Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°»

Ж. А. Романович, В. А. Скрябин,
В. П. Фандеев, Б. В. Цыпин

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ, РЕМОНТ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВЫХ МАШИН И ПРИБОРОВ

Учебник

3-е издание

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Технологические машины и оборудование»

Москва
2016

УДК 681.51
ББК 32.96
Р69

Авторы:

Ж. А. Романович — доктор технических наук, профессор;
В. А. Скрябин — доктор технических наук, профессор;
В. П. Фандеев — доктор технических наук, профессор;
Б. В. Цыпин — доктор технических наук, профессор.

Рецензенты:

Н. А. Феоктистов — доктор технических наук, профессор;
В. Я. Савицкий — доктор технических наук, профессор.

Р69 **Романович Ж. А.**

Диагностирование, ремонт и техническое обслуживание систем управления бытовых машин и приборов: Учебник / Ж. А. Романович, В. А. Скрябин, В. П. Фандеев, Б. В. Цыпин. — 3-е изд. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2016. — 316 с.

ISBN 978-5-394-01631-8

В учебнике в систематизированном виде излагаются теоретические основы и методы ремонта, технического обслуживания и диагностирования систем управления. Основные теоретические вопросы дополняются примерами и заданиями для самостоятельной работы.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по приборостроительным, информационным, радиоэлектронным, машиностроительным и сервисным специальностям, а также специалистов в области технического диагностирования и ремонта.

ISBN 978-5-394-01631-8 © Коллектив авторов, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 7

Часть I
ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕМОНТА, ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Глава 1. Понятия ремонта, технического обслуживания и диагностирования 12
1.1 Техническое состояние 12
1.2 Виды, критерии и последствия отказа 17
1.3 Ремонт, восстановление и техническое обслуживание 21
1.4 Задачи и цели диагностирования 26
1.5 Методы, операции, процессы ремонта и технического обслуживания 30
Контрольные вопросы 35

Глава 2. Системы ремонта, технического обслуживания и диагностирования 37
2.1 Структура систем 37
2.2 Средства ремонта, технического обслуживания и диагностирования 39
2.3 Показатели системы технического обслуживания и ремонта 45
2.4 Ремонтопригодность и технологичность объектов технического обслуживания и ремонта 48
2.5 Показатели диагностирования 55
2.6 Приспособленность к диагностированию 59
Контрольные вопросы 62
Список литературы 64

Часть II
МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕМОНТИРУЕМЫХ И ОБСЛУЖИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Глава 3. Методы диагностирования при восстановлении работоспособности 67
3.1 Диагностические параметры и признаки 67
3.2 Виды и методы диагностирования 72
3.3 Контроль работоспособности 76
3.4 Поиск места отказа 80
3.5 Прогнозирование технического состояния 83
3.6 Алгоритмы диагностирования 89
3.7 Методика диагностирования и восстановления работоспособности 94
Контрольные вопросы 97

Глава 4. Исчерпывающее тестирование 99
4.1 Счет переходов и единиц 99
4.2 Сигнатурный анализ 103
4.3 Сочетание методов диагностирования 108
4.4 Средства исчерпывающего диагностирования 113
Контрольные вопросы 117
Список литературы 118

Часть III
ВНУТРИСХЕМНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

Глава 5. Диагностирование электрических цепей систем управления 120
5.1 Постановка задачи внутрисхемного диагностирования 120
5.2 Систематизация задач диагностирования электрических цепей 123
5.3 Обобщенная структурная схема системы контроля и диагностирования 130
Контрольные вопросы 142

Глава 6. Методы диагностирования линейных двухполюсных электрических цепей 143
6.1 Классификация методов получения информации о параметрах линейных двухполюсных электрических цепей 143
6.2 Методика анализа способов оценки параметров пассивных линейных двухполюсных цепей 151
6.3 Способы допускового контроля параметров линейных двухполюсных электрических цепей 159
6.4 Измерение параметров линейных электрических цепей системами с цифровыми процессорами 172
6.5 Способы программного определения информационных параметров сигналов 178
Контрольные вопросы 191

Глава 7. Диагностирование электрических цепей и элементов в составе систем управления 192
7.1 Контроль двухполюсных электрических цепей в составе печатного узла 192
7.2 Диагностирование транзисторов в составе печатного узла 204
7.3 Диагностирование интегральных схем в составе печатного узла 227
7.4 Диагностирование цепей в процессе функционирования объекта 242
7.5 Пример построения измерительного блока АСКД для внутрисхемного диагностирования 249
Контрольные вопросы 253
Список литературы 253

Часть IV
ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Глава 8. Моделирование объектов диагностирования 255

8.1 Диагностические модели ... 255
8.2 Математическое моделирование работоспособного объекта ... 258
8.3 Математическое моделирование отказов ... 264
8.4 Определение области отказа ... 267
Контрольные вопросы ... 269

Глава 9. Методы и алгоритмы оптимизации обнаружения отказов ... 271
9.1 Выбор проверок для обнаружения отказов методом линейного целочисленного программирования ... 271
9.2 Выбор проверок для обнаружения отказов методом ветвей и границ ... 275
9.3 Выбор проверок для обнаружения отказов по эвристическому алгоритму ... 279
9.4 Выбор очередности выполнения проверок для обнаружения отказов методом ветвей и границ ... 281
Контрольные вопросы ... 287

Глава 10. Методы и алгоритмы оптимизации поиска места отказа ... 289
10.1 Выбор проверок для поиска места отказа методом линейного целочисленного программирования ... 289
10.2 Выбор проверок для поиска места отказа по эвристическому алгоритму ... 293
10.3 Выбор проверок для поиска места кратного отказа по эвристическому алгоритму ... 296
10.4 Выбор очередности выполнения проверок для поиска места отказа по эвристическому алгоритму ... 298
Контрольные вопросы ... 302
Список литературы ... 302

Приложения:
1. Примеры вариантов решений по приспособленности к диагностированию ... 305
2. Задания на практические занятия ... 308

Предисловие

Бытовые машины и приборы относятся к обслуживаемым и ремонтируемым изделиям. Технологическими процессами ремонта, операциями технического обслуживания предусматривается диагностирование изделия. Затраты на диагностирование достигают 85% затрат на ремонт и техническое обслуживания изделий. Обеспечение приспособленности изделия к диагностированию, ремонту и техническому обслуживанию начинается уже на стадии разработки и требует значительных затрат материальных и финансовых ресурсов, труда квалифицированных специалистов.

Наиболее сложными для диагностирования, ремонта и технического обслуживания составными частями современных бытовых машин и приборов, других изделий, в том числе электронной бытовой аппаратуры, летательных аппаратов, транспортных средств, станков, являются системы управления.

Техническая диагностика становится одной из важнейших учебных дисциплин при подготовке специалистов по сервису изделий различного назначения. В последние годы издано большое число учебных пособий и монографий по отдельным вопросам и проблемам диагностирования, ремонта и технического обслуживания различной техники.

Однако преподавание дисциплин пока недостаточно обеспечено учебниками, учитывающими современное состояние теории, методов и средств, особенности объектов диагностирования, ремонта и технического обслуживания. Техническое обслуживание и ремонт столь сложных объектов, как системы управления невозможно осуществлять без знаний основ теории, методологии и современных информационных технологий технической диагностики.

В учебнике показана взаимосвязь и взаимообусловленность задач и целей технического диагностирования, ремонта и технического обслуживания. Анализируется понятийный аппарат технической диагностики ремонта и технического обслуживания, систематизируются методы и средства диагностирования аналоговых и цифровых электронных объектов систем управления, предлагаются модели, методы, алгоритмы, используемые при восстановлении работоспособности и автоматизированном проектировании диагностического обеспечения систем управления.

Учебник создан на кафедрах “Информационно-измерительная техника”, “Приборостроение” и “Бытовые машины и приборы” Пензенского государственного университета совместно с Московским государственным университетом сервиса. Он основывается на материалах лекций, практических и лабораторных занятий, проводимых авторами много лет в Пензенском государственном университете и Московском государственном университете сервиса для студентов приборостроительных, информационных, радиоэлектронных, машиностроительных, сервисных специальностей, а также на опыте практической работы авторов в области технического диагностирования и ремонта. Материалы учебника будут полезны практически всем техническим специальностям, в программе которых предусмотрено изучение дисциплин технической диагностики и ремонта.

Учебник состоит из десяти глав.

В первой главе анализируются технологические процессы ремонта и технического обслуживания. Показывается, что диагностирование является частью технологических процессов технического обслуживания и ремонта, предусматривающих определение технического состояния объекта, в которых обычно решаются комплексно несколько задач диагностирования. Раскрывается понятие технического состояния объекта диагностирования. Формулируются задачи, обосновываются цели диагностирования ремонтируемых и обслуживаемых изделий. Рассматривается методический подход к обоснованию эконо-

мической целесообразности восстановления работоспособности печатных узлов во взаимосвязи с технологией восстановления.

Во второй главе анализируется система показателей ремонтопригодности, ремонтной технологичности, технического обслуживания и ремонта, их связь с показателями приспособленности к диагностированию, показателями диагностирования. Раскрывается понятие системы ремонта, технического обслуживания, диагностирования. Систематизируются виды средств диагностирования.

В третьей главе систематизируются виды, методы и алгоритмы диагностирования, применяемые при техническом обслуживании и ремонте систем управления. Излагается методика сочетания методов и алгоритмов диагностирования при восстановлении работоспособности изделий. Анализируется понятие диагностического параметра, позволяющего осуществлять диагностирование изделия без его разборки.

В четвертой главе рассматриваются методы исчерпывающего тестирования цифровых устройств систем управления. Оценивается достоверность обнаружения логических отказов цифровых объектов методами счета переходов и единиц, методом сигнатурного анализа, сочетанием методов исчерпывающего тестирования.

Пятая глава посвящена общим вопросам внутрисхемного диагностирования ремонтируемых узлов систем управления. Рассматривается специфика обнаружения отказов элементов, распаянных на платах аппаратуры.

В шестой и седьмой главах рассматриваются методы измерения и контроля диагностируемых параметров двухполюсных и многополюсных электрических цепей систем управления, в том числе пассивных электрических цепей с резисторами, конденсаторами и катушками индуктивности, транзисторов и интегральных схем без выпаивания их из печатного узла.

В восьмой главе обосновывается выбор двудольного орграфа как единой диагностической модели для постановки и решения задач обнаружения и поиска места отказа при ремонте и техническом обслуживании аналоговых и цифровых объектов.

Предлагается методика разработки диагностической модели на основе модели работоспособного объекта и моделей отказов. Выводятся формулы для локализации места отказа по результатам контроля работоспособности объекта.

Девятая и десятая главы содержат методы и алгоритмы оптимизации технологических процессов ремонта и технического обслуживания на основе обнаружения и поиска места отказа по критериям, выводимым из показателей диагностирования и приспособленности к диагностированию изделий. Задачи выбора проверок и очередности выполнения проверок изделий для обнаружения отказов и поиска места отказа с минимальными затратами времени, труда, средств решаются при обосновании состава контрольных точек, встроенных и внешних средств диагностирования, разработке алгоритмов диагностирования.

Выбор проверок для обнаружения отказа с минимальными затратами приводится к задаче линейного целочисленного программирования, решаемой по алгоритму Баллаша, и к задаче оптимизации методом ветвей и границ. Преимущества каждого из методов проявляются в частных случаях для конкретных моделей и исходных данных. Сокращение перебора методом ветвей и границ обеспечивается за счет сведений об обязательно выполняемых проверках, получаемых при анализе модели. Излагается эвристический алгоритм выбора проверок, сочетанием которого с алгоритмом Баллаша достигается экономия вычислительных ресурсов. Рассматривается выбор очередности выполнения проверок для обнаружения отказов с минимальными средними затратами методом ветвей и границ.

Выбор проверок для поиска места отказа с минимальными затратами приводится к задаче линейного целочисленного программирования, решаемой по алгоритму Баллаша. Описаны эвристические алгоритмы выбора проверок, сочетанием которых с алгоритмом Баллаша достигается экономия вычислительных ресурсов. Рассматривается эвристический алгоритм выбора очередности проверок для поиска места отказа с минимальным средним числом проверок, основанный на методе минимизации избыточности кодирования.

Каждая глава содержит вопросы для контроля усвоения материала.

Теоретические основы ремонта, технического обслуживания, диагностики заложены трудами многих отечественных и зарубежных ученых. В каждой части учебника приводится список литературы, использованной при написании учебника и рекомендуемой для углубленного изучения дисциплины.

Приложение содержит варианты заданий для практических и самостоятельных занятий.

Часть I
ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕМОНТА, ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Глава 1
ПОНЯТИЯ РЕМОНТА, ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

1.1 Техническое состояние

Техническое состояние изделия приборостроения или машиностроения характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической (нормативно-технической, конструкторской, проектной) документацией.

Параметры изделия, значениями которых характеризуется техническое состояние, являются физическими величинами.

Виды физической величины систематизируются, например, по методу определения численного значения, виду физических явлений (проявлений), принадлежности к различным группам физических процессов (таблица 1.1).

Измеряемая физическая величина выражается количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Физическая величина, для которой не может быть введена единица измерения, оценивается числом с помощью принятой шкалы физической величины.

Вещественными (пассивными) физическими величинами описываются свойства веществ, материалов и изделий. Для их

Таблица 1.1

Систематизация видов физической величины

Классификационные признаки	Виды физической величины
Метод определения численного значения	Измеряемые; оцениваемые
Виды физических явлений	Вещественные; энергетические; характеризующие протекание процессов во времени
Принадлежность к различным группам физических процессов	Пространственно-временные; механические; тепловые; электрические и магнитные; акустические; световые; физико-химические и др.

измерения используется вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации.

К пассивным физическим величинам относятся, например, масса, плотность, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность.

Энергетическими (активными) физическими величинами описываются энергетические процессы. Преобразование активных физических величин в сигналы измерительной информации осуществляется без использования вспомогательных источников энергии.

Активными физическим величинам являются, например, электрический ток, напряжение, мощность, энергия.

К физическим величинам, характеризующим протекание процессов во времени, относятся переходные характеристики, спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

Принадлежность параметров к тем или иным группам физических процессов зависит от принципов действия изделия. Техническое состояние электронных систем управления, аппаратуры, приборов и устройств характеризуется, например, электрическими и магнитными, акустическими, тепловыми величинами.

Совокупность значений параметров, удовлетворяющих или не удовлетворяющих установленным требованиям, образует вид технического состояния изделия.

Например, видами технического состояния изделия являются: исправное (исправность), работоспособное (работоспособность), неисправное (неисправность), неработоспособное (неработоспособность), предельное. Краткие формы терминов, указанные в скобках, разрешается применять в случаях, исключающих возможность их различного толкования.

Каждый из видов технического состояния характеризуется совокупностью значений параметров, описывающих состояние изделия, а также качественных признаков, для которых не применяются количественные оценки. Номенклатура этих параметров и признаков, а также пределы их допустимых изменений устанавливаются в технической документации.

Изделие в исправном состоянии соответствует всем требованиям технической документации. В неисправном состоянии изделие не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Словосочетание "характер неисправности" означает конкретное недопустимое изменение в изделии, которое находилось в исправном состоянии.

Состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям технической документации, называется работоспособным, а при несоответствии значения хотя бы одного параметра требованиям технической документации — неработоспособным состоянием.

Термин "работоспособность" применяется к таким изделиям, которые при использовании по назначению расходуют свой ресурс.

Работоспособное изделие, в отличие от исправного, должно удовлетворять лишь тем требованиям технической документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение изделия по назначению. Поэтому работоспособное изделие может быть неисправным, если, например, оно не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудше-

ние внешнего вида изделия не препятствует его применению по назначению.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния изделия, называется отказом. Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния при сохранении работоспособного состояния, называется повреждением. В результате отказа или повреждения изделие переходит в неисправное состояние. Термины “неисправность”, “отказ”, “повреждение” применяются при эксплуатации изделий.

Вид технического состояния, в котором применяемое по назначению изделие выполняет в текущий момент алгоритм функционирования со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям, называется правильным функционированием. Изделие функционируют неправильно, если значения параметров функционирования не соответствуют установленным требованиям.

Изделие, правильно функционирующее в текущий момент времени, может быть неработоспособным.

Для сложных изделий возможны частично неработоспособные состояния, при которых изделие способно выполнять требуемые функции с пониженными показателями или лишь часть заданных функций.

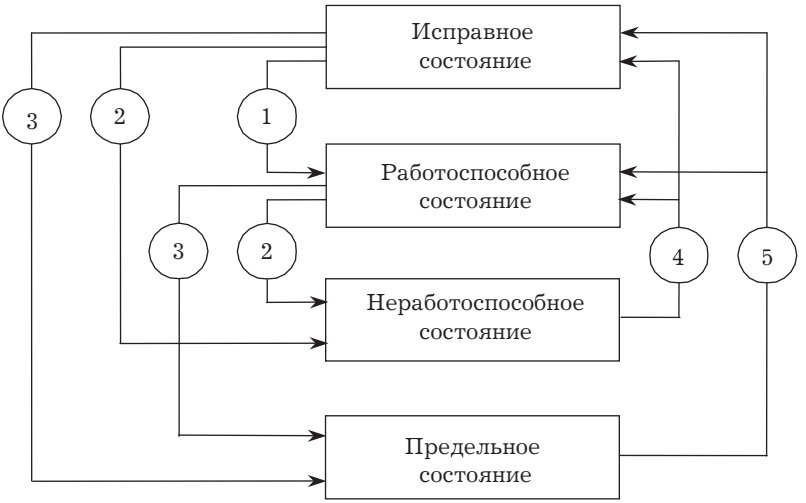
События и процессы, приводящие к изменению вида технического состояния изделия, указаны на рисунке 1.1.

Состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособности невозможно или нецелесообразно рассматривается как предельное состояние.

Предельное состояние проявляется признаком или совокупностью признаков, которые устанавливаются в технической документации и называются критерием предельного состояния.

Например, критериями предельного состояния изделия могут быть:

– отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не пре-



1 — повреждение; 2 — отказ (нересурсный); 3 — ресурсный отказ или другие факторы; 4 — восстановление; 5 — ремонт

Рисунок 1.1 — Схема изменения вида технического состояния изделия

дусматривается эксплуатационной документацией и должна выполняться в ремонтных организациях;

– износ деталей или ухудшение физических, химических свойств материалов до предельно допустимых значений;

– недопустимое снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов);

– превышение установленных текущих (суммарных) затрат на технические обслуживания и ремонты или другие признаки, определяющие экономическую целесообразность дальнейшей эксплуатации.

Изделие может перейти в предельное состояние в результате отказа или, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности.

По достижении предельного состояния изделие должно быть снято с эксплуатации, направлено в средний или капи-

тальный ремонт, утилизировано или передано для применения не по назначению.

1.2 Виды, критерии и последствия отказа

Систематизация видов отказа осуществляется по признакам существенным для технического обслуживания, ремонта и диагностирования (таблица 1.2).

Таблица 1.2

Систематизация видов отказа

Классификационные признаки	Виды отказа
Причина отказа	Конструктивный; производственный; эксплуатационный; деградационный
Критерий отказа	Функциональный; параметрический
Возможность обнаруживать отказ	Явный; скрытый
Возможность самоустранения отказа	Сбой; перемежающийся
Число отказавших составных частей объекта	Одиночный; кратный
Обусловленность отказа другими отказами	Независимый; зависимый
Характер изменения параметра	Постепенный; внезапный
Последствия отказа	Ресурсный; критический; некритиче-ский

Отказ относится к конструктивным, производственным (технологическим) или эксплуатационным для установления, на какой стадии создания или существования изделия следует провести мероприятия для устранения причин отказа.

Причиной конструктивного отказа является несовершенство или нарушение установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ возникает в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовле-

ния или ремонта изделия, выполнявшегося на ремонтном предприятии.

Возникновение эксплуатационного отказа является результатом нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации изделия.

Деградационный отказ обусловливается естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Отказ проявляется признаком или совокупностью признаков нарушения работоспособного состояния, которые устанавливаются в технической документации и называются критерием отказа.

Функциональный отказ проявляется прекращением выполнения изделием заданных функций (невыполнением алгоритма функционирования), ошибками при обработке, хранении и передаче информации цифровым устройством.

Разновидностями функционального отказа являются короткое замыкание электротехнического или электронного изделия, логический отказ цифрового устройства.

Коротким замыканием называется недопустимое возрастание токов в ветвях электрической цепи, вызванное соединением различных точек цепи, не предусмотренным нормальным режимом работы.

Логический отказ проявляется недопустимой комбинацией уровней цифрового двузначного сигнала. При логическом константном отказе уровень цифрового двузначного сигнала всегда имеет значение логического нуля (константа 0) или значение логической единицы (константа 1).

Параметрический отказ проявляется недопустимым снижением качества функционирования (производительности, мощности, точности, чувствительности и других параметров).

Явный отказ и скрытый отказ соответственно обнаруживаются и не обнаруживаются визуально или штатными методами и средствами контроля технического состояния при под-

готовке изделия к применению или в процессе его применения по назначению.

Скрытый отказ выявляется при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством человека, называется сбоем. Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера называется перемежающимся.

Характерным примером сбоя является остановка выполнения программы компьютером, устраняемая перезагрузкой программы.

Понятия “одиночный отказ”, “кратный отказ”, “независимый отказ”, “зависимый отказ” обычно относятся к составным частям изделия.

Отказ одной составной части и нескольких составных частей изделия называются одиночным и кратным отказом изделия соответственно.

Независимый отказ составной части не обусловливается, а зависимый отказ составной части обусловливается отказом другой составной части изделия.

Возникновение зависимого отказа означает, что в изделии отказали по меньшей мере две составные части и отказ является кратным.

Примером зависимого отказ является отказ вторичного источника электропитания, не защищенного от перегрузки, при коротком замыкании.

Постепенный отказ возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров изделия. Непрерывное и монотонное изменение измеряемого параметра, характеризующего способность изделия выполнять заданные функции, позволяет предсказывать наступление отказа.

Внезапный отказ проявляется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров изделия. Наступление внезапного отказа не может быть предсказано измерением параметров, значения которых изменяются только в момент наступления отказа.

Возникновение отказа приводит к явлениям, процессам, событиям и состояниям, называемым последствиями отказа. Совокупность признаков, характеризующих последствия отказа, называется критичностью отказа.

Классификация отказов по последствиям необходима при нормировании надежности (в частности, для обоснования выбора номенклатуры и численных значений нормируемых показателей надежности), установлении гарантийных обязательств.

Для классификации отказов по последствиям необходим анализ критериев, причин и последствий отказов, а также построение логической и функциональной связи между отказами.

Признаками для классификации отказов по их последствиям могут служить, например, прямые и косвенные потери, вызванные отказами, затраты на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта силами потребителя или необходимость ремонта изготовителем или третьей стороной, продолжительность простоев из-за возникновения отказов.

Последствием ресурсного отказа является достижение изделием предельного состояния.

Отказ относится к критическим, если тяжесть его последствий (ущерба от отказа) признается недопустимой и требуется принятие специальных мер по снижению вероятности данного отказа и (или) возможного ущерба, связанного с его возникновением.

Несоответствие изделия установленным требованиям при контроле качества на стадии изготовления, а также при контроле качества отремонтированного изделия называется дефектом.

Изделие, не содержащее дефектов, препятствующих его приемке, называется годным и является исправным. Неисправное изделие может иметь дефекты.

Термин “неисправность”, в отличие от термина “дефект”, распространяется не на всякое изделие. Например, не называют неисправностью недопустимые отклонения показателей качества материалов.

Отказ может возникнуть в результате наличия в изделии дефектов, но появление дефектов не всегда означает, что возник отказ.

1.3 Ремонт, восстановление и техническое обслуживание

Техническим обслуживанием называется комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании в состоянии готовности к использованию по назначению, хранении и транспортировании.

В техническое обслуживание могут входить, например, мойка изделия, контроль технического состояния, очистка, смазывание, замена некоторых составных частей, регулировка.

Процесс перевода изделия в работоспособное состояние из неработоспособного состояния называется восстановлением.

Восстановление включает в себя определение места отказа, замену отказавшей составной части, контроль и регулирование параметров составных частей, контроль работоспособности изделия в целом.

Ремонтом называется комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей.

В ремонт могут входить разборка, дефектовка, контроль технического состояния изделия, замена и (или) восстановление деталей, сборка и т. д. Содержание части операций ремонта может совпадать с содержанием некоторых операций технического обслуживания.

Характеристика технического обслуживания (ремонта), определяющая номенклатуру операций, продолжительность их выполнения, потребные трудовые, материальные и финансовые затраты, называется объемом технического обслуживания (ремонта).

Изделие, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено технической документацией, называется

обслуживаемым изделием, в противном случае — необслуживаемым.

Изделие, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено технической документацией, называется восстанавливаемым изделием, а в противном случае называется невосстанавливаемым изделием.

Изделие, ремонт которого возможен и предусмотрен технической документацией, называется ремонтируемым изделием.

Если ремонт изделия невозможен или не предусмотрен технической, документацией по техническим, экономическим или другим причинам, то такое изделие называется неремонтируемым.

Неремонтируемое изделие может быть технически обслуживаемым. Ремонтируемое изделие может быть не восстанавливаемым в конкретной ситуации.

Системы управления, их составные части, как правило, обслуживаемые, восстанавливаемые и ремонтируемые изделия. Необслуживаемыми, невосстанавливаемыми и неремонтируемыми являются, например, автономные системы управления непилотируемых космических летательных аппаратов.

Под видом технического обслуживания (ремонта) понимается техническое обслуживание (ремонт), выделяемое (выделяемый) по таким признакам, как этап существования, периодичность, объем работ, регламентация и т. д. (таблица 1.3).

Техническое обслуживание изделия может выполняться при использовании (подготовке к использованию по назначению, использовании по назначению, а также непосредственно после его окончания), при хранении (подготовке к хранению, хранении и непосредственно после его окончания), при транспортировании (подготовке к транспортированию, транспортировании и непосредственно после его окончания).

Постановка изделия на неплановое техническое обслуживание осуществляется без предварительного назначения по техническому состоянию.

Таблица 1.3

Систематизация видов технического обслуживания и ремонта

Классификационные признаки	Виды технического обслуживания и ремонта
Техническое обслуживание	
Этап эксплуатации	При использовании; при хранении; при перемещении; при ожидании
Планирование	Плановое; неплановое
Периодичность выполнения	Периодическое; сезонное
Регламентация выполнения	Регламентированное; с периодическим контролем; с непрерывным контролем; номерное
Организация выполнения	Поточное; централизованное; децентрализованное; эксплуатационным персоналом; специализированным персоналом; эксплуатирующей организацией; специализированной организацией; фирменное
Ремонт	
Степень восстановления ресурса	Капитальный, средний; текущий
Планирование	Плановый; неплановый
Регламентация выполнения	Регламентированный; по техническому состоянию
Сохранение принадлежности ремонтируемых частей	Обезличенный: необезличенный
Организация выполнения	Агрегатный; поточный; эксплуатирующей организацией; специализированной организацией; фирменный

Периодическое техническое обслуживание выполняется через установленные в эксплуатационной документации значения наработки или интервалы времени.

Виды периодического технического обслуживания могут различаться объемом работ. В этом случае технические обслуживания нумеруются в порядке возрастания объема работ (номерные технические обслуживания), например, ТО-1, ТО-2, ТО-3 и т. д.

Сезонное техническое обслуживание выполняется для подготовки изделия к использованию в осенне-зимних или весенне-летних условиях (при существенных изменениях состояния окружающей среды в течение года) и включает в себя операции замены сезонных сортов эксплуатационных материалов с промывкой соответствующих систем, установки и снятия утеплений и приборов предпускового подогрева двигателей и т. д.

Регламентированное техническое обслуживание предусматривается в нормативно-технической или эксплуатационной документации и выполняется с периодичностью и в объеме, установленными в ней, независимо от технического состояния изделия в момент начала технического обслуживания.

Техническое обслуживание с периодическим контролем выполняется с установленными в нормативно-технической или эксплуатационной документации периодичностью и объемом контроля технического состояния. Объем остальных операций определяется техническим состоянием изделия в момент начала технического обслуживания.

Техническое обслуживание с непрерывным контролем предусматривается в нормативно-технической или эксплуатационной документации и выполняется по результатам непрерывного контроля технического состояния изделия. Непрерывно контролируется, например, безошибочность передаваемой информации в компьютере.

Поточное техническое обслуживание (поточный ремонт) выполняется на специализированных рабочих местах с определенными технологической последовательностью и ритмом.

Централизованное техническое обслуживание выполняется персоналом и средствами одного подразделения организации или предприятия, а децентрализованное техническое обслуживание выполняется персоналом и средствами нескольких подразделений организации или предприятия.

Техническое обслуживание эксплуатационным персоналом выполняется работающими на данном изделии при использовании его по назначению, а техническое обслуживание специализированным персоналом выполняется работниками,

специализирующимися на выполнении операций технического обслуживания.

Персонал, выполняющий техническое обслуживание, может быть специализирован по видам объектов, операций, видам технического обслуживания.

Техническое обслуживание (ремонт) специализированной организацией выполняется работниками организации, специализирующимися на операциях технического обслуживания (ремонта).

Прогрессивным видом технического обслуживания (ремонта) некоторых изделий является фирменное техническое обслуживание (фирменный ремонт) предприятием-изготовителем. Такая организация технического обслуживания (ремонта) стимулирует создателей изделия улучшать его приспособленность к обслуживанию и ремонту, совершенствовать технологию и средства обслуживания и ремонта.

Капитальный ремонт выполняется для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые.

Под базовой частью часто понимается основная часть изделия, предназначенная для его компоновки и установки других составных частей.

Средний ремонт выполняется для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса изделий с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния составных частей, выполняемым в объеме, установленном в нормативно-технической документации. Значение частично восстанавливаемого ресурса устанавливается в нормативно-технической документации.

Текущий ремонт выполняется для обеспечения или восстановления работоспособности изделия и состоит в замене и (или) восстановлении отдельных частей.

Капитальный, средний и текущий ремонты могут быть плановыми и неплановыми.

Постановка изделия на плановый ремонт осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, а постановка изделия на неплановый ремонт — без предварительного назначения для устранения последствий отказов или происшествий.

Регламентированный ремонт является плановым, выполняемым с периодичностью и объемом, установленными в эксплуатационной документации, независимо от технического состояния изделия в момент начала ремонта.

При ремонте по техническому состоянию контроль технического состояния выполняется с периодичностью и в объеме, установленными в нормативно-технической документации, а объем и момент начала ремонта определяются техническим состоянием изделия.

Необезличенный ремонт выполняется с сохранением восстановленных составных частей к определенному экземпляру изделия, а при обезличенном ремонте принадлежность восстановленных составных частей к определенному экземпляру изделия не сохраняется.

Разновидностью обезличенного ремонта является агрегатный ремонт, при котором неисправные агрегаты заменяются новыми или заранее отремонтированными. Замена агрегатов может выполняться после отказа изделия или по плану.

Под агрегатом понимается сборочная единица, обладающая свойствами полной взаимозаменяемости, независимой сборки и самостоятельного выполнения определенной функции в изделиях различного назначения.

Примеры агрегатов; электродвигатель; насос; редуктор.

Противоположностью агрегатного ремонта является подетальный ремонт, при котором заменяются или восстанавливаются отдельные неисправные детали.

1.4 Задачи и цели диагностирования

Техническое состояние изделия определяется при техническом диагностировании. Задачами технического диагнос-

тирования являются контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирование, воспроизведение технического состояния.

Термин “техническое диагностирование” или его краткая форма “диагностирование” применяются в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (неисправности).

Контролем технического состояния называется проверка соответствия значений параметров изделия требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент.

Термин “контроль технического состояния” или его краткая форма “контроль” применяются, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния.

Выявление недопустимого значения параметра при контроле технического состояния позволяет обнаружить отказ и определить (локализовать) подозреваемые в отказе составные части изделия. Локализация обычно рассматривается как первый этап поиска места отказа, т. е. определения части изделия, отказ которой вызвал неработоспособность этого изделия.

Явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа изделия, называются причинами отказа. К определению причины отказа (анализу причины отказа, анализу отказа) приступают после отыскания места отказа. Выяснение причины отказа позволяет принимать конструктивные, технологические и организационные меры по их предупреждению.

Причинами отказа изделия могут быть, например, несовершенство или нарушение правил, норм проектирования и конструирования, установленного процесса изготовления или ремонта на предприятии, нарушение установленных правил, условий эксплуатации, дефекты не обнаруженные при изготовлении, испытаниях, приемочном контроле, естественные процессы старения, изнашивания, коррозии и усталости.

Прогнозирование технического состояния заключается в определении технического состояния с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Техническое состояние прогнозируется посредством анализа значений параметров, документируемых при периодическом контроле технического состояния изделия.

Результат прогнозирования (прогноз) может использоваться, например, для принятия решения в системе технического обслуживания с периодическим контролем и ремонта по техническому состоянию (рисунок 1.2).

Рисунок 1.2 — Схема принятия решения о техническом обслуживании, восстановлении, ремонте изделия

Воспроизведением технического состояния называется процесс установления технического состояния изделия по за-

писи (регистрации) значений параметров, произведенной в предшествующий цикл (циклы) его работы. По записи значений параметров устанавливаются, например, часть изделия, содержащая отказавший элемент, вид и причина отказа.

Диагностирование является частью технологических процессов, предусматривающих определение технического состояния изделия. В технологических процессах обычно решаются комплексно несколько задач диагностирования (таблица 1.4). Целью диагностирования может быть поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования изделий, достижение требуемых значений показателей технологических процессов, предусматривающих диагностирование, или технологических систем, в которых выполняются заданные технологические процессы.

Таблица 1.4

Задачи диагностирования при техническом обслуживании и ремонте

Задачи диагностирования при		
техническом обслуживании	**восстановлении и неплановом ремонте**	**плановом ремонте**
Контроль и прогнозирование технического состояния	Контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа	Контроль технического состояния, поиск места неисправности

Формализация цели диагностирования состоит во введении целевой функции, выбираемой с учетом назначения и области применения диагностирования, с помощью которой оценивается полезность диагностирования.

Например, полезность диагностирования изделия при восстановлении работоспособности можно определять по формуле

$$W = \frac{W_{\text{р}} - W_{\text{о}}}{W_{\text{и}} - W_{\text{о}}}, \tag{1.1}$$

где $W_р$, $W_и$, $W_о$ — показатели восстановления, технологичности или ремонтопригодности в части восстановления изделия при использовании соответственно реальной (оцениваемой), идеальной системы диагностирования и без системы диагностирования или ее части, например, при восстановлении пробными заменами.

Выбирая конкретные показатели восстановления, технологичности или ремонтопригодности в части восстановления, можно получать различные показатели полезности (1.1) диагностирования.

Показатель вида (1.1) обладает высокой чувствительностью к изменению показателей диагностирования изделия.

1.5 Методы, операции, процессы ремонта и технического обслуживания

Методом технического обслуживания (ремонта) называется совокупность технологических и организационных правил выполнения операций технического обслуживания (ремонта).

Систематизация методов технического обслуживания и ремонта представлена в таблице 1.5. Классификационные признаки и термины методов технического обслуживания и ремонта совпадают с соответствующими классификационными признаками и терминами видов технического обслуживания и ремонта (см. таблицу 1.3).

Операция технического обслуживания является законченной частью технического обслуживания изделия, представляющей совокупность приемов, выполняемых на одном рабочем месте одним или группой исполнителей установленными для выполняемой операции средствами технического обслуживания.

Операция ремонта является законченной частью ремонта изделия, представляющей совокупность приемов, выполняемых на одном рабочем месте установленными для выполняемой операции средствами ремонта.

Техническое обслуживание может включать удаление загрязнений, технический осмотр (контроль, осуществляемый в основном при помощи органов чувств), контроль и регулировку

Таблица 1.5

Систематизация методов технического обслуживания и ремонта

Классификационные признаки	Термины
Методы технического обслуживания	
Организация выполнения	Поточный; централизованный; децентрализованный; эксплуатационным персоналом; специализированным персоналом; эксплуатирующей организацией; специализированной организацией; фирменный
Методы ремонта	
Сохранение принадлежности ремонтируемых частей	Обезличенный: необезличенный;
Организация выполнения	Агрегатный; поточный; эксплуатирующей организацией; специализированной организацией; фирменный

Примечание. Персонал, выполняющий техническое обслуживание, может быть специализирован по типам изделий, видам операций и видам технического обслуживания

параметров, замену составных частей, смазок, контроль работоспособности, расконсервацию, консервацию, сбор и обработку сведений по эксплуатации изделия и другие работы в зависимости от вида технического обслуживания.

Восстановление изделия, неплановый ремонт, выполняемый для восстановления работоспособности, включают контроль технического состояния, поиск места и устранение отказа (рисунок 1.3).

Контроль технического состояния позволяет обнаружить отказ и локализовать место отказа. Уточнение отказавшей составной части осуществляется при поиске места отказа.

Для устранения отказа обычно требуются разборка, замена или восстановление отказавших составных частей, сборка изделия.

Разборка изделия при восстановлении и неплановом ремонте осуществляется в минимально необходимом объеме для устранения отказа.

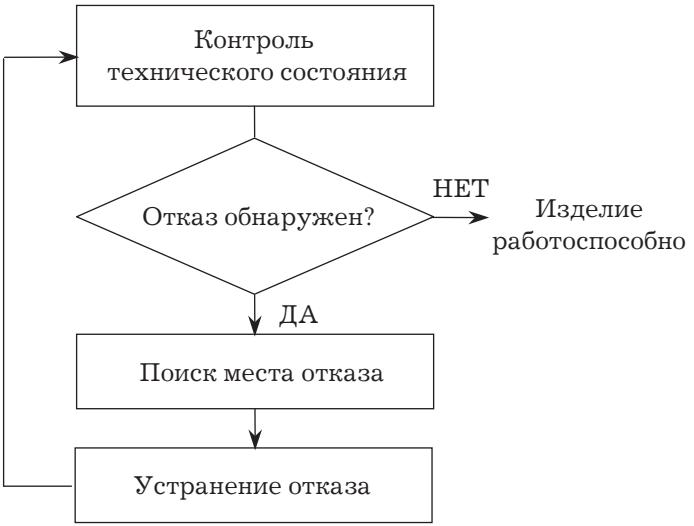


Рисунок 1.3 — Схема типового технологического процесса восстановления и непланового ремонта

Технологией восстановления может предусматриваться совмещение поиска места и устранение отказа пробными заменами подозреваемых в отказе составных частей запасными частями. Для восстановления пробными заменами не требуются средства поиска места отказа, но необходим комплект заведомо работоспособных составных частей. Определение места отказа и восстановление пробными заменами не гарантируется.

Ремонт изделий может выполняться заменой или восстановлением отдельных деталей и сборочных единиц.

Капитальный ремонт обычно включает следующие виды работ:

– проверку комплектности изделия;
– разборку изделия;
– дефектовку сборочных единиц и деталей;
– замену или восстановление составных частей;
– восстановление покрытий;

– сборку, регулировку, настройку, наладку сборочных единиц и изделия;

– контроль качества и испытания сборочных единиц и изделия;

Упрощенная схема типового технологического процесса планового капитального ремонта показана на рисунке 1.4.

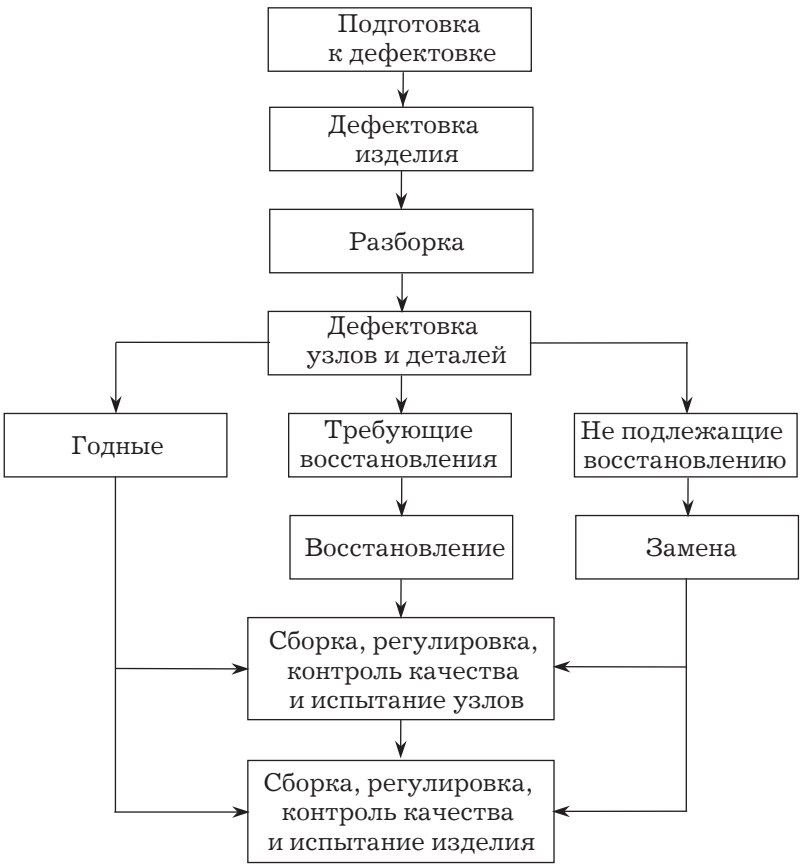


Рисунок 1.4 — Схема типового технологического процесса капитального ремонта изделия

Подготовка к дефектовке включает, например, чистку и мойку изделия. Дефектовка проводится для определения вида

технического состояния, состава и объема операций, обеспечивающих восстановление после ремонта значений технико-эксплуатационных характеристик изделия. Определение вида технического состояния при дефектовке осуществляется, например, техническим осмотром, методами неразрушающего контроля, диагностирования. Технология и организация дефектовки должны исключать возможность постановки на ремонтируемое изделие неисправных, выработавших свой ресурс деталей и сборочных единиц.

Современными методами и средствами неразрушающего контроля и диагностирования не обеспечивается, как правило, определение неисправных и выработавших свой ресурс деталей и сборочных единиц без разборки изделия.

Разборка изделия осуществляется в объеме, обеспечивающем обнаружение повреждений и отказов, восстановление и замену узлов и деталей. Восстановление формы и размеров деталей осуществляется способами наплавки, нанесения покрытий, пластического деформирования, применения дополнительных деталей ремонтных размеров, сочетаемыми с обработкой резанием. Восстановление печатных узлов выполняется заменой отказавших изделий электронной техники. Поиск места отказа, определение ресурса восстанавливаемого узла осуществляются методами технического диагностирования.

Целесообразность восстановления составных частей изделия определяется с учетом технических возможностей ремонтных органов и результатов экономического анализа. Учитываются наличие, возможность или целесообразность приобретения средств технологического оснащения, наличие освоенных и возможность внедрения новых технологических процессов, наличие специалистов требуемой квалификации.

Обоснование экономической целесообразности восстановления основывается на количественной оценке стоимости восстановления коэффициентом экономичности ремонта $К_э$, определяемым по формуле

$$К_э = \frac{С_{рем}}{К_R С_{изг}}, \qquad (1.2)$$

где $C_{рем}$ — стоимость восстановления (ремонта) составной части;

$C_{изг}$ — стоимость изготовления составной части;

K_R — коэффициент, равный отношению технического ресурса восстановленной составной части к техническому ресурсу закупленной составной части.

Восстановление составной части считается экономически целесообразным при $K_э \leq 1$. Стоимость восстановления составной части в значительной степени определяется технологической себестоимостью, и прежде всего расходами на осуществление технологического процесса восстановления. Детали и сборочные единицы, не подлежащие восстановлению, заменяются новыми, изготовленными по заказу или закупленными. Восстановленные, годные без восстановления и новые детали и сборочные единицы комплектуются в сборочные комплекты и подаются на рабочие места для сборки.

Сборка составных частей и изделия в целом выполняется при помощи слесарно-сборочных операций (слесарная сборка), электромонтажа, пайки, сварки и других методов образования соединений. Сборочные операции могут чередоваться с операциями контроля и регулирования параметров, настройки, наладки, контроля функционирования, диагностирования узлов и изделия.

Технологическим процессом ремонта предусматриваются контроль качества и контрольные испытания составных частей и изделия. Входному контролю подвергаются материалы и изделия, используемые для ремонта. Операционный контроль осуществляется во время выполнения или после завершения технологической операции. По результатам приемочного контроля принимается решение о пригодности изделия к поставке и (или) использованию.

Составные части и изделие подвергаются испытаниям на воздействие механических, термических, электрических и других факторов.

Контрольные вопросы

1. Что такое техническое состояние изделия?

2. Дайте определение параметра изделия. Приведите примеры параметров, относящихся к различным видам физических величин.

3. Чем отличаются вещественные и энергетические физические величины? Приведите примеры таких величин.

4. Дайте определения терминов “неисправность”, “отказ”, “повреждение”, “дефект” и поясните различия между ними.

5. Может ли быть изделие одновременно работоспособным и неисправным? Поясните на примере.

6. Чем отличаются функциональный и параметрический отказы? Приведите примеры функциональных и параметрических отказов.

7. Перечислите и поясните виды функционального отказа.

8. Дайте определения и поясните различия одиночного и кратного отказов.

9. Поясните признаки, по которым отказы подразделяются на конструктивные, производственные и эксплуатационные.

10. Поясните назначение технического обслуживания, различия между регламентированным техническим обслуживанием, техническим обслуживанием с периодическим контролем, техническим обслуживанием с непрерывным контролем.

11. Чем отличаются между собой капитальный, средний и текущий ремонты, плановый и неплановый ремонты, регламентированный ремонт и ремонт по техническому состоянию?

12. Поясните схему технологического процесса восстановления работоспособности изделия, предусматривающего контроль технического состояния и поиск места отказа.

13. Поясните различия между поиском места отказа и определением причин отказа.

14. Какие работы может включать техническое обслуживание?

Глава 2
СИСТЕМЫ РЕМОНТА, ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

2.1 Структура систем

Система технического обслуживания и ремонта техники представляет собой совокупность взаимосвязанных средств, документации технического обслуживания и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества изделий, входящих в эту систему.

Обобщенная структурная схема системы технического обслуживания (ремонта) представлена на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 — Структурная схема системы технического обслуживания (ремонта)

Взаимодействие составных частей системы технического обслуживания (ремонта) между собой и с системой более высокого уровня, внешней средой показано двунаправленными стрелками.

Системы технического обслуживания и текущего ремонта являются подсистемами системы эксплуатации на стадии эксплуатации, а системы среднего и капитального ремонта входят в производственные системы ремонта на стадии ремонта жизненного цикла изделий.

К средствам технического обслуживания и ремонта относятся здания, сооружения, технические устройства, а также материалы, запасные части, предназначаемые для выполнения технического обслуживания и ремонта.

Создание, хранение, рациональное расходование, пополнение до установленных норм запасов средств технического обслуживания и ремонта являются задачами систем материально-технического обеспечения технического обслуживания и ремонта.

Документацией технического обслуживания и ремонта определяются правила технического обслуживания и ремонта, содержатся сведения по техническому обслуживанию и ремонту.

Сведения об изделии и указания, необходимые для правильного и безопасного технического обслуживания, текущего ремонта и оценок его технического состояния при определении необходимости отправки в ремонт, содержатся в руководстве по эксплуатации.

Сведения о проведении технических обслуживаний, текущих ремонтов вносятся в формуляр изделия.

К ремонтным документам относятся, например, общее руководство, руководство по ремонту, общие технические условия, технические условия на ремонт.

Эксплуатационные и ремонтные документы могут разрабатываться в электронной форме, например, в виде интерактивных электронных документов.

Обеспечение подразделений, предприятий документацией по техническому обслуживанию и ремонту является задачей систем документального обеспечения технического обслуживания и ремонта.

Исполнителями технического обслуживания и ремонта являются квалифицированные специалисты.

Система технического диагностирования (контроля технического состояния) является подсистемой системы технического обслуживания или ремонта, образованной совокупностью средств, изделия и исполнителей для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации.

Для организации взаимодействия составных частей системы диагностирования необходимо при создании нового или модернизации существующего изделия определить цель и задачи, установить показатели диагностирования, разработать диагностическое обеспечение, приспособить конструкцию к диагностированию.

Диагностическим обеспечением называется комплекс взаимоувязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла изделия.

Тенденцией развития систем диагностирования является автоматизация диагностирования. Проведение диагностирования в автоматизированной системе диагностирования обеспечивается с применением средств автоматизации и участием человека. Диагностирование в автоматической системе диагностирования осуществляется без участия человека.

Автоматизированной системой диагностирования реализуется информационная технология в виде определенной последовательности информационно связанных функций, задач или процедур, выполняемых в автоматизированном (интерактивном) или автоматическом режиме.

2.2 Средства ремонта, технического обслуживания и диагностирования

Средствами технического обслуживания и ремонта являются здания, сооружения, технические устройства, запасные части и материалы, предназначенные для выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту изделий.

К техническим устройствам, применяемым при техническом обслуживании и ремонте, относятся, например, средства выполнения технологических операций и процессов, называемые средствами технологического оснащения, состоящие из технологического оборудования, приспособлений и инструментов.

Запасная составная часть (запасная часть) изделия предназначается для замены находившейся в эксплуатации такой же части с целью поддержания или восстановления исправности или работоспособности изделия.

Запасные части, инструменты, принадлежности (ЗИП), материалы, используемые при техническом обслуживании и ремонте изделий, могут поставляться комплектами и вне комплектов (запасные части, ЗИП россыпью).

Комплекты запасных частей, инструментов, принадлежностей, материалов в зависимости от назначения и условий их использования подразделяются на одиночные, групповые и ремонтные комплекты запасных частей, комплекты ЗИП.

Одиночный комплект ЗИП (запасных частей) поставляется вместе с изделием и предназначается для его эксплуатации.

Групповой комплект ЗИП (запасных частей) поставляется в расчете на группу однородных или однотипных изделий для обеспечения их эксплуатации, а также для выполнения ремонта эксплуатирующей организацией и пополнения одиночных комплектов ЗИП (запасных частей) по мере их расхода.

Ремонтный комплект ЗИП (запасных частей) поставляется на группу однородных или однотипных изделий для обеспечения их ремонта и пополнения комплектов ЗИП (запасных частей).

Комплект запасных частей (ЗИП) россыпью предназначается для пополнения одиночных, групповых и ремонтных комплектов запасных частей (ЗИП), а также для непосредственного использования при техническом обслуживании и ремонте изделий.

Средствами диагностирования называются аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Систематизация видов средств диагностирования

Признаки классификации	Виды средств диагностирования
Степень универсальности	Универсальные, специализированные
Степень автоматизации	Автоматизированные, автоматические
Приспособленность к агрегатированию	Агрегатные; неагрегатные
Конструктивная связь с объектом	Встроенные, внешние

К диагностической аппаратуре относятся приборы и устройства, используемые для диагностирования.

Программные средства диагностирования представляют собой программы, предусматривающие операции, необходимые для диагностирования программно-управляемого изделия, например компьютера.

Универсальное средство диагностирования предназначается для диагностирования изделий различных типов. В качестве универсальных средств диагностирования могут использоваться, например универсальные измерительные приборы.

Специализированное средство диагностирования предназначается для диагностирования одного изделия или группы однотипных изделий. К специализированным средствам диагностирования относятся, например, диагностические программы цифровых вычислительных машин.

Автоматизированным и автоматическим средствами диагностирования производятся в автоматическом режиме (без участия человека) соответственно часть действий и все действия по диагностированию изделия.

Агрегатированием называется метод конструирования изделий на основе применения унифицированных и стандартизированных составных частей путем изменения характера их соединений и пространственного сочетания применительно к заданным условиям.

Приспособленность к агрегатированию позволяет разрешать противоречия между требованиями однотипности изделий массового производства и многообразием средств диагностирования.

Встроенное средство диагностирования является составной частью изделия. Например, для контроля технического состояния изделия в его конструкцию вводятся светодиодный индикатор подачи напряжения питания, измерительный преобразователь.

Определение вида технического состояния средств контроля с помощью встроенных средств или специальных программ называется самоконтролем.

Развитие теории и микроэлектронных встроенных средств диагностирования позволило ставить и решать задачи создания самопроверяемых отказоустойчивых цифровых устройств. Самопроверяемое устройство обладает свойством обнаруживать отказ составной части, в том числе встроенного средства диагностирования, в процессе функционирования.

Внешнее средство диагностирования выполняется конструктивно отдельно от изделия. Подключение внешнего средства к изделию осуществляется через устройство сопряжения только во время диагностирования.

Примером внешнего средства диагностирования является комплект контрольно-проверочной аппаратуры, содержащий универсальные и специализированные средства диагностирования.

Комплекс внешних автоматизированных средств контроля технического состояния и поиска места отказа сложных изделий, называемый аппаратурой автоматизированного контроля (ААК), состоит из взаимодействующих аппаратных и программных средств диагностирования.

Основными признаками ААК являются агрегатные автоматизированные средства диагностирования, подключенные к внутреннему интерфейсу ААК, средства управления и математической обработки информации на базе одного или нескольких процессоров или электронной вычислительной машины (ЭВМ),

модульная магистральная структура, программное обеспечение на алгоритмическом языке, проблемно ориентированном на задачи диагностирования, решаемые конкретным типом ААК.

Агрегатные автоматизированные средства диагностирования позволяют легко наращивать функциональные возможности ААК и вместе с модульной магистральной структурой обеспечивают адаптацию к объектам и задачам диагностирования.

Основными функциями средств ААК являются выдача на изделие стимулирующих сигналов, управление подключением к изделию нагрузок, прием и преобразование контролируемых сигналов, организация цепей преобразования контролируемых и формирования стимулирующих сигналов, исполнение программ диагностирования, выполнение команд человека-оператора, выдача данных, математическая обработка информации.

Математическая обработка информации в ААК применяется при определении значений параметров изделия, формировании результатов диагностирования установленного вида, преобразовании входной информации в форму, пригодную для использования средствами ААК, преобразовании выходной информации в форму, удобную для восприятия человеком.

Обобщенная структурная схема ААК с параллельным интерфейсом показана на рисунке 2.2.

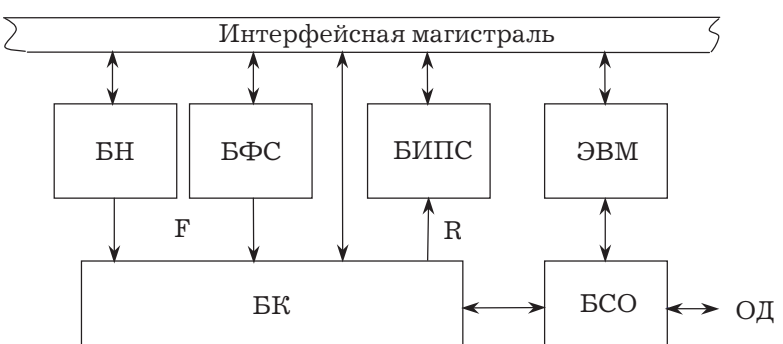


Рисунок 2.2 — Структурная схема автоматизированной аппаратуры контроля

Воздействия F на объект диагностирования (ОД), необходимые для контроля технического состояния и блоком поиска места отказа, создаются приборами блоков формирования стимулирующих сигналов (БФС) и блоком нагрузок (БН). Формирование стимулирующих сигналов осуществляется, например, автоматическими генераторами или синтезатором сигналов.

Контролируемые сигналы R объекта поступают на приборы блока измерения и преобразования сигналов (БИПС). Измерение параметров сигналов осуществляется, например, автоматическими цифровыми измерительными приборами. Преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму выполняется аналого-цифровым преобразователем.

Цепи формирования воздействий и преобразования контролируемых сигналов образуются коммутаторами блока коммутации (БК), проводами, кабелями, контактными соединениями блока сопряжения с объектом диагностирования (БСО). Для реализации алгоритма диагностирования любого вида требуется полнодоступный коммутатор с адресным управлением.

Управление средствами и объектом диагностирования в соответствии с алгоритмом диагностирования осуществляется электронной вычислительной машиной через интерфейсную магистраль, шины и устройства БСО.

Программное обеспечение ААК состоит из общего и функционального программного обеспечения. Функциональное программное обеспечение (ФПО) предназначается для диагностирования объекта и средств самой ААК. Общее программное обеспечение предназначается для исполнения программ ФПО, управления средствами диагностирования с рабочего места человека-оператора.

Качество средств диагностирования характеризуется показателями точности, быстродействия, затратами труда и времени на подготовку к использованию, другими показателями.

2.3 Показатели системы технического обслуживания и ремонта

Показатели системы технического обслуживания и ремонта (таблица 2.2) позволяют количественно оценивать затраты времени, труда и средств на техническое обслуживание и ремонт, влияние технического обслуживания, ремонта на надежность.

Календарное время проведения и трудозатраты (затраты труда) на проведение одного технического обслуживания (ремонта) называются соответственно продолжительностью и трудоемкостью технического обслуживания (ремонта).

Стоимость одного технического обслуживания (ремонта), называемая стоимостью технического обслуживания (ремонта), вычисляется по формуле

$$C = C_А + C_Э + C_И, \qquad (2.1)$$

где $C_А$ — амортизационные затраты средств технического обслуживания (ремонта);

$C_Э$ — затраты на заработную плату исполнителей, все виды энергии, материалы, запасные части, инструменты, потребляемые при техническом обслуживании (ремонте);

$C_И$ — снижение стоимости изделия в результате расходования его ресурса за время технического обслуживания (ремонта).

Таблица 2.2

Показатели системы технического обслуживания и ремонта

Термины	Определения
Средняя продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания (ремонта)	Математическое ожидание продолжительности (трудоемкости, стоимости) одного технического обслуживания (ремонта) данного вида за определенный период эксплуатации или наработку
Средняя суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний (ремонтов)	Математическое ожидание суммарной продолжительности (трудоемкости, стоимости) технических обслуживаний (ремонтов) за определенный период эксплуатации или наработку

Окончание табл. 2.2

Термины	Определения
Удельная суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний (ремонтов)	Отношение средней суммарной продолжительности (трудоемкости, стоимости) технических обслуживаний (ремонтов) к заданной наработке
Коэффициент готовности	Вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается
Коэффициент технического использования	Отношение математического ожидания суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период
Готовность парка изделий	Отношение числа работоспособных изделий к общему числу изделий парка в рассматриваемый момент времени

Изменения технического состояния изделия, организации, технологии, материально-технического обеспечения и других факторов приводят к случайным изменениям затрат на техническое обслуживание (ремонт). Средние затраты определяются как математические ожидания по известному закону распределения случайных затрат.

Например, средняя продолжительность технического обслуживания (ремонта) определяется по формуле

$$T = \int_0^\infty t f(t)\,dt = \int_0^\infty t\,dF(t) = \int_0^\infty [1 - F(t)]\,dt, \qquad (2.2)$$

где $f(t)$ — плотность распределения продолжительности технического обслуживания (ремонта);

$F(t)$ — функция распределения продолжительности технического обслуживания (ремонта).

Суммарные продолжительность, трудоемкость, стоимость технических обслуживаний (ремонтов) складываются из продолжительностей, трудоемкостей, стоимостей всех технических обслуживаний (ремонтов) за заданные наработку или интервал времени.

Средняя суммарная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний (ремонтов) за определенный период эксплуатации или наработку представляет собой сумму средних продолжительностей (трудоемкостей, стоимостей) отдельных видов технического обслуживания (ремонта).

Например, средняя суммарная трудоемкость технических обслуживаний (ремонтов) определяется по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{r} (S_i n_i), \tag{2.3}$$

где S_i — средняя трудоемкость технического обслуживания (ремонта) i-го вида;

n_i — количество технических обслуживаний (ремонтов) i-го вида;

r — количество видов технического обслуживания (ремонта).

Показатели системы технического обслуживания и ремонта содержат оперативные затраты, обусловленные конструкцией и техническим состоянием изделий, и затраты, обусловленные организацией, технологией выполнения технического обслуживания и ремонта, материально-техническим обеспечением, квалификацией персонала, условиями окружающей среды и т. д.

Коэффициент готовности характеризует готовность изделия к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени. Различают стационарный и нестационарный коэффициенты готовности, а также средний коэффициент готовности.

Например, стационарное значение коэффициента готовности, если оно существует, определяется по формуле

$$K_{г} = \frac{T}{T + T_{в}},$$

где T — средняя наработка на отказ;

$T_{в}$ — среднее время восстановления.

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения изделия в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации.

2.4 Ремонтопригодность и технологичность объектов технического обслуживания и ремонта

Ремонтопригодность является одним из свойств обслуживаемого и ремонтируемого изделия, определяющих его надежность, которое заключается в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Технологичность изделия при техническом обслуживании и ремонте является совокупностью свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ (по организации, технологии, материально-техническому обеспечению и т. д.).

Показатели для оценки ремонтопригодности (таблица 2.3) являются оперативными составляющими показателей системы технического обслуживания и ремонта.

Затраты времени исполнителя на выполнении операции технического обслуживания (ремонта), определяемые конструкцией и техническим состоянием изделия, называются оперативным временем технического обслуживания (ремонта). Оперативное время технического обслуживания (ремонта) определяется при хронометраже работ по техническому обслуживанию и ремонту изделий каждого исполнителя.

Место оперативного времени в структуре всего рабочего времени исполнителя работ по техническому обслуживанию и ремонту изделия показано на рисунке 2.3.

Таблица 2.3

Показатели для оценки ремонтопригодности и технологичности объектов технического обслуживания и ремонта

Термины	Определения
Показатели ремонтопригодности	
Средняя оперативная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания (планового (непланового) текущего, среднего, капитального ремонта) данного вида	Математическое ожидание оперативной продолжительности (трудоемкости, стоимости) технического обслуживания (планового (непланового) текущего, среднего, капитального ремонта) данного вида за определенный период эксплуатации или наработку
Среднее время (средняя трудоемкость) восстановления	Математическое ожидание времени (трудоемкости) восстановления изделия после отказа
Гамма-процентная оперативная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания (планового (не-планового) текущего, среднего или капитального ремонта) данного вида	Оперативная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технического обслуживания (планового (непланового) текущего, среднего, капитального ремонта) данного вида, которая не превышается с заданной вероятностью γ (выраженной в процентах)
Гамма-процентное время восстановления	Время, в течение которого восстановление работоспособности изделия будет осуществлено с вероятностью γ (выраженной в процентах)
Средняя суммарная оперативная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний (текущих, средних, капитальных ремонтов)	Часть средней суммарной продолжительности (трудоемкости, стоимости) технических обслуживаний (плановых и неплановых текущих ремонтов, планового и неплановых средних, капитальных ремонтов), определяемая конструкцией и техническим состоянием изделия

Продолжение табл. 2.3

Термины	Определения
Удельная суммарная оперативная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний (текущих, средних, капитальных ремонтов)	Отношение математического ожидания средней суммарной оперативной продолжительности (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний (текущих, средних, капитальных ремонтов) к заданной наработке изделия
Вероятность выполнения непланового текущего (среднего, капитального) ремонта в заданное время	Вероятность того, что время выполнения непланового текущего (среднего, капитального) ремонта изделия не превысит заданной оперативной продолжительности
Вероятность восстановления	Вероятность того, что время восстановления не превысит заданное значение
Интенсивность восстановления	Условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния изделия, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено
Объединенная удельная оперативная продолжительность (трудоемкость, стоимость) технических обслуживаний и ремонтов	Сумма удельных оперативных продолжительностей (трудоемкостей, стоимостей) технических обслуживаний и ремонтов всех видов за определенные период эксплуатации или наработку
Показатели технологичности объекта при техническом обслуживании и ремонте	
Средняя оперативная трудоемкость (продолжительность) технического обслуживания (ремонта) данного вида	Совпадают с определениями аналогичных показателей ремонтопригодности
Коэффициент доступности	Отношение основной трудоемкости выполнения операций технического обслуживания (ремонта) к сумме основной и вспомогательной трудоемкостей

Окончание табл. 2.3

Термины	Определения
Коэффициент взаимозаменяемости	Отношение оперативной трудоемкости замены сборочных единиц или деталей изделия без учета трудоемкости пригоночных, регулировочных и селективных работ к оперативной трудоемкости сборки объекта с учетом этих работ
Коэффициент легкосъемности	Отношение оперативной трудоемкости демонтажно-монтажных работ на прототипе изделия к оперативной трудоемкости этих работ на испытуемом изделии
Коэффициент унификации	
Коэффициент стандартизации	

Примечание. Под прототипом понимается изделие, показатели технологичности которого приняты за исходные.

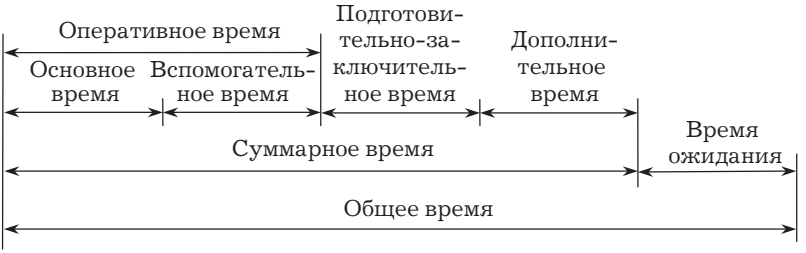


Рисунок 2.3 — Структура общего рабочего времени исполнителя работ по техническому обслуживанию и ремонту

В течение вспомогательного времени технического обслуживания (ремонта) осуществляется подготовка изделия к выполнению работ по техническому обслуживанию (ремонту) путем частичной разборки, например вскрытия люков, крышек, для обеспечения доступа к месту обслуживания (ремонта) и установка снятых сборочных единиц и деталей в исходное рабочее положение после операций технического обслуживания (ремонта).

Вспомогательное время является важной характеристикой технологичности конструкции изделия при техническом обслуживании и текущем ремонте и основной составляющей при расчете коэффициента доступности как одного из показателей для оценки ремонтопригодности.

В течение *основного времени* технического обслуживания (ремонта) выполняются непосредственно операции технического обслуживания (ремонта), в том числе диагностирование, регулировка параметров и др.

Подготовительно-заключительное время затрачивается исполнителем на подготовку и приведение в порядок рабочего места и материальных средств перед началом, в процессе выполнения и после завершения технического обслуживания (ремонта), а также на получение задания, инструктаж и ознакомление с технической документацией.

Дополнительное время затрачивается исполнителем на отдых при утомительной работе и личные надобности. *Время*

ожидания входит в рабочее время исполнителя, например, при неудовлетворительной организации, несвоевременном материально-техническом обеспечении работы.

Понятие “Оперативная продолжительность технического обслуживания (ремонта)” используется для характеристики занятости изделия работами по техническому обслуживанию (ремонту) в отличие от понятия “Оперативное время технического обслуживания (ремонта)”, которое используется для характеристики занятости работами каждого отдельного исполнителя.

Оперативная продолжительность технического обслуживания (ремонта) зависит от приспособленности изделия к одновременному выполнению работ несколькими исполнителями, что особенно важно для сложных изделий.

Минимальная оперативная продолжительность технического обслуживания (ремонта) имеет место при равномерной и одновременной загрузке всех исполнителей.

При неравномерной и неодновременной загрузке исполнителей оперативная продолжительность технического обслуживания (ремонта) равна интервалу времени от начала работ первого исполнителя до их завершения последним исполнителем.

В случае одного исполнителя оперативная продолжительность совпадает с оперативным временем и численно равна оперативной трудоемкости технического обслуживания (ремонта).

Показатель “Средняя оперативная продолжительность непланового текущего (среднего, капитального) ремонта данного вида” соответствует показателю “Среднее время восстановления”.

Структура средней оперативной продолжительности непланового ремонта (восстановления) электронной аппаратуры модульной конструкции показана на рисунке 2.4. Наибольшая доля затрат приходится на диагностирование аппаратуры.

Три класса значений средней оперативной продолжительности ремонта аппаратуры связаны с концепцией (замыслом) ремонта по организации, технологии и средствам ремонта, приспособленности конструкции к ремонту.

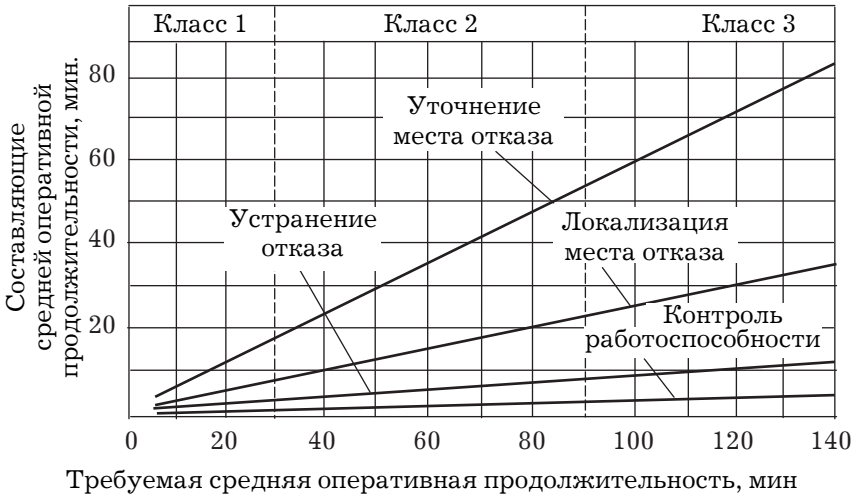


Рисунок 2.4 — Соотношение составляющих средней оперативной продолжительности непланового ремонта электронной аппаратуры

Значения показателя в пределах заданного класса обеспечиваются, если выполняются определенные требования к организации, технологии и средствам ремонта, приспособленности конструкции к ремонту.

Гамма-процентные показатели позволяют оценивать риск потребителя изделий.

Оперативные затраты определяются на основе статистических данных о затратах времени, труда и средств в заданных условиях выполнения технического обслуживания и ремонта по организации, технологии, материально-техническому обеспечению, квалификации персонала, воздействиям окружающей среды и т. д. для заданной наработки за определенный период эксплуатации.

В качестве заданной наработки изделия принимаются, например, один цикл всех технических обслуживаний при оценке приспособленности изделия к техническому обслуживанию, назначенный ресурс до первого капитального ремонта, назначенный ресурс между капитальными ремонтами или наработ-

ка за установленный срок службы до списания при оценке приспособленности изделия к капитальному ремонту.

Расчет показателей ремонтопригодности осуществляется по формулам для расчета аналогичных показателей системы технического обслуживания и ремонта, в которых вместо общих затрат времени, труда и средств учитываются оперативные затраты.

2.5 Показатели диагностирования

Затраты времени и труда при диагностировании оцениваются продолжительностью и трудоемкостью диагностирования.

Интервал времени, необходимый для проведения диагностирования (продолжительность диагностирования) зависит от конструкции и технического состоянием изделия, организации, технологии, материально-технического обеспечения, квалификации исполнителей работ, условий окружающей среды.

Затраты труда на диагностирование (трудоемкость диагностирования) характеризуются количеством рабочего времени (в часах), затрачиваемого исполнителями на диагностирование. Трудоемкость диагностирования определяется на основе технически обоснованных норм рабочего времени.

Составляющей продолжительности (трудоемкости) диагностирования является оперативная продолжительность (трудоемкость) диагностирования. Оперативной составляющей характеризуются затраты времени (труда) на выполнение всех операций диагностирования изделия, определяемых его конструкцией и техническим состоянием, в заданных условиях диагностирования по организации, технологии, материально-техническому обеспечению, квалификации исполнителей, факторам окружающей среды.

Изменения технического состояния изделия и средств диагностирования, организации, технологии и материально-технического обеспечения диагностирования, факторов окружающей среды приводят к случайным изменениям затрат на диагностирование.

Математические ожидания продолжительности (трудоемкости) и оперативной продолжительности (трудоемкости) диагностирования называются средней продолжительностью (трудоемкостью) и средней оперативной продолжительностью (трудоемкостью) диагностирования соответственно.

Удельные затраты на диагностирование определяются как отношение математического ожидания затрат к заданной наработке.

Степень объективного соответствия результатов диагностирования техническому состоянию изделия называется достоверностью диагностирования.

Показатели достоверности диагностирования указаны в таблице 2.4.

Если изделие находится в состоянии i, а в результате диагностирования считается находящимся в состоянии j и $i \neq j$, то происходит ошибка диагностирования вида (i, j), $i \neq j$. При $i = j$ состояние изделия определяется правильно.

Ошибки диагностирования, в результате которых неисправное (неработоспособное) изделие признается исправным (работоспособным), и наоборот, называются необнаруженной неисправностью (необнаруженным отказом) и ложной неисправностью (ложным отказом) соответственно.

Составляющие показателей достоверности диагностирования, обусловленные применяемыми методом и средствами диагностирования, называются соответственно показателями методической и инструментальной достоверности диагностирования. При оценке показателей методической достоверности диагностирования характеристики средств диагностирования, как правило, принимаются идеальными.

Показатель методической достоверности диагностирования изделия зависит, например, от совокупности контролируемых параметров этого изделия, методики контроля и принятых в ней критериев оценки технического состояния.

Показатель инструментальной достоверности диагностирования зависит, например, от вероятностных свойств взаимодействующих между собой устройств изделия и средств

Таблица 2.4

Показатели достоверности диагностирования

Задачи диагностирования	Результаты диагностирования	Показатели диагностирования
Контроль технического состояния	Заключение в виде: 1) изделие исправно и (или) работоспособно; 2) изделие неисправно и (или) неработоспособно	Вероятность того, что неисправное (не-работоспособное) изделие в результате диагностирования признается исправным (работоспособным) Вероятность того, что исправное (работоспособное) изделие в результате диагностирования признается неисправным (неработоспособным)
Поиск места отказа или неисправности	Наименование элемента (сборочной единицы) или группы элементов, которые неисправны и место отказа или неисправности	Вероятность того, что при наличии отказа (неисправности) в результате диагностирования принимается решение об отсутствии отказа (неисправности) в данном элементе (группе) Вероятность того, что при отсутствии отказа (неисправности) в результате диагностирования принимается решение о наличии отказа (неисправности) в данном элементе (группе)
Прогнозирование технического состояния	Численное значение параметра на задаваемый период времени, в том числе и на данный момент времени	Среднеквадратическое отклонение прогнозируемого параметра
	Численное значение остаточного ресурса (наработки)	Среднеквадратическое отклонение прогнозируемого остаточного ресурса
	Численное значение остаточного ресурса (наработки), соответствующего заданной вероятности	Вероятность безотказной работы, показатели изменения прогнозируемого параметра
	Нижняя граница вероятности безотказной работы по параметрам безопасности на задаваемый период времени	Доверительная вероятность

диагностирования, формирующих контролируемые сигналы и обеспечивающих контроль их параметров, а также вида используемого алгоритма проверки результата контроля каждого параметра.

Характеристика, определяющая возможность обнаружения отказов (неисправностей) в изделии при выбранном методе его диагностирования, называется полнотой контроля. Ограничение полноты контроля, например сокращение числа контролируемых параметров, приводит к увеличению числа необнаруженных отказов.

Интервал времени или наработка между очередными этапами контроля технического состояния при техническом обслуживании с периодическим контролем называется периодичностью контроля технического состояния.

Вычисление средней продолжительности (трудоемкости), средней оперативной продолжительности (трудоемкости), показателей достоверности диагностирования осуществляется по известному закону распределения или статистическим данным случайной величины.

Например, средняя оперативная продолжительность диагностирования вычисляется по формуле

$$T = \sum_{i=1}^{n} t_i p_i = \sum_{i=1}^{n} p_i \sum_{l=1}^{k} t_{i,l} p_l, \qquad (2.4)$$

где n, k — число состояний изделия и средств диагностирования соответственно;

t_i — средняя оперативная продолжительность диагностирования изделия в состоянии i;

p_i — априорная вероятность состояния i;

$t_{i,\,l}$ — оперативная продолжительность диагностирования изделия в состоянии i при условии, что средство диагностирования находится в состоянии l;

p_l — априорная вероятность нахождения средства диагностирования в состоянии l.

Вероятность правильного диагностирования вычисляется по формуле

$$D = \sum_{i=1}^{n} p_{i,i} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} p_{i,j}, \qquad (2.5)$$

где $p_{i,\,i}$ — вероятность правильного определения состояния i изделия;

$p_{i,j}$ — вероятность ошибки диагностирования вида (i, j), $i \neq j$.

Вероятность ошибки диагностирования вида (i, j), $i \neq j$ вычисляется, например, по формуле

$$p_{i,j} = p_i \sum_{l=1}^{k} p_l p_{j,i,l}, \qquad (2.6)$$

где k — число состояний средства диагностирования;

p_i — априорная вероятность нахождения изделия в состоянии i;

p_l — априорная вероятность нахождения средства диагностирования в состоянии l;

$p_{j,\,i,\,l}$ — условная вероятность того, что в результате диагностирования изделие признается находящимся в состоянии j при условии, что оно находится в состоянии i и средство диагностирования находится в состоянии l.

Показатели диагностирования объекта нормируются из следующих условий (критериев оптимизации):

$$W \to \max; \quad C \leq C^*; \qquad (2.7)$$

$$C \to \min; \quad W \leq W^*, \qquad (2.8)$$

где W — показатель выходного эффекта диагностирования;

C — показатель затрат на обеспечение диагностированием объекта;

W^*, C^* — заданные значения показателей.

Для оптимизации показателей диагностирования устанавливается их связь с критериями (2.7), (2.8) и применяются методы математического программирования.

2.6 Приспособленность к диагностированию

Свойство изделия, характеризующее его пригодность к проведению диагностирования (контроля) заданными сред-

ствами диагностирования (контроля) называется приспособленностью к диагностированию (контролепригодностью).

Приспособленность к диагностированию (контролепригодность) достигается согласованием диагностического обеспечения и конструкции при проектировании изделия.

Требования по приспособленности к диагностированию (контролепригодности) устанавливаются в технической документации на проектируемое изделие в виде количественных значений показателей приспособленности к диагностированию и качественных требований.

Показателями приспособленности к диагностированию могут быть, например, вспомогательное время диагностирования, оперативные составляющие продолжительности, трудоемкости диагностирования, средняя оперативная трудоемкость или продолжительность данного вида диагностирования, удельная суммарная оперативная трудоемкость диагностирования, коэффициент безразборного диагностирования.

Средней оперативной трудоемкостью (продолжительностью) данного вида диагностирования называется средняя суммарная оперативная трудоемкость (продолжительность) операций, необходимых для определения технического состояния изделия при данном виде диагностирования.

Вычисление средней оперативной трудоемкости данного вида диагностирования осуществляется по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{m} s_i, \tag{2.9}$$

где m — число операций данного вида диагностирования, необходимых для определения технического состояния;

s_i — оперативная трудоемкость i-й операции диагностирования, вычисляемая по формуле

$$s_i = s_{\text{O}i} + s_{\text{B}i}, \tag{2.10}$$

где $s_{\text{O}i}$, $s_{\text{B}i}$ — основная и средняя вспомогательная трудоемкость операции диагностирования соответственно.

Основной трудоемкостью операции диагностирования характеризуются, например, затраты труда на установление не-

обходимых режимов работы изделия и средств диагностирования, контроль параметров.

Средняя вспомогательная трудоемкость операции диагностирования складывается, например, из средней трудоемкости установки и снятия средств диагностирования, средней трудоемкости работ на изделии для обеспечения доступа к контрольным точкам.

Коэффициентом безразборного диагностирования называется отношение числа контролируемых параметров изделия данного вида диагностирования, для измерения которых не требуются демонтажно-монтажные работы, к общему числу контролируемых параметров данного вида диагностирования.

Вычисление коэффициента безразборного диагностирования осуществляется по формуле

$$K = \frac{П_к}{П_н}, \qquad (2.11)$$

где $П_к$ — число контролируемых параметров данного вида диагностирования, для измерения которых не требуются демонтажно-монтажные работы;

$П_н$ — общее число контролируемых параметров данного вида диагностирования.

Удельной суммарной оперативной трудоемкостью диагностирования называется отношение средней суммарной оперативной трудоемкости диагностирования за цикл периодического технического обслуживания к заданной наработке объекта. Этот показатель применяется, например, при определении такого показателя ремонтопригодности, как удельная суммарная оперативная трудоемкость технических обслуживаний.

Нормирование показателей приспособленности к диагностированию осуществляется из условий обеспечения заданных значений показателей диагностирования, технологичности конструкции и ремонтопригодности.

Качественные требования по приспособленности к диагностированию (контролепригодности) содержат общие требования к параметрам, методам, средствам технического диагностиро-

вания (СТД), конструкции изделия в целом и его составных частей (приложение 1). Эти требования согласовываются с нормированными значениями показателей приспособленности изделия к диагностированию (таблица 2.5).

Таблица 2.5

Требования по приспособленности к поиску места отказа электронной аппаратуры при восстановлении работоспособности

Средняя оперативная продолжительность поиска, мин	Варианты решений по приспособлености к диагностированию	Качественные требования
До 26	1–2	Автоматизированное диагностирование без разборки аппаратуры
Свыше 26 до 77	3–5	Диагностирование по алгоритмам преимущественно без разборки аппаратуры
Свыше 77	6	Диагностирование с применением демонтажно-монтажных работ и универсальных измерительных приборов

Сведения по приспособленности изделия к диагностированию, необходимые для создания средств диагностирования и оценки приспособленности к диагностированию, указываются в конструкторском документе “Характеристика контролепригодности”.

Контрольные вопросы

1. Поясните взаимодействие составных частей системы диагностирования по схеме на рисунке 2.1.

2. Дайте определение информационной технологии диагностирования.

3. Приведите примеры внешних воздействий на изделия объект диагностирования, средства диагностирования, исполнителей диагностирования.

4. Нарисуйте структурную схему автоматической системы диагностирования.

5. Что такое диагностическое обеспечение? Какие составные части системы диагностирования содержат элементы диагностического обеспечения?

6. Приведите примеры универсальных и специализированных средств диагностирования.

7. Приведите примеры встроенных средств диагностирования.

8. Дайте определение термина “агрегатирование”. Поясните проблему, которую позволяет разрешать агрегатирование.

9. Поясните структуру оперативного времени диагностирования.

10. От каких факторов зависят продолжительность и трудоемкость диагностирования?

11. Поясните различие между оперативной продолжительностью диагностирования и оперативным временем диагностирования.

12. В каком случае оперативная продолжительность совпадает с оперативным временем и численно равна оперативной трудоемкости диагностирования?

13. Укажите условие, при котором оперативная продолжительность диагностирования минимальная.

14. Чему равна оперативная продолжительность диагностирования при неравномерной и неодновременной загрузке исполнителей.

15. Дайте определение достоверности диагностирования.

16. Чем обусловлены ошибки диагностирования?

17. Почему показатели диагностирования являются случайными величинами?

18. Дайте определения и поясните формулы для вычисления средней оперативной продолжительности и средней оперативной трудоемкости диагностирования.

19. Поясните формулы для вычисления вероятности правильного диагностирования и вероятности ошибки диагностирования.

20. Поясните различие между приспособленностью к диагностированию и контролепригодностью.

21. Перечислите и поясните показатели приспособленности к диагностированию.

22. Какие составляющие времени диагностирования характеризуют приспособленность к диагностированию?

23. Перечислите качественные требования по приспособленности к диагностированию.

Список литературы

1. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.

2. ГОСТ 28.101-80. Система технического обслуживания и ремонта техники. Ремонтопригодность. Общие требования.

3. ГОСТ 21623-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтопригодности. Термины и определения.

4. ГОСТ 23146-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Выбор и задание показателей ремонтопригодности. Общие требования.

5. ГОСТ 20831-75. Система технического обслуживания и ремонта техники. Порядок проведения работ по оценке качества отремонтированных изделий.

6. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

7. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

8. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.

9. Методика определения экономического ущерба от отказов. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 10 с.

10. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.

11. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения.

12. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования.

13. ГОСТ 20417-75. Техническая диагностика. Общие положения о порядке разработки систем диагностирования.

14. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.

15. ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения.

16. ГОСТ 14.201-83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования.

17. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

18. ГОСТ 2.601-2006. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы.

19. ГОСТ 2.602-95. Единая система конструкторской документации. Ремонтные документы.

20. ГОСТ Р 50.1.029-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Интерактивные электронные технические руководства. Общие требования к содержанию, стилю и оформлению. Рекомендации по стандартизации.

21. ГОСТ Р 50.1.030-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Интерактивные электронные технические руководства. Требования к логической структуре базы данных.

22. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.

23. *Леонов А. И.* Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов / А. И. Леонов, Н. Ф. Дубровский. — М.: Легпромбытиздат, 1991. — 272 с.

24. *Кокс Д.* Теория восстановления: пер. с англ. / Д. Кокс, В. Смит. — М.: Сов. радио, 1967. — 299 с.

25. *Барзилович Е. Ю.* Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие. — М.: Высш. школа, 1982. — 231 с.

26. *Молодык Н. В.* Восстановление деталей машин: справочник / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. — М.: Машиностроение, 1989. — 480 с.

27. *Фолкенберри Л. М.* Справочное пособие по ремонту электрических и электронных систем / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 416 с.

28. *Карр Ф.* Диагностика и ремонт аппаратуры радиосвязи и радиовещания / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 400 с.

29. *Чухнин В. Н.* Теоретические основы эксплуатации и ремонта вооружения: Учеб. пособие / В. Н. Чухнин, Н. Н. Вершинин. — Пенза: Из-во Пенз. гос. ун-та, 2001. — 228 с.

30. *Каннингхем К.* Методы обеспечения ремонтопригодности/ К. Каннингхем, В. Кокс / Пер. с англ.; под ред. О. Ф. Пославского. — М.: Сов. радио, 1978. — 312 с.

31. *Гайденко В. С.* Основы построения автоматизированных систем контроля сложных объектов / В. С. Гайденко, Б. К. Жилюк, С. К. Крылов и др.; под ред. П. И. Кузнецова. — М.: Энергия, 1969. — 480 с.

32. *Кудрицкий В. Д.* Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры / В. Д. Кудрицкий, М. А. Синица, П. И. Чинаев; под ред. П. И. Чинаева. — М.: Сов. радио, 1977. — 256 с.

343. *Кудрявцев Г. Г.* Микропроцессоры и микроЭВМ в системах технического обслуживания средств связи / Г. Г. Кудрявцев, И. А. Мамзелев. — М.: Радио и связь, 1989. — 136 с.

Часть II
МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕМОНТИРУЕМЫХ И ОБСЛУЖИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

3.1 Диагностические параметры и признаки

Параметр изделия, используемый при диагностировании (контроле), называется диагностическим (контролируемым) параметром. Диагностические (контролируемые) параметры выбираются в зависимости от применяемого метода диагностирования (контроля) и позволяют определять техническое состояние изделия без его разборки.

Следует различать прямые и косвенные диагностические (контролируемые) параметры.

Прямым называется структурный параметр, т. е. параметр, непосредственно характеризующий существенное свойство детали или сборочной единицы изделия. Косвенный параметр функционально зависит от структурного параметра.

Например, прямыми параметрами электродвигателя являются износ щеток и коллектора, износ подшипников, мощность электродвигателя, а к косвенным параметрам относятся потребляемый ток, параметры вибрации и шума, частота вращения ротора.

Информация о значениях диагностического (контролируемого) параметра передается сигналом измерительной информации, или измерительным сигналом. Он поступает на вход средства измерений, при помощи которого преобразуется в выходной сигнал, имеющий форму, удобную либо для непосредственного восприятия человеком, либо для последующей обработки и передачи.

Сигнал представляет собой процесс изменения физической величины (несущей величины), характеризующей энергетический носитель воздействия и взаимодействующую с ним материальную среду. Изменение несущей величины описывается математической функцией совокупности взаимосвязанных физических величин, содержащих информацию об источнике воздействия и материальной среде.

Примером является периодический сигнал в виде гармонического колебания тока. Несущая физическая величина — ток как характеристика направленного движения электронов. Изменение тока описывается зависимостью

$$I(t) = A\cos(\omega t - \varphi),$$

т. е. связанной совокупностью физических величин A, ω, φ (амплитуда, угловая частота и начальная фаза соответственно).

Характеристика сигнала, отображающая физическую величину, называется параметром сигнала. Понятие “параметр сигнала” предполагает в качестве отображающей физической величины несущую величину или одну из величин, характеризующих изменение несущей величины.

Измерительный сигнал (таблица 3.1) содержит количественную информацию об измеряемой физической величине диагностического (контролируемого) параметра. Один из параметров измерительного сигнала (информативный параметр) функционально связан с измеряемой физической величиной.

Аналоговый сигнал отображается непрерывной или кусочно-непрерывной функцией, причем функцией и аргументом принимаются любые значения в заданных интервалах.

Таблица 3.1

Систематизация измерительных сигналов

Классификационные признаки	**Виды измерительных сигналов**
Математическое описание изменения сигнала	Аналоговые; дискретные; цифровые
Характер изменения во времени	Постоянные; переменные Непрерывные; импульсные Периодические; непериодические
Наличие априорной информации о сигнале	Детерминированные; случайные

Дискретный сигнал изменяется дискретно во времени или по уровню. В первом случае сигнал может принимать в дискретные моменты времени любые значения и описывается решетчатой функцией. Во втором случае значение сигнала из ограниченного числа значений существует в любой момент времени.

Цифровой сигнал изменяется дискретно по уровню и во времени и описывается квантованными решетчатыми функциями, принимающими в дискретные моменты времени лишь конечное число дискретных значений.

Объекты диагностирования, параметры которых отображаются аналоговыми, дискретными, цифровыми измерительными сигналами, называются аналоговыми, дискретными, цифровыми соответственно.

Параметры постоянного сигнала не изменяются, а параметры переменного сигнала изменяются во времени. Параметры переменного непрерывного сигнала изменяются во времени непрерывно.

Импульсный сигнал имеет конечную энергию, которая существенно отличается от нулевого значения в течение ограниченного интервала времени.

Мгновенные значения периодического сигнала повторяются через постоянный интервал времени, называемый периодом. Спектр периодического сигнала состоит из гармоник. Гармонический периодический сигнал содержит только одну гармонику, описываемую функцией синуса или косинуса.

Непериодический сигнал не имеет периода повторения. К непериодическим относятся, например, сигналы переходных процессов в системах управления.

Закон изменения и параметры модели детерминированного сигнала априорно известны. Мгновенные значения детерминированного сигнала известны в любой момент времени.

Например, выходной сигнал генератора низкочастотного синусоидального сигнала характеризуется значениями амплитуды и частоты, на которые он настраивается с помощью органов управления.

Сигнал с частично известным характером изменения во времени, т. е. с одним или несколькими неизвестными параметрами называется квазидетерминированным.

Случайный сигнал представляет собой изменяющуюся во времени физическую величину, мгновенное значение которой является случайной величиной.

Требования к параметру могут устанавливаться, например, в форме задания его номинального и предельно допустимых значений. Процесс определения соответствия значения параметра установленным требованиям называется контролем параметра.

Контроль параметра, как правило, состоит из трех стадий:

1) формирования и подачи (в случае необходимости) на соответствующий вход изделия стимулирующих воздействий;

2) измерения физической величины, соответствующей данному параметру с количественной или качественной характеристикой ее значения;

3) сравнения измеренного значения физической величины с требованиями технической документации и принятия заключения о степени соответствия результата измерения этим требованиям.

Вид технического состояния изделия может характеризоваться качественными признаками, для которых не применяются количественные оценки. Примерами качественных признаков являются оплавление изоляции, шум, стук, вибрация, перегрев, искрение, выделение химических веществ, указывающие на нарушение нормальной работы изделия.

Качественные признаки, используемые при диагностировании изделия, называются диагностическими признаками.

Информация о значениях диагностических параметров и признаков получается с помощью прямых, косвенных и совокупных измерений, неразрушающего контроля, органолептического контроля, анализов.

Неразрушающий контроль основывается на взаимодействии физического поля или вещества с контролируемым объектом, например изделием, материалом.

Задачами неразрушающего контроля могут быть обнаружение дефекта и выявление неоднородности структуры в объекте, измерение параметров дефекта и оценка структуры объекта, визуализация физических полей при их взаимодействии (прохождении, отражении, рассеянии и т. п.) с объектом, синтез изображений объекта в сечениях и другие.

Совокупность методов и средств обнаружения дефекта, выявления неоднородности структуры в объекте, измерения параметров дефекта, оценки структуры объекта называется соответственно дефектоскопией, структуроскопией, дефектометрией, структурометрией.

Неразрушающий контроль, в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяется на магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, проникающими веществами.

Органолептический контроль основывается на восприятии органами чувств (зрения, слуха, обоняния, осязания) информации об оцениваемых физических величинах, качественных признаках.

К органолептическому контролю относится, например, визуальный контроль, осуществляемый органами зрения.

При органолептическом контроле могут применяться средства контроля, не являющиеся измерительными, но увеличивающие разрешающую способность или восприимчивость органов чувств человека.

Значения параметров и качественных признаков изделия, удовлетворяющие или не удовлетворяющие требованиям, определяющим вид технического состояния, называются признаками исправности и неисправности, работоспособности и отказа.

Формализованными методами выбора диагностических (контролируемых) параметров предусматриваются построение и анализ диагностической модели изделия. Диагностическая модель устанавливает взаимосвязь между параметрами изделия и позволяет выбрать диагностические (контролируемые) параметры, необходимые и достаточные для решения той или иной задачи диагностирования.

3.2 Виды и методы диагностирования

Видом диагностирования (контроля) называется классификационная группировка диагностирования (контроля) по определенному признаку (таблица 3.2).

Таблица 3.2

Систематизация видов диагностирования (контроля технического состояния)

Признак вида диагностирования (контроля)	Вид диагностирования (контроля)
Стадия существования изделия	Диагностирование при разработке; диагностирование при производстве; диагностирование при эксплуатации; диагностирование при ремонте
Задачи диагностирования	Контроль технического состояния; поиск места отказа (неисправности); определение причин отказа (неисправности); прогнозирование технического состояния
Задачи контроля	Контроль исправности; контроль работоспособности; контроль функционирования
Приспособленность конструкции к диагностированию	Диагностирование изделия без его разборки; диагностирование изделия с его разборкой

Окончание табл. 3.2

Признак вида диагностирования (контроля)	**Вид диагностирования (контроля)**
Принципы диагностирования	Рабочее диагностирование; тестовое диагностирование Структурное диагностирование; поэлементное диагностирование
Правила диагностирования	Алгоритмическое диагностирование; экспертное диагностирование
Средства диагностирования	Аппаратное диагностирование: программное диагностирование
Участие человека в диагностировании	Неавтоматизированное диагностирование; автоматизированное диагностирование; автоматическое диагностирование

Диагностирование на стадиях разработки и производства изделия может предусматриваться, например, технологическими процессами настройки, регулировки, отладки опытного и серийного образцов.

На стадии эксплуатации изделия диагностирование осуществляется при вводе в эксплуатацию, подготовке к использованию по назначению, техническом обслуживании и текущем ремонте.

На стадии ремонта изделия диагностирование осуществляется при дефектовке, восстановлении работоспособности составных частей, контроле качества отремонтированного изделия.

Задачей контроля технического состояния может быть проверка соответствия значений параметров изделия требованиям, определяющим исправность (контроль исправности), или только работоспособность (контроль работоспособности).

Контролем функционирования называется контроль выполнения изделием части или всех свойственных ему функций.

Диагностирование изделия без его разборки (безразборное диагностирование) осуществляется без демонтажа, разрыва связей составных частей. Возможность безразборного диагностирования достигается, начиная с разработки изделия, за счет

обеспечения приспособленности конструкции к диагностированию.

Разборка изделия при диагностировании необходима, если конструкция не приспособлена к безразборному диагностированию применяемыми методами и средствами. Например, выполняется демонтаж составной части для диагностирования вне изделия.

Рабочее (функциональное) диагностирование осуществляется при подаче на изделие рабочих воздействий во время его применения по назначению. Никакие воздействия на изделие со стороны средств диагностирования не поступают.

При тестовом диагностировании воздействия на изделие (тесты) поступают от средств диагностирования. Тестовое диагностирование возможно во время работы изделия, если тестовые воздействия не мешают его нормальному функционированию, при имитации условий функционирования, испытании изделия или при неработающем изделии.

Структурное диагностирование осуществляется с использованием взаимодействия составных частей изделия. На изделие поступают рабочие или подаются тестовые воздействия. Реакции одних составных частей являются воздействиями для других составных частей. Диагностическими параметрами выбираются, как правило, косвенные параметры.

Поэлементное диагностирование осуществляется без использования взаимодействия составных частей изделия. Рабочие воздействия на объект не поступают. Тестовые воздействия подаются на составные части изделия. Диагностическими параметрами являются, как правило, структурные параметры.

Последовательность действий при алгоритмическом диагностировании задается алгоритмом, методикой диагностирования. Алгоритмическое диагностирование позволяет ограничить требования к квалификации специалиста, выполняющего диагностирование, автоматизировать диагностирование.

Решения при экспертном диагностировании принимаются специалистами (экспертами), имеющими опыт диагностирова-

ния изделия. Трудоемкость экспертного диагностирования существенно зависит от квалификации специалиста.

Аппаратное диагностирование осуществляется с использованием приборов, устройств, аппаратуры, а для программного диагностирования применяются диагностические программы.

Неавтоматизированное диагностирование выполняется человеком. Автоматизированное диагностирование осуществляется с частичным участием человека. Автоматическое диагностирование осуществляется без участия человека.

Каждому виду диагностирования соответствуют определенные методы диагностирования. Методом диагностирования называется совокупность взаимосвязанных принципов и правил диагностирования.

Принципы диагностирования характеризуются диагностическими параметрами и признаками, применяемыми для определения вида технического состояния, поиска места отказа (неисправности), определения причины отказа (неисправности), прогнозирования технического состояния изделия.

Правила диагностирования составляют предписания, задаваемые алгоритмом или методикой диагностирования, например по выполнению, анализу и обработке результатов измерений параметров для определения значений структурных параметров и получения диагноза.

Систематизирующими (классификационными) признаками методов диагностирования учитываются конструктивно-функциональные уровни декомпозиции, назначение, принцип действия, структура, конструкция, параметры, виды состояний, отказов, повреждений, дефектов изделия.

Методы диагностирования подразделяются, например, применительно к комплексам, изделиям, входящим в комплекс, сборочным единицам, деталям, аппаратным и программным изделиям, аналоговым и цифровым объектам, видам отказов.

Разработка принципов и правил диагностирования (планирование диагностирования) включает выбор вида метода диагностирования, определение номенклатуры и пределов из-

менения диагностических параметров и признаков, оптимизацию алгоритмов диагностирования.

Планирование диагностирования осуществляется с использованием диагностических моделей, математических методов и информационных технологий при проектировании изделия, разработке технологической, эксплуатационной, ремонтной документации.

3.3 Контроль работоспособности

Контроль работоспособности осуществляется сочетанием контроля функционирования и параметров составных частей и изделия в целом.

Систематизация методов контроля работоспособности должна осуществляться по признакам существенным для объектов и средств диагностирования. Такими классификационными признаками являются, например, назначение, принцип действия, виды контролируемых параметров, отказов изделия.

Вариант систематизации видов методов контроля работоспособности, позволяющих обнаруживать функциональные и параметрические отказы аналоговых и цифровых объектов диагностирования, представлен в таблице 3.3.

Номенклатура контролируемых параметров, а также признаки нарушения работоспособности (критерии отказа) устанавливаются в технической документации с учетом назначения, принципа действия, видов отказа, методов контроля работоспособности изделия.

Таблица 3.3

Систематизация методов контроля работоспособности

Виды объекта	Виды отказа	Виды методов контроля работоспособности
Аналоговый	Функциональный	Методы контроля функций, выполняемых изделием и его составными частями, внутрисхемного контроля функционирования изделий электронной техники

Окончание табл. 3.3

Виды объекта	Виды отказа	Виды методов контроля работоспособности
	Параметрический	Методы контроля статических и динамических параметров и характеристик изделия и его составных частей, внутрисхемного диагностирования (параметрического контроля) изделий электронной техники
Цифровой	Функциональный	Методы контроля функций, выполняемых изделием и его составными частями, программного диагностирования, тестовых наборов, внутрисхемного контроля функционирования изделий электронной техники
	Параметрический	Методы контроля статических и динамических параметров и характеристик, цифровых двузначных сигналов изделия и его составных частей, внутрисхемного диагностирования (параметрического контроля) изделий электронной техники

Примеры характеристик работоспособности, диагностических параметров и признаков аналоговых систем автоматического управления и вычислительных машин представлены в таблице 3.4.

Статической характеристикой принято называть связь значений постоянного электрического тока и постоянного напряжения на паре зажимов электрической цепи. Для четырехполюсника определяются входные и выходные статические характеристики.

По статическим характеристикам можно определять значения статических параметров объекта, например абсолютную чувствительность, статический коэффициент передачи тока, и обнаруживать соответствующий параметрический отказ.

Динамическими временны́ми и частотными характеристиками электрической цепи являются, например, входная, вы-

ходная, передаточная функции, переходная, амплитудно-частотная, фазочастотная характеристики.

По динамическим характеристикам можно определять динамические параметры объекта, например постоянную времени электрической цепи, резонансную частоту, и обнаруживать соответствующий параметрический отказ.

Таблица 3.4

Характеристики работоспособности, диагностические параметры, признаки систем автоматического управления и вычислительных машин

Характеристики работоспособности	Виды диагностических параметров и признаков
Системы автоматического управления	
Чувствительность	Параметры выходного сигнала при минимальном входном сигнале
Точность	Параметры установившегося выходного сигнала, коэффициенты передачи и усиления
Устойчивость	Сдвиг фаз выходного и входного сигналов
Характер переходного процесса	Признаки и параметры переходной характеристики: форма кривой переходного процесса; колебательность; время регулирования; перерегулирование; скорость и ускорение переходного процесса
Вычислительные машины	
Исполнение программных команд	Результаты исполнения каждой команды на постоянных и переменных кодах
Передача информации	Отсутствия запрещенных кодов при избыточном кодировании информации
Запись и сохранение информации в ПЗУ	Суммы кодов информации, хранимых в ячейках ПЗУ
Запись информации и считывание из ОЗУ	Результаты записи-считывания контрольных кодов для каждой ячейки
Ввод-вывод информации	Результаты ввода-вывода контрольной текстовой и графической информации

Методами поэлементного внутрисхемного диагностирования (параметрического контроля) и внутрисхемного контроля

функционирования изделия электронной техники (электрорадиоэлемента, микросхемы) предусматривается создание внешними аппаратными средствами режима диагностирования (контроля), обеспечивающего ослабление взаимного влияния диагностируемого (контролируемого) изделия и цепей печатного узла.

Аппаратные средства внутрисхемного диагностирования (контроля) соединяются с выводами диагностируемого (контролируемого) изделия обычно через печатные проводники специальными контактными устройствами. Внутрисхемно определяются сопротивление, емкость, индуктивность, потребляемый ток, другие параметры, функционирование полупроводникового прибора или микросхемы без разрывов цепей печатного узла.

Функциональные и тестовые методы программного диагностирования применяются для диагностирования программно управляемых изделий, например компьютеров (см. таблицу 3.4). Эти методы позволяют обнаруживать отказы, не относящиеся к "ядру" вычислительной системы, которое включает микропроцессор, часть памяти и программного обеспечения, некоторые другие устройства.

Методы тестовых наборов (тестов) заключаются в определении и реализации в установленной последовательности избранных или всех допустимых (исчерпывающих) тестов, позволяющих обнаруживать логические отказы цифрового устройства. Тестовый набор составляется комбинацией уровней напряжения цифровых двузначных сигналов на входах устройства.

Тесты, позволяющие обнаруживать логический отказ, выбираются обычно моделированием объекта диагностирования с привлечением аппарата математической логики, теории конечных автоматов. Выбор тестов, особенно для обнаружения кратных отказов, отказов последовательностного цифрового печатного узла сопряжен со значительными трудностями математического моделирования объекта диагностирования.

Предпочтение все чаще отдается диагностированию исчерпывающими тестами, которые имеют преимущества перед

“традиционными” методами избранных тестовых наборов. К методам исчерпывающего тестирования относятся, например, счет переходов и единиц, сигнатурный анализ.

Существенным преимуществом исчерпывающего тестирования является формирование тестов и определение допустимых значений контролируемых характеристик без математического моделирования объекта диагностирования. Вместе с тем достоверность обнаружения отказов исчерпывающими тестами меньше, чем тестовыми наборами.

3.4 Поиск места отказа

Поиск места отказа обычно осуществляется в два этапа.

На первом этапе, называемом локализацией места отказа, анализом результатов проверок, выполняемых при контроле работоспособности, определяются подозреваемые в отказе составные части изделия. Результаты проверок анализируются по диагностической модели изделия. Методом локализации определяется место параметрического отказа или функционального отказа, кроме короткого замыкания, аналоговых и цифровых объектов диагностирования. Локализацией не гарантируется достижение требуемой глубины поиска места отказа из-за ограниченной полноты контроля параметров.

Ко второму этапу, называемому уточнением (определением) места отказа, приступают, если на первом этапе не достигнута требуемая глубина поиска места отказа. При уточнении места отказа среди подозреваемых в отказе составных частей определяются фактически отказавшие составные части. Уточнение места отказа осуществляется сочетанием контроля выполняемых функций и параметров составных частей изделия. Глубина поиска места отказа задается указанием составной части изделия, с точностью до которой определяется место отказа.

Систематизации методов поиска (уточнения) места отказа аналоговых и цифровых объектов диагностирования при функциональных и параметрических отказах, представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Систематизации методов поиска места отказа

Виды объекта	Виды отказа	Виды метода определения места отказа
Аналоговый	Функциональный	Методы промежуточных проверок, внутрисхемного контроля функционирования изделий электронной техники, замены составных частей
	Параметрический	Методы промежуточных проверок, внутрисхемного диагностирования изделий электронной техники, замены составных частей
Цифровой	Функциональный	Методы тестовых наборов, промежуточных проверок, внутрисхемного контроля функционирования изделий электронной техники, замены составных частей
	Параметрический	Методы замены, внутрисхемного диагностирования изделий электронной техники
Аналоговый или цифровой	Короткое замыкание	Методы исключения, внутрисхемного диагностирования и контроля функционирования изделий электронной техники, замены составных частей

Метод промежуточных проверок применяется для безразборного поиска места отказа в режиме имитации функционирования изделия, создаваемом средствами контроля работоспособности. Определение места отказа основывается на упорядоченном контроле параметров входных и выходных сигналов составных частей в доступных контрольных точках при заданных параметрах сигналов от средств контроля работоспособности. Отказавшая составная часть имеет недопустимый параметр выходного сигнала при допустимых параметрах входных сигналов.

Промежуточными проверками определяется место параметрического отказа или функционального отказа, кроме ко-

роткого замыкания, с глубиной до функционально завершенной составной части аналоговых объектов диагностирования. Использование промежуточных проверок для поиска места логического отказа цифрового устройства возможно только при конкретном тесте, обнаруживающем отказ, или исчерпывающем тестовом диагностировании. Отказы составных частей, формирующих сигналы в контурах обратной связи, без разрывов контуров обратной связи неразличимы.

Метод тестовых наборов применяется для безразборного поиска места отказа цифровых объектов диагностирования в режимах имитации функционирования, создаваемых средствами контроля работоспособности. Отыскание места отказа осуществляется подачей в установленной последовательности на входы объекта выборочных тестовых наборов и контролем уровней напряжения в доступных контрольных точках на выходах объекта. Тестовыми наборами определяется место логического отказа с глубиной до цифровой микросхемы. Диагностические тестовые наборы, позволяющие различать отказы цифровых микросхем, выбираются обычно моделированием изделия с привлечением аппарата математической логики, теории конечных автоматов. Выбор тестовых наборов, особенно для различения кратных отказов, сопряжен со значительными трудностями математического моделирования изделия.

Внутрисхемный контроль функционирования и внутрисхемное диагностирование изделий электронной техники может применяться для поиска места параметрического или функционального отказа, в том числе короткого замыкания, с глубиной до электрорадиоэлемента, микросхемы. Не требуется существенно увеличивать затраты на обеспечение приспособленности печатного узла к диагностированию.

Методы и средства внутрисхемного контроля функционирования и диагностирования отдельных типов полупроводниковых приборов и микросхем пока не разработаны. Исследования и разработки в области внутрисхемного параметрического и функционального контроля ИЭТ продолжаются. Определение места отказа печатного узла методами внутрисхемного контроля фун-

кционирования и диагностирования не гарантируется. Поэтому внутрисхемный контроль и диагностирования целесообразно применять совместно с другими методами поиска места отказа.

Метод исключения используется для поиска места отказа, вызванного коротким замыканием, с разрывом цепей. Цепи электропитания объекта соединяются с защищаемым от перегрузки источником питания средств диагностирования. Короткое замыкание обнаруживается по срабатыванию устройства защиты от перегрузки при включении источника питания. Цепи питания подозреваемых в отказе составных частей поочередно разрываются. После разрыва цепи питания отказавшей составной части и очередного включения источника питания устройство защиты от перегрузки не срабатывает. Недостатком метода исключения является высокая трудоемкость демонтажно-монтажных работ.

Метод замены применяется для поиска отказавших составной части с восстановлением в режимах имитации функционирования изделия, создаваемого средствами контроля работоспособности. Подозреваемые в отказе составные части поочередно заменяются заведомо работоспособными составными частями. После каждой замены контролируется работоспособность изделия. Заменами подозреваемых в отказе составных частей добиваются восстановления работоспособности изделия. Пробными заменами обычно определяется место одиночного функционального отказа аналогового или цифрового объекта диагностирования. Отыскание места параметрического отказа, кратного отказа не гарантируется.

Замены подозреваемых в отказе составных частей являются трудоемкими демонтажно-монтажными работами. Иногда для поиска места кратного отказа методом замены применяются трудоемкие методы контроля работоспособности демонтированных составных частей.

3.5 Прогнозирование технического состояния

Прогнозирование технического состояния осуществляется на основе изучения закономерностей изменения технического

состояния (развития дефектов, старения, изнашивания, коррозии, усталости и т. п.), приводящих к нарушению работоспособности изделия. Изменение технического состояния можно представить как изменение во времени результатов периодически выполняемых проверок параметров нескольких одинаковых изделий (групповое прогнозирование) или одного изделия (индивидуальное прогнозирование).

Для прогнозирования технического состояния изделия могут использоваться как структурные, так и функциональные параметры. Структурные параметры обычно труднодоступны для прямого измерения. Требуется принимать меры по обеспечению приспособленности изделия к диагностированию, определять значения структурных параметров косвенными и совокупными измерениями, методами внутрисхемного диагностирования.

Функциональные параметры не всегда пригодны для прогнозирования технического состояния изделия. Значительные изменения структурных параметров могут не проявляться, например, за счет обратных связей, или проявляться незначительными изменениями функциональных параметров. Параметры должны удовлетворять требованиям полноты, доступности, информативности. Этим критериям при прогнозировании технического состояния электронных устройств, приборов и аппаратуры систем управления удовлетворяют, например, токи, потребляемые составными частями от источников питания, параметры изделий электронной техники, определяемые методами внутрисхемного диагностирования.

Модели изменения результатов проверок параметров нескольких одинаковых или одного изделия задаются, например, многомерными векторами, а модель изменения результатов проверок одного параметра изделия задается функцией в дискретные моменты времени. Результаты проверок параметров являются величинами со случайными и детерминированными составляющими. Преобладание той или иной составляющей влияет на постановку задачи и выбор математического аппарата прогнозирования.

Задачами и результатами прогнозирования технического состояния изделия могут быть предсказание значений параметров, определение статистических (вероятностных) характеристик значений параметров, отнесение значений параметров к некоторым классам.

Задача предсказания значений параметра формулируется следующим образом. Допустим, что математической моделью изменения результатов проверок параметра u является функция $u(t)$, заданная значениями в дискретные моменты времени $t_i \in T_1$, $i = \overline{0,n}$, как показано на рисунке 3.1.

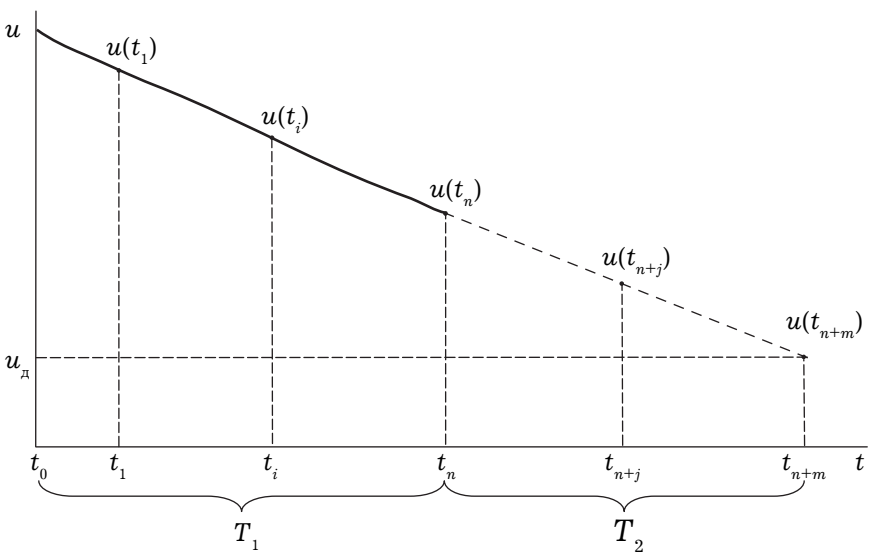


Рисунок 3.1 — Прогнозирование значений параметра

Необходимо определить значения функции в моменты времени $t_{n+j} \in T_2$, $j = \overline{1,m}$ и временной интервал T_2 работоспособного состояния изделия, в котором значение параметра не меньше предельно допустимого значения $u_д$.

Подобная постановка задачи справедлива в предположении, что преобладает детерминированная составляющая параметра. Прогнозирования значений параметра можно рассмат-

ривать как восстановление детерминированной функции $u(t)$ по ее известным значениям в дискретные моменты времени $t_i \in T_1$, $i = \overline{0,n}$ сочетанием интерполирования и экстраполирования.

Интерполирование состоит в отыскании интерполяционной функции $v(t)$, например, в виде интерполяционного многочлена Лагранжа или Ньютона, удовлетворяющего условию

$$v(t_i) = u(t_i),\ i = \overline{0,n}. \tag{3.1}$$

При равных интервалах времени между проверками параметра применяются интерполяционные многочлены Ньютона, Гаусса, Бесселя и др. Интерполяционную функцию можно преобразовать в экстраполяционную функцию для определения значений функции $u(t)$ в интервале T_2.

Экстраполяционная функция $v(t)$ определяется в виде, например, экстраполяционного многочлена из условия метода наименьших квадратов:

$$\sum_{i=0}^{n} \left[u(t_i) - v(t_i)\right]^2 = \min. \tag{3.2}$$

Интерполирование или экстраполирование функции имеет смысл только в том случае, если указан класс, к которому заведомо принадлежит искомая функция.

Для функций одной переменной достаточно указать только предпочтительность тех или иных функций, некоторую оценку сложности функции. В случае экстраполирования функций нескольких переменных необходимо назначать значительно более строгие ограничения на класс функций. Если никаких ограничений нет, то экстраполирование теряет смысл, так как в этом случае функцию можно продолжить совершенно произвольно.

Задачу определения статистических характеристик значений параметра можно представить следующим образом.

Известны значения и функция распределения $F_i(u)$ значений результатов проверок параметра нескольких одинаковых объектов в моменты времени t_i, $i = \overline{0,n}$, показанные на рисунке 3.2.

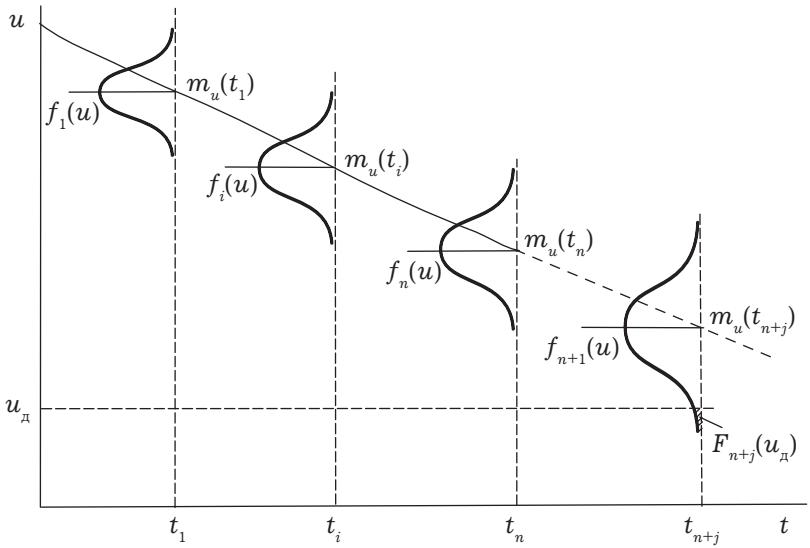


Рисунок 3.2 — Прогнозирование вероятности выхода значений параметра за допустимое значение

Необходимо определить, например, вероятность выхода параметра за допустимое значение (вероятность отказа) по формуле

$$F_{n+j}(u_д) = P(u_{n+j} < u_д) = \int_{-\infty}^{u_д} f_{n+j}(u)\,du, \qquad (3.3)$$

где $u_д$ — предельно допустимое значение параметра;

$f_{n+j}(u)$ — плотность распределения значений параметра в момент $n+j$ с математическим ожиданием $m_u(t_{n+j})$ и дисперсией $\sigma_u^2(t_{n+j})$.

Разные параметры объектов отличаются размерностью. Иногда параметры представляются в безразмерной форме относительными величинами, рассматриваются как однородная совокупность случайных величин и анализируются вероятностно-статистическим методом.

Статистические характеристики значений параметра определяются с использованием математического аппарата

теории вероятностей, теории случайных функций и математической статистики. Для вычисления искомой функции (3.3) необходимо определить функцию плотности распределения $f_t(u)$. Последняя аппроксимируется известными законами распределения.

Чаще всего функция $f_t(u)$ подчиняется нормальному закону распределения

$$f_t(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t(u)} e^{-\frac{[u(t)-m_t(u)]^2}{2\sigma_t^2(u)}}, \tag{3.4}$$

где $m_t(u), \sigma_t^2(u)$ — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение параметра в момент времени t.

Статистические характеристики $m_t(u)$, $\sigma_t(u)$ вычисляются по формулам

$$m(u) = \sum_{i=1}^{n} u_i p_i; \tag{3.5}$$

$$\sigma(u) = \left\{ \sum_{i=1}^{n} [u_i - m(u)]^2 p_i \right\}^{1/2}, \tag{3.6}$$

где p_i — вероятность появления значения параметра u_i.

Прогнозирование изменения функции плотности распределения сводится к прогнозированию изменений математического ожидания $m_t(u)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_t^2(u)$.

В тех случаях, когда аппроксимацию известными законами распределения выполнить не удается, применяются вероятностные неравенства.

В задаче классификации по совокупности значений параметров u_i, $i = \overline{1,k}$, полученных в момент времени t_0 или в ограниченный период времени, принимается решение о принадлежности изделия к некоторому классу R_v, $v = \overline{0,\mu}$ Классы могут быть параметрическими (интервалами поля допуска) или временными (интервалами продолжительности безотказной работы).

Связь между значениями параметров и, например, продолжительностью безотказной работы имеет статистический

характер. Классы R_v являются как бы эталонами изделия. Задача сводится к сравнению диагностируемого изделия с эталонами и последующему принятию решения.

Отнесение значений параметров к некоторым классам является одной из задач распознавания образов. Для решения этой задачи используются детерминированные и вероятностные модели, аппарат математического программирования, теория информации, теория статистических решений и др.

3.6 Алгоритмы диагностирования

Последовательность действий при проведении диагностирования может задаваться совокупностью предписаний, называемых алгоритмом диагностирования, которыми устанавливается состав и порядок выполнения элементарных проверок изделия и правила анализа их результатов. Элементарная проверка (далее проверка) определяется воздействием, поступающим или подаваемым на изделие, а также составом параметров и признаков, образующих ответ (реакцию) изделия на воздействие. Проверки могут различаться только составом воздействий, только составом реакций или воздействиями и реакциями. Воздействиями и реакциями являются, например, сигналы, подаваемые на входы (стимулирующие сигналы), и контролируемые сигналы изделия соответственно.

Конкретные значения признаков и параметров, получаемые при диагностировании, являются результатами проверок или значениями реакций изделия. Реакции параметров на воздействия определяются на выходах, называемых контрольными точками, которые могут быть частью изделия или находиться на некотором удалении от него. В контрольной точке размещаются датчик, начало вывода к измерительному прибору и т. п.

Результат проверки обычно оценивается как допустимый или недопустимый. Двоичная оценка результата проверки относительно просто реализуется средствами диагностирования.

Множество видов состояния изделия $E = \{e_j\}$ по результатам проверок из множества $U = \{u_i\}$ разделяется на подмно-

жества неразличимых выполненными проверками видов состояния. Используя двоичную оценку результатов проверок, алгоритм диагностирования можно представлять моделью в форме бинарного дерева.

Пример представления алгоритмов диагностирования бинарными ранжированными деревьями показан на рисунке 3.3.

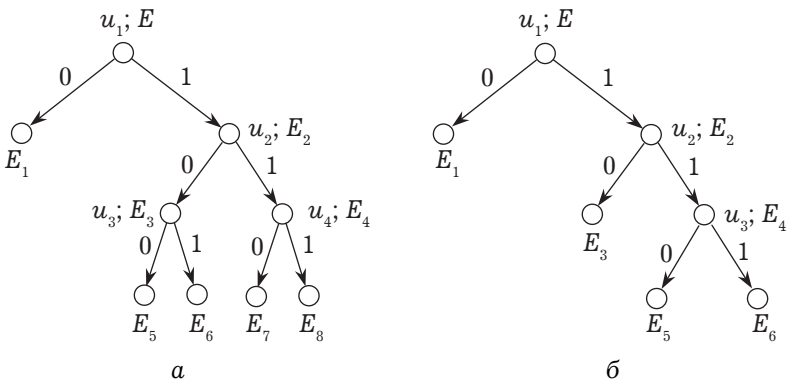


Рисунок 3.3 — Представление алгоритмов диагностирования деревьями

Основу бинарного дерева составляет связный ациклический неориентированный граф. Дугами образуются ориентированные пути из корня дерева ко всем внутренним и висячим вершинам. Ранг вершины равен числу дуг ориентированного пути, начинающегося в корне, и завершающегося в рассматриваемой вершине.

Корню и внутренним вершинам сопоставляются проверки, а исходящим из вершины дугам — возможные результаты проверки. Недопустимый результат проверки обозначается символом u_i^0 или 0, а допустимый — u_i^1 или 1. Кроме того, корню сопоставляется множество возможных видов состояния изделия, а остальным вершинам — подмножества неразличимых выполненными проверками видов состояния.

Диагностирование начинается с проверки u_1, по результатам которой множество видов состояния E разделяется на

подмножества не различимых этой проверкой видов состояния E_1, E_2. Подмножество видов состояния E_1 сопоставлено висячей вершине и его дальнейшее разделение не предусматривается. Подмножество видов состояния E_2 сопоставлено внутренней вершине и подлежит дальнейшему разделению проверкой u_2. Аналогично в любой другой внутренней вершине подмножество видов состояния разбивается очередной проверкой на два подмножества.

Диагностирование прекращается и определяется его результат (диагноз), как только в процессе реализации входящих в алгоритм проверок будет достигнута висячая вершина дерева. Фактический вид состояния изделия принадлежит подмножеству видов состояния, сопоставленному достигнутой висячей вершине.

Алгоритмы диагностирования подразделяются на условные, у которых очередные проверки выбираются в зависимости от результатов предыдущих, и безусловные, у которых порядок выполнения проверок определяется заранее.

В дереве условного алгоритма найдется хотя бы один ранг с несколькими внутренними вершинами, которым сопоставлены разные проверки (рисунок 3.3, *а*) Для каждого ранга дерева безусловного алгоритма выполняется условие, состоящее в том, что всем внутренним вершинам ранга сопоставляется одна и та же проверка (рисунок 3.3, *б*).

Безусловным алгоритмом диагностирования может предусматриваться составление диагноза после выполнения всех проверок (алгоритм с безусловной остановкой) или анализ результатов диагностирования после выполнения каждой проверки (алгоритм с условной остановкой).

Дерево алгоритма с условной остановкой имеет не менее двух висячих вершин разных рангов. В дереве алгоритма с безусловной остановкой все висячие вершины имеют одинаковый ранг. Условный алгоритм диагностирования является алгоритмом с условной остановкой.

Алгоритмическое диагностирование осуществляется человеком и средствами автоматизированного диагностирования

в режимах диалога и программного управления. В режиме диалога функционирование средств диагностирования определяется человеком в пределах возможностей, предоставляемых общим программным обеспечением.

Например, в режиме диалога обеспечивается подготовка средств диагностирования к применению, прямое управление средствами диагностирования при выборе контролируемых параметров и установление очередности контроля, отладка программ диагностирования.

Программное управление средствами диагностирования и изделием осуществляется с остановом в местах, предусматривающих ручное вмешательство человека (рисунок 3.4).

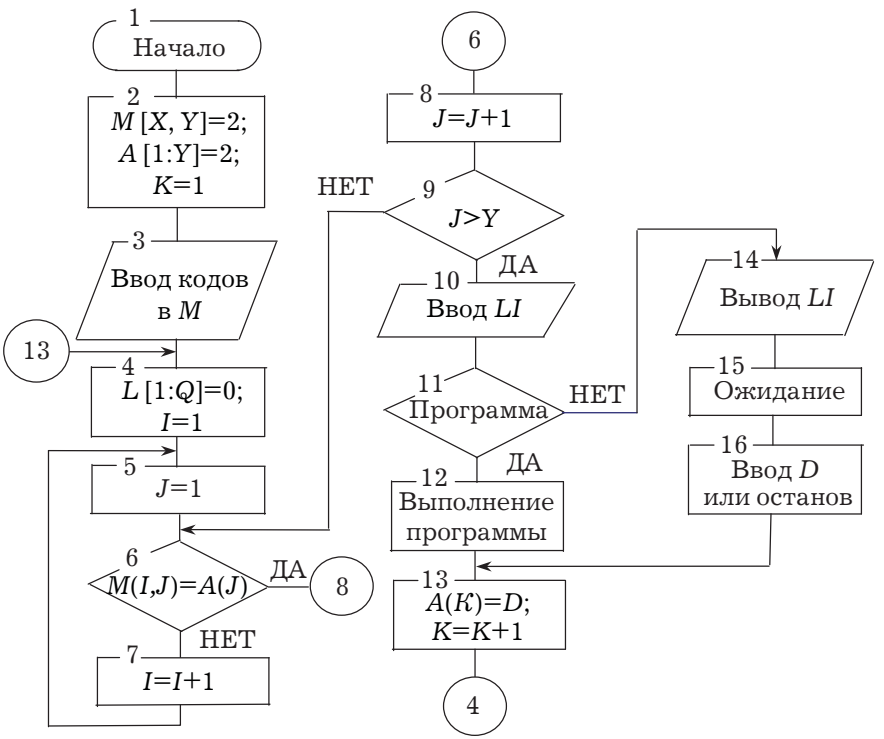


Рисунок 3.4 — Схема алгоритма управления диагностированием

Массив *M* предназначается для записи двоичных кодов условного алгоритма диагностирования. Коды составляются на основе бинарного дерева алгоритма диагностирования. Каждому коду (вершине бинарного дерева) сопоставляется инструкция человеку или программа управления аппаратными средствами и объектом диагностирования.

Инструкции и программы обозначаются номерами строк массива *M* и хранятся в массиве *L*. Таким образом, каждому коду в массиве *M* сопоставляется определенная инструкция или программа в массиве *L*. В массиве *A* формируется двоичный код результатов текущего контроля параметров.

Первоначально во все позиции массивов *M* и *A* записывается цифра, например, 2. Затем коды инструкций и программ вводятся в массив *M*, начиная со второй строки. Первая строка массива *M* сопоставляется инструкции или программе, с выполнения которой начинается диагностирование.

Поразрядным сравнением кодов в массивах *A* и *M* определяется номер строки массива *M*, содержащей код, совпадающий с кодом в массиве *A*. Инструкция или программа, имеющая обозначение найденной строки массива *M*, вводится в массив *L*. Программе в массиве *L* передается управление аппаратными средствами и объектом для контроля параметра. Результат контроля в виде значения 0 или 1 параметра *D* записывается в позицию *K* массива *A*, где *K* — номер выполняемого цикла. Значения 0 и 1 присваиваются признаку отказа и работоспособности соответственно. Если в массиве *L* содержится инструкция, то она выводится на дисплей, и компьютер переходит в режим ожидания указаний от человека.

Инструкция по контролю параметра выполняется человеком. Результат ручного контроля записывается в массив *A* аналогично результату программного контроля. После этого повторяется цикл сравнения кодов в массивах *A* и *M* и исполнения очередной инструкции или контроля параметра.

Работа программы прерывается человеком, когда очередная инструкция содержит указания о месте отказа и способе восстановления объекта.

3.7 Методика диагностирования и восстановления работоспособности

Результаты анализа применимости методов поиска места отказа для задаваемых условий по видам объектов диагностирования и отказов, глубине поиска места отказа, средствам диагностирования, безразборному диагностированию представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Области применения методов поиска места отказа

Виды методов	Виды объектов		Виды отказов		Глубина поиска		Диагностирование	
	непрерывный	цифровой	функциональный	параметрический	до устройства	до ИЭТ	средствами контроля объекта	без демонтажно-монтажных работ
Методы промежуточных проверок	±	±	±	±	±	±	±	±
Методы тестовых наборов	−	+	±	−	±	±	±	±
Методы внутрисхемного контроля функционирования	+	+	±	−	±	±	−	+
Методы внутрисхемного диагностирования	+	+	±	±	±	±	−	+
Методы исключения	+	+	±	−	+	+	+	−
Методы замены	+	+	±	±	+	+	+	−

Символами +, –, ± обозначаются соответственно возможность, невозможность и ограниченная возможность применения метода в задаваемых условиях.

Универсальные методы, применимые для любых видов объектов и отказов, обеспечивающие любую глубину поиска места отказа, отсутствуют. Поэтому при поиске места отказа объекта с глубиной до изделия электронной техники (ИЭТ) обычно необходимо сочетать несколько методов диагностирования.

Методика сочетанием методов диагностирования с восстановлением аналоговых и цифровых объектов поясняется на рисунке 3.5.

Общим методическим подходом к поиску места отказа предусматривается обычно контроль работоспособности, локализация места отказа, уточнение места отказа (отказавших частей) изделия. Такой методический подход является единым независимо от вида объекта диагностирования и отказа, глубины поиска места отказа.

Методика сочетания методов диагностирования позволяет осуществлять поиск места отказа аппаратных средств (аппаратуры) управления с глубиной до блока, поиск места отказа блока с глубиной до печатного узла и, наконец, поиск места отказа печатного узла с глубиной до функционального устройства и изделия электронной техники.

Определение отказавших составных частей обеспечивается методом локализации и дальнейшим уточнением места отказа сочетанием методов диагностирования, выбираемых в зависимости от вида объекта и отказа, глубины поиска места отказа.

Уточнение места отказа без признаков короткого замыкания аналоговых объектов диагностирования предлагается выполнять методом промежуточных проверок, а цифровых объектов диагностирования — методом промежуточных проверок при исчерпывающем тестировании, и затем методами внутрисхемного функционального и параметрического контроля подозреваемых в отказах изделий электронной техники.

Устранение отказа осуществляется заменой составных частей, регулировкой параметров.

Поиск места кратного отказа объекта может выполняться до определения всех отказавших составных частей или только одной из отказавших составных частей. В последнем случае

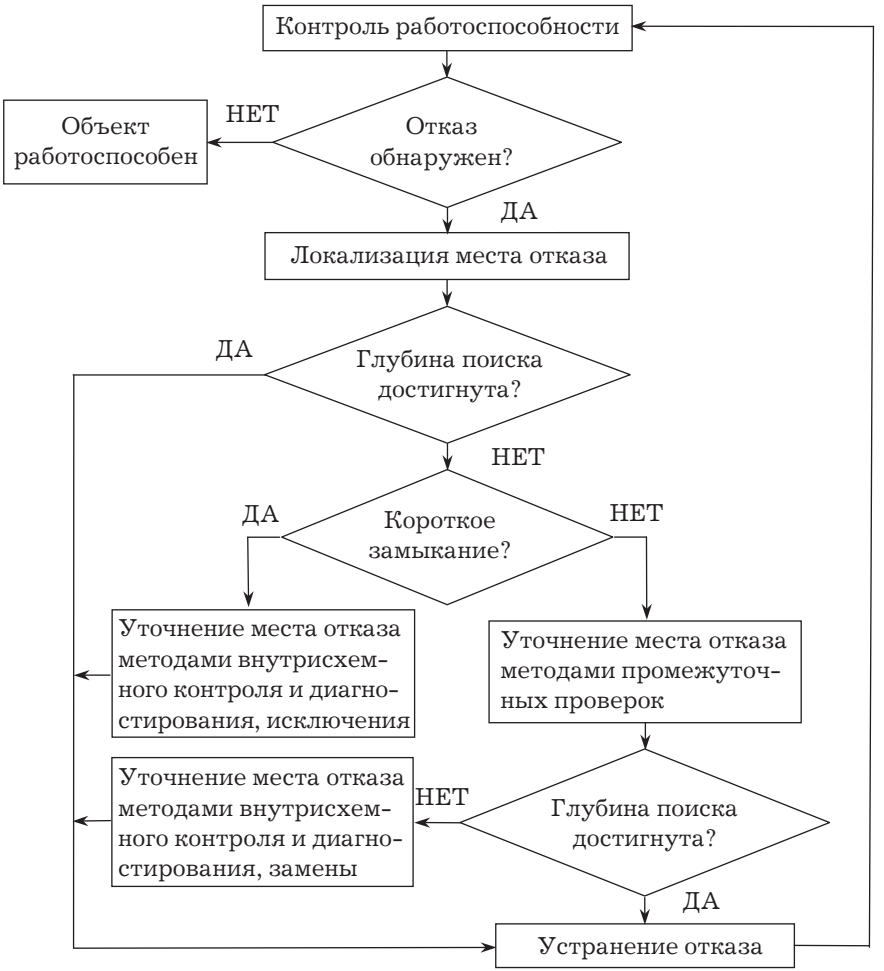


Рисунок 3.5 — Структурная модель поиска места отказа с восстановлением

после замены отказавшей составной части контролируется работоспособность изделия и, при необходимости, продолжается поиска места отказа для определения следующей отказавшей составной части. Такая методика восстановления изделия называется поиском места отказа с восстановлением.

Методикой диагностирования обеспечиваются требуемые глубина и достоверность поиска места отказа за счет согласованного сочетания методов диагностирования, выбора проверок, достаточных для обнаружения и различения заданных отказов, поиска места отказа с восстановлением.

Сокращению трудоемкости диагностирования способствуют применение в первую очередь методов безразборного диагностирования, оптимизация алгоритмов контроля работоспособности и поиска места отказа, автоматизация диагностирования.

Ограничение требований к квалификации специалистов обеспечивается алгоритмизацией и автоматизацией диагностирования.

Снижение затрат на диагностическое обеспечение достигается использованием информации, документируемой при контроле работоспособности, для локализации места отказа, методов поиска места отказа, не требующих сложных, дорогостоящих средств диагностирования и существенного усложнения конструкции объектов, выбором проверок для обнаружения и поиска места отказа с минимальными затратами.

Методика согласуется с общим методическим подходом к поиску места отказа, типовым технологическим процессом восстановления изделия и может использоваться для разработки типового технологического процесса поиска места отказа с глубиной до изделия электронной техники.

Контрольные вопросы

1. Поясните разницу между параметром и диагностическим параметром изделия.

2. По какому признаку подразделяются объекты диагностирования на аналоговые, дискретные и цифровые?

3. Можно ли использовать диагностический признак для определения технического состояния изделия, определения вида технического состояния изделия?

4. Перечислите задачи контроля технического состояния и их отличительные особенности.

5. Чем отличаются контроль работоспособности и контроль функционирования? Можно ли по результатам контроля функционирования утверждать, что изделие работоспособное?

6. Приведите примеры приспособленности изделия к безразборному диагностированию.

7. Укажите отличительные признаки рабочего и тестового диагностирования. Что такое тест?

8. Приведите примеры характеристик работоспособности, диагностических параметров и признаков аналоговых и цифровых программно управляемых объектов.

9. Поясните методы внутрисхемного параметрического и функционального контроля.

10. Поясните методы тестовых наборов, разницу между методами выборочных тестовых наборов и исчерпывающего тестирования.

11. Какие диагностические параметры и признаки позволяют обнаруживать логический отказ, короткое замыкание?

12. Поясните принципы поиска места отказа заменой составных частей, промежуточными проверками, исключением, укажите их достоинства и недостатки.

13. Поясните, как преобладание случайной или детерминированной составляющей диагностического параметра влияет на постановку задачи и выбор математического аппарата прогнозирования.

14. Дайте определение алгоритма диагностирования. Как организуется элементарная проверка изделия? В какой форме устанавливаются состав, очередность выполнения проверок и правила анализа их результатов?

15. Приведите примеры графов безусловного и условного алгоритмов диагностирования.

16. Почему необходимо сочетать методы диагностирования при поиске места отказа?

17. Поясните методику поиска места отказа с восстановлением изделия.

Глава 4
ИСЧЕРПЫВАЮЩЕЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

4.1 Счет переходов и единиц

Цифровым устройством осуществляется преобразование и обработка цифровых двузначных сигналов (рисунок 4.1).

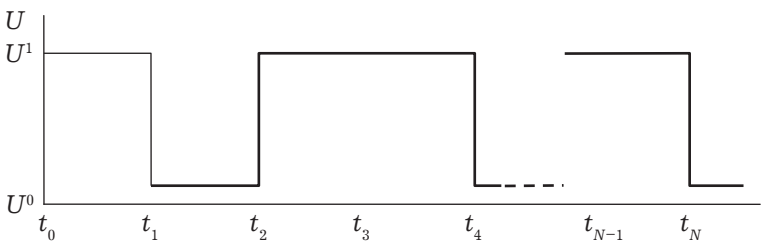


Рисунок 4.1 — Диаграмма цифрового двузначного сигнала

Сигналу, показанному на рисунке 4.1, в интервале времени от t_0 до t_N соответствует N-разрядная двоичная последовательность 10110...11, в которой символами 1 и 0 обозначаются высокий U^1 и низкий U^0 уровни напряжения соответственно.

Число возможных комбинаций уровней цифрового двузначного сигнала равно числу различных двоичных последовательностей из N единиц и нулей, которое вычисляется по формуле

$$M = 2^N. \tag{4.1}$$

Например, если $N = 4$, то $M = 16$. Все двоичные последовательности из четырех единиц и нулей перечислены в таблице 4.1.

Только одна из M двоичных последовательностей является допустимой и соответствует работоспособному устройству.

Остальные $M - 1$ двоичных последовательностей отличаются от допустимой и соответствуют отказавшему устройству.

Двоичная последовательность сигнала при логическом отказе отличается от двоичной последовательности сигнала работоспособного устройства в одном или нескольких разрядах. Например, двоичные последовательности 0000... и 1111... соответствуют логическим константным отказам.

Таблица 4.1

Характеристики четырехразрядных двоичных последовательностей цифрового двузначного сигнала

Двоичная последовательность, имеющая одинаковое число переходов	Число		Двоичная последовательность, имеющая одинаковое число единиц	Число	
	переходов	единиц		переходов	единиц
0000	0	0	0000	0	0
0001	1	1	0001	1	1
0011	1	2	0010	2	1
0111	1	3	0100	2	1
1111	1	4	1000	2	1
0010	2	1	0011	1	2
0100	2	1	0101	3	2
1000	2	1	0110	2	2
0110	2	2	1001	3	2
1100	2	2	1010	4	2
1110	2	3	1100	2	2
0101	3	2	0111	1	3
1001	3	2	1011	3	3
1011	3	3	1101	3	3
1101	3	3	1110	2	3
1010	4	2	1111	1	4

Логические отказы можно обнаруживать и попарно различать счетом числа переходов или единиц цифрового двузначного сигнала.

Переход — изменение уровня цифрового двузначного сигнала с высокого на низкий или с низкого на высокий, которому в соседних разрядах двоичной последовательности соответствует изменение 1 на 0 или 0 на 1.

Единица — высокий уровень цифрового двузначного сигнала в интервале времени (t_i, t_{i+1}), которому в разряде двоичной последовательности соответствует символ 1.

Числа переходов и единиц в четырехразрядных двоичных последовательностях указаны в таблице 4.1. Единица в старшем (крайнем левом) разряде двоичной последовательности учитывается как переход.

Структурная схема комплекса средств обнаружения отказа счетом переходов и единиц представлена на рисунке 4.2.

Генератором тестовой последовательности (ГТП) перебираются с частотой синхронизации, задаваемой сигналом ТАКТ, все возможные комбинации уровней цифровых двузначных сигналов на входах объекта диагностирования. Перебор начинается по сигналу ПУСК и заканчивается по сигналу СТОП, которые формируются объектом или средствами диагностирования и задают интервал времени (“временное окно”).

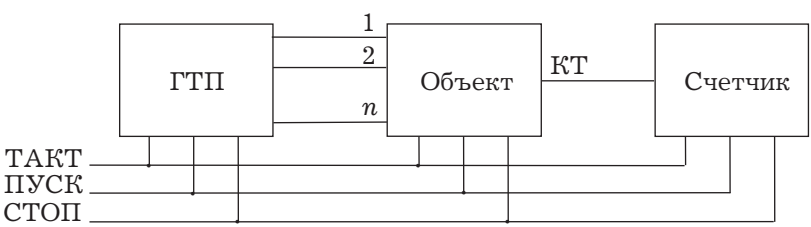


Рисунок 4.2 — Структурная схема комплекса средств обнаружения отказа счетом переходов и единиц

Каждой комбинации уровней входных цифровых двузначных сигналов соответствует высокий или низкий уровень цифрового двузначного сигнала в контрольной точке (КТ). Число разрядов двоичной последовательности, соответствующей сигналу в КТ, равно числу комбинаций уровней входных сигналов и определяется по формуле

$$N = 2^n, \tag{4.2}$$

где n — число входов объекта.

Переходы, или единицы цифрового двузначного сигнала в КТ, подсчитываются счетчиком и сопоставляется с вычисленным или экспериментально определенным числом переходов или единиц работоспособного объекта. Несовпадение сопоставляемых чисел свидетельствует об отказе объекта. При равенстве сопоставляемых чисел объект считается работоспособным.

Возможны логические отказы, при которых двоичная последовательность цифрового двузначного сигнала отказавшего объекта не отличается по числу переходов или (и) единиц от двоичной последовательности цифрового двузначного сигнала работоспособного объекта. Например, в таблице 4.1 сгруппированы и разделены горизонтальными линиями двоичные последовательности, имеющие одинаковое число переходов, и двоичные последовательности, имеющие одинаковое число единиц.

Такие логические отказы не обнаруживаются счетом переходов или единиц и объект при диагностировании ошибочно принимается работоспособным. Вероятность необнаружения отказа счетом переходов или единиц определяется по формуле

$$q \approx \frac{1}{\sqrt{N\pi}}, \tag{4.3}$$

где N вычисляется по формуле (4.2);

$\pi \approx 3{,}14$.

С увеличением N вероятность необнаружения отказа уменьшается. Например, $q \approx 0{,}14$ при $N=16$.

Логический отказ цифрового устройства, моделируемый изменением двоичной последовательности цифрового двузначного сигнала в одном разряде и нескольких разрядах, называется одиночной и кратной ошибкой соответственно.

Одиночная ошибка не всегда обнаруживается счетом переходов. Например, одиночная ошибка в первом разряде двоичной последовательности 1100 приводит к последовательности 0100, которая не отличается от первой числом переходов. Вероятность необнаружения одиночной ошибки счетом переходов составляет приблизительно 0,5.

Одиночная ошибка обнаруживается счетом единиц. Например, одиночная ошибка в первом разряде двоичной после-

довательности 1100 приводит к двоичной последовательности 0100, которая не отличается от первой числом переходов, но отличается числом единиц. Таким образом, счет единиц имеет преимущество перед счетом переходов в части обнаружения одиночных ошибок.

4.2 Сигнатурный анализ

Математической основой сигнатурного анализа является теория циклических кодов, в которой N-разрядную двоичную последовательность принято представлять двоичным многочленом $N - 1$ степени

$$A(X) = a_0 X^0 + a_1 X^1 + \ldots + a_{N-1} X^{N-1}, \tag{4.4}$$

содержащим фиктивную переменную X ($X = 2$).

Например, 6-разрядную двоичную последовательность 111001 можно представить многочленом $1 \cdot X^0 + 1 \cdot X^1 + 1 \cdot X^2 + 1 \cdot X^3 + 1 \cdot X^4 + 1 \cdot X^5$ или в сокращенной записи многочленом $1 + X^3 + X^4 + X^5$.

Удобство такого представления заключается в том, что математические действия над двоичными последовательностями сводятся к действиям над многочленами.

Принцип сигнатурного анализа состоит в следующем. Генератором тестовой последовательности перебираются с частотой синхронизации, задаваемой сигналом ТАКТ, все возможные комбинации уровней цифровых двузначных сигналов на входах объекта диагностирования. Перебор начинается по сигналу ПУСК и заканчивается по сигналу СТОП, как при счете переходов и единиц (рисунок 4.2).

Цифровой двузначный сигнал с контрольной точки диагностируемого объекта поступает в цифровое устройство, в котором многочлен двоичной последовательности сигнала делится на характеристический многочлен, определяемый структурой устройства.

Остаток от деления многочленов называется сигнатурой (подписью) двоичной последовательности. Сигнатура сохра-

няется в цифровом устройстве и отображается на цифровых индикаторах в форме шестнадцатеричного числа для сопоставления с вычисленной или экспериментально определенной сигнатурой работоспособного объекта.

Объект считается работоспособным при совпадении сопоставляемых сигнатур. Несовпадение сигнатур свидетельствует об отказе объекта.

Схема цифрового устройства для деления произвольного многочлена (4.4) на характеристический многочлен

$$G(X) = g_0 X^0 + g_1 X^1 + \ldots + g_{k-1} X^{k-1} \qquad (4.5)$$

и сохранения остатка от деления (сигнатуры) показана на рисунке 4.3, *а*.

Цифровое устройство представляет собой регистр сдвига двоичной последовательности, который состоит из $k - 1$ ячеек памяти (показаны квадратами) и сумматоров по модулю 2 (показаны крестиками в кружках) с обратными связями. Связи g_i на схеме соответствуют коэффициентам $g_i = 1$ характеристического многочлена (4.3).

Примеры схем цифровых устройств, построенных по характеристическому многочлену

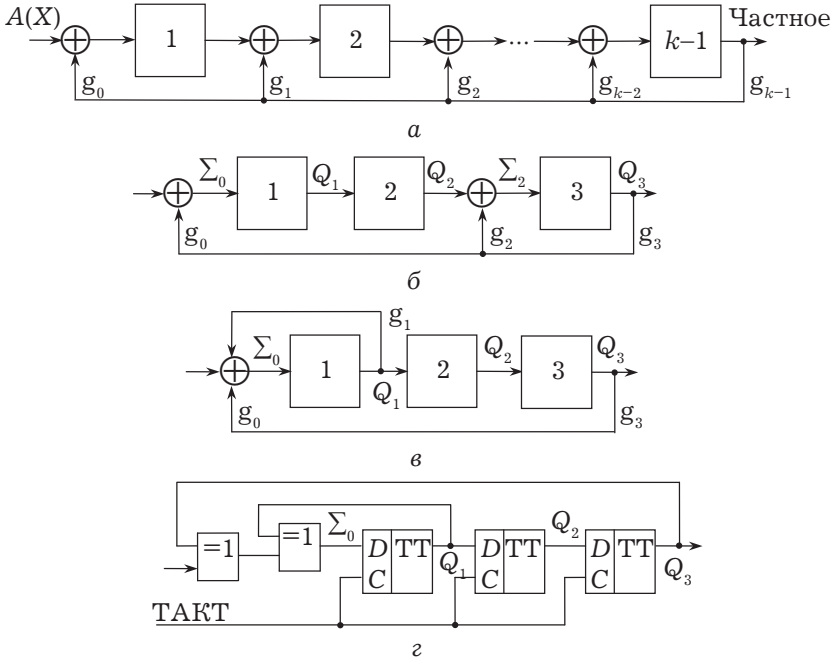
$$G(X) = 1 + X^2 + X^3, \qquad (4.6)$$

показаны на рисунках 4.3, *б* и 4.3, *в*.

Регистр сдвига и сумматор по модулю 2 могут быть образованы, например, двухступенчатыми D-триггерами и логическими элементами “исключающее ИЛИ”, как показано на рисунке 4.3, *г*. Подобное устройство называется иногда генератором псевдослучайной тестовой последовательности.

Триггер имеет вход данных D, тактовый вход C и выход Q. Сигнал на выходе Q принимает значение 1 или 0, когда сигнал данных на входе D принимает значение 1 или 0 соответственно и тактовый (синхронизирующий) сигнал ТАКТ на входе C принимает значение 1.

Для правильной работы триггера тактовый импульс должен приходить на вход C несколько позже изменения уровня напряжения на входе D.



а — обобщенная схема; *б*, *в*, *г* — примеры схем

Рисунок 4.3 — Схемы цифровых устройств для деления многочленов

Сумматором по модулю 2 (логическими элементами “исключающее ИЛИ”) выполняется поразрядное сложение двоичных последовательностей цифровых двухзначных сигналов. Выходной сигнал сумматора по модулю 2 принимает значение 1 или 0, если арифметическая сумма значений 1 и 0 входных сигналов — нечетное или четное число соответственно.

Например, $1 \oplus 1 = 0$, $0 \oplus 1 = 1$, $1 \oplus 0 = 1$, $0 \oplus 0 = 0$, $1 \oplus 1 \oplus 1 = 1$, $0 \oplus 1 \oplus 1 = 0$ и т. д., где $\oplus$ — символ сложения (свертки) по модулю 2.

Для правильной работы логического элемента “исключающее ИЛИ” изменение уровней входных двухзначных сигналов должно быть синхронизировано, прямоугольные импульсы сигналов не должны иметь искаженных фронтов.

Деление многочлена шестиразрядной двоичной последовательности 111001 на характеристический многочлен (4.6) в цифровых устройствах, схемы которых показаны на рисунке 4.3, поясняется в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Значения цифровых двухзначных сигналов в регистрах сдвига при делении многочленов

№ такта	Вход	Значения сигналов в устройстве на рисунке 4.3, *б*					Значения сигналов в устройствах на рисунках 4.3, *в*, 4.3, *г*			
		Σ_0	Q_1	Q_2	Σ_2	Q_3	Σ_0	Q_1	Q_2	Q_3
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
4	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
5	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1
6	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В исходном состоянии регистров входные сигналы, выходные сигналы Q_1, Q_2, Q_3 ячеек памяти и сигналы Σ_0, Σ_2 сумматоров имеют значение 0. В такте 0 уровень входного сигнала, соответствующий старшему разряду двоичной последовательности, принимает значение 1 и с приходом тактового импульса “записывается” в первую ячейку регистра.

Значения сигналов в устройствах по окончании нулевого такта указаны во второй строке таблицы. Действительно, в схеме на рисунке 4.3, *б* значения сигналов $\Sigma_0 = X^6 \oplus Q_3 = 1 \oplus 0 = 1$, $Q_1 = \Sigma_0 = 1$, $\Sigma_2 = Q_{2-} \oplus Q_3 = 0 \oplus 0 = 0$, а в схеме на рисунках 4.3, *в*, *г* значения сигналов $\Sigma_0 = X^6 \oplus Q_1 \oplus Q_3 = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1$, $Q_1 = \Sigma_0 = 1$.

В первом такте в регистр “записывается” значение входного сигнала, соответствующее очередному разряду двоичной последовательности, и т. д. Завершается деление после пятого такта.

Двоичная последовательность 000101, получаемая при считывании столбца Q_3 сверху вниз, соответствует многочлену $1 + X^2$ частного отделения многочлена $1 + X^3 + X^4 + X^5$ на характеристический многочлен (4.4). Остаток 000 в ячейках памяти регистров по окончании такта 5 соответствует остатку отделения многочленов, который равен 0. Этот остаток и есть сигнатура.

Ручное деление многочленов показано на рисунке 4.4 (результаты сложения и вычитания по модулю 2 двоичных переменных одинаковы и переносы отсутствуют).

$$
\begin{array}{l|l}
\oplus\ 1X^5 + 1X^4 + 1X^3 + 0X^2 + 0X^1 + 1X^0 & 1X^3 + 1X^2 + 0X^1 + 1X^0 \\
\cline{2-2}
\quad 1X^5 + 1X^4 + 0X^3 + 1X^2 & 1X^2 + 0X^1 + 1X^0 \\
\cline{1-1}
\quad \oplus\ 0X^4 + 1X^3 + 1X^2 + 0X^1 & \\
\quad\quad 0X^4 + 0X^3 + 0X^2 + 0X^1 & \\
\cline{1-1}
\quad\quad \oplus\ 1X^3 + 1X^2 + 0X^1 + 1X^0 & \\
\quad\quad\quad 1X^3 + 1X^2 + 0X^1 + 1X^0 & \\
\cline{1-1}
\quad\quad\quad\quad 0X^2 + 0X^1 + 0X^0 &
\end{array}
$$

Рисунок 4.4 — Результаты деления многочлена на многочлен

Многочлен $1 + X^2$ является частным от деления. Остаток от деления многочленов действительно равен 0.

Таким образом, результаты деления многочленов в цифровых устройствах и ручного деления совпадают.

Прибор для вычисления сигнатуры цифрового двухзначного сигнала диагностируемого объекта, называемый сигнатурным анализатором, обычно содержит шестнадцатиразрядный сдвигающий регистр, реализующий характеристический многочлен $1 + X^4 + X^7 + X^9 + X^{16}$.

Двоичная последовательность остатка от деления многочленов, сохраняемая в регистре, состоит из четырех тетрад. Каждая тетрада отображается на цифровом индикаторе в виде шестнадцатеричного символа (таблица 4.3).

Например, шестнадцатиразрядная двоичная последовательность 1101100101010011 остатка от деления многочле-

Таблица 4.3

Представление тетрад двоичных цифр шестнадцатеричными символами

Тетрады двоичных цифр							
0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
Шестнадцатеричные символы							
0	1	2	3	4	5	6	7
Тетрады двоичных цифр							
1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
Шестнадцатеричные символы							
8	9	A	C	F	H	P	U

нов отображается на цифровых индикаторах в виде сигнатуры *H*953.

Различные двоичные последовательности могут иметь одинаковые сигнатуры. Отказ объекта, при котором сигнатура двоичной последовательности сигнала не отличается от сигнатуры двоичной последовательностью сигнала работоспособного объекта, невозможно обнаружить сигнатурным анализом.

Вероятность необнаружения отказа методом сигнатурного анализа определяется по формуле

$$q_s = \frac{2^{N-m} - 1}{2^N - 1} \approx \frac{1}{2^m}, \qquad (4.7)$$

где m — число разрядов регистра сигнатурного анализатора;

N вычисляется по формуле (4.2).

Приближенное равенство справедливо при $N >> m$.

Например, при шестнадцатиразрядном ($m = 16$) регистре сигнатурного анализатора $q_s \approx 15 \times 10^{-6}$.

4.3 Сочетание методов диагностирования

Повышение вероятности обнаружения и различения отказов цифрового устройства достигается сочетанием методов диагностирования, основанным на получении двух и более ха-

рактеристик цифровых двузначных сигналов, например чисел переходов и единиц, сигнатуры и числа единиц.

Анализ таблицы 4.1 показывает, что двоичные последовательности, имеющие одинаковое число переходов, могут иметь разное число единиц и, наоборот, последовательности, имеющие одинаковое число единиц, могут иметь разное число переходов. Следовательно, сочетанием счета переходов и единиц можно обнаруживать и различать отказы, которые невозможно обнаруживать и различать только счетом переходов или только счетом единиц.

Объект диагностирования считается работоспособным, когда подсчитанные числа переходов и единиц совпадают с вычисленными или экспериментально определенными числами переходов и единиц работоспособного объекта. Несовпадение сопоставляемых чисел переходов или единиц свидетельствует об отказе объекта.

Покажем, что сигнатурно неразличимые отказы (отказы, проявляющиеся одинаковой сигнатурой) могут различаться числом единиц.

Зависимость значений двухзначного сигнала в контрольной точке (КТ) от значений тестовых двузначных сигналов на n входах цифрового комбинационного устройства (ЦКУ) можно представить булевой функцией в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ) следующим образом:

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_n) = \bigvee_{f(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)=1} x^{\alpha_1} x^{\alpha_2} ... x^{\alpha_n}, \qquad (4.8)$$

где $x_1, x_2, ..., x_n$ — двоичные переменные, сопоставленные тестовым двухзначным сигналам;

$\alpha_i \in \{0,1\}$; $x^{\alpha_i} = x_i$ при $\alpha_i = 1$; $x^{\alpha_i} = \overline{x}_i$ при $\alpha_i = 0$.

Дизъюнкция берется по всем таким наборам $(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$ значений двоичных переменных, на которых функция (сигнал в КТ) принимает значение логической единицы.

Функция $x^{\alpha_1} x^{\alpha_2} ... x^{\alpha_n}$, связывающая знаком конъюнкции переменые, представленные в прямой или инверсной форме, называется минтермом.

Например, зависимость значений выходного двузначного сигнала от значений входных двузначных сигналов ЦКУ, схема которого показана на рисунке 4.5, задается булевой функцией в СДНФ, состоящей из трех минтермов:

$$y = f_z(x_1 x_2) = x_1 \overline{x}_2 \vee \overline{x}_1 x_2 \vee \overline{x}_1 \overline{x}_2.$$

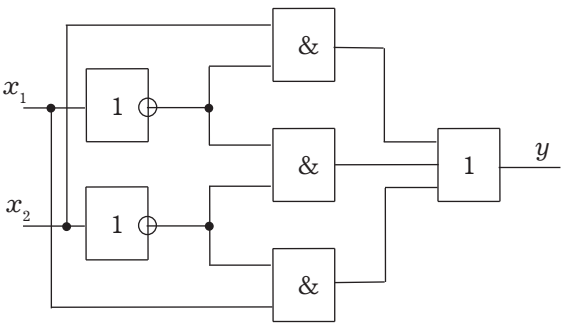


Рисунок 4.5 — Схема цифрового комбинационного устройства

Число булевых функций, или наборов минтермов, что одно и то же, которые могут быть реализованы в КТ ЦКУ при полном переборе генератором тестовой последовательности тестовых наборов из n цифровых двухзначных сигналов, вычисляется по формулам (4.1), (4.2).

Например, в ЦКУ с двумя входами ($n = 2$) могут быть реализованы 16 булевых функций, из которых в схеме ЦКУ на рисунке 4.5 реализуется только одна булева функция.

Доказано, что сигнатуру двузначного сигнала в КТ ЦКУ при n разрядах регистров генератора тестовой последовательности и сигнатурного анализатора можно вычислить как сигнатуру $s = S(f)$ булевой функции (4.8) по следующим правилам:

– представить булеву функцию в СДНФ;

– определить сигнатуру каждого минтерма, воспользовавшись следующим выражением:

$$S\left(x^{\alpha_1} x^{\alpha_2} \ldots x^{\alpha_n}\right) = \alpha_n \alpha_{n-1} \ldots \alpha_1;$$

– просуммировать сигнатуры по модулю два.

Из последнего правила следует, что сигнатура булевой функции имеет в разряде 1, если количество единиц в соответствующем разряде сигнатур всех минтермов — нечетное и имеет в разряде 0 при отсутствии или четном количестве единиц в соответствующем разряде сигнатур всех минтермов.

Число сигнатур булевых функций при n разрядах регистра сигнатурного анализатора вычисляется по формуле (4.2). Тогда число булевых функций, имеющих одинаковую сигнатуру и называемых сигнатурно неразличимыми, вычисляется по формуле

$$M_s = \frac{M}{N} = 2^{N-n}.$$

Например, $M_s = 4$ при $n = 2$.

Булевы функции двух переменных в виде наборов двоичных эквивалентов минтермов и соответствующие им сигнатуры, вычисленные по сформулированным выше правилам, указаны в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Булевы функции двух переменных и соответствующие им сигнатуры

Номер набора	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Двоичные эквиваленты минтермов	—	00	01	10	11	00 01	00 10	00 11	01 10	01 11	10 11	00 01 10	00 01 11	00 10 11	01 10 11	00 01 10 11
Сигнатуры	00	00	10	01	11	10	01	11	11	01	10	11	01	10	00	00

Анализ таблицы 4.4 показывает, что сигнатурно неразличимые булевы функции (отказы) могут различаться числом минтермов (единиц).

Булевы функции, реализуемые в КТ ЦКУ, могут иметь нулевую или ненулевую сигнатуры. Нулевая сигнатура содержит нули во всех разрядах, а ненулевая сигнатура содержит единицу хотя бы в одном из разрядов.

Нулевая сигнатура — единственная. Число ненулевых сигнатур при n разрядах регистра сигнатурного сигнатурного анализатора вычисляется по формуле

$$N_{s\neq 0} = 2^n - 1.$$

Булева функция, представленая в СДНФ набором из k минтермов, имеет ненулевую сигнатуру, если сигнатуры минтермов содержат нечетное число единиц хотя бы в одном из разрядов (следствие из третьего правила вычисления сигнатуры).

Можно показать, что вероятность необнаружения отказа сочетанием сигнатурного анализа и счета единиц вычисляется по формуле

$$q_{k,s} \approx \frac{\dfrac{(2^n-1)!}{k!(2^n-k)!} - 1}{2^{2^n} - 1}. \qquad (4.9)$$

Вероятность (4.9) необнаружения отказа принимает максимальное значение, если $k = 2^n/2$.

Результаты вычислений и сопоставлений значений вероятности необнаружения отказа сигнатурным анализом и сочетанием сигнатурного анализа со счетом единиц представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Результаты вычислений и сопоставлений значений вероятности необнаружения отказа сигнатурным анализом и сочетанием сигнатурного анализа со счетом единиц

n	**Вероятность необнаружения отказа, вычисленная по формуле**			$q_{k,s}/q_s$
	(4.3)	**(4.7) при $m = n$**	**(4.9)**	
4	0,141	0,062	0,012	0,19
5	0,1	0,031	0,0044	0,14
6	0,071	0,016	0,0016	0,1
7	0,05	0,0078	0,00055	0,071

Максимальное значение вероятности необнаружения отказа сочетанием сигнатурного анализа со счетом единиц меньше вероятности необнаружения отказа счетом единиц или сигнатурным анализом.

4.4 Средства исчерпывающего диагностирования

Структурная схема комплекса аппаратных средств сигнатурного анализа и счета единиц показана на рис. 4.6, *а*.

Диагностирование начинается по сигналу ПУСК и заканчивается по сигналу СТОП. Генератором тестовой последовательности (ГТП) перебираются с частотой синхронизации, задаваемой сигналом ТАКТ, все возможные тестовые наборы из n цифровых двухзначных сигналов на входах объекта диагностирования.

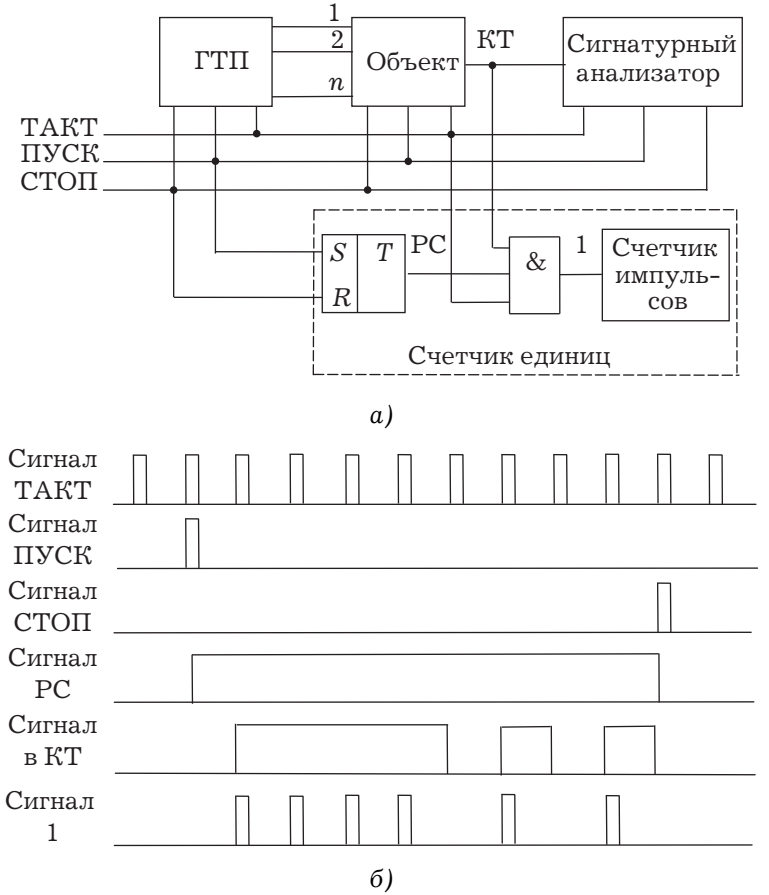
Цифровой двухзначный сигнал с контрольной точки (КТ) объекта поступает на сигнатурный анализатор и счетчик единиц для определения за интервал времени между сигналами ПУСК и СТОП сигнатуры и числа единиц соответственно.

Счет единиц в интервале времени между сигналами ПУСК и СТОП разрешается сигналом РС триггера счетчика единиц. Сигнал 1 на выходе логического элемента “И” счетчика единиц появляется при совпадении на его входах высоких уровней напряжения цифрового двузначного сигнала в КТ, сигналов РС и ТАКТ (рисунок 4.6, *б*).

Число сигналов 1 за интервал времени между сигналами ПУСК и СТОП подсчитывается десятичным счетчиком импульсов.

Допустимая сигнатура и допустимое число единиц работоспособного объекта определяются экспериментально или вычисляются.

Работоспособность объекта определяется по совпадению полученной сигнатуры с допустимой сигнатурой и совпадению подсчитанного количества единиц с допустимым. Отказ определяется по несовпадению полученной сигнатуры с допусти-



а — структурная схема; *б* — временные диаграммы сигналов

Рисунок 4.6 — Комплекс средств исчерпывающего диагностирования

мой сигнатурой или несовпадению подсчитанного количества единиц с допустимым.

Генератором тестовой последовательности осуществляется, как правило, полный перебор n-разрядных тестовых наборов цифровых двузначных сигналов. Однако отдельные тесто-

вые наборы могут быть недопустимыми при диагностировании цифрового устройства и должны исключаться.

Схема генератора допустимых тестовых наборов показана на рисунке 4.7.

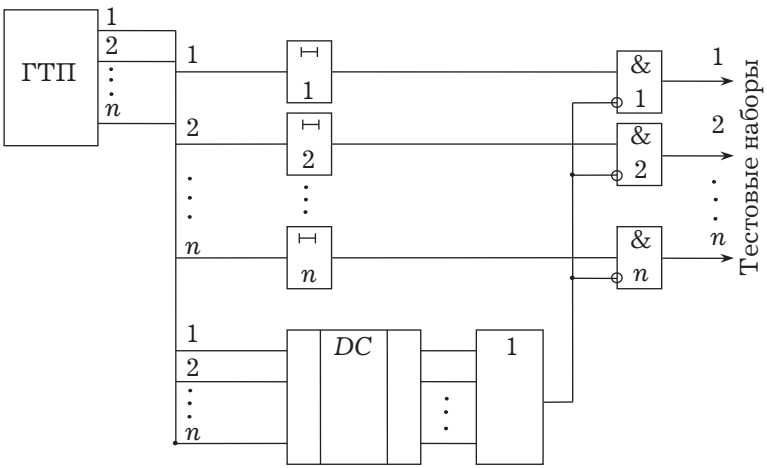


Рисунок 4.7 — Схема генератора тестовых наборов

Исключение тестовых наборов, недопустимых для диагностируемого цифрового устройства, достигается тем, что выходы ГТП подключаются к входам диагностируемого устройства через элементы задержки и элементы запрета.

Запрещающие входы элементов запрета соединяются через элемент “ИЛИ” с выходами дешифратора. Входами дешифратора являются выходы ГТП. С входами элемента “ИЛИ” соединяются те выходы дешифратора, которые соответствуют номерам недопустимых тестовых наборов.

Контрольными точками для диагностирования объекта обычно являются контакты доступного разъема, предусматриваемого при конструировании объекта. Число контрольных точек, выводимых на разъем для достижения требуемой глу-

бины поиска места отказа, может быть велико, что приводит к усложнению объекта.

Значительно уменьшить число контрольных точек, выводимых на разъем, позволяет применение встроенного самопроверяемого коммутатора, схема которого показана на рисунке 4.8.

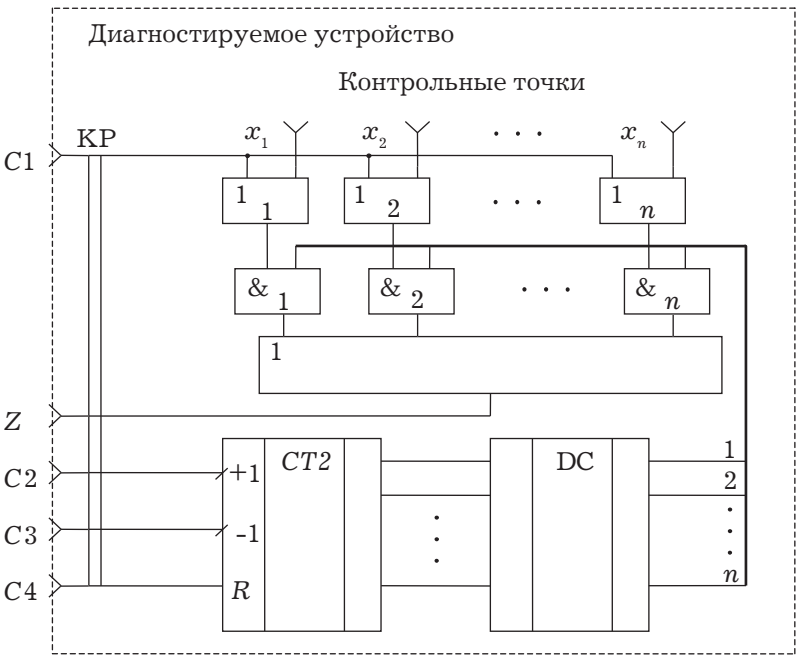


Рисунок 4.8 — Схема встроенного самопроверяемого коммутатора

Контрольные точки $x_1,\ldots, x_n$ диагностируемого объекта соединяются через элементы ИЛИ и элементы И со входами элемента ИЛИ, единственный выход которого соединяется с контрольным разъемом КР.

Вторые входы элементов И соединяются с соответствующими выходами дешифратора, сигналы на входы которого поступают с выходов двоичного счетчика. Входы двоичного счетчика и соединенные между собой вторые входы элементов ИЛИ выводятся на контрольный разъем.

Управление поочередным соединением контрольных точек диагностируемого объекта с выходом Z контрольного разъема осуществляется сигналами, подаваемыми на суммирующий и вычитающий входы двоичного счетчика импульсов. Сигнал $C1$ применяется для самопроверки коммутатора.

Таким образом, контрольный разъем диагностируемого объекта содержит только пять контактов.

Контрольные вопросы

1. Поясните принципы обнаружения отказа счетом переходов и единиц цифрового двузначного сигнала.

2. Приведите примеры логических отказов, которые не обнаруживаются счетом переходов, счетом единиц, счетом переходов и единиц.

3. Приведите пример одиночной ошибки, которая не обнаруживается счетом переходов, но обнаруживается счетом единиц.

4. Приведите пример двоичной последовательности и представьте ее двоичным многочленом.

5. Что такое сигнатура и как она вычисляется?

6. Поясните принцип обнаружения логического отказа сигнатурным анализом.

7. Поясните работу цифрового устройства для деления многочленов (рисунок 4.3) временными диаграммами.

8. Определите по схеме на рисунке 4.5, как изменится булева функция при отказе “константа 0” или “константа 1” одного из логических элементов.

9. Вычислите сигнатуру выходного сигнала работоспособного и отказавшего устройства, схема которого показана на рисунке 4.5.

10. Почему вероятность необнаружения отказа сочетанием счета переходов и единиц меньше вероятности необнаружения отказа счетом переходов или счетом единиц?

11. Предложите формулу для вычисления вероятности необнаружения отказа при сочетании счета переходов и единиц.

12. Предложите методику обнаружения отказа, предусматривающую сочетание счета единиц и сигнатурного анали-

за. Объясните, почему повышается вероятность обнаружения отказа.

13. Поясните принцип работы счетчика единиц на рисунке 4.6.

14. Поясните принцип исключения недопустимых тестовых наборов по схеме на рисунке 4.7.

15. Предложите методику самопроверки встроенного коммутатора по схеме на рисунке 4.8.

Список литературы

1. РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

2. ГОСТ 16465-70. Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения.

3. МИ 2090-90. ГСИ. Определение динамических характеристик линейных аналоговых средств измерений с сосредоточенными параметрами. Общие положения.

4. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

5. *Сергеев А. Г.* Метрология: Учеб. пособие / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. — М.: Логос, 2002. — 408 с.

6. Введение в техническую диагностику / Г. Ф. Верзаков, Н. В. Киншт, В. И. Рабинович, Л. С. Тимонен; под ред. К. Б. Карандеева. — М.: Энергия, 1968.– 224 с.

7. *Ушакова Г. Н.* Аппаратный контроль и надежность специализированных ЭВМ. — М.: Сов. радио, 1969. — 312 с.

8. *Мозгалевский А. В.* Техническая диагностика (непрерывные объекты): учеб. пособие для вузов. — М.: Сов. радио, 1975 — 207 с.

9. *Калявин В. П.* Технические средства диагностирования / В. П. Калявин, А. В. Мозгалевский. — Л.: Судостроение, 1984. — 208 с.

10. Основы технической диагностики / В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян, В. Ф. Халчев; под ред. П. П. Пархоменко. — М.: Энергия, 1976. — 464 с.

11. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.

12. *Ксенз С. П.* Диагностика и ремонтопригодность радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1989. — 248 с.

13. *Джейкокс Дж.* Руководство по поиску неисправностей в электронной аппаратуре / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 176 с.

14. *Граф Ш.* Схемы поиска неисправностей / Ш. Граф, М. Гессель: пер. с нем. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 144 с.

15. *Гаскаров Д. В.* Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозгалевский; под ред. Т. А. Голинкевича. — М.: Сов. радио, 1974. — 224 с.

16. *Давыдов П. С.* Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. — М.: Радио и связь, 1988. — 256 с.

17. *Уильямс Г. Б.* Отладка микропроцессорных систем / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 253 с.

18. *Литиков И. П.* Кольцевое тестирование цифровых устройств. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 160 с.

19. *Хоровиц П.* Искусство схемотехники: В 2-х томах / Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. — М.: Мир, 1983. — Т. 2. — 590 с.

20. *Аршинов М. Н.* Коды и математика (рассказы о кодировании) / М. Н. Аршинов, Л. Е. Садовский. — М.: Наука, 1983. — 144 с.

21. Технические средства диагностирования: справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1989. — 672 с.

22. *Фандеев В. П.* Технологии и средства анализа отказов восстанавливаемых электронных изделий приборостроения. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. — 240 с.

23. *Фандеев В. П.* Методы внутрисхемного диагностирования электрорадиоэлементов и микросхем: учебное пособие / В. П. Фандеев, И. М. Скориков. — Пенза: Приволжский дом знаний, 2002. — 87 с.

Часть III
ВНУТРИСХЕМНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

Глава 5
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

5.1 Постановка задачи внутрисхемного диагностирования

Современные системы управления являются электронной аппаратурой, сердцевину которой составляют сложные печатные узлы (платы) с высокой плотностью монтажа, например такие, как показаны на рисунке 5.1. Многополюсная электрическая цепь (МЭЦ) — схема системы управления образуется соединением между собой отдельных компонентов: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, трансформаторов, диодов, тиристоров, симисторов, транзисторов, микросхем (рисунок 5.2).

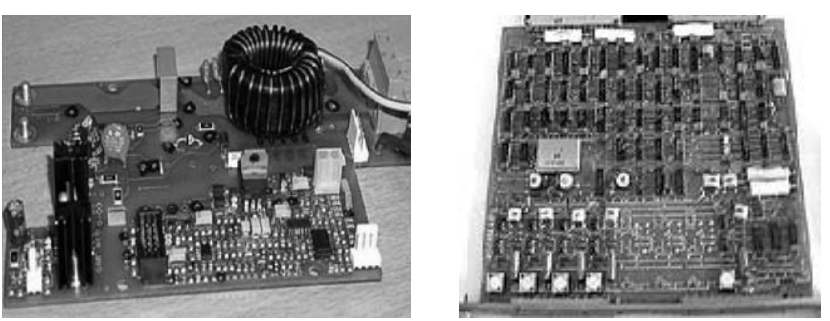


Рисунок 5.1 — Печатные узлы

Рисунок 5.2 — Компоненты печатных узлов

Каждый компонент (радиоэлемент) характеризуется совокупностью параметров, значения которых должны находиться в пределах определенных норм, т. е. в диапазоне, ограниченном предельно допустимыми, граничными значениями (уставками). Топология МЭЦ, т. е. схема соединения компонентов, описывается моделью с множеством полюсов $\mathbf{P} = \{p_i\}_{i = 1, 2, ..., n}$ (точек соединения радиоэлементов между собой) и множеством соединяющих их цепей $\mathbf{Z} = \{z_{ij}\}_{i = 1, 2, ..., n;\, j = 1, 2, ..., n;\, i \neq j}$, где i и j — порядковые номера полюсов, общее количество которых n.

Ограниченный электрический доступ к контрольным точкам печатного узла с высокой плотностью монтажа и миниатюрными компонентами создает серьезные проблемы в применении традиционных методов контроля. Определение параметров цепей для целей диагностирования не может быть проведено обычными приборами, предназначенными для контроля радиоэлементов, так как реакция многополюсной электрической цепи (МЭЦ) на тестовое энергетическое воздействие определяется всей МЭЦ, а не отдельными ее элементами.

Возрастающие сложность схем, плотность компоновки и миниатюризация компонентов, все более расширяющееся применение микросхем еще боле усложняют задачу диагностирования и заставляют непрерывно улучшать контрольно-измерительную и диагностическую аппаратуру, искать новые и совершенствовать известные методы и средства количественной и качественной оценки параметров. С другой стороны,

развитие и совершенствование электроники, достижения микроэлектроники, информационно-измерительной и вычислительной техники открывают новые возможности построения контрольно-диагностической аппаратуры и служат основой ее постоянного совершенствования.

Интенсивно разрабатываются методы функционального и структурного диагностирования, основанные на тестировании под рабочим напряжением систем управления и их функциональных узлов. Наибольше успехи достигнуты в диагностировании цифровой аппаратуры, поддающейся описанию методами математической логики. Однако функциональный контроль обеспечивает информацию, только подтверждающую правильность работы объекта и позволяет принимать решение о годности изделия. При исследовании технического состояния аналоговых схем, являющихся неотъемлемой частью систем управления, этих методов недостаточно для обеспечения требуемой глубины локализации места появления дефекта.

Проблема поиска неисправностей при ремонте дополнительно усложняется тем, что в процессе замены неисправного компонента возможны нарушения топологии (разрывы соединений или короткие замыкания), появление нелогичных неисправностей (неправильно установленные радиоэлементы, отсутствие элементов), а также появление вторичных дефектов при подаче рабочего напряжения. В таких условиях методы структурного диагностирования и традиционные методы контроля параметров электрических сигналов и цепей имеют ограниченное применение и недостаточно эффективны из-за отсутствия достоверной информации о топологии схемы.

Наиболее результативный метод поиска дефектов при ремонте систем управления — проведение проверок каждого компонента или фрагмента схемы при условиях исключения влияния внешних по отношению к нему элементов и неповреждающего характера тестовых воздействий. Метод получил название внутрисхемной (in-circuit), или поэлементной, оценки. При поиске дефектов в процессе эксплуатации и ремонта поэлементное диагностирование дополняет структурное и способс-

твует увеличению глубины локализации дефектов. Контроль под напряжением применяется для предварительной локализации места отказа. Внутрисхемное диагностирование используется на последнем этапе для нахождения конкретного несправного компонента или нарушения топологии, что заметно снижает стоимость ремонта — достаточно заменить дефектную деталь.

При внутрисхемном диагностировании определение всей совокупности параметров, характеризующих исправность отдельного компонента практически невозможно, вследствие соединения компонентов между собой. Этого и не требуется, так как полный контроль параметров проводится после изготовления компонента. Перед монтажом на плате обычно осуществляется проверка работоспособности. Интервал времени между контролем элементов до монтажа и после него, как правило, достаточно мал. Вследствие этого постепенный отказ произойти не может, а резкий отказ вызывает ошибку функционирования, а не ухудшение отдельных параметров. Для локализации места отказа аппаратуры в процессе ее эксплуатации также достаточно проверки функционирования компонентов. Таким образом, для решения большинства задач внутрисхемного диагностирования достаточно контроля функционирования компонентов в составе платы.

5.2 Систематизация задач диагностирования электрических цепей

Контроль функционирования электронных компонентов осуществляется путем проведения измерительного эксперимента. Для корректной постановки эксперимента диагностируемая цепь должна быть представлена моделью, учитывающей параметры функционирования и неинформативные факторы, влияющие на результат. Эти параметры для электрических цепей различных типов и даже внутри одного типа весьма разнообразны и разнородны. В связи с этим возможность оценки их стандартными методами с помощью одной универсальной системы контроля представляется достаточно проблематичной.

Для определения минимально необходимого набора методов и реализующих их функциональных элементов, совместимых в единой системе, проведем систематизацию параметров (рисунок 5.3), используемых для диагностирования электрических цепей аппаратуры.

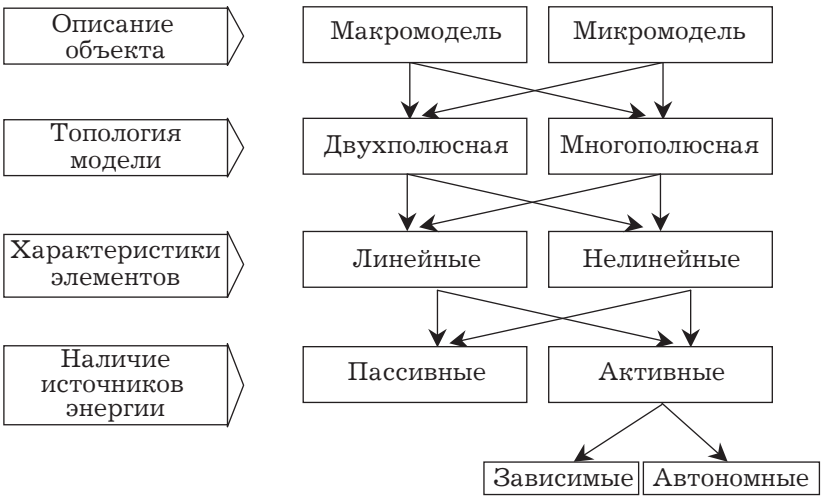


Рисунок 5.3 — Систематизация параметров электрических цепей

Описание электрических цепей аппаратуры возможно на уровнях макро- и микромоделей. Макромодель характеризуется множеством обобщенных параметров $\mathbf{\Pi}_x = \{\text{п}_{ij}\}_{i=1,2,\ldots,n;\, j=1,2,\ldots,n}$, описывающих связь между независимыми активными величинами A_{01}, A_{02}, ..., A_{0n} (напряжениями между парами полюсов i, j или контурными токами), определяющими тестовое энергетическое воздействие, и зависимыми активными величинами A_{x_1}, A_{x_2}, ..., A_{x_n}, определяющими реакцию цепи:

$$\begin{bmatrix} A_{x_1} \\ A_{x_2} \\ \cdots \\ A_{x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{п}_{x_{11}} & \text{п}_{x_{12}} & \cdots & \text{п}_{x_{1n}} \\ \text{п}_{x_{21}} & \text{п}_{x_{22}} & \cdots & \text{п}_{x_{2n}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \text{п}_{x_{n1}} & \text{п}_{x_{n2}} & \cdots & \text{п}_{x_{nn}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{01} \\ A_{02} \\ \cdots \\ A_{0n} \end{bmatrix}.$$

Параметры $п_{ij}$ могут представлять собой амплитудно-фазовые частотные характеристики, временные характеристики, матричные параметры многополюсника, включая параметры внутренних источников сигналов, разнообразные функциональные зависимости и т. д. Обобщенные параметры позволяют судить о свойствах электрической цепи в целом как о едином объекте.

Микромодель характеризуется схемой соединения и параметрами $\mathbf{X} = \{x_i\}_{i = 1, 2, \ldots, m;\, m \geq n}$ образующих схему элементов. При таком подходе МЭЦ уже не рассматривают как многомерный объект, а описывают множеством независимых уравнений:

$$\left.\begin{array}{c} A_{x_1} = A_{01} K_1 x_1 \\ A_{x_2} = A_{02} K_2 x_2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ A_{x_m} = A_{0m} K_m x_m \end{array}\right\},$$

где K_i — коэффициент преобразования, а параметры x_i характеризуют свойства только одного элемента, включенного в стандартную измерительную схему.

Применение обобщенных параметров макромодели $п_{x_{ij}}$ наиболее естественно для контроля функциональных узлов на этапе настройки и испытания аппаратуры. Те же параметры, определенные для отдельного компонента в стандартной испытательной схеме, следует считать параметрами микромодели, так как они характеризуют функционирование конкретного исследуемого элемента. В первую очередь это относится к многополюсным компонентам, таким как транзисторы, микросхемы, некоторые моточные и электромеханические изделия и т. д. При контроле двухполюсных элементов (резисторов, конденсаторов, диодов и т. п.), соединенных между собой в аппаратуре, грань между макро- и микромоделью зависит от внутренней структуры МЭЦ.

В общем случае возможность оценки параметров компонентов в схеме (измеряемость) обеспечивается, если число независимых уравнений, описывающих связи между доступными

для наблюдения переменными, больше или равно количеству параметров компонента. В зависимости от топологии схемы объекта диагностирования и поставленных задач условия измеряемости могут быть конкретизированы.

Определение параметров компонентов по макромодели возможно с помощью совокупных и совместных оценок путем математической обработки измерительной информации. Для нахождения параметров модели при этом могут быть использованы все виды оценок параметров, включая прямые и косвенные. В большинстве случаев оценки обобщенных параметров условия измеряемости параметров отдельного компонента не выполняются.

Микромодель должна удовлетворять условиям измеряемости и идентифицируемости. Она имеет однозначно разрешимую относительно параметров компонентов схему, состоящую из идеализированных радиоэлементов. Значению каждого параметра микромодели соответствует значение параметра определенного элемента. То есть микромодель наиболее приемлема для внутрисхемной оценки исправности компонентов.

На основе микромодели возможно определение параметров элементов методами прямых и косвенных оценок. Это не исключает возможности применения любых видов оценок, включая совокупные и совместные, для нахождения параметров модели, поскольку оценка параметров модели является задачей более низкого уровня по отношению к задаче оценки параметров печатного узла в целом.

В зависимости от числа полюсов, к которым подключается измерительная аппаратура на соответствующей операции, схема модели может быть двухполюсной (ДЭЦ) и многополюсной. В схеме модели могут быть внутренние полюсы, недоступные для подключения измерительной аппаратуры.

Двухполюсная модель характерна для пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов и т. д.), не соединенных между собой или соединенных параллельно. Такую модель можно использовать для описания двухполюсных радиоэлементов, соединенных в схеме с

цепями, влияние которых на оценку может быть пренебрежимо мало за счет выбора параметров тестовых воздействий или применения специальных методов измерения. Под измерением в широком смысле этого слова понимается количественная или качественная оценка параметров объекта. Например, влияние транзистора на результат оценки параметров резисторов или конденсаторов может быть устранено при выборе тестового воздействия меньше уровня открывания переходов транзистора. Влиянием соединенных с ДЭЦ микросхем в ряде случаев можно пренебречь, если питание на последние не подается. Модели микросхем, транзисторов, трансформаторов, коммутационных электромеханических элементов и т. п. принципиально должны быть многополюсными.

В зависимости от типа вольт-амперных характеристик элементов модели подразделяют на линейные и нелинейные. Значения параметров линейной модели не зависят от интенсивности электрических сигналов. У нелинейной модели интенсивность сигналов сказывается на значениях хотя бы одного из параметров. Линейной моделью обычно представляются резисторы, конденсаторы, в ряде случаев катушки индуктивности, транзисторы, аналоговые интегральные схемы в режиме усиления и т. д. Нелинейная модель характерна для полупроводниковых элементов, образованных p-n переходами, катушек индуктивности с сердечниками и т. п.

В зависимости от наличия внутреннего источника электрической энергии модель может быть пассивной или активной. В свою очередь источник энергии бывает зависимым, если на значения параметров, характеризующих его энергию, влияют сигналы на полюсах элемента, и автономным (независимым). Использование модели с зависимым источником характерно для схем с транзисторами и интегральными схемами, диагностируемыми при включенном напряжении питания.

Информацию об автономных источниках можно получить из пассивного измерительного эксперимента без подачи тестового энергетического воздействия, путем измерения напряжений между полюсами и токов, протекающих через цепи из-

мерительной аппаратуры, подключенные к полюсам элемента. Получение информации о пассивных элементах модели объекта с автономными источниками энергии также возможно путем пассивного эксперимента, например в опытах холостого хода и короткого замыкания. Оценка параметров модели, не содержащей автономных источников энергии, возможна только в ходе активного измерительного эксперимента при использовании внешнего источника энергетического воздействия на объект диагностирования.

Пассивные элементы способны либо рассеивать электромагнитную энергию, либо запасать ее в электрическом и магнитном полях. Описание реакции пассивной ДЭЦ на приложенную к ней электрическую энергию основано на законе Ома. В общем случае используют операторную форму, устанавливающую связь между изображениями по Лапласу напряжения $U(p)$, приложенного к цепи, и протекающего через нее тока $I(p)$:

$$\mathbf{U}(p) = \mathbf{Z}(p)\,\mathbf{I}(p), \text{ или } \mathbf{I}(p) = \mathbf{Y}(p)\,\mathbf{U}(p),$$

где $\mathbf{Z}(p)$ и $\mathbf{Y}(p)$ — соответственно операторное сопротивление и проводимость;

p — оператор Лапласа.

Математическое выражение для операторных сопротивления $\mathbf{Z}(p)$ и проводимости $\mathbf{Y}(p)$ имеет вид дробно-рациональной функции. Вид операторной функции обусловлен схемой соединения элементов, образующих цепь. Значения активного сопротивления R, емкости C, индуктивности L и взаимоиндуктивности M элементов схемы задаются частотно независимыми коэффициентами функции и подлежат определению в процессе измерительного эксперимента. Существует взаимно однозначное соответствие между электрической схемой модели и операторным сопротивлением или проводимостью. Если значениям параметров R, C, L, M можно поставить в соответствие определенные значение параметров компонентов, то схема соответствует микромодели.

Обобщенной характеристикой пассивной двухполюсной электрической цепи служит иммитанс — комплексное сопро-

тивление $\dot{\mathbf{Z}}$ (импеданс) или проводимость $\dot{\mathbf{Y}}$ (адмиттанс) — который описывает реакцию цепи на гармоническое синусоидальное воздействие

$$u_0(t) = U_0 \sin\omega_0 t,$$

где U_0 и ω_0 — соответственно, амплитуда и частота напряжения.

Иммитанс аналитически можно представить в функции от своих параметров. Наиболее часто используют четыре формы представления:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \frac{1}{\dot{Y}} = ze^{j\varphi} = \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}} + j\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}} = \mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}(\mathrm{tg}\,\phi \pm j) = \mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}\left(\frac{1}{Q} \pm j\right), \qquad (5.1)$$

где z и φ — модуль и аргумент $\dot{\mathbf{Z}}$;

$\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}} = z\cos\varphi$ и $\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}} = z\sin\varphi$ — активная и реактивная составляющие соответственно;

$\mathrm{tg}\,\phi = \dfrac{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}}{\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}}$ — тангенс угла потерь;

$Q = \dfrac{1}{\mathrm{tg}\,\phi}$ —добротность.

Выбор формы представления определяют исходя из решаемой задачи. Например, модуль z и аргумент φ характеризуют роль, которую цепь исполняет в общей схеме. Эти параметры используют при диагностировании цепей аппаратуры в тех случаях, когда частота воздействия при оценке параметров близка к рабочей частоте объекта диагностирования. Оценка активной $\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}$ и реактивной $\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}$ составляющих $\dot{\mathbf{Z}}$ позволяет приблизиться к поэлементному контролю. Оценка одной из составляющей и потерь, или добротности, наиболее удобна для контроля реактивных радиоэлементов, таких как конденсаторы или катушки индуктивности.

Иммитанс и его параметры частотно зависимы и в общем случае являются характеристиками макромодели. В случае двухэлементной микромодели между параметрами иммитанса и параметрами модели существует взаимно однозначное соответствие. Частотная функция импеданса, т. е. зависимость его

параметров от частоты ω_0 может быть использована для идентификации и синтеза многоэлементной схемы микромодели.

5.3 Обобщенная структурная схема системы контроля и диагностирования

В аппаратуре для внутрисхемного контроля и диагностирования необходимо реализовать ряд специальных функций, не свойственных обычным измерительным приборам в полной мере. Рассмотрим обобщенную структурную схему автоматической системы контроля и диагностирования (АСКД) электронной аппаратуры (рисунок 5.4), особенности построения которой характерны также для автоматизированных и ручных тестеров внутрисхемного контроля.

В общем случае в АСКД входят устройство контактирования УК с объектом диагностирования, коммутатор К, узел фиксации неисправностей УФН, программирующее устройство ПУ и узлы измерительной подсистемы: преобразователь параметр — унифицированный сигнал ППС, узел сравнения УС, формирователь опорных сигналов ФОС.

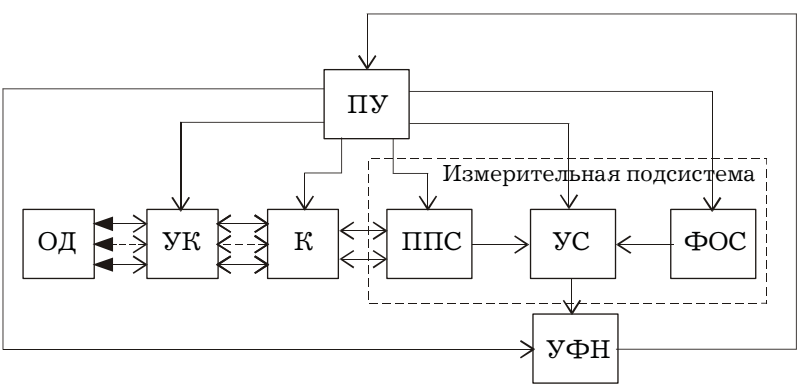


Рисунок 5.4 — Структура автоматической системы контроля и диагностирования

Устройство контактирования обеспечивает электрический контакт с контрольными точками (полюсами) объекта диагнос-

тирования ОД. Коммутатор служит для выбора на каждой контрольной операции контрольных точек ОД и подключения их к ППС в соответствии с программой диагностирования. ППС осуществляет восприятие разнообразных контролируемых величин x_i и преобразование их к единому виду A_{x_i}, удобному для сравнения в УС с граничным значением $A_{г_i}$, сформированным в ФОС. Результат сравнения поступает в узел фиксации неисправностей УФН. УФН в зависимости от результата сравнения принимает решение о принадлежности контролируемого параметра к одной из качественно различных областей состояния: “годен”, т. е. значение параметра в норме, “значение параметра больше нормы”, “значение параметра меньше нормы”, “брак исправимый”, “брак неисправимый” и т. п. Программирующее устройство ПУ осуществляет управление работой всей АСКД. Оно задает номера и последовательность точек, подключаемых к ППС через УК и К, режим работы ППС, значение опорного сигнала, формируемого ФОС, логику работы УФН. Программа диагностирования может модифицироваться в зависимости от результатов выполнения отдельных операций, зафиксированных УФН.

В ручных диагностических тестерах коммутатор и программирующее устройство обычно не используются, выбор контрольных точек и порядок их подключения определяются оператором. Принятие решения о соответствии параметра норме, как правило, возлагается на оператора.

Технические характеристики АСКД зависят от вариантов исполнения основных узлов. Рассмотрим их.

В автоматизированных системах используются три основных варианта исполнения узла контактирования. На рисунке 5.5 схематично показана конструкция традиционного контактрона типа “ложе из гвоздей”, представляющего собой матрицу подпружиненных контактирующих штифтов (зондов), с наконечниками специальной формы, обеспечивающими контакт с печатным узлом в точках припайки компонентов.

Основным недостатком рассмотренного типа контактирующего устройства являются невозможность обеспечения двухстороннего контактирования с печатным узлом. Кроме того,

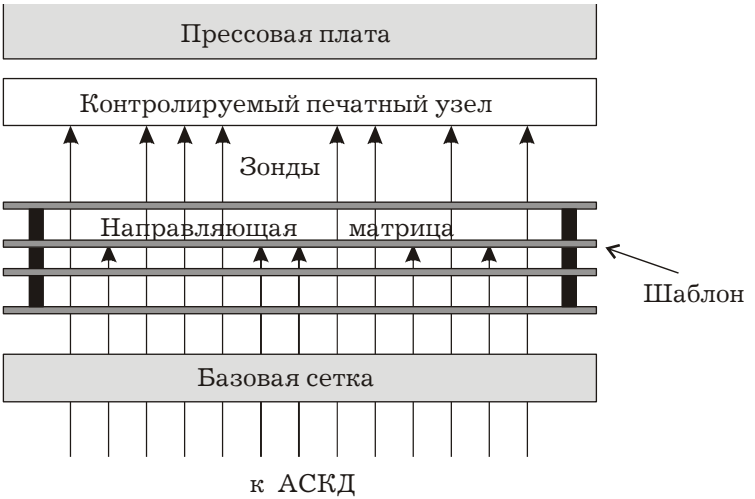


Рисунок 5.5 — Схема контактрона “ложе из гвоздей”

использование десятков тысяч контактирующих штифтов приводит к необходимости обеспечения давление прессовой платы, достигающего нескольких тонн. Наличие большого числа зондов ведет также к значительному усложнению коммутатора и кабеля, соединяющего его с контактами. Паразитные параметры кабеля, такие как распределенные межпроводниковые емкости, сопротивление и индуктивность проводников, значительно увеличивают время контрольных операций и вызывают искажения тестовых и контролируемых сигналов.

Тенденцией развития печатных узлов является применение многослойных печатных плат с двухсторонним поверхностным монтажом, уменьшение размеров компонентов и тестовых контактов. Для таких узлов могут применяться контактроны с роботизированными (управляемыми) зондами. На рисунке 5.6 схематично показана конструкция контактрона с управляемыми зондами, а на рисунке 5.7 — общий вид одного из промышленных контактронов.

Используют от четырех до восьми зондов. Зондовые головки имеют возможность перемещения по программе по трем

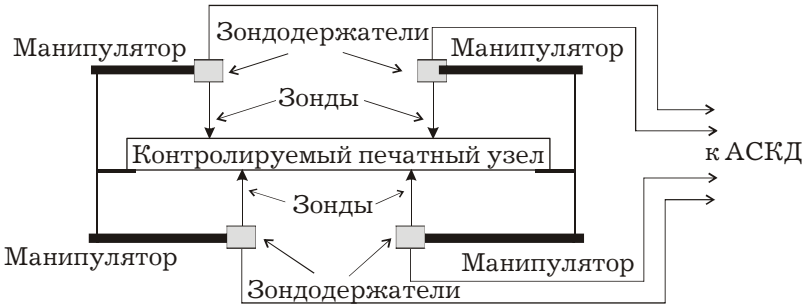


Рисунок 5.6 — Схема контактрона с управляемыми зондами

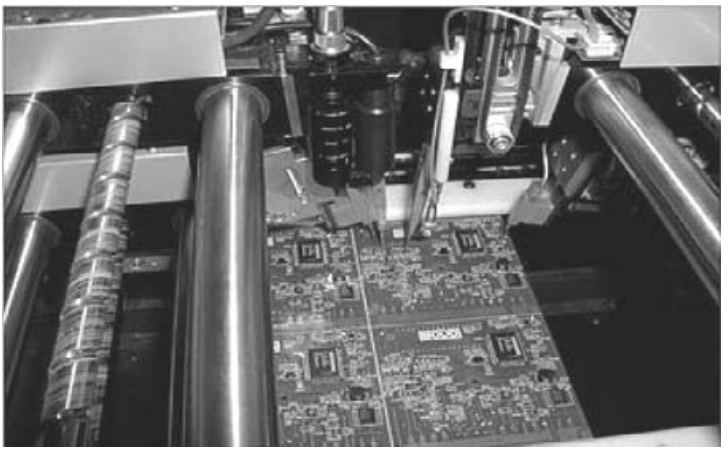


Рисунок 5.7 — Вид контактрона с управляемыми зондами

координатам X, Y и Z с шагом менее 1 мм. В некоторых модификациях одновременно может перемещаться на транспортере сам диагностируемый печатный узел. Контактирование осуществляется в моменты остановок. Таким образом последовательно зондируются все контрольные точки. Зонды могут контактировать не только с контрольными точками, но и с выводами компонентов, соединителями, перемычками.

Недостатками контактронов с управляемыми зондами является снижение производительности и наработки на отказ из-

за наличия движущихся частей по сравнению с ранее рассмотренным вариантом.

Компромиссным вариантом, сочетающим достоинства ранее рассмотренных конструкций, является использование “летающих матриц” (рисунок 5.8).

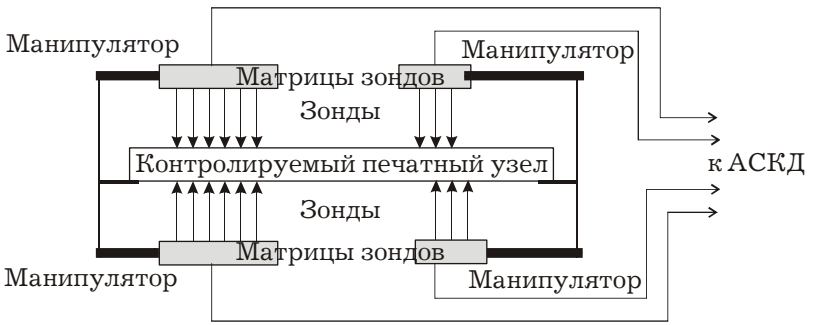


Рисунок 5.8 — Схема контактрона с “летающими матрицами”

В четырех матрицах сгруппированы зонды, имеющие соленоидный привод перемещения по вертикали и расположенные со сравнительно большим шагом до 25 мм. Матрицы располагаются по обе стороны от диагностируемого печатного узла и имеют возможность перемещения по программе по координатам X и Y с шагом менее 1 мм. Обычно с каждой стороны располагаются большая матрица, содержащая до 300 зондов, и малая — с 50-100 зондами. Такой контактрон позволяет проводить контроль одновременно нескольких цепей печатного узла. Для изменения точек контактирования требуется сравнительно небольшое перемещение матриц, которое производится с высокой скоростью.

В ручных тестерах для контактирования применяют щупы (рисунок 5.9), специальные захватики, навесные контактные приспособления типа “клипса” (рисунок 5.10), которые надеваются сверху на микросхему, обеспечивая контактирование со всеми ее выводами, и т. п.

Для построения коммутаторов используются транзисторные матрицы ключей. Их важнейшие характеристики — со-

противление открытого и закрытого ключа. Сопротивления достигают, соответственно, от десятых до сотых долей Ома и от сотен кОм до десятков МОм.

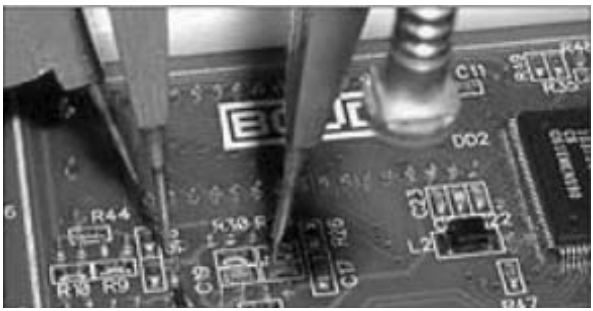


Рисунок 5.9 — Контактные щупы для ручных средств диагнострования

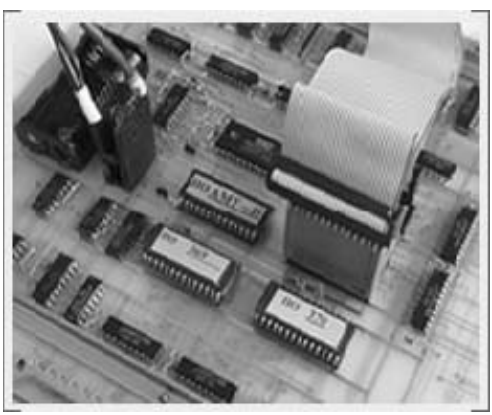


Рисунок 5.10 — Контактное приспособления типа “клипса”

В качестве программирующего устройства применяются персональные и промышленные компьютеры или микроконтроллеры. Для фиксации неисправностей могут использоваться все типы памяти, индикаторные панели или монитор.

В состав ППС входят источник воздействий ИВ на объект диагностирования, измерительная схема ИС, в которой

под действием электрической энергии ИВ происходит преобразование пассивных контролируемых величин в активные, и унифицирующие преобразователи УП активных величин к виду, удобному для последующего сравнения с опорными сигналами ФОС.

Метрологические характеристики АСКД в значительной степени определяются принципом построения и узлами измерительной подсистемы, включающей в себя ППС, УС и ФОС. Возможны четыре варианта построения измерительной подсистемы, отличающиеся тем, в каком виде — аналоговом или цифровом — задаются значения норм в ФОС и происходит сравнение действительного и заданного значений контролируемых величин в УС (рисунок 5.11). АСКД со сравнением в аналоговом виде в дальнейшем будем называть аналоговыми, а со сравнением в цифровом виде — цифровыми.

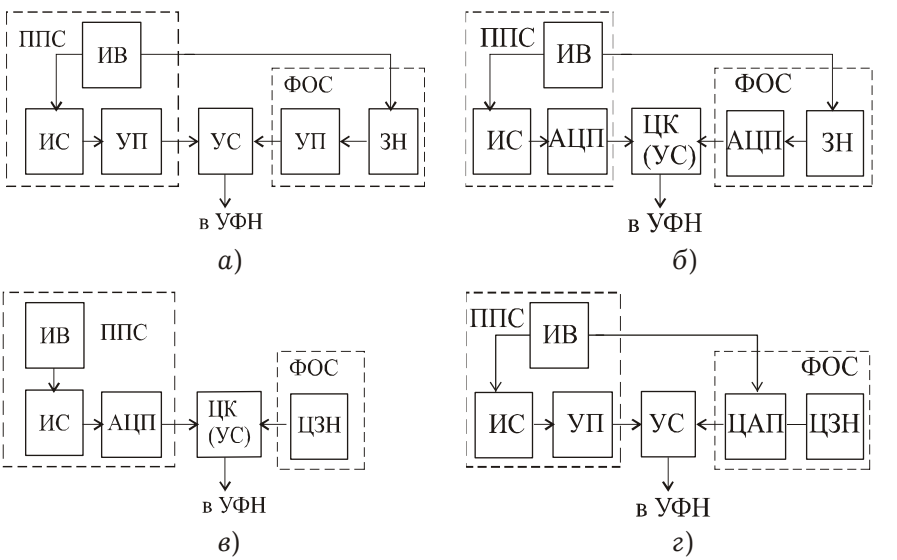


Рисунок 5.11 — Структуры измерительных подсистем АСКД

В АСКД с заданием норм в аналоговом виде (рисунки 5.11, *а* и *б*) в качестве ФОС может использоваться:

1) заведомо исправное изделие (блок или печатный узел), идентичное проверяемому;

2) узел, изготовленный из прецизионных элементов той же физической природы, что и контролируемые;

3) узел, в котором контролируемые цепи моделируют с помощью прецизионных элементов одной физической природы, чаще всего резисторами.

Заведомо исправное изделие применялось в качестве ФОС в ранних конструкциях АСКД. В таких системах УС сравнивает реакции объекта диагностирования и аналогового задатчика норм ЗН, предварительно преобразованные унифицирующими преобразователями УП в величину, удобную для сравнения. Достаточно часто в качестве унифицирующих используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Тогда УС представляет собой цифровой компаратор ЦК (рисунок 5.11, *б*).

В целом, рассматриваемый вариант нельзя признать удачным для диагностирования аналоговых схем, так как значения параметров цепей заведомо исправного изделия могут лежать на границе зоны допустимых значений. Контроль относительно них как номинальных может привести к грубым ошибкам и общему снижению достоверности результата. В современных АСКД сравнение с заведомо исправным изделием применяют для контроля сложных цифровых схем, таких как память, микропроцессоры и т. п. Причем тестовое воздействие часто задают случайным образом, поскольку полная программа контроля подобных схем может потребовать слишком больших затрат времени.

Схемы измерительных подсистем, использующих в ФОС прецизионные элементы той же физической природы, что и контролируемые, соответствуют схемам мостов переменного тока, обладающих высокой точностью измерения параметров иммитанса. Однако в современных АСКД этот вариант практически не применяется из-за сложности изготовления таких прецизионных элементов, как конденсаторы и катушки индуктивности, и практической невозможности изготовления прецизионных нелинейных элементов. Кроме того, конструкция и, следовательно, значения паразитных параметров схемы

из прецизионных элементов, как правило, значительно отличаются от соответствующих параметров ОД, что снижает достоверность контроля. В силу указанных выше причин АСКД с подобными ФОС характеризуются низкой достоверностью результатов контроля аналоговых схем, малой универсальностью и громоздкостью.

В специализированных и полууниверсальных АСКД, предназначенных для контроля однотипных изделий со сравнительно небольшим количеством цепей, нашел применение третий вариант построения ФОС. Как правило, такие АСКД используют сравнение в аналоговом виде. С увеличением количества контролируемых цепей происходит резкое усложнение ФОС, и применение метода затруднительно.

В универсальных АСКД, контролирующих широкую номенклатуру изделий с большим числом разнообразных цепей, применяют цифровые задатчики норм (ЦЗН). При этом возможно сравнение как в цифровом виде (рисунок 5.11, *в*) с использованием цифрового компаратора ЦК и АЦП в составе ППС, так и в аналоговом (рисунок 5.11, *г*), характерном для систем допускового контроля. В последнем варианте в состав ФОС включается цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Сопоставление аналогового и цифрового вариантов построения АСКД проведем по информационному критерию. Количество информации, которое получают в аналоговых системах для определения принадлежности контролируемой величины x к одной из n качественно различных областей, может быть найдено по формуле

$$I_{\text{А}} = -\sum_{i=1}^{n} \int_{x_{\text{г}i-1}}^{x_{\text{г}i}} p(x)dx \ln \int_{x_{\text{г}i-1}}^{x_{\text{г}i}} p(x)dx, \qquad (5.2)$$

где $p(x)$ — плотность вероятности распределения x в диапазоне возможных значений $x_{\min} \le x \le x_{\max}$;

$x_{\text{г}_{i-1}}$ и $x_{\text{г}_i}$ для $i = 1, 2, ..., n$ — границы i-й области.

Аналого-цифровое преобразование величины x с шагом квантования $\Delta x_{\text{к}}$ обеспечивает получение количества информации

$$I_{\text{Ц}} = -\sum_{j=1}^{N} \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx \ln \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx, \qquad (5.3)$$

где $N = \dfrac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x_{\text{к}}}$ — число участков квантования в этом диапазоне (число возможных градаций значений x);

x_{j-1} и x_j, для j = 1, 2, ..., N — граничные значения x на j-м участке квантования.

Для упрощения расчетов примем, что граничные значения $x_{\text{г}_i}$ кратны $\Delta x_{\text{к}}$, тогда выражение (5.3) можно представить в виде

$$I_{\text{Ц}} = -\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=\frac{x_{\text{г}_{i-1}}}{\Delta x_{\text{к}}}}^{\frac{x_{\text{г}_i}}{\Delta x_{\text{к}}}} \ln \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx. \qquad (5.4)$$

Избыточное количество информации, получаемое в цифровых АСКД при допусковом контроле величины x, можно найти как разность выражений (5.2) и (5.4):

$$I_{\text{Ц}} - I_{\text{А}} = -\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=\frac{x_{\text{г}_{i-1}}}{\Delta x_{\text{к}}}}^{\frac{x_{\text{г}_i}}{\Delta x_{\text{к}}}} \ln \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx + \sum_{i=1}^{n} \ln \int_{x_{\text{г}_{i-1}}}^{x_{\text{г}_i}} p(x)dx \int_{x_{\text{г}_{i-1}}}^{x_{\text{г}_i}} p(x)dx =$$

$$= -\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=\frac{x_{\text{г}_{i-1}}}{\Delta x_{\text{к}}}}^{\frac{x_{\text{г}_i}}{\Delta x_{\text{к}}}} \int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx \ln \frac{\int_{x_{j-1}}^{x_j} p(x)dx}{\int_{x_{\text{г}_{i-1}}}^{x_{\text{г}_i}} p(x)dx}.$$

Для наиболее распространенных случаев равномерного и нормального законов распределения величины x количество информации, получаемое в цифровых системах, превышает минимально необходимое для допускового контроля в 5–30 раз в зависимости от соотношения значений n и N.

Информационная избыточность цифровых АСКД объясняется тем, что при допусковом контроле важно обеспечить максимальную точность сравнения контролируемой величины x с уставкой $x_{\text{г}}$ в том случае, когда значение $x \approx x_{\text{г}}$ находится на границе допуска. В такой ситуации велик риск появления

ошибки диагностирования, т. е. принятия решения о принадлежности x, значение которого соответствует одной из областей состояния, к другой качественно отличной области.

По мере удаления значения x от предельно допустимого точность сравнения может быть снижена без риска повышения вероятности ошибки диагностирования. Минимально необходимому для допускового контроля количеству информации соответствует показанный на рисунке 5.12 закон распределения по диапазону $x_{min} - x_{max}$ абсолютной погрешности сравнения, т. е. минимального значения разности $\Delta x = x - x_г$, приводящего к появлению ошибки диагностирования.

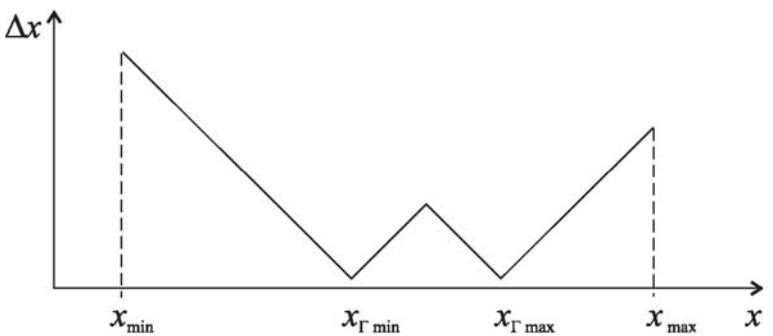


Рисунок 5.12 — Оптимальное распределение погрешности сравнения значения контролируемого параметра с уставкой

При таком характере распределения погрешности вероятность появления ошибки диагностирования одинакова во всем диапазоне значений x. При аналого-цифровом преобразовании контролируемой величины x вероятность появления ошибки диагностирования уменьшается по мере отклонения значения x от предельно допустимого. Получаемое количество информации возрастает и становится избыточным.

Минимизация количества получаемой информации в аналоговых системах допускового контроля без промежуточного аналого-цифрового преобразования наиболее просто может быть использована для повышения быстродействия. Много-

кратное сравнение с мерой, характерное для аналого-цифрового преобразования, в аналоговых системах заменяется однократным сравнением с граничным значением. Запас быстродействия может быть так же обменен на повышение точности контроля, например, путем усреднения нескольких результатов.

Преимущества аналоговых систем можно реализовать в случае, когда величина A_x, непосредственно воспринимаемая измерительным преобразователем, однозначно связана с контролируемым параметром объекта x диагностирования $A_x = f(x)$.

В тех случаях, когда величины, непосредственно воспринимаемые измерительными преобразователями, являются функцией нескольких контролируемых величин $A_x = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, перед проведением допускового контроля необходимо вычисление действительного значения x. Эта операция может быть выполнена с использованием функциональных аналоговых преобразователей или в цифровом виде. Последний вариант характерен для современных систем с микроконтроллерами и ЭВМ.

При контроле совокупности свойств объекта $x_1, x_2, ..., x_n$, связанных с непосредственно воспринимаемыми величинами системой уравнений

$$\left.\begin{array}{l} \varphi_1(x_1, x_2, \ldots, x_n; A_{x_1}, A_{x_2}, \ldots, A_{x_n}) = 0 \\ \varphi_2(x_1, x_2, \ldots, x_n; A_{x_1}, A_{x_2}, \ldots, A_{x_n}) = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \varphi_n(x_1, x_2, \ldots, x_n; A_{x_1}, A_{x_2}, \ldots, A_{x_n}) = 0 \end{array}\right\},$$

возможен непосредственный допусковый контроль параметров $x_1, x_2, ..., x_n$ по величинам $A_{x_1}, A_{x_2}, \ldots, A_{x_n}$. Однако при этом возникает методическая погрешность, вызванная несовпадением конфигураций областей допустимых значений $x_1, x_2, ..., x_n$ и величин $A_{x_1}, A_{x_2}, \ldots, A_{x_n}$. Неконтролируемое отклонение в пределах диапазона допустимых значений величины x_i вызывает погрешность допускового контроля x_j. Устранение этой погрешности возможно при вычислении действительного значения x_j.

До недавнего времени использование сравнения в аналоговом виде позволяло существенно упростить схемотехнику

АСКД за счет применения простейших ИС с нелинейной функцией преобразования и исключения из системы сравнительно сложных узлов АЦП. Влияние нелинейности ИС достаточно просто устранялось путем учета фактической функции преобразования при расчете границ зоны допустимых значений.

С развитием средств вычислительной техники и расширяющимся применением микроконтроллеров различия в сложности между аналоговыми и цифровыми АСКД нивелировались. Более того, учитывая низкую цену микроконтроллеров, в состав которых уже входят узлы АЦП и ЦАП, удобство и простоту исполнения программирующего устройства на основе того же контроллера и возможности цифровых методов измерения параметров электрических цепей и напряжений, на современном этапе цифровые АСКД имеют неоспоримые преимущества. Они оказываются более дешевыми за счет совмещения нескольких функций в одной интегральной схеме, более универсальными и более простыми при разработке и эксплуатации, особенно для контроля параметров, косвенно связанных с непосредственно воспринимаемыми величинами и для контроля совокупности параметров.

На современном уровне развития электронной техники применение сравнения в аналоговом виде целесообразно в случае экстремальных требований к быстродействию или точности, а также в простых специализированных ручных тестерах для внутрисхемного контроля.

Контрольные вопросы

1. Какое диагностирование называют внутрисхемным?
2. Что представляет собой печатный узел?
3. Какие виды электрических цепей встречаются при диагностировании печатных узлов?
4. Как варианты конструкций контактронов вы знаете”?
5. В чем преимущества АСКД со сравнением величин в аналоговом виде?
6. В каких случаях применение таких систем затруднено?
7. В каких единицах измеряется количество информации?

Глава 6
МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

6.1 Классификация методов получения информации о параметрах линейных двухполюсных электрических цепей

Наиболее общей задачей диагностирования печатных узлов является оценка параметров пассивных линейных ДЭЦ. Традиционно методы оценки параметров ДЭЦ подразделяются на компенсационно-мостовые и методы, использующие преобразование параметров ДЭЦ в пропорциональные значения промежуточных величин (рисунок 6.1). Компенсационно-мостовые методы измерения наиболее точные. Однако они сложны в реализации и по сравнению с остальными имеют низкое быстродействие. В силу этих причин компенсационно-мостовые методы практически не применяются в АСКД.

Методы с преобразованием в пропорциональные величины подразделяются на временны́е и частотные. Временны́е методы используют импульсные воздействия для оценки параметров элементов ДЭЦ (для временны́х методов принято название “инвариантные”). В основе временны́х методов лежит тот факт, что оригинал функции операторного сопротивления $L^{-1}[\mathbf{Z}(p)] = g(t)$ представляет собой импульсную характеристику ДЭЦ. Функция $g(t)$ описывает изменение напряжения на полюсах ДЭЦ (тока в ней) в случае изменения тока (напряжения) по закону дельта-функции:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0 \\ 0, & \text{при } t \neq 0 \end{cases}.$$

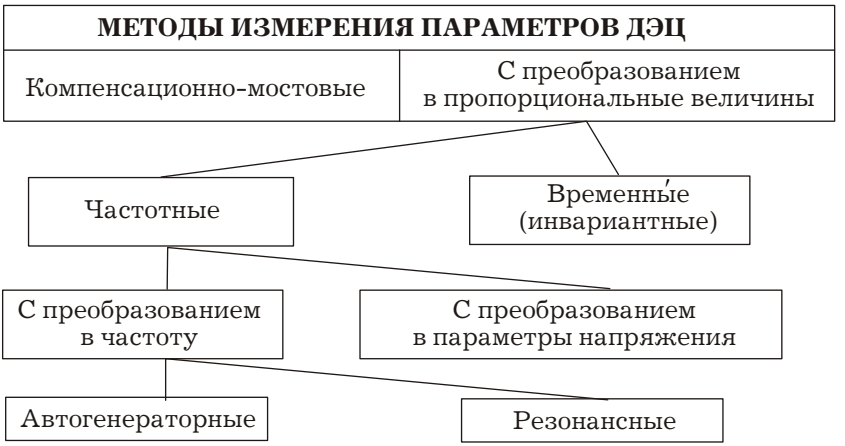


Рисунок 6.1 — Систематизация методов оценки параметров ДЭЦ

Измерение импульсной характеристики невозможно вследствие физической нереализуемости функции $\delta(t)$. На практике осуществляют измерение другой временно́й характеристики — переходной функции $h(t)$, описывающей реакцию цепи на единичный скачок воздействия и связанной с импульсной функцией известным соотношением:

$$h(t) = \int_0^t g(t)dt.$$

В силу интегрального характера этого соотношения “тонкие нюансы” импульсной характеристики теряются в погрешностях измерения. Этим объясняется определенное ограничение количества однозначно оцениваемых элементов ДЭЦ, свойственное временны́м методам. Хотя временны́е методы позволяют проводить оценку непосредственно параметров элементов, образующих ДЭЦ на основе известной микромодели, применение их в АСКД проблематично в связи с тем, что структура измерительной схемы, форма воздействия и способы обработки выходного сигнала ИС зависят от топологии ДЭЦ и не являются универсальными.

Среди частотных методов измерения выделяются резонансные и автогенераторные, в которых о параметрах ДЭЦ судят по регулируемой частоте энергетического воздействия. Эти методы применяются в основном для работы с параметрическими датчиками и позволяют оценивать параметр одного из элементов ДЭЦ.

Частотные методы с преобразованием параметров контролируемой цепи в параметры напряжения основаны на оценке реакции ДЭЦ на гармоническое воздействие определенной частоты. Оцениваются значения параметров иммитанса, т. е. обобщенные параметры макромодели. Эти методы наиболее универсальны, структура измерительной схемы, форма воздействия и способы обработки выходного сигнала ИС не зависят от топологии ДЭЦ, а оценка параметров приближается к поэлементной. Они широко применяются в технике диагностирования печатных узлов, поэтому в дальнейшем именно им будет уделено основное внимание.

Процесс оценки параметров ДЭЦ можно рассмотреть на обобщенной модели (рисунок 6.2). В общем случае процесс оценки включает в себя три основные операции:

1. Преобразование (оператор $\mathbf{\Phi}_A$) с помощью опорного элемента Z_0 и активного воздействия $A_0(t)$ характеристики Z_x ДЭЦ (параметров иммитанса или элементов модели) в активную величину $A_x(Z_x, Z_0, t)$. Характеристика Z_x описывается параметрами x_i ($i = 1, 2, ..., n$); опорный элемент Z_0 — параметрами x_{0i}; воздействие $A_0(t)$ — параметрами a_{0j} ($j = 1, 2, ..., m$); реакция ДЭЦ на воздействие $A_x(Z_x, Z_0, t)$ — параметрами a_{x_j}.

2. Выделение (оператор $\mathbf{\Phi}_a$) не менее n параметров a_{x_j} реакции ДЭЦ, зависящих от параметров x_i.

3. Определение (оператор $\mathbf{\Phi}_x$) по параметрам a_{x_j} значений оцениваемых параметров x_i.

Данные операции присутствуют в том или ином виде во всех методах оценки параметров электрических цепей. Конкретный вид операторов $\mathbf{\Phi}_A$, $\mathbf{\Phi}_a$ и $\mathbf{\Phi}_x$ зависит от используемого метода оценки и может изменяться в процессе оценки параметров по априори заданному закону или в зависимости от полу-

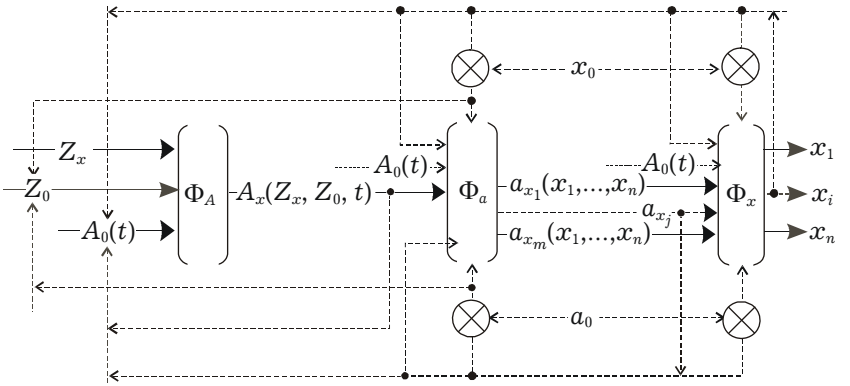


Рисунок 6.2 — Обобщенная модель оценки параметров ДЭЦ

ченных результатов. Операндами могут служить как результаты предыдущих, так и последующих операций. Воздействие $A_0(t)$ также может использоваться на последующих операциях для формирования компенсирующих или опорных сигналов (на рисунке 6.2 возможные, но необязательные варианты показаны пунктиром).

Например, для компенсационно-мостовых методов, использующих уравновешивание сигнала, несущего информацию об оцениваемых параметрах, характерно управление операциями $\mathbf{\Phi}_a$ и $\mathbf{\Phi}_x$ в зависимости от результатов сравнения параметров a_{x_j} реакции или результатов оценки параметров x_i с априори заданными (нулевыми или ненулевыми) опорными значениями a_0 или x_0.

В зависимости от формы, в которой представлены результаты операций $\mathbf{\Phi}_a$ и $\mathbf{\Phi}_x$, методы оценки можно подразделить на цифровые и аналоговые. Цифровые результаты представляют собой численные значения параметров a_{x_j} или результаты сравнения: “равно — неравно”, “больше — меньше”. Численные значения параметров a_{x_j} могут характеризовать реакцию $A_x(Z_x, Z_0, t)$ в определенные моменты времени или представлять собой отсчеты — мгновенные значения реакции, считанные через заданный шаг дискретизации. В первом случае параметры

a_{x_j} однозначно связаны с одним или несколькими (не всеми) параметрами элементов ДЭЦ, которые далее вычисляются путем алгебраической обработки значений a_{x_j} (оператор $\mathbf{\Phi}_x$). Во втором варианте характерные параметры реакции предварительно находят путем аппроксимации отсчетов мгновенных значений.

Результаты сравнения используют для управления уравновешиванием в компенсационно-мостовых методах. При этом подразумевается, что оператор $\mathbf{\Phi}_x$ описывает работу ветви моста с уравновешивающими элементами. В системах допускового контроля параметров цепей результат сравнения будет окончательным.

Аналоговые результаты преобразования $\mathbf{\Phi}_a$ и $\mathbf{\Phi}_x$ далее могут быть оценены любым стандартным электроизмерительным прибором или использованы для управления воздействием $A_0(t)$. Последнее характерно для автогенераторных методов и методов с компенсацией отдельных параметров ДЭЦ. При двухэлементной схеме ДЭЦ управление осуществляют сигналами a_{x_j}, а при более сложной — сигналами x_i.

Первичными и определяющими для всех методов оценки параметров являются характеристики процесса преобразования параметров ДЭЦ в активную величину (оператор $\mathbf{\Phi}_A$). Для получения информации о параметрах пассивной электрической цепи к ней должно быть приложено энергетическое изменяющееся во времени воздействие $A_0(t)$. Значения параметров a_{x_j} реакции $A_x(Z_x, Z_0, t)$ ДЭЦ на воздействие характеризуют параметры x_i.

Оперируя только с двумя полюсами ДЭЦ невозможно осуществить одновременно подачу энергетического воздействия и оценку параметров реакции. Для этого необходима организация специальной измерительной схемы ИС с числом доступных для внешнего подключения полюсов не менее трех. Третий полюс образуется путем соединения двухполюсника Z_x, характеристики которого оцениваются, с калиброванным элементом Z_0. С его помощью осуществляется съем реакции ДЭЦ на приложенное энергетическое воздействие. Соединение $Z_x - Z_0$

обязательно присутствует во всех типах ИС, дополняясь в ряде случаев управляемыми источниками энергии — усилителями.

В качестве источника энергетического воздействия $A_0(t)$ наиболее часто используют источники напряжения $u_0(t)$. В ИС, предназначенных для работы с источниками тока, Z_0 в явном виде может не присутствовать. Его роль выполняет внутреннее сопротивление источника тока.

Основной характеристикой ИС служит функция преобразования (ФП). Она может быть линейной относительно оцениваемых параметров иммитанса и нелинейной. Нелинейная функция преобразования имеет вид

$$\dot{\mathbf{K}}_{\text{ИС}} = \frac{\dot{\mathbf{Z}}_1}{\dot{\mathbf{Z}}_1 + \dot{\mathbf{Z}}_2}, \tag{6.1}$$

где $\dot{\mathbf{Z}}_1$ — иммитанс одного из элементов Z_x или Z_0, а $\dot{\mathbf{Z}}_2$ — второго.

Вследствие нелинейного характера функции преобразования на значение каждого из параметров реакции ИС на приложенное воздействие оказывают совместное влияние все параметры ДЭЦ

$$\mathbf{A}_x(\dot{\mathbf{Z}}_x, \dot{\mathbf{Z}}_0, t) = \mathbf{A}_0(t)\dot{\mathbf{K}}_{\text{ИС}}.$$

Нелинейная функция преобразования свойственна простейшей ИС в виде делителя напряжения, составленного из Z_x и Z_0 (рисунок 6.3). Погрешность такой ФП определяется только неточностью задания параметров элемента Z_0, в качестве которого используются точные резистор, конденсатор или их соединение. ИС с нелинейной ФП применяются в наиболее точных мостовых методах измерения. Известно их применение во временны́х методах оценки параметров, однако после появления интегральных операционных усилителей для временны́х измерений, как правило, применяются активные ИС с линейной ФП. В АСКД в качестве Z_0 чаще всего применяются прецизионные резисторы R_0.

Основная проблема при использовании ИС с нелинейной ФП заключается в разделении информации о параметрах

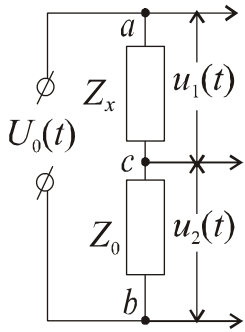


Рисунок 6.3 — ИС с нелинейной функцией преобразования

ДЭЦ. В компенсационно-мостовых методах эту проблему решают за счет уравновешивания выходного сигнала ИС сигналом, получаемым с помощью компенсирующей цепи с аналогичной функцией преобразования. В АСКД для разделения информации о параметрах иммитанса ДЭЦ используется фазочувствительное детектирование сигналов при определенных режимах работы ИС, обеспечивающих минимальную чувствительность к неконтролируемым составляющим. Достижения вычислительной техники позволили реализовать точностные возможности ИС с нелинейной ФП при цифровых совокупных измерениях, когда параметры ДЭЦ находят из решения системы уравнений, связывающих их с параметрами реакции ИС.

Линейная относительно импеданса (при $Z_1 = Z_x$; $Z_2 = Z_0$) или адмиттанса (при $Z_1 = Z_0$; $Z_2 = Z_x$) функция преобразования имеет вид

$$\dot{\mathbf{K}}_{\text{ИС}} = \frac{\dot{\mathbf{Z}}_1}{\dot{\mathbf{Z}}_2}[1 + \dot{\boldsymbol{\delta}}_K], \tag{6.2}$$

где $\dot{\boldsymbol{\delta}}_K$ — относительная комплексная погрешность функции преобразования (см. раздел 6.2).

Применение ИС с линейной ФП обеспечивает получение прямо пропорциональной зависимости параметров реакции ИС от соответствующих параметров ДЭЦ, что существенно уп-

рощает последующую обработку сигналов. Обеспечить линейность функции преобразования можно двумя способами:

во-первых, за счет количественных соотношений между значениями параметров элементов делителя $Z_x - Z_0$;

во-вторых, за счет введения в ИС усилителей, цепь обратной связи которых образована делителем напряжения $Z_x - Z_0$.

В первом варианте при выполнении условия $\dot{\mathbf{Z}}_2 >> \dot{\mathbf{Z}}_1$ выражение (6.1) переходит в выражение (6.2). Диапазон значений оцениваемых в такой ИС параметров ДЭЦ мал. Практическое применение они нашли только в стрелочных мультиметрах.

Измерительные схемы, построенные по второму варианту, называют активными. Активные ИС обладают рядом достоинств, обусловивших их бурное развитие на базе интегральных операционных усилителей (ОУ) в 70-е гг. XX в.:

– удобство сопряжения с последующими устройствами обработки активных сигналов вследствие низкого выходного сопротивления;

– простота задания определенных энергетических режимов (тока через контролируемую ДЭЦ или напряжения на ней);

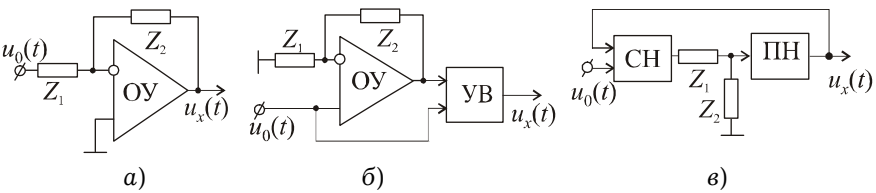
– возможность представления функция преобразования в виде суммы или произведения, каждый из членов которых функционально зависит только от одного из параметров ДЭЦ, что существенно упрощает последующее разделение информации о параметрах цепи структурными методами;

– возможность масштабирования и усиления сигналов реакции ДЭЦ на энергетическое воздействие.

Некоторые наиболее распространенные типы активных ИС приведены на рисунке 6.4.

В схемах, изображенных на рисунках 6.4, *а* и 6.4, *б*, соединение $Z_x - Z_0$ включено в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя, а в схеме на рисунке 6.4, *в* — в цепь положительной обратной связи сумматора напряжений СН с коэффициентом передачи, равным единице. Повторитель напряжения ПН в схеме на рисунке 6.4, *в* служит для исключения влияния входного сопротивления СН на результат. В схеме на рисунке 6.4, *б* для получения линейной функции преобразова-

ния дополнительно используется аналоговый узел вычитания УВ сигнала воздействия $\dot{\mathbf{U}}_0$ из выходного напряжения операционного усилителя $\dot{\mathbf{U}}_x = \dot{\mathbf{U}}_0\left(1+\frac{\dot{\mathbf{Z}}_2}{\dot{\mathbf{Z}}_1}\right)$. Схемы, изображенные на рисунках 6.4, *б* и 6.4, *в*, обеспечивают возможность непосредственного подключения этого соединения к общей шине.



а) *б*) *в*)

Рисунок 6.4 — Активные ИС с линейной функцией преобразования

Необходимо отметить, что погрешность ИС с линейной ФП принципиально больше, чем у ИС с нелинейной ФП. Это обусловлено введением дополнительного источника погрешности — операционного усилителя. Характеристики ОУ отличаются от идеальных вследствие дрейфа, смещения нуля, конечности значений входного и выходного сопротивлений, коэффициента усиления, ограничения полосы пропускания и т. д. В основном на погрешности преобразования сказываются комплексный коэффициента усиления ОУ на рабочей частоте ($\dot{\mathbf{K}}$) и его входное сопротивление $\dot{\mathbf{Z}}_{\text{вх}}$. Их влияние можно рассчитать. Например, для схемы с параллельной обратной связью по напряжению

$$\dot{\boldsymbol{\delta}}_K = -\frac{1}{\dot{\mathbf{K}}}\left(1+\frac{\dot{\mathbf{Z}}_2}{\dot{\mathbf{Z}}_1}+\frac{\dot{\mathbf{Z}}_2}{\dot{\mathbf{Z}}_{\text{вх}}}\right).$$

6.2 Методика анализа способов оценки параметров пассивных линейных двухполюсных цепей

Сопоставление и выбор способов оценки параметров пассивных линейных двухполюсных цепей, включающих в себя способы преобразования параметров контролируемой цепи в

активную величину и способы последующей обработки этих величин, удобно производить на основе анализа распределения погрешностей оценки зоны допустимых значений параметров по диапазону значений. Такой анализ позволяет рационально определить соотношения между погрешностями и границами поддиапазонов, внутри которых значения параметров калиброванного элемента Z_0 постоянно. В зависимости от конкретно решаемой задачи возможно применение разных вариантов определения погрешностей. Общей базой для определения погрешностей служит теория чувствительности.

Влияние оцениваемого параметра x_i на параметр a_{x_j} (a_{x_j} — амплитуда, начальная фаза, активная или реактивная составляющая, мгновенное или эффективное значение) сигнала реакции $A_x(Z_x, Z_0, t)$ ИС на приложенное воздействие $A_0(t)$ можно найти путем разложения зависимости $A_x(Z_x, Z_0, t)$ в ряд Тейлора. Абсолютная погрешность Δx_i оценки параметра x_i, вызванная абсолютными погрешностями Δa_{x_j} оценки параметров реакции, рассчитывается как

$$\Delta x_i = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^k x_i}{\partial a_{x_j}^k} \frac{\Delta a_{x_j}^k}{k!}. \qquad (6.3)$$

При оценке параметров, характеризующих рассеиваемую в ДЭЦ мощность и имеющих размерность сопротивления, проводимости, емкости или индуктивности (к таким параметрам относятся модуль z, активная $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}$ и реактивная $\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}$ составляющие иммитанса и R, L, C параметры элементов ДЭЦ), удобно вместо абсолютных значений использовать зависимость относительной погрешности $\delta x_i = \Delta x_i / x_i$ от относительной погрешности $\delta a_{x_j} = \Delta a_{x_j} / a_{x_j}$ оценки параметра интенсивности сигнала реакции:

$$\delta x_i = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^k x_i}{\partial a_{x_j}^k} \frac{a_{x_j}^k}{x_i k!} \delta a_{x_j}^k. \qquad (6.4)$$

При оценке параметра x_i по сдвигу фазы φ_j напряжения реакции $A_x(Z_x, Z_0, t)$ относительно сигнала воздействия $A_0(t)$ правильнее определять зависимость относительной погрешности

δx_i от абсолютной погрешности $\Delta\varphi_j$ определения сдвига фазы, так как мера фазы по своей физической сущности является относительной величиной (радиан — отношение охватываемой углом дуги окружности к радиусу):

$$\delta x_i = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^k x_i}{\partial \varphi_j^k} \frac{1}{x_i k!} \Delta\varphi_j^k. \tag{6.5}$$

По аналогичной причине результат оценки аргумента иммитанса φ_x целесообразно характеризовать абсолютной погрешностью:

$$\Delta\varphi_x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^k \varphi_x}{\partial a_{x_j}^k} \frac{a_{x_j}^k}{k!} \delta a_{x_j}^k, \tag{6.6}$$

$$\Delta\varphi_x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^k \varphi_x}{\partial \varphi_j^k} \frac{\Delta\varphi_j^k}{k!}. \tag{6.7}$$

При расчетах с достаточной для практики точностью в выражениях (6.3)–(6.7) можно ограничиться старшим, не равным нулю, членом разложения.

Таким образом, погрешность оценки параметра x_i может быть найдена по формулам (6.3)–(6.7) как произведение погрешности оценки параметра a_{x_j} реакции на соответствующий весовой коэффициент $K_{x_i a_{x_j}}$. Весовой коэффициент представляет собой величину, обратную чувствительности параметра напряжения реакции ИС к оцениваемому параметру иммитанса

$$S_{a_{x_j} x_i} = \frac{1}{\left| K_{x_i a_{x_j}} \right|}. \tag{6.8}$$

Результатом оценки значения иммитанса $\dot{\mathbf{Z}}_x$ служат два параметра (см. выражение 5.1), отражающие положение изображающей $\dot{\mathbf{Z}}_x$ точки на комплексной плоскости. Принято характеризовать этот результат скалярными погрешностями (абсолютными, относительными или приведенными) определения каждого из параметров. Выбор вида погрешности произволен и определяется различными нормативными документами, областью применения аппаратуры и другими факторами, вклю-

чая субъективные качества разработчика аппаратуры. Такая ситуация затрудняет сопоставление результатов, полученных приборами, оценивающими различные пары параметров.

Для сопоставления результатов необходима характеристика погрешностей, которая учитывала бы неопределенность положения точки, изображающей $\dot{\mathbf{Z}}_x$ на комплексной плоскости, и в то же время была сопоставима с погрешностью оценки отдельного параметра. Такая характеристика может быть получена при введении понятия комплексной погрешности.

Абсолютную комплексную погрешность $\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x$ оценки $\dot{\mathbf{Z}}_x$ можно представить в виде вектора разности между истинным значением $\dot{\mathbf{Z}}_x$ и значением $\tilde{\dot{\mathbf{Z}}}_x$, полученным в результате измерительного эксперимента

$$\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x = \dot{\mathbf{Z}}_x - \tilde{\dot{\mathbf{Z}}}_x. \tag{6.9}$$

При анализе измерительных схем под $\dot{\mathbf{Z}}_x$ следует понимать идеальную функцию преобразования, а под $\tilde{\dot{\mathbf{Z}}}_x$ — реальную.

Возможные пределы изменения положения конца вектора $\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x$ на комплексной плоскости могут быть изображены некоторой областью погрешности. При оценке $\dot{\mathbf{Z}}_x$ с погрешностью, не превышающей $\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x$, координаты точки, изображающей $\dot{\mathbf{Z}}_x$, неопределенны внутри этой области. Очевидно, что погрешность $\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x$ не изменяется при преобразовании системы координат. Следовательно, векторная погрешность служит однозначной характеристикой измерительного процесса и производящего его устройства.

Для получения относительной комплексной погрешности $\delta\dot{\mathbf{Z}}_x$ рассмотрим разложение в ряд Тейлора выражения для $\dot{\mathbf{Z}}_x$ в полярной системе координат:

$$\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x = \frac{\mathrm{d}\left(z_x e^{j\varphi_x}\right)}{\mathrm{d}\,z_x}\Delta z_x + \frac{\mathrm{d}\left(z_x e^{j\varphi_x}\right)}{\mathrm{d}\,\varphi_x}\Delta\varphi_x = \\ = \Delta z_x \cdot e^{j\varphi_x} + j\cdot\Delta\varphi_x \cdot z_x \cdot e^{j\varphi_x}. \tag{6.10}$$

После перехода к относительным величинам, получим

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}_x = \frac{\Delta\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x e^{j\varphi_x}} = \delta z_x + j\Delta\varphi_x. \qquad (6.11)$$

Таким образом, в полярной системе координат относительная комплексная погрешность может быть определена через две скалярные составляющие — относительную погрешность $\delta z_x = \frac{\Delta z_x}{z_x}$ оценки модуля и абсолютную погрешность $\Delta\varphi_x$ оценки аргумента. Этот результат подтверждает справедливость выражений (6.5) и (6.7).

В прямоугольной системе координат аналогично находим

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}_x = \frac{\frac{\mathrm{d}\left(\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + j\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x\right)}{\mathrm{d}\,\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x}\Delta\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + j\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x} + \frac{\frac{\mathrm{d}\left(\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + j\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x\right)}{\mathrm{d}\,\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + j\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x} =$$

$$= \frac{\Delta\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + j\cdot\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + j\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}. \qquad (6.12)$$

После перехода к модулям погрешностей оценки составляющих $\dot{\mathbf{Z}}_x$ получим, что для оценки результатов должны использовать абсолютные погрешности измерения составляющих, приведенные к значению модуля:

$$\delta_{\text{п}}\,\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x = \frac{\Delta\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x} \text{ и } \delta_{\text{п}}\,\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x = \frac{\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x}. \qquad (6.13)$$

В дальнейшем эти погрешности будем называть просто приведенными.

Для случая оценки реактивной составляющей и потерь, или добротности, имеем:

$$\delta\dot{\mathbf{Z}} = \frac{\frac{\mathrm{d}\left[\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x(\mathrm{tg}\phi_x \pm j)\right]}{\mathrm{d}\,\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x(\mathrm{tg}\phi_x \pm j)} + \frac{\frac{\mathrm{d}\left[\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x(\mathrm{tg}\phi_x \pm j)\right]}{\mathrm{d}\,\mathrm{tg}\phi_x}\Delta\,\mathrm{tg}\phi_x}{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x(\mathrm{tg}\phi_x \pm j)} =$$

$$= \frac{\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x} \pm \frac{\Delta\,\mathrm{tg}\phi_x}{\mathrm{tg}\phi_x \pm j}; \qquad (6.14)$$

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}=\frac{\dfrac{\mathrm{d}\left[\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x\left(\dfrac{1}{Q_x}\pm j\right)\right]}{\mathrm{dIm}\dot{\mathbf{Z}}_x}\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x\left(\dfrac{1}{Q_x}\pm j\right)}+\frac{\dfrac{\mathrm{d}\left[\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x\left(\dfrac{1}{Q_x}\pm j\right)\right]}{\mathrm{d}Q_x}\Delta Q_x}{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x\left(\dfrac{1}{Q_x}\pm j\right)}=$$

$$=\frac{\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}\pm\frac{\Delta Q_x}{Q_x(1\pm jQ_x)}. \qquad (6.15)$$

После перехода к модулям погрешностей получим, что для оценки результата можно рекомендовать:

– относительную погрешность $\delta\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x=\dfrac{\Delta\,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}$ при измерении реактивной составляющей $\dot{\mathbf{Z}}_x$;

– абсолютную погрешность $\Delta\mathrm{tg}\phi_x$ при измерении малых потерь ($\mathrm{tg}\phi_x << 1$);

– относительную погрешность $\delta\,\mathrm{tg}\,\phi_x=\dfrac{\Delta\,\mathrm{tg}\,\phi_x}{\mathrm{tg}\,\phi_x}$ при измерении больших потерь ($\mathrm{tg}\phi_x >> 1$);

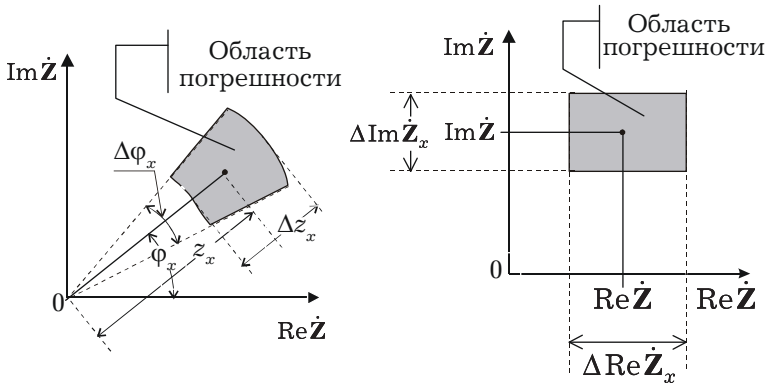
– относительную погрешность $\delta Q_x=\dfrac{\Delta Q_x}{Q_x}$ при измерении малых значений добротности;

– относительную погрешность, деленную на значение добротности $\dfrac{\delta Q_x}{Q_x}$, при измерении больших значений добротности.

Конфигурация области погрешности зависит от выбора системы координат. При оценке модуля и аргумента иммитанса она имеет форму части сектора с центральным углом $\Delta\varphi_x$ (рисунок 6.5, *а*), а при оценке активной и реактивной составляющих — прямоугольника со сторонами $\Delta\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x$ и $\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x$ (рисунок 6.5, *б*). Сопоставление погрешности оценки $\dot{\mathbf{Z}}_x$ в различных системах координат возможно путем сравнения площади S_Δ области погрешности. Эта площадь может служить совокупной скалярной характеристикой абсолютной комплексной погрешности.

Площадь области погрешности в системе координат z и φ равна:

$$S_\Delta(z,\varphi)=z_x\Delta z_x\Delta\varphi_x. \qquad (6.16)$$



а) *б)*

Рисунок 6.5 — Конфигурации области погрешности

В соответствии с выводами, полученными при анализе выражения (6.11), относительную оценку S_δ (z, φ) погрешности можно представить в виде:

$$S_\delta(z,\varphi) = \frac{z_x \cdot \Delta z_x \cdot \Delta\varphi_x}{z_x^{\ 2}} = \delta z_x \cdot \Delta\varphi_x. \qquad (6.17)$$

С целью получения численного значения погрешности, сопоставимого с погрешностью измерения одномерной величины, удобнее S_δ (z, φ) считать квадратом относительной комплексной погрешности

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}_{z,\varphi} = \sqrt{S_\delta(z,\varphi)}. \qquad (6.18)$$

Для обеспечения возможности сопоставления совокупной характеристики комплексной погрешности при различных сочетаниях пар оцениваемых величин во всех вариантах следует использовать отношение площади области погрешности к квадрату модуля. Это единственный вариант, при котором полученная относительная погрешности независима по отношению к преобразованию системы координат.

Например, при измерении в координатах Re$\dot{\mathbf{Z}}$ и Im$\dot{\mathbf{Z}}$ комплексную погрешность следует искать в виде:

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}_{\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x} = \sqrt{\frac{\Delta\,\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x}\cdot\frac{\Delta\,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x}}, \qquad (6.19)$$

что совпадает с выводами из выражения (6.13).

Выражения (6.18) и (6.19) позволяют сделать вывод о том, что при проектировании аппаратуры для оценки параметров иммитанса целесообразно стремиться к получению примерно равных численных значений погрешностей оценки отдельных параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$. Приведенные соображения целесообразно учитывать при сопоставлении метрологических характеристик аппаратуры подобного назначения.

Рассмотрим применение полученных выводов в некоторых частных случаях. При оценке иммитанса с небольшой реактивностью, например комплексного сопротивления резисторов $\dot{\mathbf{Z}}_x = \mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x + j\,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$, когда $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x >> \mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$ и модуль сопротивления $z_x \approx \mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$, общая относительная погрешность определяется относительной погрешностью оценки $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$:

$$\left|\delta\dot{\mathbf{Z}}_x\right| \approx \left|\frac{\Delta\,\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x} + j\frac{\Delta\,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}{\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}\right| = \left|\delta\,\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x + j\Delta\mathrm{tg}\,\varphi_x\right| \approx$$

$$\approx \left|\delta\,\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x + j\Delta\varphi_x\right| \approx \delta\,\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x,$$

а погрешность оценки реактивной составляющей — абсолютной погрешностью оценки аргумента сопротивления $\Delta\varphi_x$.

При оценке конденсаторов, характеризуемых емкостью C_x и тангенсом угла потерь $\mathrm{tg}\phi_x << 1$, при последовательной схеме замещения измеряемое сопротивление равно $\dot{\mathbf{Z}}_x = \mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x(\mathrm{tg}\,\phi_x + j)$. Для комплексной погрешности можно записать

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}_x = \frac{\Delta\,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x(\mathrm{tg}\,\phi_x + j)}{\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x\sqrt{\mathrm{tg}^2\,\phi_x + 1}} + \frac{\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x\Delta\mathrm{tg}\phi_x}{\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x\sqrt{\mathrm{tg}^2\phi_x + 1}} \approx$$

$$\approx \frac{\Delta C_x}{C_x}(\mathrm{tg}\,\phi_x + j) + \Delta\mathrm{tg}\,\phi_x.$$

Отсюда погрешность измерения емкости равна $\left|\frac{\Delta C_x}{C_x}\left(\mathrm{tg}\,\phi_x + j\right)\right| \approx \delta C_x$, а погрешность измерения угла потерь $\Delta \mathrm{tg}\phi_x \approx \Delta\phi_x$.

Таким образом, погрешности оценки параметров иммитанса рассчитываются по формулам (6.5)–(6.15) как произведение погрешности измерения параметра реакции ИС $A_x(Z_x, Z_0, t)$ на соответствующий весовой коэффициент.

При выборе способов обработки выходных сигналов ИС на первом этапе целесообразно ввести допущение, что погрешности оценки всех параметров реакции равны между собой. Это предположение при соответствующем выборе методов оценки параметров реакции близко к истине. Исходя из принятого допущения, для сопоставления и выбора методов достаточно проанализировать распределение значений весовых коэффициентов, рассчитанных по формулам (6.4)–(6.7), по диапазону оцениваемых значений $\dot{\mathbf{Z}}_x$. В дальнейшем при расчете погрешностей оценки $\dot{\mathbf{Z}}_x$ должны быть учтены реальные значения погрешностей оценки соответствующих параметров реакции.

6.3 Способы допускового контроля параметров линейных двухполюсных электрических цепей

Структура и метрологические характеристики АСКД в значительной степени определяются преобразователями контролируемых параметров в активные величины. В пассивной ИС с нелинейной ФП (рисунок 6.3) обычно в качестве калиброванного элемента используется резистор R_0, включенный вместо элемента сопротивлением Z_2, а в качестве выходного сигнала — падение напряжения на нем $u_2(t) = u_R(t)$.

Если напряжение воздействия $u_0(t)$ принять за опорное и отсчет начальных фаз напряжения $u_R(t)$ проводить относительно него, то выходное напряжение ИС описывается следующими выражениями

$$\dot{\mathbf{U}}_R = U_R e^{i\varphi_R} = \mathrm{Re}\dot{\mathbf{U}}_R + i\,\mathrm{Im}\dot{\mathbf{U}}_R =$$

$$= U_0 \frac{R_0}{R_0 + z_x e^{i\varphi_x}} = U_0 \frac{R_0}{R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x + i\,\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x},$$

где $\dot{\mathbf{U}}_R$ — напряжение $u_R(t)$ в комплексной форме амплитудой

$$U_R = U_0 \frac{R_0}{\sqrt{\left(R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x\right)^2 + \mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x^2}} =$$

$$= U_0 \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + 2R_0 z_x \cos\varphi_x + z_x^2}},$$

сдвигом фазы относительно напряжения $u_0(t)$

$$\varphi_R = -\mathrm{arctg}\left(\frac{\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x}\right) = -\mathrm{arctg}\left(\frac{z_x \sin\varphi_x}{R_0 + z_x \cos\varphi_x}\right),$$

активной и реактивной составляющими

$$\mathrm{Re}\dot{\mathbf{U}}_R = U_0 \frac{R_0\left(R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x\right)}{\left(R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x\right)^2 + \mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x^2} = U_0 \frac{R_0\left(R_0 + z_x \cos\varphi_x\right)}{R_0^2 + 2R_0 z_x \cos\varphi_x + z_x^2};$$

$$\mathrm{Im}\dot{\mathbf{U}}_R = U_0 \frac{-R_0\,\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{\left(R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x\right)^2 + \mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x^2} = U_0 \frac{-R_0 z_x \sin\varphi_x}{R_0^2 + 2R_0 z_x \cos\varphi_x + z_x^2}.$$

Приведенные зависимости позволяют сделать вывод о том, что при применении ИС с нелинейной ФП уравнение конформного отображения области допустимых значений параметров иммитанса в область допустимых значений параметров напряжений $u_R(t)$ имеет дробно-линейный вид.

На топографической диаграмме линии в плоскости параметров иммитанса (рисунок 6.6, *а*), соответствующие постоянным значениям параметров, преобразуются в плоскости напряжений (рисунок 6.6, *б*) в окружности:

– прямая $\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x = \mathrm{Const}$ — в проходящую через точку *b* окружность с центром O_R, расположенным на векторе *ba*, изображающем напряжение воздействия $u_0(t)$, и радиусом

$$r_R = \frac{R_0}{2(R_0 + \mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x)};$$

– прямая $\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x = \mathrm{Const}$ — в проходящую через точку b окружность с центром O_X, расположенным на перпендикуляре к ba, восстановленном в точке b, и радиусом

$$r_X = \frac{R_0}{2\,\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x};$$

– прямая $\varphi_x = \mathrm{Const}$ — в проходящую через точки b и a окружность с центром O_φ, расположенным на перпендикуляре к ba, восстановленном в его середине, и радиусом

$$r_\varphi = \frac{1}{2\sin\varphi_x};$$

– окружность $z_x = \mathrm{Const}$ с центром в точке 0 в окружность с центром O_z, расположенным на продолжении отрезка ba слева от точки a при $z_x > R_0$ и справа от точки a при $z_x < R_0$, и радиусом

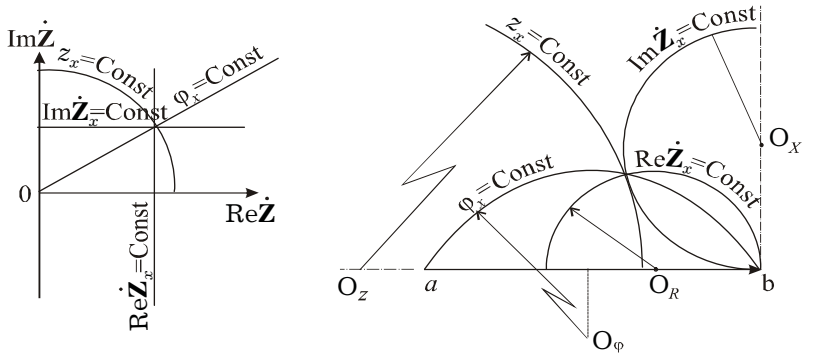
$$r_z = \frac{R_0 z_x}{z_x^2 - R_0^2}.$$

В выражениях для радиусов окружностей длина вектора ba принята за единицу.

Каждый из параметров напряжения $u_R(t)$ зависит от всех параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$. Это не является препятствием для совокупной оценки параметров иммитанса, которую можно провести по двум параметрам напряжения $u_R(t)$. Однако в случае допускового контроля границы области допустимых значений $\dot{\mathbf{Z}}_x$ и области, которая может быть ограничена предельно допустимыми значениями параметров $u_R(t)$, не совпадают.

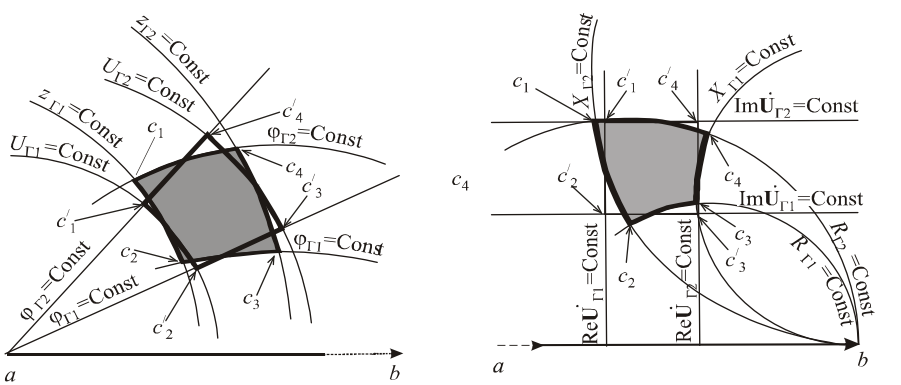
Так область допустимых значений модуля z_x и аргумента φ_x, в плоскости параметров иммитанса изображается частью сектора (см. рисунок 6.5, *а*). В плоскость напряжений эта область отображается криволинейным четырехугольником $c_1 c_2 c_3 c_4$ (рисунок 6.7, *а*), а область $c_1' c_2' c_3' c_4'$, которая может быть задана предельно допустимыми значениями амплитуды $U_{г1}$, $U_{г2}$ и начальной фазы $\varphi_{г1}$, $\varphi_{г2}$ напряжения $u_R(t)$, представляет собой часть сектора.

Область допустимых значений активной $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}$ и реактивной $\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}$ составляющих $\dot{\mathbf{Z}}$, ограниченная в плоскости парамет-



а) *б*)

Рисунок 6.6 — Линии, соответствующие постоянным значениям параметров



а) *б*)

Рисунок 6.7 — Конфигурации областей допустимых значений параметров и оцениваемых областей

ров иммитанса прямоугольником со сторонами Re$\dot{\mathbf{Z}}_{\text{г}1}$, Re$\dot{\mathbf{Z}}_{\text{г}2}$, Im$\dot{\mathbf{Z}}_{\text{г}1}$, Im$\dot{\mathbf{Z}}_{\text{г}2}$ (рисунок 6.5, *б*), также отображается в плоскость напряжений криволинейным четырехугольником $c_1 c_2 c_3 c_4$ (рисунок 6.7, *б*). Область $c'_1\, c'_2\, c'_3\, c'_4$, которая может быть задана предельно допустимыми значениями активной Re$\dot{\mathbf{U}}_{\text{г}1}$, Re$\dot{\mathbf{U}}_{\text{г}2}$ и реактивной Im$\dot{\mathbf{U}}_{\text{г}1}$, Im$\dot{\mathbf{U}}_{\text{г}2}$ составляющих напряжения $u_R(t)$, имеет форму прямоугольника. Несовпадающая часть областей

$c_1 c_2 c_3 c_4$ и $c_1' c_2' c_3' c_4'$ соответствует методической погрешности оценки, вызванной отклонением в пределах допуска неконтролируемого на данной операции параметра $\dot{\mathbf{Z}}_x$.

Приемлемая для внутрисхемного контроля точность обеспечивается, если ширина поля допуска на параметр $\dot{\mathbf{Z}}_x$ не менее чем на порядок превышает погрешность. Для этого необходимо, чтобы чувствительность параметра напряжения $u_R(t)$, по которому проводится оценка, к контролируемому на данной операции параметру $\dot{\mathbf{Z}}_x$ превышала не менее чем на порядок чувствительность к неконтролируемому параметру.

Необходимое соотношение чувствительностей обеспечивает выбор сопротивления R_0 в 10–100 меньше значения модуля сопротивления контролируемой цепи z_x. Расчеты показали, что оценка амплитуды и начальной фазы напряжения $u_R(t)$ наиболее приемлема для контроля модуля и аргумента иммитанса в универсальных АСКД. По этим параметрам напряжения возможен также контроль преобладающей активной или реактивной составляющей $\dot{\mathbf{Z}}_x$. Оценка активной и реактивной составляющих напряжения целесообразна для контроля модуля и аргумента $\dot{\mathbf{Z}}_x$ в АСКД с моделированием на каждой позиции контроля контролируемой ДЭЦ резистором, а также для контроля преобладающей составляющей $\dot{\mathbf{Z}}_x$.

Рассмотрим варианты построения измерительной подсистемы АСКД на основе нелинейной ИС, приведенной на рисунке 6.3. Структурная схема измерительной подсистемы АСКД, осуществляющей контроль параметров иммитанса по амплитуде и начальной фазе напряжения $u_R(t)$ с преобразованием их в длительность импульса, приведена на рисунке 6.8.

Источник ИВ вырабатывает синусоидальное напряжение воздействия $u_0(t)$ на ИС, составленную из контролируемой ДЭЦ с иммитансом $\dot{\mathbf{Z}}_x$ и калиброванного резистора R_0 из блока выбора предела измерения БВП. При контроле по начальной фазе φ_R напряжения $u_R(t)$ и $u_0(t)$ поступают на усилители-ограничители $УО_1$ и $УО_2$, где преобразуются в последовательности прямоугольных импульсов. Совпадающая во времени часть импульсов выделяется схемой совпадения

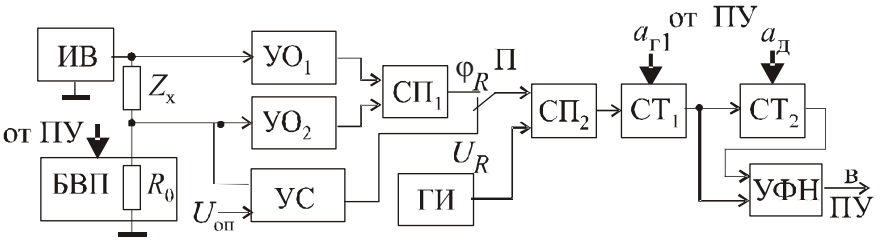


Рисунок 6.8 — Структура измерительной подсистемы АСКД с преобразованием параметров в длительности импульсов

СП$_1$. На время совпадения открывается схема СП$_2$, и импульсы генератора ГИ опорной частоты проходят на счетчик СТ$_1$, а после его заполнения на счетчик СТ$_2$. Предварительно по программе контроля в счетчик СТ$_1$ заносится код $a_{г1}$, соответствующий минимально допустимому значению φ_R, а в СТ$_2$ — код $a_д$, соответствующий допуску на φ_R. Если значение φ_R находится в допуске, в УФН должен поступить сигнал переполнения счетчика СТ$_1$ и не поступить аналогичный сигнал счетчика СТ$_2$. В противном случае в УФН или приходят два сигнала переполнения, или ни один из них. При контроле по амплитуде U_R в узле сравнения УС напряжение $u_R(t)$ сравнивается с опорным уровнем $U_{оп}$. Вырабатывается импульс, длительность которого равна времени превышения напряжением $u_R(t)$ опорного уровня:

$$t_x = \frac{\pi}{\omega_0} - \frac{2}{\omega_0}\arcsin\frac{U_{оп}}{U_R}.$$

Оценка длительности производится так же, как и при контроле по начальной фазе.

Универсальная схема с преобразованием амплитуды, начальной фазы и ортогональных составляющих $u_R(t)$ в напряжение постоянного тока приведена рисунке 6.9. Положения переключателей П$_1$, П$_2$ и П$_3$ в зависимости от параметров напряжения $u_R(t)$, по которым проводят контроль, показаны в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Положения переключателей в схеме

Параметр \ Перекл.	$П_1$	$П_2$	$П_3$
U_R	2	—	1
φ_R	1	—	1
$\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{U}}_R$	2	2	2
$\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{U}}_R$	2	1	2

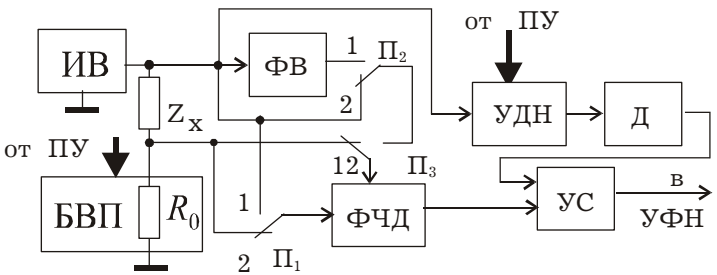


Рисунок 6.9 — Структура измерительной подсистемы АСКД с преобразованием параметров в напряжение постоянного тока

Преобразование параметров в унифицированный сигнал постоянного тока производится с помощью фазочувствительного детектора ФЧД. При контроле по амплитуде напряжения U_R ФЧД работает в режиме синхронного детектирования. На его сигнальный и управляющий входы подается напряжение $u_R(t)$. При контроле по начальной фазе φ_R на сигнальный вход подается напряжение $u_0(t)$, и выходное напряжение ФЧД $U_{ФЧД} = U_0\cos\varphi_R$ зависит только от φ_R. При контроле по ортогональным составляющим $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{U}}_R$ и $\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{U}}_R$ на сигнальный вход ФЧД подается напряжение $u_R(t)$, а на управляющий — напряжение $u_0(t)$ непосредственно или со сдвигом на $\pi/2$ через фазовращатель ФВ. Выходное напряжение ФЧД сравнивается с уставкой, которая формируется из $u_0(t)$ с помощью управляемого делителя напряжения УДН и детектора Д. С целью уменьшения инстру-

ментальных погрешностей в качестве детектора может быть использован фазочувствительный выпрямитель в режиме синхронного детектирования.

Уменьшение методических погрешностей возможно в случае оценки области допустимых значений по составляющим выходного напряжения ИС, выбранным из условия минимума чувствительности к неконтролируемым на данной операции параметрам $\dot{\mathbf{Z}}_x$. При этом область $c_1' c_2' c_3' c_4'$ ограничивается касательными к границам зоны $c_1 c_2 c_3 c_4$ (рисунок 6.10). Контролируемые составляющие напряжения $u_R(t)$ изображаются на топографической диаграмме перпендикулярами к касательным границы области допустимых значений $\dot{\mathbf{Z}}_x$.

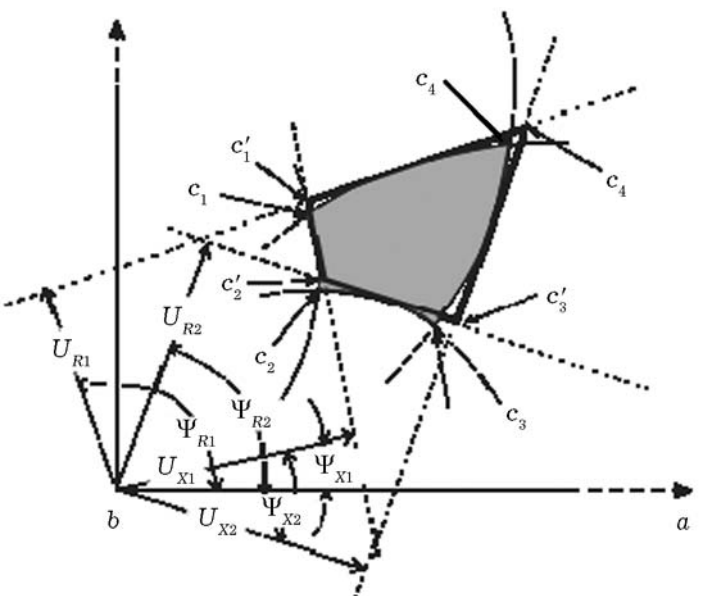


Рисунок 6.10 — Ограничение области допустимых значений параметров касательными

Реализация метода возможна с помощью схемы (рисунок 6.11) с управляемым по программе контроля фазовращателем УФВ в цепи опорного сигнала ФЧД. Выражения для расчета

углов сдвига фаз Ψ_i контролируемых составляющих напряжения $u_R(t)$ приведены в таблице 6.2, где $n_z = \frac{z_x}{R_0}$, $n_R = \frac{\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x}{R_0}$.

Таблица 6.2

Формулы для расчета углов сдвига фазы в ФЧД

Параметры	$\mathrm{arctg}\psi_l$
z_x	$\frac{(n_z^2-1)\sin\varphi_x}{(n_z^2+1)\cos\varphi_x+2n_z}$
φ_x	$\frac{(n_z^2+1)\cos\varphi_x+2n_z}{(1-n_z^2)\sin\varphi_x}$
$\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$	$\frac{2\mathrm{tg}\varphi_x(1+n_R)}{(1+n_R)^2-2\mathrm{tg}\varphi_x^2}$
$\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$	$\frac{2\mathrm{tg}\varphi_x^2-(1+n_R)^2}{2\mathrm{tg}\varphi_x(1+n_R)}$

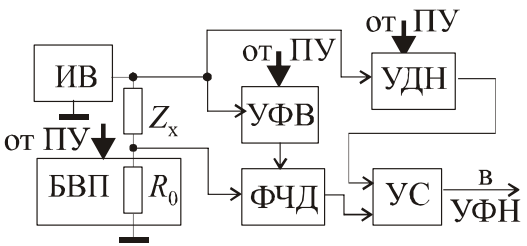


Рисунок 6.11 — Структура измерительной подсистемы ЛСКД с ограничением зоны допустимых значений параметров касательными

Исключение методических погрешностей возможно при формировании в схеме (рисунок 6.12) потенциальный точек, изображения которых на топографической диаграмме расположены в центрах окружностей, ограничивающих область $c_1c_2c_3c_4$ (см. рисунки 6.6 и 6.7).

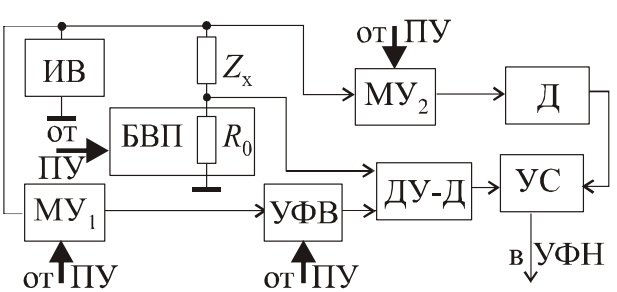


Рисунок 6.12 — Структура измерительной подсистемы АСКД без методической погрешности

Для этого напряжение $u_0(t)$ сдвигается по фазе управляемым программой контроля фазовращателем УФВ так, чтобы изображающий его вектор на топографической диаграмме проходил через центр соответствующей граничной окружности. Масштабирующим усилителем $МУ_1$ устанавливают амплитуду этого сигнала $u_{ФВ}(t)$ такой, чтобы конец изображающего напряжение вектора совпадал с центром граничной окружности. Дифференциальный усилитель-детектор ДУ-Д преобразует амплитуду разности напряжений $u_{ФВ}(t) - u_R(t)$ в сигнал постоянного тока. В УС этот сигнал сравнивается с напряжением, пропорциональным радиусу граничной окружности, сформированным по программе масштабирующим усилителем $МУ_2$. Формулы для расчета углов сдвига фаз в УФВ и равных между собой коэффициентов передачи $МУ_1$ и $МУ_2$ приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3

Формулы для расчета программируемых параметров в схеме рисунка 6.12

Параметр	$\varphi_{ФВ}$	$\mathbf{K}_{МУ}$
z_x	0 при $n_z < 1$; $-\pi$ при $n_z > 1$	$\dfrac{n_z}{n_z^2 - 1}$
φ_x	$\dfrac{\pi}{2} - \varphi_x$	$\dfrac{1}{2\sin\varphi_x}$
$\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x$	0	$\dfrac{1}{2(n_R + 1)}$
$\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x$	$-\pi/2$ для $\varphi_x < 0$; $\pi/2$ для $\varphi_x > 0$	$\dfrac{1}{2n_x}$

Упрощение реализации метода за счет исключения достаточно сложного управляемого фазовращателя возможно при формировании напряжений, изображаемых линиями, на которых расположены центры граничных окружностей (рисунок 6.13). Формулы для расчета коэффициентов передачи масштабирующих усилителей $МУ_1$ и $МУ_2$ во всех режимах, кроме

контроля аргумента, остаются неизменными. При контроле аргумента коэффициент передачи $МУ_1$ равен $0{,}5\mathrm{ctg}\varphi_x$.

В схеме на рисунке 6.13 с помощью операционного ОУ и масштабирующего $МУ_2$ усилителей формируется потенциал общей шины узла сравнения УС — точки d — соответствующий центру граничной окружности. УС сравнивает амплитуду напряжения, пропорциональную радиусу граничной окружности ($u_{df}(t)$ при контроле модулей или $u_{db}(t)$ в остальных режимах), с амплитудой напряжения $u_{dc}(t)$, пропорциональной фактическому значению радиуса. Резистивный делитель напряжения R_3 – R_4 предназначен для формирования потенциала общей шины ОУ и $МУ_2$ — точки e, изображение которой расположено в середине вектора ab. Положения переключателей при контроле различных параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ приведены в таблице 6.4.

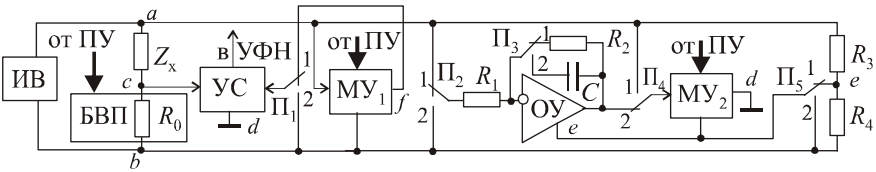


Рисунок 6.13 — Упрощение реализации измерительной подсистемы АСКД без методической погрешности

Таблица 6.4

Положения переключателей в схеме на рисунке 6.13

Перекл. / Параметр	$П_1$	$П_2$	$П_3$	$П_4$	$П_5$
z_x	1	1 при $n_z > 1$; 2 при $n_z < 1$	1	2	1
φ_x	2	1 при $\varphi_x > 0$; 2 при $\varphi_x < 0$	2	2	1
$\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x$	2	—	—	1	2
$\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x$	2	1	2	2	2

При контроле модуля для $n_z > 1$ переключатель $П_2$ устанавливается в положение 1. ОУ инвертирует и усиливает напряже-

ние $u_{ea}(t)$, а МУ$_2$ его масштабирует так, чтобы изображение точки d было в центре граничной окружности слева от точки b. МУ$_1$ масштабирует $u_{ab}(t)$ так, чтобы изображение точки f на линии ab находилось на граничной окружности. При $n_z < 1$ переключатель П$_2$ устанавливают в положение 2. Изображение точки d оказывается в центре граничной окружности справа от точки a.

При контроле аргументов $\varphi_x > 0$ ОУ сдвигает по фазе на угол $-\pi/2$ напряжение $u_{ea}(t)$, формируя линию центров граничных окружностей, а при $\varphi_x < 0$ — напряжение $u_{eb}(t)$. При контроле $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}$ потенциал точки d формируется усилителем МУ$_2$ из напряжения $u_{ab}(t)$. При контроле $\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}$ емкостного характера $\varphi_x > 0$ ОУ сдвигает по фазе напряжение $u_{ab}(t)$ на угол $\pi/2$, формируя линию центров граничных окружностей, а при $\varphi_x < 0$ выходное напряжение ОУ в МУ$_2$ кроме масштабирования дополнительно инвертируют.

Обработка выходных сигналов ИС с линейной ФП в простейшем случае существенно не отличается от применяемой в схемах на рисунках 6.8 и 6.9. Дополнительное использование компенсационных методов преобразования позволяет существенно расширить диапазон соотношений значений параметров контролируемых цепей. Компенсация возможна как непосредственно в ИС, так и после нее.

Первый вариант рассмотрим на примере схемы (рисунок 6.14) с ИС на операционном усилителе, цепь отрицательной обратной связи которого образована последовательным соединением $Z_x - R_0$.

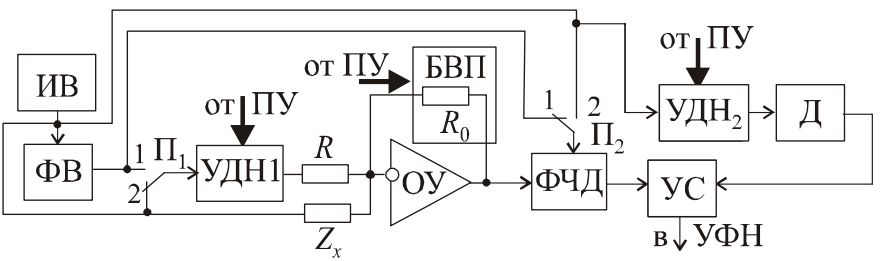


Рисунок 6.14 — Структура измерительной подсистемы АСКД с компенсацией одного из параметров на входе ИС

На инвертирующий вход ОУ через дополнительный резистор R подается компенсирующее напряжение $u_{УДН}(t)$, амплитуда которого с помощью $УДН_1$ задается по программе пропорционально номинальному значению одного из параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$. При компенсации активной составляющей $u_{УДН}(t)$ формируется непосредственно из напряжения воздействия, а при компенсации реактивной составляющей — после сдвига этого напряжения в ФВ по фазе на $\pi/2$. ФЧД преобразует в сигнал постоянного тока оставшуюся недокомпенсированную часть, пропорциональную разности между фактическим и номинальным значениями параметра, или вторую составляющую. Напряжение уставки формируется с помощью $УДН_2$ и детектора Д из напряжения тестового воздействия. Имеет смысл компенсировать бóльшую по значению составляющую. Предельные значения $\mathrm{tg}\varphi_x$ контролируемой цепи ограничены погрешностью ИС, которая определяется коэффициентом усиления ОУ и возрастает по мере роста компенсируемой составляющей из-за уменьшения глубины обратной связи.

Во втором варианте (рисунок 6.15) компенсацию осуществляют в сумматоре напряжений СН. Диапазон значений $\mathrm{tg}\varphi_x$ ограничен динамическим диапазоном ОУ и минимально допустимым с точки зрения инструментальной погрешности уровнем сигналов.

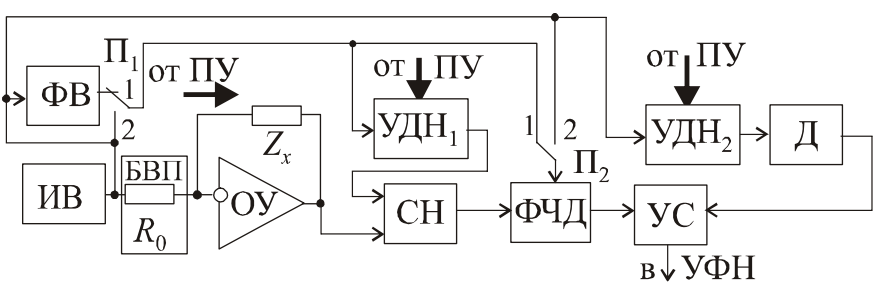


Рисунок 6.15 — Структура измерительной подсистемы АСКД с компенсацией одного из параметров на выходе ИС

Инструментальные погрешности значительно уменьшаются в случае задания компенсирующего сигнала пропор-

ционально предельно допустимому значению измеряемой составляющей. Вместо ФЧД можно использовать высокочувствительный фазовый нуль-индикатор ФНИ, к которому не предъявляется требований линейности характеристики. Выходной сигнал ФНИ характеризует знак разности фаз между опорным сигналом $\dot{\mathbf{U}}_{оп}$, ортогональным компенсируемой составляющей, и сигналом, полученным после компенсации, т. е. разности $\dot{\mathbf{U}}_x - \dot{\mathbf{U}}_{УДН}$ между выходными сигналами ОУ и УДН. Он служит результатом контроля и может быть подан непосредственно в УФН.

Например, на векторной диаграмме (рисунок 6.16) показан случай компенсации активной составляющей для $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}} < \mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_г$.

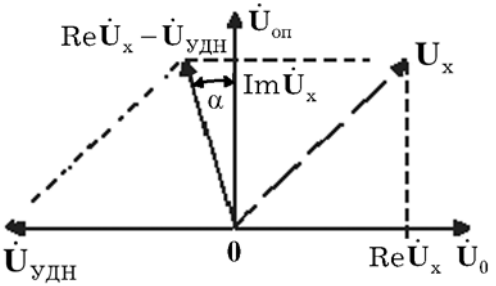


Рисунок 6.16 — Векторная диаграмма, иллюстрирующая сравнение значения компенсируемого параметра с уставкой

6.4 Измерение параметров линейных электрических цепей системами с цифровыми процессорами

Современные АСКД используют цифровые процессоры для хранения программы диагностирования, управления процессом диагностирования и документирования результатов. Как правило, вычислительные мощности процессора используются далеко не полностью. Резерв мощности можно использовать для замены достаточно дорогостоящих в разработке и производстве аналоговых преобразователей программными цифровыми методами обработки информации.

Экономически и технически целесообразно при этом использовать минимальное число внешних по отношению к процессору элементов. Для ввода сигналов в процессор и формирования энергетического воздействия на ИС удобно использовать серийно выпускаемые модули ввода-вывода аналоговых сигналов, в состав которых входят АЦП и ЦАП. Дополнительно требуется использование одного на предел измерения калиброванного резистора R_0. Резистор совместно с $\dot{\mathbf{Z}}_x$ образуют ИС (см. рисунок 6.3) с нелинейной ФП.

Напряжение воздействия $u_0(t)$ (рис. 6.17) на ИС формируется с помощью ЦАП. АЦП оцифровывает мгновенные значения выходных сигналов ИС и передает их в процессор. Параметры сигналов (амплитуда, эффективное значение, начальная фаза, активная и реактивная составляющие) рассчитываются по программе. Определение параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ осуществляется путем решения системы, составленной из двух уравнений, связывающих параметры иммитанса и напряжений $u_R(t)$ и $u_Z(t)$. Таким образом, процесс контроля проходит в четыре этапа: прямое измерение мгновенных значений выходных сигналов ИС, косвенное измерение параметров сигналов, совокупное измерение иммитанса и допусковая оценка его параметров.

Наиболее известными методами определения параметров иммитанса по параметрам напряжений, действующих в ИС, являются методы “трех вольтметров” и “двух фазометров”. Метод “трех вольтметров” основан на расчете параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ по параметрам интенсивности напряжений $u_0(t)$, $u_R(t)$ и $u_Z(t)$. Выбор конкретного параметра (амплитуды, средневыпрямленного или эффективного значения) при синусоидальном напряжении $u_0(t)$ не влияет в явном виде на результат измерения, так как во все формулы для расчета $\dot{\mathbf{Z}}_x$ входит отношение напряжений. Параметр выбирают исходя из удобства программирования, необходимой помехоустойчивости и т. п. В дальнейшем для определенности будет говориться об амплитудных значениях. Метод “двух фазометров” основан на определении параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ по начальным фазам напряжений $u_R(t)$ и $u_Z(t)$. Формулы для расчета параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ ме-

тодами “трех вольтметров” и “двух фазометров” приведены в таблице 6.5.

Методы трех вольтметров и двух фазометров хорошо дополняют друг друга. Для измерения модуля иммитанса предпочтительнее использование метода трех вольтметров, а для измерения аргумента — двух фазометров. При этом диапазон измерения, в пределах которого значение R_0 постоянно, ограничен только диапазоном АЦП и влиянием помех. В принципе, возможно использование одного калиброванного резистора для измерения z_x в диапазоне от единиц Ом до МОм, естественно, если уровень шумов и помех позволяет измерять меньшее из напряжений с требуемой точностью.

Таблица 6.5

Формулы для расчета параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ методами “трех вольтметров” и “двух фазометров”

Расчетные величины	**Измеряемые величины**	
	U_R, U_Z	φ_R, φ_Z
z_x	$R_0 \dfrac{U_z}{U_R}$	$R_0 \dfrac{\sin\varphi_R}{\sin\varphi_z}$
φ_x	$\arccos\left(\dfrac{U_0^2 - U_R^2 - U_z^2}{2U_R U_z}\right)$	$\varphi_R - \varphi_Z$
$\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$	$R_0 \dfrac{U_0^2 - U_R^2 - U_z^2}{2U_R^2}$	$-R_0 \dfrac{\mathrm{tg}\,\varphi_R\left(1+\mathrm{tg}\,\varphi_R\,\mathrm{tg}\,\varphi_z\right)}{\mathrm{tg}\,\varphi_z\left(1+\mathrm{tg}\,\varphi_R{}^2\right)}$
$\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{Z}}_x$	$\dfrac{R_0 U_z}{U_R}\sqrt{1-\dfrac{(U_0^2 - U_R^2 - U_z^2)^2}{4U_R^2 U_z^2}}$	$R_0 \dfrac{\mathrm{tg}\,\varphi_R\left(\mathrm{tg}\,\varphi_R - \mathrm{tg}\,\varphi_z\right)}{\mathrm{tg}\,\varphi_z\,(1+\mathrm{tg}\,\varphi_R{}^2)}$

Для измерения активной составляющей иммитанса при $\varphi_x > 60^\circ$ лучше подходит метод трех вольтметров, а для измерения реактивной составляющей при $\varphi_x < 30^\circ$ — двух фазометров. Достоинством методов трех вольтметров и двух фазометров является независимость результатов измерения от входного сопротивления АЦП.

При реализации измерения необходимо учитывать особенности построения модулей ввода-вывода в ЭВМ аналоговых сигналов. Как правило, ЦАП и АЦП, входящие в состав модулей, подключены к общей шине. Подача напряжения воздействия на ИС и съем измеряемых напряжений производят относительно общего провода (рисунок 6.17). Переход от измерения напряжения $u_R(t)$ к измерению напряжения $u_Z(t)$ возможен при изменении точки подключения к ИС общей шины модуля ввода-вывода. В положении 1 переключателя П измеряется $u_R(t)$, а в положении 2 – $u_Z(t)$.

АЦП производит прямое измерение и ввод в процессор мгновенных значений напряжений. По мгновенным значениям процессор рассчитывает амплитуды и начальные фазы напряжений.

Для измерения начальных фаз напряжений требуется привязка по времени результатов аналого-цифрового преобразования к напряжению $u_0(t)$. Синхронизация АЦП с ЦАП в ряде случаев, например когда ЦАП работает от ЭВМ, а АЦП управляется от собственного таймера, может быть затруднительна.

Решение проблемы возможно за счет применения модуля ввода-вывода с двумя синхронно работающими АЦП (рисунок 6.18). АЦП$_1$ измеряет напряжение $u_0(t)$, а АЦП$_2$ — $u_R(t)$ или $u_Z(t)$ в зависимости от положения переключателя П.

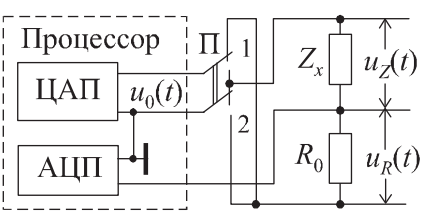


Рисунок 6.17 — Схема подключения АЦП к ИС

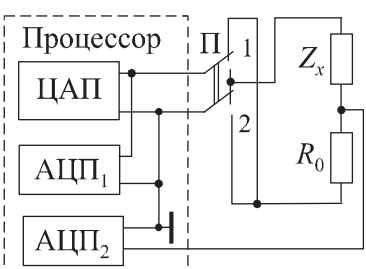


Рисунок 6.18 — Схема подключения сдвоенного АЦП к ИС

Необходимость коммутаций при измерении рассмотренными методами существенно усложняет процесс измерения,

особенно в автоматических системах. Кроме того, требуется дважды дожидаться окончания переходных процессов в ИС, продолжительность которых зависит от параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$.

Избежать указанных недостатков можно при расчете параметров иммитанса по любой паре параметров одного из напряжений $u_R(t)$ или $u_Z(t)$. Предпочтительнее с точки зрения уменьшения погрешности измерения, вызванной влиянием входного сопротивления АЦП, проводить оценку по параметрам напряжения $u_R(t)$, так как значение сопротивления R_0 может быть выбрано существенно меньше модуля сопротивления контролируемой цепи z_x.

Далее в разделах 6.5 и 6.6 будет показано, что для расчета параметров напряжений целесообразно использовать аппроксимацию отсчетов мгновенных значений сигнала экспоненциальными функциями. При этом в первую очередь определяются амплитуда U_R и начальная фаза φ_R напряжения. Формулы для расчета параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ по амплитуде и начальной фазе напряжения $u_R(t)$ приведены в таблице 6.6. Использование для расчетов значений активной и реактивной составляющих напряжения практически не дает каких-либо дополнительных преимуществ.

Таблица 6.6

Формулы для расчета параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ по амплитуде и начальной фазе напряжения $u_R(t)$

Параметры $\dot{\mathbf{Z}}_x$	Расчетные формулы
z_x	$\dfrac{R_0\sqrt{U_0^2+U_R^2-2U_RU_0\cos\varphi_R}}{U_R}$
φ_x	$\operatorname{arctg}\dfrac{U_0\sin\varphi_R}{U_0\cos\varphi_R-U_R}$
$\operatorname{Re}\dot{\mathbf{Z}}_R$	$\dfrac{R_0(U_0\cos\varphi_R-U_R)}{U_R}$
$\operatorname{Im}\dot{\mathbf{Z}}_R$	$\dfrac{R_0U_0\sin\varphi_R}{U_R}$

Приведенные в таблице 6.6 выражения позволяют рассчитать погрешности измерения по методике, изложенной в разделе 6.2. Выражения для весовых коэффициентов при погрешностях косвенного измерения параметров напряжений приведены в таблице 6.7. Погрешности, связанные с калиброванным резистором R_0, не рассмотрены ввиду малости.

Значения весовых коэффициентов, отражающих влияние погрешности измерения параметров напряжений на погрешность определения параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$, уменьшаются при увеличении n_z (n_R). Однако в этом случае уменьшается амплитуда напряжения $u_R(t)$, что приводит к росту погрешностей δU_R и $\Delta\varphi_R$. Компромисс обеспечивается при выборе отношения z_x/R_0 в диапазоне $1< n_z<10$. Значения весовых коэффициентов для расчета приведенных погрешностей измерения $\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x$ и $\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x$ (последние две строки таблицы 6.6) несколько меньше, чем расчета для относительных погрешностей. Особенно это заметно при оценке погрешности измерения меньшей из составляющих $\dot{\mathbf{Z}}_x$, что согласуется с выводами раздела 6.2.

Сумма весовых коэффициентов при погрешностях измерений δU_0 и δU_R по каждой строке равна нулю (см. табл. 6.7). Следовательно, систематическая составляющая погрешности измерения напряжений, например погрешность, вызванная неточностью опорного напряжения АЦП и ЦАП, не влияет на результат определения параметров иммитанса. При расчетах следует учитывать только случайную составляющую погрешности измерений. Систематические погрешности измерения фаз напряжений не компенсируются. Их можно учесть программно. Отсюда следует, что для полной оценки погрешности определения параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ можно использовать среднеквадратичное суммирование отдельных составляющих погрешности в каждой точке диапазона контролируемых значений. Составляющие погрешности измерения параметра $\dot{\mathbf{Z}}_x$ находят как произведение погрешности косвенного измерения параметра напряжения, указанного в первой строке таблицы, на весовой коэффициент, записанный в данном столбце в строке соответствующего параметра $\dot{\mathbf{Z}}_x$.

Таблица 6.7

Весовые коэффициенты при погрешностях измерения параметров напряжений

Погрешность	Весовые коэффициенты		
	δU_0	δU_R	$\Delta\varphi_R$
δz_x	$\frac{\cos\varphi_x}{n_z}+1$	$-\left(\frac{\cos\varphi_x}{n_z}+1\right)$	$\frac{\sin\varphi_x}{n_z}$
$\Delta\varphi$	$-\frac{\sin\varphi_x}{n_z}$	$\frac{\sin\varphi_x}{n_z}$	$\frac{\cos\varphi_x}{n_z}+1$
$\delta\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x$	$\frac{1}{n_R}+1$	$-\left(\frac{1}{n_R}+1\right)$	$-\mathrm{tg}\varphi_x$
$\delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x$	1	-1	$\frac{n_x+\mathrm{tg}\varphi_x}{n_z\,\mathrm{tg}\varphi_x}$
$\frac{\Delta\mathrm{Re}\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x}$	$\left(\cos\varphi_x+\frac{1}{n_z}\right)$	$-\left(\cos\varphi_x+\frac{1}{n_z}\right)$	$-\sin\varphi_x$
$\frac{\Delta\mathrm{Im}\dot{\mathbf{Z}}_x}{z_x}$	$\sin\varphi_x$	$-\sin\varphi_x$	$\left(\cos\varphi_x+\frac{1}{n_z}\right)$

Для полной оценки погрешности измерения параметров $\dot{\mathbf{Z}}_x$ нужен анализ погрешностей косвенного измерения параметров напряжений. Она зависит как от погрешностей прямых измерений мгновенных значений сигналов, так и от выбранного способа математической обработки отсчетов.

6.5 Способы программного определения информационных параметров сигналов

Определение всех параметров гармонического сигнала при известной частоте, в принципе, возможно по двум отсчетам. Дискретные значения гармонического напряжения $u(t)$ в моменты цифрового измерения можно представить в виде

$$u(i)=U\sin\left(2\pi n\frac{i}{N}+\varphi_0\right), \qquad (6.20)$$

где $n = \frac{T_и}{T} = T_и f$ — отношение общего времени измерения $T_и$ к периоду T напряжения $u(t)$ частотой f;

$\frac{T_и}{N} = \Delta t$ — шаг дискретизации;

N — общее количество измерений;

$i = 0, 1, ..., N - 1$ — порядковый номер измерения;

φ_0 — фаза $u(t)$ в момент первого измерения при $i = 0$.

Вследствие влияния шумов значения отсчетов $\tilde{u}(i)$ отличаются от мгновенных значений напряжений, описываемых выражением (6.20). При использовании d-разрядного АЦП с двоичным шагом квантования значения отсчетов можно представить в виде

$$\tilde{u}(i) = \frac{\text{round}\left\{2^d\left[u(i) + e(i)\right]\right\}}{2^d},$$

где $e(i)$ — значения аддитивного белого шума с дисперсией σ_e в моменты отсчетов;

round$\{x\}$ — ближайшее целое x.

С помощью функции round$\{x\}$ учитываются погрешность и шумы квантования АЦП при условии, что значение амплитуды измеряемого напряжения $u(i)$ не выходит за пределы рабочего диапазона АЦП. В качестве иллюстрации ниже приведены взятые за время одного периода девять значений ($N = 9$, $n = 1$, $\varphi_0 = 0{,}2\pi$, $U = 0{,}1$): напряжения $u(i)$; отсчетов $\tilde{u}(i)$ этого напряжения 10-разрядным АЦП в отсутствии шума; напряжения $u_1(i) = u(i) + e(i)$ с нормальным аддитивным шумом при отношении сигнал-шум $\frac{U}{\sigma_e} = 100$; результатов аналого-цифрового преобразования этого напряжения $\tilde{u}_1(i)$, а на рисунке 6.19 для ста отсчетов показаны абсолютные погрешности, вызванные влиянием квантования и белого шума и определенные, соответственно, как $u_1(i) - \tilde{u}_1(i)$ и $u(i) - u_1(i)$.

По двум отсчетам $u(0)$ и $u(1)$ с заданным сдвигом фаз $\varphi = 2\pi n$ между ними параметры напряжения находят их решения системы уравнений

$$\begin{cases} u(0) = U \sin\varphi(0); \\ u(1) = U \sin\left[\varphi(0) + \varphi\right]. \end{cases}$$

$$u(i) = (0{,}0588 \quad 0{,}0970 \quad 0{,}0899 \quad 0{,}0407 \quad -0{,}0276 \quad -0{,}0829 \quad -0{,}0995 \quad -0{,}0695 \quad -6{,}9756\times10^{-3})$$
$$\tilde{u}(i) = (0{,}0586 \quad 0{,}0967 \quad 0{,}0898 \quad 0{,}0410 \quad -0{,}0273 \quad -0{,}0830 \quad -0{,}0996 \quad -0{,}0693 \quad -0{,}0068)$$
$$u_1(i) = (0{,}0583 \quad 0{,}0964 \quad 0{,}0894 \quad 0{,}0397 \quad -0{,}0292 \quad -0{,}0829 \quad -0{,}0996 \quad -0{,}0689 \quad -0{,}0048)$$
$$\tilde{u}_1(i) = (0{,}0586 \quad 0{,}0967 \quad 0{,}0898 \quad 0{,}0400 \quad -0{,}0293 \quad -0{,}0830 \quad -0{,}0996 \quad -0{,}0693 \quad -0{,}0049)$$

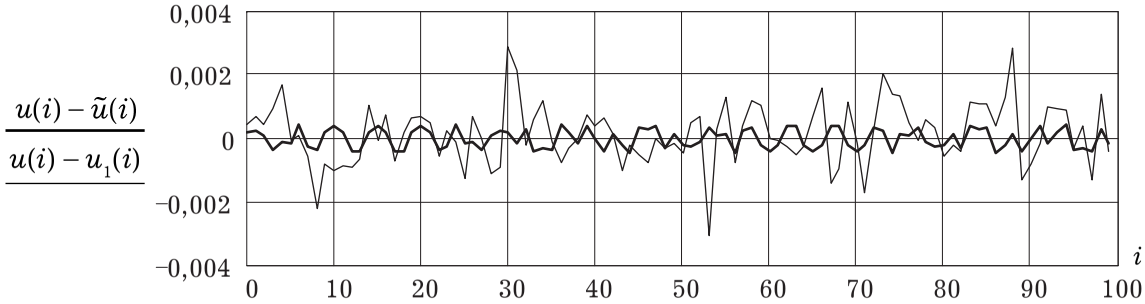


Рисунок 6.19 — Влияние шума на результаты аналого-цифрового преобразования

С учетом физических соображений формулы для расчета амплитуды и фазы φ(0) измеряемого напряжения имеют вид

$$U = \left| \frac{\sqrt{u(0)^2 + u(1)^2 - 2u(0)u(1)\cos\varphi}}{\sin\varphi} \right|, \quad \varphi(0) = \left| \arctan\left[\frac{u(0)\sin\varphi}{u(1) - u(0)\cos\varphi} \right] \right|.$$

В случае применения 12-разрядного АЦП минимальная погрешность измерения обеспечивается, если фазовый сдвиг между отсчетами задан в пределах $1{,}2 < \varphi[\text{рад}] < 1{,}6$. Погрешность измерения не зависит от начальной фазы сигнала и в худшем случае, когда амплитуда напряжения $U = 0{,}1$ соответствует нижнему пределу рабочего диапазона АЦП, не превосходит по амплитуде ±0,15%, а по фазе ±0,0015 рад. Относительные погрешности измерения активной и реактивной составляющих напряжения возрастают, соответственно, при $\varphi_0 > 1{,}4$ рад и $\varphi_0 < 0{,}2$ рад.

Отношение дисперсии шума σ_e к дисперсии результатов измерения примерно равно единице. Таким образом, шум входит полным весом в погрешность измерения. Для отношения сигнал-шум $\frac{U}{\sigma_e} = 1000$ погрешность АЦП доминирует при числе разрядов $d < 12$. С увеличением разрядности АЦП влияние шума начинает превалировать.

Повышения помехоустойчивости можно достичь при определении параметров напряжения по интегральным отсчетам, полученным путем суммирования результатов измерения отдельных мгновенных значений. С этой же целью можно проводить усреднение результатов измерения амплитуд и фаз напряжений, полученных в течение определенного времени.

В первом случае возможности повышения помехоустойчивости ограничены. При сдвиге фаз между отсчетами $\varphi = 0{,}5\,\pi$, частоте напряжения 1 кГц и быстродействии АЦП 200000 измерений в секунду для усреднения может быть использовано примерно 45 результатов. То есть можно ожидать уменьшения влияния шума примерно в 6–7 раз. Во втором случае подавление шума зависит от общей длительности измерения. Во всех вари-

антах теряется основное достоинство метода — возможность измерения за время, меньшее одного периода напряжения.

Применение метода наименьших квадратов (МНК) в переопределенном случае, когда число отсчетов превышает минимально необходимое для расчета параметров, позволяет уменьшить случайную погрешность измерения. В МНК проводят аппроксимацию временно́го ряда $\tilde{u}(i)$ экспериментально полученных значений функцией $\hat{u}(i)$, параметры которой подбираются таким образом, чтобы минимизировать действительную сумму квадратичных ошибок ε^2 аппроксимации по всем отсчетам

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=0}^{N-1} \left|\tilde{u}(i) - \hat{u}(i)\right|^2.$$

Наиболее естественно аппроксимировать отсчеты гармонического сигнала синусно-косинусными функциями. Аппроксимирующую функцию можно представить в прямоугольной или полярной системе координат. В первом случае по параметрам аппроксимирующей функции определяют значения ортогональных составляющих измеряемого напряжения. Во втором случае непосредственно находят его амплитуду и фазу.

Аппроксимирующую функцию в ортогональной системе координат представляют в виде суммы действительных значений синусной и косинусной компонент

$$\hat{u}(i) = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) + B \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right),$$

где коэффициенты A и B рассчитывают по формулам

$$A = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i) \cos\left(2\pi n \frac{i}{N}\right), \; B = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i) \sin\left(2\pi n \frac{i}{N}\right).$$

Если отсчет начальной фазы производится от момента первого измерения при $i = 0$, то эти коэффициенты по существу представляют собой активную и реактивную составляющие измеряемого напряжения и являются искомыми результатами измерения. По ним можно рассчитать амплитуду и начальную фазу аппроксимирующего колебания:

$$U = \sqrt{A^2 + B^2},\ \varphi(0) = \arctan\frac{A}{B}.$$

Минимальную погрешность измерения обеспечивает равенство целому числу отношения n времени измерения к периоду измеряемого напряжения. С увеличением длительности наблюдения необходимость обеспечения целого числа периодов становится менее острой, даже если количество отсчетов при этом не увеличивают. Погрешности измерения амплитуды и начальной фазы напряжения практически не зависят от начальной фазы измеряемого напряжения. Их значения в отсутствии шумовой помехи при 12-разрядном АЦП не превосходят для измерения амплитуды 0,025%, а фазы — 0,00025 рад.

Относительные погрешности измерения активной $\delta Re u$ и реактивной $\delta \mathrm{Im} u$ составляющих напряжения резко возрастают на краях диапазона значений фаз, когда собственные значения этих составляющих стремятся к нулю: для активной составляющей при $\varphi_0 > 1{,}35$ рад, а для реактивной при $\varphi_0 > 0{,}1$ рад.

В нашей задаче начальные фазы напряжений могут изменяться от нуля, если $\dot{\mathbf{Z}}_x$ представляет собой чисто активное сопротивление, до 1,47 рад при чисто реактивном характере $\dot{\mathbf{Z}}_x$, отличающемся в десять раз по значению от сопротивления R_0. В связи с этим нецелесообразно при использовании МНК выбирать для измерения иммитансов, характер сопротивления которых близок к активному, в качестве одного из расчетных параметров напряжения реактивную составляющую, а для импедансов реактивного характера — активную.

Подавление нормального шума зависит от числа отсчетов. При частоте напряжения 1 кГц и быстродействии АЦП 200000 измерений в секунду за время одного периода может быть получено 200 отсчетов. Коэффициент подавления шума (отношение дисперсии шума σ_e к дисперсии результатов измерения) составляет примерно $\sqrt{0{,}5N}$ и равен 10 при 200 отсчетах и 7 — при 100. Для отношения сигнал-шум $\frac{U}{\sigma_e} = 100$ погрешность АЦП доминирует при числе разрядов $d < 12$. С увеличени-

ем разрядности АЦП влияние шума начинает превалировать. Увеличение коэффициента подавления шума может быть получено за счет увеличения числа периодов напряжения, во время которых происходит измерение.

Рассмотренный способ измерения можно применять, если существует взаимная синхронизация АЦП и ЦАП. При асинхронной работе необходимо одновременное измерение фазы напряжения $u_0(t)$ в момент первого измерения при $i = 0$. Фазовый сдвиг напряжений $u(t)$ и $u_0(t)$ находят как разность их фаз при $i = 0$. Соответственно рассчитывают активную и реактивную составляющие напряжения $u(t)$.

В варианте с одновременным измерением напряжений $u(t)$ и $u_0(t)$ отсчеты $u_0(t)$ можно использовать для аппроксимации напряжения $u(t)$. Амплитуда напряжения $u(t)$ для гармонического сигнала рассчитывается через среднеквадратичное значение:

$$U = \sqrt{\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1}\left[u(i)\right]^2}.$$

Отношение мгновенных значений напряжения воздействия $u_0(t)$ к его амплитуде U_0 несет информацию о текущем значении фазы $u_0(t)$ в моменты отсчетов:

$$\frac{\tilde{u}_0(i)}{U_0} = \sin\varphi(i).$$

Учитывая это, активная $\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{U}}$ и реактивная $\mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{U}}$ составляющие напряжения $u(t)$ можно рассчитать как

$$\mathrm{Re}\,\dot{\mathbf{U}} = \frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1}\frac{\tilde{u}_0(i)}{U_0}u(i),\ \mathrm{Im}\,\dot{\mathbf{U}} = \sqrt{U^2 - \mathrm{Re}\,U^2}.$$

В полярной системе координат для нашего случая действительных отсчетов аппроксимирующую функцию можно представить в виде

$$\hat{u}(i) = \dot{\mathbf{h}}_0\dot{\mathbf{z}}_0^i + \dot{\mathbf{h}}_1\dot{\mathbf{z}}_1^i,$$

где $\dot{\mathbf{h}}_0 = \dot{\mathbf{h}}_1^* = U\exp(j\varphi)$ — комплексно-сопряженные амплитуды, представляющие собой независимый от времени параметр;

$\dot{\mathbf{z}}_0 = \dot{\mathbf{z}}_1^* = \exp(j2\pi f\Delta t)$ — комплексно-сопряженные экспоненты, которые описывают параметр, зависящий от времени (звездочка * обозначает комплексное сопряжение).

Решение задачи сводится к нахождению комплексной амплитуды $\dot{\mathbf{h}}_1$ из системы уравнений, составленной с использованием процедуры МНК:

$$\left.\begin{aligned} \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i)\dot{\mathbf{z}}_0^i &= \dot{\mathbf{h}}_0 \sum_{i=0}^{N-1} \dot{\mathbf{z}}_0^{2i} + \dot{\mathbf{h}}_1 \sum_{i=0}^{N-1} (\dot{\mathbf{z}}_0\dot{\mathbf{z}}_1)^i \\ \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i)\dot{\mathbf{z}}_1^i &= \dot{\mathbf{h}}_0 \sum_{i=0}^{N-1} (\dot{\mathbf{z}}_0\dot{\mathbf{z}}_1)^i + \dot{\mathbf{h}}_1 \sum_{i=0}^{N-1} \dot{\mathbf{z}}_1^{2i} \end{aligned}\right\}. \tag{6.21}$$

Затем рассчитываются амплитуды и начальные фазы аппроксимирующего колебания:

$$U = \left|\dot{\mathbf{h}}_1\right|, \varphi(0) = \arg \dot{\mathbf{h}}_1. \tag{6.22}$$

Оценку погрешностей косвенного измерения параметров напряжений путем аппроксимации мгновенных значений достаточно сложно провести аналитически. В данном разделе такая оценка была произведена методом математического моделирования в среде *MATHCAD*. Отдельно варьировались значения каждого их факторов, и анализировались полученные при этом результаты.

В качестве примера на рисунке 6.20 приведена *MATHCAD*-программа для анализа влияния числа отсчетов N на погрешности измерения U и $\varphi(0)$ при аппроксимации отсчетов экспоненциальными функциями. В силу особенностей синтаксиса системы *MATHCAD* отдельные обозначения в программе не совпадают с принятыми в основном тексте. В программе: v_k — отсчеты, V_k и ϑ_k — результаты измерения амплитуды и начальной фазы, k — варьирующий коэффициент.

Влияние остальных факторов так же оценено с помощью программы при приравнивании к k значения параметра, влияние которого анализировалось. Результаты моделирования представлены на рисунке 6.21.

round (x) if(x – floor(x) < 0.5, floor(x), ceil(x)) $\quad k := 3...100 \quad d := 12$

$v := 0.1 \qquad \varphi_0 := 0.25\cdot\pi \qquad e := \mathrm{rnorm}(250, 0, 0.001)$

Цикл расчета коплексных коэффициентов:

$hk :=$

$N \leftarrow k$

for $i \in 0..N-1$

$$u_i \leftarrow 2\cdot v\cdot\cos\left(2\cdot\pi\cdot i\cdot\frac{1}{N}+\varphi_0\right)$$

$$U_i \leftarrow \frac{\mathrm{round}[(u_i+e_i)\cdot 2^d]}{2^d}$$

N — число отсчетов за время измерения, равное одному периоду

u_i — значения измеряемого напряжения

U_i — отсчеты

$$z_0 \leftarrow \exp\left[-i\cdot(2\cdot\pi)\cdot\left(\frac{1}{N}\right)\right]$$

$$z_1 \leftarrow \exp\left[i\cdot 2\cdot\pi\cdot\left(\frac{1}{N}\right)\right]$$

z_0, z_1 — аппроксимирующие комплексно-спряженные экспоненты

$$Mz_{0,0} \leftarrow \sum_{i=0}^{N-1}(z_0)^{2\cdot i}$$

$$Mz_{0,1} \leftarrow \sum_{i=0}^{N-1}(z_0 z_1)^{i}$$

$$Mz_{1,0} \leftarrow Mz_{0,1}$$

$$Mz_{1,1} \leftarrow \sum_{i=0}^{N-1}(z_1)^{2\cdot i}$$

Mz — коэффициенты системы уравнений для определения комплексных коэффициентов методом наименьших квадратов

$$Mu_0 \leftarrow \sum_{i=0}^{N-1}U_i\cdot(z_0)^{i}$$

$$Mu_1 \leftarrow \sum_{i=0}^{N-1}U_i\cdot(z_1)^{i}$$

Mu — свободные члены системы уравнений

$hl \leftarrow \mathrm{lsolve}(Mz, Mu)$

hl_1

hl_1 — решение системы уравнений

$$V_k := |h_k| \qquad \vartheta_k := |\arg(h_k)| \qquad v_k := \frac{V_k - v}{v}\cdot 100\% \quad \Delta\varphi_k := (\varphi_0 - \vartheta_k)\cdot 100$$

Рисунок 6.20 — *MATHCAD*-программа для анализа метода измерения

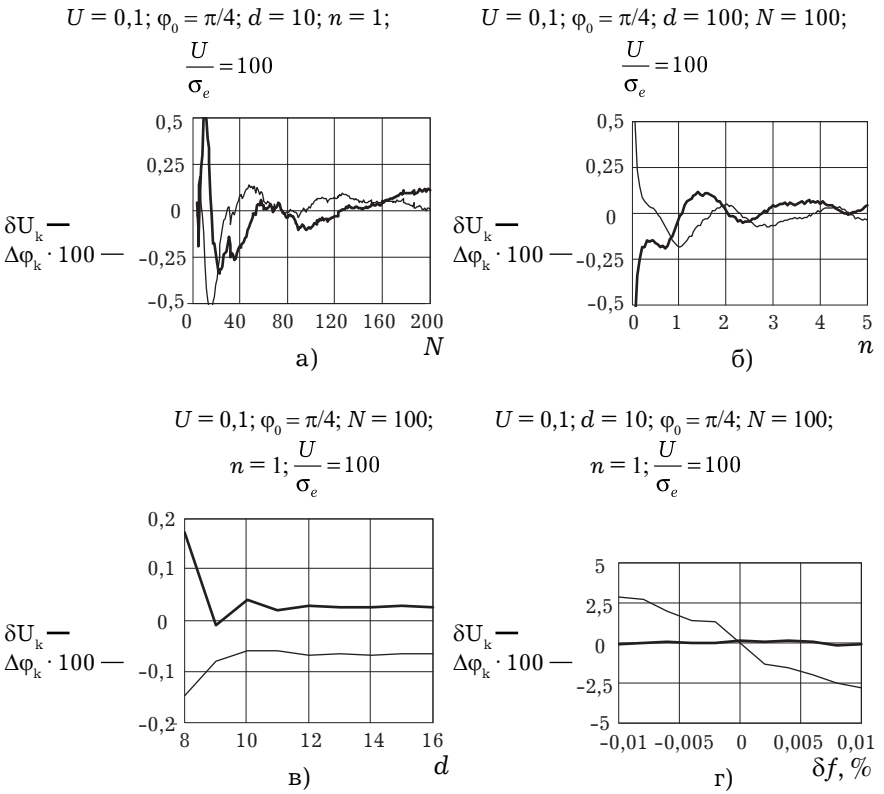


Рисунок 6.21 — Результаты моделирования метода измерения

На графиках погрешность измерения фазы $\Delta\varphi$ дана в радианах, умноженных на 100, а остальные погрешности — в процентах. Вверху каждого рисунка указаны значения постоянных величин, при которых зависимости получены. Для этого использованы обозначения, принятые в основном тексте.

На рисунке 6.21, *а* показано влияние числа отсчетов сигнала N, используемых для аппроксимации. На рисунке 6.21, *б* показано влияние отношения n общего времени измерения к периоду напряжения $u(t)$. На рисунке 6.21, *в* показано влияние разрядов АЦП, а на рисунке 6.21, *г* — влияние относительного отклонения частоты сигнала от заданного априори значения δf.

Аппроксимация экспоненциальными функциями в значительной степени сглаживает недостатки ранее рассмотренных методов, а их преимущества аккумулирует. Анализ зависимостей, приведенных на рисунке 6.21, позволяет оценить погрешности измерения. При отсутствии белого шума погрешность измерения не зависит от отношения n времени измерения к длительности периода сигнала. Измерение возможно при числе отсчетов $N \geq 3$. При шуме зависимость погрешности от продолжительности измерения проявляется. Тем не менее возможно проведение измерения за время, меньшее одного периода, как и при измерении по двум отсчетам. Отпадает необходимость обеспечения кратности времени измерения целому числу периодов сигнала. При использовании 50 отсчетов 10-разрядного АЦП погрешность измерения амплитуды не превышает 0,1%, а начальной фазы — 0,001 рад, если время измерения составляет не менее одного периода сигнала, а отношение сигнал-шум $\frac{U}{\sigma_e} = 100$. Коэффициент подавления нормального шума вдвое выше по сравнению с предшествующим методом и составляет $\sqrt{2N}$.

Особое внимание при применении метода следует обратить на точность задания частоты сигнала. В случае отклонения фактического значения частоты от заданного в пределах ±0,001% погрешность измерения фазы достигает 0,005 рад. На погрешности измерения амплитуды отклонение частоты сказывается мало.

Аппроксимация экспоненциальными функциями может быть использована для оценки амплитудно-фазовых частотных характеристик компонентов печатного узла. По характеристикам можно рассчитать параметры элементов многоэлементных двухполюсных цепей путем решения системы уравнений, связывающих результаты измерения иммитанса на нескольких частотах воздействия $u_0(t)$ с параметрами элементов, образующих диагностируемую цепь. Возможны два варианта решения задачи, отличающиеся способом задания $u_0(t)$.

В первом варианте используется $u_0(t)$, представляющее собой сумму нескольких гармонических колебаний заданных частот:

$$u_0(t) = \sum_{m=1}^{p} U_m \sin(2\pi f_m t).$$

Параметры гармонических компонент реакции объекта диагностирования на воздействие определяются аналогично выше рассмотренному случаю измерения параметров синусоидального сигнала известной частоты. Количество уравнений в системе (6.21) возрастает и равно удвоенному числу p гармонических составляющих тестового воздействия:

$$\left.\begin{array}{l}
\sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i)\dot{\mathbf{z}}_1^i = \sum_{m=1}^{p} \dot{\mathbf{h}}_m \sum_{i=0}^{N-1} \left(\dot{\mathbf{z}}_1 \dot{\mathbf{z}}_m\right)^i \\
\sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i)\dot{\mathbf{z}}_2^i = \sum_{m=1}^{p} \dot{\mathbf{h}}_m \sum_{i=0}^{N-1} \left(\dot{\mathbf{z}}_2 \dot{\mathbf{z}}_m\right)^i \\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
\sum_{i=0}^{N-1} \tilde{u}(i)\dot{\mathbf{z}}_p^i = \sum_{m=1}^{p} \dot{\mathbf{h}}_m \sum_{i=0}^{N-1} \left(\dot{\mathbf{z}}_p \dot{\mathbf{z}}_m\right)^i
\end{array}\right\}. \qquad (6.23)$$

Решение системы уравнений (6.23) в матричной форме имеет вид

$$\mathbf{H} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \mathbf{U}, \qquad (6.24)$$

где верхний индекс H означает комплексно сопряженную транспозицию матрицы, а произведение $(\mathbf{Z}^H\mathbf{Z})$ имеет вид Эрмитовой матрицы $(p \times p)$, обладающей свойством комплексно-сопряженной симметрии;

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \tilde{u}(p) \\ \tilde{u}(p+1) \\ \vdots \\ \tilde{u}(N-1) \end{pmatrix}$$ — вектор отсчетов размерности $(N - p) \times 1$;

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{h}}_1 \\ \dot{\mathbf{h}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{h}}_p \end{pmatrix}$$ — вектор комплексных амплитуд ($p \times 1$);

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \dot{\mathbf{z}}_1 & \dot{\mathbf{z}}_2 & \cdots & \dot{\mathbf{z}}_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{\mathbf{z}}_1^{N-1} & \dot{\mathbf{z}}_2^{N-1} & \cdots & \dot{\mathbf{z}}_p^{N-1} \end{pmatrix}$$ — матрица Вандермонда размерности ($N \times p$), представляющая комплексные экспоненты.

По корням $\dot{\mathbf{h}}_m$ этой системы уравнений рассчитываются амплитуды и начальные фазы аппроксимирующих колебаний согласно формулам (6.22 и 6.23), в которых индекс $\dot{\mathbf{h}}$ принимает значения от 1 до m.

Измерение может быть произведено за время одного периода напряжения $u_0(t)$, если быстродействие АЦП обеспечивает получение необходимого для заданной точности числа отсчетов. Погрешности измерения мало зависят от количества гармонических компонент сигнала и соотношения их частот. Число используемых гармоник зависит от существующих физических ограничений на максимальное значение напряжения $u_0(t)$. При заданном максимальном значении $u_0(t)$ с увеличением количества гармоник амплитуда каждой из них должна быть уменьшена. Отношение сигнал-шум для каждой гармоники также уменьшается, и погрешность измерения возрастает.

Во втором варианте используется квазигармоническое колебание, длительность соседних периодов которого изменяется по заданному закону. В каждом периоде производится измерение параметров реакции объекта диагностирования на соответствующей частоте воздействия с использованием выражений (6.21) и (6.22). Расширение частотного диапазона при

этом не приводит к ухудшению соотношения между сигналом и шумом. Однако время измерения прямо пропорционально ширине диапазона частот. Погрешность измерения полностью соответствует указанной ранее.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются измерительные схемы для контроля иммитанса по виду функции преобразования?

2. Какие причины вызывают появление методической погрешности допускового контроля параметров иммитанса при использовании пассивной измерительной схемы?

3. На какие основные этапы можно разбить контроль параметров иммитанса при использовании программных методов обработки отсчетов сигналов?

4. Какой метод аппроксимации отсчетов сигнала характеризуется наибольшим коэффициентом подавления белого шума?

5. В чем сущность метода наименьших квадратов?

Глава 7
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕМЕНТОВ В СОСТАВЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

7.1 Контроль двухполюсных электрических цепей в составе печатного узла

В печатном узле двухполюсные цепи соединены между собой в многополюсные. Проведение контроля и диагностирования МЭЦ возможно как по обобщенным параметрам, так и по параметрам образующих МЭЦ элементов. В первом случае для описания объекта диагностирования пользуются макромоделью, а во втором используется микромодель. Наиболее разработаны методы контроля обобщенных параметров. Они могут быть определены различными способами:

1) на основе совокупных оценок — путем измерения входных сопротивлений, проводимостей или коэффициентов передачи между парами полюсов при различных режимах (холостого хода и короткого замыкания) остальных полюсов и последующего решения системы уравнений;

2) на основе косвенных оценок — путем измерения токов и напряжений на зажимах МЭЦ и последующих расчетов;

3) на основе прямых оценок — путем сравнения параметров контролируемой МЭЦ с параметрами образцовой.

Внутрисхемное диагностирование по обобщенным параметрам возможно, если параметры элементов, образующих ДЭЦ, могут быть рассчитаны по результатам измерения, т. е. выполняются условия измеряемости. Если МЭЦ содержит l внешних и $n - l$ внутренних полюсов (замкнутых контуров), недоступных для подключения измерительной аппаратуры,

то связь между параметрами описывают матричным уравнением:

$$[\text{п}_{x_{ij}}]=[\text{п}_{cc}]-[\text{п}_{cd}]\,[\text{п}_{dd}^{-1}]\,[\text{п}_{dc}], \qquad (7.1)$$

где $c = 1, 2, ..., l$ и $d = 1, 2, ..., n - l$ — соответственно внешние и внутренние полюсы (контуры), $c \neq d$.

Обобщенные параметры могут быть однозначно определены на основе информации о структуре МЭЦ и параметрах ее элементов согласно уравнению (7.1). Обратная задача, т. е. определение параметров элементов МЭЦ по обобщенным параметрам в общем случае не имеет однозначного решения, так как количество обобщенных параметров МЭЦ меньше числа параметров образующих ее элементов при наличии внутренних полюсов или контуров.

Необходимым и достаточным условием измеряемости является доступность всех полюсов МЭЦ для подключения измерительной аппаратуры или наличие в цепи только внешних контуров. В этих случаях обобщенные параметры $[\text{п}_{x_{ij}}]$ совпадают с параметрами собственно ветвей. Однако при числе полюсов свыше четырех-пяти сложность измерительной аппаратуры и самого процесса диагностирования резко возрастают. Кроме того, при диагностировании систем управления после ремонта, когда возможны топологические ошибки, контроль обобщенных параметров может быть использован только для нахождения отдельных неисправных фрагментов схемы.

Таким образом, измерение обобщенных параметров не эквивалентно контролю собственно элементов МЭЦ и не может быть единственно используемым для внутрисхемного диагностирования. Универсальный способ поэлементного диагностирования основан на раздельном преобразовании параметров элементов МЭЦ в электрические сигналы, т. е. в вычленении на каждой измерительной операции контролируемой цепи из МЭЦ.

Измеряемость параметров ветви Z_x между полюсами a и b МЭЦ обеспечивается тогда и только тогда, когда каждый из путей протекания тока от полюса a к полюсу b (исключая путь через Z_x) содержат хотя бы один доступный полюс c. При доступ-

ности для подключения измерительной аппаратуры всех полюсов схема МЭЦ за счет внешних коммутаций может быть приведена к трехполюсной цепи типа “треугольник” (рисунок 7.1). Для этого определяют подмножество $\mathbf{Z}' \in \mathbf{Z}$ ветвей, имеющих общий полюс a с Z_x, и подмножество $\mathbf{P}' \in \mathbf{P}$ вторых полюсов $\mathbf{P}' = \{p_a\}_{a = 1, 2, \ldots, k}$ этих ветвей. Элементами $\mathbf{P}'$ могут быть и полюсы многополюсных компонент. За счет замыкания между собой полюсов подмножества $\mathbf{P}'$ образуют цепь, в которой по отношению к исследуемой ветви Z_x остальная часть МЭЦ объединена в две шунтирующие ветви $Z_{ш1}$ и $Z_{ш2}$. Анализ топологии МЭЦ и выбор полюсов легко доступен для автоматизации.

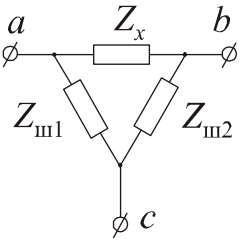


Рисунок 7.1 — МЭЦ типа “треугольник”

Проиллюстрируем сказанное на примере схемы (рисунок 7.2), имеющей 11 узлов и состоящей из ДЭЦ Z_1— Z_{11} и многополюсных элементов M_1, M_2. Рассмотрим измерение Z_1. Выберем полюс 1 в качестве общего, тогда в подмножество $\mathbf{P}'$ входит только полюс 10. Одной из шунтирующих ветвей является Z_3, а второй — сложное соединение остальных элементов схемы. Если в качестве общего выбран полюс 2, то в подмножество $\mathbf{P}'$ входят полюсы 3 и 11. После их объединения между собой с помощью внешнего соединения одна из шунтирующих ветвей будет представлять собой параллельное соединение Z_2 и Z_4, а вторая — сложное соединение остальных ЭРЭ. Аналогично и для других цепей.

Наличие в МЭЦ внутренних полюсов, недоступных для подключения, не всегда является препятствием для поэлементного диагностирования. Если недоступный полюс соединен не менее чем с тремя внешними полюсами, электрическая связь между которыми существует только через этот полюс, то поэлементный контроль возможен. Наличие не менее трех ветвей, соединяющих общий внутренний полюс с внешними, позволяет через внешние полюсы зафиксировать потенциал недоступного полюса.

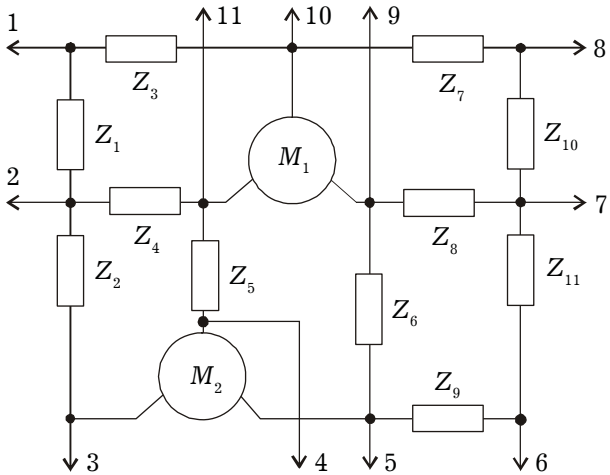


Рисунок 7.2 — Пример схемы МЭЦ

Рассмотрим в качестве примера МЭЦ, представленную графом на рисунке 7.3, где внутренние полюсы обведены кружками, а внешние обозначены точками.

Полюсы 2, 3, 8, 9 препятствуют проведению поэлементного диагностирования, так как с каждым из них непосредственно соединено не более двух внешних полюсов, не связанных между собой иначе, чем через данный полюс. А именно: с полюсом 2 соединены внешние полюсы 1, 4 и 10, но полюсы 4 и 10 дополнительно связаны между собой через внутренние полюсы 3 и 8; с полюсом 3 соединены те же внешние полюсы и полюсы 1 и 10 соединены между собой через внутренние полюсы 2 и 8; для полюса 8 внешние полюсы 1 и 4 связаны между собой через внутренние полюсы 2 и 3; с полюсом 9 соединены внешние полюсы 4, 7, 11, 12, 13, но только полюс 12 не связан с остальными, у которых имеется общий полюс 6. Полюсы 5 и 6 не препятствуют поэлементному диагностированию: полюс 5 соединен с внешними полюсами 4, 7, 11, 12 и 13, причем полюсы 4 и 11 не соединены с другими. Полюс 6 находится в аналогичных условиях, так как полюсы 12 и 4 или 11 не связаны с остальными.

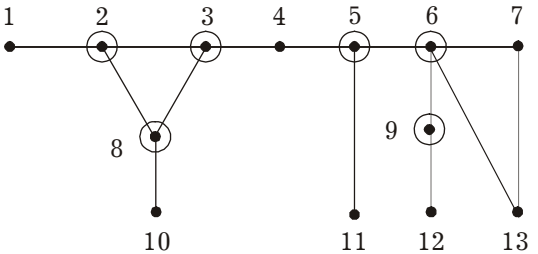


Рисунок 7.3 — Пример граф-схемы МЭЦ

При включении МЭЦ типа “треугольник” в обычную ИС к калиброванному резистору R_0 оказываются подключенными ряд ветвей, имеющих общий полюс. Токи реакции на энергетическое воздействие как измеряемой, так и шунтирующих ветвей протекают через R_0 и влияют на результат преобразования. Единственной возможностью исключения этого эффекта является эквипотенциальное разделение контролируемой и шунтирующих ветвей за счет установки на вторых полюсах шунтирующих ветвей электрического потенциала, равного потенциалу общего с R_0 полюса. С этой целью можно использовать с необходимыми дополнениями ИС, представленные на рисунке 6.4. Основные ИС для контроля ветвей МЭЦ типа “треугольник” приведены на рисунке 7.4.

В пассивной ИС (см. рисунок 6.3) необходимо применение повторителя напряжения ПН (рисунок 7.4, а). ПН задает потенциал полюса *c* равным потенциалу полюса *a*. Ток между эквипотенциальными точками через ветвь $Z_{ш1}$ не протекает. Ток от источника напряжения U_0 через ветвь $Z_{ш2}$ замыкается на общую шину через выходное сопротивление ПН, минуя R_0. В результате падение напряжения на калиброванном резисторе R_0 зависит только от иммитанса Z_x контролируемой ветви МЭЦ.

Активные ИС не требуют введения дополнительных узлов для обеспечения возможности контроля МЭЦ. В схеме с положительной обратной связью (рисунок 7.4, б) достаточно выход повторителя напряжения подключить к полюсу *c* МЭЦ.

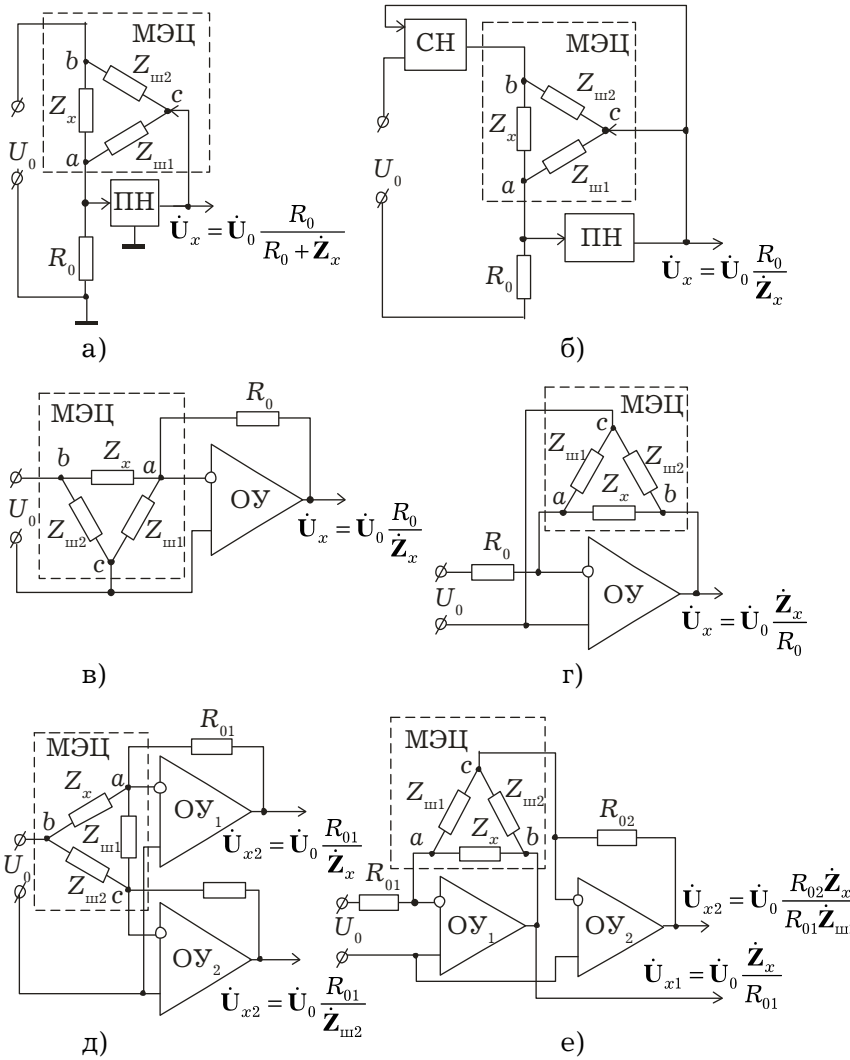


Рисунок 7.4 — ИС для МЭЦ с шунтирующими ветвями

В схемах на основе операционных усилителей с включением МЭЦ в цепь отрицательной обратной связи (рисунки 7.4, в, г) полюс *c* подключается к неинвертирующему входу, который, в

свою очередь, может быть соединен с общей шиной или (и) выходом источника напряжения U_0. В силу свойств операционного усилителя разность потенциалов на полюсах ветви $Z_{ш1}$ и ток через нее стремятся к нулю, а ветвь $Z_{ш2}$ включена параллельно выходу источника напряжения U_0 или ОУ и не влияет на результат измерения.

При необходимости одновременной оценки параметров двух ветвей могут быть использованы измерительные схемы на двух ОУ (рисунки 7.4, д, е). В преобразователях сопротивления цепи в напряжение ветвь $Z_{ш1}$ включена между инвертирующими входами $ОУ_1$ и $ОУ_2$, потенциал которых в силу свойств ОУ близок к нулю. Выходное напряжение $ОУ_1$ прямо пропорционально адмиттансу ветви Z_x в схеме на рисунке 7.4, д или ее импедансу в схеме на рисунке 7.4, е. Выходное напряжение $ОУ_2$ в схеме на рисунке 7.4, д зависит только от $Z_{ш2}$, а в схеме на рисунке 7.4, е — от отношения сопротивлений двух ветвей.

Дополнительная погрешность $\delta\dot{\mathbf{Z}}_ш$, вызванная влиянием шунтирующих цепей МЭЦ, возникает из-за остаточной разности потенциалов $\dot{\mathbf{U}}_{ac}$ на полюсах ветви $Z_{ш1}$. Значение этой погрешности зависит от соотношения токов, протекающих через Z_x и ветвь $Z_{ш1}$:

$$\delta\dot{\mathbf{Z}}_ш = \frac{\dot{\mathbf{Z}}_x}{\dot{\mathbf{Z}}_{ш1}} \frac{\dot{\mathbf{U}}_{ac}}{\dot{\mathbf{U}}_0 - \dot{\mathbf{U}}_x} \approx \frac{\dot{\mathbf{Z}}_x}{\dot{\mathbf{Z}}_{ш1}} \frac{\dot{\mathbf{U}}_{ac}}{\dot{\mathbf{U}}_0}. \qquad (7.2)$$

Причиной возникновения $\dot{\mathbf{U}}_{ac}$ может быть как несовершенство узлов, ответственных за потенциал точки *c*, так и контактные сопротивления зондов, через которые объект диагностирования подключен к ИС. Первый фактор при использовании современных аналоговых интегральных схем можно исключить из рассмотрения. На вторую причину следует обратить особое внимание при выборе точек подключения к объекту. Покажем это на простейшем примере измерения сопротивления резистора R_x с помощью схемы на ОУ (рисунок 7.5).

Пусть номиналы резисторов в объекте диагностирования составляют: R_x = 1 кОм, $R_{ш1} = R_{ш2}$ = 100 Ом, U_0 = 1 В, а сопротивление контактирования $r_к$ = 5 Ом (среднее значение для

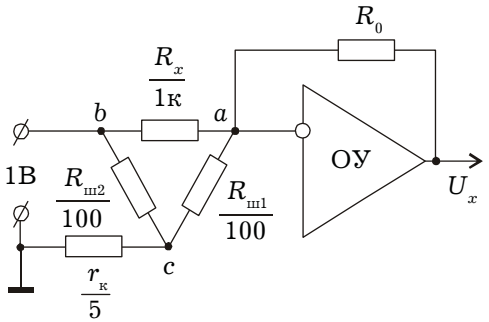


Рисунок 7.5 — Учет влияние контактных сопротивлений зондов

многозондового контактирующего устройства). Тогда напряжение между точками *a* и *c*, вызванное током, протекающим через $R_{ш2}$ и $r_к$, $U_{ac} = U_0 \frac{r_к}{r_к + R_{ш2}} \approx 0{,}05$ В. Под действием этого напряжения через R_0 протекает вызывающий погрешность ток $I_{ш1} = \frac{U_{ac}}{R_{ш1}} \approx 0{,}5$ мА, в то время как ток, обусловленный измеряемым сопротивлением равен $I_x = \frac{U_0}{R_x} \approx 1$ мА. Таким образом, погрешность составляет 50%. Такой же результат получается и при расчете по формуле (7.2).

Для минимизации рассмотренной погрешности необходимо использовать двухпроводное подключение к каждой точке МЭЦ, т. е. шестипроводное подключение к МЭЦ объекта диагностирования. Обычно это не вызывает затруднений, так как каждый из элементов, входящих в многополюсную цепь, имеет два вывода и монтируется на печатном узле двумя пайками. То есть каждый полюс МЭЦ, образованный электрическим соединением двух элементов, в объекте имеет не менее чем две точки (пайки) для подключения внешних контактов. Коммутатор АСКД выбирает контакты, подключенные к пайкам соединенных между собой элементов.

Организация шестипроводного подключения к МЭЦ проиллюстрирована на рисунке 7.6, а для случая контроля импеданса и на рисунке 7.6, б — для адмиттанса. Цифрами 1–6 обозначены точки контактирования, т. е. точки припайки элементов

к плате. Собственно измерительная схема выполнена на операционном усилителе ОУ$_1$.

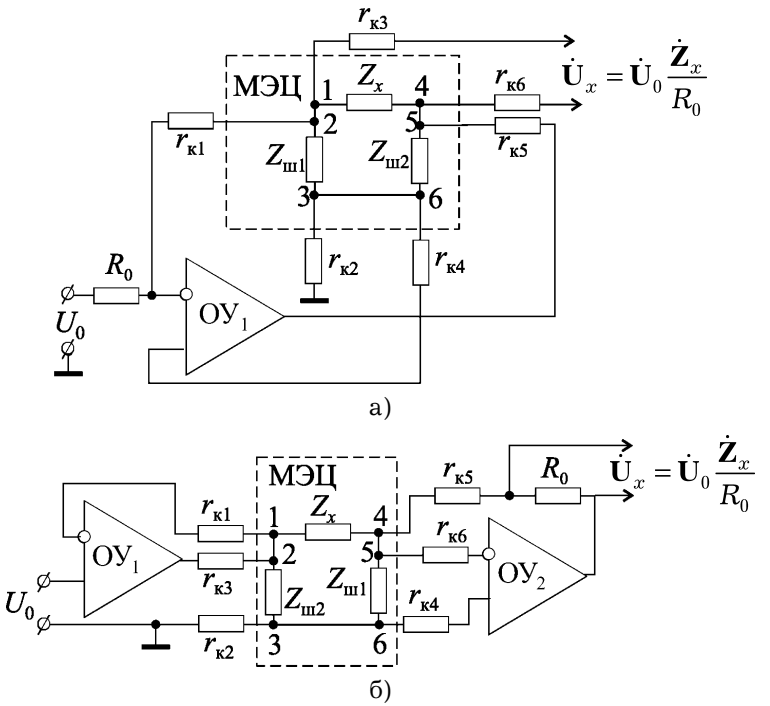


Рисунок 7.6 — Шестипроводное подключение контролируемой МЭЦ

Влияние контактного сопротивления $r_{к2}$, соединяющего полюс с шунтирующей цепи $Z_{ш1}$– $Z_{ш2}$ (точки 3 и 6 МЭЦ) с общей шиной, в схемах исключается за счет соединения точки 6 с неинвертирующим входом ОУ$_1$ через контактное сопротивление $r_{к4}$. Вследствие этого потенциал инвертирующего входа усилителя оказываются равными потенциалу точек 3 и 6, и ток через ветвь $Z_{ш1}$ стремится к нулю.

В схеме на рисунке 7.6, а влияние контактных сопротивлений $r_{к1}$, $r_{к3}$, $r_{к5}$, $r_{к6}$, обеспечивающих подключение контролируемого импеданса Z_x устраняется за счет разделения токовых и потенциальных цепей (классическое 4-зажимное подключение).

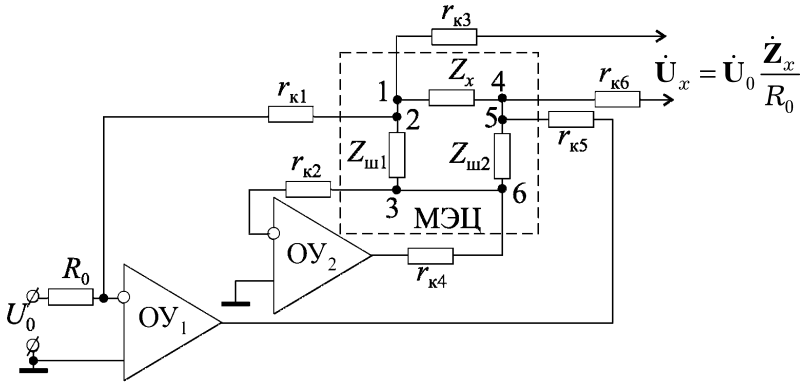
В схеме на рисунке 7.6, б влияние $r_{к1}$ и $r_{к3}$ устраняется включением их в цепь отрицательной обратной связи $ОУ_1$, работающего в режиме повторителя напряжения. За счет свойств ОУ (малый входной ток и большой коэффициент усиления) при таком включении напряжение на инвертирующем входе усилителя и в точках соединения сопротивлений $r_{к1}$ и $r_{к3}$ устанавливается равным напряжению на его неинвертирующем входе. В точках 1 и 2 напряжение воздействия на контролируемую цепь Z_x равно U_0 и нет потерь на контактных сопротивлениях. Влияние сопротивления $r_{к5}$ устраняется путем измерения падения напряжения непосредственно на калиброванном резисторе R_0. Сопротивление $r_{к6}$ не влияет на результат контроля, так как ток, протекающий через него, равен входному току $ОУ_2$ и пренебрежимо мал.

Недостатком рассмотренных измерительных схем является погрешность, вызванная уменьшением приложенного к Z_x сигнала из-за падения напряжения на контактном сопротивлении $r_{к2}$. Погрешность становится ощутимой при контроле малых сопротивлений, соизмеримых с сопротивлением контактов.

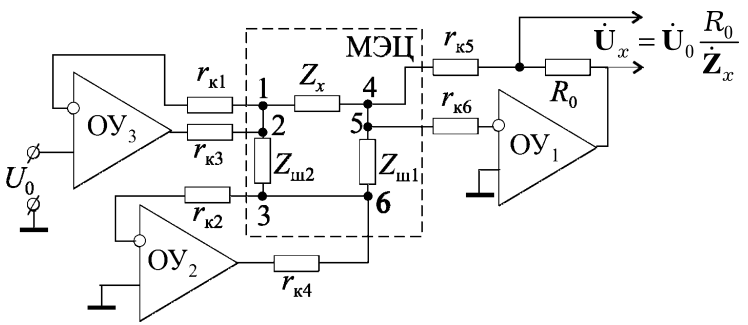
Схемы, изображенные на рисунке 7.7 лишены этого недостатка. В них к потенциал точек 3 и 6 МЭЦ равен нулю благодаря использованию повторителя напряжения на $ОУ_2$.

Метод измерения параметров ветвей МЭЦ с недоступной точкой соединения (МЭЦ типа “звезда”) дуален рассмотренному, как и сама схема МЭЦ. Для раздельного диагностирования необходимо обеспечить равенство токов, протекающих через две ветви МЭЦ. Для этого в пассивных ИС энергетическое воздействие осуществляется от источника тока I_0, включенного между ветвями Z_x и Z_1, а напряжение снимают с помощью схемы с высоким входным сопротивлением через оставшуюся ветвь Z_2 (рисунок 7.8, а). Выходной сигнал схемы прямо пропорционален контролируемому импедансу $\dot{\mathbf{U}}_x = \dot{\mathbf{I}}_0\dot{\mathbf{Z}}_x$.

В активных ИС на основе операционных усилителей при использовании токового воздействия I_0 (рисунок 6.4, б) влияние сопротивления ветвей Z_1 и Z_2 на результат преобразования устраняется за счет включения их последовательно с большими сопротивлениями — внутренним сопротивлением источни-



а)



б)

Рисунок 7.7 — Улучшенное шестипроводное подключение МЭЦ

ка тока и входным сопротивлением операционного усилителя. Выходное напряжение схемы при этом прямо пропорционально $\dot{\mathbf{Z}}_x$. При использовании в этой схеме вместо источника тока с высоким внутренним сопротивлением источника напряжения U_0 выходной сигнал пропорционален отношению сопротивлений: $\dot{\mathbf{U}}_x = \dot{\mathbf{U}}_0 \frac{\dot{\mathbf{Z}}_x}{\dot{\mathbf{Z}}_1}$.

В схеме на рисунке 7.8, в выходное напряжение $\dot{\mathbf{U}}_x = \dot{\mathbf{U}}_0 \frac{\dot{\mathbf{Z}}_x}{R_0}$ снимают через ветвь Z_2. При этом необходимо, чтобы последующий узел имел высокое входное сопротивление.

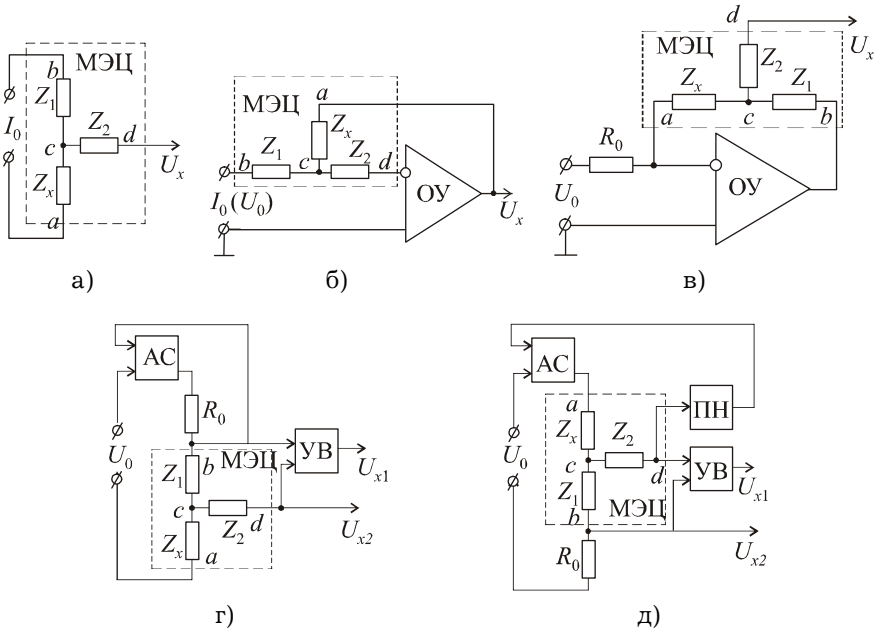


Рисунок 7.8 — ИС для МЭЦ с недоступной точкой соединения плеч

В схеме на рисунке 7.8, г за счет положительной обратной связи устанавливается значение тока, протекающего через ветви $Z_x - Z_1$ $\dot{\mathbf{I}}_0 = \dot{\mathbf{U}}_0 / R_0$. При этом выходное напряжение узла вычитания УВ $\dot{\mathbf{U}}_{x1} = \dot{\mathbf{U}}_0 \dfrac{\dot{\mathbf{Z}}_1}{R_0}$, а $\dot{\mathbf{U}}_{x2} = \dot{\mathbf{U}}_0 \dfrac{\dot{\mathbf{Z}}_x}{R_0}$.

В схеме на рисунке 7.8, д также используют ИС с положительной обратной связью. Выходные напряжения ИС равны $\dot{\mathbf{U}}_{x1} = \dot{\mathbf{U}}_0 \dfrac{\dot{\mathbf{Z}}_1}{\dot{\mathbf{Z}}_x}$, $\dot{\mathbf{U}}_{x2} = \dot{\mathbf{U}}_0 \dfrac{R_0}{\dot{\mathbf{Z}}_x}$.

Дополнительная погрешность, вызванная влиянием неконтролируемых ветвей МЭЦ, возникает из-за тока, протекающего через ветвь $Z_{\text{ш}2}$ (остаточной разности потенциалов на полюсах ветви). Значение этой погрешности зависит от соотношения токов, протекающих через Z_x и ветвь Z_2, и может быть рассчитано по аналогии с выражением (7.2).

7.2 Диагностирование транзисторов в составе печатного узла

Несмотря на широчайшее применение интегральных схем, транзисторы до сих пор остаются необходимым элементом электронных систем управления. Их широко применяют в мощных выходных каскадах усилителей, в высоковольтных узлах, функциональных преобразователях и т. д.

Транзисторы характеризуются большим числом параметров, измерить которые при внутрисхемном диагностировании практически невозможно. Этого и не требуется. Важно оценить правильность распайки транзистора после его замены в процессе ремонта и его работоспособность, т. е. возможность в дальнейшем выполнять свои функции.

Методы внутрисхемного контроля транзисторов можно подразделить на две группы. К первой группе относятся методы качественной оценки работоспособности, позволяющие проверить по какому-либо критерию способность транзистора выполнять определенные функции. Вторую группу составляют методы внутрисхемного измерения параметров.

В простейшем случае транзистор можно проверить по значениям сопротивлений переходов в открытом и закрытом состояниях, когда транзистор представляется пассивной нелинейной трехполюсной моделью. Метод широко применяется в радиолюбительской практике. Использование для измерения сопротивлений переходов обычных омметров неэффективно, так как в реальной схеме переходы транзистора всегда зашунтированы другими элементами, и оценить реальное значение сопротивлений невозможно. Для решения задачи целесообразно использовать методы и измерительные преобразователи для контроля элементов МЭЦ. Например, измерение сопротивления перехода в режиме заданного тока возможно с помощью схемы, приведенной на рисунке 7.9.

Испытываемый переход транзистора VT включают с помощью зондов $З_2$ и $З_4$ между входом и выходом операционного усилителя ОУ, во входной цепи которого включен калиброванный резистор R_0. Проверка перехода осуществляется в два

такта, отличающихся полярностью тестового напряжения U_0. В одном такте проверяют сопротивление открытого перехода, а во втором — закрытого. С помощью зондов $З_1$ и $З_3$ замыкают между собой шину питания ШП и общую шину ОШ объекта и соединяют их с общей шиной измерительной схемы. Элементы Z_1 и Z_2 оказываются включенными между эквипотенциальными точками — инвертирующим входом ОУ с нулевым потенциалом и общей шиной. Ток через них не протекает, и они не влияют на результат измерения. Элемент Z_3 также не влияет на результат измерения, так как через зонды $З_1$ и $З_4$ он включен параллельно малому выходному сопротивлению ОУ. Благодаря замыканию накоротко шин питания на остальные каскады ОД напряжение не подается. Тем самым исключается возможность появления в ИС сигналов от предшествующих транзистору *VT* элементов печатного узла.

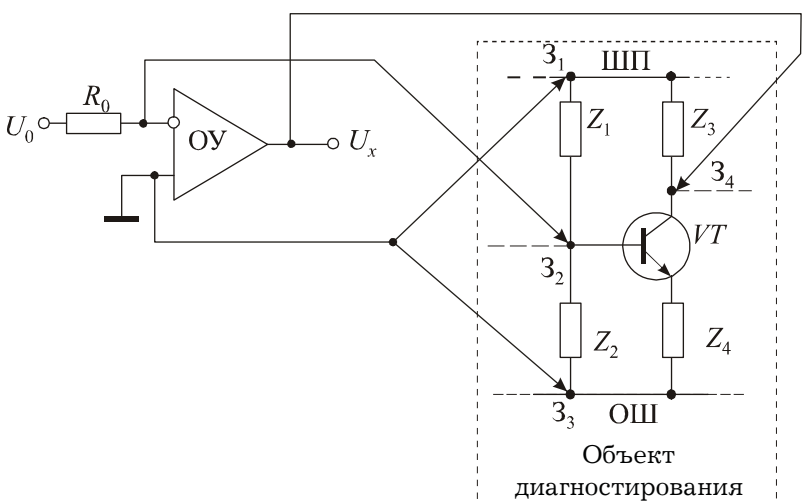


Рисунок 7.9 — Внутрисхемное измерение сопротивления перехода транзистора

Рассмотренный метод можно использовать для проверки правильности распайки вывода базы транзистора. Перепу-

тывание выводов эмиттера и коллектора не диагностируется. Возможно также обнаружить факт ошибочной установки транзистора другого типа проводимости. Контроль параметров чисто качественный: “открыт переход” — “закрыт переход”. Точному измерению препятствует очень широкий диапазон значений сопротивлений переходов (от десятков Ом у открытого перехода до десятков МОм у закрытого), который должен быть измерен с помощью одного измерительного преобразователя. Серьезный недостаток рассмотренной схемы — возможность появления большого напряжения насыщения на выходе ОУ в том случае, когда оборвана цепь электрода транзистора или перепутаны его выводы. Это может привести к выходу из строя других элементов печатного узла. Метод не может быть применен в схемах, где параллельно электродам транзистора включен диод, переход другого транзистора или активное сопротивление.

Достаточно просто можно поверить в некоторых схемах усилительные свойства транзистора в случае представления его активной четырехполюсной моделью с автономным источником энергии. Для этого к проверяемому транзистору подключают внешние элементы малым сопротивлением, образующие вместе с ним генераторную схему, чаще всего блокинг-генератор. Возникновение генерации свидетельствует об исправности транзистора. Метод широко применяется в радиолюбительской практике из-за простоты реализации и удобства представления информации: обычно появление генерации индицируется звуковым сигналом или свечением светодиода. Однако метод не может быть рекомендован для применения в промышленных целях из-за ряда серьезных недостатков:

– на схему объекта диагностирования подают напряжение питания, что может привести к выходу из строя соседних элементов проверяемого узла;

– низкоомные цепи измерительной схемы резко нарушают режим работы соседних компонентов печатного узла, что также может привести к выходу их из строя. Аналогичный эффект могут вызвать генерируемые сигналы;

– рабочие сигналы ОД могут быть ошибочно приняты за положительный результат проверки.

В целом, рассмотренные методы качественной оценки работоспособности транзисторов не обладают достаточной универсальностью и достоверностью контроля.

Измерение параметров можно проводить при представлении транзистора как пассивной, так и активной моделью с зависимым источником энергии. В рабочей схеме ОД невозможно измерить все параметры транзистора. Поэтому важно выбрать параметры, позволяющие наиболее достоверно оценить его работоспособность. Параметры транзистора классифицируют следующим образом:

– статические параметры, которые оцениваются по значениям постоянных токов, протекающих через электроды транзистора, или по значениям напряжений постоянного тока на этих электродах при фиксированных условиях измерения;

– малосигнальные параметры эквивалентного четырехполюсника, когда используется линейная модель транзистора;

– параметры физической эквивалентной схемы, характеризующие работу транзистора в заданном диапазоне частот и режимов;

– импульсные параметры, характеризующие реакцию транзистора на скачкообразное воздействие, такие как длительность фронта, время задержки и т. д.;

– тепловые параметры, характеризующие саморазогрев транзистора рассеиваемой в нем мощностью;

– параметры, характеризующие шумовые свойства.

Наиболее полно характеризуют работоспособность транзистора статические и малосигнальные параметры.

Рассмотрим более подробно статические характеристики. Система коллекторных вольт-амперных характеристик представлена на рисунке 7.10. Работа транзистора описывается в четырех областях: активной области I, области отсечки II, области насыщения III и области пробоя IV.

Основной характеристикой активной области служит статический коэффициент передачи тока

$$\beta = \frac{I_к - I_{к0}}{I_б + I_{к0}},$$

где $I_к$ и $I_б$ — соответственно, ток коллектора и ток базы в активной области;

$I_{к0}$ — обратный ток коллектора при отключенном эмиттере.

Коэффициент β определяют при небольшом значении напряжения коллектор — эмиттер $U_{кэ}$ и при токе коллектора, близком к рабочему. Учет $I_{к0}$ в числителе и знаменателе выражения для β существенен только для микрорежимов, когда $I_б < 20I_{к0}$.

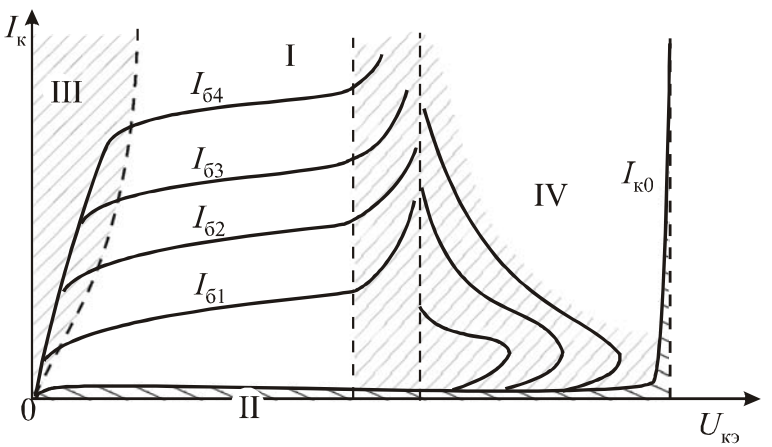


Рисунок 7.10 — Коллекторные вольт-амперные характеристики транзисторов

Для характеристики области отсечки используются токи обратно смещенных переходов транзистора:

– $I_{к0}$ и $I_{э0}$ обратные токи переходов база-коллектор и база-эмиттер, измеряемые при отключенном третьем электроде;

– $I_{кн}$ и $I_{эн}$ начальные токи переходов, измеряемые при замкнутых выводах базы и третьего электрода или при включении между ними определенного активного сопротивления;

– $I_{кз}$ и $I_{эз}$ токи переходов закрытого транзистора, измеряемые при определенном запирающем напряжении между базой и третьим электродом.

Для характеристики области насыщения III используются напряжения насыщения коллектор-эмиттер и база-эмиттер, измеряемые при заданном токе коллектора и фиксированном токе базы, значение которого должно быть в 2–20 раз больше тока базы, соответствующего току коллектора в активном режиме.

Измерение характеристик области пробоя в принципе неприемлемо для внутрисхемного контроля из-за необходимости подачи на объект больших напряжений.

Малосигнальные параметры, иногда называемые динамическими, дополняют статические характеристики и дают более полную оценку параметров транзистора в активной области. Их измерение основано на использовании тестового воздействия переменного тока с малой амплитудой. Амплитуда воздействия считается малой, если при уменьшении ее в два раза значение измеряемого параметра изменяется менее чем на величину основной погрешности измерения.

Характеристики транзистора как линейного четырехполюсника удобно описывать с помощью матриц. Для биполярных транзисторов наиболее часто используют h-параметры:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix},$$

которые могут быть пересчитаны в любые другие.

Измерения h-параметров можно производить в любой из возможных схем включения транзистора: с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором при определенных режимах по постоянному току. Для указания на схему включения используют дополнительный индекс у h — “б”, “э” или “к”. При этом напряжения и токи, входящие в выражение для h-параметров приобретают конкретный смысл. Например, для схемы с общим эмиттером это выражение будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} U_{бэ} \\ I_к \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11э} & h_{12э} \\ h_{21э} & h_{22э} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_б \\ U_{кэ} \end{bmatrix}.$$

Низкочастотные малосигнальные параметры связаны со статическими характеристиками, поэтому их часто называют квазистатическими. Так, например,

$$\beta = \frac{I_к - I_{к0}}{I_б + I_{к0}} = \frac{1}{I_б + I_{к0}} \int_0^{I_б} h_{21э} dI_б.$$

Высокочастотные малосигнальные параметры также описывают транзистор как линейное устройство. Однако они не имеют однозначной связи со статическими характеристиками, их относят к динамическим параметрам, которые характеризуют переходные процессы в транзисторе.

Одними из наиболее информативных параметров, однозначно характеризующих исправность транзисторов, служат обратные токи переходов $I_{к0}$ и $I_{э0}$, так как их значения зависят не только от состояния переходов, но и от состояния поверхности полупроводника. Однако $I_{к0}$ и $I_{э0}$ измеряются при разрыве соответственно цепи эмиттера или коллектора, что нереализуемо при внутрисхемном контроле. В связи с этим в качестве критерия исправности транзистора в составе печатного узла могут быть выбраны только токи его закрытых переходов $I_{кз}$ и $I_{эз}$. Без учета поверхностных эффектов обратные токи и токи закрытых переходов отличаются по значению на несколько процентов:

$$I_{кз} = \frac{I_{к0}(1 - \alpha_и)}{(1 - \alpha\alpha_и)} = \frac{I_{к0}(1 + \beta)}{(1 + \beta + \beta_и)},$$

где α и $\alpha_и$ — коэффициенты усиления тока в схеме с общей базой для прямого и инверсного включения транзистора;

$\beta_и$ — коэффициент усиления тока в схеме с общим эмиттером для инверсного включения.

Например, при $\beta = 40$ и $\beta_и = 1$ разница в значениях составляет 2,5%.

Причиной ухудшения свойств транзистора является возрастание поверхностных токов. Это явление эквивалентно шунтированию перехода некоторым сопротивлением. За счет поверхностных эффектов разница между значениями токов становится еще меньше, так как общий обратный ток транзис-

тора оценивают независимо от числа компонент, из которых он состоит, в то время как приведенное выражение описывает поведение отдельной компоненты.

Целесообразность выбора токов $I_{кз}$ и $I_{эз}$ в качестве критерия исправности транзистора обусловлена тем, что у исправных транзисторов максимальное значение этих токов в 5–10 раз меньше, чем у неисправных. Достоверность контроля исправности транзистора по току одного из переходов составляет 0,95, а по токам двух переходов — практически равна единице. Ошибка диагностирования исправности транзистора по току одного из переходов возникает при неисправности типа “обрыв” цепи третьего электрода. Для исключения ошибки необходима дополнительная контрольная операция по проверке целости цепи третьего электрода.

Преобразователи для контроля токов переходов по структуре близки к преобразователям для контроля сопротивлений переходов. Так, в схеме (рисунок 7.9) для контроля токов переходов достаточно поменять места включения калиброванного резистора R_0 и проверяемого перехода. В силу свойств активной линейной ИС в этом случае к переходам проверяемого транзистора оказывается приложенным заданное напряжение U_0. Значение этого напряжения должно быть небольшим, не более 0,5 В, для того чтобы исключить пробой транзистора в случае неправильного подключения полярности тестового напряжения.

Учитывая, что сопротивление закрытого перехода достаточно велико, режим заданного напряжения на переходе легко может быть получен и в пассивной ИС для контроля МЭЦ (рисунок 7.11). Источник тестового закрывающего переход напряжения U_0 включается через калиброванный резистор R_0 с помощью зондов $З_2$ и $З_3$ между базой и коллектором проверяемого транзистора. Напряжение коллектора через повторитель ПН подается на соединенные накоротко через зонды $З_1$ и $З_4$ шины ШП и ОШ питания каскада. Благодаря этому исключается влияние элементов Z_1–Z_4. В результате падение напряжения на резисторе R_0 пропорционально измеряемому току.

При необходимости схема преобразователя может быть еще более упрощена. В качестве калиброванного возможно использование сопротивления в цепи коллектора (Z_3) или эмиттера (Z_4) проверяемого каскада (рисунок 7.12). В такой схеме сопротивления Z_1 и Z_2 цепи базового делителя включены параллельно выходу источника напряжения U_0. Их минимально допустимое значение ограничено только мощностью источника. Элементы Z_3 и Z_4 не влияют на значение измеряемого тока, так как в подавляющем большинстве реальных схем их сопротивление на несколько порядков меньше сопротивления закрытого перехода. Отклонение сопротивления резисторов от своего номинального значения в пределах допуска ± 20% также не оказывает существенного влияния на результат оценки исправности, так как значения обратных токов у исправных и неисправных транзисторов отличаются более чем в пять раз.

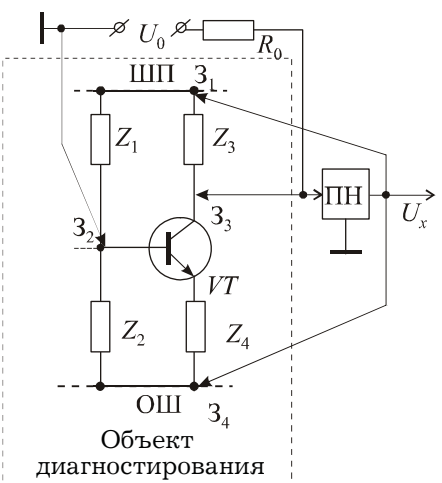


Рисунок 7.11 — Схема для контроля токов закрытых переходов

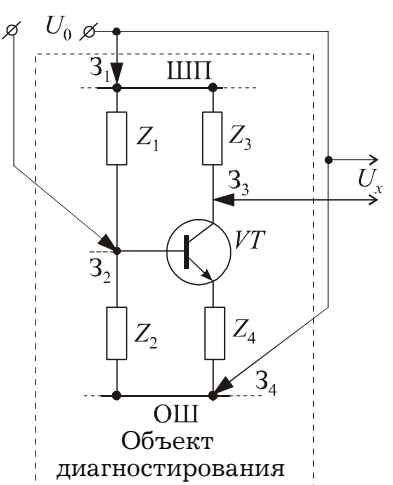


Рисунок 7.12 — Упрощенная схема для контроля токов закрытых переходов

С помощью рассмотренного метода также возможно измерение начальных токов $I_{кн}$ и $I_{эн}$, характеризующих работу

транзистора в импульсном режиме. Для этого в схему преобразователя дополнительно вводят зонд $З_5$ и переключатель П (рисунок 7.13). При измерении начального ток коллектора переключатель устанавливают в положение “1”, и через зонд $З_5$ эмиттер транзистора замыкают с базой. При измерении начального ток эмиттера переключатель устанавливают в положение “2”, и через зонд $З_3$ коллектор транзистора замыкают с базой. Выходной сигнал при этом снимают через зонд $З_5$.

Преобразователи для диагностирования исправности транзисторов в составе печатного узла могут работать с любым числом последовательно включенных каскадов, подключенных к общим шинам питания. Для этого необходимо только подключать зонды $З_2$, $З_3$ и $З_5$ к разным транзисторам. Достоинством метода контроля токов по сравнению с методом контроля сопротивлений является низкий уровень используемых напряжений и исключение возможности появления рабочих сигналов ОД благодаря замыканию шин питания.

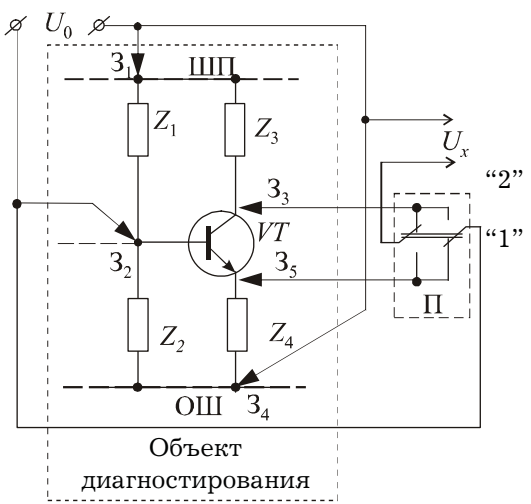


Рисунок 7.13 — Схема для контроля начальных токов переходов

Рассмотренный метод не применим для контроля схем с включенным параллельно переходу активным сопротивлени-

ем или другим p-n переходом. Однако оба перехода одновременно зашунтированы бывают крайне редко, а контроль тока даже одного перехода дает достаточно достоверную оценку исправности транзистора. Использование метода проблематично для контроля современных планарных маломощных транзисторов, у которых значения обратных токов лежат в диапазоне наноампер. Проведение контроля столь малых токов непосредственно в печатном узле с помощью автоматических систем весьма сложно из-за неизбежных токов утечки в коммутаторах, контактирующих устройствах и соединительных жгутах. Метод не позволяет также обнаружить перепутывание выводов коллектора и эмиттера, так как значения токов $I_{кз}$ и $I_{эз}$ близки.

Расширить возможности внутрисхемного диагностирования можно при контроле усилительных свойств транзистора. Для учета влияния шунтирующих транзистор цепей печатного узла на значения напряжений и токов, действующих в измерительной схеме, измерения проводят в два такта. В первом такте к контролируемому транзистору прикладывают закрывающее напряжение и оценивают реакцию ОД на тестовое воздействие, которая обусловлена только шунтирующими цепями. Во втором такте транзистор открывают. Реакция ОД при этом определяется суммой токов, протекающих через открытый транзистор, и токов, протекающих через шунтирующие цепи. Разность реакций зависит только от свойств транзистора.

На рисунках 7.14 приведены схемы преобразователей, реализующих рассмотренный метод применительно к измерению различных параметров транзисторов. Во всех схемах шины питания рабочей схемы ОД, в которую включен проверяемый транзистор, замкнуты между собой. При этом элементы цепей эмиттера и коллектора оказываются между собой соединенными, и на рисунках представлены цепью Z_3.

Преобразователи на рисунках 7.14, а, б, в предназначены для измерения параметров биполярного транзисторов в схеме с общей базой. Нулевой потенциал базы задается через зонд $З_1$ с инвертирующего входа операционного усилителя $ОУ_1$, прямой

вход которого соединен с общей шиной. Эмиттер проверяемого транзистора подключается к выходу этого усилителя через зонд $З_3$. Таким образом, переход база-эмиттер и соединенная параллельно ему цепь Z_2 оказываются включенными между входом и выходом $ОУ_1$. Ток через параллельное соединение задается входными напряжениями и элементами, через которые оно поступает на вход $ОУ_1$.

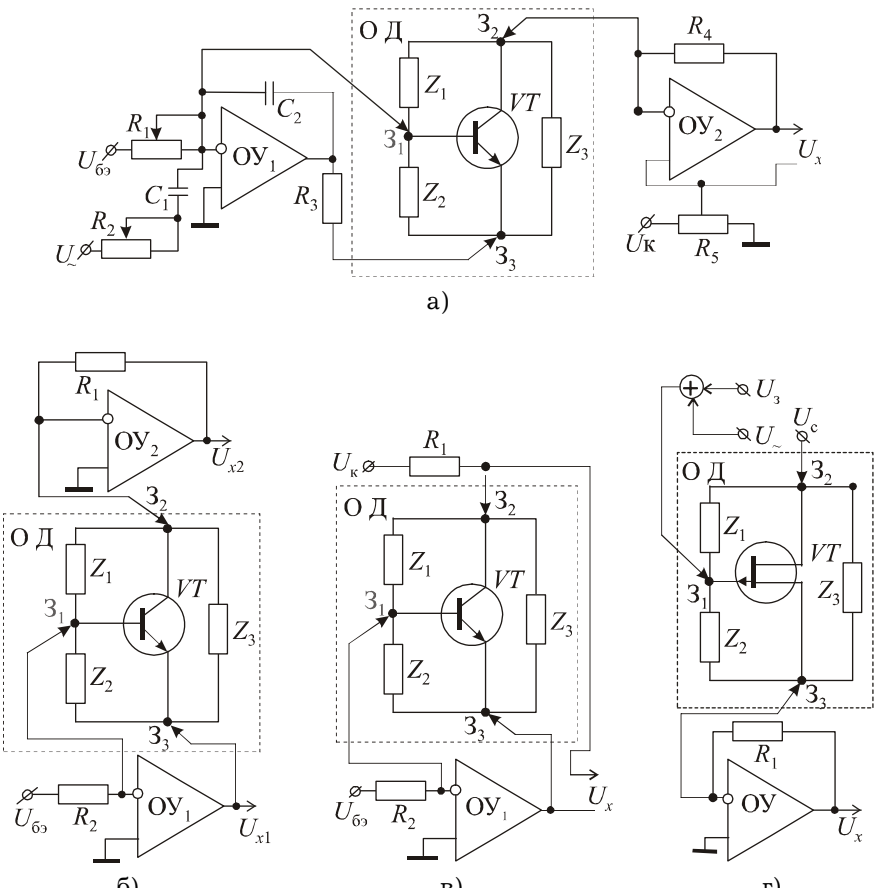


Рисунок 7.14 — Схемы для контроля усилительных свойств транзисторов

Схема на рисунке 7.14, а предназначена для внутрисхемного контроля динамического коэффициента усиления тока в схеме с общей базой. Постоянный ток база-эмиттер, определяющий рабочую точку транзистора, задается от источника напряжения $U_{бэ}$ через переменный резистор R_1. При изменении полярности этого напряжения транзистор переключается из открытого состояния в закрытое. Тестовый сигнал переменного тока задается от источника напряжения $U_{\sim}$ через переменный резистор R_2 и конденсатор C_1. Подстройка резисторов необходима для исключения влияния шунтирующих цепей на режим измерения. Резистор R_3 предназначен для ограничения токов в процессе подстройки режимов. Конденсатор C_2 служит для ограничения токов в момент подключения зондов к ОД. В схеме на операционном усилителе $ОУ_2$ совмещены функции задания напряжения на коллекторе транзистора с преобразованием тока коллекторной цепи в напряжение и ограничением значения этого тока. Задаваемые напряжения коллекторного питания подаются на неинвертирующий вход усилителя. В силу свойств усилителя такие же напряжения устанавливаются на инвертирующем входе. Они подаются на коллектор. Напряжение на коллекторе остается постоянным и равным заданному до тех пор, пока усилитель работает в линейной области без ограничения сигнала. В случае короткого замыкания цепи коллектора, значение тока ограничено резистором R_4, включенным между инвертирующим входом и выходом усилителя. Ток коллекторной цепи вызывает на калиброванном резисторе R_4 падение напряжения. В качестве выходного сигнала используется напряжение между неинвертирующим входом и выходом усилителя U_x, которое прямо пропорционально току в коллекторной цепи. Разность значений напряжения U_x при открытом и закрытом транзисторе пропорциональна только току коллектора.

Схема на рисунке 7.14, б предназначена для внутрисхемного контроля статического коэффициента усиления тока. Ток в цепи база-эмиттер при нулевом потенциале на базе задается напряжением $U_{бэ}$ и резистором R_2. При изменении полярности этого напряжения транзистор переключается из открытого со-

стояния в закрытое. Ток в цепи коллектора при нулевом напряжении база-коллектор считывается усилителем $ОУ_2$.

Схема на рисунке 7.14, в предназначена для внутрисхемного контроля напряжения насыщения. Напряжение коллекторного питания $U_к$ подается через резистор R_1. Напряжение между зондами $З_2$ и $З_2$ является искомым параметром.

Схема на рисунке 7.14, г предназначена для внутрисхемного контроля крутизны полевых транзисторов. Напряжение затвора $U_з$ и тестовый сигнал переменного тока $U_\sim$ подаются через зонд $З_1$, а напряжение стока — через зонд $З_2$. С помощью операционного усилителя задается нулевой потенциал на исток и формируется напряжение U_x, пропорциональное току истока. Перевод транзистора из открытого состояния в закрытое осуществляется изменением полярности напряжения $U_з$.

Рассмотренным преобразователям для измерения параметров биполярных транзисторов свойственен тот же недостаток, что и преобразователям для внутрисхемного контроля сопротивления переходов, а именно возможность появления достаточно большого напряжения на выходе операционного усилителя $ОУ_1$ в том случае, когда оборвана цепь электрода транзистора или перепутаны его выводы. Этот недостаток устраняется в преобразователе для внутрисхемного измерения коэффициента усиления тока $h_{21э}$ по схеме с общим эмиттером (рисунок 7.15).

При испытаниях транзистора шины питания проверяемого каскада замыкаются накоротко через зонды $З_1$ и $З_3$ и соединяются с общей шиной измерительной схемы. Элементы рабочей схемы объекта, шунтирующие транзистор VT, представлены ветвями Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4. К коллектору транзистора через калиброванный резистор R_2 и зонд $З_4$ подключается источник коллекторного питания $U_к$. На базу транзистора через калиброванный резистор R_1 и зонд $З_2$ подается тестовый сигнал (рисунок 7.16, в), полученный в результате сложения в сумматоре напряжений СН низкочастотных прямоугольных импульсов генератора $Г_1$ (рисунок 7.16, а), с сигналом генератора $Г_2$ (рисунок 7.16, б) более высокой частоты. Уровни низкочастотного сигнала выбра-

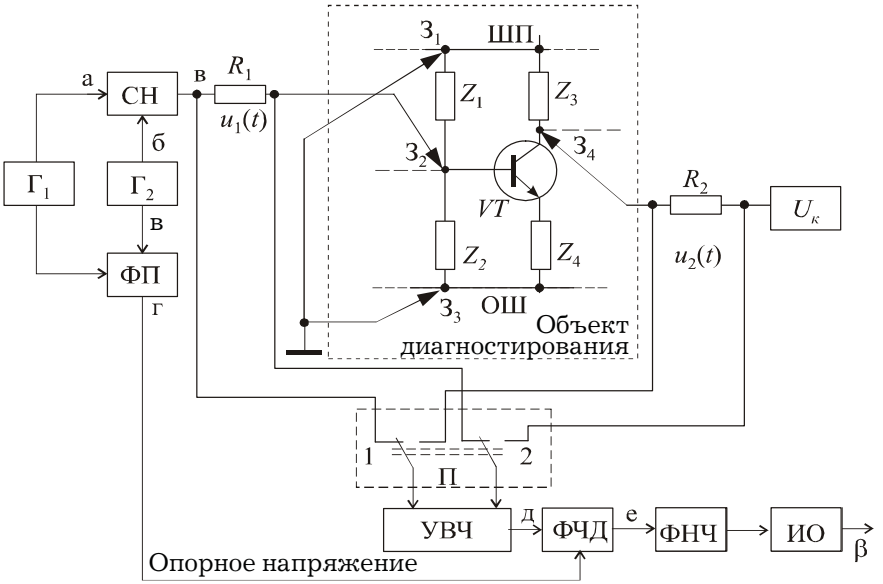


Рисунок 7.15 — Схема для измерения коэффициента усиления тока

ны таким образом, чтобы во время первого полупериода транзистор был надежно закрыт, а во время второго — находился в активной области. В первом полупериоде падения напряжения на резисторах R_1 и R_2, соответственно $u_1(T_1)$ и $u_2(T_1)$, пропорциональны только токам $i_{шб}$ и $i_{шк}$, протекающим через шунтирующие транзистор цепи Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4:

$$u_1(T_1) = i_{шб}R_1;\ u_2(T_1) = i_{шк}R_2.$$

Во втором полупериоде эти напряжения $u_1(T_2)$ и $u_2(T_2)$ изменяются за счет токов базы $i_б$ и коллектора $i_к$ открытого транзистора:

$$u_1(T_2) = (i_{шб} + i_б)R_1;\ u_2(T_2) = (i_{шк} + i_к)R_2.$$

С помощью усилителя высокой частоты УВЧ выделяют высокочастотные составляющие напряжений (на рисунке 7.16, д показано для напряжения в цепи базы). Разность амплитуд высокочастотного сигнала за первый и второй полупериоды на-

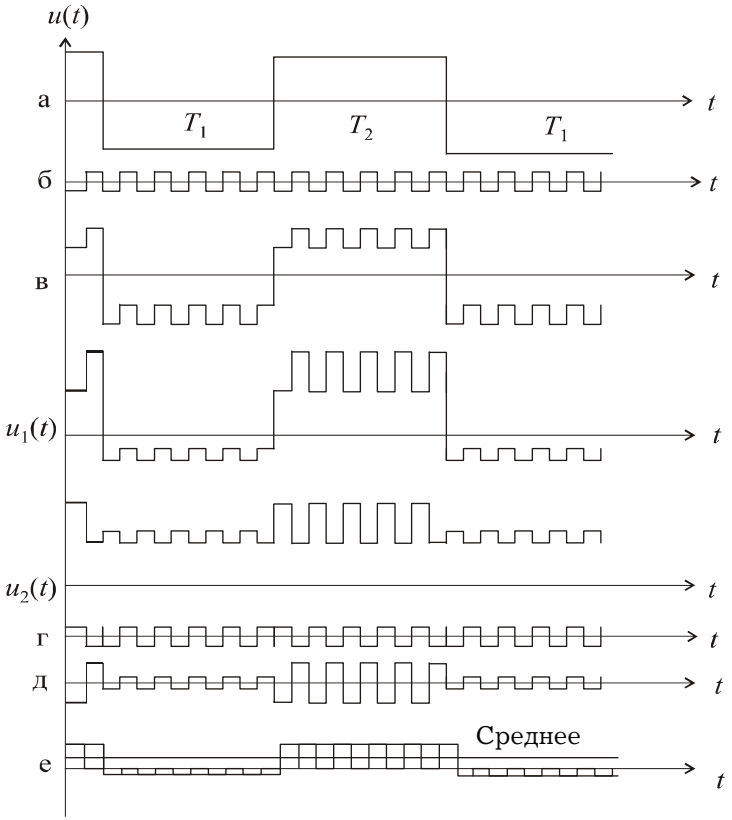


Рисунок 7.16 — Временны́е диаграммы работы схемы (рисунок 7.15)

пряжения $Г_1$ зависит только от токов транзистора. Выделение разностного сигнала осуществляется с помощью фазочувствительного детектора ФЧД. Для этого в моменты переключения низкочастотного сигнала $Г_1$ изменяется на противоположную фаза его опорного напряжения (рисунок 7.16, г), сформированного из сигнала генератора $Г_2$ с помощью фазового переключателя ФП. В результате выходное напряжение УВЧ в течение первого полупериода преобразуется фазочувствительным детектором в отрицательное напряжение, а во время второго полупериода — в положительное (рисунок 7.16, е). Среднее

значение выходного напряжения ФЧД, выделяемое фильтром низкой частоты ФНЧ, пропорционально токам открытого транзистора. При измерении тока базы переключатель П находится в положении “1”, а при измерении тока коллектора — в положении “2”. Измеритель отношений ИО вычисляет значение h_{21}, равное отношению выходных напряжений ФНЧ при положениях “1” и “2”переключателя П.

С целью упрощения реализации ИО возможна параллельная подача напряжений на его входы. Для этого в схеме необходимо использовать два идентичных канала УВЧ-ФЧД-ФНЧ. Необходимости в измерении отношения напряжений можно избежать, если поддерживать постоянным ток базы открытого транзистора. Для этого может быть применена отрицательная обратная связь с выхода ФНЧ базового канала, управляющая амплитудой высокочастотного напряжения генератора $Г_2$.

С помощью рассмотренного преобразователя возможна также оценка нелинейности характеристик транзистора. Для этого уровни открывающего низкочастотного сигнала выбираются таким образом, чтобы транзистор работал в необходимых точках активной области. Разность коллекторных токов в этом случае пропорциональна нелинейности характеристики транзистора. Метод можно применять также для контроля полевых транзисторов. Их усилительные свойства характеризуют крутизной $S = \frac{\Delta i_с}{\Delta u_{сз}}$, равной отношению изменения тока стока $\Delta i_с$ к вызвавшему его изменению напряжения $\Delta u_{сз}$ сток-затвор. Для измерения крутизны достаточно исключить из схемы резистор R_1 и базовый канал. Изменение напряжения $\Delta u_{сз}$ сток-затвор рано амплитуде сигнала генератора $Г_2$ и не зависит от шунтирующих цепей ОД. Изменение тока стока $\Delta i_с$ определяют так же, как и у биполярных транзисторов. Оно пропорционально крутизне. Необходимость вычисления отношения отпадает.

Недостатком рассмотренной схемы является зависимость режима работы транзистора от сопротивления шунтирующих цепей вследствие падений напряжения на калиброванных резисторах R_{01} и R_{02}. Этот недостаток устраняется введением

схемы на операционном усилителе, совмещающей задание напряжения на нагрузке с преобразованием тока нагрузки в напряжение и ограничением значения этого тока (рисунок 7.17).

Задаваемые напряжения коллекторного питания и тестовое от генератора ГИ, совпадающее по форме с напряжением в точке “в” схемы на рисунке 7.15, подаются на неинвертирующие входы соответственно усилителей $ОУ_2$ и $ОУ_1$. В силу свойств усилителя такие же напряжения устанавливаются на их инвертирующих входах. Их подают на нагрузку. Ток нагрузки (ток базы или коллектора проверяемого транзистора) вызывает на калиброванном резисторе в цепи обратной связи ОУ падение напряжения. В качестве измеряемого сигнала используют напряжение между неинвертирующим входом и выходом усилителя, которое прямо пропорционально току транзистора.

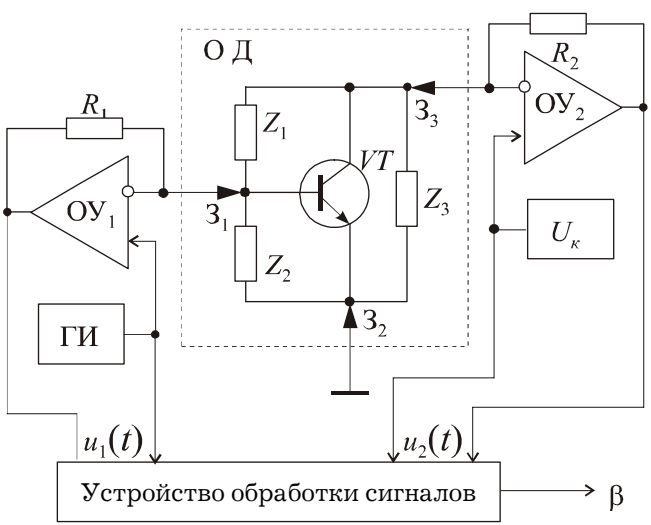


Рисунок 7.17 — Схема с точным заданием напряжений на электродах

Основная проблема, возникающая при практической реализации преобразователя, состоит в выделении напряжений, пропорциональных токам открытого транзистора. Как правило, токи

через шунтирующие элементы Z_1, Z_2, Z_3 в несколько раз превышают ток базы и соизмеримы с током коллектора. Необходимо измерять малое значение разности двух больших переменных напряжений, действующих в разных полупериодах. Усугубляет эту проблему наличие низкочастотного сигнала, служащего для задания режима работы проверяемого транзистора по постоянному току, который также в несколько раз превышает сигнал высокочастотный. Полностью отфильтровать высокочастотный сигнал от низкочастотного, особенно когда они оба импульсные, не удается. Остаточное после фильтрации напряжение низкочастотного сигнала искажает результат измерения токов.

Решение проблемы разделения сигналов за счет использования высокочастотного сигнала синусоидальной формы нельзя признать удовлетворительным, так как ведет к необходимости применения достаточно сложных узкополосных усилителей. Несколько проще выделить напряжения, пропорциональные токам открытого транзистора, можно при использовании схем выборки и хранения СВХ или двукратного фазочувствительного детектирования.

В первом варианте требуются четыре схемы выборки и хранения (СВХ) в каждом канале (рисунок 7.18), которые формируют напряжение постоянного тока, равное мгновенному значению входного напряжения в момент подачи управляющего сигнала.

Управляющие сигналы СВХ показаны на рисунке 7.19.

$СВХ_1$ и $СВХ_2$ канала работают в полупериоде T_1, когда проверяемый транзистор закрыт, и запоминают значения напряжения $u_1(t)$ соответственно во время положительных и отрицательных полупериодов напряжения высокочастотного генератора, входящего в состав ГИ (рисунок 7.17). Разность выходных сигналов $СВХ_1$ и $СВХ_2$, выделяемая узлом вычитания напряжений $УВ_1$, равна амплитуде высокочастотного сигнала, пропорционального току шунтирующих цепей. $СВХ_3$ и $СВХ_4$ работают в полупериоде T_2, когда проверяемый транзистор открыт. Разность их выходных сигналов, выделяемая $УВ_2$, пропорциональна сумме токов открытого транзистора и шун-

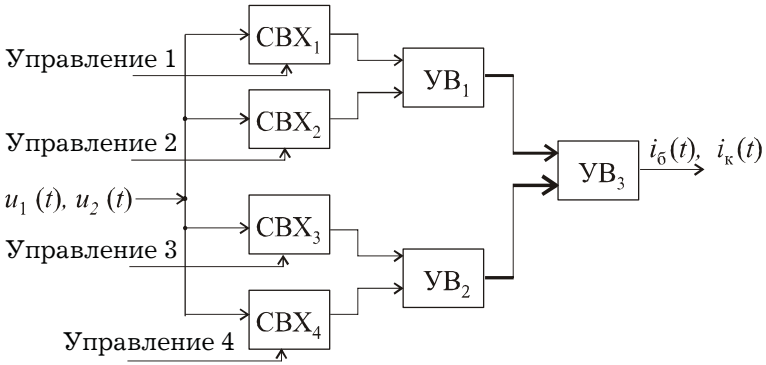


Рисунок 7.18 — Применение схем выборки и хранения для обработки сигналов

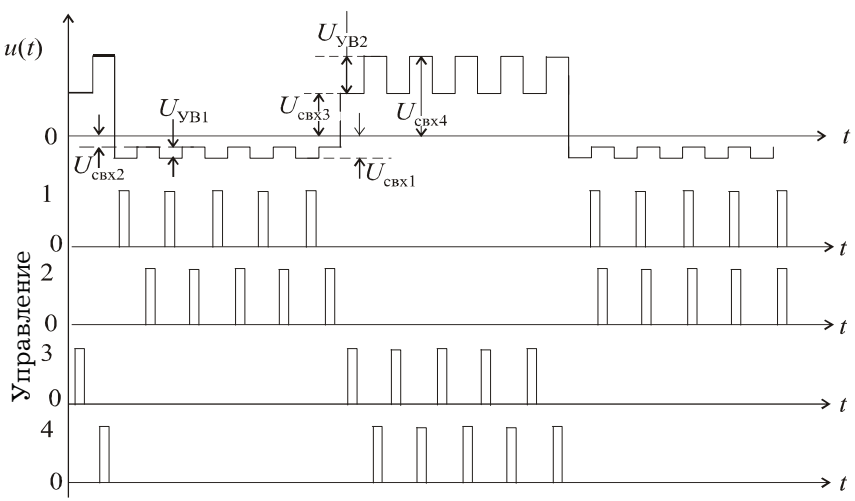


Рисунок 7.19 — Временны́е диаграммы работы схемы (рисунок 7.18)

тирующих цепей. С помощью УВ$_3$ формируют напряжение постоянного тока, зависящее только от тока транзистора.

Во втором варианте (на рисунке 7.20 приведена схема одного канала) с помощью разделительной цепи C_1R_1 исключают постоянную составляющую сигнала $u(t)$ (рисунок 7.21), обус-

ловленную напряжением коллекторного питания $U_к$ и влиянием низкочастотных токов открытого транзистора.

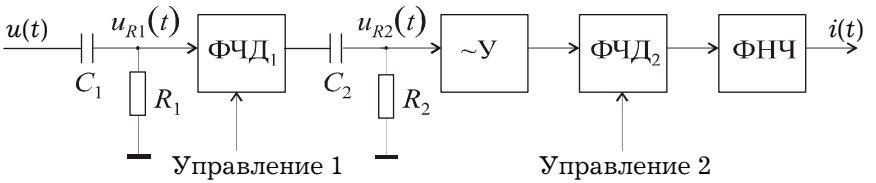


Рисунок 7.20 — Применение ФЧД для обработки сигналов

Полученное переменное напряжение u_{R1} поступает на ФЧД$_1$, опорным напряжением которого служат низкочастотные импульсы Г$_1$ ($U_{у1}$ на рисунке 7.21). С помощью разделительной цепи C_2R_2 выделяют переменную составляющую u_{R2} выходного сигнала ФЧД$_1$, разность амплитуд которой в полупериодах T_1 и T_2 пропорциональна току открытого транзистора. Этот сигнал усиливают и подвергают повторному фазочувствительному детектированию в ФЧД$_2$. Опорный сигнал ФЧД$_2$ ($U_{у2}$ на рисунке 7.21) формируют так же, как и в схеме на рисунке 7.15. В результате среднее значение выходного напряжения ФЧД$_2$, выделяемое фильтром ФНЧ ($u_{ФЧД2}$ на рис. 7.21), пропорционально измеряемому току.

Этот вариант выгодно отличается возможностью усиления сигнала на переменном токе. Требования к разделительным RC-цепям намного ниже, чем к УВЧ в схеме на рисунке 7.15, так как их задача состоит только в исключении постоянной составляющей сигналов, а не в выделении высокочастотного сигнала на фоне низкочастотного.

С помощью схемы на рисунке 7.20 возможно измерение коэффициента усиления тока с погрешностью не более 10% при сопротивлениях шунтирующих цепей не менее 100 Ом. Вместе с тем применение рассмотренного преобразователя в универсальных АСКД ограничено его сложностью.

Упрощение преобразователя возможно при переходе к контролю статического коэффициента усиления. Структурная схема преобразователя не отличается от схемы на рисун-

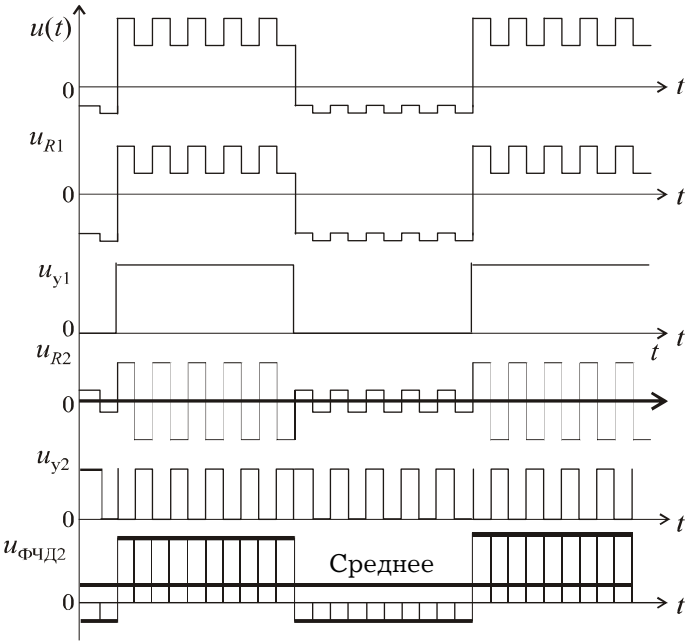


Рисунок 7.21 — Временны́е диаграммы работы схемы (рисунок 7.20)

ке 7.17, изменена лишь форма тестового сигнала в цепи базы проверяемого транзистора. Временны́е диаграммы, поясняющие работу, приведены на рисунке 7.22, где показана последовательность разнополярных импульсов тестового воздействия, вырабатываемого ГИ, и выходные напряжения операционных усилителей $ОУ_1$ и $ОУ_2$. Амплитуда импульсов одной полярности достаточна для надежного запирания транзистора, а амплитуда импульсов противоположной полярности задает рабочую точку транзистора в активной области.

Для исключения возможности саморазогрева транзистора выбирают скважность импульсов $\theta \geq 10$ при токе эмиттера, равном или большем 1 мА, и $\theta \geq 2$ при токе до 1 мА. Длительность импульсов выбирают исходя из частотных свойств транзистора таким образом, чтобы не было заметно искажения их формы. При

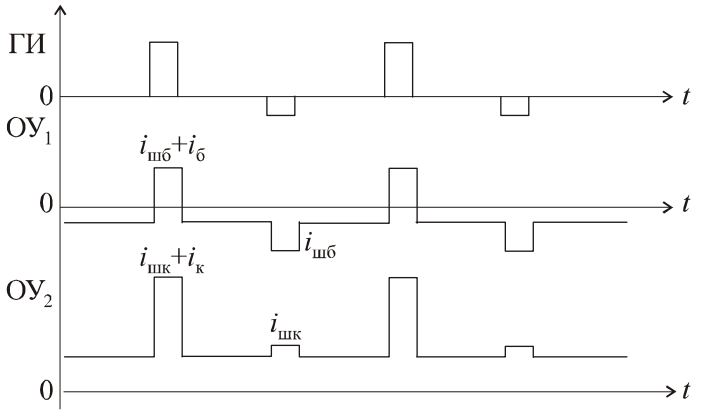


Рисунок 7.22 — Временны́е диаграммы работы схемы при контроле статического коэффициента усиления тока

этом результат соответствует значению β, измеренному на постоянном токе. Варианты обработки сигналов, несущих информацию о токах, принципиально не отличаются от рассмотренных ранее.

Существенно упростить преобразователь можно, если измерять статический коэффициент усиления тока при напряжении база-коллектор, равном нулю. Полученное значение β на 15–20% ниже справочного, но для оценки исправности при внутрисхемном контроле это непринципиально и при необходимости может быть учтено в программе контроля. Из схемы на рисунке 7.17 исключается источник напряжения $U_к$ и соединяются между собой неинвертирующие входы операционных усилителей (рисунок 7.23).

Тестовый импульсный сигнал ГИ тот же, что и ранее (см. рисунок 7.22), но не содержит постоянной составляющей, т. е. амплитуды импульсов положительной и отрицательной полярностей равны. В качестве сигнала, зависящего от токов, можно использовать выходное напряжение $ОУ_1$ и $ОУ_2$, а не падения напряжения на калиброванных резисторах, что намного проще. Токи открытого транзистора приводят к появлению постоянной составляющей этого напряжения (рисунок 7.24), которая легко выделяется с помощью фильтров низкой частоты.

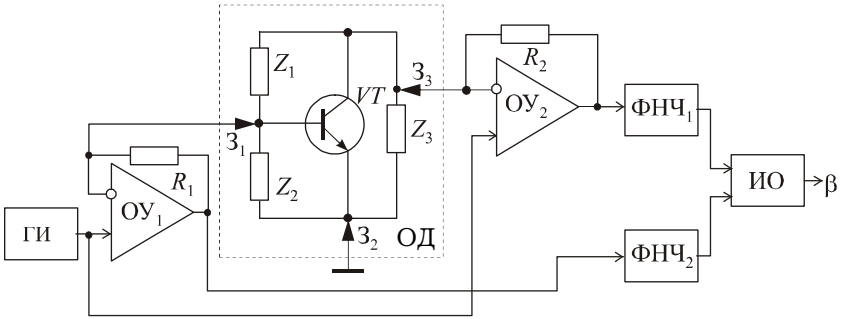


Рисунок 7.23 — Измерение статического коэффициента усиления тока при нулевом напряжении база-коллектор

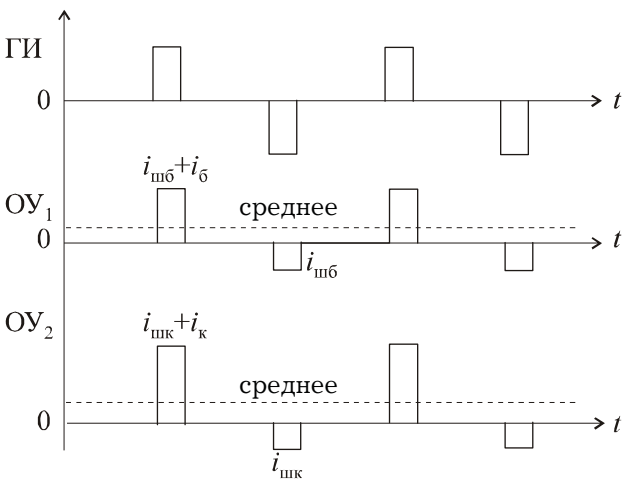


Рисунок 7.24 — Временны́е диаграммы работы схемы (рисунок 7.23)

7.3 Диагностирование интегральных схем в составе печатного узла

Поверка соответствия характеристик микросхем (МС) паспортным данным проводится регламентированными стандартами и техническими условиями методами в строго определенных схемах. Большая номенклатура параметров и методов

их измерения практически исключают возможность измерения характеристик МС различных классов с помощью одной универсальной системы.

Для решения задачи внутрисхемного диагностирования МС необходим иной подход. С одной стороны, измерение параметров может быть заменено контролем функционирования, что существенно упрощает задачу. С другой стороны, необходимо обнаружение специфических дефектов, возникающих в процессе замены МС при ремонте, таких как неправильное ориентирование корпуса МС при установке в печатный узел, ошибочная замена одного типа МС другим, замыкание или обрыв выводов. Желательно, чтобы такие дефекты были обнаружены до включения схемы под рабочее напряжение. В противном случае они могут стать причиной выхода из строя других исправных элементов схемы, т. е. причиной появления вторичных дефектов.

Таким образом, после ремонта систем управления диагностирование МС должно проходить несколько этапов. На первом этапе проводится проверка правильности установки МС в печатный узел, используя представление МС пассивной моделью. Затем возможна проверка отсутствия коротких замыканий цепей, критических для исправности соседних элементов, и проверка функционирования МС при пониженном напряжении питания. На заключительном этапе проверяют функционирование МС под рабочим напряжением.

Проверка правильности установки МС в печатный узел проводится по известному сопротивлению одной или нескольких цепей между внешними выводами МС. Рассмотрим это на конкретных примерах для МС операционных усилителей К553УД1А и 140УД1. Правильность установки операционного усилителя К553УД1А (рисунок 7.25) в корпусе *DIP* (рисунок 7.26) можно проверить по сопротивлению между выводами 6 и 9. Оно определяется последовательным соединением резисторов R_{12}, R_{14} и должно быть в диапазоне 7–8 кОм. Для его проверки выбор полярности напряжения воздействия должен обеспечивать закрытое состояние перехода база-эмиттер

транзистора VT_{12}. Значение этого напряжения должно быть не более 0,5 В, для того чтобы не вызвать открывания переходов транзисторов схем, соединенных с проверяемой МС.

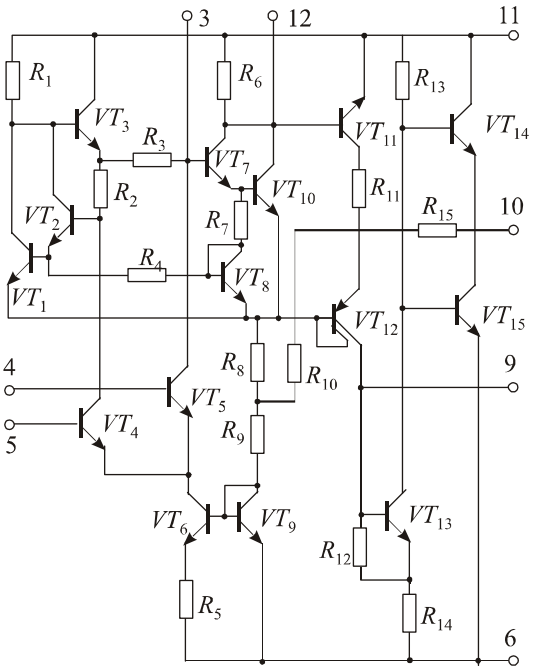


Рисунок 7.25 —
Схема усилителя К553УД1А

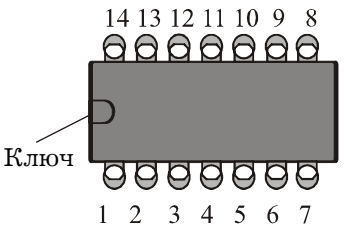


Рисунок 7.26 —
Корпус *DIP*

При неправильной установке МС ключом в противоположную сторону место выводов 6 и 9 займут выводы 2 и 13. Они не задействованы, и сопротивление между ними — сопротивление изоляции платы и корпуса МС. Правильность установки также может быть проверена по сопротивлению R_6 между выводами 11 и 12.

При установке МС 140УД1 (рисунок 7.27) в корпусе Т0100 (рисунок 7.28) возможно смещение по кругу выводов. Для исключения ошибок целесообразен контроль нескольких цепей, например проверка сопротивления соединения резисторов R_{11}

и R_{12} между выводами 1 и 5, а также сопротивления R_8 между выводами 7 и 12 (см. рис. 7.27).

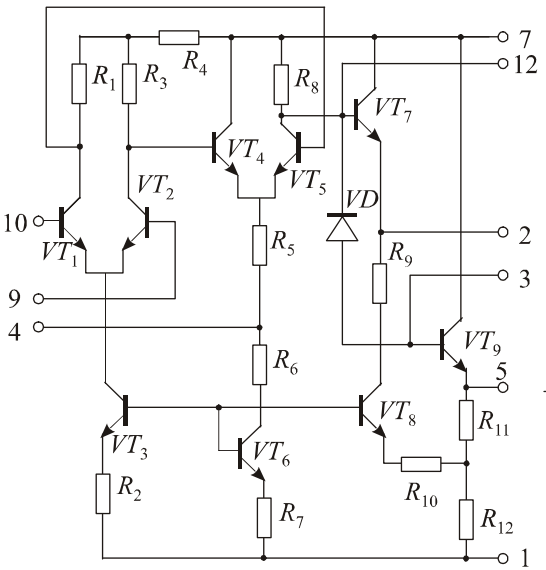


Рисунок 7.27 —
Схема усилителя 140УД1

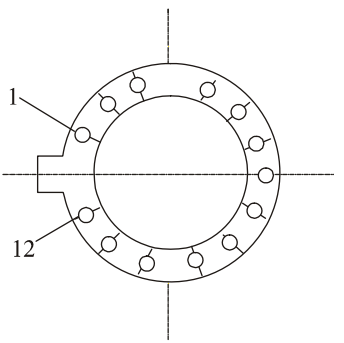


Рисунок 7.28 —
Корпус Т0100

Для проверки правильности установки цифровых ТТЛ микросхем можно воспользоваться измерением прямого и обратного сопротивлений защитного диода во входной цепи. Правильность установки МС со связанными эмиттерами проверяют по сопротивлению цепи из p-n перехода и резистора одного из входных транзисторов и т. д.

Поверка отсутствия коротких замыканий цепей МС и локализация места их появления является одной из наиболее сложных задач. Появление коротких замыканий возможно как внутри МС вследствие ее выхода из строя, так и во внешних цепях, например, из-за случайного замыкания токоведущих проводников при ремонте. Во всех случаях появление короткого замыкания препятствует проведению диагностирования всех компонентов печатного узла, электрически связанных с

точкой замыкания, и может привести к появлению вторичных дефектов.

Появление короткого замыкания цепи питания внутри МС может быть обнаружено путем оценки потребляемого тока. Такая оценка одновременно позволяет обнаружить появление второй типовой неисправности — обрыва цепи питания. Для решения задачи целесообразно воспользоваться методами измерения параметров МЭЦ (рисунок 7.29).

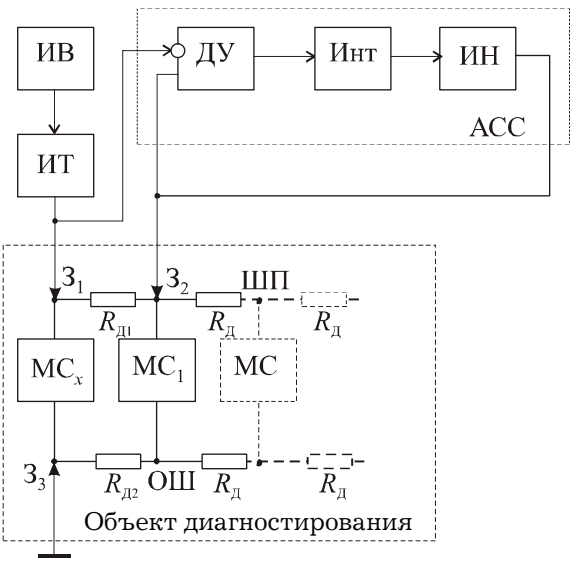


Рисунок 7.29 — Схема для измерения тока питания микросхемы

Печатный узел можно рассматривать как многополюсную электрическую цепь. Микросхема $МС_x$, ток которой измеряется, соединена с остальными компонентами по цепи питания через сопротивления $R_{д1}$ участка дорожки шины питания (ШП) и $R_{д2}$ участка дорожки общей шины (ОШ). Специфика задачи заключается в том, что эти сопротивления очень малы и составляют тысячные доли Ома. Проверку целесообразно проводить при минимально возможном для обеспечения функционирования исправной ИС напряжении питания, вырабатываемом ис-

точником воздействия ИВ. Для уменьшения влияния соседних МС на результат измерения необходимо свести к минимуму ток, ответвляющийся в $R_{д1}$, и, следовательно, разность потенциалов на его концах между точками подключения контактных зондов (см. выражение 7.2). Этого достигают при использовании в качестве повторителя напряжения астатической следящей системы АСС.

ИВ через измеритель тока ИТ и зонды $З_1$, $З_3$ подключается к точкам соединения (пайкам) $МС_x$ с шинами ШП и ОШ. К зонду $З_1$ подключен также вход АСС, содержащей дифференциальный усилитель ДУ, интегратор Инт и регулируемый источник напряжения ИН. Выход ИН через зонд $З_2$ подключается к точке соединения с ШП (пайке) ближайшей к зонду $З_1$ микросхемы $МС_1$. Следящая система устанавливает равной нулю разность потенциалов на концах участка $R_{д1}$ шины питания между $З_1$ и $З_2$ не зависимо от токов, потребляемых остальными МС печатного узла.

Погрешность измерения тока зависит от точности поддержания равенства потенциалов на концах участка $R_{д1}$ шины питания, на что в свою очередь влияют контактные сопротивления и разность потенциалов зондов. Реально возможно поддержание разности потенциалов с погрешностью 1–5 мкВ. При этом погрешность оценки тока потребления составляет 2–10 мА. Этого достаточно для обнаружения короткого замыкания.

Погрешность измерения тока зависит от конструкции и силы прижима зондов к плате. Для устранения этого недостатка можно использовать схему подключения (рисунок 7.30) с разделением токовых и потенциальных цепей. В ней контактные сопротивления дополнительных зондов $З_4$ и $З_5$, через которые измеряют разность потенциалов на участке $R_{д1}$, включены последовательно с высоким входным сопротивлением ДУ и практически не влияют на работу системы независимо от качества контактирования. Погрешность измерения тока при тех же аппаратных средствах может быть снижена до 0,2–1 мА.

Дальнейшего повышения точности измерения можно достичь за счет исключения влияния на результат измерения

контактной разности потенциалов и напряжений дрейфа и смещения нуля ДУ при использовании дополнительного тестового воздействия переменного тока. Структурная схема измерителя при этом существенно не изменяется, просто на напряжение, вырабатываемое ИВ, накладывается небольшая переменная составляющая, которая служит тестовым сигналом.

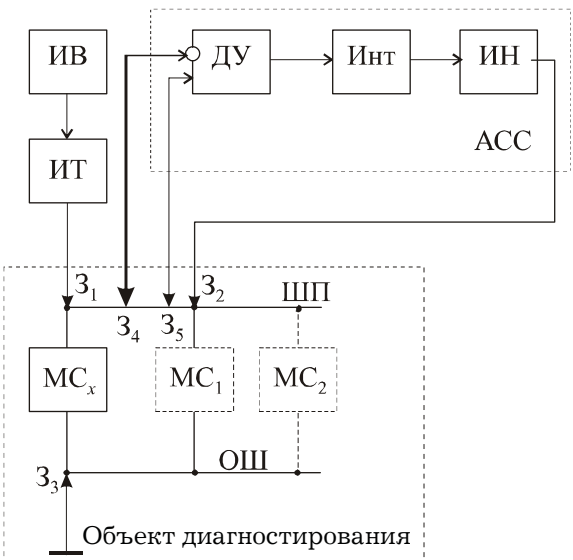


Рисунок 7.30 — Схема для измерения тока с разделением токовых и потенциальных цепей

В реальной схеме компоненты могут быть включены параллельно по цепи питания по обе стороны от проверяемой микросхемы $МС_x$. В этом случае необходимо учитывать то, что контактные сопротивления зондов намного больше сопротивления ШП между точками их подключения. В силу этого использование внешних по отношению к печатному узлу перемычек для объединения точек подключения компенсирующего сигнала ИН по обе стороны от проверяемой $МС_x$ в одну неэффективно. Необходимо применение двух АСС.

Для локализации места короткого замыкания на общую шину какого-либо проводника объекта диагностирования тока можно применять процедуру последовательного поиска неисправностей с помощью упрощенной схемы (рисунок 7.31).

Пусть, например, обнаружено короткое замыкание на ОШ в точке “0”, к которой подключены три МС. Для локализации места замыкания сначала зонды $З_1$–$З_5$ подключают к печатному проводнику, соединяющему точку “0” с $МС_1$. Через зонды $З_1$ и $З_6$ подается тестовое воздействие от источника переменного тока I_0. Узел сравнения УС сравнивает падения напряжений на участках проводника между зондами $З_2$–$З_3$ и зондами $З_4$–$З_5$. Результат сравнения позволяет определить, с какой стороны от зонда $З_1$ находится место короткого замыкания, со стороны $МС_1$ или одной из двух оставшихся микросхем. В последнем случае процедуру продолжают при подключении зондов между точкой “0” и одной из оставшихся МС. При использовании тестового сигнала частотой порядка нескольких десятков килогерц для подключения можно использовать емкостные контакты с проводниками печатного узла.

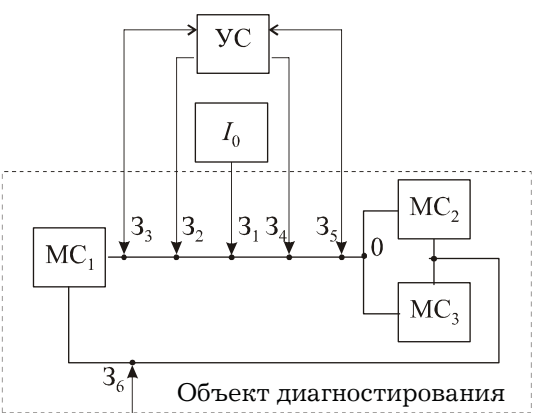


Рисунок 7.31 — Схема для локализации места короткого замыкания

Проверка функционирования МС проводится под рабочим напряжением. Цифровые МС поверяются путем оценки

реакции на входные тестовые двоичные последовательности, синтез которых представляет собой самостоятельную задачу. Специфика внутрисхемного контроля проявляется в том, что на входах проверяемой МС присутствуют сигналы с других элементов печатного узла. Проблема задания необходимых тестов решается за счет применения источников тестовых сигналов с малым внутренним сопротивлением, существенно меньшим выходного сопротивления собственных источников сигналов проверяемой аппаратуры. Источник тестового сигнала замыкает на себя собственные сигналы аппаратуры и устанавливает на входах проверяемой МС требуемую двоичную последовательность. Для исключения возможности перегрузки и выхода из строя предшествующих МС средняя мощность тестовых сигналов должна быть ограничена за счет длительности. Однако обеспечить малую длительность импульса в ряде случаев не удается из-за паразитных реактивностей схемы и возникающих переходных процессов. Увеличение длительности тестового импульса становится возможным при питании схемы пониженным напряжением, для ТТЛ логики 2–2,5 В. Снижение уровня напряжения питания приводит к изменению режима работы транзисторов МС. Открытые транзисторы выходят из состояния насыщения. Их внутренне сопротивление возрастает, что приводит к уменьшению тока от выходных транзисторов предшествующей МС.

Аналоговые МС весьма разнообразны. Рассмотрим особенности контроля наиболее представительного класса аналоговых МС — операционных усилителей. При работе ОУ в линейной области без ограничения сигналов абсолютное значение напряжения $U_{\text{вхд}}$ между прямым и инвертирующим входами ОУ не превышает предельно допустимого для данного типа ОУ значения $U_{\text{см}}$ напряжения смещения нуля:

$$\left|U_{\text{вхд}}\right| \le \left|U_{\text{см}}\right|. \tag{7.3}$$

Примерно в 80% случаев полярность $\text{sgn}(U_{\text{вхд}})$ этого напряжения соответствует полярности $\text{sgn}(U_{\text{вых}})$ выходного напряжения:

$$\mathrm{sgn}(U_{\text{вхд}}) = \mathrm{sgn}(U_{\text{вхп}} - U_{\text{вхи}}) = \mathrm{sgn}(U_{\text{вых}}). \qquad (7.4)$$

где $U_{\text{вхп}}$, $U_{\text{вхи}}$ — напряжения соответственно на прямом и инвертирующем входах.

В схемах, где ОУ работает с ограничением входного сигнала при максимально допустимых входных напряжениях неравенство (7.3) не соблюдается. Равенство (7.4) всегда соблюдаются у исправных ОУ, а у неисправных — случайным образом. Значения напряжений U_j на j-х выводах промежуточных каскадов, предназначенных для подключения внешних цепей частотной коррекции и балансировки нуля, у исправных ОУ могут изменяться в пределах достаточно небольшого диапазона значений $U_{jд}$. Ширина диапазона зависит от уровня входного напряжения ОУ, напряжения питания и режима работы — в линейной области без ограничения входного сигнала или в нелинейной области с ограничением сигнала. В качестве примера в таблице 7.1 приведены границы диапазонов допустимых значений напряжений для некоторых типов ОУ при напряжении питания ±15 В.

Таблица 7.1

Диапазоны допустимых значений напряжений на выводах ОУ

Тип ОУ	Вывод	Границы диапазона допустимых значений напряжений на выводах ОУ, [В]					
		при $U_{вх} = 0$		в линейной области		в нелинейной области	
		max	min	max	min	max	min
К553УД1	3	+10,17	+9,89	+10,37	+9,69	+11,27	+8,39
	9	-14,33	-14,18	-14,53	-13,98	-14,97	-13,38
	12	+11,03	+10,71	+11,33	+10,41	+14,97	+9,11
К553УД2	3	-13,83	-13,44	-13,83	-13,44	-14,84	-12,14
	9	-13,87	-13,54	-13,87	-13,54	-14,37	-13,04
К140УД6	1, 5	-14,91	-14,82	-14,95	-14,89	-14,84	-14,95
К544УД1	1, 8	+14,86	+14,79	+14,86	+14,79	+14,95	+14,75

Изложенные соображения положены в основу алгоритма внутрисхемного диагностирования ОУ (рис. 7.32):

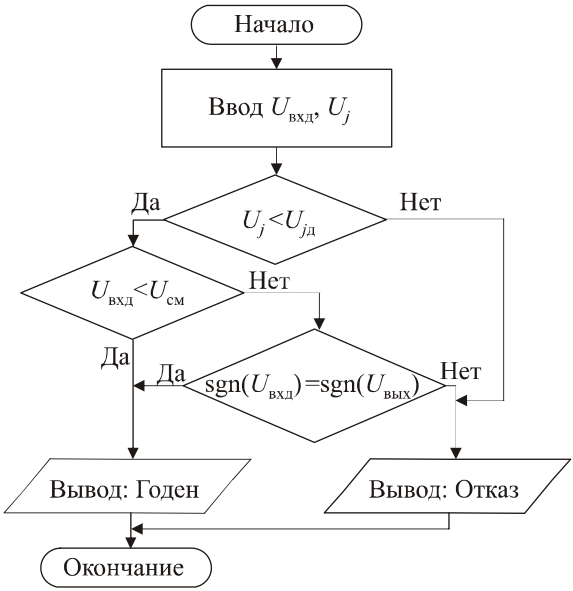


Рисунок 7.32 — Алгоритм внутрисхемного диагностирования ОУ

1. Проверяется соответствие напряжений U_j диапазону допустимых значений $U_{jд}$;

2. Выделяется входной дифференциальный сигнал $U_{вхд}$ и проверяется выполнение условия (7.3);

3. При несоблюдении условия (7.3) проверяется выполнение условия (7.4);

4. В случае невыполнения условий п. 1 или одновременного невыполнения условий п. 2 и п. 3 принимается решение “Отказ”;

5. При выполнения условий п. 1 и п. 2, или п. 1 и п. 3 принимается решение “Годен”.

При реализации алгоритма диагностирования следует учесть, что в том случае, когда в рабочей схеме на входе ОУ присутствует сравнительно высокочастотное напряжение, из-за фазовых искажений и задержки сигналов в исправном усилителе возможно в отдельные моменты времени нарушение условия (7.4). Для исключения возможности вследствие этого

неправильного диагноза в устройство для диагностирования (рисунок 7.33) вводят фильтры низкой частоты ФНЧ$_1$ и ФНЧ$_2$.

Фильтр ФНЧ$_2$ выделяет постоянную составляющую входного дифференциального сигнала, сформированного в узле вычитания УВ, подключенном непосредственно к входам контролируемого ОУ. ФНЧ$_1$ выделяет постоянную составляющую выходного сигнала. В двухпороговом компараторе ДК$_2$ происходит проверка условия (7.3) путем сравнения $U_{вхд}$ с положительным и отрицательным значением $U_{см}$. Так как предельно допустимое значение напряжения смещения нуля ОУ зависит от напряжения питания ОУ, то пороговые напряжения формируются из напряжений E_1 и E_2 питания ОУ с помощью делителя напряжения ДН.

При выполнении условия (7.3) сигнал с выхода 2 ДК$_2$ поступает на управление узлом сравнения полярностей УСП. На выходе последнего вырабатывается сигнал “Годен”. Если условие не выполняется, то на выходе 1 ДК$_2$ появляется напряжение, полярность которого соответствует полярности входного дифференциального сигнала sgn($U_{вхд}$). В УСП это напряжение сравнивается с выходным напряжением ФНЧ$_1$, полярность которого соответствует полярности выходного сигнала ОУ sgn($U_{вых}$). В зависимости от выполнения условия (7.4) УСП вырабатывает сигналы “Годен” или “Отказ”. Компаратор ДК$_1$ сравнивает напряжения на выводах промежуточных каскадов U_J с предельно допустимыми значениями, сформированными в ДН, и формирует сигналы “Годен” или “Отказ”. Схема & вырабатывает сигнал “Годен” только в случае одновременного присутствия аналогичных сигналов на выходах ДК$_1$ и УСП.

При контроле ОУ, имеющих выводы для подключения внешнего балансировочного потенциометра, например серии 544, возможно при неправильной установке потенциометра значительное смещения нуля. Вследствие этого исправный ОУ может быть забракован. Для исключения ошибки следует замыкать накоротко выводы балансировки с помощью дополнительного ключа.

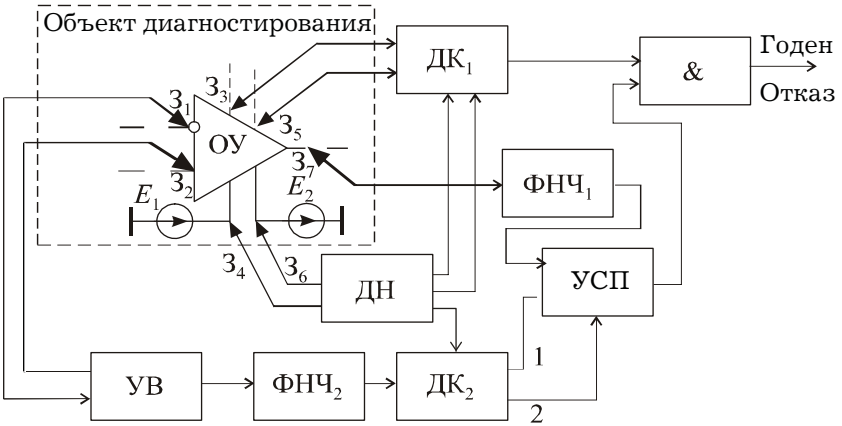


Рисунок 7.33 — Схема для внутрисхемного диагностирования ОУ

Достоверность контроля исправности ОУ, работающих в линейном режиме, рассмотренным методом не менее 0,99, а в нелинейном с ограничением сигналов — 0,95. Достоверность контроля исправности ОУ, не имеющих промежуточных выводов, не превосходит 0,8.

Для повышения достоверности необходим переход к оценке параметров ОУ с использованием модели с зависимым источником энергии. На собранной плате невозможно включить ОУ в стандартную схему, предусмотренную нормативными документами для измерения его параметров вне схемы. Этому препятствуют соединенные с усилителем компоненты печатного узла. Усилитель в составе печатного узла можно проверить, охватывая его дополнительной резистивной обратной связью (на рисунке 7.34 через R_1 и R_2). О работоспособности ОУ судят по выделенной пиковым детектором ПД реакции на тестовый импульсный сигнал, вырабатываемый генератором импульсов ГИ.

Возможности такого метода контроля ограничены. Во-первых, практически невозможно точно задать коэффициент усиления схемы, в которую включен проверяемый ОУ, из-за разброса параметров элементов рабочей схемы, параллельно которым включают дополнительную обратную связь, и огра-

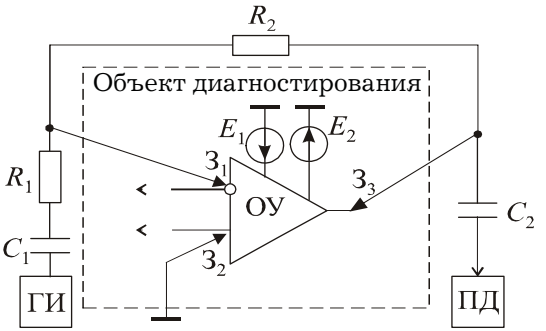


Рисунок 7.34 — Схема для оценки коэффициента усиления ОУ

ничений, накладываемых предельно допустимой нагрузочной способностью активных элементов ОД на минимальные значения сопротивления резисторов R_1 и R_2. Во-вторых, достаточно сложно выделить реакцию ОУ на импульсный тестовый сигнал на фоне возможных рабочих сигналов.

Гораздо большие возможности для диагностирования ОУ открывает сочетание стандартного метода измерения коэффициента K_x усиления ОУ с заданием непосредственно на вход ОУ тестового воздействия, аналогичного воздействию, подаваемому при контроле цифровых МС. Специфика контроля коэффициента усиления K_x заключается в том, что значения K_x велики (до 10^6) и могут различаться на несколько порядков у исправных усилителей. Отсюда следует, что амплитуда тестового воздействия не может быть постоянной, а должна выбираться автоматически в процессе диагностирования.

Этого достигают за счет охвата контролируемого ОУ отрицательной обратной связью через дополнительный дифференциальный усилитель ДУ (рисунок 7.35). На прямой вход ДУ поступает тестовый сигнал U_0. С выхода ДУ сигнал подается непосредственно на входы контролируемого усилителя. Коэффициент усиления K_x может быть рассчитан исходя из значения тестового сигнала и результата измерения напряжения $U_{\text{ОУ}}$ на выходе ОУ:

$$K_x = \frac{U_{\text{ОУ}}}{(U_0 - U_{\text{ОУ}})K_{\text{ДУ}}}.$$

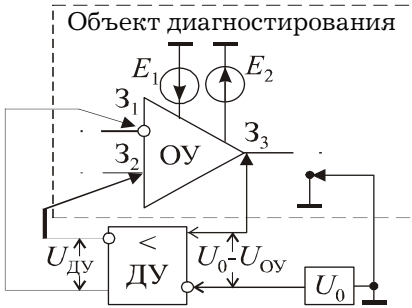


Рисунок 7.35 — Схема для измерения коэффициента усиления ОУ

При большом коэффициенте K_x усиления $U_{ОУ} \approx U_0$, и формулу можно представить в виде

$$K_x = \frac{U_0}{(U_0 - U_{ОУ})K_{ДУ}}.$$

То есть для измерения K_x достаточно измерить разность напряжений на входе ДУ.

Следует отметить некоторые особенности реализации метода, обусловленные спецификой внутрисхемного контроля:

1. При диагностировании ОУ, в отличие от цифровых МС, нет ограничений на длительность тестового сигнала, так как в корректно спроектированной схеме номиналы сопротивлений элементов связи между микросхемами выбирают исходя из допустимой нагрузочной способности МС. Вследствие этого замыкание входов проверяемого ОУ источником тестового воздействия не должно приводить к перегрузкам предшествующих схем.

2. Режим работы ОУ по постоянному току задан рабочей схемой объекта диагностирования, и дополнительного задания режима через элементы схемы контроля не требуется. Более того, гальваническое разделение входов и выходов ДУ позволяет включать его выходы непосредственно между входами ОУ. Благодаря этому возможно применение единой диагностической схемы с тестовым синусоидальным сигналом U_0, для проверки ОУ в различных схемах включения, так как в любом

варианте исключена опасность короткого замыкания выхода ДУ через общую шину.

3. Желательно подключаться к входам ОУ через разделительный конденсатор большой емкости. Такое исполнение позволяет расширить область применения метода. Например, в схеме на рисунке 7.36 исключается возможность перегрузки ОУ по постоянному току через выходное сопротивление ДУ и индуктивность L, соединенную с неинвертирующим входом ОУ.

4. $K_{ДУ}$ используется как масштабный множитель для разных пределов измерения. С уменьшением значения $K_{ДУ}$ увеличивается разность напряжений $U_0 - U_{ОУ}$, т. е. снижаются требования к точности измерения напряжения $U_{ОУ}$. Исходя из изложенного, можно рекомендовать применение в качестве ДУ делителя напряжения с малым выходным сопротивлением или обычного понижающего трансформатора напряжения (рисунок 7.36).

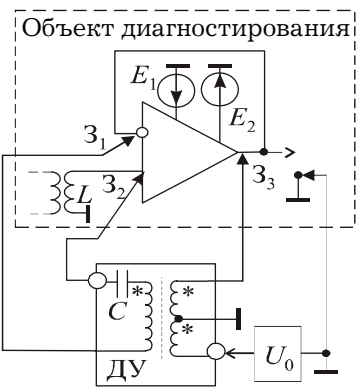


Рисунок 7.36 — Реализация схемы для измерения коэффициента усиления ОУ

7.4 Диагностирование цепей в процессе функционирования объекта

В функционирующем объекте электрические цепи находятся под действием рабочих сигналов. Для диагностирования необходимо выделить из общего сигнала составляющие, однозначно

характеризующие состояние цепи, и измерить их параметры. Контроль цепей возможен как при функциональном диагностировании с использованием только рабочих сигналов объекта, так и при тестовом, когда к рабочим сигналам объекта диагностирования подмешивается тестовое воздействие, не влияющее на функционирование. Во всех случаях решить проблему можно с привлечением методов цифрового спектрального оценивания и регрессионного анализа для аппроксимации временных рядов отсчетов сигналов, получаемых с помощью АЦП.

Отсчеты используются в авторегрессионном уравнении, которое описывает их линейную аппроксимацию:

$$\tilde{u}(i) = -\sum_{m=1}^{p} a_m \tilde{u}(i-m),$$

где $p \le i \le N-1$;

p — порядок аппроксимирующего полинома (модели);

a_m — коэффициенты регрессии.

Из решения уравнения находят коэффициенты линейной регрессии. Если число отсчетов больше, чем минимально необходимо для расчета коэффициентов линейной регрессии $N > p$, то последние могут быть определены с помощью процедуры МНК. Для этого составляется система из p уравнений:

$$\left.\begin{array}{l}
\sum_{i=p}^{N-1} \tilde{u}(i)\tilde{u}(i-1) = -\sum_{m=1}^{p} a_m \sum_{i=p}^{N-1} \tilde{u}(i-1)\tilde{u}(i-m) \\
\sum_{i=p}^{N-1} \tilde{u}(i)\tilde{u}(i-2) = -\sum_{m=1}^{p} a_m \sum_{i=p}^{N-1} \tilde{u}(i-2)\tilde{u}(i-m) \\
\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
\sum_{i=p}^{N-1} \tilde{u}(i)\tilde{u}(i-p) = -\sum_{m=1}^{p} a_m \sum_{i=p}^{N-1} \tilde{u}(i-p)\tilde{u}(i-m)
\end{array}\right),$$

где отсчеты $\tilde{u}(i)$ и коэффициенты регрессии a_m являются действительными числами.

Решение системы удобно представить в матричной форме:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{U}_p^T \mathbf{U}_p)^{-1} (\mathbf{U}_p^T \mathbf{U}),$$

где верхний индекс T означает транспонирование;

$$\mathbf{U}_p = \begin{pmatrix} \tilde{u}(p-1) & \tilde{u}(p-2) & \cdots & \tilde{u}(0) \\ \tilde{u}(p) & \tilde{u}(p-1) & \cdots & \tilde{u}(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{u}(N-2) & \tilde{u}(N-3) & \cdots & \tilde{u}(N-p-1) \end{pmatrix}$$ — матрица отсчетов размерности $(N-p) \times p$;

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix}$$ — вектор коэффициентов регрессии $(p \times 1)$.

Полученные коэффициенты a_m используются для нахождения параметров аппроксимирующего полинома совпадающего в точках отсчета с линейной аппроксимацией, в котором $a_0 = 1$.

Наиболее приемлема для решаемой задачи аппроксимация с использованием детерминированной модели в виде линейной комбинации комплексных экспоненциальных функций (затухающих синусоид):

$$\prod_{m=1}^{p} \left(\dot{\mathbf{z}} - \dot{\mathbf{z}}_m\right) = \sum_{m=0}^{p} a_m z^{p-m}.$$

Она известная как “метод наименьших квадратов Прони” и применяется для цифрового спектрального оценивания сигналов, представленных временными рядами отсчетов. Отличительной особенностью метода Прони являéтся возможность получения спектральной оценки функций, представленных ограниченным числом выборочных данных, существенно более точной по сравнению с широко известным методом дискретного преобразования Фурье. Повышение точности достигается за счет использования для подгонки аппроксимирующих функций к отсчетам, кроме частоты, амплитуды и начальной фазы гармонических колебаний, дополнительного параметра — коэффициента затухания.

В модифицированном методе Прони используется аппроксимирующий полином, состоящий из незатухающих комплек-

сных синусоид, когда коэффициент затухания $\alpha_m = 0$. Порядок модели $2p$ — четный, и аппроксимирующая функция имеет вид

$$\hat{u}(i) = \sum_{m=1}^{p} 2A_m \cos(2\pi f_m \Delta t \cdot i + \theta_m) = \sum_{m=1}^{p} (\dot{\mathbf{h}}_{2m-1}\dot{\mathbf{z}}_{2m-1}^{i} + \dot{\mathbf{h}}_{2m}\dot{\mathbf{z}}_{2m}^{i}).$$

В общем случае в процедуре Прони находят параметры аппроксимирующего полинома $\hat{u}(i)$, представляющего собой линейную комбинацию комплексных экспоненциальных функций

$$\hat{u}(i) = \sum_{m=1}^{p} A_m \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t \cdot i + j\theta_m] = \sum_{m=1}^{p} \dot{\mathbf{h}}_m \dot{\mathbf{z}}_m^{i},$$

где $0 \le i \le N-1$;

p — число комплексных экспонент, используемых для аппроксимации;

A_m, α_m, f_m, θ_m — соответственно, амплитуда, коэффициент затухания, частота и начальная фаза m-го экспоненциального колебания;

$\dot{\mathbf{h}}_m = A_m \exp(j\theta_m)$ — комплексная амплитуда;

$\dot{\mathbf{z}}_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t]$ — комплексная экспонента.

Процедура Прони включает в себя три основных этапа. На первом этапе находят коэффициенты линейной регрессии a_m. На втором этапе формируют полином, подставляя полученные на первом этапе коэффициенты a_m регрессии в характеристическое уравнение

$$\sum_{m=0}^{p} a_m z^{p-m} = 0,$$

где $a_0 = 1$.

Решение характеристического уравнения позволяет по его комплексно сопряженным корням $\dot{\mathbf{z}}_m$ определить частоты и коэффициенты затухания аппроксимирующих колебаний

$$f_m = \frac{1}{2\pi\Delta t}\left|\arctan\frac{\operatorname{Im}\dot{\mathbf{z}}_m}{\operatorname{Re}\dot{\mathbf{z}}_m}\right| \quad [\text{Гц}], \alpha_m = \frac{\ln|\dot{\mathbf{z}}_m|}{\Delta t} \quad [\text{с}^{-1}].$$

На третьем этапе повторно применяют МНК. С использованием полученных значений f_m и α_m составляется система уравнений (6.23), из решения которой находят амплитуды и начальные фазы аппроксимирующих колебаний.

Применение процедуры Прони позволяет в сигнале, действующем в объекте диагностирования, выделить синусоидальные колебания и измерить их параметры — частоту, амплитуду и начальную фазу. Таким образом, обеспечивается измерение параметров цепей на точно известной частоте синусоидального сигнала и исключается влияние на погрешность измерения формы сигнала.

В общем случае требуется измерение параметров гармонического колебания на фоне случайной шумовой помехи общего вида с неизвестной интенсивностью и смеси сигналов, представляющих собой, с точки зрения измерения, квазидетерминированную нестационарную помеху с неизвестной и переменной структурой, изменяющейся случайным образом от измерения к измерению. Продолжительность измерения должна составлять не менее десяти периодов самого низкочастотного колебания, действующего в объекте диагностирования.

Для определения амплитуды, начальной фазы и частоты гармонической составляющей сигналов, действующих в объекте, по которым рассчитываются параметры диагностируемой цепи, аппроксимирующая модель должна быть при нерезонансном сопротивлении цепи не ниже третьего порядка ($p \geq 3$), а при резонансном — пятого ($p \geq 5$). Априори точно задать порядок аппроксимирующего полинома невозможно. Занижение порядка ведет к резкому снижению точности измерения за счет влияния на результат неучтенных компонент сигналов. Неоправданное увеличение порядка приводит к усложнению вычислений, увеличению необходимого для них времени и, что самое главное, к возможности расщепления результатов при использовании большого количества отсчетов, т. е. к аппроксимации измеряемого колебания несколькими. При этом результат измерения может быть искажен в несколько раз.

Порядок модели можно определить, сравнивая относительные значения сингулярных чисел составленной из отсчетов матрицы $(\mathbf{U}_p^T\mathbf{U}_p)$ с элементами $\sum_{i=p}^{N-1}\tilde{u}(i-k-1)\tilde{u}(i-m-1)$ для $i = 0, ..., N$, $m = 0, ..., p-1$ и $k = 0, ..., p-1$. Резкое уменьшение

значений последовательных сингулярных чисел характерно для перехода к аппроксимации нормального шума. В тех случаях, когда уровень шума низок, такой подход дает положительный результат. Однако при малых отношениях сигнал-шум и в случае присутствия в сигнале быстро затухающих экспонент результат оказывается неточным.

Коэффициент подавления белого шума при использовании процедуры Прони для измерения параметров гармонического колебания равен $\sqrt{0{,}5N}$. Влияние квазидетерминированной помехи, связанной с остальными компонентами сигналов объекта, практически ограничивается уменьшением динамического диапазона АЦП, приходящегося на измеряемое колебание.

Повышение помехоустойчивости возможно за счет разбиения интервала измерения на ряд подынтервалов с последующим усреднением результатов, полученных на подынтервалах. Это требует существенного увеличения массива обрабатываемых данных, т. е. увеличения количества отсчетов, что при ограниченном быстродействии АЦП приводит к увеличению общего времени измерения.

В случае тестового диагностирования (там, где это возможно без нарушения функционирования объекта диагностирования) повышение помехоустойчивости достигается за счет использования априорной информации о тестовом воздействии. Для этого аппроксимирующий полином представляется в виде произведения двух полиномов

$$\prod_{m=1}^{p}\left(\dot{\mathbf{z}}-\dot{\mathbf{z}}_m\right)=\sum_{m=0}^{p}a_m\dot{\mathbf{z}}^{p-m}=\left(\sum_{k=0}^{q}c_k\dot{\mathbf{z}}^k\right)\left(\sum_{l=0}^{p-q}b_l\dot{\mathbf{z}}^l\right),$$

где $c_q = 1$ и $b_{p\text{-}q} = 1$.

Первый полином степени q связан с тестовым сигналом, спектр частот которого известен априори. Его степень q равна удвоенному числу гармоник сигнала воздействия (для общего случая воздействия несколькими частотами). Второй полином пониженного порядка образован оставшимися компонентами модели, обусловленными помехами и шумами. Коэффициенты c_k первого полинома используют для фильтрации исходной

последовательности отсчетов $\tilde{u}(i)$. Полученную таким образом новую последовательность

$$\tilde{u}_1(i) = \sum_{k=0}^{q} c_k \tilde{u}(i-k)$$

обрабатывают по обычной процедуре Прони для получения значений частот и коэффициентов затухания корней характеристического уравнения пониженного порядка

$$\sum_{l=0}^{p-q} b_l \dot{\mathbf{z}}^l = 0.$$

На третьем этапе процедуры Прони известные априори q корней и найденные p-q корней подставляют в систему уравнений (6.23), из решения которой определяют по формулам (6.22) амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих реакции объекта диагностирования на тестовое воздействие.

При таком подходе исключена опасность расщепления результатов, связанных с измеряемыми компонентами сигнала. Порядок модели и используемое количество отсчетов ограничены только техническими возможностями аппаратуры. Погрешности измерения не отличаются от приведенных в разделе 6.5 (на стр. 189) для случая измерения параметров сигналов известной частоты с использованием аппроксимации комплексными экспонентами и мало зависят от числа гармонических составляющих и соотношения их частот, разнесенных не менее чем на 30%. Коэффициент подавления шума равен $\sqrt{2N}$. За счет использования априорной информации о частотах тестового воздействия появляется возможность измерения параметров в условиях сильных шумов. Даже при отношении сигнал-шум, равном единице, использование ста отсчетов обеспечивает дисперсию результатов измерений не более 0,08.

Возможности метода проиллюстрированы временной диаграммой сигналов, действующих в объекте диагностирования, (рисунок 7.37). Сплошной тонкой линией показан полный сигнал в объекте, сплошной жирной линией — измеряемый информативный компонент сигнала, определяемый вынужденной реакцией объекта на тестовое воздействие, а пунктирными

линиями — неинформативные составляющие полного сигнала: напряжения переходных процессов объекта, гармонические составляющие рабоцих сигналов объекта и шумовой компонент.

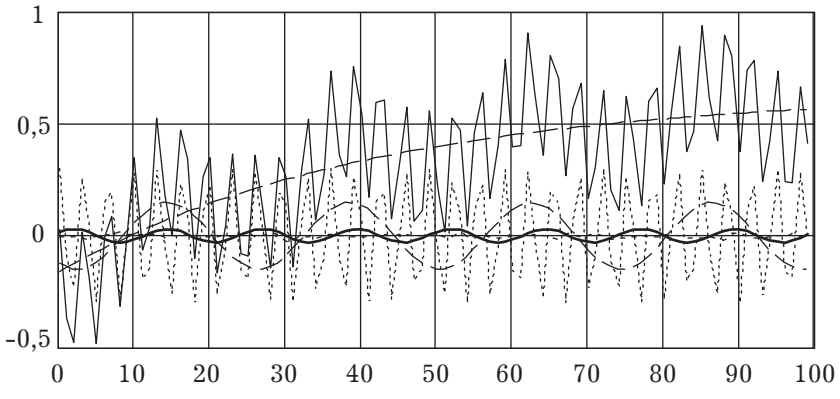


Рисунок 7.37 — Временная диаграмма сигналов, действующих в объекте диагностирования

7.5 Пример построения измерительного блока АСКД для внутрисхемного диагностирования

В качестве иллюстрации принципов построения диагностической системы рассмотрим выпускаемый АО “НИИ Контрольприбор” (г. Пенза) тестер внутрисхемного контроля электрорадиоизделий АМЦ 15204 (рисунок 7.38). Его основные технические характеристики приведены в таблице 7.2.

Тестер предназначен для измерения параметров R, L, C элементов, контроля диодов, стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов, операционных усилителей без выпаивания их из платы и без нарушения внутрисхемных соединений, а также для измерения напряжения постоянного тока. Он может применяться как автономно для контроля отдельных радиоэлементов, установленных на платах, так и в составе АСКД для диагностирования печатных узлов в целом. В последнем случае совместно с тестером должна использоваться внешняя управляющая ЭВМ и контактрон.

Рисунок 7.38 — Внешний вид тестера внутрисхемного контроля

Таблица 7.2

Основные технические характеристики тестера

№	Параметр	Значение
1	Диапазон измерения:	
1.1	– сопротивления резисторов, Ом	$10–10^7$
1.2	– емкости конденсаторов, Ф	$10^{-10}–10^{-4}$
1.3	– индуктивности, Гн	$10^{-2}–1$
1.4	– постоянного напряжения, В	0–20
1.5	– напряжения стабилизации стабилитронов, В	0,5–15
2	Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения:	
2.1	– R, L, C параметров отдельных элементов, %	5
2.2	– постоянного напряжения, %	3
3	Модуль сопротивления шунтирующих цепей:	
3.1	– не менее, Ом	50
3.2	– не менее, % от измеряемого сопротивления	5
4	Предел допускаемой дополнительной относительной погрешности от влияния шунтирующих цепей, %	5
5	Достоверность контроля диодов	0,95
6	Достоверность контроля транзисторов	0,95
7	Достоверность контроля операционных усилителей	0,9
8	Напряжение питания ~50 Гц, В	220±22

В тестере оригинально решена задача унификации измерительных преобразователей для диагностирования широкой номенклатуры параметров. Прибор имеет общую аналоговую шину (рисунок 7.39). Необходимая измерительная конфигурация, реализующая рассмотренные выше методы диагностирования, образуется из минимально необходимого состава узлов с помощью коммутационной матрицы, управляемой микропроцессором. Для уменьшения влияния сопротивления ключей, обеспечивающих соединение отдельных элементов с общей аналоговой шиной, все подключения реализуются по двухпроводной схеме с использованием повторителей напряжения на операционных усилителях, включенных так же, как $ОУ_2$ и $ОУ_3$ в схеме на рисунке 7.7.

В состав прибора входят: коммутационная матрица, состоящая из восьми аналоговых шин для подключения объекта диагностирования и узлов тестера, образующих измерительную схему; два программируемых источника напряжения постоянного тока U_1 и U_2, соединенных последовательно с программируемыми калиброванными резисторами R_{01} и R_{02}; программируемый генератор ~U синусоидальных и импульсных сигналов, выполненный на базе цифро-аналогового преобразователя ЦАП; усилитель измерительный; аналого-цифровой преобразователь АЦП; центральный процессор ЦП; память, состоящая из ОЗУ и ПЗУ; панель управления; индикатор и интерфейс для подключения внешней управляющей ЭВМ.

Необходимый режим работы может задаваться на панели управления, с помощью типового меню, или от внешней ЭВМ. В соответствии с программой, хранящейся в ПЗУ, происходит коммутация узлов в необходимую измерительную конфигурацию и формирование тестовых воздействий. Восемь аналоговых шин позволяют организовать двухпроводное подключение к четырем точкам проверяемой платы.

Для контроля параметров R, L, C элементов применена активная ИС (см. рисунок 7.7). Предел измерения (номинал резистора R_{01} на рис. 7.39) выбирается автоматически или задается программно. Мгновенные значения выходного напряжения из-

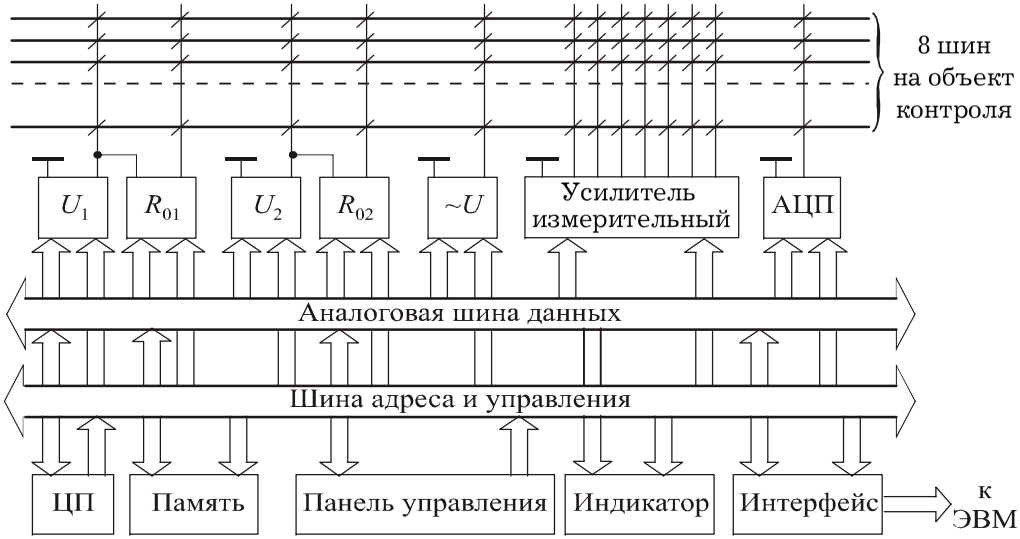


Рисунок 7.39 — Структурная схема тестера внутрисхемного контроля

мерительной схемы преобразуются с помощью АЦП в десятиразрядный двоичный код и вводятся в процессор, где выполняется расчет значений параметров и их допусковая оценка.

Контроль диодов и стабилитронов производится стандартными методами, используя для исключения влияния шунтирующих цепей метод эквипотенциального разделения цепей. Контроль транзисторов можно проводить по токам переходов на основе схемы рисунка 7.9. и по коэффициенту усиления тока на основе схемы рисунка 7.23. Контроль интегральных операционных усилителей можно проводить в соответствии с алгоритмом рисунка 7.32 и по коэффициенту усиления в соответствии со схемой рисунка 7.34.

На индикаторы прибора выводятся значение измеряемой величины, ее размерность и режим измерения; результат проверки “Годен — Брак”; номера шин, к которым подключен объект контроля на данной операции; состояние прибора по результатам самоконтроля.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит возможность измерения параметров элементов МЭЦ?

2. На чем основан метод эквипотенциального разделения ветвей МЭЦ?

3. Что используют для уменьшения влияния контактного сопротивления зондов при контроле МЭЦ?

4. Какие критерии используются для внутрисхемного диагностирования транзисторов?

5. Как проверяются на платах цифровые интегральные схемы?

6. Какие методы используются для диагностирования на платах операционных усилителей?

Список литературы

Автоматический контроль радиоэлектронного и электротехнического оборудования / Под общ. ред. В. М. Шляндина и А. И. Мартяшина. — М.: Энергия, 1872.

Байда Н. П. Микропроцессорные системы поэлементного диагностирования РЭА / Н. П. Байда, И. В. Кузьмин, В. Т. Шпилевой. — М.: Радио и связь, 1987.

Волгин Л. И. Аналоговые операционные преобразователи для измерительных приборов и систем. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

Волгин Л. И. Линейные электрические преобразователи для измерительных приборов и систем. — М.: Сов. радио, 1971.

Городов В. А. Электрический контроль печатных плат и узлов. // Электроника НТБ. 2004. № 7.

Диагностика измерительно-вычислительных и управляющих систем: Учебн. пособие / Ю. М. Крысин, В. А. Мишин, Б. В. Цыпин, В. В. Шишкин, Н. Г. Ярушкина. — Ульяновск: изд-во УлГТУ, 2005.

Добровинский И. Р. Проектирование ИИС для измерения параметров электрических цепей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев. — М.: Энергоатомиздат, 1997.

Кнеллер В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В.Ю. Кнеллер, Л.П. Боровских.– М.: Энергоатомиздат, 1986.

Лихтциндер Б. Я. Многомерные измерительные устройства / Б. Я. Лихтциндер, С. М. Широков. — М.: Энергия, 1978.

Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.

Мартяшин А. И. Преобразователи параметров многоэлементных электрических цепей / А. И. Мартяшин, Л. В. Орлова, В. М. Шляндин. — М.: Энергоиздат, 1981.

Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова . — М.: Энергоатоиздат, 1990.

Цыпин Б. В. Измерение импедансов системами с ЭВМ. — Пенза: Гос. ун-т, 2001.

Цыпин Б. В. Методы диагностики и измерительные преобразователи для приборов и систем контроля узлов электронной аппаратуры: Учебн. пособие / А. И. Мартяшин, Б. В. Цыпин. — Пенза: Политехн. ин-т, 1989.

Часть IV
ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Глава 8
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

8.1 Диагностические модели

Диагностической моделью называется формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования. Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах.

Выбор диагностической модели производится с учетом конструкции объекта, метода диагностирования и других факторов.

Методы решения задач, возникающих при контроле технического состояния и поиске места отказа, основываются на структурировании диагностическими моделями множеств видов технического состояния E, проверок U, оценок результатов проверок U^z.

Диагностическая модель может задаваться, например, в форме бинарного отношения между множествами видов технического состояния и оценками результатов проверок, позволяющей сочетать методы теории множеств и теории графов.

Объект диагностирования при двоичной оценке значений параметров и признаков моделируется бинарным отношением

$$\Phi \subseteq E \times U^z \tag{8.1}$$

между множеством видов технического состояния и множеством двоичных оценок результатов проверок ($z = 2$).

Подмножествами E являются, например, допустимые E^1 и недопустимые E^0 виды технического состояния, в том числе отказы.

Множество U^z подразделяется на равные по мощности подмножества допустимых $U^1 = \{u_i^1\}$ и недопустимых $U^0 = \{u_i^0\}$ результатов проверок.

Правила формирования бинарного отношения допустимо толковать как отображение φ: $E \to U^z$ множества E во множество U^z. Тогда диагностическая модель задается, например, двудольным ориентированным графом (орграфом)

$$G = (E, U^z, \varphi). \tag{8.2}$$

Элементы множеств E и U^z бинарного отношения изображаются вершинами, а отображение φ — дугами орграфа (8.2).

Если вид технического состояния $e \in E$ проявляется оценкой u^0 или u^1 результата проверки, то вершины орграфа соединяются дугой (e, u^0) или (e, u^1) соответственно.

Пример диагностической модели в форме двудольного орграфа представлен на рисунке 8.1.

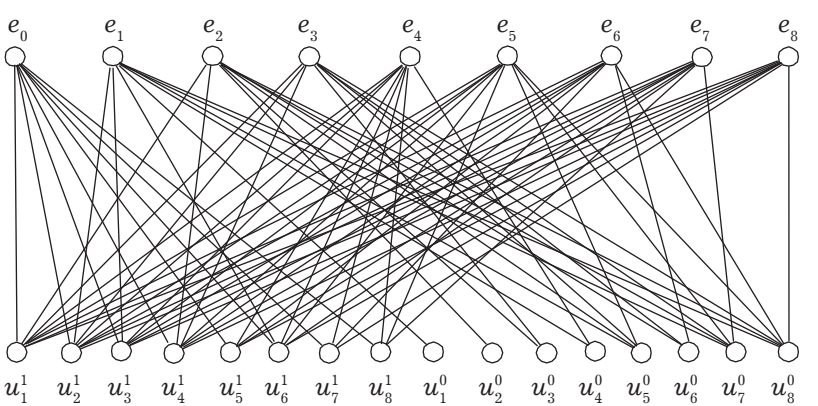


Рисунок 8.1 — Диагностическая модель в форме двудольного орграфа

Вершины из множества E сопоставлены работоспособному состоянию e_0 и отказам объекта. Стрелки на дугах не показаны.

Двудольный орграф можно задавать таблицей связей (таблица 8.1). В первом столбце и первой строке таблицы связей содержатся обозначения видов технического состояния и проверок. На пересечении строки e_t и столбца u_j указывается 1 или 0, если в двудольном орграфе имеется дуга (e_i, u_j^1) или дуга (e_i, u_j^0) соответственно.

Таблица 8.1

Таблица связей

E	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8
e_0	1	1	1	1	1	1	1	1
e_1	0	1	1	0	0	1	0	0
e_2	1	0	0	1	0	0	0	0
e_3	1	1	0	1	0	0	0	0
e_4	1	1	1	0	1	1	1	1
e_5	1	1	1	1	0	1	0	0
e_6	1	1	1	1	1	0	1	0
e_7	1	1	1	1	1	1	0	1
e_8	1	1	1	1	1	1	1	0

Модель в форме таблицы связей аналогична при соответствующих допущениях таблице функций неисправностей и таблице состояний.

Если для любого вида состояния известна оценка результата каждой проверки, никакой вид состояния не проявляется одновременно недопустимым и допустимым результатами проверки, проверок достаточно для различения видов состояния попарно, то орграф (8.2) удовлетворяет условиям, которые формально записываются так:

$$\varphi^{-1}(u^0) \bigcup \varphi^{-1}(u^1) = E; \tag{8.3}$$

$$\varphi^{-1}(u^0) \bigcap \varphi^{-1}(u^1) = \varnothing; \tag{8.4}$$

$$\varphi(e_i) \neq \varphi(e_j), \tag{8.5}$$

где $\varphi^{-1}(u^0), \varphi^{-1}(u^1)$ — полные прообразы,

$\varphi(e_i)$, $\varphi(e_j)$ — образы соответствующих вершин;

$\varnothing$ — символ пустого множества;

$i = \overline{0, |E^0| - 1}$;

$j = \overline{i+1, |E^0|}$.

Полный прообраз и образ составляют подмножества из множеств E и U^z соответственно. Например, для двудольного орграфа $\varphi^{-1}(u_4^0) = \{e_1, e_4\}$; $\varphi(e_8) = \{u_1^1, u_2^1, u_3^1, u_4^1, u_5^1, u_6^1, u_7^1, u_8^0\}$.

Контроль технического состояния объекта обычно осуществляется в нескольких режимах. Режим контроля технического состояния характеризуется проверками $U_К \subseteq U$, выполнение которых позволяет обнаруживать отказы $E_К^0 \subseteq E^0$. Диагностической моделью объекта в некотором режиме контроля технического состояния является подграф орграфа (8.2):

$$G_К = (E_К, U_К^z, \varphi_К), \tag{8.6}$$

где $E_К = E_К^0 \bigcup e_0$.

Виды состояния и проверки, учитываемые диагностической моделью, упорядочиваются по вероятностям и затратам соответственно. Вероятности состояний, отказов и затраты на выполнение проверок оцениваются при проектировании и уточняются по результатам испытаний и эксплуатации объектов.

Построение диагностической модели осуществляется экспертными методами и (или) на основе математического моделирования отказов. Для моделирования отказов необходимы математическая модель работоспособного объекта, математические модели отказов и правила получения формальных описаний неработоспособных состояний.

8.2 Математическое моделирование работоспособного объекта

Форма представления модели работоспособного объекта зависит от задачи и метода диагностирования. Объект, состоя-

щий из взаимодействующих функциональных составных частей (блоков), при решении задач обнаружения отказов и поиска отказавшей составной части контролем параметров аналоговых сигналов или сигнатурным анализом цифровых сигналов моделируется, например, бинарным отношением в форме связного орграфа

$$D = (V, \gamma). \tag{8.7}$$

Вершинами V орграфа изображаются принятые при выборе метода диагностирования входные и выходные сигналы составных частей объекта. Дугами задается отображение γ: $V \to V$ зависимостей, связей между параметрами сигналов существенных для диагностирования.

Методика математического моделирования работоспособного объекта по исходным данным, содержащимся в его конструкторской документации, поясняется схемой на рисунке 8.2.

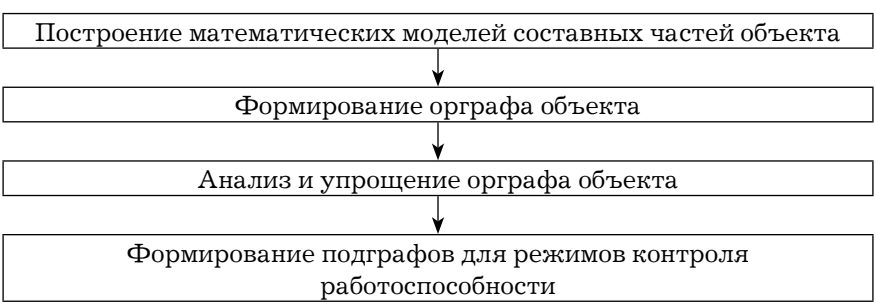


Рисунок 8.2 — Этапы математического моделирования работоспособного объекта

Математической моделью составной части является бинарное отношение в форме двудольного орграфа

$$D_i = (F_i, R_i, \gamma_i), \tag{8.8}$$

в котором входные сигналы $f_{ij} \in F_i$ и выходные сигналы $r_{ik} \in R_i$ изображаются вершинами.

Вершины соединяются дугой (f_{ij}, r_{ik}), если изменение параметра сигнала f_{ij} приводит к изменению параметра сигнала r_{ik}.

Зависимости между параметрами сигналов определяются на основе изучения трактов прохождения сигналов и моделирования электронных устройств с использованием систем схемотехнического моделирования, например, *PSpice*, *Micro-Cap*.

Исходными данными для формирования модели (8.8) на основе схемотехнического моделирования электронного устройства являются принципиальная схема электронного устройства, типы электрорадиоэлементов и микросхем, значения их параметров, состав, номинальные значения и диапазоны изменений входных параметров, состав выходных параметров.

Алгоритм формирования модели (8.8) состоит в следующем.

1. Ввод исходных данных.

2. Подготовка двумерного массива модели, в первом столбце и первой строке которого указываются условные обозначения входных и выходных параметров соответственно. Обнуление массива.

3. Схемотехническое моделирование электронного устройства по постоянному току при изменении первого входного параметра в заданном диапазоне и номинальных или (и) заданных значениях остальных входных параметров.

Результат моделирования в виде значений входного параметра и соответствующих им значений выходных параметров представляются графиком и сохраняются в текстовом файле.

4. Преобразование текстового файла в двумерный массив. В первой строке массива указываются обозначения входного и выходных параметров. В последующих строках массива указываются значения входного параметра и соответствующие им значения выходных параметров.

5. Анализ графика и (или) двумерного массива для определения наличия или отсутствия зависимости значений выходных параметров от значений входного параметра.

6. Заполнение строки массива модели, соответствующей входному параметру. На пересечении строки и столбца массива указывается символ “1”, если значение выходного параметра зависит от значения входного параметра, в противном случае оставляется символ “0”.

7. Повторение пунктов 3–6 для очередных входных параметров, указанных в массиве диагностической модели.

8. Передача массива диагностической модели электронного устройства в программу формирования диагностической модели объекта.

Примеры двудольных орграфов составных частей представлены на рисунке 8.3.

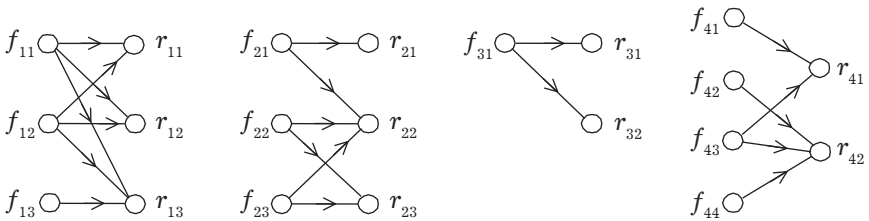


Рисунок 8.3 — Модели составных частей в форме двудольных орграфов

Связи (соединения) между составными частями моделируются бинарными отношениями в форме двудольных орграфов

$$D_{ij} = (R_i, F_j, \gamma_{ij}). \tag{8.9}$$

Множества выходных сигналов i-й составной части и входных сигналов j-й составной части задаются вершинами. Вершины соединяются дугой (r_{ik}, f_{iq}), если выходной сигнал r_{ik} является входным сигналом f_{iq}. Связи определяются, например, по схеме соединений.

Двудольные орграфы связей между составными частями представлены на рисунке 8.4.

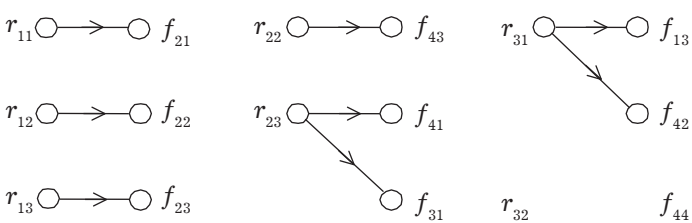


Рисунок 8.4 — Двудольные орграфы связей между составными частями

Орграф (8.7) формируется объединением двудольных орграфов (8.8), (8.9). Вершины с одинаковыми обозначениями при объединении двудольных орграфов совмещаются.

Пример объединения двудольных орграфов показан на рисунке 8.5. Ориентированный цикл (орцикл), выделенный утолщенными линиями, соответствует контуру обратной связи объекта.

Контроль технического состояния средств диагностирования выполняется, как правило, до контроля технического состояния объекта. Входные сигналы объекта, создаваемые работоспособными средствами диагностирования, имеют допустимые значения и соответствующие вершины с инцидентными им дугами можно исключить из орграфа.

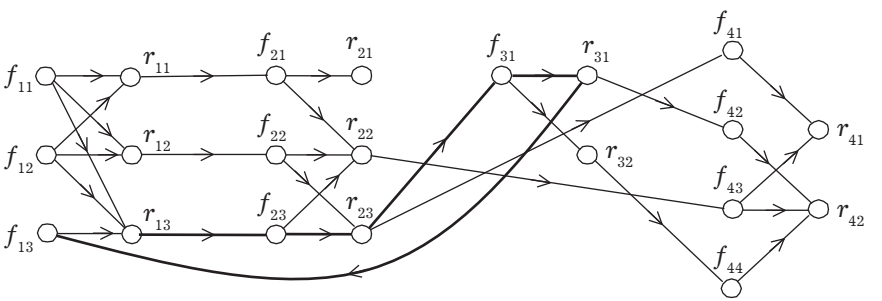


Рисунок 8.5 — Модель объекта в форме связного орграфа

Диагностирование кабелей отказавшего объекта иногда выполняется до поиска места отказа. Тогда модель объекта можно упростить совмещением вершин двудольных орграфов связей между составными частями. Совмещаемые вершины с инцидентными дугами стягиваются в вершину, соответствующую выходному сигналу, причем дуги сворачиваются в петлю.

Орграф, полученный после исключения вершин f_{11}, f_{12}, соответствующих входным сигналам объекта, и совмещения вершин, показан на рисунке 8.6.

Взаимное влияние сигналов не позволяет определить отказавшую составную часть в контуре обратной связи. Если объект диагностируется без разрыва контуров обратной связи, то орграф рекомендуется упрощать конденсированием.

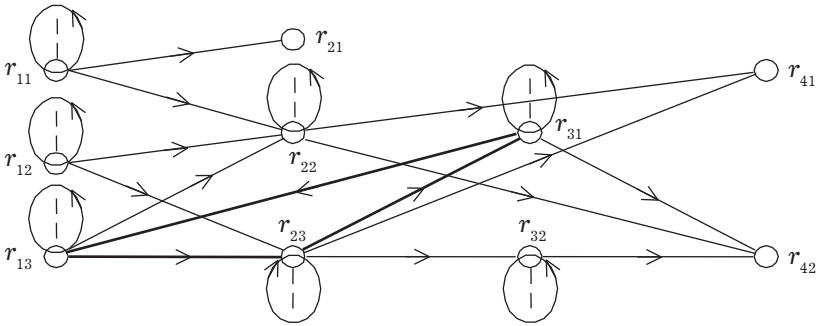


Рисунок 8.6 — Упрощенный связный орграф

Вершины орцикла и принадлежащие им дуги при конденсировании стягиваются в одну из его вершин, причем дугами орцикла образуется петля (рисунок 8.7).

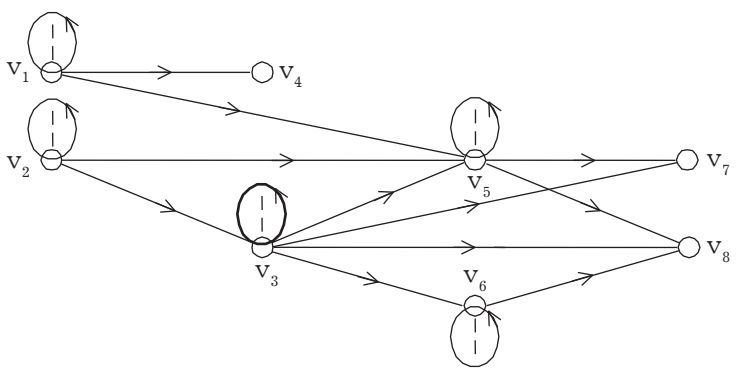


Рисунок 8.7 — Конденсированный орграф

Вершины обозначены символами $v \in V$. Соответствие обозначений вершин орграфов указано в таблице 8.2. Вершины и дуги орцикла стянуты в вершину v_3.

Таблица 8.2

Соответствие обозначений вершин орграфов

Рисунок 8.6	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{21}	r_{22}	r_{32}	r_{41}	r_{42}
Рисунок 8.7	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8

Орграф (8.7) может использоваться для формирования подграфа в конкретном режиме контроля технического состояния объекта

$$D_{\text{К}} = (V_{\text{К}}, \gamma_{\text{К}}), \tag{8.10}$$

где $V_{\text{К}} \subseteq V$, $\gamma_{\text{К}} \subseteq \gamma$.

Режим контроля технического состояния характеризуется определенным составом входных сигналов $F_{\text{К}} \subseteq F$, воздействующих на объект, и контролируемых выходных сигналов $R_{\text{К}} \subseteq R$ составных частей.

Для каждого режима контроля технического состояния объекта формируется подграф (8.10). При единственном режиме контроля технического состояния орграф (8.10) не отличается от орграфа (8.7).

8.3 Математическое моделирование отказов

Допустимое и недопустимое значения параметра сигнала, отображаемого вершиной орграфа (8.7), можно толковать как отсутствие отказа и отказ, а также одновременно как допустимый и недопустимый результаты проверки соответственно.

Моделью отказа является недопустимое значение параметра сигнала v^0, отображаемого вершиной $v \in V$, при допустимых значениях параметров сигналов V_v^1, отображаемых вершинами $V_v = \gamma^{-1}(v)$, составляющими полный прообраз вершины v. Работоспособное состояние и отказы объекта составляют множество

$$E = \{e_0, e \mid e \subseteq \{v^0\}\}, \tag{8.11}$$

где $e \in E^0$.

Проверки объекта составляют множество

$$\text{U} = \{v \mid v \in V\}. \tag{8.12}$$

Диагностическая модель (8.2) для одиночных отказов формируется на основе модели работоспособного объекта (8.7) по следующим правилам:

$$(e_i = v_i^0) \wedge (u_q = v_q) \wedge ((v_q = v_i) \vee (v_q \in \gamma^*(v_i))) \rightarrow$$
$$\rightarrow u_q^0 \in \varphi(e_i) \wedge u_q^1 \notin \varphi(e_i); \qquad (8.13)$$
$$(e_i = v_i^0) \wedge (u_q = v_q) \wedge ((v_q \neq v_i) \vee (v_q \notin \gamma^*(v_i))) \rightarrow$$
$$\rightarrow u_q^0 \notin \varphi(e_i) \wedge u_q^1 \in \varphi(e_i); \qquad (8.14)$$
$$\varphi(e_0) = U^1, \qquad (8.15)$$

где $u \in U; u^0 \in U^0; u^1 \in U^1; e \in E; i,q = \overline{1,|V|}; \gamma^*(v_i)$ — образ вершины в транзитивном замыкании орграфа (8.7).

Таблица смежности орграфа (8.7) преобразуется по правилам (8.13)–(8.15) в таблицу связей орграфа (8.2) поэтапно:

1) формируется таблица смежности транзитивного замыкания орграфа (8.7);

2) заменяются символы вершин в первом столбце и в первой строке символами отказов и проверок соответственно, без изменения порядковых номеров символов;

3) заменяются символы 1 и 0 на пересечении строк, начиная со второй, и столбцов, начиная со второго, символами 0 и 1 соответственно;

4) заменяются символы 1 на пересечении строк и столбцов по диагонали из верхнего левого в правый нижний угол символами 0;

5) добавляется после первой строки строка e_0 с символами 1 на пересечении со всеми столбцами.

Транзитивное замыкание орграфа (8.7) формируется на основе следующих правил: если в орграфе имеются дуги (v_i, v_j), (v_j, v_q) и $i \neq j \neq q$, то в транзитивном замыкании должны присутствовать дуги (v_i, v_q).

Пример транзитивного замыкания и таблица смежности транзитивного замыкания орграфа показаны на рисунке 8.8 и в таблице 8.3 соответственно.

Таблица связей для одиночных отказов, полученная по сформулированным правилам, представлена в таблице 8.1, а соответствующий ей двудольный орграф, показан на рисунке 8.1.

Аналогично преобразуется таблица смежности орграфа (8.10) в таблицу связей орграфа (8.6).

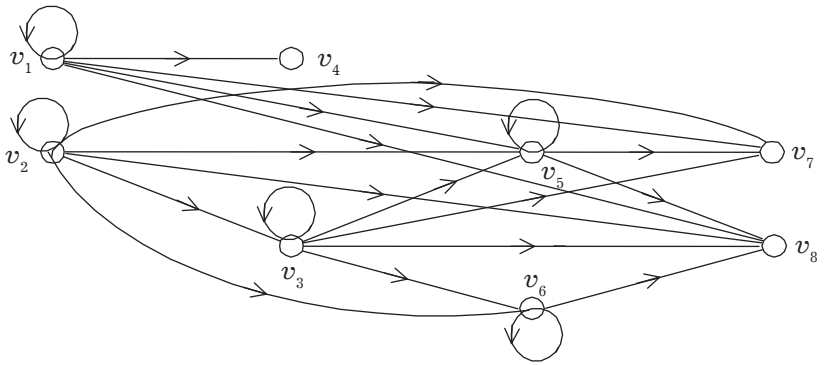


Рисунок 8.8 — Транзитивное замыкание орграфа

Таблица 8.3

Таблица смежности транзитивного замыкания орграфа

E	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
v_1	0	0	0	1	1	0	1	1
v_2	0	0	1	0	1	1	1	1
v_3	0	0	1	0	1	1	1	1
v_4	0	0	0	0	0	0	0	0
v_5	0	0	0	0	0	0	1	1
v_6	0	0	0	0	0	0	0	1
v_7	0	0	0	0	0	0	0	0
v_8	0	0	0	0	0	0	0	0

Диагностическая модель, учитывающая сочетания отказов (кратные отказы) из множества (8.11), формируется преобразованием таблицы связей для одиночных отказов по следующим правилам:

1) таблица связей для одиночных отказов дополняется строками с обозначениями кратных отказов;

2) на пересечении строки кратного отказа и столбца проверки указывается символ 0 или 1, если на пересечении строк отказов, сочетанием которых образуется кратный отказ, и столбца проверки имеется или отсутствует символ 0 соответственно.

Например, по результатам проверок 11010000 в строке отказа e_3 и результатам проверок 11110100 в строке отказа e_5 таблицы связей 8.1 формируются результаты проверок 11010000, которыми проявляется сочетание отказов e_3, e_5.

8.4 Определение области отказа

Результатами выполнения проверок $U_К \subset U$ при контроле работоспособности объекта являются признаки отказа $U_К^0 \subseteq U_К$ и признаки работоспособности $U_К^1 = U_К \setminus U_К^0$. Отказы составных частей, проявляющиеся сочетанием признаков отказа и работоспособности, составляют область отказа $E_Л \subset E^0$. Глубина локализации места отказа увеличивается с уменьшением мощности множества отказов, составляющих область отказа.

Определение области отказа основывается на анализе диагностической модели. Затраты вычислительных ресурсов при определении области отказа зависят от размерности диагностической модели, которая характеризуется мощностями множеств отказов, проверок и результатов проверок.

Наименьшую размерность имеет диагностическая модель, формируемая для одиночных отказов и бинарных результатов проверок, позволяющих обнаруживать отказы с минимальными затратами.

Диагностическая модель, формируемая для одиночных отказов, может использоваться при определении областей одиночного и кратного (сочетания) отказов.

Область одиночного отказа при использовании диагностической модели (8.2) для одиночных отказов и проверок, позволяющих обнаруживать отказы с минимальными затратами, определяется по формуле

$$E_Л = \bigcap_{u^0 \in U_К^0} \varphi^{-1}(u^0) \setminus \bigcup_{u^1 \in U_К^1} (E \setminus \varphi^{-1}(u^1)). \qquad (8.16)$$

Определим, например, область отказа с использованием диагностической модели, представленной таблицей 8.4.

Предположим, что выполнено множество $U_К = \{u_6, u_3, u_5\}$ проверок и получены множество признаков работоспособнос-

Таблица 8.4

Таблица связей

E	u_3	u_5	u_6
e_0	1	1	1
e_1	0	0	1
e_2	1	0	0
e_3	0	1	1
e_4	1	0	0
e_5	1	0	1
e_6	1	1	0

ти $U_К^1 = \{u_6^1\}$ и множество признаков отказа $U_К^0 = \{u_3^0, u_5^0\}$, тогда $E_Л = \varphi^{-1}(u_3^0) \cap \varphi^{-1}(u_5^0) \setminus (E \setminus \varphi^{-1}(u_6^1)) = \{e_1, e_3\} \cap \{e_1, e_2, e_4, e_5\} \setminus (\{e_0, e_1, \ldots, e_6\} \setminus \{e_0, e_1, e_3, e_5\}) = \{e_1\} \setminus \{e_2, e_4, e_6\} = \{e_1\}$.

Итак, $E_Л = \{e_1\}$, $|E_Л| = 1$.

При определении области кратного отказа (сочетания отказов) по формуле (8.16) может быть допущена ошибка.

Например, сочетание отказов e_3, e_5 проявляется сочетанием признаков работоспособности и отказа 001, как и отказ e_1 в таблице связей 8.4. Однако область отказа, вычисляемая по формуле (8.16), содержит только отказ e_1.

Область кратного отказа определяется по формулам

$$E_Л = \bigcup_{u^0 \in U_К^0} \varphi^{-1}(u^0) \setminus \bigcup_{u^1 \in U_К^1} (E \setminus \varphi^{-1}(u^1)); \qquad (8.17)$$

$$E_Л = \varphi^{-1}(u^0) \setminus \bigcup_{u^1 \in U_К^1} (E \setminus \varphi^{-1}(u^1)). \qquad (8.18)$$

Область отказа (8.17) содержит все сочетания одиночных отказов, не учитываемые диагностической моделью.

Например, для рассматриваемой комбинации признаков отказа и работоспособности область отказа, сформированная по формуле (8.17), составляет: $E_Л = \varphi^{-1}(u_3^0) \cup \varphi^{-1}(u_5^0) \setminus (E \setminus \varphi^{-1}(u_6^1)) = \{e_1, e_3\} \cup \{e_1, e_2, e_4, e_5\} \setminus (\{e_0, e_1, \ldots, e_6\} \setminus \{e_0, e_1, e_3, e_5\}) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\} \setminus \{e_2, e_4, e_6\} = \{e_1, e_3, e_5\}$.

Область отказа (8.18) содержит хотя бы один отказ из сочетания отказов. Формула (8.18) применяется для каждого при-

знака отказа $u^0 \in U^0_{К}$ и выбирается наименьшая по мощности область отказа.

Например, область отказа для признака u^0_3 составляет $E_{Л} = \{e_1, e_3\}$. Область отказа для признака u^0_5 составляет $E_{Л} = \{e_1, e_5\}$.

Модель объекта диагностирования в области отказа задается подграфом

$$G_{Л} = (E_{Л}, U^2_{Л}, \varphi_{Л}), \tag{8.19}$$

двудольного орграфа (8.2), где $U^2_{Л}$ — значения проверок, которыми проявляются отказы $E_{Л}$; $\varphi_{Л}$: $E_{Л} \to U^2_{Л}$.

Преобразование таблицы связей двудольного орграфа (8.2) в таблицу связей орграфа (8.19) осуществляется поэтапно:

1) исключаются строки $e \notin E_{Л}$;

2) исключаются столбцы $u \in U$, имеющие символы 1 на пересечении со всеми строками.

Например, таблица связей 8.4 после локализации места отказа по формуле (8.17) преобразуется в таблицу связей 8.5.

Таблица 8.5

Таблица связей

E	u_3	u_5	u_6
e_1	0	0	1
e_3	0	1	1
e_5	1	0	1

Определение области отказа объекта, моделируемого орграфом (8.6), выполняется аналогично.

Контрольные вопросы

1. Укажите аналитическую форму записи двудольного орграфа. Перечислите множества, которые структурируются двудольным орграфом.

2. Что такое образ и полный прообраз вершины двудольного орграфа? Поясните эти понятия на примерах двудольного орграфа, таблицы связей.

3. Запишите и поясните условия обнаружения и различения попарно отказов с помощью двудольного орграфа и его таблицы связей.

4. Поясните на примере, почему контроль сигналов в контуре обратной связи не позволяет определить отказавшую составную часть объекта.

5. Как задаются модели работоспособного состояния и отказов, проверки по модели в форме орграфа работоспособного объекта?

6. Что такое транзитивное замыкание? Поясните образование транзитивного замыкания по орграфу и таблице смежности.

7. Как преобразовать таблицу смежности транзитивного замыкания в таблицу связей двудольного орграфа?

8. Дайте определение области отказа.

9. Запишите и поясните с помощью таблицы связей формулы для определения областей одиночного и кратного отказов по результатам выполнения проверок при контроле работоспособности объекта.

10. Поясните на примере диагностической модели, почему при определении области кратного отказа по формуле (8.16) может быть допущена ошибка.

Глава 9
МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗОВ

9.1 Выбор проверок для обнаружения отказов методом линейного целочисленного программирования

Диагностическая модель в форме орграфа (8.2) удовлетворяет условиям (8.5), которые при $i = 0$ являются условиями обнаружения отказов по результатам проверок. Отказы различаются с работоспособным состоянием недопустимыми результатами проверок.

Например, в таблице связей 9.1 отказы отличаются от работоспособного состояния недопустимым результатом хотя бы одной проверки.

Таблица 9.1

Таблица связей

E	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
e_0	1	1	1	1	1	1
e_1	0	1	0	1	0	1
e_2	1	0	1	0	0	0
e_3	1	1	0	1	1	1
e_4	1	1	1	0	0	0
e_5	1	1	1	1	0	1
e_6	1	1	1	1	1	0

Множества $\varphi_0(e_j)$, составляющие образы отказов, различающихся с работоспособным состоянием, не пустые, т. е.

$$|\varphi_0(e_j)| > 0, \tag{9.1}$$

где φ_0: $E^0 \to U^0$.

Например, при $j = 1$ по таблице 9.1 определяем: $\varphi_0(e_1) = \{u_1^0, u_3^0, u_5^0\}$ и $|\varphi_0(e_1)| = 3$.

Выбор проверок для обнаружения отказов с минимальными затратами приводится к задаче линейного целочисленного программирования:

$$\min \sum_{i=1}^{m} c_i x_i; \tag{9.2}$$

$$\sum_{i \in S_j} x_i > 0, \tag{9.3}$$

где x_i — бинарная переменная, сопоставленная проверке u_i, принимающая значение 1, если проверка выполняется, и значение 0 — в противном случае;

c_i — затраты на выполнение проверки u_i;

m — число проверок;

S_j — множество номеров проверок, недопустимыми результатами которых проявляется отказ e_j.

Ограничения (9.3) формируются на основе неравенств (9.1). Число ограничений равно числу отказов n, составляющих множество E^0.

При одинаковых затратах на выполнение проверок задача линейного целочисленного программирования (9.2), (9.3) сводится к выбору минимального числа бинарных переменных.

Целевая функция и ограничения для объекта, моделируемого таблицей связей 9.1, и значений затрат на выполнение проверок в условных единицах $c_1 = 3$, $c_2 = 4$, $c_3 = 2$, $c_4 = 8$, $c_5 = 6$, $c_6 = 5$ записываются так:

$$\min (3x_1 + 4x_2 + 2x_3 + 8x_4 + 6x_5 + 5x_6); \tag{9.4}$$

$$x_1 + x_3 + x_5 > 0; \tag{9.5}$$

$$x_2 + x_4 + x_5 + x_6 > 0; \tag{9.6}$$

$$x_3 > 0; \tag{9.7}$$

$$x_4 + x_5 + x_6 > 0; \tag{9.8}$$

$$x_5 > 0; \tag{9.9}$$

$$x_6 > 0. \tag{9.10}$$

При формировании ограничений учитывается, что отказ e_j проявляется недопустимыми результатами проверок из множества $\varphi_0(e_j) = \{u_{ji}^0\}$ и $S_j = \{i\}$. Например, если $\varphi_0(e_1) = \{u_1^0, u_3^0, u_5^0\}$ то $S_1 = \{1, 3, 5\}$ и приходим к ограничению (9.5).

Задача линейного целочисленного программирования с бинарными переменными решается сокращенным перебором по аддитивному алгоритму Баллаша с фильтром.

Определяется сочетание значений переменных, удовлетворяющее всем ограничениям, и прежде всего ограничениям с одной переменной, которое принимается допустимым решением задачи.

Для задачи (9.4)–(9.10) допустимым решением являются, например значения переменных $x_3 = x_5 = x_6 = x_1 = 1$, $x_2 = x_4 = 0$.

Значение целевой функции при выбранных значениях переменных принимается в качестве дополнительного ограничения (фильтра). Целевая функция (9.4) для допустимого решения принимает значение 16. Следовательно, значение целевой функции в оптимальном решении будет не больше 16. Искомое решение должно удовлетворять ограничению:

$$3x_1 + 4x_2 + 2x_3 + 8x_4 + 6x_5 + 5x_6 \le 16. \qquad (9.11)$$

Вычисляются значения ограничений, начиная с фильтра, для всех сочетаний значений переменных и проверяется выполнение каждого вычисленного ограничения. Если для рассматриваемого сочетания значений переменных очередное ограничение не выполняется, то вычисления остальных ограничений не проводятся. Значения целевой функции вычисляются при условии выполнения всех ограничений.

Сочетания значений переменных и вычисленные значения ограничений целевой функции частично представлены в таблице 9.2.

Если при некотором сочетании значений переменных значение целевой функции окажется лучшим, чем в допустимом решении, следует перейти к новому дополнительному ограничению и продолжать вычисления ограничений и целевой функции для очередных сочетаний значений переменных.

Таблица 9.2

Результаты определения оптимального решения по алгоритму Баллаша

Номер сочетания	Сочетания значений переменных						Значения ограничений и целевой функции							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	**(9.11)**	**(9.7)**	**(9.9)**	**(9.10)**	**(9.5)**	**(9.6)**	**(9.8)**	**(9.4)**
1	0	0	0	0	0	0	0	0						
2	0	0	0	0	0	1	5	0						
3	0	0	0	0	1	0	6	0						
4	0	0	0	0	1	1	11	0						
5	0	0	0	1	0	0	8	0						
6	0	0	0	1	0	1	13	0						
7	0	0	0	1	1	0	14	0						
8	0	0	0	1	1	1	19							
9	0	0	1	0	0	0	2	1	0					
10	0	0	1	0	0	1	7	1	0					
11	0	0	1	0	1	0	8	1	1	0				
12	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**1**	**13**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**13**
							(9.12)	(9.7)	(9.9)	(9.10)	(9.5)	(9.6)	(9.8)	(9.4)
13	0	0	1	1	0	0	10	1	0					
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
64	1	1	1	1	1	1	28							

Например, при сочетании значений переменных № 12 значение целевой функции меньше, чем для допустимого решения. Принимается новое дополнительное ограничение

$$3x_1 + 4x_2 + 2x_3 + 8x_4 + 6x_5 + 5x_6 \le 13, \qquad (9.12)$$

вычисление и проверка которого начинаются с сочетания № 13.

Оптимальным решением задачи, как следует из таблицы 9.2, являются значения переменных $x_3 = x_5 = x_6 = 1$, $x_1 = x_2 = x_4 = 0$, при которых целевой функцией принимается значение 13. Следовательно, выполнение проверок u_3, u_5, u_6 позво-

ляет обнаруживать отказы с минимальными затратами в 13 условных единиц.

Число вычислений значений целевой функции (9.2) и ограничений (9.3) при поиске оптимального решения задачи методом полного перебора определяется по формуле $2^m (n + 1)$. Например, для решения задачи (9.4)–(9.10) полным перебором требуется 448 вычислений. Сокращение перебора применением алгоритма Баллаша с фильтром позволяет уменьшить число вычислений до 116, т. е. до 26% от числа вычислений при полном переборе.

Выбор проверок для обнаружения отказов с минимальными затратами объекта, моделируемого орграфом (8.6), осуществляется аналогично.

Уменьшение вычислений по алгоритму Баллаша достигается выбором допустимого решения, принимаемого в качестве фильтра, близкого к оптимальному. Допустимое решение можно определять по эвристическому алгоритму исключения.

9.2 Выбор проверок для обнаружения отказов методом ветвей и границ

Идея выбора проверок для обнаружения отказов с минимальными затратами методом ветвей и границ состоит в многошаговом возвратном (рекуррентном) переборе сочетаний проверок структурированных обычно вершинами ветвей корневого дерева и выборе после каждого шага перспективного сочетания с наименьшей нижней границей.

Сокращение перебора достигается развитием на каждом шаге перспективного сочетания проверок добавлением очередной проверки, выбираемой по наименьшей нижней границе затрат. Развитие перспективных сочетаний проверок продолжается до формирования сочетания проверок, позволяющего обнаруживать отказы с наименьшими затратами.

Нижняя граница затрат на обнаружение отказов E^0 после выбора k $(1 \le k \le m - 1)$ проверок $U_k \subseteq U$, позволяющих обнару-

живать отказы $E_k^0 \subseteq E^0$, обозначается $C_{\text{Н}}(U_k, E^0)$ и представляется в виде суммы двух слагаемых

$$C_H(U_k, E^0) = C(U_k, E_k^0) + C_H(U_{\text{И}}, E^0 \setminus E_k^0), \tag{9.13}$$

где $C(U_k, E_k^0)$ — затраты на обнаружение отказов E_k^0 проверками U_k;

$C_H(U_{\text{И}}, E^0 \setminus E_k^0)$ — нижняя граница затрат на обнаружение отказов $E^0 \setminus E_k^0$ информативными проверками $U_{\text{И}} \subseteq U_k$.

Множество отказов E_k^0 определяется по формуле

$$E_k^0 = \bigcup_{u_i^0 \in U_{\text{К}}^0} \varphi^{-1}(u_i^0), \tag{9.14}$$

где U_k^0 — недопустимые значения проверок U_k.

Примечание. Если проверок U_k достаточно для обнаружения всех отказов, то $E_k^0 = E^0$, $E^0 \setminus E_k^0 = \varnothing$ и $C_H(U_{\text{И}}, E^0 \setminus E_k^0) = C_H(U_{\text{И}}, \varnothing) = 0$.

Информативные проверки, позволяющие обнаруживать отказы $E^0 \setminus E_k^0$, определяются по формуле

$$U_{\text{И}} = U_{\text{И}}^0 = \bigcup_{e_i \in E^0 \setminus E_k^0} \varphi_0(e_i). \tag{9.15}$$

Нижняя граница должна быть меньше фактических затрат на обнаружение отказов. Поэтому условно принимается, что среди $U_{\text{И}}$ проверок существует минимальная по затратам проверка, позволяющая обнаружить оставшиеся отказы $E^0 \setminus E_k^0$. Тогда нижняя граница затрат на обнаружение отказов $E^0 \setminus E_k^0$ определяется по формуле

$$C_H(U_{\text{И}}, E^0 \setminus E_k^0) = \min_{u_i \in U_{\text{И}}} \{c(u_i)\}. \tag{9.16}$$

Результаты выбора проверок методом ветвей и границ для обнаружения с минимальными затратами отказов объекта, моделируемого таблицей связей 9.1, при значениях затрат на выполнение проверок в условных единицах $c_1 = 3, c_2 = 4, c_3 = 2, c_4 = 8$, $c_5 = 6$, $c_6 = 5$ представлены деревом на рисунке 9.1 и в таблице 9.3.

Проверки отображаются вершинами ветвей дерева. Ветвь дерева соответствует развиваемому перспективному сочета-

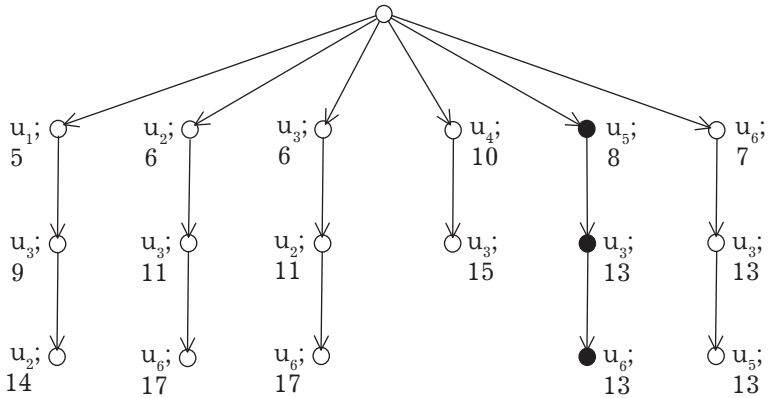


Рисунок 9.1 — Дерево выбора проверок методом ветвей и границ

нию проверок. Перспективность сочетания проверок определяется по наименьшему значению нижней границы затрат на обнаружение отказов, указанному в условных единицах рядов с каждой вершиной.

Выполнение проверок u_3, u_5, u_6, отображаемых затемненными вершинами, позволяет обнаруживать отказы с минимальными затратами в 13 условных единиц.

Анализ диагностической модели (см. таблицу 9.1) показывает, что для обнаружения отказов e_3, e_5, e_6 необходимо и достаточно выполнять проверки u_3, u_5, u_6 соответственно. Следовательно, для обнаружения всех отказов, задаваемых диагностической моделью, необходимо выполнять не менее трех проверок, причем обязательно u_3, u_5, u_6. Априорные сведения об обязательно выполняемых проверках для обнаружения отказов позволяют сократить перебор методом ветвей и границ.

Перебор начинается с комбинации обязательно выполняемых проверок. Если выполняемыми проверками не обнаруживаются все отказы, то перебираются их комбинации с одной из невыбиравшихся проверок. Для дальнейшего развития выбирается комбинация проверок с наименьшей нижней границей затрат, которая не выбиралась на предшествующих шагах вычислений, вплоть до формирования комбинации про-

Таблица 9.3

Результаты вычислений по методу ветвей и границ

Номер шага	U_k	E_k^0	$E^0 \setminus E_k^0$	$U_{\text{И}}$	$C(U_k, E_k^0)$	**Выбранная проверка**	$C_H(U_{\text{И}}, E^0 \setminus E$	$C_H(U_k, E^0)$
1	u_1	$\{e_1\}$	$\{e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$	$\{u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$	3	u_3	2	5
2	u_2	$\{e_2\}$	$\{e_1, e_3, e_4, e_5, e_6\}$	$\{u_1, u_3, u_4, u_5, u_6\}$	4	u_3	2	6
3	u_3	$\{e_1, e_3\}$	$\{e_2, e_4, e_5, e_6\}$	$\{u_2, u_4, u_5, u_6\}$	2	u_2	4	6
4	u_4	$\{e_2, e_4\}$	$\{e_1, e_3, e_5, e_6\}$	$\{u_1, u_3, u_5, u_6\}$	8	u_3	2	10
5	u_5	$\{e_1, e_2, e_4, e_5\}$	$\{e_3, e_6\}$	$\{u_3, u_6\}$	6	u_3	2	8
6	u_6	$\{e_2, e_4, e_6\}$	$\{e_1, e_3, e_5\}$	$\{u_1, u_3, u_5\}$	5	u_3	2	7
7	u_1, u_3	$\{e_1, e_3\}$	$\{e_2, e_4, e_5, e_6\}$	$\{u_2, u_4, u_5, u_6\}$	5	u_2	4	9
8	u_2, u_3	$\{e_1, e_2, e_3\}$	$\{e_4, e_5, e_6\}$	$\{u_4, u_5, u_6\}$	6	u_6	5	11
9	u_3, u_2	См. шаг 8						
10	u_6, u_3	$\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_6\}$	$\{e_5\}$	$\{u_5\}$	7	u_5	6	13
11	u_5, u_3	$\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$	$\{e_6\}$	$\{u_6\}$	8	u_6	5	13
12	u_1, u_3, u_2	$\{e_1, e_2, e_3\}$	$\{e_4, e_5, e_6\}$	$\{u_4, u_5, u_6\}$	9	u_6	5	14
13	u_4, u_3	$\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$	$\{e_5, e_6\}$	$\{u_5, u_6\}$	10	u_6	5	15
14	u_2, u_3, u_6	$\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_6\}$	$\{e_5\}$	$\{u_5\}$	11	u_5	6	17
15	u_6, u_3, u_5	$\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$	$\varnothing$	–	13	–	–	13
16	u_5, u_3, u_6	См. шаг 15						
Результаты вычислений при априорных сведениях об обязательно выполняемых проверках								
1	u_3, u_5, u_6	$\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$	$\varnothing$	–	1	13	–	–

верок, позволяющей обнаруживать отказы с минимальными затратами.

Результаты вычислений представлены в таблице 9.3. Проверки, позволяющие обнаруживать отказы объекта с минимальными затратами, выбраны на первом шаге вычислений.

Выбор проверок для обнаружения отказов с минимальными затратами объекта, моделируемого орграфом (8.6), осуществляется аналогично.

9.3 Выбор проверок для обнаружения отказов по эвристическому алгоритму

Критерием оптимизации состава проверок принимается минимум затрат на обнаружение отказов, которые вычисляются по формуле

$$C(U_{\text{К}}) = \sum_{u \in U_{\text{К}}} c(u), \tag{9.17}$$

где $U_{\text{К}}$ — множество выполняемых проверок. Ограничения задаются неравенствами (9.1).

Объект при выборе проверок по эвристическому алгоритму исключения моделируется таблицей связей орграфа (8.2) или (8.6).

Множество проверок $U_{\text{К}}$, позволяющих обнаруживать отказы с минимальными затратами, формируется поочередным исключением из таблицы связей проверок с наибольшими затратами на их выполнение. Если несколько проверок выполняются с одинаковыми затратами, исключается любая из этих проверок. Для выполнения неравенств (9.1) достаточно, чтобы каждая строка $e \in E^0$ таблицы связей после исключения проверки содержала хотя бы один символ 0.

Множество проверок, учитываемых диагностической моделью, ранжируется в порядке убывания затрат на их реализацию.

Например, затраты в условных единицах на реализацию проверок, учитываемых таблицей связей 9.1, в порядке убывания составляют: $c_4 = 8$; $c_5 = 6$; $c_6 = 5$; $c_2 = 4$; $c_1 = 3$; $c_3 = 2$.

Таблица связей 9.1 после ранжирования проверок в порядке убывания затрат на их реализацию представлена таблицей 9.4.

Таблица 9.4

Таблица связей

E	u_4	u_5	u_6	u_2	u_1	u_3
e_0	1	1	1	1	1	1
e_1	1	0	1	1	0	0
e_2	0	0	0	0	1	1
e_3	1	1	1	1	1	0
e_4	0	0	0	1	1	1
e_5	1	0	1	1	1	1
e_6	1	1	0	1	1	1

Далее определяется число символов 0 в каждой строке $e \in E^0$ таблицы связей без учета результатов проверки, затраты на выполнение которой наибольшие. Если каждая строка содержит хотя бы один символ 0, то проверка (столбец) исключается из таблицы связей. В случае невыполнения неравенств (9.1), а также после исключения проверки действия повторяются для очередных проверок с меньшими затратами на реализацию. Проверки, оставшиеся в таблице связей, позволяют обнаруживать отказы.

Например, строки $e \in E^0$ таблицы связей без учета результатов проверки u_4 содержат символы 0 и проверка (столбец) u_4 исключается. Проверка u_5 должна применяться при обнаружении отказов, поскольку после ее исключения из таблицы связей отсутствуют символы 0 в строке e_5. Аналогично определяется, что проверки u_6, u_3 не исключаются, а проверки u_2, u_1 исключаются из таблицы связей.

Таблица связей после исключения проверок u_4, u_2, u_1 представлена таблицей 9.5.

Проверки u_5, u_6, u_3, оставшиеся в таблице связей, позволяют обнаруживать отказы с затратами в 13 условных единиц.

Таблица 9.5

Таблица связей

E	u_5	u_6	u_3
e_0	1	1	1
e_1	0	1	0
e_2	0	0	1
e_3	1	1	0
e_4	0	0	1
e_5	0	1	1
e_6	1	0	1

9.4 Выбор очередности выполнения проверок для обнаружения отказов методом ветвей и границ

Очередность выполнения проверок, позволяющих обнаруживать отказы с минимальными затратами, влияет на средние затраты при обнаружении отказов по безусловному с условной остановкой алгоритму контроля работоспособности.

Вариант очередности выполнения проверок u_3, u_5, u_6 по безусловному с условной остановкой алгоритму контроля работоспособности объекта, моделируемого таблицей связей 9.5, представлен бинарным деревом на рисунке 9.2.

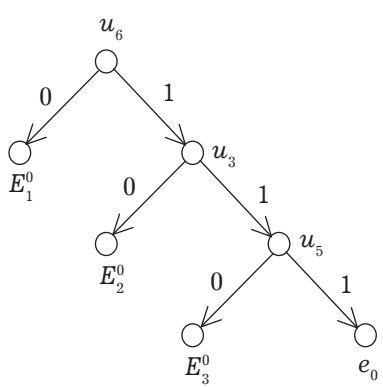


Рисунок 9.2 — Граф алгоритма контроля работоспособности

Множества отказов, обнаруживаемых после очередных проверок, составляют: $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_6^0) = \{e_2, e_4, e_6\}$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_3^0) \setminus E_1^0 = \{e_1, e_3\}$, $E_3^0 = \varphi^{-1}(u_5^0) \setminus E_1^0 \bigcup E_2^0 = \{e_5\}$.

Если работоспособное состояние и отказы образуют полную группу несовместных случайных событий и алгоритм контроля работоспособности применяется многократно, то средние затраты на обнаружение отказов вычисляются по формуле

$$C = \sum_{i=1}^{m} c_i \left[1 - \sum_{j=0}^{i-1} P(E_j^0) \right], \qquad (9.18)$$

где c_i — затраты на реализацию очередной проверки;

$P(E_j^0)$ — вероятность отказов, обнаруживаемых при недопустимом результате проверки;

m — число выполняемых проверок.

Например, средние затраты алгоритма на рисунке 9.2 при затратах в условных единицах на выполнение проверок $c(u_3) = 2$, $c(u_5) = 6$, $c(u_6) = 5$, вероятностях отказов $p(e_1) = p(e_2) = 0{,}01$, $p(e_3) = p(e_4) = 0{,}015$, $p(e_5) = p(e_6) = 0{,}05$ и вероятности работоспособного состояния $p(e_0) = 0{,}85$, учитывая, что $P(E_0^0) = 0$, составляют:

$$\begin{aligned} C &= c(u_6)[1 - P(E_0^0)] + c(u_3)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + \\ &+ c(u_5)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0) - P(E_2^0)] = \\ &= c(u_6) + c(u_3)[1 - p(e_2) - p(e_4) - p(e_6)] + \\ &+ c(u_5)[1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_3) - p(e_4) - p(e_6)] = \\ &= 5 + 2(1 - 0{,}075) + 6(1 - 0{,}1) = 12{,}25 \end{aligned}$$

При иной очередности выполнения проверок средние затраты на обнаружение отказов будут другими.

Комбинации очередности выполнения проверок можно отображать вершинами ветвей ранжированного дерева. Вершинам каждой ветви, кроме корня, сопоставляются m проверок в очередности их выполнения. Ранг вершины равен числу дуг от корня до рассматриваемой вершины. Полустепень исхода корня составляет m. С увеличением на единицу ранга вершины полустепень ее исхода уменьшается на единицу.

Дерево комбинаций очередности выполнения проверок u_3, u_5, u_6 показано на рисунке 9.3. Ветвь с затемненными вершинами соответствует очередности выполнения проверок, установленной графом алгоритма контроля работоспособности на рисунке 9.2.

Идея поиска оптимального решения задачи методом ветвей и границ состоит в многошаговом возвратном (рекуррентном) сокращенном переборе комбинаций (сочетаний с перестановками) проверок и выборе после каждого шага перспективной комбинации оцениванием нижней границы средних затрат на обнаружение отказов.

Сокращение перебора достигается развитием на каждом шаге только перспективной комбинации проверок с наименьшей нижней границей средних затрат. Развитие перспективных комбинаций проверок продолжается до формирования комбинации проверок, позволяющей обнаруживать отказы с наименьшими средними затратами.

Нижняя граница средних затрат на обнаружение отказов для очередности выполнения k ($1 \le k \le m - 1$) проверок u_i, u_j, ..., u_q, составляющих множество U_k, обозначается $C_{\text{н}}(U_k)$ и представляется в виде суммы двух слагаемых:

$$C_{\text{н}}(U_k) = C(U_k) + C_{\text{н}}(U \backslash U_k). \qquad (9.19)$$

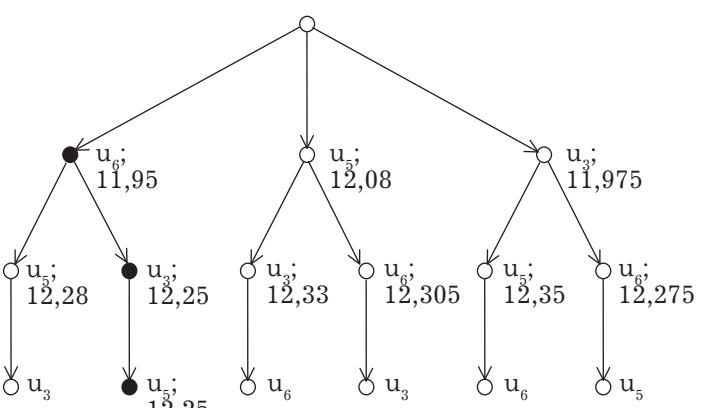


Рисунок 9.3 — Дерево комбинаций очередности выполнения проверок

Первое слагаемое составляют средние затраты на обнаружение отказов после выполнения k проверок. Второе слагаемое является нижней границей средних затрат на обнаружение отказов для оставшихся $U \backslash U_k$ проверок.

Из формулы (9.18) получаем

$$C(U_k) = \sum_{i=1}^{k} c_i \left[1 - \sum_{j=0}^{i-1} P(E_j^0) \right]. \qquad (9.20)$$

Нижняя граница должна быть меньше фактических средних затрат на обнаружение отказов. Поэтому условно принимается, что среди $U \backslash U_k$ проверок существует минимальная по затратам проверка, позволяющая обнаруживать оставшиеся отказы. Остальные проверки $U \backslash U_{k+1}$ используются при определении работоспособного состояния. Тогда нижняя граница средних затрат вычисляется по формуле

$$C_H(U \setminus U_k) = \left(\min_{u_i \in U \backslash U_k} \{c(u_i)\} \right) \left[1 - \sum_{j=0}^{k} P(E_j^0) \right] + p(e_0) \sum_{u_i \in U \setminus U_{k+1}} c(u_i). \qquad (9.21)$$

Результаты вычислений нижних границ средних затрат и выбора очередности выполнения проверок методом ветвей и границ представлены на рисунке 9.3.

Первой проверкой при контроле работоспособности может быть любая проверка, отображаемая вершиной первого ранга. Нижние границы средних затрат на обнаружение отказов после выполнения первой проверки вычисляются по формулам (9.19)–(9.21) при $k = 1$:

$$C_{\text{Н}}(u_6) = c(u_6)[1 - P(E_0^0)] + c(u_3)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + p(e_0)\, c(u_5),$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_6^0) = \{e_2, e_4, e_6\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_6) = c(u_6) + c(u_3)[1 - p(e_2) - p(e_4) - p(e_6)] - p(e_0)\, c(u_5) =$$
$$= 5 + 2(1 - 0{,}075) + 0{,}85 \times 6 = 11{,}95.$$

$$C_{\text{Н}}(u_5) = c(u_5)[1 - P(E_0^0)] + c(u_3)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + p(e_0)\, c(u_6),$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_5^0) = \{e_1, e_2, e_4, e_5\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_5) = c(u_5) + c(u_2)\,[1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_4) - p(e_5)] + p(e_0)\,c(u_6) =$$
$$= 6 + 2(1 - 0{,}085) + 0{,}85 \times 5 = 12{,}08.$$

$$C_{\text{Н}}(u_3) = c(u_3)\,[1 - P(E_0^0)] + c(u_6)\,[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + p(e_0)\,c(u_5),$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_3^0) = \{e_1, e_3\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_3) = c(u_3) + c(u_6)\,[1 - p(e_1) - p(e_3)] - p(e_0)\,c(u_5) =$$
$$= 2 + 5(1 - 0{,}025) + 0{,}85 \times 6 = 11{,}975.$$

Перспективная комбинация проверок начинается с проверки u_6, которой сопоставлена наименьшая нижняя граница. Вторая проверка выбирается из проверок u_3, u_5, отображаемых вершинами второго ранга. Нижние границы средних затрат на обнаружение отказов после выполнения двух проверок вычисляются при $k = 2$.

За проверками u_6, u_3 может следовать только проверка u_5, тогда

$$C_{\text{Н}}(u_6, u_3) = c(u_6)\,[1 - P(E_0^0)] + c(u_3)\,[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] +$$
$$+ c(u_5)\,[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0) - P(E_2^0)],$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_6^0)$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_3^0) \setminus E_1^0 = \{e_1, e_3\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_6, u_3) = c(u_6) + c(u_3)\,[1 - p(e_2) - p(e_4) - p(e_6)] +$$
$$+ c(u_5)[(1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_3) - p(e_4) - p(e_6)] =$$
$$= 5 + 2(1 - 0{,}075) + 6(1 - 0{,}1) = 12{,}25.$$

За проверками u_6, u_5 может следовать только проверка u_3, тогда

$$C_{\text{Н}}(u_6, u_5) = c(u_6)\,[1 - P(E_0^0)] + c(u_5)\,[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] +$$
$$+ c(u_3)\,[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0) - P(E_2^0)],$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_6^0) = \{e_2, e_4, e\}$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_5^0) \setminus E_1^0 = \{e_1, e_5\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_6, u_5) = c(u_6) + c(u_5)\,[1 - p(e_2) - p(e_4) - p(e_5) - p(e_6)] +$$
$$+ c(u_3)[(1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_4) - p(e_5) - p(e_6)] =$$
$$= 5 + 6(1 - 0{,}075) + 2(1 - 0{,}135) = 12{,}28.$$

Перспективная комбинация проверок начинается с проверки u_3, которой соответствует наименьшая нижняя граница.

Вторая проверка выбирается из проверок u_6, u_5, отображаемых вершинами второго ранга. Нижние границы средних затрат на обнаружение отказов после выполнения двух проверок вычисляются при $k = 2$.

За проверками u_3, u_6 может следовать только проверка u_5, тогда

$$C_{\text{Н}}(u_3, u_6) = c(u_3)[1 - P(E_0^0)] + c(u_6)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + \\ + c(u_5)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0) - P(E_2^0)],$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_3^0) = \{e_1, e_3\}$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_6^0) \setminus E_1^0 = \{e_2, e_4, e_6\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_3, u_6) = c(u_3) + c(u_6)\,[1 - p(e_1) - p(e_3)] + c(u_5)[(1 - p(e_1) - \\ - p(e_2) - p(e_3) - p(e_4) - p(e_6)] = 2 + 5(1 - 0{,}025) + \\ + 6(1 - 0{,}1) = 12{,}275$$

За проверками u_3, u_5 может следовать только проверка u_6, тогда

$$C_{\text{Н}}(u_3, u_5) = c(u_3)[1 - P(E_0^0)] + c(u_5)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + \\ + c(u_6)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0) - P(E_2^0)],$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_3^0) = \{e_1, e_3\}$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_5^0) \setminus E_1^0 = \{e_2, e_4, e_5\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_3, u_5) = c(u_3) + c(u_5)\,[1 - p(e_1) - p(e_3)] + c(u_6)[(1 - p(e_1) - \\ - p(e_2) - p(e_3) - p(e_4) - p(e_5)] = 2 + 6(1 - 0{,}025) + \\ + 5(1 - 0{,}1) = 12{,}35.$$

Перспективная комбинация проверок начинается с проверки u_5, которой соответствует наименьшая нижняя граница. Вторая проверка выбирается из проверок u_3, u_6, отображаемых вершинами второго ранга. Нижние границы средних затрат на обнаружение отказов после выполнения двух проверок вычисляются при $k = 2$.

За проверками u_5, u_3 может следовать только проверка u_6, тогда

$$C_{\text{Н}}(u_5, u_3) = c(u_5)[1 - P(E_0^0)] + c(u_3)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + \\ + c(u_6)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^o) - P(E_2^0)],$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_5^0)$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_3^0) \setminus E_1^0 = \{e_3\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_5, u_3) = c(u_5) + c(u_3)\,[1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_4) - p(e_5)] + \\ + c(u_6)\,[(1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_3) - p(e_4) - p(e_5)] = \\ = 6 + 2\,(1 - 0{,}085) + 5\,(1 - 0{,}1) = 12{,}33.$$

За проверками u_5, u_6 может следовать только проверка u_3, тогда

$$C_{\text{Н}}(u_5, u_6) = c(u_5)[1 - P(E_0^0)] + c(u_6)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0)] + \\ + c(u_3)[1 - P(E_0^0) - P(E_1^0) - P(E_2^0)],$$

где $E_1^0 = \varphi^{-1}(u_5^0)$, $E_2^0 = \varphi^{-1}(u_6^0) \setminus E_1^0 = \{e_6\}$;

$$C_{\text{Н}}(u_5, u_6) = c(u_5) + c(u_6)\,[1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_4) - p(e_5)] + \\ + c(u_2)\,[(1 - p(e_1) - p(e_2) - p(e_4) - p(e_5) - p(e_6)] = \\ = 6 + 5(1 - 0{,}085) + 2(1 - 0{,}135) = 12{,}305.$$

Итак, проверки следует выполнять в последовательности u_6, u_3, u_5, обеспечивающей минимальное значение 12,25 в условных единицах средних затрат на обнаружение отказов объекта. Граф алгоритма контроля работоспособности с минимальными средними затратами на обнаружение отказов показан на рисунке 9.2.

При поиске оптимального решения методом ветвей и границ построены все ветви дерева комбинаций очередности выполнения проверок и, таким образом, методом ветвей и границ не гарантируется неполный перебор вариантов решений для любых исходных данных.

Контрольные вопросы

1. Как выбор проверок для обнаружения отказов с минимальными затратами приводится к задаче линейного целочисленного программирования?

2. Поясните переход от условий обнаружения отказов по двудольному орграфу к ограничениям в задаче линейного целочисленного программирования.

3. Что такое допустимое решение задачи линейного целочисленного программирования?

4. Как формируется дополнительное ограничение (фильтр) при решении задачи линейного целочисленного программирования методом Баллаша?

5. Поясните методику решения задачи линейного целочисленного программирования методом Баллаша.

6. Как выбрать проверки для обнаружения отказов с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения?

7. Почему эвристический алгоритм выбора проверок для обнаружения отказов не гарантирует достижения минимального значения целевой функции?

8. Поясните идею выбора проверок для обнаружения отказов с минимальными затратами методом ветвей и границ с помощью дерева выбора проверок.

9. Как формируется нижняя граница затрат на обнаружение отказов при выборе проверок методом ветвей и границ?

10. Запишите и поясните с помощью графа алгоритма контроля работоспособности формулу для вычисления средних затрат на обнаружение отказов.

11. Поясните идею выбора очередности выполнения проверок для обнаружения отказов с минимальными средними затратами методом ветвей и границ с помощью дерева комбинаций очередности выполнения проверок.

12. Как формируется нижняя граница затрат на обнаружение отказов при выборе очередности выполнения проверок методом ветвей и границ?

Глава 10
МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПОИСКА МЕСТА ОТКАЗА

10.1 Выбор проверок для поиска места отказа методом линейного целочисленного программирования

Диагностическая модель в форме орграфа (8.2) удовлетворяет условиям (8.5), которые при $i \neq 0$ являются условиями различения отказов по результатам проверок. Отказы различаются результатами хотя бы одной проверки.

Например, в таблице связей 10.1 отказы отличаются между собой результатами хотя бы одной проверки.

Таблица 10.1

Таблица связей

E	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
e_0	1	1	1	1	1	1
e_1	0	1	0	1	0	0
e_2	1	0	1	0	0	0
e_3	1	1	0	1	1	1
e_4	1	1	1	0	0	0
e_5	1	1	1	1	0	1
e_6	1	1	1	1	1	0

Если отказы различаются результатами проверок, то симметрические разности множеств $\varphi_0(e_i)$, $\varphi_0(e_j)$, содержащие элементы, принадлежащие в точности одному из множеств, не являются пустыми:

$$|\varphi_0(e_i)\Delta\varphi_0(e_j)| > 0, \qquad (10.1)$$

где φ_0: $E^0 \to U^0$;

Δ — символ симметрической разности множеств.

Например, при $i = 1$ и $j = 2$ по таблице 10.1 определяем: $\varphi_0(e_1) = \{u_1^0, u_3^0, u_5^0, u_6^0\}$, $\varphi_0(e_2) = \{u_2^0, u_4^0, u_5^0, u_6^0\}$, $\varphi_0(e_1)\Delta\varphi_0(e_2) = \{u_1^0, u_2^0, u_3^0, u_4^0\}$ и $|\varphi_0(e_1) \cdot \Delta\varphi_0(e_2)| = 4$.

Выбор проверок для поиска места отказа с минимальными затратами приводится к задаче линейного целочисленного программирования:

$$\min \sum_{i=1}^{m} c_i x_i; \tag{10.2}$$

$$\sum_{i \in S_{jk}} x_i > 0, \tag{10.3}$$

где x_i — бинарная переменная, сопоставленная проверке u_i, принимающая значение 1, если проверка выполняется, и значение 0 — в противном случае;

c_i — затраты на выполнение проверки u_i;

m — число проверок;

S_{jk} — множество номеров проверок, недопустимыми результатами которых различаются отказы e_j, e_k.

Ограничения (10.3) формируются на основе неравенств (10.1). Число ограничений вычисляется по формуле

$$C_n^2 = \frac{n!}{2!(n-2)!},$$

где $n = |E^0|$. Например, при $n = 6$ число ограничений равно $C_6^2 = 15$.

При одинаковых затратах на выполнение проверок задача линейного целочисленного программирования (10.2), (10.3) сводится к выбору минимального числа бинарных переменных.

Целевая функция и ограничения для объекта, моделируемого таблицей связей 10.1, значений затрат на выполнение проверок в условных единицах $c_1 = 3$, $c_2 = 4$, $c_3 = 2$, $c_4 = 8$, $c_5 = 6$, $c_6 = 5$ записываются так:

$\min (3x_1 + 4x_2 + 2x_3 + 8x_4 + 6x_5 + 5x_6)$; (10.4)

$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 > 0$; (10.5)

$x_1 + x_5 + x_6 > 0$; (10.6)

$x_1 + x_3 + x_4 > 0$; (10.7)

$x_1 + x_3 + x_6 > 0$; (10.8)

$x_1 + x_3 + x_5 > 0$; (10.9)

$x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 > 0;$ (10.10)

$x_2 > 0;$ (10.11)

$x_2 + x_4 + x_6 > 0;$ (10.12)

$x_2 + x_4 + x_5 > 0;$ (10.13)

$x_3 + x_4 + x_5 + x_6 > 0;$ (10.14)

$x_3 + x_5 > 0;$ (10.15)

$x_3 + x_6 > 0;$ (10.16)

$x_4 + x_6 > 0;$ (10.17)

$x_4 + x_5 > 0;$ (10.18)

$x_5 + x_6 > 0.$ (10.19)

Ограничения (10.5)–(10.19) получены на основе неравенств (10.1).

Например, если $\varphi_0(e_1)\Delta\varphi_0(e_2) = \{u_1^0, u_2^0, u_3^0, u_4^0\}$, то $S_{12} = \{1, 2, 3, 4\}$ и приходим к ограничению (10.5).

Задача линейного целочисленного программирования может содержать ограничения с одной булевой переменной. Таким переменным во всех ограничениях и в целевой функции следует присваивать значения 1, а отображаемые ими проверки выбирать для поиска места отказа с минимальными затратами. Число переменных и ограничений в задаче линейного целочисленного программирования уменьшается.

Действительно, из ограничения (10.11) следует, что $x_2 = 1$ и множество проверок, позволяющих обнаруживать отказы с минимальными затратами, должно содержать проверку u_2. После подстановки $x_2 = 1$ в целевую функцию и ограничения получаем:

$\min(3x_1 + 2x_3 + 8x_4 + 6x_5 + 5x_6 + 4);$ (10.20)

$x_1 + x_5 + x_6 > 0;$ (10.21)

$x_1 + x_3 + x_4 > 0;$ (10.22)

$x_1 + x_3 + x_6 > 0;$ (10.23)

$x_1 + x_3 + x_5 > 0;$ (10.24)

$x_3 + x_4 + x_5 + x_6 > 0;$ (10.25)

$x_3 + x_5 > 0;$ (10.26)

$x_3 + x_6 > 0;$ (10.27)

$x_4 + x_6 > 0;$ (10.28)

$x_4 + x_5 > 0;$ (10.29)

$x_5 + x_6 > 0.$ (10.30)

Задача выбора проверок для поиска места отказа с минимальными затратами, приведенная к задаче линейного целочисленного программирования с бинарными переменными, решается по аддитивному алгоритму Баллаша с фильтром (см. подраздел 9.1).

Допустимым решением задачи (10.20)–(10.30) удовлетворяющим ограничениям (10.21)–(10.30), являются, например,

Таблица 10.2

Результаты определения оптимального решения по алгоритму Баллаша

Номер сочетания	Сочетания значений переменных					Значения ограничений и целевой функции						
	x_1	x_3	x_4	x_5	x_6	(10.31)	(10.26)	(10.27)	(10.28)	·	(10.25)	(10.20)
1	0	0	0	0	0	4	0			·		
2	0	0	0	0	1	9	0			·		
3	0	0	0	1	0	10	1	0		·		
4	0	0	0	1	1	15	1	1	1	·		
5	0	0	1	0	0	12	0			·		
6	0	0	1	0	1	17	0			·		
7	0	0	1	1	0	18				·		
8	0	0	1	1	1	23				·		
9	0	1	0	0	0	6	1	1	0	·		
10	0	1	0	0	1	11	1	2	1	·		
11	0	1	0	1	0	12	2	1	0	·		
12	0	**1**	0	**1**	**1**	**17**	**2**	**2**	**2**	·	**3**	**17**
13	0	1	1	0	0	14	1	1	1	·		
·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
31	1	1	1	1	0	23				·		
32	1	1	1	1	1	28				·		

значения переменных $x_3 = x_5 = x_6 = 1$, $x_1 = x_4 = 0$, для которых целевая функция (10.20) принимает значение 17.

Минимальное значение целевой функции будет не более 17, если выполняется дополнительное ограничение

$$3x_1 + 2x_3 + 8x_4 + 6x_5 + 5x_6 + 4 \le 17. \qquad (10.31)$$

Результаты определения оптимального решения по алгоритму Баллаша частично представлены в таблице 10.2.

Допустимое решение оказалось оптимальным. Выполнение проверок u_2, u_3, u_5, u_6 позволяет обнаруживать отказы и определять место отказа с минимальными затратами в 17 условных единиц.

Число вычислений значений целевой функции (10.2) и ограничений (10.3) при поиске оптимального решения задачи методом полного перебора определяется по формуле $2^m\left[\frac{n!}{2!(n-2)!}+1\right]$.

Например, для решения задачи (10.4)–(10.19) полным перебором требуется 1024 вычисления.

Сочетание методического приема сокращения числа ограничений с алгоритмом Баллаша позволяет уменьшить число вычислений до 91, т. е. приблизительно до 9% от числа вычислений при полном переборе.

Уменьшение числа вычислений по алгоритму Баллаша достигается выбором допустимого решения, принимаемого в качестве фильтра, близкого к оптимальному. Допустимое решение можно формировать, например, по эвристическому алгоритму исключения проверок, на реализацию которого требуются относительно небольшие ресурсы.

Выбор проверок для поиска места отказа с минимальными затратами объекта, моделируемого орграфом (8.5) или (8.19), осуществляется аналогично.

10.2 Выбор проверок для поиска места отказа по эвристическому алгоритму

Выбор проверок для поиска места отказа с минимальными затратами методами комбинаторной оптимизации, например,

по алгоритму Баллаша, достигается ценой больших затрат вычислительных ресурсов, которые недопустимо возрастают с увеличением размерности диагностической модели. Поэтому иногда ограничиваются выбором состава проверок близкого к оптимальному по эвристическому алгоритму без комбинаторного перебора вариантов решений.

Критерием оптимизации состава проверок принимается минимум затрат на поиск места отказа, которые вычисляются по формуле

$$C(U_{\text{П}}) = \sum_{u \in U_{\text{П}}} c(u), \qquad (10.32)$$

где $U_{\text{П}}$ — множество выполняемых проверок.

Ограничения задаются условиями (8.5) при $i \neq 0$.

Объект при выборе проверок для поиска места отказа по эвристическому алгоритму исключения моделируется таблицей связей орграфа (8.2), (8.6) или (8.19). Множество проверок, учитываемых моделью, ранжируется в порядке убывания затрат на их реализацию.

Например, затраты в условных единицах на реализацию проверок, учитываемых таблицей связей 10.1, в порядке убывания составляют: $c_4 = 8$, $c_5 = 6$, $c_6 = 5$, $c_2 = 4$, $c_1 = 3$, $c_3 = 2$.

Таблица связей 10.1 после исключения строки e_0 ($i \neq 0$) и ранжирования проверок в порядке убывания затрат на их реализацию представлена таблицей 10.3.

Таблица 10.3

Таблица связей

E	u_4	u_5	u_6	u_2	u_1	u_3
e_1	1	0	0	1	0	0
e_2	0	0	0	0	1	1
e_3	1	1	1	1	1	0
e_4	0	0	0	1	1	1
e_5	1	0	1	1	1	1
e_6	1	1	0	1	1	1

Далее осуществляется сравнение строк таблицы связей попарно без учета результатов проверки, затраты на выполнение которой наибольшие. Если строки различаются попарно, то проверка (столбец) исключается из таблицы связей.

В случае появления одинаковых строк, а также после исключения проверки действия повторяются для очередных проверок с меньшими затратами на реализацию. Проверки, оставшиеся в таблице связей, позволяют определять место отказа.

Например, строки таблицы связей без учета результатов проверки u_4 различаются попарно и проверка (столбец) u_4 исключается. Очередная проверка u_5 должна применяться при поиске места отказа, поскольку ее исключение из таблицы связей приводит к появлению неразличимых строк e_4, e_6.

Аналогично определяется, что проверки u_6, u_2, u_3 не исключаются из таблицы связей, а проверка u_1 исключается.

Таблица связей после исключения столбцов u_4, u_1 представлена таблицей 10.4.

Таблица 10.4

Таблица связей

E	u_5	u_6	u_2	u_3
e_1	0	0	1	0
e_2	0	0	0	1
e_3	1	1	1	0
e_4	0	0	1	1
e_5	0	1	1	1
e_6	1	0	1	1

Проверки u_5, u_6, u_2, u_3, оставшиеся в таблице связей, позволяют определять место отказа с затратами в 17 условных единиц.

Проверок, выбранных для поиска места отказа по диагностической модели, учитывающей только одиночные отказы, обычно недостаточно при поиске места кратного отказа. Ограниченное число выполняемых проверок может привести к ошибке в определении места кратного отказа. Действительно, сочетание

отказов e_3, e_4 проявляется сочетанием признаков работоспособности и отказа 0010, как и отказ e_1 в таблице связей 10.4.

Учет кратных отказов приводит к увеличению размерности диагностической модели и затрат вычислительных ресурсов при выборе проверок для поиска места отказа.

10.3 Выбор проверок для поиска места кратного отказа по эвристическому алгоритму

Обоснование методики выбора проверок для поиска места кратного отказа с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения основывается на моделировании работоспособного объекта орграфом (8.7), из которого удаляются орциклы, петли, кратные и транзитивные дуги.

Пример орграфа (8.7), представленного на рисунке 8.6, после удаления петель и транзитивных дуг показан на рисунке 10.1.

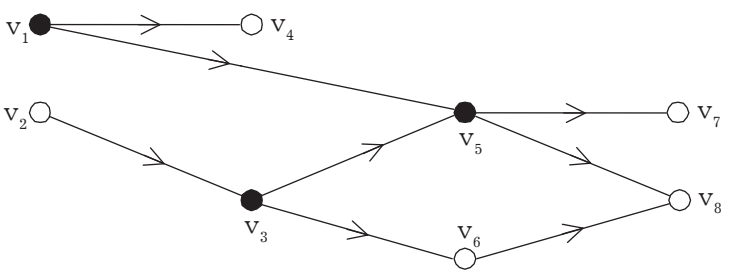


Рисунок 10.1 — Орграф без орциклов, петель, кратных и транзитивных дуг

Проверки объекта различаются между собой только контролируемыми сигналами, отображаемыми вершинами орграфа. Состав проверок задается всеми вершинами орграфа и проверок достаточно для поиска места отказа при любом сочетании (любой кратности) отказов.

Предположим, что контролируются сигналы ν_4, ν_5. Если каждый из сигналов ν_4, ν_5 имеет недопустимое значение, а соче-

тания отказов невозможны, то причиной является недопустимое значение сигнала ν_1, которое определяется без его контроля.

Недопустимые значения сигналов ν_4, ν_5 могут быть следствием сочетания одиночных отказов. Тогда по результатам контроля сигналов ν_4, ν_5 нельзя сделать вывод о значении сигнала ν_1 без его контроля.

Аналогично можно показать, что при сочетании не более k одиночных отказов необходимое условие для исключения проверки (определения значения сигнала без его контроля) формулируется следующим образом:

$$|\gamma(\nu)| \geq k + 1, \tag{10.33}$$

где ν — вершина, соответствующая сигналу;

$|\gamma(\nu)|$ — мощность множества вершин, составляющего образ вершины ν.

Заметим, что $|\gamma(\nu)| \geq \alpha^+(\nu)$,

где $\alpha^+(\nu)$ — полустепень исхода вершины ν (число исходящих дуг).

Выполнения условия (10.33) в общем случае недостаточно для исключения проверки. Исключение проверок, удовлетворяющих условию (10.33), не должно приводить к нарушению условий (8.5) при $i \neq 0$ модели, учитывающей сочетания не более k одиночных отказов (отказов кратностью не более k).

Методикой выбора проверок для поиска места кратного отказа с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения предусматриваются следующие действия:

1) установление кратности k отказов и формирование таблицы связей, учитывающей сочетания не более k одиночных отказов;

2) определение подмножества проверок, удовлетворяющих условию (10.33), и упорядочение их по убыванию затрат на выполнение;

3) сравнение строк таблицы связей попарно без учета результатов проверки, затраты на выполнение которой наибольшие и исключение проверки (столбца) из таблицы связей, если строки различаются попарно;

4) повторение действий по пункту 3 для очередных проверок с меньшими затратами на реализацию.

Проверки, оставшиеся в таблице связей, позволяют определять место кратного отказа.

Например, при $k = 1$ условию (10.33) удовлетворяют вершины v_5, v_1, v_3 орграфа на рисунке 10.1, которым соответствуют проверки u_5, u_1, u_3 из таблицы связей 8.1, перечисленные в порядке убывания затрат на их выполнение.

Исключение проверок u_5, u_1, u_3 из таблицы связей не приводит к нарушению условий (8.5) при $i \neq 0$. Вершины, соответствующие исключенным проверкам, на рисунке 10.1 затемнены.

Для поиска места отказа с минимальными затратами следует выполнять проверки u_2, u_4, u_6, u_7, u_8.

10.4 Выбор очередности выполнения проверок для поиска места отказа по эвристическому алгоритму

Очередность выполнения проверок влияет на среднее число проверок для поиска места отказа по условному алгоритму диагностирования.

Если отказы, учитываемые диагностической моделью, образуют полную группу несовместных случайных событий и алгоритм диагностирования применяется многократно, то среднее число проверок для поиска места отказа вычисляется по формуле

$$l = \sum_{i=1}^{n} p_i m_i, \tag{10.34}$$

где p_i — вероятность отказа $e_i \in E^0$;

m_i — число проверок, выполняемых для определения места отказа;

n — число отказов.

Таблицу связей двудольного орграфа допустимо рассматривать как форму задания префиксного кода с избыточностью кодирования, определяемой по формуле (10.34), и выбирать очередность выполнения проверок, основываясь на методе минимизации избыточности кодирования Хаффмена.

Если для поиска места отказа выбрано минимальное число проверок, то таблица связей содержит n_1 отказов (строк) E_i, которые отличаются только значениями проверки u_k, и n_2 отказов E_j, отличающихся только значениями проверки u_q.

Усечение таблицы связей исключением значений проверки u_k из всех строк, кроме соответствующих отказам E_i, не нарушает условия (8.5) и приводит к снижению избыточности кодирования l до l_k. Аналогично, исключение значений проверки u_q из всех строк, кроме E_j, приводит к уменьшению избыточности кодирования до l_q. Выбор проверки для усечения таблицы связей основывается на следующей теореме:

$$\sum_{i=1}^{n_1} p(e_i) \le \sum_{j=1}^{n_2} p(e_j) \to l_k \le l_q. \qquad (10.35)$$

Действительно, каждая строка исходной таблицы связей содержит m результатов проверок. После усечения таблицы связей число результатов проверок в строке уменьшается до m–1. Тогда исходя из формулы (10.35) получаем

$$\begin{aligned} l_k - l_q = & [1 - \sum_{i=1}^{n_1} p(e_i)(m-1) + \sum_{i=1}^{n_1} p(e_i)m] - \\ & - [1 - \sum_{j=1}^{n_2} p(e_j)(m-1) + \sum_{j=1}^{n_2} p(e_j)m] = \\ & = \sum_{i=1}^{n_1} p(e_i) - \sum_{j=1}^{n_2} p(e_j) \le 0, \end{aligned}$$

что и требовалось доказать.

Проверка условия, сформулированного в теореме, позволяет определить по меньшей мере одну проверку, например u_k, после исключения значений которой из таблицы связей избыточность кодирования становится наименьшей. Если проверка не единственная, то следует использовать проверку, затраты на выполнение которой наибольшие. Такой прием приводит к уменьшению средних затрат на поиск места отказа.

Каждую пару строк e_s, e_t усеченной таблицы связей, имеющих наибольшую длину и отличающихся только значениями проверки u_k, можно представить следующим образом:

$$e_s = e_{st} u_k^0; \tag{10.36}$$

$$e_t = e_{st} u_k^1, \tag{10.37}$$

где e_{st} — общая часть строк.

Строки e_s, e_t редуцируются (объединяются), т. е. заменяются строкой e_{st}, которой сопоставляется вероятность

$$p_{st} = p(e_s) + p(e_t). \tag{10.38}$$

После редуцирования пар строк с наибольшей длиной таблица связей содержит строки одинаковой длины на единицу меньше исходной и удовлетворяет условию (8.5). Усечение и редуцирование продолжаются до получения пар строк, содержащих по одному значению проверки.

Пример поэтапного усечения и редуцирования таблицы связей 10.4 представлен на рисунке 10.2, *а*. Вероятности отказов, составляющих полную группу случайных независимых и несовместных событий, указаны в первом столбце.

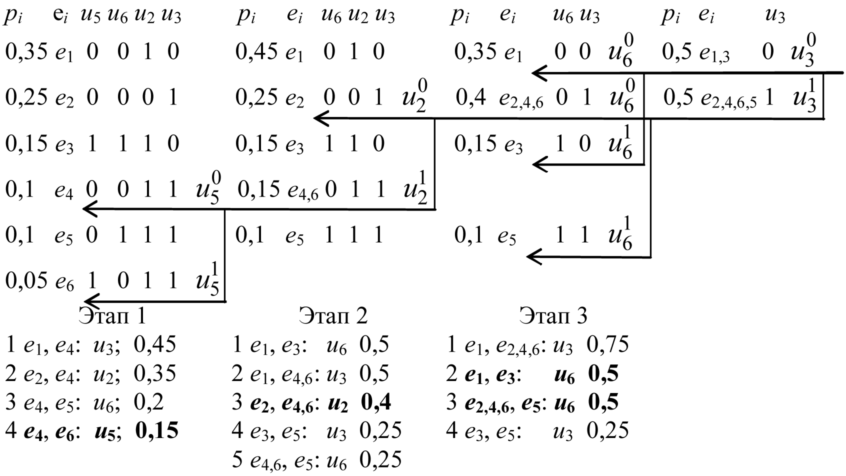
Отказы, отличающиеся значениями проверки, определяются сравнением попарно строк таблицы связей. В исходной таблице связей четыре пары отказов, в которых отказы различаются значениями одной из проверок. Для усечения таблицы связей выбрана проверка u_5, поскольку суммарная вероятность отказов e_4, e_6 наименьшая. Редуцируемые строки показаны стрелками. Значения проверки u_5, которыми отличаются отказы e_4, e_6 указаны в соответствующих строках над стрелками.

На втором этапе выбрана проверка u_2, значениями которой различаются отказы e_2, $e_{4,6}$ наименьшей суммарной вероятностью.

На третьем этапе выбрана проверка u_6, превосходящая по затратам проверку u_3.

Таблица связей, соответствующая префиксному коду с минимальной избыточностью кодирования, формируется из значений проверок, выделенных при поэтапном усечении и указанных над стрелками.

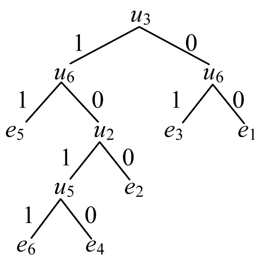
От значения проверки, выбранной на последнем этапе, до значения проверки, выбранной на первом этапе, имеется



а

e_1	u_3^0	u_6^0		
e_2	u_3^1	u_6^0	u_2^0	
e_3	u_3^0	u_6^1		
e_4	u_3^1	u_6^0	u_2^1	u_5^0
e_5	u_3^1	u_6^1		
e_6	u_3^1	u_6^0	u_2^1	u_5^1

б



в

Рисунок 10.2 — Пример оптимизации очередности выполнения проверок

единственный путь, указанный стрелами. Значения проверок на этих путях образуют строки таблицы связей, соответствующей префиксному коду с минимальной избыточностью, показанному на рисунке 10.2, *б*.

Очередность выполнения проверок при поиске места отказа задается схемой (графом) условного алгоритма диагностирования на рисунке 10.2, *в*. Среднее число выполняемых проверок при поиске места отказа составляет приблизительно 2,8.

Контрольные вопросы

1. Поясните переход от условий различения отказов по двудольному орграфу к ограничениям в задаче линейного целочисленного программирования.

2. Как уменьшить число переменных и ограничений в задаче линейного целочисленного программирования?

3. Сфомулируйте и поясните необходимое условие исключения проверки при выборе проверок для поиска места отказа с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения.

4. Как выбрать проверки для поиска места кратного отказа с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения?

5. Почему эвристический алгоритм выбора проверок для поиска места отказа не гарантирует достижения минимального значения целевой функции?

6. Запишите и поясните с помощью графа алгоритма поиска места отказа формулу определения среднего числа проверок для поиска места отказа.

7. Сформулируйте и докажите теорему, используемую при выборе проверки для усечения таблицы связей.

8. Как осуществляется усечение и редуцирование таблицы связей при одинаковых вероятностях отказов?

9. Поясните идею минимизации среднего числа проверок для поиска места отказа по графу алгоритма поиска места отказа.

Список литературы

1. *Бункин А. В.* Справочник по оптимизационным задачам в АСУ/ В. А. Бункин, Д. Колев, Б. Я. Курицкий и др. — Л.: Машиностроение, 1984. — 212 с.

2. *Карибский В. В.* Анализ систем для контроля работоспособности и диагностики неисправностей // Автоматика и телемеханика. — 1965. — №2. — С. 308–314.

3. *Киншт Н. В.* О критериях оптимизации процесса поиска неисправностей // Изв. СО АН СССР: Сер. техн. наук. — 1965. — № 10. — Вып.3. — С. 3–11.

4. *Кузнецов П. И.* Контроль и поиск неисправностей в сложных системах (Методы статистической оптимизации контроля работоспособности и поиска неисправностей в электротехнических и радиоэлектронных системах) / П. И. Кузнецов, Л. А. Пчелинцев, В. С. Гайденко. — М.: Сов. Радио, 1969. — 240 с.

5. *Латинский С. М.* Теория и практика эксплуатации радиоэлектронных систем / С. М. Латинский, В. И. Шарапов, С. П. Ксенз, С. С. Афанасьев / Под ред. С. М. Латинского. — М.: Сов радио, 1970. — 432 с.

6. *Линковский Г. Б.* Среднее время поиска неисправностей в системе электрических блоков / Г. Б. Линковский, В. Ф. Крапивин // Изв. вузов: Электромеханика. — 1962. — № 9.

7. *Линковский Г. Б.* Элементарное обоснование принципа Беллмана для поиска неисправностей в системе блоков с разными временами отказов и временами поиска // Изв. Вузов: Энергетика. — 1961. — № 3.

8. *Осис Я. Я.* Минимизация числа точек контроля // Автоматическое управление. — Рига: Зинатне, 1967. — С. 173–179.

9. *Пархоменко П. П.* Основы технической диагностики: (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян / Под ред П. П. Пархоменко. — М.: Энергия, 1981. — 320 с.

10. *Пашковский Г. С.* Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА / Под ред И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1981. — 280 с.

11. *Свами М.* Графы, сети и алгоритмы/ М. Свами, К. Тхуласираман / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 455 с.

12. *Тимонен Л. С.* О построении оптимальных программ диагностики состояния сложных технических систем // Техническая кибернетика. — 1966. — № 1.

13. *Тимонен Л. С.* О построении оптимальных программ контроля работоспособности //Автометрия. — 1966. — № 4.

14. *Убар Р. Р.* О выборе контролируемых параметров // Автоматика и вычислительная техника. — 1971. — № 3.

15. *Ушаков И. А.* Определение оптимального порядка контроля элементов с целью проверки работоспособности аппара-

туры // Оптимальные задачи надежности. — М.: Изд-во стандартов, 1968. — С. 221–229.

16. *Ушаков И. А.* Оптимальные задачи надежности (Материалы лекций, прочитанных в Политехническом музее на семинаре по надежности и прогрессивным методам контроля качества). — М.: Знание, 1971. — 48 с.

17. *Фандеев В. П.* Теоретические основы оптимизации обнаружения отказов и поиска места отказа: Учебн. пособие. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. — 60 с.

18. *Фрейман М. И.* Реализация на ЭВМ алгоритма метода ветвей и границ для построения программ технической диагностики / М. И. Фрейман, В. И. Шарапов // Техническая диагностика: Труды I всесоюзного совещания по технической диагностике. — М.: Наука, 1972. — С. 265–270.

19. *Чернышов Ю. О.* Выбор параметров контроля параллельных вычислительных структур методом кратчайшего пути // Вопросы технической диагностики. — Ростов: Ростов. инж.-строит. ин-т, 1978. — Вып. 18. — С. 108–115.

20. *Шаронов В. И.* Применение теории графов для решения задачи контроля работоспособности радиоэлектронных систем // Материалы республиканской конференции. — Минск, 1967.

21. *Шило В. Н.* Диагностирование отказов систем вооружения: Краткий текст лекций. — Министерство обороны СССР, 1978. — 42 с.

22. *Яблонский С. В.* Введение в дискретную математику. — М.: Наука, 1979. — 272 с.

Приложение 1

Примеры вариантов решений по приспособленности к диагностированию

Вариант	Вид СТД	Описание работ при подготовке объекта к диагностированию	Способ сопряжения объекта и СТД	Способ унификации сигналов в каналах связи
1	2	3	4	5
1	Встроенные	Работы отсутствуют, не считая операций по выведению объекта на режим диагностирования	Не регламентируется	Не регламентируется
2	Встроенные и внешние	Монтажно-демонтажные работы только в случаях, когда необходим демонтаж составной части для имитирования условий ее функционирования с помощью СТД	Централизованный унифицированный соединитель (соединители) для сопряжения объекта или его составной части с внешними СТД. Сопряжение объекта с внешними СТД для передачи механических воздействий — по внешним поверхностям составных частей и органам управления (установка объекта на стенд, установка приспособления на орган управления)	Сигналы для встроенных СТД не регламентируются. Сигналы в каналах связи с внешними СТД унифицированы встроенными и (или) внешними преобразователями
3	Внешние	То же	То же	Сигналы в каналах связи с внешними СТД унифицированы внешними преобразователями

Продлжене таблицы

1	2	3	4	5
4	Встроенные и внешние	То же и работы по обеспечению доступа к контрольным точкам: вскрытие люков, крышек и т. д.; установка измерительных преобразователей, приборов и устройств	Контрольные точки для внешних СТД выведены на поверхности составных частей. Предусмотрены конструктивные элементы для установки измерительных преобразователей, приборов и устройств. Места присоединения внешних СТД распределены по объекту, находятся в легкодоступных местах. Устройства сопряжения унифицированы. Сопряжение с внешними СТД для передачи механических воздействий — по внешним поверхностям составных частей и органам управления	Сигналы для встроенных СТД не регламентируются. Сигналы в каналах связи с внешними СТД унифицированы встроенными и (или) внешними преобразователями и (или) с помощью преобразователей, устанавливаемых на объект при подготовке к диагностированию
5	Внешние	То же	То же	Сигналы в каналах связи с внешними СТД унифицированы внешними преобразователями и (или) с помощью преобразователей, устанавливаемых на объект при подготовке к диагностированию

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
6	Внешние	Монтажно-демонтажные работы со снятием отдельных составных частей для диагностирования вне объекта, обеспечения доступа к контрольным точкам. Установка технологических переходников, в том числе с разрывом электрических, механических цепей и гидропневмосистем. Установка измерительных преобразователей, приборов и устройств. Подключение СТД	Контрольные точки выведены на внешние поверхности составных частей. Предусмотрены конструктивные элементы для установки измерительных преобразователей, приборов и устройств. Места подсоединения СТД распределены по объекту. Устройства сопряжения унифицированы. Сопряжение с СТД для передачи механических воздействий — по внешним поверхностям составных частей и органам управления	Не регламентируется

Приложение 2

Задания на практические занятия

Задание № 1

Разработать диагностическую модель объекта, схема которого показана на рисунке 1, модели блоков представлены в таблице 1 заданием дуг двудольных орграфов. Наличие и отсутствие дуги обозначаются символами 1 и 0 соответственно.

Отчет по работе должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, результаты разработки графических и табличных моделей работоспособного и отказавшего объекта.

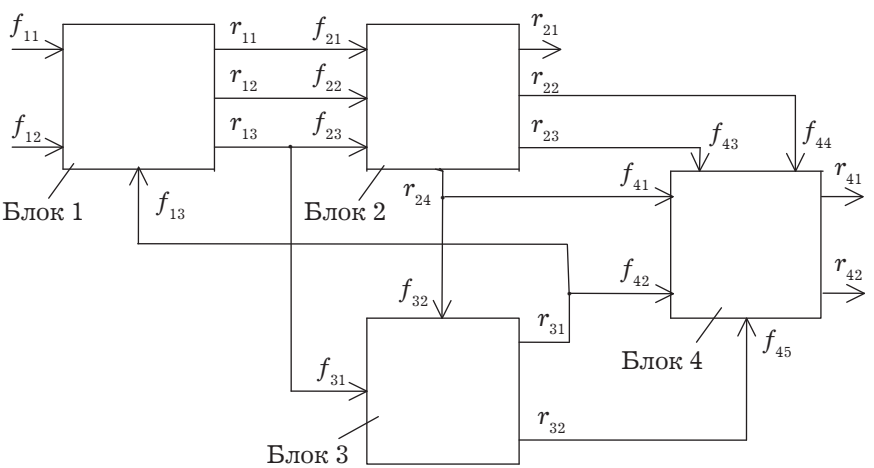


Рисунок 1 — Функциональная схема объекта

Таблица 1

Модели блоков

Дуги	Варианты задания дуг двудольных орграфов														
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
(f_{11},r_{11})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{11},r_{12})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{11},r_{13})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{12},r_{11})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{12},r_{12})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{12},r_{13})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{13},r_{13})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{21},r_{21})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{21},r_{22})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{21},r_{23})	1	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{22},r_{22})	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
(f_{22},r_{23})	1	1	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{31},r_{32})	1	1	1	1	1	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{32},r_{31})	1	1	1	1	1	1	**0**	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{32},r_{32})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0**	1	1	1
(f_{41},r_{41})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{41},r_{42})	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
(f_{42},r_{41})	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	1	**0**	**0**	**0**	**0**
(f_{42},r_{42})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{43},r_{41})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0**	1	1
(f_{43},r_{42})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0**	1
(f_{44},r_{41})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
(f_{45},r_{42})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Задание № 2

Выбрать проверки для обнаружения отказов с минимальными затратами по алгоритму Баллаша при исходных данных, представленных таблицей связей 9.1 и значениями затрат на выполнение проверок, указанными в таблице 2.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, аналитическое представление задачи, результаты решения по алгоритму Баллаша, оптимальное решение.

Таблица 2

Значения затрат на выполнение проверок

Обозначение	Варианты значений затрат в условных единицах										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
c_1	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
c_2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
c_3	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
c_4	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
c_5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
c_6	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	12	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**
c_1	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
c_2	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
c_3	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
c_4	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
c_5	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
c_6	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Задание № 3

Выбрать проверки для обнаружения отказов с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения при исходных данных, представленных таблицей связей 9.1 и значениями затрат на выполнение проверок, указанными в таблице 2.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, результаты решения по эвристическому алгоритму исключения, оптимальное решение.

Задание № 4

Выбрать проверки для обнаружения отказов с минимальными затратами методом ветвей и границ при исходных данных, представленных таблицей связей 9.1 и значениями затрат на выполнение проверок, указанными в таблице 2.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, результаты решения методом ветвей и границ, оптимальное решение.

Задание № 5

Выбрать очередность выполнения проверок для обнаружения отказов с минимальными средними затратами методом ветвей и границ при исходных данных, представленных таблицей связей 9.4, вероятностями отказов $p(e_1) = p(e_2) = 0{,}01$, $p(e_3) = p(e_4) = 0{,}015$, $p(e_5) = p(e_6) = 0{,}05$ и работоспособного состояния $p(e_0)=0{,}85$, значениями затрат на выполнение проверок, указанными в таблице 3.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, результаты вычислений нижних границ средних затрат, сформированные дерево комбинаций очередности выполнения проверок, граф оптимального алгоритма контроля работоспособности.

Таблица 3

Значения затрат на выполнение проверок

Проверки	Варианты значений затрат в условных единицах								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
u_3	3	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2
u_5	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
u_6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,8	1,7

Продолжение таблицы 3

Проверки	Варианты значений затрат в условных единицах								
	10	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
u_3	2,1	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
u_5	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
u_6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8

Задание № 6

Определить области одиночного и кратного отказов по диагностической модели, представленной таблицей 4, для сочетаний результатов проверок при контроле работоспособности объекта, указанных в таблице 5.

Отчет по работе должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, описание методики, результаты локализации места одиночного и кратного отказов.

Таблица 4

Таблица связей

E	u_4	u_8	u_9	u_{10}
e_0	1	1	1	1
e_1	0	1	0	0
e_2	1	0	0	0
e_3	1	0	0	0
e_4	0	1	1	1
e_5	1	1	0	0
e_8	1	0	1	1
e_9	1	1	0	1
e_{10}	1	1	1	0

Таблица 5

Сочетания результатов проверок при контроле работоспособности

Проверки	Варианты							
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
	Результаты проверок							
u_4	0	0	0	0	0	0	0	0
u_8	0	0	0	0	1	1	1	1
u_9	0	0	1	1	0	0	1	1
u_{10}	0	1	0	1	0	1	0	1

Продолжение таблицы 5

Проверки	Варианты							
	9	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	
	Результаты проверок							
u_4	1	1	1	1	1	1	1	
u_8	0	0	0	0	1	1	1	
u_9	0	0	1	1	0	0	1	
u_{10}	0	1	0	1	0	1	0	

Задание № 7

Выбрать проверки для поиска места отказа с минимальными затратами по алгоритму Баллаша при исходных данных, представленных таблицей связей 10.1 и значениями затрат на выполнение проверок, указанными в таблице 2.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, аналитическое представление задачи, результаты решения по алгоритму Баллаша, оптимальное решение.

Задание № 8

Выбрать проверки для поиска места отказа с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения при исходных данных, представленных таблицей связей 10.1

и значениями затрат на выполнение проверок, указанными в таблице 2.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, результаты решения по эвристическому алгоритму исключения, оптимальное решение.

Задание № 9

Выбрать проверки для поиска места кратного отказа с минимальными затратами по эвристическому алгоритму исключения и моделям, сформированным при выполнении задания № 1. Отказы одиночные, затраты на выполнение проверок одинаковые.

Отчет должен содержать титульный лист, модели, используемые для решения задачи, результаты решения по эвристическому алгоритму исключения, оптимальное решение.

Задание № 10

Выбрать очередность выполнения проверок для поиска места отказа с минимальным средним числом проверок по эвристическому алгоритму и таблице связей 10.4 при вероятностях отказов, указанных в таблице 6.

Отчет должен содержать титульный лист, исходные данные для заданного варианта, схему поэтапного усечения и редуцирования таблицы связей, префиксный код с минимальной избыточностью, схему условного алгоритма диагностирования, вычисленное значение среднего числа выполняемых проверок.

Таблица 6

Значения вероятностей отказов

Отказы	Варианты значений вероятностей отказов										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
e_1	0,1	0,15	0,25	0,1	0,3	0,05	0,05	0,08	0,1	0,05	0,05
e_2	0,15	0,1	0,1	0,15	0,05	0,35	0,05	0,12	0,1	0.1	0,05
e_3	0,25	0,25	0,15	0,20	0,05	0,1	0,4	0,18	0,15	0,1	0,25
e_4	0,1	0,15	0,25	0,25	0,1	0,2	0,2	0,22	0,15	0,45	0,2
e_5	0,15	0,1	0,1	0,15	0,25	0,25	0,15	0,1	0,4	0,05	0,25
e_6	0,25	0,25	0,15	0,15	0,25	0,05	0,15	0,3	0,1	0,25	0,2

Продолжение таблицы 6

Отказы	Варианты значений вероятностей отказов										
	12	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**
e_1	0,1	0,15	0,25	0,25	0,1	0,2	0,2	0,22	0,15	0,45	0,2
e_2	0,15	0,1	0,1	0,15	0,25	0,25	0,15	0,1	0,4	0,05	0,25
e_3	0,25	0,25	0,15	0,15	0,25	0,05	0,15	0,3	0,1	0,25	0,2
e_4	0,25	0,25	0,15	0,20	0,05	0,1	0,4	0,18	0,15	0,1	0,25
e_5	0,15	0,1	0,1	0,15	0,05	0,35	0,05	0,12	0,1	0.1	0,05
e_6	0,1	0,15	0,25	0,1	0,3	0,05	0,05	0,08	0,1	0,05	0,05

Главный редактор — *А. Е. Илларионова*
Редактор — *В. Н. Рогожкин*
Художник — *В. А. Антипов*
Верстка — *Н. В. Байкова*
Корректор — *В. Ш. Мерзлякова*

Ответственный за выпуск — *С. М. Паскевич*

Учебное издание

Романович Ж. А., Скрябин В. А.,
Фандеев В. П., Цыпин Б. В.

Диагностирование, ремонт и техническое обслуживание систем управления бытовых машин и приборов

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.007399.06.09 от 26.06.2009 г.

Подписано в печать 20.06.2015. Формат 60×84 1/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Печ. л. 19,75.
Тираж 500 экз.

Издательско-торговая корпорация “Дашков и К°”
129347, Москва, Ярославское шоссе, д. 142, к. 732.
Для писем: 129347, Москва, п/о И-347.
Тел./факс: 8 (499) 182-01-58, 182-11-79, 183-93-01.
E-mail: sales@dashkov.ru — отдел продаж;
office@dashkov.ru — офис;
http://www.dashkov.ru

Отпечатано в ГУП Академиздатцентр «Наука» РАН,
ОП Производственно-издательский комбинат «ВИНИТИ»-«Наука»,
140014, Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403.
Тел./факс: 554-21-86, 554-25-97, 974-69-76.