. А. Универсальная диагностическая установка для тестового диагностирования // Докл. III Всесоюзного совещания по технической диагностике. Минск: Наука и техника, 1975. С. 113—117.
39. Кремлевский П. П. Измерение расхода многообразных потоков. Л.: Машиностроение, 1982. 214 с.
40. Кремлевский П. П. Расходы и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1975. 776 с.
41. Кузовков Н. Г. и др. Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
42. Лавлер Е. Л., Вуд Д. Е. Методы ветвей и границ // Экспресс-информация. Сер. Техническая кибернетика, 1966. № 47. С. 1—10.
43. Левин В. И. Динамика логических устройств и систем. М.: Энергия, 1980. 210 с.
44. Левин Б. Р. Теория надежности радиотехнических систем. М.: Сов. радио, 1978. 265 с.
45. Лейкин В. С., Шлемин А. В., Захалев А. И. Контрольно-испытательная аппаратура для определения работоспособности элементов судовой автоматики // Практика проектирования технических средств диагностирования. Л.: ЛДНТП, 1979. С. 78—81.
46. Лихачев В. Я., Васин А. С., Гликман Б. Ф. Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1983. 204 с.
47. Макаров Р. А. Средства технической диагностики машин. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
48. Миллер Р. Теория переключаемых схем. М.: Наука, 1970. Т. 1. 416 с.
49. Модели и методы векторной оптимизации. М.: ВИНТИ, 1973. 195 с.
50. Мозгалевский А. В., Гаскаров Д. В. Техническая диагностика: Непрерывные объекты. М.: Высш. школа, 1975. 208 с.
51. Мозгалевский А. В., Калявин В. П., Костанди Г. Г. Диагностирование электронных систем. Л.: Судостроение, 1984. 224 с.
52. Мозгалевский А. В., Калявин В. П. Системы диагностирования

судового оборудования. Л.: Судостроение, 1982. 139 с.

53. **Моисеев Н. Н.** Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 158 с.

54. **Негойцэ К.** Применение теории систем к проблемам управления. М.: Мир, 1981. 231 с.

55. **Основы** технической диагностики /В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян, В. Ф. Халчев. М.: Энергия, 1976. Ч. 1. 464 с.

56. **Остром К.** Введение в стохастическую теорию управления. М.: Мир, 1973. 252 с.

57. **Пархоменко П. П., Согомоян Е. С.** Основы технической диагностики. М.: Энергоиздат, 1981. 320 с.

58. **Попков В. И., Мышинский Э. Л., Попков О. И.** Виброакустическая диагностика в судостроении. Л.: Судостроение, 1983. 203 с.

59. **Приборы** для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2 кн. /Под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1986. Кн. 1. 313 с. Кн. 2. 391 с.

60. **Приборы** и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2 кн. /Под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1978. Кн. 1. 448 с. Кн. 2. 440 с.

61. **Пушкарев И. Ф.** Контроль и анализ технического состояния тепловозов. Л.: ЛИИЖТ, 1977. 218 с.

62. **Райкин А. Л.** Элементы теории надежности технических систем /Под

ред. П. Р. Ушакова. М.: Сов. радио, 1978. 215 с.

63. **Райншке К.** Модели надежности и чувствительности систем. М.: Мир, 1979. 452 с.

64. **Рентгенотехника:** Справочник. В 2 кн. /Под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1980. Кн. 1. 432 с. Кн. 2. 387 с.

65. **Самойлов А. Г., Каштанов А. И., Волков В. С.** Дисперсионные ТВЭЛы: Конструкция и работоспособность. М.: Энергоиздат, 1982. 255 с.

66. **Технологические** методы и средства контроля качества в самолетостроении /Под ред. И. М. Дунаева. М.: Машиностроение, 1973. 447 с.

67. **Убар Р.** Тестовая диагностика цифровых устройств. Таллин: Политехнический институт, 1980. Ч. 1. 114 с. Ч. 2. 112 с.

68. **Уонем М.** Линейные многомерные системы управления. М.: Наука, 1980. 301 с.

69. **Харазов А. М., Кривенко Е. Н.** Диагностирование легковых автомобилей на станциях технического обслуживания. М.: Высш. школа, 1982. 130 с.

70. **Хофман Д.** Техника измерений и обеспечение качества. М.: Энергоиздат, 1985. 472 с.

71. **Чегис И. А., Яблонский С. В.** Логические способы контроля работы электрических схем //Тр. Математического ин-та им. В. А. Стеклова. М.: АН СССР, 1958. Т. 51. С. 270—360.

Предметный указатель

А

- Автомат абстрактный** — Формы задания 71
— конечный — Состояния 73
— конечный инициальный, неинициальный 73
Автомат конечный с памятью — Представление комбинационным эквивалентом 75
— не полностью определенный, полностью определенный 75
Автомат структурный конечный — Блочная схема 73 — Формы задания 74
Алгоритм диагностирования 23 — Блок-схема алгоритма 87 — Построение: на основе теории информации 30—34; по логической модели 36,37; по таблице функций неисправностей 85, 86 — Форма задания: аналитическая 25; графическая 24; табличная 25, 26
— безусловный 23, 24, 33, 34
— минимизированный 136
— оптимальный 28
— оптимизированный 136
— с безусловной остановкой 24
— с условной остановкой 24
— условный 24, 27, 30, 31 — Построение методами: ветвей и границ 147; время — вероятность 26, 27; деления поровну 152, 153; динамического программирования 27, 146, 147; Шеннона—Фано 152
Алгоритм тестового диагностирования 24 — функционального диагностирования 24
Алфавиты (входной, выходной, состояний автомата) 71
Анализаторы состава жидких сред 248

Б

- Базис логической сети булев** 54
— простой 54
Безотказность объекта и технических средств диагностирования — Показатели 198

В

- Вентили** 54
Вероятность ошибки диагностирования 20, 21
— правильного диагностирования 20, 21
Вершина графа всякая 143
— внутренняя 143
Вес вершины графа 47
— события 143, 144
Весы — Виды 283 — 286
Вибрация — Аналоговые способы измерения 227 — Гармоническое колебание тела 219 — Оптические методы измерения 223 — **Параметры** 219 — Периодические и непериодические вибрационные процессы 220—222

- Вибродиагностика. Аппаратурные средства** — Выбор 226 — Группы 226 — Структурные схемы 224, 225
Влажность — Методы измерения и применяемая аппаратура 275—280
Вопросник 142, 143
— однородный и неоднородный 144
— оптимальный 144, 145 — Алгоритм построения 145
— оптимизированный 145, 146
— реализуемый 147, 148
Вопросы 142 — Основание вопроса 142 — Ответ вопроса 142
Время — Методы измерения и применяемая аппаратура 286—291

Г

- Газоанализаторы** — Виды 247, 248 — Классификационные схемы 247, 248
Гигрометры 279
Гидротестер 323
Глубина поиска дефектов 8
Графы альтернативные для задания булевых функций 56
— структурные 60, 61
— функциональные 57
— элементарные 57, 58 — Задание комбинационного объекта 61
Графы представления вопросников 143
— переходов-выходов абстрактного автомата 72
— причинно-следственных связей 38

Д

- Давление** — Методы измерения и применяемая аппаратура 257—260
Датчики давления тактильные 330
— очувствления роботов (ДОР) — Виды 329, 330
— технического зрения 330
Дерево (одновыходная логическая сеть) 59
— решений 140, 141
— эквивалентное 60
Дефектоскопия — Виды выявляемых дефектов 234 — Основные методы и их чувствительность 234—239
Диагностирование автомобилей 317—319
— двигателей внутреннего сгорания 316, 317
— двухсекционного насоса — Схема испытательного стенда 322
— гидроприводов 321, 322
— как системная задача этапов проектирования 16—18
— легковых автомобилей — Основные параметры 213, 214
— многоступенчатого редуктора 319, 320
Диагностирование техническое 7 — **Общая методика решения задач диагностирования**

18, 19 — Элементарные проверки 19
— параллельно-последовательное и последовательно-параллельное 174
— тестовое 12—14
— функциональное 10—12
Диаграммы прохождения сигналов — Правила преобразования: инверсии пути 45; Мэсона 46; простейшие 45
Дозаторы 285, 286

И

Измерители абсолютной вибрации — Виды 220, 222, 223
— относительной вибрации — Классификация 223
Измеритель механических сопротивлений — Структурная схема 314 Импульсы ударные — Аппаратура для измерения 231, 233—
Основные диагностические параметры 231 — Основные измеряемые параметры 233 — Примеры 232 — Формы 230
Индуктосины — Принцип действия 254, 255
Интроскопия — Основные методы и средства 239—241
Информация априорная 157
Искатели шаговые 207
Исправность объекта 7, 8
Испытательная техника — Измерение механических параметров материалов 266—269
Источники 45

К

Карта Карно 53
Код равновесный (m/n-код) 195
— двухпроводный 193
— избыточный 192
— избыточный с проверкой на нечетность 192, 193
— разделимый 194, 195
Компараторы оптические 250
Комплекс технологический — Схема системы диагностирования 323, 324
Комплексы агрегатные специализированные 208
— агрегатные широкого применения 207, 208
— робототехнические — Средства получения информации 328—330
— технологические роботизированные неразрушающего контроля 241—243
Контроль корпуса реактора 330, 331, 333, 335, 336
— ксерорентгенографический 239
— оборудования летательных аппаратов 337—343
— судового оборудования 309—316
— технического состояния механизма 228
— тракторных двигателей на основе измерения вибрации 320, 321
— ЭВМ 301—303, 308
— электронных приборов 308, 309
Контуры обратных связей — Режимы 113
Критерий ранговый 116, 117
— эффективности алгоритмов поиска дефектов 26

М

Магнитографы 297
Магнитной компенсации метод 259
Масса — Методы измерения и применяемая аппаратура 283—286
Матрица переходов-выходов абстрактного автомата 72, 73
Машина проверочная универсальная (ПУМА) 306, 308

Меры времени — Виды 287—289
Металлография 249, 250
Микрофоны для измерения акустического шума 229
Модели дефектов 67, 68
— динамических аналоговых моделей —
Построение: методом малого параметра в области коэффициентов уравнений 39; с использованием дифференциальных уравнений: векторных 42, 43, линейных 38, нелинейных 40—42, характеристических 38, эквивалентных 38, 39
— дискретных комбинационных объектов 51—70
— исправных дискретных объектов с памятью 71—79
— исправных комбинационных объектов 63—68
— математические процессов изменения состояния объекта 158—160
— неисправных дискретных объектов с памятью 79—83
— неисправных комбинационных объектов 63—68
— объектов логические 35—38
— объектов явные и неявные 51, 52
— прогнозирования с применением дискриминантного анализа 171—173
— распознавания образов: вероятностные 170, 171; детерминированные одномерные 169
— экстраполяции 165—169
Моделирование на входном наборе 112
— троичное 77, 78 — Особенности 78, 79
Модель итеративная 82, 109, 111
— объекта диагностирования топологическая 47—50 — Декомпозиция модели по множеству дефектов 49, 50
Мотор-тестер 321
Мультиметры 299, 300

Н

Набор входной 52
— выходной 52
— единичный 57
— контура входной: нейтральный 113, устанавливающий 113
— нулевой 57
Наборы базовых узлов (агрегатов) средств диагностирования 207—210
— входные для дискретных комбинационных объектов — Построение проверяющих и различающих совокупностей по неявным моделям 88—109
— для дискретных объектов с памятью 109—115
— обнаруживающие 88
— проверяющие 88
— различающие 88
Надежность объектов диагностирования — Обеспечение требуемых показателей 186, 187
— человека-оператора 176
Неисправности доминирующие 69
— константные 68
— кратные 51, 68
— кратные эквивалентного дерева 69 —
Отображение в виде букв ЭНФ (ОЭНФ) 69
— логические 68
— неправильные 64
— неустойчивые (сбои) 68
— одиночные 51, 68, 69
— правильные 64, 79
— физические 63, 64
— устойчивые 68

Неисправность 7, 187 — Математическая модель 187

О

Обеспечение диагностическое — Задачи организации обеспечения 9, 10
Обходы графа 143
Объект технического диагностирования 7 — аналоговый 11, 35 — Контроль правильности функционирования 130—134 — Особенности проверки работоспособности 134, 135 — Характеристики: динамические 134, статические 134 — дискретный 11, 51, 53 — дискретный блочный 196, 197 — дискретный с памятью 70, 79—81, 83 — **Внутреннее состояние** 71 — Выявление состояний 78 — комбинационный 51, 53 Координаты объекта 51 — локально вполне управляемый 44 — многорежимный 37 — наблюдаемый 43 — избыточный 188 — непрерывный 189 — с динамической избыточностью — Аппаратурные средства контроля 187 — с логическими переменными 84 — со статической избыточностью — Аппаратурные средства контроля 188 **Оптимизация организации систем диагностирования** 180—186 Критерии оценки организации 180—182 — теста поиска дефекта 33, 34 **Организация диагностирования сложных объектов** 14—16 — Подходы при построении систем диагностирования 16 — поиска неисправностей Виды 305 **Осциллографы** 295, 298 **Отказы** — Виды 211 — Причины 211, 212 — для судового оборудования Причины 212 **Ошибки**: кратная 187; однонаправленная 195

П

Параметр объекта диагностирования 256 — Классы 50 — косвенный 47, 49 — Затраты на оценку 49 — Оптимизация выбора 120—130 — Различающая способность 49 — Структура алгоритма выбора 124 — структурный 47 **Параметры диагностирования легковых автомобилей** 213, 214 — диагностические обобщенные аналоговых объектов — Методы выбора 115—119 — Оптимизация выбора 120—130 — Порядок выбора 119 — физические 216—218 — электрические — Классификация 292 — Методы измерения и применяемая аппаратура 291 **Плотность** 281 — Классификация 283 — Методы применения и применяемая аппаратура 279, 280—283 **Поиск дефектов** 7 **Показатель готовности объекта диагностирования** — Аналитическое выражение 181, 182, 184—186 **Покртия оптимизированные** — Методы построения 142 **Покртия таблиц покрытий** 137 — оптимальные 137—142 **Полнота обнаружения дефектов** 89 **Порог** 141

Преобразователи абсолютной вибрации 220—222 — аналого-цифровые 299 — для измерения давления емкостные 258, 259 — пневматические 259, 260 **Приборы магнитоэлектрические измерительные** 293, 294 — Виды 294—300 — Измеряемые параметры 293 **Приборы электроизмерительные** — Классификация 291 — аналоговые — Основные технические характеристики 295 — цифровые — Основные технические характеристики 293 **Прогнозирование с применением статистической классификации** 163—165 — с применением экстраполяции 161—163 **Преобразователи** — Измерение объектов и определение положения объектов 250—255 — Основные типы оптических схем 251 **Процессы изменения технического состояния объектов деградационные** 158, 159: детерминированные 158, 160; стохастические 158 — См. также *Старение*

Р

Работоспособность объекта 7, 8 — электронных приборов большой мощности 309 **Радиолокация** — Применение для измерения уровня жидкости 263 **Разделители кодов** 195 **Распространение однозначное** 102—105 **Расходомеры** — Виды 263—266 — Технические характеристики 264, 265 **Резание** — Методы диагностирования параметров и применяемая аппаратура 328, 329 **Резервирование мажоритарное** 188 **Рентгеноструктурный анализ** 249 **Роботы контрольно-измерительные** 325 — промышленные 325—327

С

Сварной шов — Методы контроля и применяемая аппаратура 324 **Свойство наблюдаемости** 44 — управляемости 43, 44 **Сети логические правильные** 54, 56 — Ветвь разветвления 54 — Ранги элементов 56 — Узлы сети 54 — с памятью, реализованной на триггерах — Аналитическое описание 75—77 **Сигнал входной** — Структура 129 **Силоизмерительные устройства** 269, 270, 330 — Основные типы и параметры 271, 272 — стержневые тензометрические для измерения сил, действующих на опоры подшипников 320 **Система автоматическая временного программного управления** 289, 290 — тестового контроля ЭВМ 305 **Системы диагностирования** 11 — диагностирования общие — Управление работой устройств задания установок 189, 190 — сканирования 241 — тестового диагностирования 8 — технического диагностирования 8 — Последовательность действий при разработке системы 10 — технического зрения 242

Системы и комплексы информационные измерительные 297 — Классификация 298
 Системы функционального диагностирования 8 — Подходы к вопросам построения 189
 — локальные 188
 — общие 188, 189 — Преимущества 191
 Слова кодовые 192
 События 142
 Состязания — Виды 7
 — логические 67
 Средства диагностирования технические —
 Конструкция 206—210 — Основные элементы 201 — Требования к безотказности, контролепригодности и ремонтпригодности 199—201 — Элементная база 206—210
 — автотракторного оборудования 316—323
 — внешние 197 — Классификация 197—199
 — встроенные ЭВМ 191—197
 — оборудования АЭС 330—337
 — оборудования летательных аппаратов 337—344
 — судового оборудования 309—316
 — технологического оборудования и гибких производственных систем 323—330
 Средства тестового диагностирования внешние 9, 10
 — встроенные 9, 10
 Средства функционального диагностирования встроенные (встроенного контроля) 9, 10
 Старение 157
 Степень работоспособности объекта 18
 Стоимость диагностирования средняя 20, 22
 Стоки 45
 Структуроскопия металлов — Методы определения и применяемая аппаратура 243—247
 Структуроскопы 245, 246
 Структуры систем диагностирования — Выбор 178 — Типы 177—179
 Схемы встроенного контроля, защищенные от неисправностей 192
 — одновыходные 196 — Условие самопроверяемости 196
 — полностью самопроверяемые 192, 193
 — самопроверяемые 191
 — самотестируемые 192, 194
 Схемы интегральные полупроводниковые 206
 Схемы сжатия встроенные для двухпроводных кодов 193, 194
 — многоразрядные 194
 Счетчики объемные 264

Т

Таблица дефектов объекта, представленного логической моделью 36
 — истинности 52, 53: сжатия 61, 62; структурного автомата 74
 — переходов-выходов 71, 72: автомата абстрактная 109; автомата структурная 74, 109; триггера 76
 — покрытий 136 — Построение 136, 137
 — функций неисправностей 69, 84—88 — Неявная форма задания 70
 Твердость металлов — Классификация методов измерения 268, 269
 Температура — Методы измерения и применяемая аппаратура 255—257

Тензометрирование — Классификация методов 273
 Тензометры 274
 Тензорезисторы — Виды 257, 258, 275 — Принцип работы 257
 Тепловизор — Группы 256
 Терминалы диагностические 306
 Термометры 255, 256
 Термы 60
 Тестирование программного обеспечения ЭВМ — Применяемая аппаратура 303, 305 — 309 — Процедуры 303 — Типы 303
 Тесты 87 — Построение 88
 Толщинометры 253, 254
 Томография рентгеновская вычислительная 240
 Точки контрольные 8, 19
 Триггеры 75—77
 Трудоемкость диагностирования оперативная средняя 20, 22

У

Уровень жидкости и сыпучих веществ — Методы измерения и применяемая аппаратура 260—263
 Уровнемеры 260—262
 Устройства влагомерные 279
 — дискретные 306 — Алгоритм проверки исправности и поиска дефектов 307
 — измерительные координатные 328
 — логической обработки контрольных параметров 309
 — релейные 207
 — сравнения 189

Ф

Фазометры 295
 Флюорография 239
 Фотоупругости метод 274
 Функционирование объекта 7, 8
 Функция булева — Отображение на n -мерный куб 61 — Табличная форма задания 61
 — возбуждения 73
 — выходная комбинационного объекта 57, 59
 — обобщенная выхода сети 70
 — оптимизации целевая 136
 — предпочтения 136
 — различающая 88, 89
 — штрафная 200

Ц

Цена вопроса 142
 — пути 143
 — обхода графа средняя 144

Ч

Частотомеры цифровые 295
 Часы — Характеристика основных типов 290

Ш

Шум акустический — Измерительная аппаратура 229, 230
 — Формулы для расчета 227, 228

Э

Эквивалент комбинационный автомата 76
 Эксперимент над объектом 80
 Элементы объекта диагностирования 53—55
 — систем диагностирования 174—177
 Эффективность диагностирования — Показатели и критерии 19—23