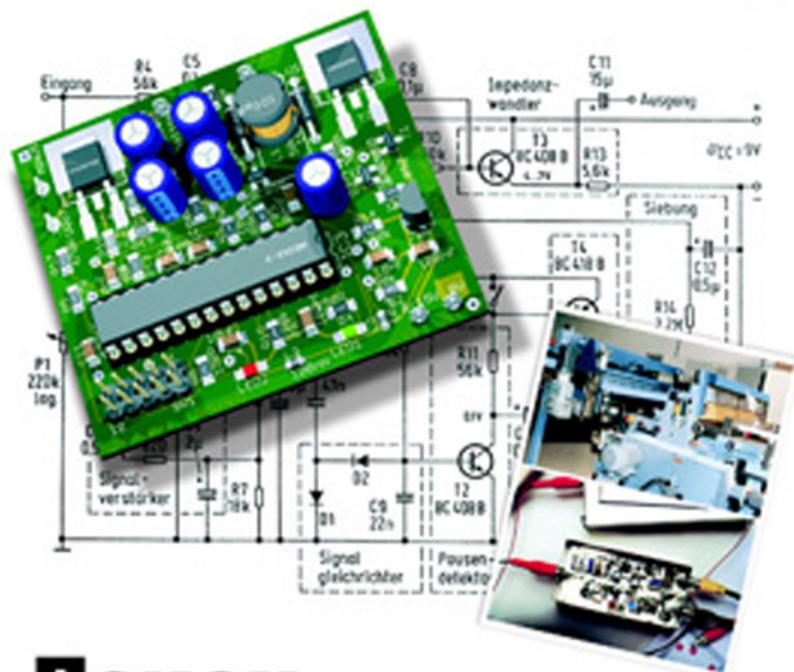


# Электроника

Дитмар Бенда



## Поиск неисправностей в ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

FRANZIS

Dietmar Benda

# **Wie sucht man Fehler in elektronischen Schaltungen?**



**Elektronik**

**Dietmar Benda**

# **Wie sucht man Fehler in elektronischen Schaltungen?**

**Fehlersuche mit Methode**

Mit 170 Abbildungen

**FRANZIS**



**Дитмар Бенда**

# **Поиск неисправностей в ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ**

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2010

УДК 681.3.06  
ББК 32.973.26-018.2  
Б46

### **Бенда Дитмар**

Б46 Поиск неисправностей в электрических схемах: Пер. с нем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 256 с.: ил. — (Электроника)

ISBN 978-5-9775-0359-4

В книге обобщен многолетний опыт практической работы и приведены проверенные методики поиска неисправностей для различных электронных устройств. На большом количестве примеров аналоговых и цифровых блоков, программируемых контроллеров и компьютерной техники показан системный подход и специфика поиска неисправностей в электрических схемах. Рассмотрены основные правила проведения технического обслуживания, фазы поиска неисправностей, диагностика устройств, тестирование электронных компонентов.

*Для профессиональных инженеров-электронщиков  
и радиолюбителей*

УДК 681.3.06  
ББК 32.973.26-018.2

Die berechtigte Übersetzung von deutschsprachiges Buch Wie sucht man Fehler in elektronischen Schaltungen? Fehlersuche mit Methode, ISBN: 978-3-7723-5268-3. Copyright © 2007 Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing. Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Das Erstellen und Verbreiten von Kopien auf Papier, auf Datenträger oder im Internet, insbesondere als PDF, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags gestattet und wird widrigenfalls strafrechtlich verfolgt. Die Russische Übersetzung ist von BHV St. Petersburg verbreitet, Copyright © 2009.

Авторизованный перевод немецкой редакции книги Wie sucht man Fehler in elektronischen Schaltungen? Fehlersuche mit Methode, ISBN: 978-3-7723-5268-3. Copyright © 2007 Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing. Все права защищены, включая любые виды копирования, в том числе фотомеханического, а также хранение и тиражирование на электронных носителях. Изготовление и распространение копий на бумаге, электронных носителях данных и публикация в Интернете, особенно в формате PDF, возможны только при наличии письменного согласия Издательства Franzis. Нарушение этого условия преследуется в уголовном порядке. Перевод на русский язык "БХВ-Петербург" © 2009.

ISBN 978-3-7723-5268-3 (нем.)  
ISBN 978-5-9775-0359-4 (рус.)

© 2008 Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing  
© Перевод на русский язык "БХВ-Петербург", 2009

# Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>1</b>
<b>Глава 1. Основные правила успешного технического обслуживания .....</b>	<b>3</b>
1.1. Системный подход, логика и опыт гарантируют успех .....	3
1.2. Общение с клиентом .....	5
<b>Глава 2. Получение информации об устройствах и системах .....</b>	<b>7</b>
2.1. Системный сбор информации о знакомом и неизвестном .....	7
2.2. Собирайте информацию целенаправленно .....	8
2.3. Устанавливайте характерные черты структуры .....	10
<b>Глава 3. Систематизированный поиск неисправностей в автоматизированных устройствах.....</b>	<b>19</b>
3.1. Предпосылки и последовательность успешного поиска неисправностей.....	20
3.2. Оценка фактического состояния устройства .....	21
3.3. Локализация области неисправности .....	24
3.4. Мероприятия по ремонту и вводу в эксплуатацию .....	28
<b>Глава 4. Определение полярности и напряжения в электронных блоках и схемах.....</b>	<b>31</b>
4.1. Измерение напряжения.....	31
4.2. Неисправности в электрической цепи.....	32
4.3. Точка, взятая в качестве опорного потенциала, определяет полярность и значение напряжений.....	38
4.4. Примеры определения полярности и напряжений.....	41
4.5. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	52
<b>Глава 5. Системный поиск неисправностей в аналоговых схемах.....</b>	<b>57</b>
5.1. Определение напряжений в схемах .....	58

5.2. Последствия возможных коротких замыканий и обрывов при различных видах связи .....	60
Соединительные связи.....	61
Отрицательные обратные связи.....	64
Положительные обратные связи.....	67
5.3. Систематизированный поиск неисправностей в аналоговых схемах .....	67
5.4. Поиск неисправностей в схемах управления и регулировки.....	76
Электропривод трехфазного тока.....	76
Стабилизатор напряжения.....	81
5.5. Поиск неисправностей в колебательных схемах .....	83
LC-генератор синусоидальных колебаний .....	83
Мостовой RC-генератор .....	87
Функциональный преобразователь .....	89
5.6. Поиск неисправностей в операционных усилителях .....	91
Поиск неисправностей в предусилителях.....	95
Оконечный усилитель.....	96
5.7. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	97

## **Глава 6. Системный поиск неисправностей в импульсных и цифровых схемах..... 103**

6.1. Напряжения в цифровых схемах .....	103
6.2. Воздействия возможных коротких замыканий и внутренних обрывов .....	106
6.3. Систематизированный поиск ошибок в цифровой схеме.....	117
6.4. Ошибки в цифровых интегральных схемах .....	122
6.5. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	132

## **Глава 7. Поиск неисправностей в системе с компьютерными схемами..... 137**

7.1. Диагностика неисправностей в схемах с тремя состояниями .....	137
7.2. Проверка статических функциональных параметров .....	139
7.3. Проверка динамических функциональных параметров.....	141
7.4. Систематизированный поиск неисправностей в компьютерной схеме.....	146
7.5. Поиск неисправностей в схемах интерфейсов.....	151
7.6. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	157

## **Глава 8. Поиск неисправностей в системах на программируемых контроллерах..... 161**

8.1. Проверка статических и динамических функциональных параметров .....	164
8.2. Техническое обслуживание путем диагностики с помощью устройства визуального отображения.....	165
8.3. Систематизированный поиск неисправностей в схеме программируемого контроллера .....	171
8.4. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	176

---

<b>Глава 9. Поиск неисправностей в системе с сетевым напряжением питания .....</b>	<b>179</b>
9.1. Сетевые помехи и их воздействия .....	179
9.2. Поиск неисправностей в схемах выпрямителей.....	183
9.3. Поиск неисправностей в источниках питания.....	187
9.4. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	191
<b>Глава 10. Поиск ошибок в системах тестирования при обслуживании и производстве .....</b>	<b>195</b>
10.1. Внутрисхемное тестирование .....	196
10.2. Поиск неисправностей с помощью контактной системы тестирования .....	208
10.3. Подготовка электронных блоков к тестированию .....	233
10.4. Локализация коротких замыканий.....	234
10.5. Упражнения для закрепления полученных знаний .....	235
<b>Приложение. Ответы к упражнениям .....</b>	<b>237</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>241</b>



# Предисловие

Поиск ошибок в установках, узлах, схемах и элементах приобретает существенное значение, если учитывать обоснованные затраты на качественный сервис и техобслуживание.

Высокотехнологичные автоматизированные производственные установки требуют наличия квалифицированного персонала для проведения техобслуживания.

Поиск ошибок, необоснованный логически или основанный только на смутных предположениях, и отсюда бессистемность действий в процессе поиска ошибок, влекут за собой существенные затраты времени и средств. В большинстве случаев это приводит также к значительному снижению качества устройства или установки.

Поэтому грамотное техническое обслуживание требует от обслуживающего персонала наличия следующих качеств:

- серьезных знаний в предметной области;
- быстрого восприятия системных взаимосвязей;
- умение работать в команде и талант организатора, необходимые для получения и обмена информацией.

В соответствии с этими требованиями, а также учитывая последовательность действий в процессе систематизированного поиска ошибок, содержание этой книги делится на четыре тематических раздела.

## □ Усвоение системных знаний

На примере автоматизированного производственного устройства будут показаны фазы поиска и структурирования выявленных системных взаимосвязей.

### □ Системный поиск ошибок в автоматизированных устройствах и установках

Исходя из информации о фактическом состоянии оборудования и опираясь на результаты диагностики, приводится описание ремонта автоматизированного производственного оборудования.

### □ Перепроверка сигнала и измерение электрических величин в узлах и схемах

На большом количестве примеров линейных и цифровых устройств, программируемых контроллеров и компьютерной техники, дается разъяснение специфической для схем системы поиска ошибок.

### □ Поиск ошибок в узлах с помощью автоматических тестеров и систем диагностики

Приведены возможности функционального контроля посредством измерения напряжений, проверки соединений, получения кривых "ток-напряжение" и выполнения сравнительных тестов, а также локализации короткого замыкания.

Область применения электронных устройств достаточно разнообразна, существуют различные виды и конфигурации схем, а поэтому *не может быть единого подхода к поиску ошибок*. В книге приведен функциональный обзор и представлены различные методы контроля, исходя из практического опыта и характерных особенностей различных электронных схем.

Книга является руководством для преподавателей, а также специалистов, занимающихся техобслуживанием и поиском неисправностей в электронных устройствах.

# ГЛАВА 1

## Основные правила успешного технического обслуживания

Благодаря автоматизации всех областей производства техническое обслуживание и процесс устранения неисправностей становится все более существенным фактором, влияющим на издержки производства и качество выпускаемого оборудования, его надежность и точность.

### 1.1. Системный подход, логика и опыт гарантируют успех

Специалист техобслуживания должен уметь на месте ориентироваться в системных функциях больших комплексных установок, обладающих различной системотехникой. При этом он отличается от обычного мастера ремонтных работ, который имеет дело только с одинаковыми серийными продуктами.

Ошибки можно искать двумя различными способами: используя логику и системный подход или опираясь на подозрения и интуицию. В обоих случаях профессиональный опыт имеет решающее значение. *Однако только поиск ошибок, основанный на логике и системном подходе, гарантирует положительный результат в приемлемые сроки.* Поиск ошибок, основанный на подозрениях и интуиции, зависит от случая; он может, но, однако, не обязательно должен привести к успеху.

Поиск ошибок в знакомых специалисту системах с уже известными функциями отличается от поиска ошибок в незнакомых системах. В первом случае большинство неисправностей и дефектов становятся легко прогнозируемыми ошибками. Например, специалист, который в течение длительного времени ремонтирует и поддерживает в исправном состоянии устройства с одинаковой функциональностью (телевизоры, радиоустройства, видеотехнику или персональные компьютеры), всегда или в большинстве случаев имеет дело с одними и теми же ошибками в устройствах, имеющих одинаковый принцип

действия. Принцип действия этих устройств заранее известен (в том числе для различных марок), т. е. их работой не нужно детально разбирать на основании документации. Неисправные узлы и возникающие в связи с этим симптомы ошибок все легче будут локализованы и объяснены в процессе накопления опыта.

В этом случае отсутствует схема поиска неисправностей, поскольку все базируется только на результатах, полученных опытным путем, и происходит примерно так:

- симптом ошибки  $A$  вызван ошибкой в узле  $X$  или схеме  $Y$ ;
- симптом ошибки  $B$  вызван дефектом в схеме  $Z$ .

Этот способ — или лучше сказать привычка — поиска ошибок имеет как свои преимущества, так и недостатки. Специалист по техобслуживанию теряет способность к методичному и системному анализу и локализации ошибок с использованием своих профессиональных знаний. Происходит неизбежное сокращение постоянных упражнений и систематического применения полученных знаний на практике. Вместе с тем одновременно снижается способность к обучению и ориентации в новых или неизвестных системах и функциях.

По-другому обстоит дело в случае, когда специалист техобслуживания на основе своих специальных знаний, а также определенному системному подходу и логике способен определить местонахождение и локализовать ошибки в выполненных на заказ, а иногда и единственных в своем роде приборах и устройствах. Составить себе представление об особенностях функционирования и функциональных блоках этих устройств он может в первую очередь с помощью информации, имеющейся об устройстве, а также из документации. Здесь специалист может проявить себя благодаря умению самостоятельно и методично работать.

В следующих главах книги, на типичных примерах из практики, читателю будет указано направление, в котором он должен целенаправленно и систематично двигаться, чтобы самостоятельно приобрести системный кругозор и знания в области автоматизированных устройств, схем и компонентов, что позволит ему без посторонней помощи устранять неисправности и дефекты. При этом порядок процесса поиска неисправностей всегда соответствует схеме, представленной на рис. 1.1.

Тем не менее, прежде всего, необходимо внимательно ознакомиться с настоящей главой. Информация, представленная в ней, имеет существенное значение для организации качественного технического обслуживания, а также способствует повышению вашей квалификации.

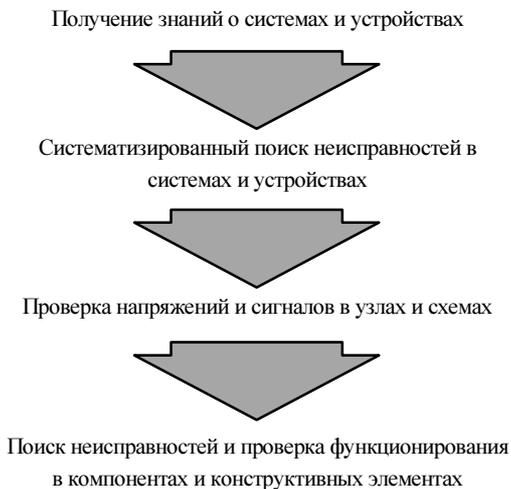


Рис. 1.1. Этапы систематизированного поиска неисправностей от уровня получения знаний об устройстве до уровня конструктивного элемента

## 1.2. Общение с клиентом

Ведение беседы с клиентом является важной составляющей успешной деятельности специалиста по техобслуживанию.

Первое впечатление, произведенное вами на клиента, крайне важно. Как только вы окажетесь перед клиентом, то он сразу же начнет вас оценивать (рис. 1.2). Это неповторимый шанс для формирования хороших, позитивных отношений с клиентом на длительный срок.

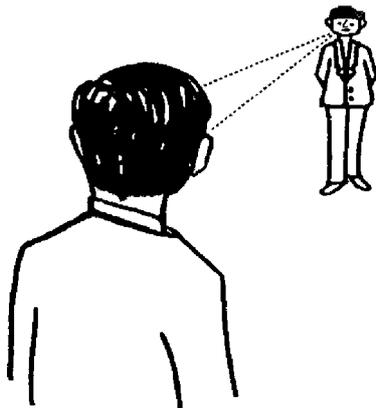


Рис. 1.2. Формирование первого положительного впечатления

Для таких отношений необходимо следующее:

- позитивный настрой;
- пунктуальность;
- соответствующий внешний вид;
- зрительный контакт;
- уверенное ведение беседы.

Основу доверия, которая формируется в процессе ведения беседы, невозможно разрушать плохо проведенными переговорами и неверными действиями. Поэтому задавайте вопросы и просите клиента, чтобы он сам как можно более подробно рассказал о неисправности.

Обращайте при этом внимание на соблюдение равновесия в беседе (рис. 1.3) и пытайтесь встречать возражения активным слушанием, убедительным анализом возражений, а также спокойными и убедительными ответами (рис. 1.4). Думайте всегда, прежде всего, о цели вашего общения — это доверие, которое клиент будет оказывать вам и соответственно продукту.

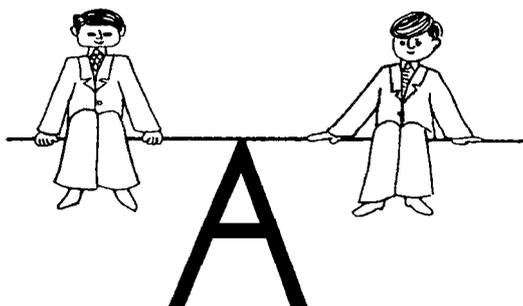


Рис. 1.3. Равновесие ведения беседы

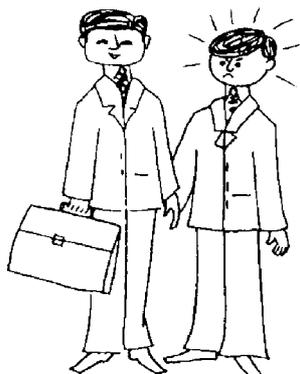


Рис. 1.4. На возражения отвечайте спокойно и убедительно

## ГЛАВА 2

# Получение информации об устройствах и системах

Отправной точкой здесь является необходимость получения общего представления о незнакомом устройстве, в частности о его конструкции, особенностях функционирования, а также о возможностях обслуживания и программирования.

## 2.1. Системный сбор информации о знакомом и неизвестном

Обрабатывающие центры, промышленные роботы и производственные центры имеют определенную *структуру аппаратного и программного обеспечения*. Необходимо определить эту структуру и обобщить информацию о функционировании.

Например, в качестве характеристик функционирования аппаратного обеспечения можно было бы выделить следующее:

- транспортировка заготовок и деталей;
- замена инструмента;
- наличие числового программного управления (ЧПУ), тип привода;
- система смазки;
- гидравлическое или пневматическое управление;
- система охлаждения;
- вспомогательные устройства для поддержания давления, обеспечения смазки и охлаждения, а также позиционирования;
- системы защиты для аварийного выключения и блокировки, такие как, например, фоторелейная защита, световой занавес, контактные коврики, защитные ограждения и двери;

- вид и тип управления (соответственно, вид и тип автоматизируемых устройств), например, централизованное или децентрализованное управление;
- размещение пульта управления и его назначение;
- размещение управляющих шкафов.

Вопросы к структуре программного обеспечения:

- структура программ, язык программирования;
- взаимосвязь ЧПУ и программируемых контроллеров;
- структура сети при децентрализованном управлении;
- программы управления;
- отладочные программы и совокупность служебных программ;
- сохранение программ.

Особенно важно получить детальную информацию об отличительных особенностях и незнакомых функциональных характеристиках системы. При этом необходимо выяснить, кто является ответственным за:

- производственное оборудование;
- обслуживание устройства;
- функционирование системы;
- программирование ЧПУ;
- программирование контроллеров;
- электрику;
- механику, гидравлику, пневматику.

Ответить на значительную часть поставленных вопросов и получить наиболее важную информацию об устройстве можно с помощью документации. Документация может быть достаточно объемной, но в то же время очень запутанной. Если документы, необходимые для получения полной информации об устройстве или процессах обработки (например, блок-схемы программ, списки программ, чертежи электрических схем) отсутствуют, то их нужно обязательно получить до начала обслуживания.

## 2.2. Собирайте информацию целенаправленно

На вопрос: *"Что отличает хорошего специалиста по техобслуживанию?"* можно ответить так: *"Он знает, где получить всю необходимую ему информацию!"*

Плохое впечатление производит специалист по техобслуживанию, который непродуманно звонит куда попало, чтобы получить нужную информацию и документы. Прежде чем беспокоить по телефону персонал предприятия или фирмы-производителя, он должен составить контрольный список интересующих его вопросов. Только на конкретные вопросы получают конкретные ответы.

Для сравнения назову несколько примеров конкретных и неточных вопросов.

- ❑ Некорректная формулировка —

*"Отсутствуют важные листинги программ".*

- ❑ Конкретный вопрос —

*"В листингах программ отсутствуют пошаговые цепочки для вентили, управляющего заменой инструмента".*

- ❑ Некорректная формулировка —

*"Я не понимаю обозначения элементов".*

- ❑ Конкретный вопрос —

*"Мне непонятны сокращения в обозначении элементов. Имеется ли для них собственный список сокращений? Где я могу его найти?"*

При составлении перечня вопросов по недостающей документации важно также определиться, кому именно должны быть заданы конкретные вопросы. Целенаправленные вопросы правильно выбранному сотруднику, обладающему соответствующей профессиональной компетенцией, повышают вероятность получения необходимой информации. Естественно, готовность помочь снижается, если сотруднику задаются вопросы, которые выходят за рамки его профессиональной компетенции.

Еще два примера для сравнения.

- ❑ Некорректный вопрос оператору установки —

*"Какие гидравлические вентили управляют столом подачи?"*

Такой узкоспециализированный вопрос выходит за рамки компетенции данного сотрудника. Чтобы снова не оказаться в неловком положении, он будет пытаться уклониться от следующих вопросов.

- ❑ Неправильный вопрос мастеру участка:

*"Можете ли Вы мне сказать, кто отвечает за техническое состояние устройства?"*

В этом случае, чтобы не совершить ошибку, он назовет человека, занимающего самую высокую должность. Этого желательно избежать, сформулировав вопрос более точно. Иначе возникнет ситуация, когда техниче-

ский руководитель будет вынужден выполнять роль посредника между вами и техническим персоналом.

Из этих примеров становится понятно, что уже на этапе сбора информации необходимо использовать профессиональную технику постановки вопросов и учитывать организационную структуру предприятия.

Для получения системных сведений специалист по техобслуживанию должен использовать следующие четыре средства:

#### □ *Наблюдение*

Начните работу с устройством с выяснения того, какие характеристики вам уже знакомы, а какие являются для вас новыми. Понаблюдайте за работой оператора и мастера участка, а также за функционированием элементов устройства.

#### □ *Выяснение*

Добывайте информацию об особенностях функционирования устройства (например, маршрут прохождения материала, схема соединения автоматизированных устройств в линию, создание информационной сети). Каково значение устройства в процессе производства? Выясните компетентность персонала, которая требуется для обслуживания, управления и программирования устройства.

#### □ *Приобретение*

Получите всю необходимую документацию, руководство по использованию, новейшие копии программного обеспечения, информацию о сервисном обслуживании.

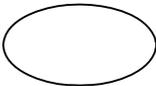
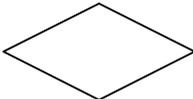
#### □ *Опрос*

Опросите оператора, мастера участка, ответственного за систему с целью прояснения непонятных моментов в процессах обслуживания и функционирования устройства, а также симптомов неисправностей, которые особенно важны для вашего понимания.

## **2.3. Устанавливайте характерные черты структуры**

После того как вы получили всю необходимую информацию об устройстве и системе, вы должны с помощью этих сведений и имеющейся документации разработать в виде *блок-схемы* последовательность выполнения работ (производственный процесс) или взять существующую блок-схему из документации (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Элементы блок-схемы

Символ	Обозначение	Значение	Пример
	Начало/конец (большая метка)	Начало или конец процесса	 <pre> graph TD     Start([Монтаж с помощью робота]) --&gt; Grip[Подвести захват]     Grip --&gt; Merge(( ))     Merge --&gt; Repeat{{Повторить пять раз}}     Repeat --&gt; Part1[Деталь 1 подвести и соединить]     Part1 --&gt; Part2[Деталь 2 подвести и соединить]     Part2 --&gt; EndCycle{{Конец цикла}}     EndCycle --&gt; Decision{Дальше монтировать?}     Decision -- Да --&gt; Merge     Decision -- Нет --&gt; OutGrip[Отвести захват]     OutGrip --&gt; End([Конец]) </pre>
	Малая метка	Точка ссылки	
	Блок "процесс"	Выполнение операции	
	Блок "условие"	Проверка условия	
	Блок ввода данных	Ввод-вывод данных	
	Начало цикла	Начало повторяющейся части	
	Конец цикла	Конец повторяющейся части	

В качестве самоконтроля полезно взять имеющуюся блок-схему, сравнить ее с вашей собственной и затем дополнить новой появившейся актуальной информацией. Разбивайте блок-схему на осмысленные составные части! Старайтесь охватить компоненты одной системы общим представлением, при этом используйте термины и определения, соответствующие стандарту DIN 31051 "Техническое обслуживание. Наименование операций и техноло-

гия выполнения" (рис. 2.1). Набросайте в масштабе горизонтальную проекцию устройства с характерными контурами (компоновку устройства, если такая отсутствует в документации).

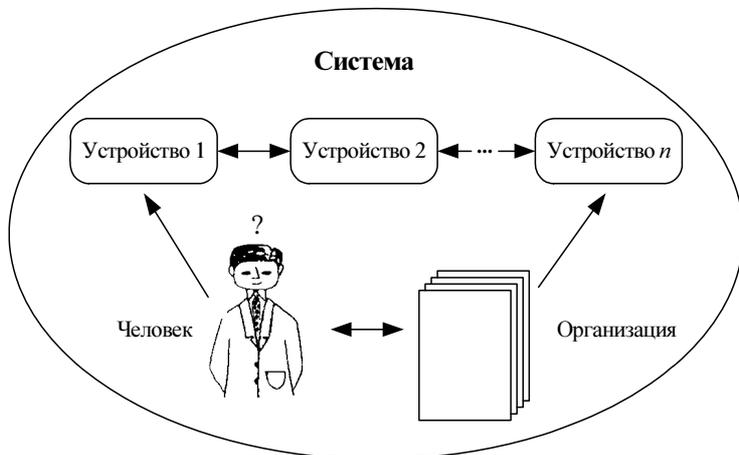


Рис. 2.1. Терминология, используемая в стандарте DIN 31051 для описания системы

Далее приводятся некоторые определения терминов, используемых в стандарте DIN 31051.

- *Система* — с точки зрения технического обслуживания, совокупность технических, организационных и других средств, предназначенных для самостоятельного выполнения определенного комплекса задач.
- *Устройство* — совокупность технических средств системы.
- *Узел* — совокупность взаимосвязанных элементов. Узел предназначен для выполнения определенной функции, тем не менее, в пределах устройства не может функционировать самостоятельно.
- *Элементы* — представляют собой элементарные, неделимые технические единицы. Решение о выделении составных частей в качестве элементов зависит от степени детализации.
- *Объект* — с точки зрения технического обслуживания, предмет рассмотрения, который в каждом конкретном случае выделяется по виду и объему исключительно человеком (DIN 40150).

Автоматизированная система соответствует этому определению.

- *Функция* — обусловленное целью применения задание.
- *Неисправность* — непреднамеренное прерывание функционирования объекта.



После того, как вами выделены компоненты устройства, особенно важно ознакомиться с информационными связями между отдельными узлами и элементами. Для этого необходимо исследовать информационные потоки внутри системы.

Какие элементы, узлы, устройства обмениваются информацией? Для лучшего понимания этих функциональных взаимосвязей желательно изобразить их графически в разных плоскостях. На рис. 2.3 изображены подобные взаимосвязи на примере обрабатывающего станка с перемещением заготовки. Здесь показано не размещение модулей, а информационные связи между компонентами.

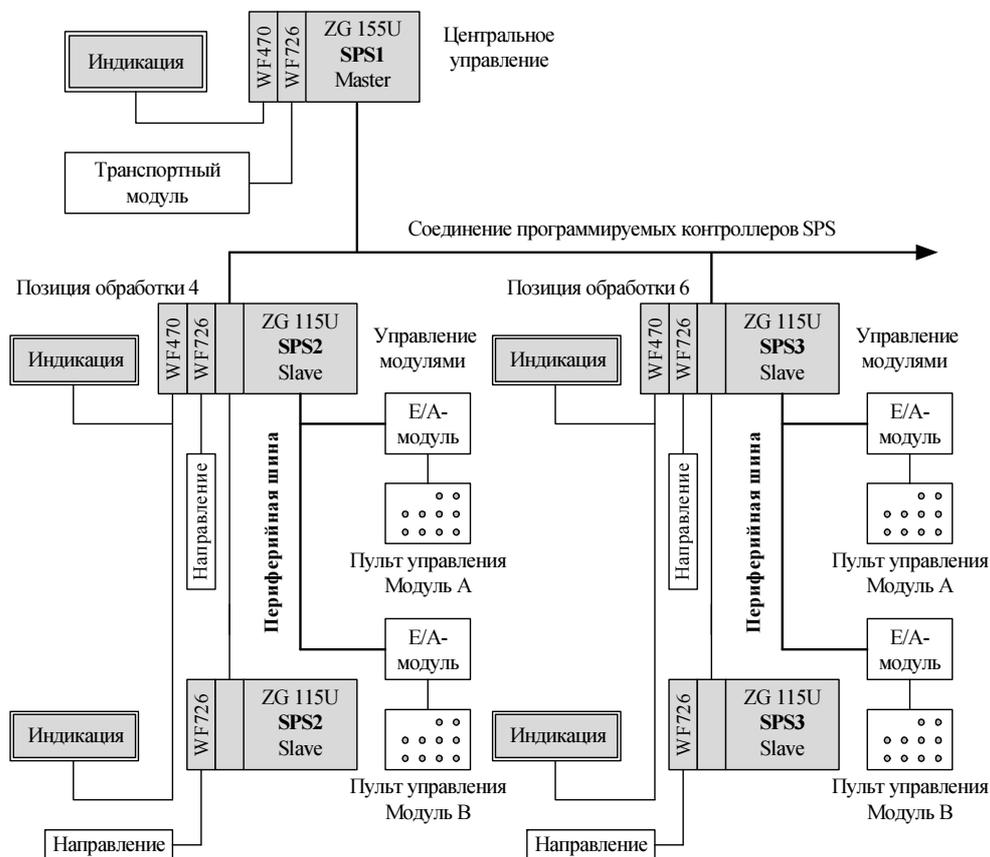


Рис. 2.3. Системный обзор электронных потоков информации

Для успешного систематизированного поиска неисправностей решающее значение имеет отслеживание пути прохождения электрических сигналов (см. главу 3).

При этом различают три функциональные группы устройств:

- *исполнительные элементы*, например, вентили, двигатели, электромагниты;
- *датчики*, например, механический, оптический, индуктивный, емкостный, полупроводниковое реле, тахогенератор, манометр;
- *устройства для обработки сигналов*, например, программируемый контроллер, устройство управления роботом, компьютерное управление, аналоговое управление, цифровое управление.

На рис. 2.4, в качестве примера, представлена схема прохождения электрического сигнала.

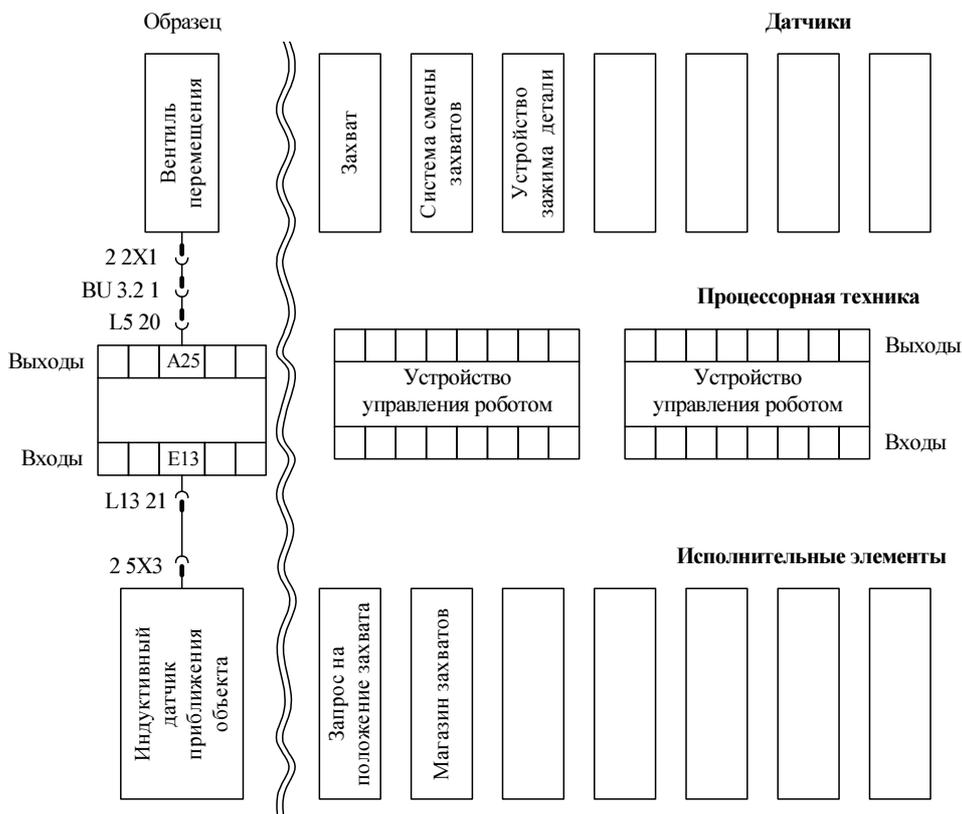


Рис. 2.4. Путь прохождения электрического сигнала

Для проведения технического обслуживания важно обладать информацией о функционировании отдельных элементов, узлов элементов и устройств. В технической документации на устройство должны быть описаны процессы функционирования его блоков, таких как, например, захват робота, система замены инструмента. Кроме того, в вашем распоряжении должны быть пневматические, гидравлические и электрические схемы устройств.

В идеальном случае содержание полного комплекта технической документации должно соответствовать следующему далее списку.

### **1. Информация об устройстве**

Условное обозначение

Контактное лицо

Перечень внесенных изменений

### **2. Изображения устройства**

Компоновка устройства

Схема эксплуатации

Трехмерное изображение

Изображения отдельных компонентов

### **3. Структура и управление системы**

Блок-схемы программ

Процессы функционирования

Описание процессов

Технологическая схема

### **4. Программы**

Прикладные программы (для роботов, программируемых контроллеров, устройств с ЧПУ, персональных компьютеров)

Системное программное обеспечение (операционная система, машинный код)

Комбинации входных и выходных сигналов

Списки распределения ресурсов

### **5. Монтажные схемы**

Электрические схемы прохождения тока

Схемы крепления

Схемы установки

Пневматические и гидравлические монтажные схемы

## 6. Управление и программирование

Руководство оператора

Указания по диагностике

Сообщения об ошибках

Инструкции по программированию

## 7. Техническое обслуживание

Сопровождение

Техосмотр

Ремонт

Повторный ввод в эксплуатацию

## 8. Ввод в эксплуатацию

## 9. Спецификации и ведомости запчастей

Техническое обслуживание подразумевает возможность внесения изменений в программу или параметры устройства в пределах значений, установленных производителем.

Прежде чем самостоятельно запускать процессы функционирования системы или устройства, необходимо из соображений безопасности сначала сделать это в присутствии обслуживающего персонала, который может ответить на возникающие у вас вопросы и в случае крайней необходимости способен вмешаться и исправить ситуацию.

Кроме того, необходимо изучить инструкцию по эксплуатации и описанные в ней функциональные элементы *пультов управления* (рис. 2.5), а также панели экранов индикации (рис. 2.6).

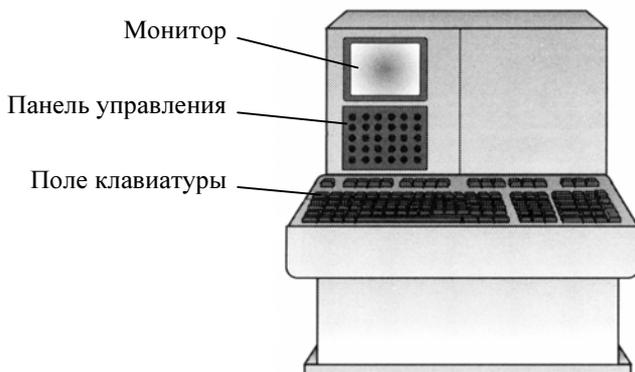


Рис. 2.5. Пульт автоматизированного управления устройством

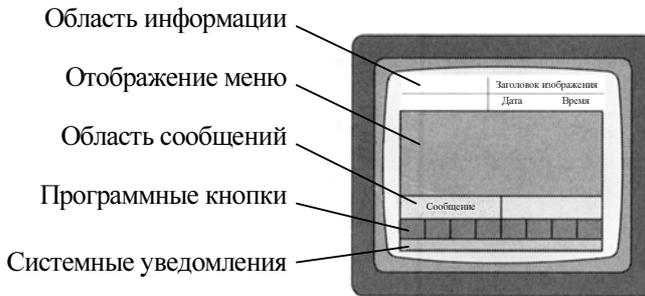


Рис. 2.6. Пример панели экранной диагностики

Основной пульт управления состоит из клавиатуры, монитора и панели управления автоматизированным устройством, транспортированием и транспортными модулями. Система индикации облегчает обслуживание за счет использования монитора, на экране которого отображаются различные процессы функционирования и информация о состоянии всех модулей, инструмента и обрабатываемых деталей. Управление взаимосвязано с системами диагностики и индикации, благодаря которым неисправности быстро и точно распознаются, локализируются и отображаются на экране. При этом выдается информация о виде, месте, причине неисправности, а также сообщение о ее устранении.

## ГЛАВА 3

# Систематизированный поиск неисправностей в автоматизированных устройствах

Крупные автоматизированные производственные линии иногда могут простаивать из-за отдельных неисправностей или аварий. Практически не существует ни одной технической системы, которая работала бы безотказно на протяжении всего срока службы. Чем больше элементов в устройстве, тем выше статистическая вероятность сбоя в работе. Вместе с тем издержки, возникающие на предприятии по причине аварии, могут быть весьма существенны. Задача качественного техобслуживания — снижение этих расходов. Этого можно добиться соответствующим техническим сопровождением и своевременным снабжением запасными частями, а также быстрым устранением появляющихся неисправностей. Итак, качественное техническое обслуживание предполагает:

- увеличение времени функционирования устройства за счет упреждающего обслуживания;
- распознавание в ходе проводимых проверок появляющихся нарушений на ранней стадии;
- правильную оценку неисправностей;
- восстановление работоспособности в кратчайшие сроки.

В соответствии со стандартом DIN 31051 техническое обслуживание включает в себя следующие задачи:

- *Проверку* — определение и оценка истинного состояния технических средств системы;
- *Обслуживание* — мероприятия по сохранению требуемого состояния технических средств системы;
- *Ремонт* — восстановление требуемого состояния технических средств системы.

### 3.1. Предпосылки и последовательность успешного поиска неисправностей

В предыдущих главах было описано, как получают системные сведения об устройстве и как эти сведения структурируют. Опираясь на это, выполняется систематизированный поиск неисправностей (рис. 3.1). Базируясь на полученных вами системных сведениях, вы должны подключить свои знания и подойти к решению проблемы с использованием логики и определенному системному подходу.



Рис. 3.1. Структурная схема поиска неисправности

В нашем примере нарушение возникло в автоматическом производственном оборудовании. Отсюда вытекает соответствующая последовательность действий.

1. О случае неисправности сообщают специалисту по техобслуживанию.
2. На основании этого сообщения заказывается техническое обслуживание.
3. Специалист по техобслуживанию определяет истинное состояние оборудования с помощью мастера участка или обслуживающего персонала.
4. Специалист по техобслуживанию начинает поиск неисправности, в результате чего неисправность диагностируется.

5. Установленная неисправность устраняется (корректируется программное обеспечение или настройка точности) или выполняется ремонт (замена блоков или конструктивных элементов).
6. После этого происходит проверка функционирования устройства и соответственно ввод его в эксплуатацию.
7. Неисправность описывается в соответствующей документации на устройство.
8. Если неисправность возникла из-за неправильного обслуживания, даются конкретные указания во избежание повторного ее появления.
9. В технической документации фиксируются все изменения, внесенные в программное обеспечение или в характеристики конструктивных элементов. Выполняются копии измененного программного обеспечения.

## 3.2. Оценка фактического состояния устройства

Оценка фактического состояния устройства требует принятия во внимание всех очевидных функциональных признаков. К ним относятся:

- *Контроль за возникновением очевидных повреждений, а также наблюдение за общим состоянием устройства, включая его внешний вид.*

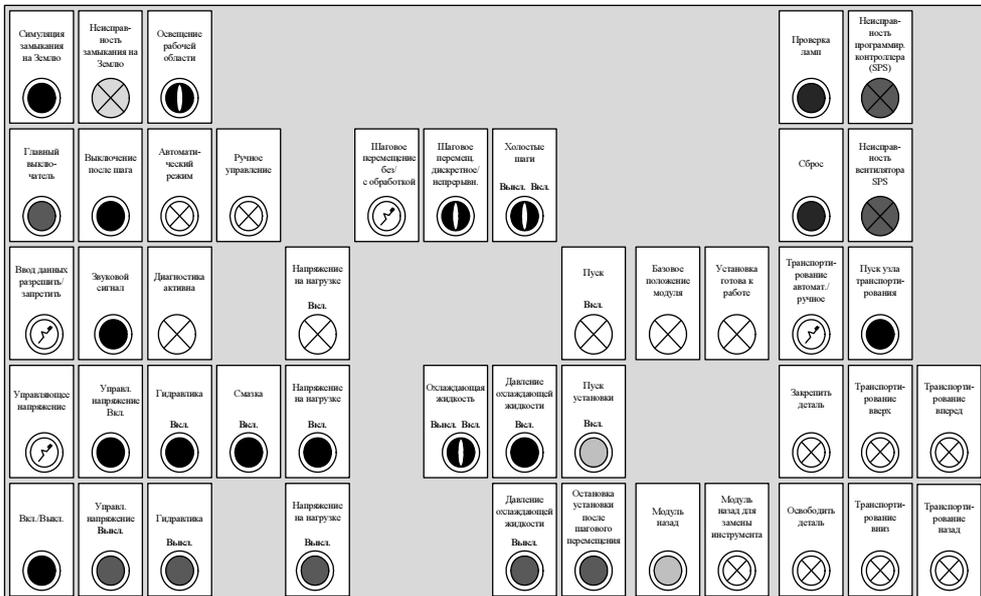
Создает ли устройство благоприятное впечатление или оно выглядит неухоженным? Обслуживающий персонал должен быть приобщен к этому процессу. Инициативность или, наоборот, равнодушие обслуживающего персонала проявляется во многих поступках. Например, доволен ли он простою оборудования, исчезая при этом с рабочего места? Или же остается у устройства и помогает специалисту по техническому обслуживанию устранить неисправность?

- *Контроль за сигнальными табло и световыми индикаторами (рис. 3.3).*

Какие из них светятся, а какие нет? Правильны ли показания световых приборов, соответствуют ли они рабочему состоянию и режиму работы? Исходя из показаний приборов, получают сведения об ошибках в оборудовании, например, это может быть недостаточное напряжение на нагрузке, недостаточное количество смазки или охлаждающего вещества, неисправность в электрике. Если имеется хотя бы одна из вышеперечисленных ошибок, то устройство простаивает.

- *Отображаются ли на диагностическом экране сообщения о текущем состоянии устройства, сообщения об ошибке или сбое в работе (рис. 3.2)?*





- Световой индикатор
- Переключатель
- Черный
- Зеленый
- Клавиша с подсветкой
- Кодовый переключатель
- Красный
- Синий
- Микропереключатель
- Желтый

Рис. 3.3. Панель основного пульта управления



Рис. 3.4. Режимы эксплуатации

сигнального табло и экранной диагностики. Уже первые сообщения об ошибке могут указать на неисправный модуль.

- *Неисправности транспортирования или ошибки в определенные моменты времени при работе в непрерывном режиме автоматизированной линии проще всего определить, используя режим отладки или дискретного шагового выполнения.*

### 3.3. Локализация области неисправности

Если анализ фактического состояния устройства еще не привел к локализации неисправности, то полученную информацию используют для определения того компонента устройства, в котором кроется причина ошибки (например, это может быть транспортный модуль, погрузчик, поворотная технологическая позиция, измерительная станция, модуль обработки). Назовем этот компонент *областью поиска*. Область поиска может быть определена посредством находящихся в распоряжении документов или с помощью экранной диагностики. Область поиска можно обозначить на схеме устройства, определив ее с помощью экранной диагностики, анализа компонентов, структурной схемы устройства, информационно-технической модели и блок-схемы.

В этом случае необходимо отметить и те компоненты устройства, которые можно с уверенностью исключить из области поиска. Соответствующий пример представлен на рис. 3.5.

После того как область поиска определена, *выдвигаются предположения (гипотезы)* по поводу возможных причин неисправности. В этом помогает информация об области поиска и собственный опыт. Причем необходимо рассмотреть самые разнообразные причины неисправности, используя для этого все технические возможности. При выдвижении гипотез учитываются все основные компоненты, в том числе:

- механика;
- электрика;
- программное обеспечение;
- электроника (например, устройства управления, компоненты привода, контрольные приборы).

В первую очередь, выдвигается предположение, что неисправность вызвана простыми причинами, такими как:

- скачок напряжения или давления сжатого воздуха;
- неправильно установленный датчик или переключатель;
- неработоспособность программного обеспечения.



Если все перечисленное исключено, то можно предположить следующие причины неисправности:

- самые распространенные механические неисправности обусловлены смещением компонентов и загрязнением;
- случайные сбои часто возникают под влиянием окружающей среды (температура, влажность, паразитные излучения);
- редко, но встречаются ошибки устройств управления;
- неисправности в силовой электронике встречаются чаще (неисправности переключателя нагрузки, переключения передач привода);
- однократно возникающие любые маловероятные неисправности;
- программные ошибки связаны исключительно с выходом за границы диапазона допустимых значений параметров.

Если возникает несколько предположений относительно причины неисправности, выбирается одна приоритетная. При этом предпочтение отдается гипотезам, которые базируются на логических соображениях, а не на интуиции. Также принимается во внимание последовательность действий, используемая для поиска неисправности. В связи с этим необходимо учитывать следующие критерии:

- вероятность возникновения ошибки, например, в электронике, программном обеспечении или механике;
- издержки на поиск ошибки, например, временные, технические, человеческие;
- риск, возникающий в процессе поиска неисправности. Например, при проведении экспериментов возможны перегрузки электрической или механической части, а также ситуация аварийного отказа механики.

В процессе поиска неисправности необходимо отслеживать, соответствует ли направление поиска основной выдвинутой гипотезе. Если этого не происходит, то необходимо в нескольких словах для себя сформулировать последовательность действий по обнаружению неисправности.

Это осознанное сопоставление теоретических соображений и практических действий показывает, насколько вы способны заниматься систематизированным поиском неисправности, не стараетесь ли вы свести поиск неисправности к одной и той же однажды выбранной поисковой схеме, которая не может использоваться с одинаковым успехом для любой неисправности.

Последовательность действий в ходе проверки гипотезы заканчивается определением неисправности и зависит от области поиска и гипотезы (рис. 3.6). В табл. 3.1 приведено несколько примеров таких последовательностей.

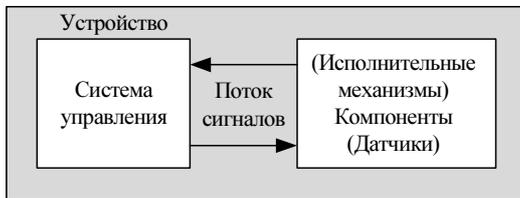


Рис. 3.6. Область поиска и определение гипотезы

Редко неисправность можно обнаружить с первой же попытки. Обычно требуется корректировать и уточнять область поиска ошибки или выдвинутую гипотезу. Постепенное приближение к истинной причине неисправности (рис. 3.7) возможно только при многократном выполнении мероприятий, способствующих уточнению гипотезы и, соответственно, приводящих к правильному диагностированию ошибки.

**Таблица 3.1.** Выдвижение гипотезы на основе соответствующей последовательности действий

Подсистема	Последовательность действий
Устройство	<ul style="list-style-type: none"> <li>Использовать экранную диагностику</li> <li>Проверить световые переключатели и световые сигнальные табло пультов управления</li> <li>Учесть указания сервисной документации</li> </ul>
Система управления	<ul style="list-style-type: none"> <li>Проверить светодиодные индикаторы двоичных входов и выходов</li> <li>Изучить блок-схемы сервисной документации</li> <li>Проанализировать диагностические сообщения, сообщения об ошибке состояния и сообщения об ошибках пошагового выполнения</li> </ul>
Поток сигналов	<ul style="list-style-type: none"> <li>Осмотреть штекеры и провода, чтобы проверить надежность соединения и исключить механическое повреждение</li> <li>Осмотреть зажимы</li> <li>Проверить соединения с гидравликой и пневматикой</li> <li>Измерить управляющее напряжение на штекерах и зажимах</li> </ul>
Компоненты	<ul style="list-style-type: none"> <li>Проверить функционирование индикаторов состояния (световых индикаторов) и микропереключателей клапанов и контактов</li> <li>Осмотреть датчики и выключатели, чтобы исключить их повреждение или смещение</li> </ul>

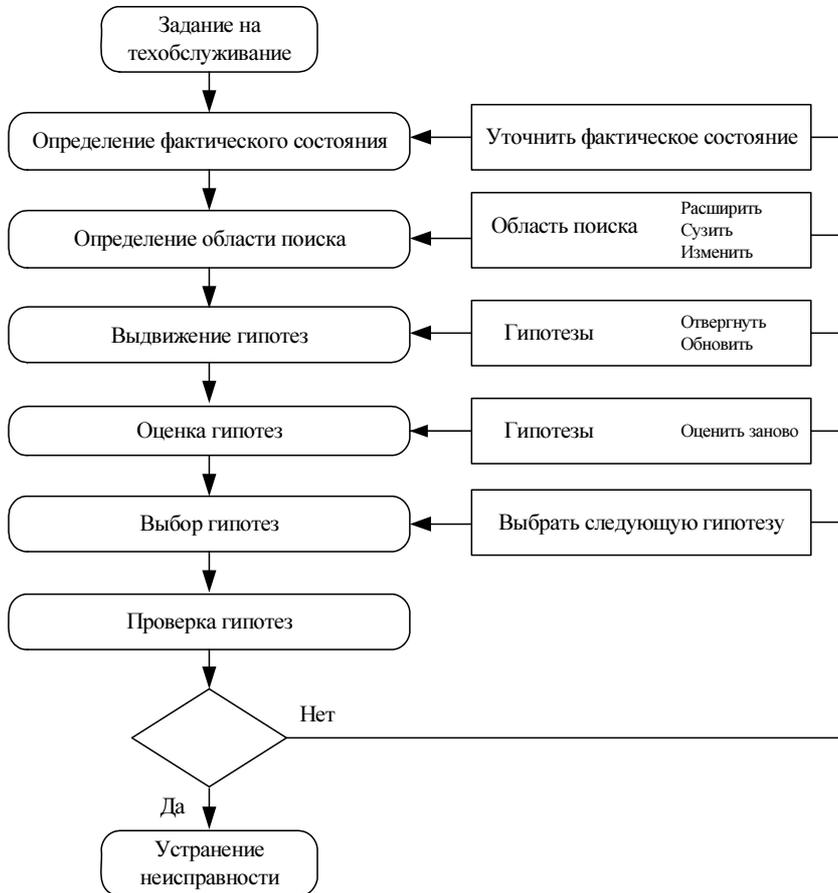


Рис. 3.7. Алгоритм определения неисправности

## 3.4. Мероприятия по ремонту и вводу в эксплуатацию

Посредством успешного диагностирования ошибки, которое выполняется путем сравнения заданных параметров с фактическими, определения области поиска и правильного выбора гипотез, причина неисправности локализуется. После этого найденную неисправность необходимо устранить. Ремонт может быть достаточно обширным, если, например, необходимо заменить крупные блоки (механические функциональные единицы, приборы, двигатели или измерительные системы).

В случае крупного ремонта нужно составить план его проведения и перечень всего необходимого для его выполнения. Перечень мог бы выглядеть следующим образом:

- необходимые запасные части;
- требуемые инструменты;
- необходимость в подсобных рабочих;
- дополнительный информационный материал (специальные руководства для демонтажа и сборки);
- последовательность действий, описывающая технологический процесс ремонта и план ввода в эксплуатацию;
- обеспечение техники безопасности, соблюдение правил во избежание несчастных случаев.

Если в процессе ремонта происходит замена целого блока (приборного модуля или функционального модуля), в таком случае ремонт считается завершенным и можно осуществлять ввод установки в эксплуатацию. Предварительно необходимо проверить правильность подсоединения замененного приборного или соответствующего функционального модуля. Для этого еще раз проверяется электрическое соединение посредством схемы размещения и схемы фиксации. Также, используя сервисную документацию, необходимо проверить, требуется ли для приборного модуля проводить юстировочные или настроечные работы. Затем отдельно проверяется функционирование приборного модуля в режиме отладки или дискретной пошаговой работы и осуществляется (например, для привода) его испытание на требуемые верхние и нижние предельные значения. Только после этого в различных режимах проверяется функционирование и проводится испытание всей установки в целом.

Если благодаря вашим усилиям установка снова работает, если место ремонта приведено в порядок, то прежде чем покинуть установку, проведите завершающий так называемый тест "на ход ноги". Другими словами, оставайтесь около установки еще до тех пор, пока обслуживающий персонал не запустит ее и не проведет самостоятельно и безотказно несколько рабочих циклов.

Систематизированный поиск неисправностей установки можно осуществить с помощью *контрольного списка*, представленного в виде опорных размышлений (табл. 3.2).

Если в распоряжении не имеется запасных приборных модулей или таковые не предусмотрены (вышедший из строя модуль изготовлен в единственном экземпляре на заказ), то приборные модули сами должны быть подвергнуты

тестированию и поиску неисправности в них на уровне отдельных схем и компонентов. Какие при этом существуют подходы и на что в таких случаях следует обратить внимание, обо всем подробно описано в последующих главах книги.

**Таблица 3.2.** Пример контрольного списка систематизированного поиска неисправности

Наименование этапа	Необходимые средства	Комментарий
Получение сообщения об ошибке	Формуляр	Первое указание на ошибку
Задание на ремонт	Формуляр	Техническое задание с расчетом времени и сметой расходов
Определение фактического состояния	Обширное обследование, опрос обслуживающего персонала	Определение фактического состояния и функционирования устройства
Определение области поиска	См. рис. 3.5	Определение причины неисправности на основе имеющихся признаков
Выдвижение гипотез по поводу возникновения неисправности	Сервисная документация	Определение неисправности на основе области поиска, логики и собственного опыта
Оценка и выбор более правдоподобных причин неисправности	Список приоритетов	Выбор более подходящей гипотезы возникновения неисправности
Проверка гипотезы	Измерительные приборы, сервисная документация, инструмент	Поиск неисправности, возможно выдвижение новой гипотезы
Планирование и проведение ремонта	Запасные части, инструкции по монтажу и проверке функционирования	Планирование техобслуживания, устранение неисправности
Ввод в эксплуатацию	Тест по проверке работоспособности, инструкция по эксплуатации	Проверка компонентов, ввод в эксплуатацию при разных режимах работы
Составление отчета о неисправности	Формуляр техобслуживания, журнал состояния установки	Причина неисправности, последствия, профилактические мероприятия, анализ "слабых мест"
Внесение дополнений в документацию и программное обеспечение	Документация на установку, напоминающие устройства	Актуализация документации на установку

## ГЛАВА 4

# Определение полярности и напряжения в электронных блоках и схемах

В предыдущих главах было рассказано, как определить область поиска неисправности в крупных автоматизированных системах. Определение дефектного блока или компонента в любом случае требует измерения напряжения, будь то измерение с помощью цифрового мультиметра, осциллографа или логического анализатора.

В полупроводниковых схемах практически не устанавливается величина напряжения. Исключением является опорное и подстраиваемое напряжения (например, в определенных рабочих точках). Большой частью причина заключается в том, что величина напряжения в полупроводниковых схемах не играет существенной роли из-за большого диапазона допустимых отклонений напряжений в полупроводниковых компонентах. Поэтому специалист по техобслуживанию должен на основе собственных соображений приблизительно оценить измеренное напряжение, исходя из расчетных значений схемы. Только сравнение требуемого значения с фактическим предоставляет специалисту по техобслуживанию возможность правильной оценки измеренного напряжения. Процесс того, как необходимо выполнять данную оценку, описан в следующих главах.

### 4.1. Измерение напряжения

Определение величины напряжения посредством его измерения является наиболее эффективной формой поиска неисправности в электронных схемах (рис. 4.1, а). Если мы *измеряем ток*, то электрическая цепь, а соответственно и линия, по которой проходит ток, должна быть разомкнута для подключения прибора (рис. 4.1, б). Прежде всего, в печатных платах это слишком затруднительно и способствует снижению их качества, поскольку необходимо разрезать проводник. *Измерение сопротивления* можно проводить только в бес-



При проверке неисправных электрических цепей существует правило, по которому перед включением вначале выполняется визуальный осмотр электрической системы, в том числе осуществляется:

- проверка электрической цепи на наличие незаизолированных проводов, которые могут накоротко замкнуть элемент схемы на опорный потенциал (потенциал земли) или на напряжение питания, а также могут привести к контакту с другим элементом;
- проверка наличия и степени износа изоляции с целью исключения возможности короткого замыкания;
- проверка наличия незакрепленных или неисправных электрических контактов и соединений, прежде всего электрических разъемов;
- проверка контактов, предназначенных для подключения напряжения питания, проверяют на коррозию и прочность соединения;
- проверка функционирования сигнальных лампочек и светодиодов;
- кратковременное периодическое включение и выключение напряжения питания в электрической цепи или схеме. Следует обратить внимание на нагревание, искрение, дым или запах, которые могут быть признаками короткого замыкания или перегрева вследствие перегрузки.

Короче говоря, используйте собственные *глаза*, *нос* и *уши*, чтобы определить, нет ли чего-нибудь необычного.

К сожалению, только малую часть возможных причин возникновения аварии можно определить с помощью органов чувств. Поэтому необходима систематизированная, методичная и полная проверка функционирования устройства.

В простой электрической цепи возможны только три существенные причины неисправности, при условии, что все соединения безупречны, и нет никаких коротких замыканий:

- имеется элемент цепи с внутренним коротким замыканием;
- присутствует завышенное внутреннее сопротивление элемента;
- имеется разрыв внутри элемента.

В простой электрической цепи, представленной на рис. 4.2, *a*, имеется три конструктивных элемента и относящиеся к ним электрические соединения (предохранитель, переключатель, лампа накаливания, провода, клеммовые соединения). Здесь могут присутствовать такого рода неисправности. Неисправности соединений легко перепутать с неисправностями конструктивных элементов электрической цепи. К примеру, не функционирует один из элементов цепи. После того как электрический контакт разъединили, а затем снова соединили, элемент опять начал функционировать. Причиной неисправности было высокое *переходное сопротивление* контакта в соединитель-

ной клемме, вызванное ее коррозией, вследствие чего необходимый электрический ток не мог протекать через рассматриваемый элемент.

Следствием повышенного сопротивления электрической цепи (рис. 4.2, б) может быть более медленная работа (например, двигателя), недостаточное функционирование (например, слабое свечение лампы). Причиной всего этого могут быть слабо закрепленные контакты, подверженные коррозии, загрязненные, замасленные клеммовые соединения и поврежденные провода, а также недостаточный диаметр многожильного провода, обусловленный его частичным обрывом.

Элементы разорванной электрической цепи не могут выполнять своих функций. Обрыв цепи возможен, например, из-за обрыва провода, отсоединения клеммы, разомкнутого переключателя.

Для определения переходного сопротивления либо для установления факта обрыва цепи необходимо измерить напряжение при замкнутом переключателе между его контактом и нагрузкой (лампой) в наиболее доступном месте и сравнить его с требуемым по документации напряжением (например, 24 В) относительно опорного потенциала (заземления).

Если измеренное напряжение оказалось слишком низким, производятся дополнительные измерения, постепенно приближаясь к источнику питания. Это необходимо для того, чтобы установить участок, на котором происходит *падение напряжения*. Измерения производятся после каждого штекерного и клеммового соединения. Если напряжение между переключателем и нагрузкой ниже 24 В, в таком случае неисправность необходимо искать в линии связи. Если напряжение питания в норме (24 В), то все же существует возможность переходного сопротивления между нагрузкой и опорным потенциалом. Поэтому производятся замеры напряжения после нагрузки в направлении опорного потенциала (заземления). Здесь не должно быть почти никакого напряжения, т. к. все напряжение должно находиться на нагрузке (лампа).

Если перед нагрузкой присутствует короткое замыкание относительно опорного потенциала (рис. 4.2, в), то нагрузка не может функционировать. Повидимому, переключатель в этом случае также функционировать не будет, и должен сработать защитный предохранитель (на выключение). Прежде чем заменить предохранитель, необходимо разомкнуть переключатель и проверить цепь на наличие короткого замыкания, измерив напряжение между шиной питания (перед и после переключателя) и опорным потенциалом. Если имеется протекание электрического тока между предохранителем и переключателем, то значит именно здесь и нужно искать короткое замыкание, в противном случае измерение напряжения выполняется после переключателя. Если ток обнаружен здесь, то короткое замыкание необходимо искать между

переключателем и нагрузкой. Короткое замыкание между двумя электрическими цепями (рис. 4.2, *з*) является причиной того, что два элемента приводятся в действие, даже если один из ключей размыкается (например, в случае неправильного контакта между двумя линиями). Элементы цепи также могут быть замкнуты накоротко. Чтобы установить, в каком месте электрические цепи замкнуты накоротко, сначала замыкаем только переключатель А. При этом обе лампы В и D будут гореть. Начинаем с того, что отсоединяем контакт лампы D, подключенный к кабелю, соединяющему ее и переключатель. Затем к этому контакту подсоединяют заведомо исправный дополнительный провод, другой конец которого начинаем постепенно перемещать вдоль кабеля от лампы к переключателю до тех пор, пока лампа не перестанет гореть. Таким образом, короткое замыкание будет находиться между двумя последними положениями дополнительного провода.

Обнаруженные неисправности в электрической цепи устраняют следующим образом.

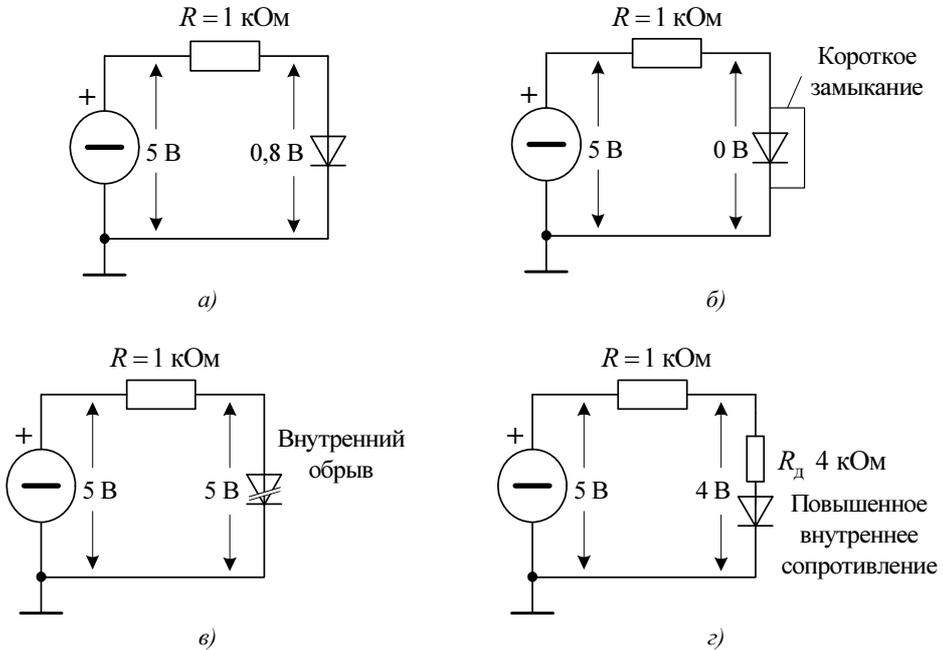
Если повреждены отдельные провода, то поврежденное место обматывают изоляционной лентой или заменяют поврежденный провод. Если кабельный жгут в месте короткого замыкания горячий, то его заменяют. Если на ощупь не чувствуется никаких горячих мест, то в месте, где обнаружено короткое замыкание помещают новый соединительный провод подходящего размера. Его проводят снаружи кабельного жгута и укрепляют вдоль него. После выполнения всех восстановительных работ выполняют повторную проверку функционирования электрической цепи.

Все вышеизложенное можно использовать не только для простой электрической цепи. Эта информация пригодится и для схем с типичными электронными полупроводниковыми элементами, такими как диоды, транзисторы, тиристоры и т. д. В таких цепях также могут присутствовать типичные признаки неисправности: короткое замыкание, обрыв внутри элемента и повышенное его внутреннее сопротивление.

На рис. 4.3, *а* показан диод, включенный в электрическую цепь в прямом направлении, с типичным напряжением на нем  $U = 0,8$  В. На добавочный резистор  $R$  остается все остальное напряжение  $U = 4,2$  В при напряжении источника 5 В.

На рис. 4.3, *б* показана цепь при коротком замыкании в диоде, вследствие чего при измерении напряжений на диоде будет 0 В, а на резисторе  $R$  все 5 В.

На рис. 4.3, *в* представлен случай внутреннего обрыва в диоде, вследствие чего электрическая цепь будет разорвана, и тока в ней не будет, поэтому как до, так и после сопротивления  $R$  напряжение будет равно 5 В. Поскольку ток в цепи не протекает, то падение напряжения на сопротивлении составляет 0 В.

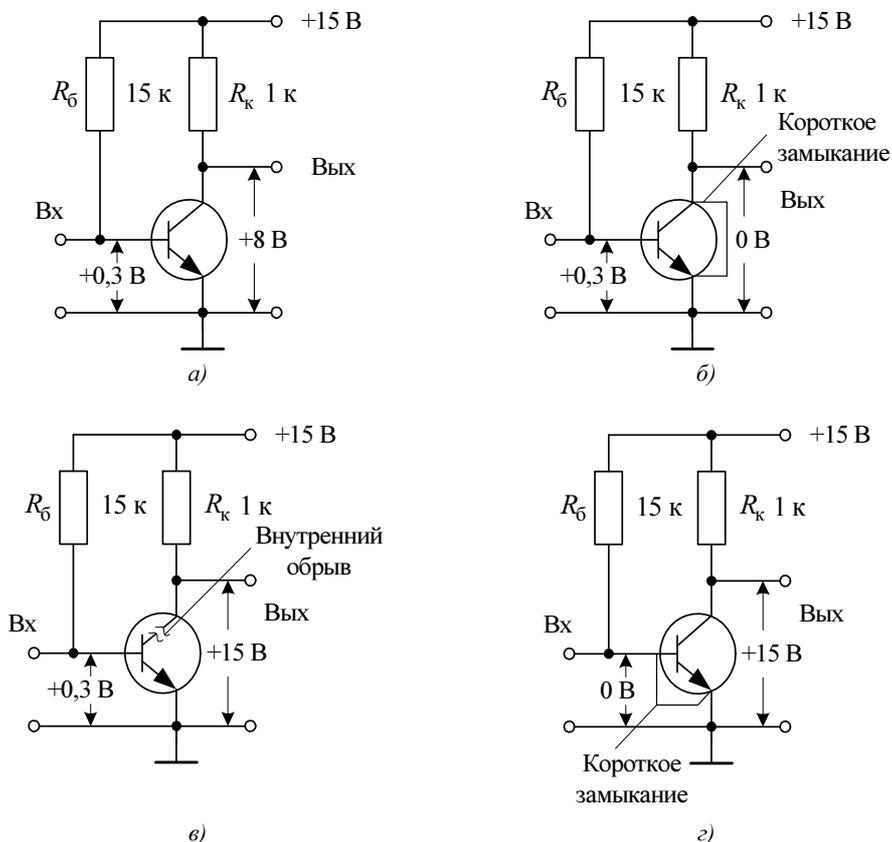


**Рис. 4.3.** Диод в электрической цепи: а) напряжения в исправной электрической цепи; б) напряжения при коротком замыкании в неисправном диоде; в) напряжения при повышенном сопротивлении перехода неисправного диода

Последний рис. 4.3, г иллюстрирует электрическую цепь с повышенным сопротивлением  $p$ - $n$ -перехода в неисправном диоде, которое равно 4 кОм. Вследствие этого приложенное напряжение распределяется между неисправным диодом и добавочным резистором в соотношении 1:4. В этом случае замеренное на диоде напряжение будет равно 4 В. Разница между приложенным (5 В) и измеренным на диоде (4 В) напряжением падает на резисторе (1 В).

*Не забудьте!* Напряжение всегда следует измерять относительно общего опорного потенциала. Разность напряжений измеряется между двумя произвольно выбранными точками, например, прямо над конструктивным элементом.

На рис. 4.4 представлена схема с конструктивным элементом, имеющим три вывода, в данном случае — транзистором. В схеме транзистор включен сразу в две электрические цепи: электрическую цепь на входе (также ее называют цепью управления) и электрическую цепь на выходе (цепь рабочего тока). При проверке предположительно неисправного транзистора целесообразно исследовать функционирование обеих этих цепей.



**Рис. 4.4.** Электрическая схема на транзисторе: а) напряжения в исправной схеме; б) напряжения с коротким замыканием перехода коллектор-эмиттер транзистора; в) напряжения при внутреннем обрыве в переходе коллектор-эмиттер; г) короткое замыкание в переходе база-эмиттер транзистора

На рис. 4.4, а указаны напряжения входной и выходной электрической цепи исправного каскадного усилителя. Напряжение  $U_b = 0,3 \text{ В}$  на базе — это *напряжение рабочей точки*, которое определяется сопротивлением резистора базы  $R_b$ , при этом напряжение на коллекторе составляет около половины напряжения питания, т. е.  $8 \text{ В}$ .

На рис. 4.4, б представлен каскадный усилитель с коротким замыканием между коллектором и эмиттером транзистора. Практически получается, что и выход также замкнут накоротко и измеренное напряжение на коллекторе (выходе схемы усилителя) будет равно  $0 \text{ В}$  (сравните с диодной электрической цепью на рис. 4.3). Все напряжение питания  $U = +15 \text{ В}$  падает на сопротивлении резистора коллектора  $R_k$ .

На рис. 4.4, *в* приведена схема, демонстрирующая внутренний обрыв между коллектором и эмиттером транзистора. В этом случае эмиттерно-коллекторная цепь разорвана, тока в ней нет. Если измерить напряжение на коллекторе, то оно будет равно полному напряжению питания  $U = +15$  В.

На рис. 4.4, *г* показан каскадный усилитель с коротким замыканием между базой и эмиттером. Этот дефект в цепи управления идентичен диодной электрической цепи на рис. 4.3, *б*, поскольку транзистор между базой и эмиттером функционирует подобно диоду. Поэтому измеренное напряжение на базе будет равно  $U_B = 0$  В. Поскольку в этом случае для транзистора не обеспечена нормальная рабочая точка, то тока в коллекторно-эмиттерной цепи также не будет. Следовательно сопротивление перехода между эмиттером и коллектором транзистора будет очень большим (стремится к бесконечности), а измеренное на коллекторе напряжение  $U_K$  равно  $+15$  В.

Изложенные в этих двух примерах сведения могут быть использованы при работе с любыми 2- и 3-полюсными полупроводниковыми элементами электрической цепи, в том числе и с полевыми транзисторами (например, МОП и КМОП), а также с диодами *p-n-p-n*-структуры, т. е. тиристорами и симисторами.

В случае использования резисторов, конденсаторов и индуктивностей существует также три причины их неисправности. Это короткое замыкание, внутренний обрыв и большое переходное сопротивление контакта. При этом всегда можно применить типовую методику выявления этих неисправностей. Все это будет рассмотрено в следующих примерах этой книги.

### **4.3. Точка, взятая в качестве опорного потенциала, определяет полярность и значение напряжений**

Если для выявления неисправности в электрической цепи мы используем замеры напряжения и хотим на основании полученных данных прийти к верному выводу, необходимо правильно проводить измерения напряжений. При этом должна учитываться точка, выбранная в качестве *опорного* или иначе *базового потенциала*. Не всегда, как показывает следующий пример на рис. 4.5, потенциал "земли" является опорным потенциалом. На приведенной схеме входное напряжение  $U_{вх} = 24$  В разделяется посредством делителя, выполненного на двух резисторах  $R_1$  и  $R_2$ .

Если выбрать в качестве опорного потенциала для прибора М1, измеряющего напряжение, соединение между двумя одинаковыми по величине сопротивлениями резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 4.5), то у верхнего по схеме вывода резисто-

ра  $R_1$  будет положительное напряжение (+12 В), а у нижнего вывода резистора  $R_2$  — отрицательное напряжение (–12 В). По-другому обстоит дело, если в качестве опорной для измерительного прибора М2 выбирают нижнюю по схеме точку резистора  $R_2$ . Тогда в средней соединительной точке резисторов  $R_1$  и  $R_2$  будет напряжение +12 В, а в верхней точке схемы +24 В. Если в качестве опорного потенциала для измерительного прибора М3 выбрать верхнюю по схеме точку, тогда в средней точке измеренное напряжение будет составлять –12 В, а в нижней –24 В.

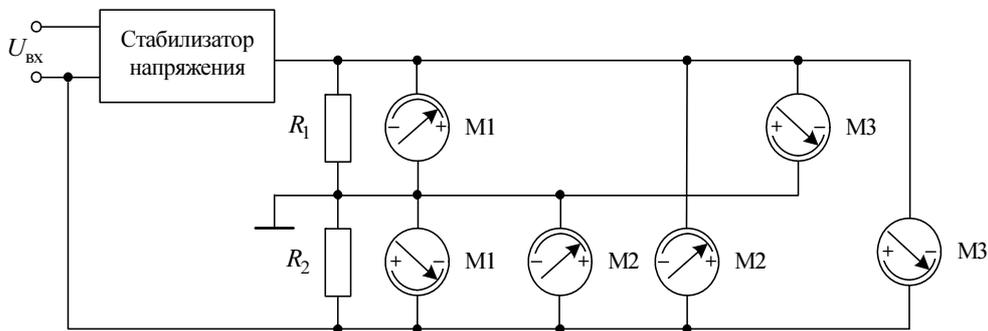


Рис. 4.5. Определение напряжения относительно опорного потенциала

Как правило, для измерительного прибора опорный потенциал выбирают таким образом, чтобы он образовывал опорный потенциал для всей проверяемой схемы. Это помогает избежать путаницы и ошибочных интерпретаций при измерении напряжения.

Пример электрической схемы последовательного соединения двух источников стабилизированного напряжения представлен на рис. 4.6. Полярность напряжения на выходах, в конечном счете, также зависит от того, какая точка схемы будет выбрана в качестве опорной при измерении. На рис. 4.6, а общий опорный потенциал расположен у самого нижнего вывода. Поэтому на соединенных средних выводах источников напряжение составляет +24 В относительно этого опорного потенциала. На верхнем выводе схемы будет суммарное напряжение двух источников равное +48 В. На рис. 4.6, б показан общий опорный потенциал, размещенный на линии соединения источников. В этом случае на нижней клемме будет напряжение –24 В, а на верхней +24 В. На рис. 4.6, в изображена схема, на которой опорный потенциал выбран на верхнем выводе. Вследствие этого, на линии соединения источников напряжение будет равно –24 В, а на нижней по схеме клемме –48 В.

При последовательном соединении нагрузок (нагрузочных сопротивлений) напряжение распределяется в зависимости от величин каждого из сопротивлений, а также зависит от величины общего прикладываемого постоянного

напряжения. На рис. 4.7. показано три сопротивления, которые расположены между двумя источниками питания с напряжениями  $+15\text{ В}$  и  $-20\text{ В}$  и образуют с ними последовательное соединение. Для определения полярности и величины напряжения, которые будут измерены на каждом сопротивлении, нужно руководствоваться следующими соображениями.

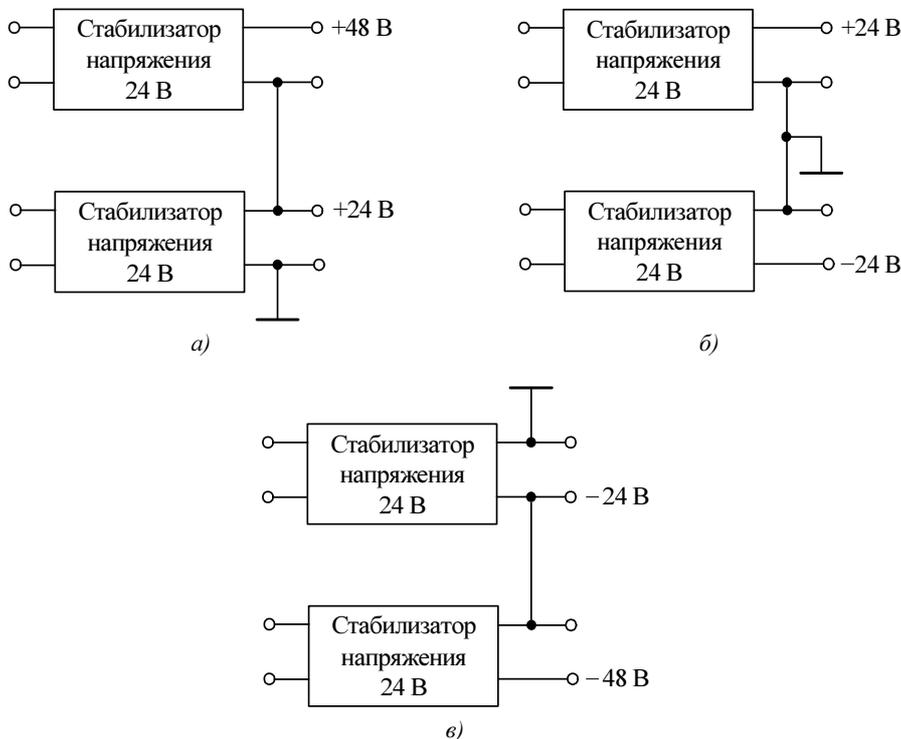


Рис. 4.6. Зависимость выходных напряжений схемы от выбора опорного потенциала

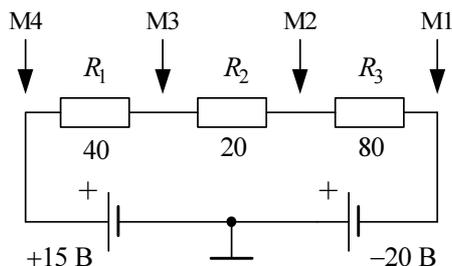


Рис. 4.7. Последовательное соединение нагрузки и источников питания

Величины сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  соотносятся друг к другу как 2:1:4.

В таком же соотношении будет распределяться общее напряжение  $U_{\text{общ}} = 15 \text{ В} + 20 \text{ В} = 35 \text{ В}$ :

$$U_{R1} = 10 \text{ В}, U_{R2} = 5 \text{ В}, U_{R3} = 20 \text{ В}.$$

Учитывая опорный потенциал, значения напряжения, измеренные в отдельных точках схемы, будут иметь следующее значение и полярность:

$$\text{"M1"} = -20 \text{ В}, \text{"M2"} = 0 \text{ В}, \text{"M3"} = +5 \text{ В}, \text{"M4"} = +15 \text{ В}.$$

Таким образом,  $R_3$  находится между "M1" и "M2" (-20 В),  $R_2$  расположено между "M2" и "M3" (+5 В),  $R_1$  между "M3" и "M4" (+10 В).

Если бы опорный потенциал располагался в точке "M1", то в результате измерений были бы получены другие значения: "M1" = 0 В, "M2" = +20 В, "M3" = +25 В и "M4" = +35 В.

## 4.4. Примеры определения полярности и напряжений

В предыдущих примерах было показано, как определять полярность и напряжение в простых электрических цепях. На рис. 4.8 представлена более сложная электрическая цепь с двумя источниками питания и двумя транзисторами, которые включаются и выключаются посредством напряжений на входах Vx1 и Vx2.

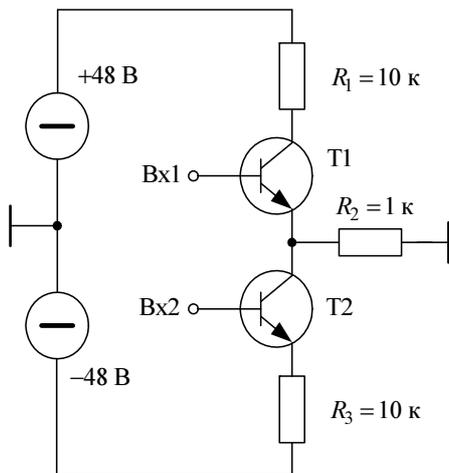


Рис. 4.8. Транзисторный каскад с последовательным соединением источников питания

Прежде всего, рассмотрим функциональные возможности этой цепи. Данная цепь имеет четыре состояния:

1. Оба транзистора выключены или иначе закрыты.
2. Транзистор Т1 включен или иначе открыт, т. е. проводит ток, транзистор Т2 выключен (закрыт).
3. Транзистор Т1 выключен (закрыт), транзистор Т2 включен (открыт), т. е. проводит ток.
4. Оба транзистора включены (открыты), т. е. проводят ток.

В данном примере следует обратить внимание на то, какие напряжения будут характеризовать функционирование представленной электрической цепи, и какие значения они будут принимать в каждом из четырех возможных состояний.

Здесь целесообразно обратить внимание на величину напряжения на коллекторе Т1 —  $U_{K_{T1}}$ , на эмиттере Т2 —  $U_{Э_{T2}}$  и на резисторе  $R_2$  —  $U_{R_2}$ . Величину питающего напряжения для каждого функционального состояния рассматриваемой электрической цепи принимаем стабильным +48 В и –48 В.

Для первого функционального состояния, при котором оба транзистора закрыты, получаем следующие ориентировочные значения напряжений:

$$U_{K_{T1}} = +48 \text{ В} \qquad U_{Э_{T2}} = -48 \text{ В} \qquad U_{R_2} = 0 \text{ В}$$

В этом случае можно принять, что закрытые транзисторы имеют достаточно высокое сопротивление перехода, а сопротивлениями резисторов  $R_1$  и  $R_3$  можно пренебречь.

Для второго функционального состояния, когда Т1 открыт, а Т2 закрыт, получаем следующие значения напряжений:

$$U_{K_{T1}} = +4,7 \text{ В} \qquad U_{Э_{T2}} = -48 \text{ В} \qquad U_{R_2} = +4,6 \text{ В}$$

Для третьего состояния, при котором Т1 закрыт, а Т2 открыт (пропускает ток), имеем:

$$U_{K_{T1}} = +48 \text{ В} \qquad U_{Э_{T2}} = -4,7 \text{ В} \qquad U_{R_2} = -4,6 \text{ В}$$

Результаты измерений для второго и третьего состояния идентичны, отличаются только знаком, т. к. в обоих случаях только одно напряжение питания порождает электрический ток.

В четвертом функциональном состоянии оба транзистора открыты (пропускают ток). В этом случае получаем следующие значения напряжений:

$$U_{K_{T1}} = +0,1 \text{ В} \qquad U_{Э_{T2}} = -0,1 \text{ В} \qquad U_{R_2} = 0 \text{ В}$$

Этот результат объясняется тем, что в данном случае оба напряжения питания могут порождать электрический ток, который в пропускающих ток транзисторах вызывает напряжение насыщения примерно 0,1 В.

На сопротивлении  $R_2$  происходит компенсация токов вследствие противоположности знаков напряжения, поэтому на резисторе напряжение равно нулю.

После того как мы получили информацию о функционировании данной схемы, нам не составит труда выявить в ней неисправность посредством измерения напряжений.

Для начала составим сводную таблицу результатов с учетом четырех функциональных состояний:

Состояние	$U_{K_{T1}}$ , В	$U_{Э_{T2}}$ , В	$U_{R_2}$ , В
1	+48	-48	0
2	+4,7	-48	+4,6
3	+48	-4,7	-4,6
4	+0,1	-0,1	0

Из этой таблицы, к примеру, видно, что напряжение на  $R_2$  равно 0 В возникает только тогда, когда напряжения на входах одинаковые.

Используя полученные знания, сопоставим их с результатами измерений, представленными ниже, в результате чего сразу можно определить неисправный элемент:

Состояние	$U_{K_{T1}}$ , В	$U_{Э_{T2}}$ , В	$U_{R_2}$ , В
1	+4,7	-48	+4,6
2	+4,7	-48	+4,6
3	+0,1	-0,1	0
4	+0,1	-0,1	0

Обратите внимание, что значения напряжений в первом функциональном состоянии неисправной схемы идентичны напряжениям для второго состояния исправной, когда транзистор Т1 открыт. Напряжения третьего функционального состояния неисправной схемы идентичны напряжениям четвертого состояния исправной, когда оба транзистора открыты.

В первом и третьем состояниях транзистор Т1 должен быть закрыт, однако таблица напряжений показывает, что транзистор Т1 постоянно открыт.

Сравнение с рис. 4.4 наводит на мысль, что в данном случае имеет место короткое замыкание между эмиттером и коллектором транзистора Т1.

При сравнении значений в таблицах мы исходили из равных значений напряжения, однако на практике эти значения могут расходиться с учетом допустимых отклонений конструктивных элементов до 100 мВ.

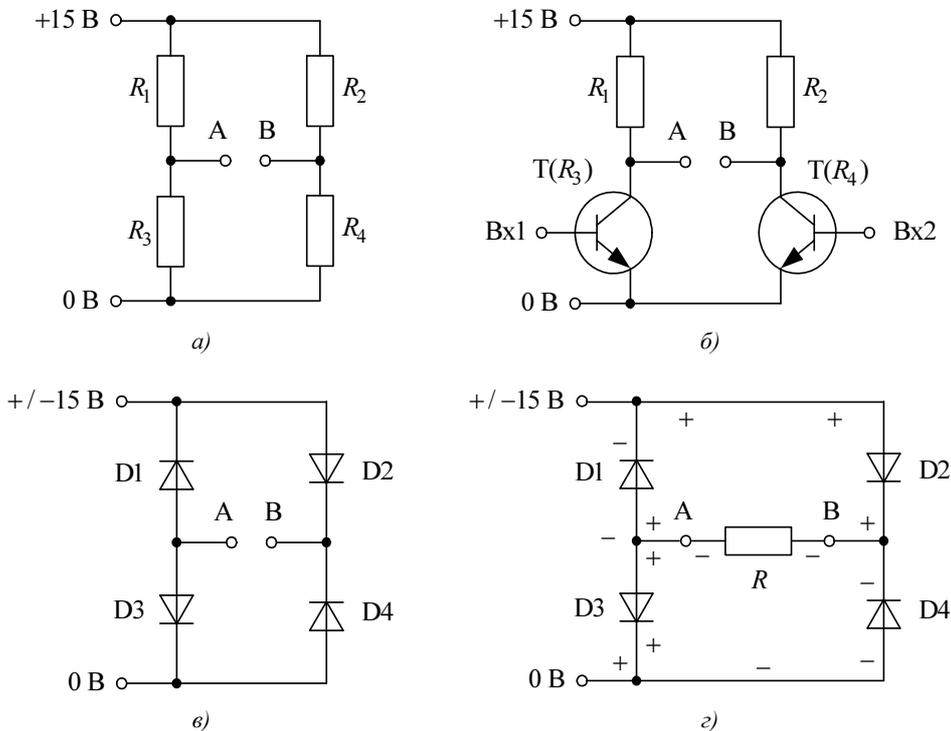


Рис. 4.9. Мостовые схемы: а) сопротивлений; б) транзисторов; в) диодов; г) диодов с сопротивлением нагрузки

Сопротивления, диоды и транзисторы могут быть соединены последовательно либо параллельно. На рис. 4.9 все они являются элементами *мостовых схем*. Подобные схемы часто используются в качестве *измерительных мостов*, а в случае с диодами — как *мостовой выпрямитель*.

Как известно, в мостовых схемах между точками "А" и "В" напряжение равно нулю, если все сопротивления элементов моста одинаковы по величине, либо если две ветви моста с последовательным соединением элементов имеют одинаковое отношение значений сопротивлений.

В *мостовой резистивной схеме*, представленной на рис. 4.9, а, обе ветви моста имеют пропорциональные сопротивления, соответственно  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$

и  $R_3 = R_4 = 5 \text{ кОм}$ . Входное напряжение вследствие этого распределяется равномерно на обе ветви, так что между точкой "А" и опорным потенциалом и соответственно между точкой "В" и опорным потенциалом измеренное напряжение равно +5 В. Поэтому разность напряжений между точками "А" и "В" равна 0 В.

Теперь уменьшим сопротивление резистора  $R_3$  вдвое: с 5 до 2,5 кОм. В результате напряжение распределяется между сопротивлениями резисторов  $R_1 = 10 \text{ кОм}$  и  $R_3 = 2,5 \text{ кОм}$  как 1:4. В таком случае приложенное напряжение +15 В разделится на 12 В для  $R_1$  и 3 В для  $R_3$ . Вторую ветвь оставим без изменений  $R_2 = 10 \text{ кОм}$  и  $R_4 = 5 \text{ кОм}$ . В таком случае напряжение, измеренное в точке "А", составит +3 В, а в точке "В" +5 В. В этом случае между точками возникает разность напряжений +2 В. Если отрицательный зажим измерительного прибора будет подведен к точке "В", а положительный к точке "А", то измеренная разность напряжений между точками "А" и "В" будет -2 В.

Если удвоить исходное значение резистора  $R_3$  с 5 до 10 кОм, то оба сопротивления данной ветви будут одинаковы по величине и в точке "А" будет измерено напряжение +7,5 В. Напряжение в точке "В" составит +5 В. Если измерительный прибор подсоединить аналогично предыдущему случаю, то он зафиксирует разность напряжений +2,5 В.

Следующая сводная таблица еще раз обобщает все результаты измерений:

<b>R3</b>	<b>А</b>	<b>В</b>	<b>Разность А – В</b>
5 кОм	+5 В	+5 В	0 В
2,5 кОм	+3 В	+5 В	-2 В
10 кОм	+7,5 В	+5 В	+2,5 В

Следующая таблица демонстрирует изменение напряжений при изменении сопротивления второй ветви:

<b>R4</b>	<b>А</b>	<b>В</b>	<b>Разность А — В</b>
5 кОм	+5 В	+5 В	0 В
2,5 кОм	+5 В	+3 В	+2 В
10 кОм	+5 В	+7,5 В	-2,5 В

*Транзисторный мост*, представленный на рис. 4.9, б, часто используется как дифференциальный усилитель, а также включается в состав операционных усилителей и функционирует подобно мостовой схеме сопротивлений, если рассматривать функционирование транзистора между выводами коллектора и

эмиттера в качестве переменного сопротивления, чья величина изменяется в зависимости от цепи управления (эмиттерной цепи) транзистора.

Если исходить из того, что сопротивления коллекторов  $R_1$  и  $R_2$  имеют одинаковую величину (10 кОм) подобно сопротивлениям, представленным на рис. 4.9, а, а транзисторы  $T(R_3)$  и  $T(R_4)$  принимают одинаковые значения как  $R_3$  и  $R_4$  на рис. 4.9, а, тогда при измерении напряжения в первой транзисторной ветви мы получим значения, совпадающие с измерениями напряжений в мостовой схеме сопротивлений:

$T(R_3)$	A	B	Разность A — B
5 Ом	+5 В	+5 В	0 В
2,5 Ом	+3 В	+5 В	-2 В
10 Ом	+7,5 В	+5 В	+2,5 В

Следующая сводная таблица отражает значения напряжений для второй транзисторной ветви:

$T(R_4)$	A	B	Разность A — B
5 Ом	+5 В	+5 В	0 В
2,5 Ом	+5 В	+3 В	+2 В
10 Ом	+5 В	+7,5 В	-2,5 В

На рис. 4.9, в представлена *диодная мостовая схема*, которая находит свое применение в выпрямителях переменного напряжения. В этой схеме также имеется две ветви. Левая ветвь с диодами D1 и D3 и правая ветвь с диодами D2 и D4. Из схемы видно, что в обеих ветвях моста диоды включены одинаковым электродом друг к другу, в результате чего как положительное, так и отрицательное напряжение питания не может породить в ветвях моста электрический ток.

Рабочее напряжение +15 В в таком случае было бы измерено на пропускающем ток диоде D2 в точке "B" относительно 0 В. Диоды D1 и D4 расположены для этого напряжения в обратном направлении (имеют очень высокое сопротивление).

В результате измерения разности напряжений между точками "A" и "B" получаем -15 В, если отрицательный полюс измерительного прибора поместить в точку "B", а положительный — в точку "A". В этом случае измеряем от +15 В к 0 В и получаем -15 В.

Питающее напряжение  $-15\text{ В}$  будет измерено на пропускающем ток диоде  $D1$  в точке "А" относительно  $0\text{ В}$ . Диоды  $D2$  и  $D3$  расположены для этого напряжения в обратном направлении (имеют высокое сопротивление).

Измерение разности напряжений между точками "А" и "В" также дает в итоге значение  $-15\text{ В}$ , если отрицательный полюс измерительного прибора поместить в точку "В", а положительный — в точку "А". В этом случае измеряем от  $0\text{ В}$  к  $-15\text{ В}$  и получаем  $-15\text{ В}$ .

На рис. 4.9, *г* показаны ветви моста, которые за счет сопротивления резистора  $R$ , расположенного между точками "А" и "В", образуют две электрические цепи для двух разных полярностей напряжения питания. Для напряжения питания  $+15\text{ В}$  ток протекает в прямом направлении диода  $D2$  через точку "В", резистор  $R$  и дальше через точку "А" и подключенный в прямом направлении диод  $D3$  к опорному потенциалу  $0\text{ В}$ .

В следующей сводной таблице приведены точные значения измеряемых величин:

Анод $D2$	Катод $D2(B)$	Анод $D3(A)$	Катод $D3$
$+15\text{ В}$	$+14,2\text{ В}$	$+0,8\text{ В}$	$0\text{ В}$

Из сводной таблицы видно, что разностное напряжение  $A - B$  на резисторе  $R$  будет равно  $13,4\text{ В}$ . Знак напряжения будет зависеть от того, как будут расположены полюсы измерительного прибора.

Электрическая цепь для напряжения питания  $-15\text{ В}$  замыкается через расположенный в этом случае в прямом направлении диод  $D1$ , точку "А", резистор  $R$  и дальше через точку "В" и диод  $D4$  на опорный потенциал  $0\text{ В}$ . В следующей сводной таблице приведены значения напряжений:

Катод $D1$	Анод $D1(A)$	Катод $D4(B)$	Анод $D4$
$-15\text{ В}$	$-14,2\text{ В}$	$-0,8\text{ В}$	$0\text{ В}$

На основании данных таблицы можно сделать вывод, что и при таком напряжении питания разностное напряжение  $A - B$  на резисторе  $R$  будет равно  $13,4\text{ В}$ , и его знак будет зависеть от размещения полюсов измерительного прибора.

Далее будут приведены две достаточно большие реальные схемы, на примере которых мы определим рабочие напряжения.

На рис. 4.10 представлена схема индикатора, которая состоит из четырех функциональных блоков. Необходимо определить величину постоянного напряжения на выводах транзистора и оценить ее значение.

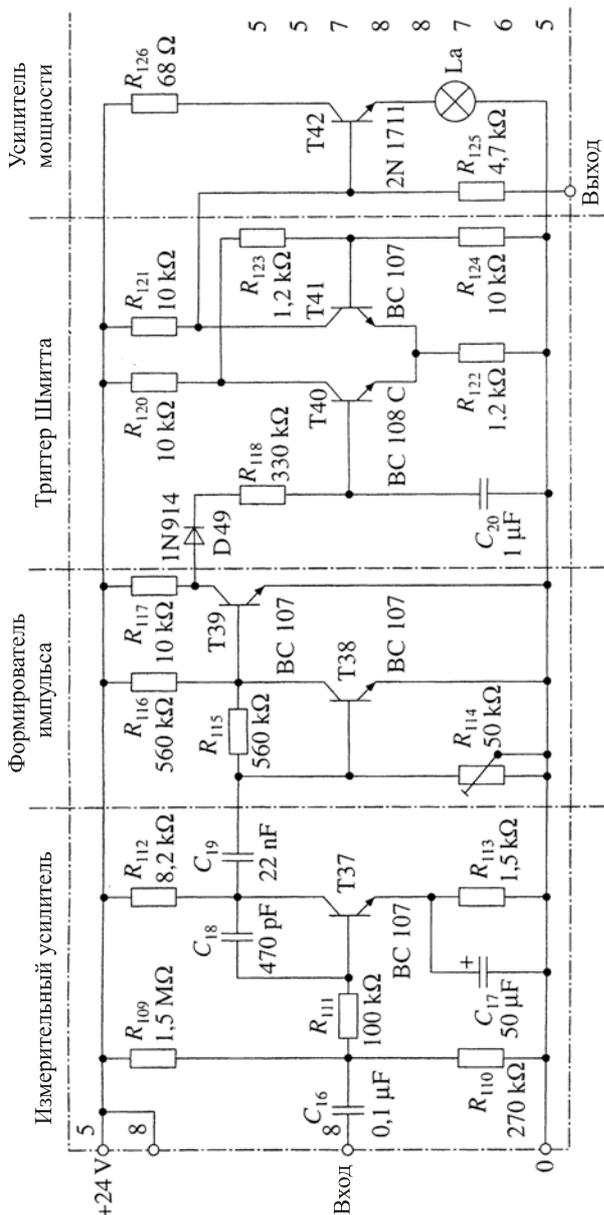


Рис. 4.10. Схема индикатора

В данном случае речь идет не о точных значениях, а о приблизительном их определении, которое соответствовало бы функциональным характеристикам схемы. Мы уже говорили о том, что пределы допуска для полупроводниковых элементов составляют 20—30%. Примем следующие соглашения:

- если мы говорим о напряжении только на одном электроде или в точке, то это напряжение измеряется относительно опорного потенциала и обозначается подобным образом:  $U_K$ ,  $U_B$ ;
- если речь идет о напряжении между двумя электродами, то используются следующие обозначения:  $U_{БЭ}$  или  $U_{КЭ}$ ;
- если один из электродов расположен на опорном потенциале, то допустимы оба обозначения:  $U_{БЭ} = U_B$ ,  $U_{КЭ} = U_K$ .

Напряжение на коллекторе транзистора Т37 *линейного усилителя* имеет следующее значение:

$$U_K = U_{пит}/2 = +24 \text{ В} / 2 = +12 \text{ В}.$$

Напряжение на эмиттере берется от +12 В и определяется из отношения сопротивлений  $R_{112}$  к  $R_{113}$  ( $R_{КЭ} = R_{112}$ ). После проведения расчетов получаем  $U_Э = +2 \text{ В}$ . Напряжение  $U_B$  получается как сумма напряжения на эмиттере  $U_Э$  и напряжения между базой и эмиттером  $U_{БЭ} = 0,3 \text{ В}$  (усилитель сигнала):  $2 \text{ В} + 0,3 \text{ В} = 2,3 \text{ В}$ .

Следующий блок *формирователя импульса* представляет собой схему ограничения для синусоидального сигнала напряжения, или иначе *амплитудный ограничитель*. Отсюда следует, что на выходе усилителя-ограничителя (коллектор транзистора Т39) сигнала нет и транзистор Т38 будет закрыт. Напряжение насыщения на коллекторе транзистора Т39  $U_K < 0,1 \text{ В}$ . При пропускании тока транзистором Т39 возникает напряжение эмиттерного перехода  $U_{БЭ}$  приблизительно равное 0,7 В. Одновременно оно является и напряжением на коллекторе  $U_K$  транзистора Т38. Если рассматривать последовательное соединение  $R_{115}$  и  $R_{114}$ , то здесь имеет место следующее отношение сопротивлений:

$560 \text{ кОм} + 50 \text{ кОм} = 610 \text{ кОм} / 50 \text{ кОм} = 12$ . Напряжение на базе транзистора Т38 определяется следующим образом:  $0,7\text{В}/12 = 60 \text{ мВ}$ . Транзистор закрыт. Однако напряжение на базе транзистора Т39 поддерживает постоянное значение напряжения  $U_K = 0,7 \text{ В}$  на коллекторе транзистора Т38. Вход схемы *триггера Шмитта* разъединен с транзистором Т39 диодом D49 и резистором  $R_{118}$ . В исходном положении триггера Шмитта транзистор Т40 закрыт, а транзистор Т41 открыт (пропускает ток). Вместе с тем напряжение базы транзистора Т40 ниже напряжения эмиттера. Напряжение коллектора  $U_K$  пропускающего ток транзистора Т41 в основном зависит от отношения сопротивлений резисторов  $R_{121}/R_{122}$ . Также необходимо учитывать ток базы транзистора Т41,

который повышает напряжение на сопротивлении  $R_{122}$ . Исходя из соотношения сопротивлений, получаем напряжение 2,6 В. Напряжение на резисторе  $R_{122}$  повышается благодаря току базы примерно на 50%. Таким образом, получаем напряжение  $U_K$  и  $U_3$  около 4 В. Тогда напряжение на базе транзистора Т41 составляет около 4,7 В. Напряжение  $U_K$  на коллекторе транзистора Т40 зависит от сопротивления последовательно соединенных резисторов  $R_{120}$ ,  $R_{123}$  и  $R_{124}$ , а также от тока базы транзистора Т41.

Из отношения сопротивлений  $(R_{120} + R_{123} + R_{124}) / R_{124}$  при напряжении питания 24 В получаем коэффициент, примерно равный 2. Если исходить из того, что ток базы примерно равен току, проходящему через резистор  $R_{124}$ , тогда для  $U_K$  получаем коэффициент около 4 ( $24 \text{ В} / 4 = 6 \text{ В}$ ). Определение потенциала на транзисторе Т42 выполняется с учетом напряжения на лампе La. Если напряжение на лампе составляет 12 В, то транзистор не пропускает ток благодаря напряжению  $U_B = 4 \text{ В}$  коллектора транзистора Т41. Напряжение на коллекторе  $U_K$  в таком случае будет иметь значение напряжения питания  $U_{\text{пит}} = U_K = 24 \text{ В}$ .

В табл. 4.1 выполнено сравнение расчетных значений напряжения (*эталонных значений*) с результатами измерений для случая, когда входной сигнал схемы отсутствует.

**Таблица 4.1.** Сравнение расчетных и измеренных значений напряжения

Выводы	Расчетное значение	Значение, полученное в результате измерения
<b>Транзистор Т37</b>		
Коллектор	12 В	12,7 В
Эмиттер	2 В	2,1 В
База	2,6 В	2,7 В
<b>Транзистор Т38</b>		
Коллектор	0,7 В	0,6 В
База	60 мВ	50 мВ
<b>Транзистор Т39</b>		
Коллектор	0,1 В	80 мВ
База	0,7 В	0,6 В
<b>Транзистор Т40</b>		
Коллектор	6 В	6,9 В
Эмиттер	4 В	3,8 В
База	<4 В	3,5 В

Таблица 4.1 (окончание)

Выводы	Расчетное значение	Значение, полученное в результате измерения
<b>Транзистор Т41</b>		
Коллектор	4 В	4,2 В
Эмиттер	4 В	3,8 В
База	4,7 В	4,8 В
<b>Транзистор Т42</b>		
Коллектор	24 В	22 В
Эмиттер	12 В	11,4 В
База	4 В	4,2 В

На рис. 4.11 представлен усилитель низкой частоты (УНЧ), который в качестве последнего каскада содержит усилительный каскад и предусилитель.

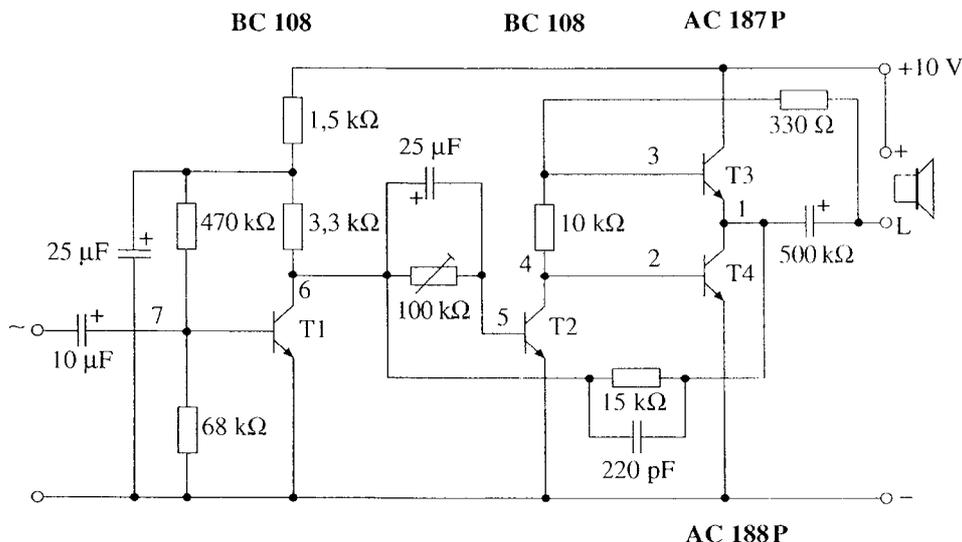


Рис. 4.11. Схема усилителя низкой частоты

Начнем с определения потенциала в точке соединения транзисторов усилителя выходного каскада. На выходе последней ступени должно быть примерно  $U_{пит} / 2$ , т. е. в точке "1" схемы около +5 В. Напряжения на базах должны определяться соответствующим значением встречного напряжения, которое составляет от 0,3 до 0,5 В. Вычисляем напряжение в точке "3":

$+5 \text{ В} + 0,5 \text{ В} = 5,5 \text{ В}$ . Для определения напряжения в точке "2" уменьшаем выходное напряжение на  $0,5 \text{ В}$ :  $5 \text{ В} - 0,5 \text{ В} = 4,5 \text{ В}$ . Напряжение в точке "4" совпадает с напряжением в точке "2". Также легко можно определить напряжение в точке "5". Напряжение эмиттера равно нулю. Напряжение базы должно быть больше на  $0,3—0,4 \text{ В}$ . Таким образом, в точке "5" примерно  $0,4 \text{ В}$ . В точке "6", т. к. речь идет о ступени усилителя, приблизительно  $U_{\text{пит}} / 2 = +5 \text{ В}$ . Напряжение в точке "7" составляет примерно  $0,2—0,3 \text{ В}$ , т. к. эмиттер здесь также имеет нулевой потенциал.

Рассмотренную в приведенном примере методику определения напряжений с успехом можно использовать в любых аналоговых схемах. При расчетах следует обратить особое внимание на определение типичной для рассматриваемой ступени усилителя рабочей точки (будь то предварительный усилитель, задающий каскад, или выходная ступень) и на определение величин сопротивлений.

## 4.5. Упражнения для закрепления полученных знаний

Рассмотренные нами примеры наводят на мысль, что систематизированный поиск неисправностей сводится к своеобразной игре "вопрос-ответ" между человеком и компьютером. Например, вопрос: *Каково напряжение в точке "А"?* Схема отвечает измеренным напряжением:  $+3 \text{ В}$ ! Этот ответ не имеет никакого практического смысла до тех пор, пока специалист по техобслуживанию не сопоставит с ним ожидаемый результат. Целесообразным в данном случае является следующий алгоритм:

Вопрос:	Каково напряжение в точке "А"?
Ожидаемое значение:	Я ожидаю $+3 \text{ В}$ с погрешностью 15%.
Измеренное значение:	Напряжение составляет $3,2 \text{ В}$ .
Вывод:	Измеренное напряжение в норме. Неисправность отсутствует.

Еще один вариант.

Вопрос:	Каково напряжение в точке "А"?
Ожидаемое значение:	$+3 \text{ В}$ с погрешностью 15%.
Измеренное значение:	Напряжение составляет $3,7 \text{ В}$ .
Вывод:	Если расчетное напряжение верно, то имеется неисправность.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.1.** В схеме на рис. 4.3 напряжение питания повышено с 5 до 10 В. Каково будет напряжение на диоде для схем, представленных на рис. 4.3, *a—г*?

- а) \_\_\_\_\_ В                      б) \_\_\_\_\_ В  
в) \_\_\_\_\_ В                      г) \_\_\_\_\_ В

**УПРАЖНЕНИЕ 4.2.** Каким будет значение напряжения на диоде (рис. 4.3, *a—г*), если изменить полярность напряжения на противоположную?

- а) \_\_\_\_\_ В                      б) \_\_\_\_\_ В  
в) \_\_\_\_\_ В                      г) \_\_\_\_\_ В

**УПРАЖНЕНИЕ 4.3.** Измеренное на диоде напряжение (рис. 4.3) оказалось равным 0,1 В. Напряжение питания не изменялось. Какова причина неисправности?

**УПРАЖНЕНИЕ 4.4.** Напряжение на базе (рис. 4.4, *a*) понизилось с +0,3 В до +0,2 В. Как изменится напряжение на коллекторе?

- а) напряжение повысится;  
б) напряжение уменьшится;  
в) напряжение не изменится.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.5.** Напряжение на базе (рис. 4.4, *a*) увеличилось с +0,3 В до +0,5 В. Как изменится напряжение на коллекторе?

- а) напряжение повысится;  
б) напряжение уменьшится;  
в) напряжение не изменится.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.6.** База транзистора, изображенного на рис. 4.4, *a* с помощью пинцета или острых щипцов, накоротко замкнута на опорный потенциал (0 В). Каково будет напряжение на коллекторе?

- а) от +7 В до +10 В;  
б) 0 В;  
в) равное напряжению питания +15 В;  
г) другое значение: \_\_\_\_\_ В.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.7.** Если убрать резистор  $R_6 = 15 \text{ кОм}$ , расположенный между напряжением питания и базой, каковы будут напряжения базы и коллектора?

- а) база +15 В                      коллектор 0,1 В;
- б) база +0,3 В                    коллектор +8 В;
- в) база 0 В                        коллектор +15 В.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.8.** В мостовой схеме сопротивлений, представленной на рис. 4.9, а, все четыре сопротивления имеют одинаковую величину. Как изменится напряжение моста (напряжение между точками "А" и "В"), если удвоить значение сопротивления резистора  $R_1$ ?

- а) разностное напряжение между А и В останется равным 0 В;
- б) разностное напряжение увеличится на 5 В;
- в) разностное напряжение увеличится на 2,5 В.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.9.** В транзисторной мостовой схеме (рис. 4.9, б) база транзистора  $T(R_3)$  замкнута накоротко на 0 В. Сопротивление коллектор-эмиттер транзистора  $T(R_4)$  равно по величине сопротивлению резистору  $R_2$ . Каково будет разностное напряжение между точками "А" и "В"?

- а) 15 В;
- б) 7,5 В;
- в) 0 В.

**УПРАЖНЕНИЕ 4.10.** Напряжение питания схемы рис. 4.9, з равно +15 В. Диод  $D_3$  замкнут накоротко. Какие напряжения будут измерены в точках "А" и "В"? Каково будет разностное напряжение на резисторе  $R$ ?

"А": \_\_\_\_\_ В

"В": \_\_\_\_\_ В

$R$ : \_\_\_\_\_ В

**УПРАЖНЕНИЕ 4.11.** Для схемы, представленной на рис. 4.12, расчетные напряжения будут равны:

$U_{R_k}$  : \_\_\_\_\_ В

$U_{КБ}$  : \_\_\_\_\_ В

$U_{БЭ}$  : \_\_\_\_\_ В

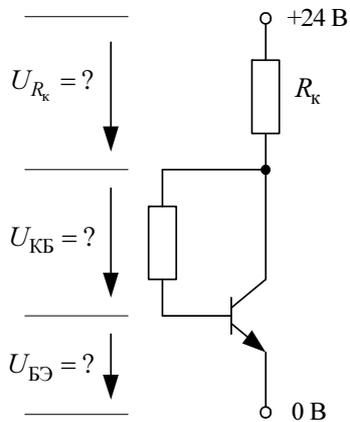


Рис. 4.12

Ответы можно посмотреть в приложении.



## ГЛАВА 5

# Системный поиск неисправностей в аналоговых схемах

Аналоговые (линейные) схемы существенно отличаются от цифровых схем как по структуре, так и по функционированию. Линейные схемы в основном используются в акустических приборах и в высокочастотных передатчиках (антенных усилителях).

Несмотря на разнообразие усилителей, нет необходимости использовать для каждого из них свой особый подход в поиске неисправностей. Необходимо лишь учитывать некоторые принципиальные отличия, присущие разным видам усилителей.

Будь то усилитель слабого сигнала или усилитель мощности, прежде всего необходимо определить тип используемых транзисторов и величину присоединенного сопротивления. Предварительный усилитель и входные каскады усилителей с высоким коэффициентом усиления и высокой чувствительностью на входе характеризуются необходимостью усиления слабого сигнала при большом сопротивлении делителя напряжения и значительном рабочем сопротивлении коллектора.

Это необходимо для получения требуемого большого входного сопротивления в первых ступенях с помощью соответствующей установки рабочей точки, а также для достижения высокого коэффициента усиления напряжения. Если увеличивать количество каскадов, то значение сопротивления снижается, т. к. рабочие токи становятся больше.

Из-за высокого усиления в первых каскадах в них возможны слишком большое усиление шумов или автоколебания. Заключение о величине общего усиления усилителя делают не только на основе определения величины рабочего сопротивления, но и с учетом использования отрицательной обратной связи.

## 5.1. Определение напряжений в схемах

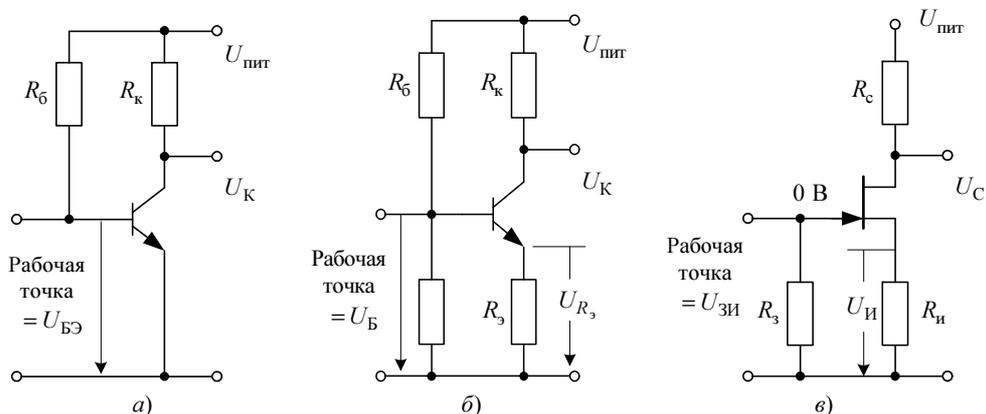
При использовании линейно управляемых элементов, например, биполярных (*p-n-p* и *n-p-n*), а также полевых транзисторов, область модуляции должна определяться на основе задающего напряжения с помощью определенной *рабочей точки* (рис. 5.1). Задание рабочей точки в биполярных транзисторах выполняется посредством *добавочного резистора* (рис. 5.1, *а*) или с помощью *делителя напряжения* (рис. 5.1, *б*), подключенного к управляющему электроду транзистора, т. е. к базе. В полевых транзисторах задание рабочей точки осуществляется посредством сопротивления истока (рис. 5.1, *в*), т. к. через управляющий электрод ток не проходит.

При линейной работе транзисторного каскада можно исходить из того, что рабочая точка определяет напряжение на коллекторе биполярного транзистора и, соответственно, на стоке полевого, как  $U_{\text{пит}} / 2$ . Вследствие этого максимальный диапазон модуляции транзистора будет находиться между  $U_{\text{пит}}$  и  $U_{\text{кэ,нас}}$  (около 0,1 В). Только в усилителях слабого сигнала возможно существенное отклонение этого напряжения. Исходя из этого, можно приблизительно определить все остальные величины постоянного напряжения транзисторных каскадов с помощью присоединенного сопротивления. На рис. 5.2 представлены два примера, демонстрирующих вышеизложенное. На рис. 5.2, *а* представлен каскад усилителя на биполярном *n-p-n*-транзисторе в качестве усилителя слабого сигнала. Об этом свидетельствуют большие значения сопротивлений резисторов коллектора и базы. Напряжение на коллекторе  $U_{\text{кэ}}$  будет приблизительно равно  $U_{\text{пит}} / 2 = 24 \text{ В} / 2 = 12 \text{ В}$ . При таком напряжении внутреннее сопротивление транзистора по постоянному току равно рабочему сопротивлению резистора коллектора. Тогда из отношения сопротивлений можно вывести ориентировочное значение постоянного напряжения на резисторе эмиттера. Током базы при этом можно пренебречь. Отношение сопротивления  $R_{\text{к}} = 1 \text{ МОм}$  к сопротивлению  $R_{\text{э}} = 10 \text{ кОм}$  составляет 100 : 1. В таком случае напряжение на  $R_{\text{э}}$  составит  $12 / 100 = 0,12 \text{ В} = 120 \text{ мВ}$ . Эмиттерное напряжение  $U_{\text{БЭ}}$  каскада линейного усилителя будет составлять 0,2—0,6 В. Напряжение на базе, измеренное относительно опорного потенциала, должно составлять 0,3—0,7 В. Таким образом  $U_{\text{Б}} = U_{\text{БЭ}} + U_{R_{\text{э}}}$ .

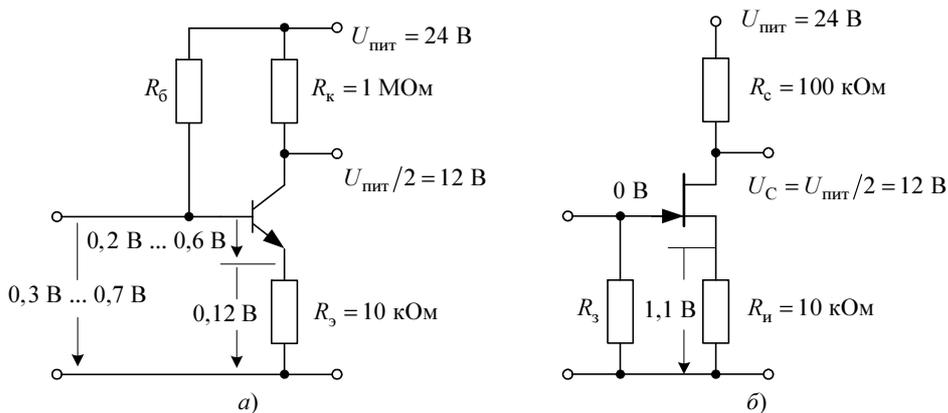
Подобные рассуждения приемлемы и для усилителей на полевых транзисторах (рис. 5.2, *б*). В рабочей точке при  $U_{\text{пит}} / 2$  внутреннее сопротивление полевого транзистора между стоком и истоком равно по величине рабочему сопротивлению  $R_{\text{с}}$ .

Поэтому напряжение на резисторе  $R_{\text{и}}$  можно рассчитать также из отношения сопротивлений. Результирующее напряжение равно  $U_{R_{\text{и}}} = 12 \text{ В} / 11 = 1,1 \text{ В}$ .

Это напряжение является напряжением затвора, т. к. известно, что в затворе тока нет.



**Рис. 5.1.** Напряжения в линейных усилителях: транзисторный каскад с добавочным резистором (а); транзисторный каскад с базовым делителем напряжения (б); каскад усилителя с полевым транзистором, имеющим сопротивление утечки затвора и сопротивление истока (е)



**Рис. 5.2.** Пример напряжений в линейных усилительных каскадах: в каскаде на биполярном  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторе (а); в каскаде на полевым транзисторе (б)

Подобная проверка постоянных напряжений наиболее эффективна при поиске и локализации неисправных элементов в схемах. При этом через схему не должно проходить никакого модуляционного сигнала, т. к. это может исказить результаты измерений.

## 5.2. Последствия возможных коротких замыканий и обрывов при различных видах связи

Распознавание и правильная оценка вида связи, как показывает опыт, вызывает у специалистов самые большие затруднения, хотя и здесь, используя несколько правил, можно достигнуть значительных результатов. В принципе, все соединения каскадов и цепей — это связи. Как и с помощью каких конструктивных элементов будут выполнены эти связи, зависит от их функционального назначения.

Связи могут быть выполнены между любыми конструктивными элементами: конденсаторами, катушками, трансформаторами, резисторами, диодами и транзисторами.

Прямое соединение двух каскадов — это тоже связь. Назовем ее *прямой* или *непосредственной связью*.

Соответственно связь перенимает характеристики, присущие конструктивному элементу, который используется в качестве элемента связи. Так, если сопротивление конструктивного элемента зависит от частоты, то и связь будет зависеть от частоты.

Величина сопротивления также оказывает влияние на действие связи. При небольшом сопротивлении элементов связи говорят об "устойчивой связи", при высоком сопротивлении — о "разъединяющей связи".

Связи, которые должны выполнять функцию развязки двух каскадов усилителя, обладают еще более высоким сопротивлением, например, развязывающий каскад — схема с общим эмиттером.

В зависимости от того, какая задача ставится перед связью и какую функцию она будет выполнять, различают три вида связи (рис. 5.3).

*Соединительная связь* служит в качестве электрического соединения либо между двумя каскадами усиления или управления, либо в фильтрующих цепях и предназначена для дальнейшего прохождения сигнала (рис. 5.3, а).

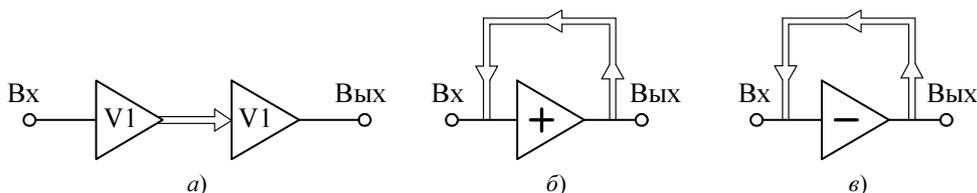


Рис. 5.3. Виды связи: соединительная связь (а); положительная обратная связь (б); отрицательная обратная связь (в)

*Положительная обратная связь* служит для возврата выходного сигнала на вход в усилителях с одной или несколькими каскадами с целью усиления сигнала, т. е. выходное напряжение должно вернуться на вход с той же полярностью (рис. 5.3, б), к примеру в схемах с колебательными контурами (генераторы).

*Отрицательная обратная связь* также служит для возврата выходного сигнала на вход в усилителях с одной или несколькими каскадами с целью стабилизации и линеаризации характеристик усилителя. При этом выходное напряжение должно вернуться на вход с обратной полярностью (рис. 5.3, в).

Связи и их типичные реализации в схемах сведены в табл. 5.1.

**Таблица 5.1.** Связи и их типичное применение

Возможная реализация	Соединительная связь	Обратная связь	
		Положительная	Отрицательная
Прямая связь	+		
Сопrotивление	+	+	+
Диод	+		+
Стабилитрон	+		
Транзистор	+	+	
Конденсатор	+	+	+
Катушка	+		
Трансформатор	+	+	+
Полосовой фильтр	+	+	+

## Соединительные связи

Соединительные связи в схемах легко поддаются определению и изучению. Начнем их изучение со схемы, представленной на рис. 5.4. Здесь имеется несколько интересных соединительных связей, информация о которых сведена в табл. 5.2.

В этой таблице кроме конструктивных элементов, влияющих на функциональные особенности связи, представлены элементы, которые находятся внутри связи, но не определяют ее функцию.

Если, например, в случае емкостной связи последовательно включено еще одно сопротивление, то такой вид связи по своему функционированию будет емкостным, т. е. будет зависеть от частоты и является делителем постоянного напряжения.

Таблица 5.2. Обзор видов связи, представленных на рис. 5.4

Выход	Вход	Вид связи
Коллектор Т1	База Т2	Прямая
Коллектор Т2	База Т3	Прямая
Эмиттер Т3	R20	Емкостная С1
Эмиттер Т3	База Т4	Емкостная С1, С10, R12
Коллектор Т4	База Т5	Резистивная R15, С11
Коллектор Т5	Выход	Резистивная R18

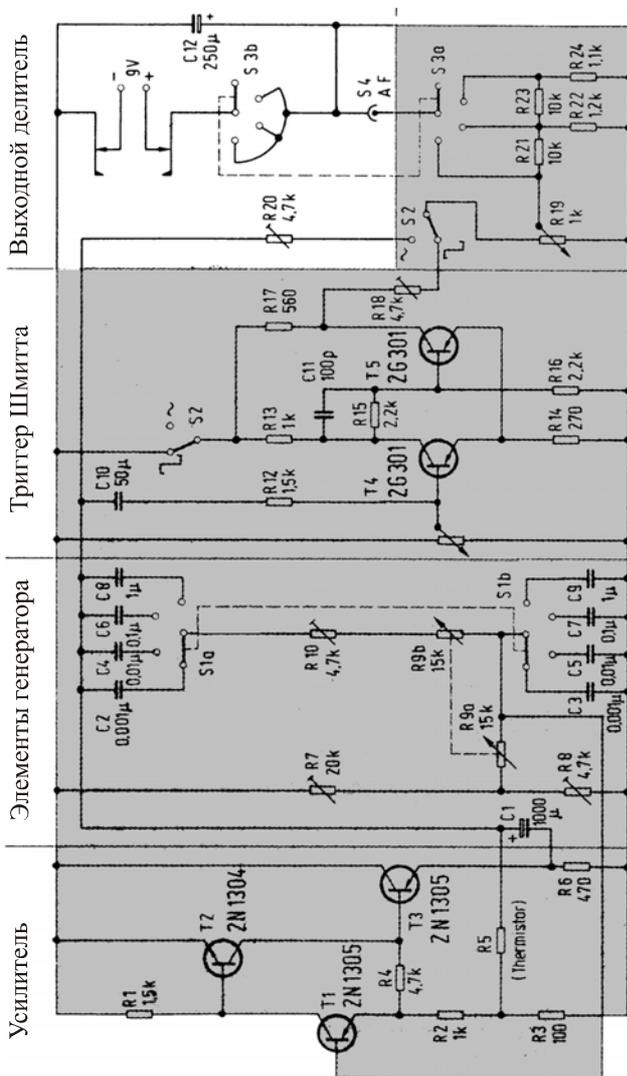


Рис. 5.4. Виды связи в функциональных группах RC-генератора

Прямо противоположно функционирование связи при параллельно соединенных резисторе и конденсаторе. В этом случае решающими являются электрические свойства резистора; конденсатор действует здесь только при переменных напряжениях с частотами, при которых реактивное сопротивление конденсатора соизмеримо с омическим сопротивлением.

Итак, перечислим возможные варианты воздействия дефектных элементов в соединительных связях на функционирование схемы усилителя.

Прямая связь между двумя транзисторами (на рис. 5.4 это связи между коллектором транзистора Т1 и базой транзистора Т2, а также между коллектором транзистора Т2 и базой транзистора Т3) в случае одного дефектного транзистора оказывает влияние на рабочие точки всех трех каскадов усилителя.

Допустим, делитель напряжения R7 (20 кОм) и R8 (4,7 кОм) изменен таким образом, что рабочая точка транзистора Т1 сдвинута и находится в зоне более высокого напряжения. Вследствие этого сопротивление между коллектором и эмиттером транзистора становится меньше, напряжение коллектора также становится меньше. За счет такого изменения напряжения смещается рабочая точка транзистора Т2, а вместе с тем посредством сопротивления базы транзистора Т3 и его рабочая точка.

Еще один вариант воздействия на рабочую точку транзистора Т1 возможен при наличии резистивной связи R4 (4,7 кОм) от эмиттера транзистора Т1 на базу транзистора Т3. Посредством более высокого тока в эмиттере транзистора Т1 повышается напряжение на сопротивлении эмиттера и вместе с тем через резистор R4 и напряжение на базе транзистора Т3. Изменение сопротивления транзистора Т2 и напряжения эмиттера транзистора Т1 также ведут к изменению рабочей точки транзистора Т3.

На рис. 5.5 представлено несколько примеров соединительных связей.

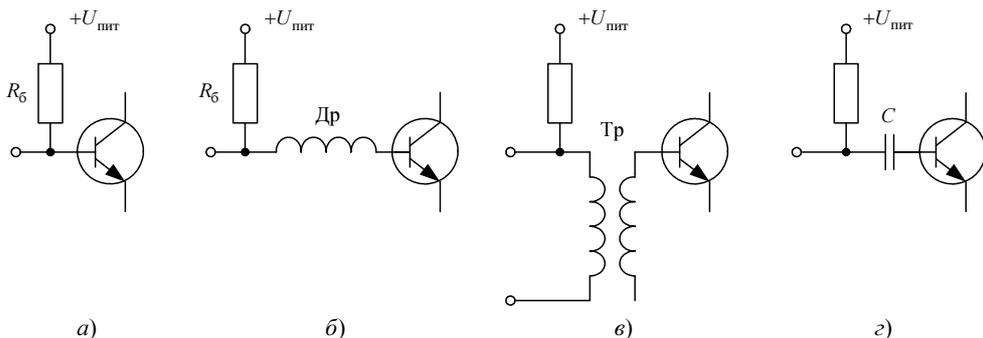


Рис. 5.5. Схемы с соединительными связями: прямая связь (а); прямая индуктивная связь (б); трансформаторная связь (в); емкостная связь (г)

На рис. 5.5, а рабочая точка транзисторного каскада зависит от сопротивления резистора  $R_6$ , подключенного между напряжением питания и базой.

На рис. 5.5, б представлена прямая связь посредством индуктивного реактивного сопротивления. Короткое замыкание в катушке не может существенно сказаться на рабочей точке транзистора, т. к. сопротивление меди намного меньше сопротивления  $R_6$ .

Внутренний обрыв в катушке индуктивности изменит рабочую точку транзистора относительно 0 В, а транзистор окажется заперт.

На рис. 5.5, в представлена схема, в связи которой используется трансформатор. Только короткое замыкание между первичной и вторичной обмоткой трансформатора может оказать влияние на рабочую точку транзистора. Короткое замыкание во вторичной обмотке может также замкнуть транзистор.

В случае емкостной связи (рис. 5.5, г) воздействие на рабочую точку транзисторного каскада возможно только при коротком замыкании конденсатора. Внутренний обрыв конденсатора не влияет на рабочие точки напряжения по постоянному току. Конденсатор с внутренним обрывом, а следовательно не имеющий емкости, оказывает свое воздействие только на передаточные характеристики при переменном напряжении.

## Отрицательные обратные связи

Еще раз напомним, что отрицательная обратная связь реализует возврат выходного сигнала однокаскадного или многокаскадного усилителя на его вход с противоположной полярностью.

Например, на рис. 5.4 отрицательная обратная связь осуществляется через сопротивление  $R_4$  от эмиттера транзистора Т1 к коллектору транзистора Т2 и базе транзистора Т3. Еще один пример — связь через терморезистор  $R_5$  от С1 к эмиттерному сопротивлению транзистора Т1.

Действие сопротивления  $R_4$ , участвующего в отрицательной обратной связи, отражается как на рабочих точках транзисторных каскадов, так и на амплитуде сигнала. В отличие от этого, терморезистор оказывает воздействие только на амплитуду сигнала, т. к. через конденсатор С1 происходит разделение постоянного напряжения транзистора Т3.

Существует много вариантов организации отрицательной обратной связи. Различают *частотно-независимые отрицательные обратные связи*, такие как, например, резистивная отрицательная обратная связь, которая оказывает влияние как на рабочие точки постоянного напряжения, так и на амплитуду сигнала, и *частотно-зависимые отрицательные обратные связи* (на основе конденсатора, катушки индуктивности, трансформатора), которые влияют только на амплитуду сигнала.

На рис. 5.6, а представлена схема, в которой рабочая точка создается резистором между коллектором и базой. Стабилизация рабочей точки происходит следующим образом.

С повышением эмиттерного напряжения (напряжение рабочей точки) увеличивается ток коллектора. Как следствие, падает напряжение коллектора и одновременно уменьшается или остается постоянным напряжение на базе. Здесь мы наблюдаем противоположное поведение коллекторного напряжения и напряжения на базе, которое используется при организации отрицательной обратной связи.

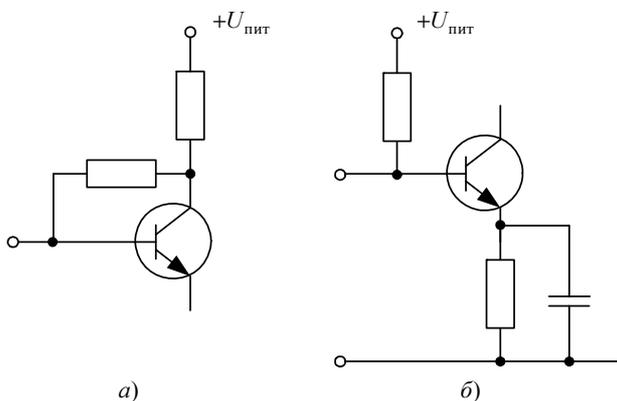


Рис. 5.6. Виды отрицательной обратной связи: коллекторная обратная связь (а); эмиттерная обратная связь (б)

Такая отрицательная обратная связь через сопротивление в равной мере может использоваться и для поддержания постоянства амплитуды переменного напряжения.

Такую обратную связь называют *отрицательной обратной связью по напряжению*.

Итак, каким образом отражаются ошибки в ветви отрицательной обратной связи на функционировании схемы.

При увеличении сопротивления отрицательной обратной связи значение рабочей точки базы уменьшается. Как следствие, уменьшается ток коллектора и увеличивается его напряжение, которое однако не создает уравнивания по причине увеличения сопротивления в цепи отрицательной обратной связи. Поэтому значение рабочей точки остается ниже требуемого. В результате происходит снижение усиления амплитуды переменного напряжения и ограничение отрицательных полуволн на коллекторе транзистора.

При уменьшении сопротивления отрицательной обратной связи рабочая точка базы изменяется в сторону больших значений. В результате усиливается ток коллектора и уменьшается его напряжение, которое опять же не уравнивается из-за пониженного сопротивления обратной связи. Рабочая точка остается в зоне повышенных значений. Как следствие, повышается усиление амплитуды переменного напряжения и ограничение положительных полуволн коллектора при достижении верхней границы усиления.

Короткое замыкание в сопротивлении отрицательной обратной связи (прямое соединение коллектор-база) приводит к разрушению транзисторного каскада. Возникает короткое замыкание или внутренний обрыв в пограничном слое между базой и эмиттером.

На рис. 5.6, б представлен пример схемы с отрицательной обратной связью на основе эмиттерного резистора. Данная отрицательная обратная связь используется для стабилизации рабочей точки транзисторного каскада и функционирует следующим образом.

При изменениях в рабочей точке изменяется ток эмиттерного перехода и ток коллектор-эмиттер. Усиление тока коллектора приводит к усилению тока эмиттера и к увеличению напряжения на эмиттерном резисторе. В результате эмиттерное напряжение уменьшается. Ток базы и ток коллектора тоже уменьшаются. Таким образом, рабочая точка остается постоянной.

Регулирование рабочей точки (напряжения эмиттерного перехода) происходит за счет изменения тока в эмиттере. Поэтому такую обратную связь называют *отрицательной обратной связью по току*.

Конденсатор, параллельно подключенный к эмиттерному резистору (см. рис. 5.6, б), при переменном напряжении образует очень низкое реактивное сопротивление. Вследствие этого действие эмиттерного сопротивления отрицательной обратной связи на усиливаемое переменное напряжение повышается.

Неисправные элементы в отрицательной обратной связи такого рода влекут за собой изменения в функционировании схемы.

Изменение значения сопротивления эмиттерного резистора ведет к изменениям в рабочей точке усилительного каскада. Низкое значение сопротивления приводит к увеличению напряжения рабочей точки (увеличению тока в коллекторе), вплоть до ограничения тока, и вместе с тем к увеличению усиления и ограничению амплитуды сигнала. Завышенное значение сопротивления уменьшает напряжение рабочей точки (уменьшается ток коллектора), вплоть до прекращения подачи тока, и вместе с тем приводит к уменьшению усиления и ограничению амплитуды сигнала.

## Положительные обратные связи

Еще в начале *разд. 5.2* упоминалось, что признаком положительной обратной связи является подача выходного сигнала однокаскадного или многокаскадного усилителя на его вход. Причем полярность этого сигнала должна совпадать с полярностью входного сигнала. Положительная обратная связь всегда используется в случаях, когда усилитель должен сам управлять своей работой, т. е. когда он выполняет функцию генератора.

Схема генератора, представленная на рис. 5.4, является типичным примером использования положительной обратной связи. Для обеспечения самоуправления сигнала с выхода усилителя (эмиттер транзистора Т3) проходит через конденсатор связи С1 и переключаемую RC-цепь С2, R10, R9 и возвращается на базу транзистора Т1. Связи, используемые в качестве положительной обратной связи, могут выполнять две функции. Либо они должны возвращать с выхода на вход необходимую для усиления частоту с сохранением полярности, либо должны при противоположной полярности выхода и входа повернуть частоту по фазе до одинаковой полярности.

Какую именно функцию выполняет цепь связи, можно понять либо по ее схеме, либо проверив полярности входа и выхода каскадов усилителя. После перепроверки полярностей представленной на схеме (см. рис. 5.4) цепи связи было установлено ее функциональное поведение.

Первый каскад усиления изменяет полярность сигнала на противоположный (база-коллектор). После повторного изменения полярности во втором каскаде усилителя сигнал получает ту же полярность, что и на входе первого каскада. В третьем каскаде полярность больше не изменяется (эмиттерная схема). В результате получаем, что полярность сигнала на выходе усилителя совпадает с полярностью сигнала на входе.

## 5.3. Систематизированный поиск неисправностей в аналоговых схемах

Если вы имеете дело с незнакомым вам неисправным устройством, то для начала попробуйте локализовать область неисправности с помощью проверки внешних функциональных характеристик: осмотрите индикаторы, лампы, элементы панели управления, которые могли бы сигнализировать о характере и месте неисправности. Рассмотрим простой пример.

Включаем оригинальное устройство, в состав которого входят питание от сети, сетевой выключатель и контрольная лампа. Первый этап представлен на рис. 5.7.

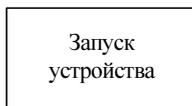


Рис. 5.7

Затем визуально оцениваем полученный результат. В нашем примере это означает, что проверяется функционирование контрольной лампы. Итак, второй этап показан на рис. 5.8.



Рис. 5.8

Если результат проверки оказывается отрицательным, т. е. контрольная лампа не светится, то требуется определение и устранение причины возникновения неисправности. В нашем примере возможна проверка напряжения сети с помощью измерительного прибора, тестирование фазы на короткое замыкание или внутренний обрыв, а также проверка функционирования сетевого предохранителя и, в случае необходимости, лампы и сетевого выключателя. Отсюда название третьего этапа — "Исправление неисправности" или, иначе, "Устранение неисправности" (рис. 5.9).



Рис. 5.9

Если в указанных областях неисправность не обнаружена, необходимо продолжить проверку функционирования, снова вернувшись к первому этапу (рис. 5.10).

Итак, самые важные логические этапы системного поиска неисправности (рис. 5.11):

- Запуск устройства
- Оценка результата
- Исправление неисправности

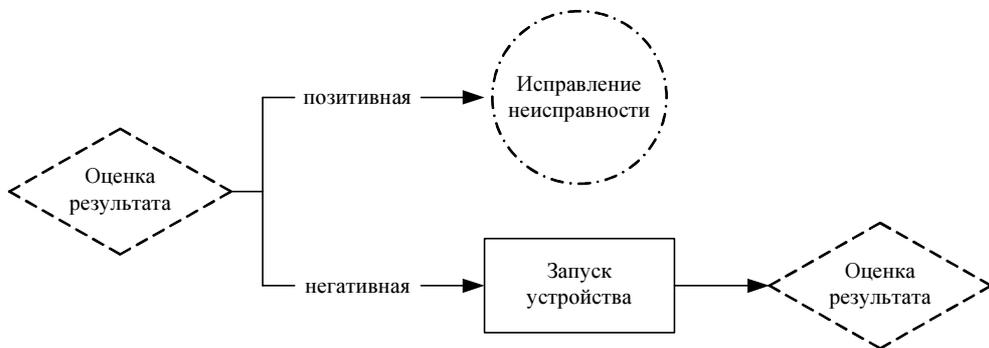


Рис. 5.10



Рис. 5.11

В качестве примера рассмотрим неисправный усилитель низкой частоты (УНЧ) (рис. 5.12). Низкочастотный динамик не выдает необходимой мощности и воспроизводит только очень слабые и искаженные звуки. Напряжение питания в порядке. Необходимо выполнить поэтапную проверку этого усилителя. При рассмотрении схемы слева направо можно выделить следующие функциональные группы: входы для микрофона и сигнала низкой частоты, фильтры, фильтр верхних частот с высокочастотным усилителем и высокочастотный динамик. Параллельно к входу высокочастотного усилителя подключены: фильтр нижних частот, мостовой низкочастотный усилитель и низкочастотный динамик.

Прежде чем начать поиск неисправности в достаточно большой схеме, можно попробовать на основе внешних признаков с использованием блок-схемы предварительно определить область неисправности. Если блок-схема отсутствует, то имеет смысл ее набросать. Преимущества такого подхода:

- в схеме нужно определить и ограничить отдельные функциональные единицы;
- с помощью блок-схемы становится возможным функциональный обзор, который очень помогает при поиске и локализации неисправности.

УНЧ можно разделить на 6 функциональных узлов (рис. 5.13), которые будут проверяться поочередно в порядке их функциональной последовательности (рис. 5.14).



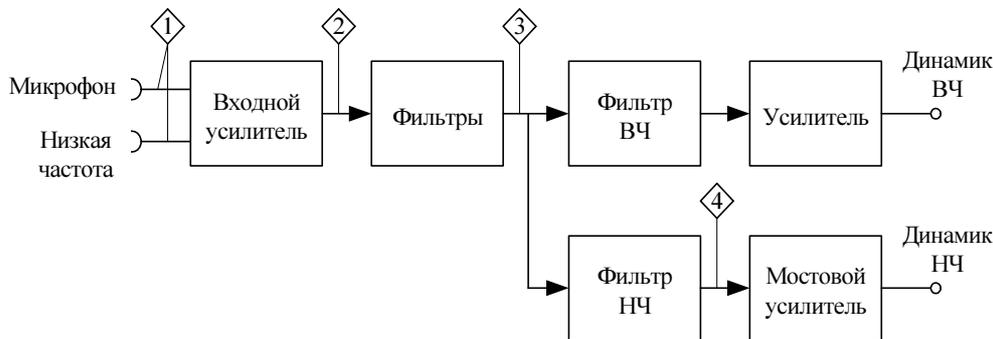


Рис. 5.13. Блок-схема УНЧ

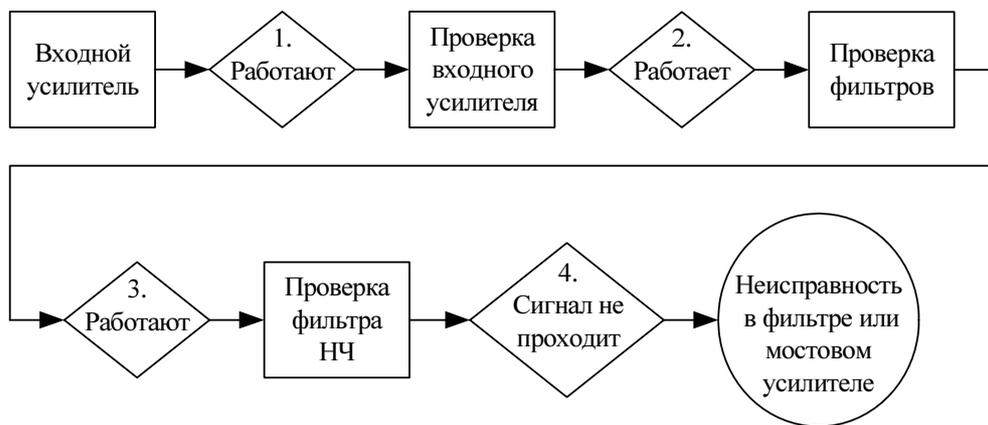


Рис. 5.14. Поиск неисправности в соответствии с блок-схемой

Сначала проверяем входы микрофона и низких частот и замеряем сигнал в точке "1". Для этого к входам подключается источник сигнала, который более или менее постоянен по частоте и амплитуде. Благодаря этому существенно облегчается процедура проверки прохождения сигнала.

Если в точке "1" сигнал присутствует, то поочередно проверяются точки "2" и "3". Затем замеряем сигнал сразу на выходе фильтра низких частот, т. к. неисправно функционирует только НЧ-динамик. Измеряем сигнал в точке "4" и определяем, что сигнал не проходит. Таким образом, приходим к выводу, что неисправен либо фильтр низких частот, либо мостовой усилитель. Дальнейшая проверка НЧ-динамика не требуется, т. к., основываясь на полученных результатах проверки функционирования, с большой вероятностью можно утверждать, что он исправен.

Итак, для первоначального определения неисправности потребовались следующие этапы:

- проверка входов;
- проверка входного усилителя;
- проверка фильтров;
- проверка фильтра низких частот.

Так как ошибка была обнаружена на выходе фильтра низких частот, в качестве следующего шага необходимо проверить функционирование непосредственно самого фильтра (см. рис. 5.12). Проверка функционирования фильтра низких частот выполняется в соответствии с теми же правилами, что и проверка всей схемы. Для дальнейшего ограничения области неисправности необходимо проверить отдельные компоненты фильтра. При этом возможно два принципиально разных направления проверки: можно начать поиск неисправности с входа схемы, постепенно продвигаясь к выходу, либо наоборот — от выхода к входу. В нашем примере мы используем первый способ (рис. 5.15). Точка "3" — это вход схемы фильтра низких частот. Поэтому нет необходимости проводить повторное измерение в этой точке.

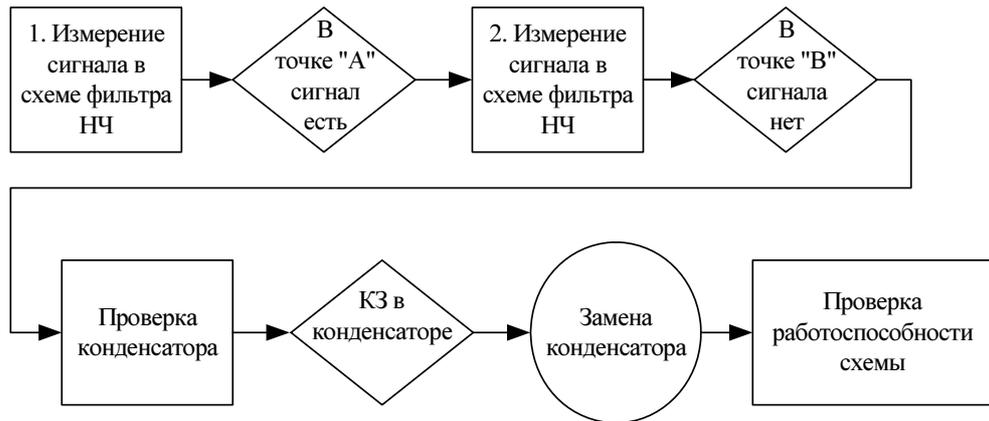


Рис. 5.15. Поиск ошибки в неисправной схеме

Следующее измерение проводится в точке "А". В результате измерений выясняется, что сигнал имеет явно ослабленную амплитуду. Поэтому выполняем измерение в точке "В". В этой точке сигнал имеет значительно меньшую амплитуду (буквально несколько милливольт). Это позволяет сделать вывод о том, что присутствует низкоомная утечка (замыкание) относительно "земли" (опорного потенциала).

В точке "В" находится конденсатор емкостью 10 нФ, соединенный с опорным потенциалом. Анализ схемы на этом участке приводит к выводу, что данный конденсатор возможно и является источником неисправности. Конденсатор вероятно имеет короткое замыкание. Это можно определить с помощью измерения сопротивления. Для этого схема отключается от напряжения питания, конденсатор с одной стороны выпаявается и его сопротивление проверяется с помощью измерительного прибора. При этом подтверждается наличие в нем короткого замыкания.

После замены конденсатора необходимо перепроверить функционирование фильтра низких частот и расположенного после него мостового усилителя. Подобный контроль имеет важное значение в таких случаях, когда (как в нашем примере) причина неисправности конденсатора осталась неизвестной.

Не забывайте про так называемый тест "на ход ноги"! Это заключительный контроль функционирования всего устройства в целом, а также проверка всех соединений. Этот контроль очень важен, особенно при выездном ремонте. Выполнение подобного контроля гарантирует, что все изменения, внесенные в устройство в процессе ремонта, устранены.

Еще раз перечислим все этапы методического поиска ошибки, которые для данной неисправности образуют следующую последовательность действий:

Проверка входов	Результат: функционирование в норме
Проверка входного усилителя	Результат: функционирование в норме
Проверка фильтров	Результат: функционирование в норме
Проверка фильтра низких частот	Результат: не функционирует
Первое измерение в схеме	Результат: измеренное значение в норме
Второе измерение в схеме	Результат: измеренное значение не соответствует норме
Проверка конденсатора	Результат: конденсатор неисправен
Замена конденсатора	Результат: функционирование в норме

Предложенный алгоритм соответствует систематизированной локализации области ошибки, характерной для эффективного и последовательного поиска неисправностей в электронных схемах.

На рис. 5.16 этот алгоритм еще раз представлен графически. Начинаем с достаточно грубого предварительного ограничения зоны ошибки (внешний круг), постепенно с каждым кругом сужая область поиска, что в конечном счете приводит к устранению неисправности.

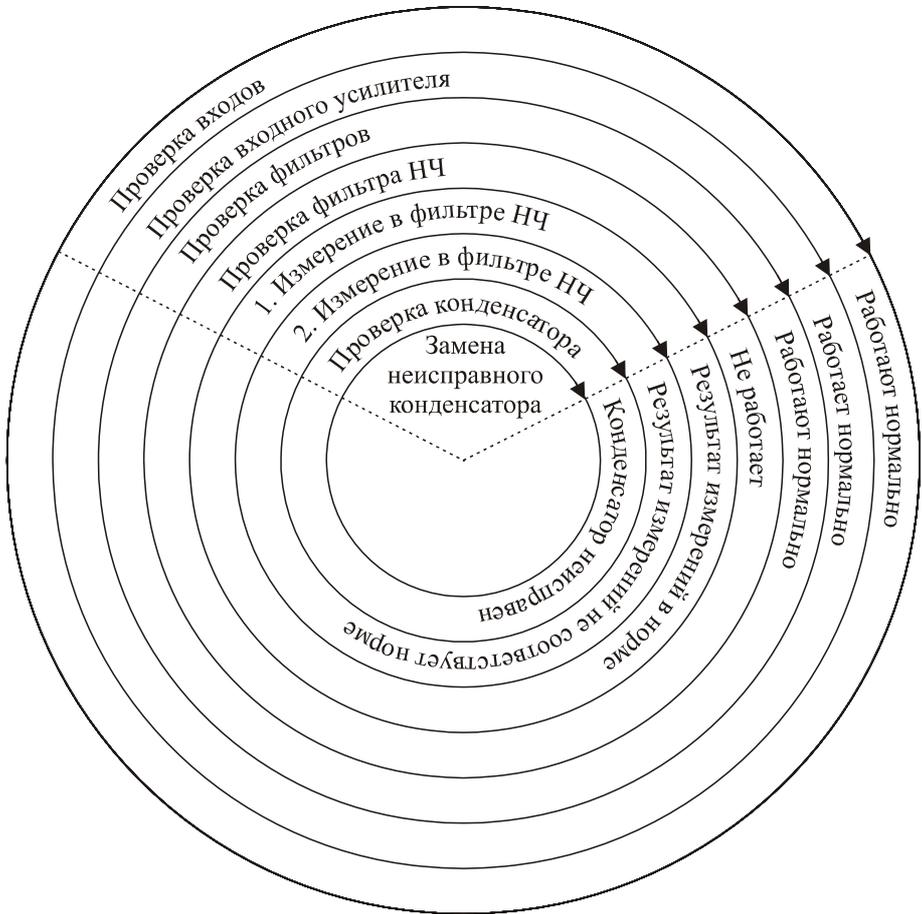


Рис. 5.16. Графическое представление систематического ограничения зоны неисправности

Этот пример демонстрирует выполнение универсального систематизированного поиска ошибки по жесткому алгоритму, который не учитывает никакие личные знания и опыт специалиста по ремонту устройств такого типа.

Однако более эффективный и успешный поиск неисправностей будет в том случае, когда специалист добавляет к этому процессу собственный опыт и знание подобных устройств. Если, например, специалисту по обслуживанию из собственного опыта известно, что усилитель мощности часто является источником неисправности, он, возможно, выполнит его проверку в качестве второго мероприятия по локализации неисправности (рис. 5.17), тем самым изменив последовательность действий. Если эта проверка не приводит к выявлению неисправности, то дальше последовательность действий выполняется в строгом соответствии со схемой.



Рис. 5.17

В отличие от этого, последовательность выполнения проверки блоков усилителя или каскадов усилителя может выполняться как от начала к концу, так и наоборот от последнего каскада или узла к первому (рис. 5.18). Иногда обратная последовательность быстрее приводит к результату, т. к. из практики известно, что каскады усилителя с наибольшим потреблением мощности, в частности предоконечные каскады и последние каскады, выходят из строя чаще всего.

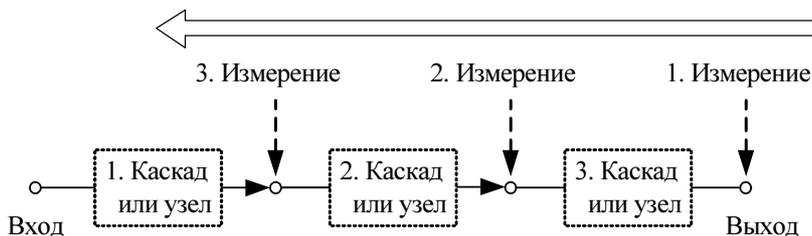


Рис. 5.18

В заключение хотелось бы еще раз указать самые важные правила, которых нужно придерживаться при систематизированном поиске неисправностей:

- ❑ в неисправных устройствах и схемах выделяйте функциональные единицы (используйте блок-схему) и проверяйте их с использованием последовательного деления на две части;
- ❑ в функциональных последовательностях, зависящих от нескольких ветвей прохождения сигнала, точки разветвления и объединения проверяйте преимущественно с учетом принципа деления на две части;
- ❑ в первую очередь проверяйте напряжение питания, если эту неисправность нельзя окончательно исключить в ходе других проверок функционирования;

- к проверке приобщайте производственные схемы, схемы вентиляции и системы охлаждения.

## 5.4. Поиск неисправностей в схемах управления и регулировки

### Электропривод трехфазного тока

В станках с ЧПУ и блоках позиционирования часто используются электроприводы трехфазного тока. Система управления электроприводом является полностью электронной и поэтому не нуждается в значительном техническом обслуживании. Все же имеется несколько элементов настройки, которые оказывают на процесс функционирования, прежде всего на регулировочные характеристики, существенное влияние. Принцип функционирования регулятора скорости вращения и угла поворота двигателя представлен на рис. 5.19.

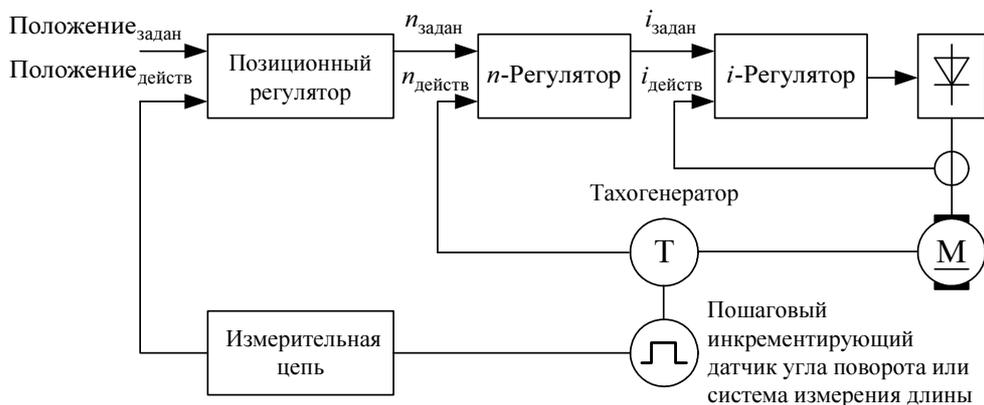


Рис. 5.19. Блок-схема регулятора скорости вращения и угла поворота двигателя

Управление мощностью серводвигателя осуществляется посредством  $i$ -регулятора и подключенного за ним вентильного преобразователя. В вентильном преобразователе используются исключительно бесконтактные неподверженные износу полупроводниковые элементы. При этом нужно различать вентили и выключатели. В вентильных преобразователях используются диоды. Они открываются при положительном напряжении и запираются при нулевом токе. В отличие от вентильного выключателя может быть, по желанию, разомкнут или замкнут. Поэтому в качестве выключателей используются запираемые тиристоры или силовые транзисторы. На рис. 5.20 представлена схема *вентильного преобразователя частоты* для двигателя подающего механизма. Выпрямитель вы-

полнен в виде моста трехфазного тока. Инвертор состоит из мостовой схемы силовых транзисторов с параллельно включенными защитными диодами.

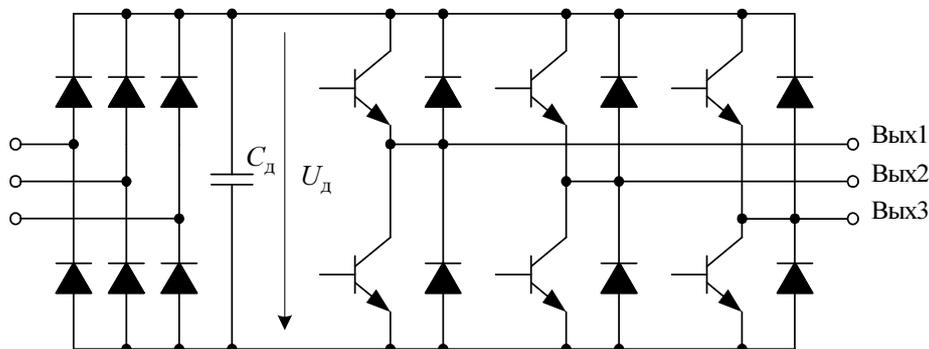


Рис. 5.20. Принципиальная схема вентильного преобразователя частоты для двигателя подающего механизма

Посредством  $i$ -регулятора выравниваются значительные колебания нагрузки. На валу привода используется тахогенератор постоянного тока, который через  $n$ -регулятор контролирует частоту вращения серводвигателя и поддерживает постоянным требуемое значение.

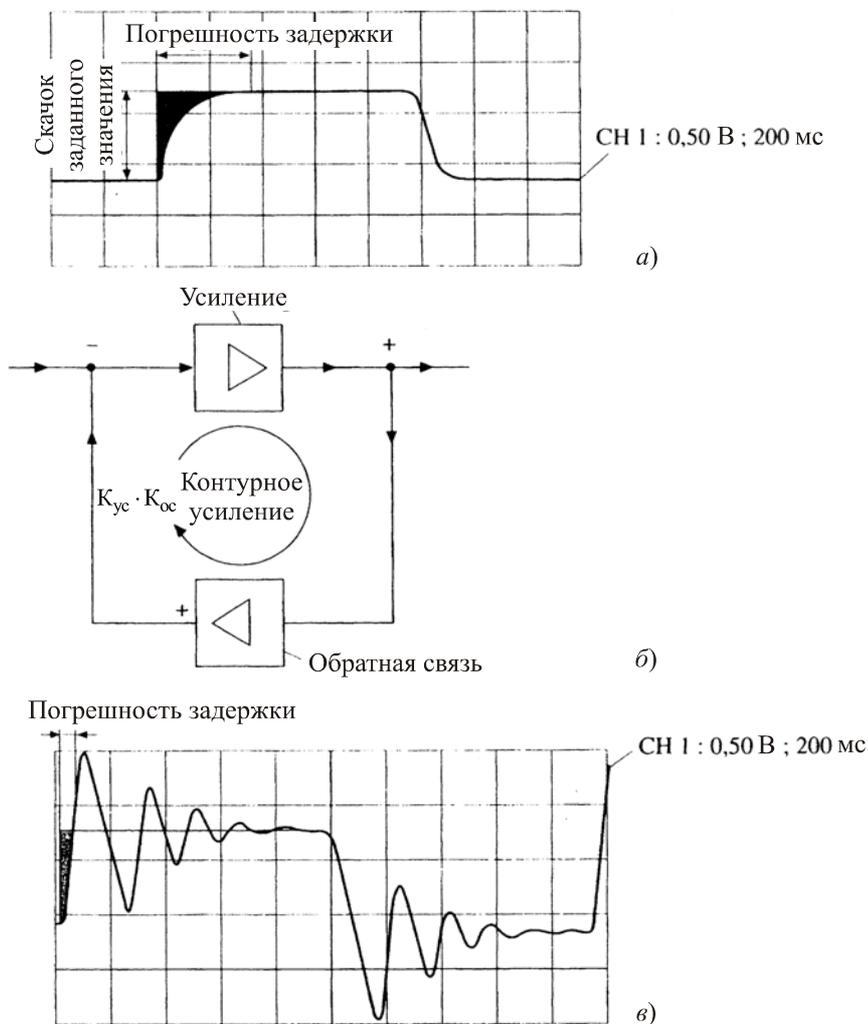
Угол поворота или позиция приводимой серводвигателем оси контролируется и управляется инкрементирующим датчиком или в случае использования каретки системой измерения длины. Двигатели трехфазного тока имеют блочно-модульную структуру, которая состоит из блока питания, приводного модуля и регулировочного модуля. Управление функциями регулирования и измерения, а также системой диагностики таких двигателей выполняется частично аппаратно или программно. Простые системы диагностики снабжаются светодиодными индикаторами. Состояние сигнала таких функций индикации оценивается либо непосредственно, либо посредством закодированных сообщений.

На вид характеристики регулирования частоты вращения можно влиять с помощью интегрального, дифференциального или пропорционального усилителя, а также посредством суммирующего усилителя.

Пропорциональный усилитель линейно усиливает разницу между заданным и действительным значением и преобразует ее. Вследствие этого такой усилитель пропорционально противодействует любому изменению частоты вращения. Коэффициент усиления определяет по сути *контурное усиление*.

*Погрешность задержки* определяет время, которое необходимо двигателю для того, чтобы достичь новой частоты вращения, при изменении заданного или действительного значения (рис. 5.21, а). Представляет собой отрезок

временной оси, на протяжении которого происходит достижение заданного значения.

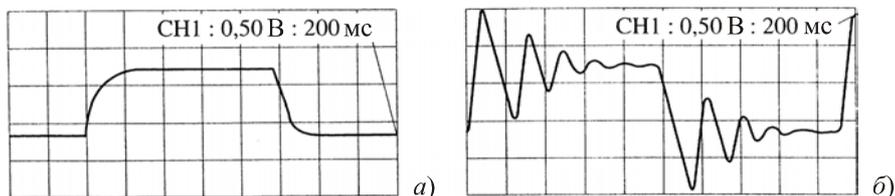


**Рис. 5.21.** Действие контурного усиления: контурное усиление мало — погрешность задержки большая (а); взаимосвязь усиления, обратной связи и контурного усиления (б); контурное усиление велико — погрешность задержки уменьшается, однако контур регулирования приводит к колебаниям (в)

Общее усиление в замкнутом контуре регулирования обозначается как контурное усиление —  $K_{конт}$  (рис. 5.21, б). Контурное усиление  $K_{конт}$  по существу определяет свойства регулирования. Слишком высокое контурное уси-

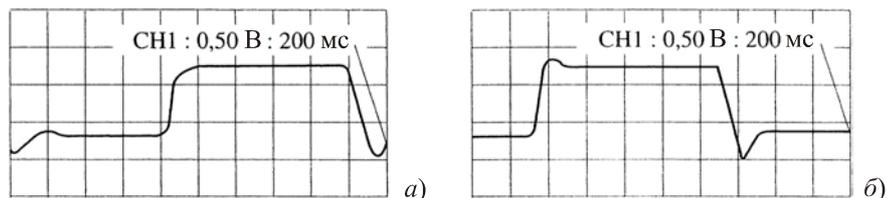
ление приводит к колебаниям (рис. 5.21, в). Критерий колебаний зависит от параметров обратной связи и величины усиления. При слишком низком контурном усилении действительная частота вращения слишком медленно приближается к заданной и наоборот ( $K_{\text{конт}} = K_{\text{yc}} \cdot K_{\text{oc}} > 1$ ). Поэтому контурное усиление обратно пропорционально погрешности задержки и должно быть оптимизировано таким образом, чтобы двигатель без колебаний частоты вращения как можно быстрее достигал заданной частоты оборотов.

При использовании интегрального усилителя выходной сигнал формируется через определенный промежуток времени как интеграл входного сигнала, что действует противоположно склонному к колебаниям пропорциональному усилению системы (двигатель, тахогенератор и усилитель) (рис. 5.22, а и 5.22, б).



**Рис. 5.22.** Влияние интегрального регулятора: высокая интегральная составляющая, погрешность задержки увеличивается (медленное достижение частоты вращения), а контурное усиление низкое (а); низкая интегральная составляющая, погрешность задержки, высокое контурное усиление, склонность к колебаниям (б)

Дифференциальный усилитель должен изменять выходной сигнал пропорционально крутизне сигнала тахометра. Поэтому действие такого усилителя проявляется сильнее при быстрых изменениях сигнала тахометра, чем при медленных (рис. 5.23, а и б).



**Рис. 5.23.** Влияние дифференциального регулятора: высокая дифференциальная составляющая, фронт в начале аппроксимации круче (а); низкая дифференциальная составляющая вызывает очень незначительное увеличение погрешности задержки

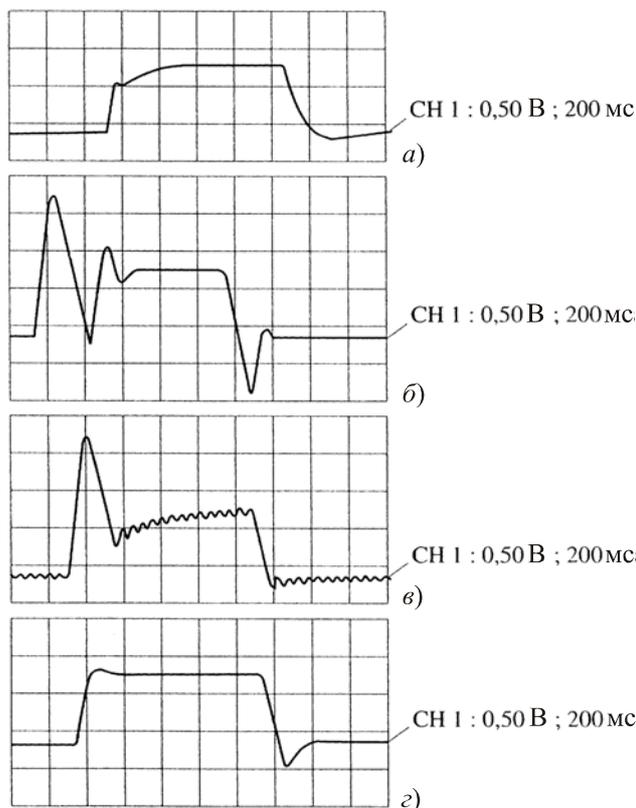
Регуляторы могут подключаться и отключаться по отдельности.

На рис. 5.24, а—в представлены критические возможности регулировки. На рис. 5.24, г показан оптимально возможный вариант настройки с помощью

пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора).

Эти примеры демонстрируют то, что ошибочное поведение ПИД-регулятора сказывается, прежде всего, на поведении двигателя в период разгона. Склонность к колебаниям выражается в быстром изменении частоты вращения и/или сильных вибрациях двигателя.

Неисправность вентиляционного преобразователя (силовой части) выражается в уменьшении мощности двигателя, а также в том, что двигатель не развивает необходимую частоту вращения.



**Рис. 5.24.** Влияние ПИД-регулятора: интегрально-дифференциальная составляющая увеличивается, в результате приближение характеристики к заданной сначала быстрое, потом медленное (а); увеличение ПИД-суммы, характеристика всего контура регулирования становится слишком крутой и вместе с тем слишком быстрой (б); завышенная пропорциональная составляющая приводит к сверхпропорциональной реакции на скачок заданного значения (в); оптимизированное ПИД-регулирование, при котором характеристика следует за скачком заданного значения; выброс на характеристике на ее спаде невозможно предотвратить без специальной тормозной системы (г)

## Стабилизатор напряжения

Прежде чем использовать нестабилизированное постоянное напряжение, полученное посредством выпрямления сетевого напряжения, в качестве напряжения питания, его необходимо стабилизировать, т. е. поддерживать его величину постоянной с помощью электронной схемы регулирования — *стабилизатора напряжения*. Пример схемы стабилизатора представлен рис. 5.25.

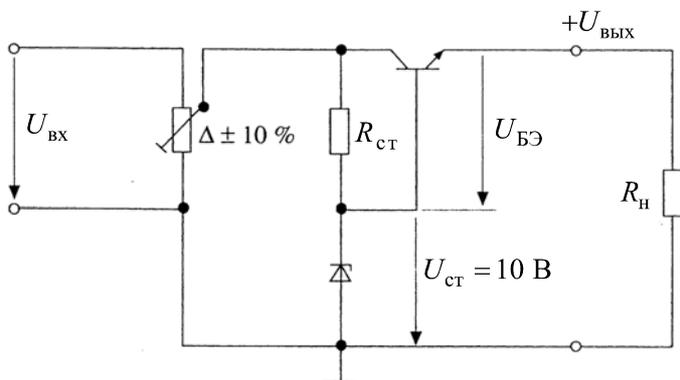


Рис. 5.25. Напряжения при последовательной стабилизации

Цепь коллектор-эмиттер транзистора включена в цепь нагрузки в качестве переменного сопротивления. Напряжение базы транзистора, благодаря стабилитрону, остается постоянным вне зависимости от изменения величины напряжения или нагрузки. Если управлять транзистором путем изменения эмиттерного напряжения на сопротивлении нагрузки, это в свою очередь вызовет изменение напряжения база-эмиттер  $U_{БЭ}$ . По этому принципу функционируют все электронные схемы стабилизации напряжения.

При поиске неисправности в такой схеме для имитации изменения сетевого напряжения можно применять регулирующий трансформатор на входе сети либо силовое сопротивление на входе схемы стабилизатора напряжения. Благодаря этому можно изменять входное напряжение в диапазоне  $\pm 10\%$ .

Благодаря регулированию входного напряжения  $U_{ВХ}$  можно определить, при каких значениях напряжение на выходе  $U_{ВЫХ}$  еще поддается стабилизации.

Если выходное напряжение изменяется вместе с изменением входного напряжения в диапазоне  $\pm 10\%$ , значит схема неисправна.

При поиске неисправности исходят из того, что схема выпрямителя на входе, а также нагрузка в виде выходного сопротивления на выходе исправны.

Если было установлено, что напряжение на выходе нестабильно, далее необходимо проверить опорное напряжение  $U_{СТ}$ . Это напряжение, в нашем случае

$U_{ст} = +10$  В, также не может изменяться пропорционально напряжению на входе. Однако в любом случае нельзя говорить о том, что это напряжение будет абсолютно стабильно.

Под влиянием изменения внутреннего сопротивления стабилитрона напряжение на стабилитроне также изменяется в пределах милливольт. Однако опорное напряжение никак не может изменяться пропорционально, например, в пределах 10%.

Если опорное напряжение изменяется пропорционально входному напряжению, это будет причиной такого же пропорционального изменения напряжения на выходе. Далее необходимо проверить, какова величина тока  $I_{ст}$ , протекающего через стабилитрон при изменении на  $-10\%$  входного напряжения, будет ли в этом случае ток выше значения  $I_{ст\ мин}$ .

Прежде чем производить измерение тока, необходимо для начала проверить функционирование силового транзистора. Слишком низкий ток  $I_{ст}$  может быть следствием короткого замыкания в переходе база-эмиттер силового транзистора.

После измерения опорного напряжения выполняется проверка напряжения на выходе. Выводы базы и эмиттера накоротко замыкаются с помощью какого-либо инструмента (острые щипцы, пинцет, проволока), после чего контролируется выходное напряжение.

В результате короткого замыкания ток эмиттерного перехода равен нулю. Транзистор заперт ( $I_K = 0$ ). Выходное напряжение  $+U_{вых}$  на сопротивлении нагрузки  $R_n$ , которое по сути для транзистора является эмиттерным сопротивлением, должно при этом уменьшаться. Если так и происходит, в качестве причины неисправности схемы остается принимать в расчет только рабочее сопротивление  $R_{ст}$  стабилитрона.

Уже проверка стабильности выходного напряжения  $U_{вых}$  может указать на тот или иной источник неисправности в зависимости от величины измеренного напряжения.

Если величина напряжения  $U_{пит}$  нестабильна и выше номинального значения, то в большинстве случаев это указывает на то, что стабилитрон находится вне диапазона регулирования. Хотя причиной может быть и короткое замыкание между коллектором и эмиттером.

Если нестабильное напряжение на выходе  $U_{пит}$  ниже номинального (минимум  $+9,2$  В), транзистор заперт. Причины этого могут быть разные. Возможно короткое замыкание между базой и эмиттером или внутренний обрыв между коллектором и эмиттером.

Если выходное напряжение  $U_{пит}$  ниже опорного на  $0,6—0,8$  В, транзистор не рассматривается как потенциальный источник неисправности. Это соответствует обратному напряжению между базой и эмиттером.

В интегрированных электронных схемах стабилизации для повышения степени стабилизации используется одно- или многоступенчатый регулирующий усилитель между опорным напряжением и регулирующим (силовым) транзистором.

## 5.5. Поиск неисправностей в колебательных схемах

В отличие от схем с отрицательной обратной связью, в которых выходной сигнал возвращается на вход с обратной полярностью, в колебательных схемах выходной сигнал возвращается на вход с той же полярностью (саморегулирование или самовозбуждение усилителя).

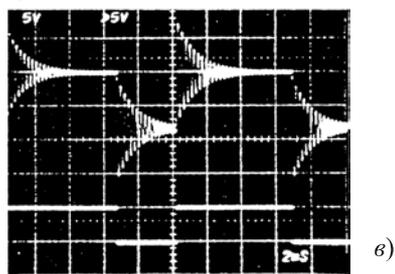
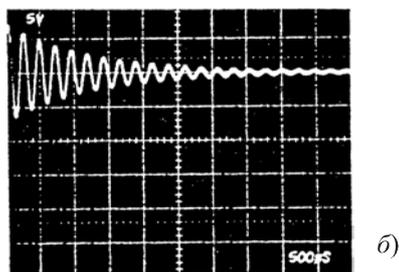
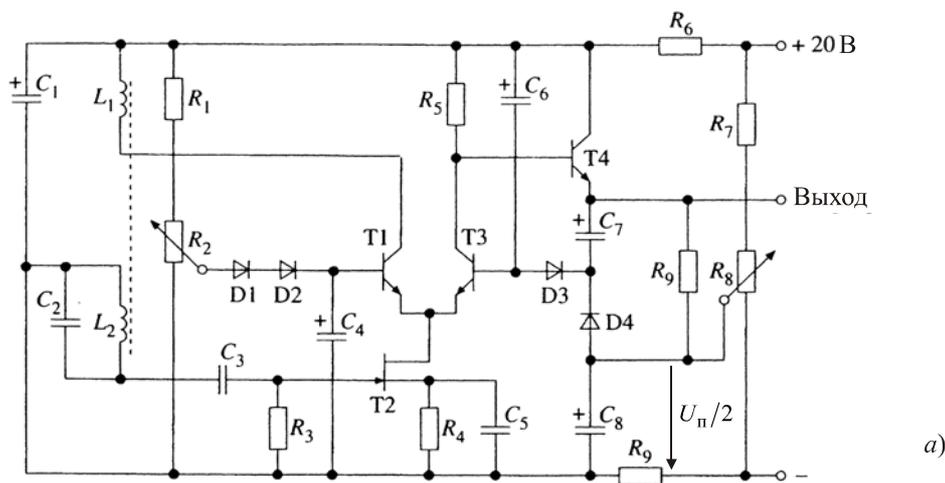
Приступая к поиску неисправности в колебательной схеме, необходимо определить, о какой именно схеме идет речь: будь то индуктивная или емкостная положительная обратная связь, либо это положительная обратная связь по постоянному напряжению. В первых двух случаях положительная обратная связь не оказывает влияния на рабочую точку и может не приниматься в расчет при поиске неисправности в усилителе при полном его отказе (отсутствие колебаний). Только в последнем случае неисправность положительной обратной связи (замкнутый контур регулирования) влечет за собой изменение потенциала, что отражается на функционировании схемы. Эту особенность необходимо учитывать при поиске неисправности так же, как и в усилителях с отрицательной обратной связью. В остальном поиск неисправности ведется подобно поиску неисправности в одно- или многокаскадном усилителе.

Практика свидетельствует о том, что причиной неисправности в колебательных схемах в большинстве случаев является неисправность усилителя и только изредка причину неисправности нужно искать в цепи положительной обратной связи.

Это утверждение справедливо для всех существующих типов колебательных схем, за исключением генераторов с кварцевой стабилизацией. В таких схемах причиной неисправности очень часто является *кварцевый резонатор*, который может выйти из строя из-за недостаточной прочности соединения или в связи со старением (эксплуатационными характеристиками) кварца.

### LC-генератор синусоидальных колебаний

Представленная на рис. 5.26 схема генератора работает совместно со стабилизатором напряжения. При этом получают синусоидальное напряжение с очень незначительными искажениями (коэффициент нелинейных искажений, КНИ) и регулированием амплитуды с погрешностью <math><1\%</math> при отношении настройки 3,5.



**Рис. 5.26.** LC-генератор синусоидальных колебаний: схема (а); затухающие колебания из-за ошибки усиления (коэффициент усиления  $K_{yc}$  слишком мал) (б); перегруженный усилитель (коэффициент усиления  $K_{yc}$  слишком высок) (в)

Благодаря полевому транзистору Т2 нет необходимости в трехточечной схеме с ответвлением обмотки, достаточно простой положительной обратной связи.

Колебания, созданные и усиленные транзисторами Т1 и Т2, через катушку индуктивности  $L_1$  (индуктивная связь) возвращаются на параллельный колебательный контур  $L_2C_2$ .

Регулирование колебаний производится разделением тока через транзисторы Т2 и Т3.

При включении конденсатор  $C_6$  разряжен, поэтому возникает ток базы транзистора Т3. Вследствие этого данный транзистор является токопроводящим, так что в транзисторах Т2 и Т3 возникает ток стока.

Во время зарядки конденсатора  $C_6$  через транзистор Т1 и катушку  $L_1$  возникает также коллекторный ток, который позволяет начать колебания. В результате на резисторе  $R_5$  возникает переменное напряжение, которое через транзистор Т4 и конденсатор  $C_7$  попадает на диоды D3 и D4. Это переменное напряжение выпрямляется диодами и сглаживается с помощью конденсатора  $C_6$ . Образующееся при этом положительное постоянное напряжение на базе транзистора Т3 позволяет току транзистора подняться еще выше, так что напряжение на резисторе  $R_5$  еще возрастает. Это влечет за собой дальнейшее повышение одинаково направленного напряжения. В транзисторах Т3 и Т4 начинает действовать эффект обратной связи, который, однако, ограничивается полевым транзистором Т2. В транзисторе Т1 и катушке  $L_1$  ток колебаний увеличивается до такого уровня, что колебания становятся стабильными. Диоды D1 и D2 выполняют роль стабилизаторов рабочей точки, не зависящей от температуры, т. е. поддерживают ее на постоянном уровне. С помощью потенциометра  $R_2$  можно устанавливать напряжение на выходе. Регулирующий усилитель находится в равновесии, когда постоянное напряжение на базе транзистора Т1 равно напряжению на базе транзистора Т3.

Нормальное функционирование соответствует переменному напряжению 100 мВ, измеренному на катушке  $L_1$ , и напряжению 300 мВ на коллекторе транзистора Т3. На эмиттере транзистора Т4 выходное напряжение должно быть в пределах 1 В.

Все указанные переменные напряжения — это фактические значения. При измерении с помощью осциллографа значения напряжений должны делиться на коэффициент 2,8.

Поиск неисправности в таком генераторе, состоящем из двух контуров связи (контур обратной связи Т2, Т1,  $L_1$  и  $L_2$  и контур регулирования Т3, Т4,  $C_7$  и D3) сложнее, чем в генераторе с одной обратной связью.

Все же и здесь можно быстро достигнуть конкретных результатов, принимая во внимание особенности функционирования данной схемы. Если генератор не создает колебаний, то можно исходить из того, что неисправен какой-то полупроводниковый элемент: диод или транзистор. Предполагается, что рабочие точки настроены правильно.

Как и для всех транзисторных схем, для этой схемы также целесообразно для начала посредством измерения постоянного напряжения проверить рабочие точки транзисторов. Схема с транзисторами T1, T2 и T3 представляет собой каскад дифференциального усилителя, в котором используется полевой транзистор в качестве общего "динамического сопротивления", выполняющего функцию источника постоянного тока.

Если можно установить одинаковыми напряжения баз транзисторов T1 и T3 на резисторе R<sub>2</sub>, то можно исходить из того, что дифференциальный усилитель функционирует. Самого точного выравнивания достигают, если измерительные линии свободного от потенциала и высокоомного прибора для измерения напряжения (цифрового вольтметра) напрямую соединить с обоими выводами баз и потом установить разность напряжений на нуль.

Если этого достигнуть не удастся, то необходимо проверить, составляет ли напряжение на диоде D4 примерно +10 В, соответственно  $U_{\pi} / 2$ . Если нет, то необходимо отрегулировать это напряжение резистором R8.

Если генератор не создает колебаний, то транзистор T2 почти заперт. Это не позволяет сделать вывод о причине неисправности.

Управляющее воздействие полевого транзистора T2 можно проверить посредством короткого замыкания выводов затвора и стока.

В случае короткого замыкания полевой транзистор (*n*-канальный) проводит ток. Измеренное при этом постоянное напряжение на эмиттерах транзисторов T1 и T3 должно становиться ниже.

Если в результате таких проверок причина неисправности не обнаружена, то далее проверяется функционирование схемы регулирования на транзисторах T3, T4 и диодах D3, D4.

Транзистор T4 работает совместно с эмиттерным сопротивлением R<sub>9</sub> и делителем резистора R<sub>8</sub>, как эмиттерный повторитель. Функционирование этого транзистора можно быстро проверить, измерив напряжение эмиттерного перехода. Если разность напряжений составляет около 0,5 В, то причиной неисправности могут быть только конденсаторы C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, C<sub>8</sub> и диоды D3 и D4.

Например, обратное напряжение, измеренное на диоде D4, должно составлять  $U_{\pi} / 2$ . Падение напряжения  $U_{D3}$  на проводящем ток диоде D3 будет очень мало, максимум 0,1—0,3 В, т. к. благодаря незначительному току базы транзистора T3 практически не возникает никакого обратного напряжения. Короткое замыкание диода D4 в расчет уже не принимается, поскольку эта неисправность обратила бы на себя внимание уже при проверке каскадов на транзисторах T1—T3.

Выравнивание напряжения покоя на резисторе R2 в таком случае больше не было бы возможным. Если бы в диоде присутствовал внутренний обрыв, то

измерение обратного напряжения не позволило бы обнаружить это, т. к. в таком случае оно не изменилось бы. Однако в этом случае не формировалась бы отрицательная полуволна синусоидального колебания, поэтому конденсатор  $C_7$  не мог бы заряжаться. Таким образом, на катоде диода D3 не могло бы возникать никакого выпрямленного регулирующего напряжения. К таким же последствиям привел бы замкнутый накоротко или имеющий внутренний обрыв диод D3.

Если генератор выдает колебания и нужно установить лишь причину недостаточной стабилизации амплитуды, в таком случае возможны следующие неисправности.

Если каскады на транзисторах T1 и T3 в связи с изменением их характеристик или колебаниями температур проводят неодинаковые коллекторные токи, которые возникают на основе изменений рабочей точки, необходимо выполнить выравнивание напряжений с помощью резистора  $R_2$ . Если же выравнивание выполнить не удастся, то возможно придется заменить оба транзистора.

Изменение пороговых напряжений диодов D3 и D4 в связи с изменением их характеристик. В таком случае требуется замена диодов.

Ток утечки конденсатора  $C_6$  в связи с изменением его характеристик может увеличиться. В результате часть тока регулирования будет утекать через конденсатор, вместо того чтобы использоваться при управлении базой транзистора T3. В таком случае необходимо заменить конденсатор, чтобы не допустить снижения регулирующего воздействия.

## Мостовой RC-генератор

При поиске неисправности в генераторах с резистивно-емкостной обратной связью (рис. 5.27) можно исходить из следующего.

Частотно-зависимая обратная связь является преимущественно емкостной, это означает, что на вход будет подаваться только переменное напряжение с выхода двухкаскадной схемы усилителя.

Отрицательные обратные связи для стабилизации рабочих точек, соответственно *амплитудно-частотных характеристик* (АЧХ), действуют на всем диапазоне частот (типично для схем усилителей) и могут быть как отрицательными обратными связями по постоянному напряжению (оказывают влияние на рабочие точки и АЧХ), так и емкостными (только на АЧХ).

Таким образом, для поиска неисправности будут справедливы рассуждения, характерные для усилителей. При поиске неисправности в генераторе также в первую очередь концентрируем внимание на функционировании отдельных

каскадов усилителя, поэтому частотно-зависимую обратную связь можно исключить из рассмотрения, т. к. она не оказывает влияния на рабочую точку усилителя.

Вероятность того, что пробитый конденсатор мог бы послужить причиной неисправности и оказать влияние на рабочую точку усилителя, очень мала. В мостовой схеме, представленной на рис. 5.27, а, это могли бы быть конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ . Конденсатор  $C_1$  при коротком замыкании возвращал бы выходное постоянное напряжение транзистора Т2 на вход транзистора Т1. Усилительный каскад на транзисторе Т1 в таком случае был бы перегружен, вследствие этого транзистор Т2 был бы заперт. Короткое замыкание в конденсаторе  $C_2$  привело бы к запиранию каскада на транзисторе Т1. Как следствие, каскад на транзисторе Т2 был бы перегружен.

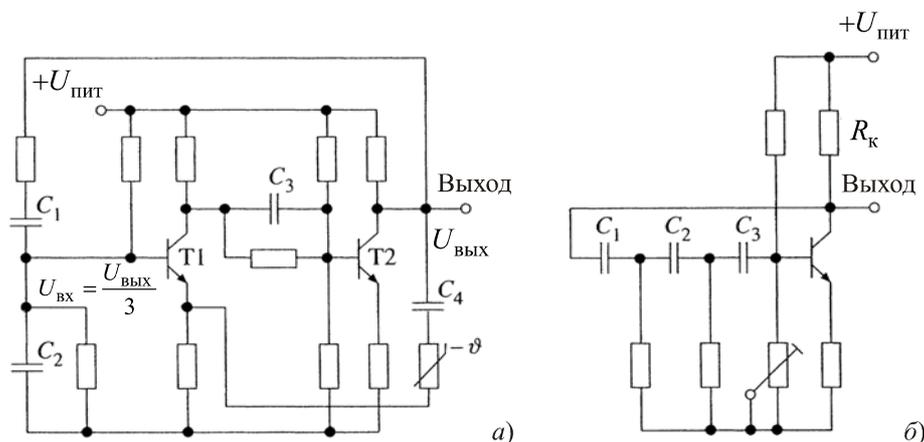


Рис. 5.27. RC-генераторы: мостовая схема Вина (а); с фазовращающей цепью (б)

Замкнутый накоротко конденсатор на схеме рис. 5.27, б не повлиял бы на рабочую точку каскада усилителя. Для этого должны были бы быть пробиты все три конденсатора. Кроме того, эта причина неисправности обратила бы на себя внимание и при проверке функционирования каскадов усилителя.

Необходимо обратить принципиальное внимание на то, что в мостовой схеме, представленной на рис. 5.27, а, обратная связь должна возвращать выходной сигнал с той же полярностью, что и входной сигнал RC-цепи. Поэтому в таких схемах выход обратной связи всегда следует после четного количества каскадов (2, 4, 6...). В схеме на рис. 5.27, б выходной сигнал должен вернуться на вход RC-цепи с противоположной полярностью, т. к. RC-цепь создает сдвиг фаз  $180^\circ$ . В таком случае обратная связь всегда используется с нечетным количеством каскадов (1, 3, 5...).

## Функциональный преобразователь

Принципиальная схема функциональных преобразователей стандартизована и включает в себя как минимум *интегратор* (рис. 5.28), электронный выключатель (триггер Шмитта для придания выходному сигналу прямоугольной формы), треугольно-синусоидальную цепь преобразования и выходной усилитель.

Замкнутый контур положительной обратной связи существует только между интегратором и электронным выключателем. Поэтому обе эти схемы могут образовывать один функциональный преобразователь автоколебаний.

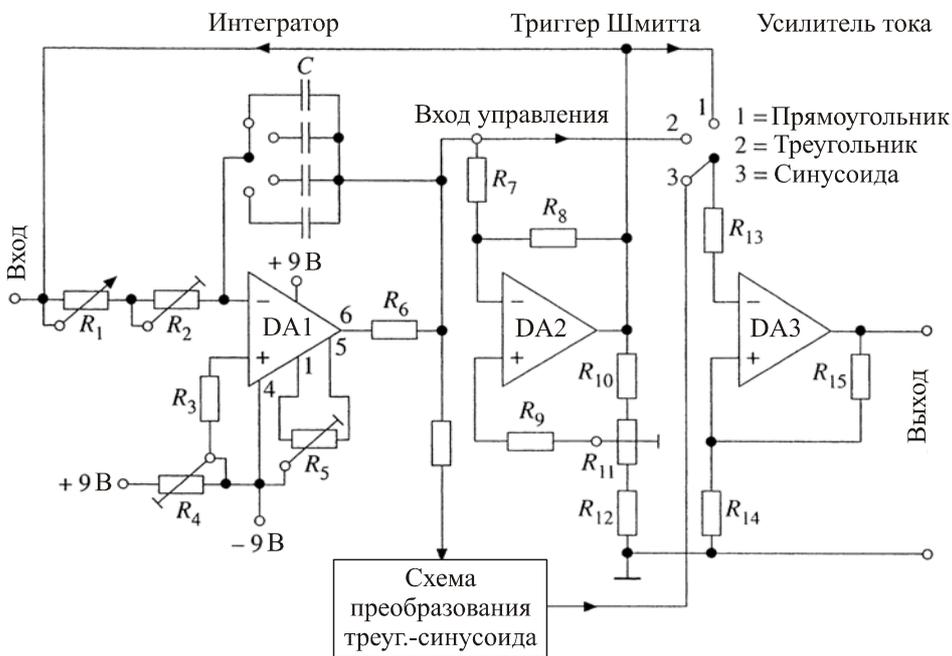


Рис. 5.28. Функциональный преобразователь

Приведу краткое описание функционирования отдельных частей преобразователя.

Интегрирующее звено интегратора DA1 образуется переключаемыми конденсаторами  $C$  и сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , с помощью которых можно устанавливать время интегрирования (постоянная по времени  $\tau = R \cdot C$ ).

В соответствии с функционированием интегрирующего звена конденсаторы с установленной постоянной времени заряжаются за счет напряжения на входе, которое имеет прямоугольную форму благодаря триггеру Шмитта.

Поскольку триггер Шмитта в качестве электронного выключателя может иметь на выходе как положительное, так и отрицательное напряжение питания операционного усилителя, конденсаторы интегрирующего звена максимально могут заряжаться до этих значений. Точное значение зависит от порога срабатывания триггера Шмитта, который устанавливается резистором  $R_{11}$ . Триггер Шмитта переключается, когда напряжение на выходе интегратора превосходит положительный или отрицательный порог срабатывания.

Возникающие при этом положительный и отрицательный синхронизирующие фронты возвращаются через обратную связь на вход интегратора.

Операционный усилитель DA1 интегратора в процессе зарядки конденсаторов выполняет роль источника постоянного тока, вследствие чего процесс зарядки конденсаторов происходит линейно как в положительном, так и в отрицательном направлении. Треугольно-синусоидальная цепь преобразования питается от треугольного напряжения интегратора.

Допустим, неисправность связана с выходным напряжением в позиции 3 (синусоида) переключателя функций. Причина неисправности в таком случае может быть связана с интегратором и триггером Шмитта, а также с треугольно-синусоидальной цепью преобразования.

Чтобы установить причину неисправности, для начала необходимо попытаться ограничить область неисправности посредством внешних функциональных характеристик. Если в позиции 2 переключателя функций на выходе с помощью осциллографа просматривается треугольный сигнал, значит неисправна треугольно-синусоидальная цепь преобразования. Усилитель тока DA3 в таком случае не является причиной неисправности.

Если треугольный сигнал отсутствует, то неисправность связана с интегратором, триггером Шмитта или усилителем тока DA3.

В таком случае следующее измерение необходимо выполнить на выходе интегратора или триггера Шмитта.

Если и здесь сигнал не фиксируется, то это значит, усилитель тока не является причиной неисправности.

В таком случае в качестве возможной причины неисправности остается рассмотреть только интегратор и триггер Шмитта. Так как в процессе функционирования они зависят друг от друга, необходимо смоделировать управляющую функцию для каждого из этих компонентов.

Для этого триггер Шмитта запускается с помощью любого внешнего переменного напряжения (без участия постоянного напряжения), поданного на вход управления (верхняя по схеме точка резистора  $R_7$ ). Триггер Шмитта должен выдавать на выходе прямоугольный сигнал.

Если на выходе триггера Шмитта отсутствует прямоугольный сигнал напряжения, то значит триггер Шмитта неисправен. В противном случае неисправен интегратор.

Неисправность в треугольно-синусоидальной цепи преобразования, как правило, выражается в том, что треугольный и прямоугольный сигналы присутствуют, а синусоидальная составляющая отсутствует или сильно искажена.

Цепь по существу состоит из двух источников постоянного тока с противоположной полярностью для напряжения смещения диодно-резисторной матрицы. Если в одном из источников постоянного тока имеется короткое замыкание, то синусоидальная функция полностью отсутствует. Вследствие этого диодно-резисторная матрица оказывается замкнутой накоротко.

Изменение величины сопротивлений или отклонения в функционировании диодов влечет за собой искажение синусоидального напряжения. Это также касается случая, когда происходит изменение напряжений источников постоянного тока или их внутреннего сопротивления.

## 5.6. Поиск неисправностей в операционных усилителях

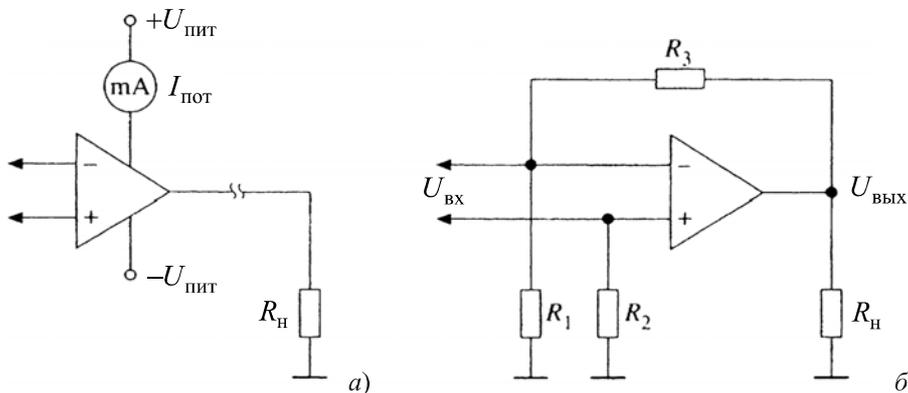
Интегрированные усилители, в частности операционный усилитель (ОУ), находят применение во многих электронных устройствах. Что касается так называемых гибридных схем (включающих в себя как дискретные, так и интегрированные полупроводниковые элементы), прежде всего в таких схемах требуется безупречное определение причины неисправности посредством измеренных характеристик.

Если транзистор с тремя выводами еще можно выпаивать без значительного повреждения печатной платы, то для элемента с 8 выводами и более это вряд ли возможно.

Лишь небольшую часть характеристик операционного усилителя можно определить с помощью измерений непосредственно на схеме.

Это номинальный потребляемый ток, коэффициент усиления по напряжению, напряжение смещения  $U_{см}$  и пределы изменения выходного напряжения.

*Номинальный потребляемый ток* должен измеряться без нагрузки на выходе. Целесообразно измерять его в положительном подводе напряжения питания (рис. 5.29, а). Потребляемый ток должен в таком случае находиться в пределах 1,5—2,5 мА. Коэффициент усиления по напряжению определяется исходя из величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_3$  (рис. 5.29, б). Он определяется отношением  $U_{вх}$  к  $U_{вых}$  и должен совпадать с величиной отношения сопротивлений.



**Рис. 5.29.** Проверка операционного усилителя: измерение номинального потребляемого тока (выход не нагружен) (а); определение коэффициента усиления  $K_{ус}$  посредством делителя напряжения (б)

**Напряжение смещения  $U_{см}$**  — это такое напряжение между двумя клеммами на входе, при котором выходное напряжение будет равно нулю. Опорная точка — это инвертированный вход. Величина напряжения смещения в общем случае находится между 0 и  $\pm 10$  мВ. Если с помощью потенциометра, корректирующего нуль, установить выходное напряжение на нулевое значение, тогда напряжение смещения должно измеряться на входах усилителя.

Пределы изменения выходного напряжения также можно проверить с помощью потенциометра, корректирующего нуль.

Установив потенциометр в среднее положение, необходимо изменять выходное постоянное напряжение в сторону положительной и отрицательной полярности таким образом, чтобы достичь левого и правого предела потенциометра.

Если потенциалы постоянного напряжения операционного усилителя в порядке, только усиление слишком велико или слишком мало, тогда для проверки функционирования операционного усилителя необходимо применить следующую схему (рис. 5.30).

К резистору отрицательной обратной связи  $R_{ос}$  параллельно присоединяется добавочный резистор  $R_{доб}$  с равным по величине сопротивлением. Значение сопротивления отрицательной обратной связи вследствие этого делится пополам. В результате пополам делится и коэффициент усиления, так что и амплитуда на выходе должна уменьшиться примерно наполовину. Если так и происходит, то значит усилитель и обратная связь не являются причиной неисправности. В таком случае необходимо проверить амплитуду входного сигнала.

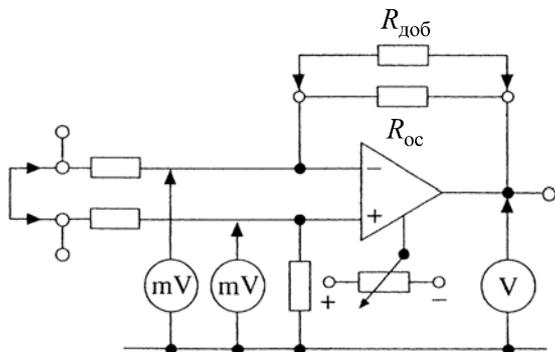


Рис. 5.30. Методы измерения и проверки операционного усилителя

Если сигнал на выходе слишком большой и присутствует ограничение перевозбуждения, а при параллельном подключении резистора  $R_{доб}$  перевозбуждение исчезает и усилитель возвращается к своему нормальному коэффициенту усиления, то в таком случае операционный усилитель в порядке, внутренний обрыв присутствует в резисторе отрицательной обратной связи  $R_{ос}$ .

Если амплитуда выходного сигнала занижена и при подключении резистора  $R_{доб}$  изменений не происходит, то в таком случае неисправен либо операционный усилитель, либо сопротивление отрицательной обратной связи слишком мало, либо величина сопротивления на входе слишком высока. В таком случае перед заменой операционного усилителя рекомендуется проверить величины этих двух сопротивлений.

Обрывы в выводах ОУ и короткое замыкание операционного усилителя сказываются на функционировании следующим образом.

Представленный на рис. 5.31, а обрыв инвертирующего входа приводит к разделению входного сигнала и отрицательной обратной связи. Операционный усилитель работает с максимальным усилением, благодаря чему действующие на вход помехи перегружают выход усилителя.

На рис. 5.31, б представлен обрыв перед точкой соединения отрицательной обратной связи с инвертирующим входом. Вследствие этого усиленный паразитный сигнал будет подаваться на вход без ослабления. Вследствие несимметричной нагрузки на входе также может встречаться перемещение напряжения смещения на выход.

Обрыв на выходе (рис. 5.31, в) перегружает операционный усилитель до ограничения. На выходе однако будет измерен только переданный через сопротивление обратной связи и уменьшенный входной сигнал.

Представленный на рис. 5.31, г обрыв отрицательной обратной связи увеличивает на выходе предел усиления холостого хода операционного усилителя,

вследствие чего выходной сигнал благодаря перегрузке полностью ограничен.

Замкнутые накоротко входы операционного усилителя (рис. 5.31, д) приводят к отсутствию сигнала на выходе.

Если выход связан с напряжением питания, то он принимает потенциал напряжения питания. На рис. 5.31, е выход замкнут накоротко с  $+U_{\text{п}}$ , в результате этот уровень был измерен на выходе. Также при коротком замыкании входов на напряжение питания на выходе благодаря усилению возникает сигнал, почти равный потенциалу напряжения питания.

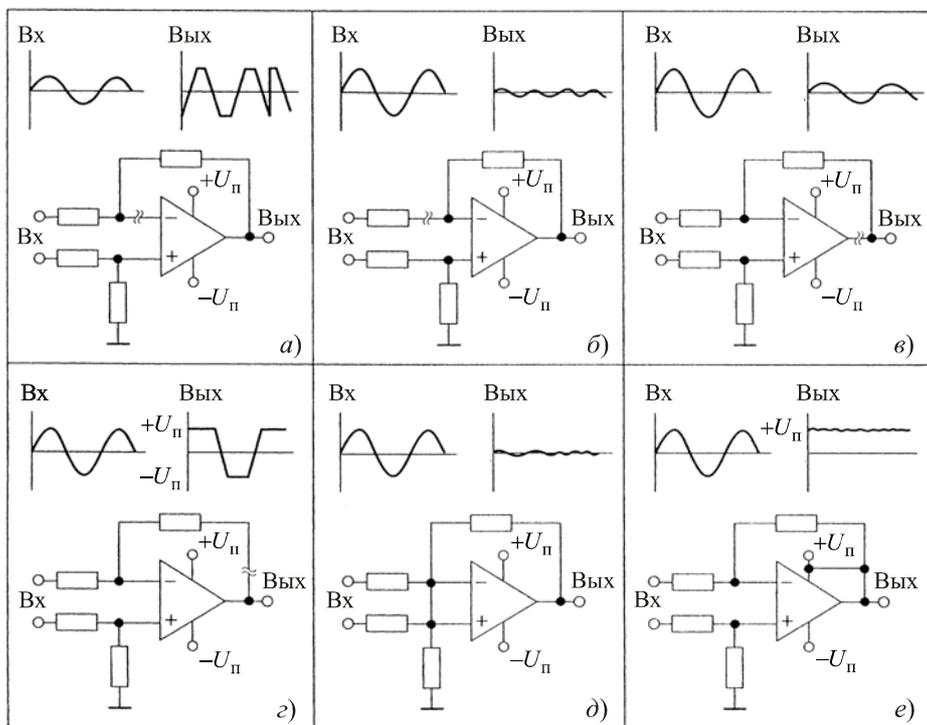


Рис. 5.31. Возможные неисправности операционного усилителя

По полярности измеренного напряжения нельзя сделать вывод о том, какой именно вход замкнут накоротко. Если, к примеру, накоротко замкнут инвертирующий вход с положительным напряжением питания, то на выходе может быть как положительное, так и отрицательное напряжение питания.

В случае интегрированного усилителя мощности звуковой частоты (УМЗЧ) для нахождения неисправности кроме измерения сопротивления на входах и выходах возможно проведение следующих проверок.

Если при наличии входного сигнала не фиксируется никакого выходного сигнала, то можно путем измерения потребляемого тока проверить, изменится ли он при изменении входного напряжения. При увеличении амплитуды входного сигнала потребляемый ток также должен увеличиваться. Если этого не происходит, то усилитель неисправен.

Короткие замыкания и обрывы на входах и выходах проявляются в виде отсутствия сигнала.

## Поиск неисправностей в предусилителях

Поиск неисправностей в предусилителях заключается в том, что на вход усилителя подается сигнал, наличие которого последовательно проверяется после каждого каскада при помощи осциллографа. Таким образом можно легко обнаружить неисправный элемент, который вызвал полный отказ устройства. Если неисправный каскад найден, то измеряется напряжение в статических рабочих точках (например, напряжение коллектор-эмиттер и напряжение база-эмиттер). В результате этих измерений в большинстве случаев возможно локализовать неисправный элемент.

Немного сложнее обнаружить неисправности, которые не приводят к полному отказу. Например, часто встречается такая неисправность, как спад усиления из-за емкостной утечки электролитических конденсаторов. В таком случае необходимо измерить усиление каждого каскада. Для этого измеряется переменное напряжение перед каскадом и после каскада, после чего вычисляется усиление. Очень полезно в этом случае использовать двухканальный осциллограф, т. к. необходимо наблюдать положение фаз и форму сигнала. Тем не менее можно использовать и осциллограф с одним лучом.

Еще одна относительно часто встречающаяся неисправность предусилителей с высоким усилением и слабой отрицательной обратной связью — это собственные колебания, или иначе *автоколебания*). Для операционных усилителей такая неисправность особенно актуальна. Автоколебания могут быть вызваны неправильно рассчитанной отрицательной обратной связью и емкостной нагрузкой на выходе (рис. 5.32).

Емкостная нагрузка препятствует достаточно быстрому повышению или снижению напряжения на выходе. Это ограничение скорости нарастания выходного напряжения приводит к формированию треугольного напряжения на выходе и может привести к нестабильности. Ограничение скорости нарастания выходного напряжения может встречаться и в самом усилителе, если не учитывать данные производителя ОУ относительно входного и выходного напряжений, не принимать во внимание частотную характеристику и усиление.



Рис. 5.32. Выходные сигналы неисправного операционного усилителя

Автоколебания можно определить при помощи осциллографа. Как правило, сигнал на выходе усилителя низкой частоты расширяется наложением высокочастотных колебаний и преобразуется в полосу (см. рис. 5.32). Это расширение может быть длительным либо встречаться только на определенных участках выходного сигнала, например, при прохождении нуля или в максимуме синусоидальных колебаний.

## Оконечный усилитель

Отличие выходных, или иначе оконечных, усилителей от предусилителей заключается в том, что их выходное переменное напряжение при высоких токах и, следовательно, высоких мощностях (усиление по мощности) имеет величину прикладываемого напряжения питания, в то время как в предусилителях на передний план выходит усиление слабых сигналов (усиление по напряжению). По этой причине рабочие точки последнего силового каскада должны многократно регулироваться, чтобы достигнуть максимума линейности сигнала.

На рис. 5.33, а в качестве примера представлен двухтактный выходной каскад на комплементарных транзисторах ( $n-p-n$  и  $p-n-p$ ). Переменное сопротивление резистора  $R_6$  между обоими выводами баз служит для установки базового напряжения смещения и вместе с тем для установки *тока покоя*. Эту настройку можно выполнить с помощью амперметра, подключенного к выводу коллектора, либо с помощью осциллографа. Слишком низкий ток покоя выражается в изломе сигнала при прохождении напряжением нулевого значения (рис. 5.33, б). При этом ни один из транзисторов не проводит ток. Для увеличения тока покоя необходимо увеличить сопротивление резистора  $R_6$ .

Дальнейшее уравнивание в выходных усилителях заключается в установке рабочих точек обоих транзисторов. При несимметричной рабочей точке переменное напряжение на выходе будет ограничено с одной стороны (рис. 5.33, в). Поэтому для выравнивания постоянное напряжение необходимо устанавливать таким образом, чтобы при увеличении амплитуды переменного напряжения выходное напряжение ограничивалось симметрично.

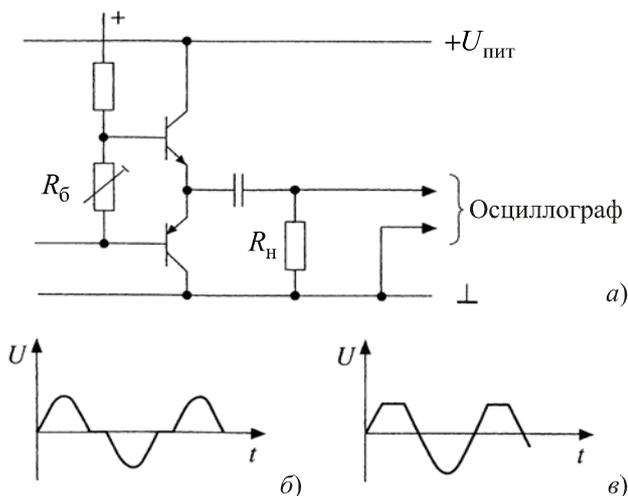


Рис. 5.33. Выходные сигналы в неисправности в оконечном усилительном каскаде: схема усилителя (а); выходной сигнал при слишком малом токе покоя (неверная рабочая точка) (б); выходной сигнал при выборе несимметричной рабочей точки

## 5.7. Упражнения для закрепления полученных знаний

**УПРАЖНЕНИЕ 5.1.** На рис. 5.34 представлен трехкаскадный усилитель, который при правильном функционировании обеспечивает общее усиление  $K_{yc} = 1000$ .

Усиление существенно снижено вследствие неисправности.

Для устранения неисправности было измерено постоянное и переменное напряжение. Для этого использовали цифровой вольтметр, который может измерять переменное напряжение частотой до  $f = 10$  кГц.

Переменное напряжение на входе имеет синусоидальную форму частотой  $f = 1$  кГц.

Все напряжения были измерены относительно опорного потенциала (земли). Для переменных напряжений используются действующие значения.

Необходимо попытаться с помощью минимального количества измерений найти причину неисправности.

Измеренные величины:

$$u_1 = 10 \text{ мВ}, u_2 = 3 \text{ В}, K_{yc} = 300$$

Транзистор Т1

$$U_{БЭ} = 1,3 \text{ В}, U_{Э} = 0,8 \text{ В}$$

Транзистор Т2

$$U_{БЭ} = 0,2 \text{ В}, U_{Э} = 0,2 \text{ В}$$

Транзистор Т3

$$U_{БЭ} = 1,6 \text{ В}, U_{Э} = 1 \text{ В}, U_{К} = 8 \text{ В}.$$

Какой транзистор неисправен? Почему общее усиление значительно ниже номинального?

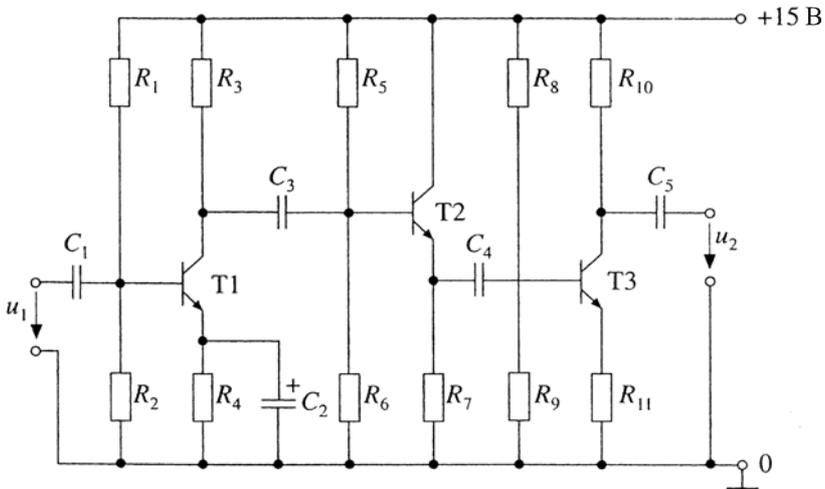


Рис. 5.34. Неисправный усилитель

**УПРАЖНЕНИЕ 5.2.** В схеме (рис. 5.35) все три транзисторных каскада непосредственно соединены друг с другом. В табл. 5.3 приведены возможные виды ошибки. Для каждого вида ошибки необходимо определить напряжения, указанные на схеме и в табл. 5.3. Так как в схеме не указаны параметры конструктивных элементов, а также напряжение питания, для заполнения таблицы можно исходить только из нормативных значений.

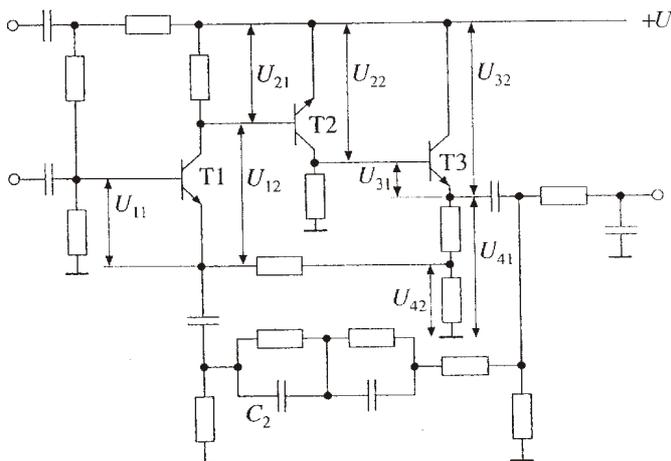
При этом принимаем, что:

$$\begin{aligned} 0 \text{ В}; & \quad \gg 0 \text{ В}; & \quad \approx 0 \text{ В}; \\ 0,6 \text{ В}; & \quad \gg 0,6 \text{ В}; & \quad \approx 0,6 \text{ В}; \\ U_{\text{пит}}; & \quad U_{\text{пит}} / 2; & \quad \approx U_{\text{пит}}. \end{aligned}$$

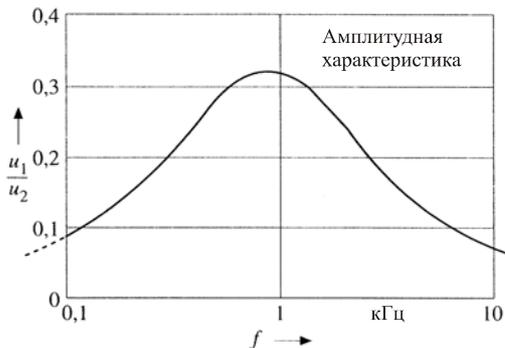
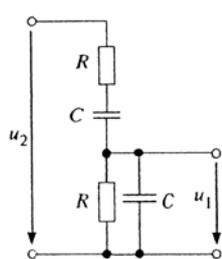
При таком теоретическом поиске неисправности произвольно исходят из одной неисправности, указанной в табл. 5.3, определяют значения напряжений и заносят результаты в таблицу. Допустим, мы определили, что  $U_{21} = 0 \text{ В}$ . В таком случае возможны только ошибки, указанные в строках 2, 3 и 5. Взглянув на таблицу, сразу можно сказать, что определение напряжения  $U_{32}$  даст ответ на то, какая из трех неисправностей имеет место. Для  $U_{32} = 0 \text{ В}$  (строка 2),  $U_{32} = 0,6 \text{ В}$  (строка 3) и для  $U_{32} \approx U_{\text{пит}}$  (строка 5).

**Таблица 5.3.** Виды неисправностей для схемы на рис. 5.35

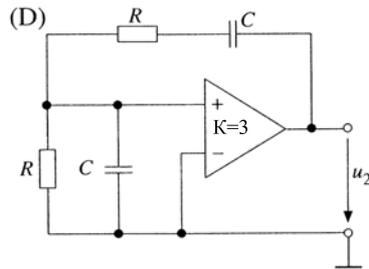
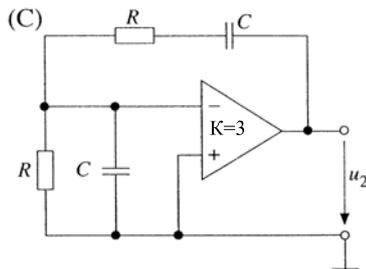
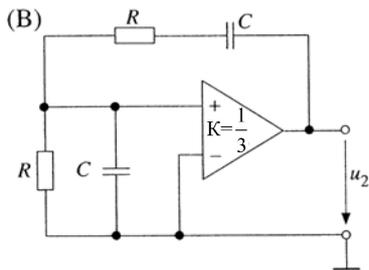
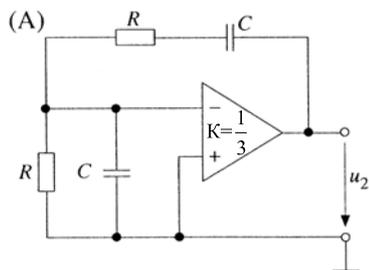
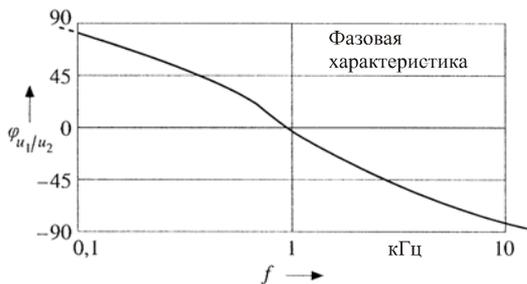
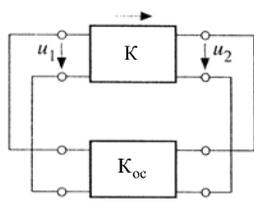
Вид ошибки	Напряжение								Строка
	$U_{41}$	$U_{42}$	$U_{11}$	$U_{12}$	$U_{21}$	$U_{22}$	$U_{31}$	$U_{32}$	
Т3 открыт									1
Т3 короткое замыкание									2
Т2 короткое замыкание									3
Т2 открыт									4
Т1 открыт									5
С1 короткое замыкание									6
С2 короткое замыкание									7



**Рис. 5.35.** Схема для определения причин неисправности



а)



б)

Рис. 5.36. Мостовая схема Вина: амплитудная и фазовая характеристики (а); четыре варианта схем — А, В, С и D (б)

Теперь необходимо еще проверить остальные напряжения, совпадают ли они с ожидаемыми значениями для этой строки. Если выясняется, что неисправный конструктивный элемент нельзя проверить с помощью измерения постоянного напряжения (строка 7), то необходимо перейти к измерениям переменного напряжения. Конденсатор  $C_2$  определяет здесь частотную характеристику усиления. Отклонение действительного значения от заданного опять же указывает на то, какой элемент неисправен.

**УПРАЖНЕНИЕ 5.3.** Частотная характеристика мостовой схемы Вина-Робинсона выражена через амплитудную и фазовую характеристики (рис. 5.36, *a*). С помощью какой из четырех схем, представленных на рис. 5.36, *б*, для генератора с заданными операционными усилителями может соблюдаться условие колебаний  $K_{oc} \times K = 1$ ?

- Схема А
- Схема В
- Схема С
- Схема D

Ответы можно посмотреть в приложении.



## ГЛАВА 6

# Системный поиск неисправностей в импульсных и цифровых схемах

Поиск неисправностей в схемах, работающих только в ключевом режиме, как правило, является более простым, чем в линейных схемах, о чем мы уже узнали в предыдущей главе 5.

### 6.1. Напряжения в цифровых схемах

В цифровых схемах транзистор в нагрузочной электрической цепи находится только в двух состояниях: "проводит ток" (открыт) и "не проводит ток" (закрыт). И поэтому для управления (открытия/закрытия) ключевыми элементами не требуется установки рабочей точки управляющего элемента.

Сопротивления на управляющих электродах, вследствие этого, имеют для сигнала управления лишь функцию ограничения тока.

Как правило, полупроводниковые схемы подобраны по параметрам таким образом, что на резисторах нагрузки диодов и транзисторов, находящихся в проводящем состоянии, падает практически все напряжение питания  $U_{пит}$  (рис. 6.1, а), а в непроводящем состоянии все напряжение падает на полупроводниковых элементах (рис. 6.1, б).

В первом примере (см. рис. 6.1, а) сопротивление перехода полупроводниковых элементов ничтожно мало по сравнению с сопротивлением резистора. Во втором примере (см. рис. 6.1, б) дело обстоит совершенно противоположным образом, теперь уже сопротивление резистора ничтожно мало по сравнению с высокими сопротивлениями перехода закрытых полупроводников.

Полупроводниковые элементы в проводящем состоянии имеют значение сопротивления в диапазоне от миллиом до ом, в закрытом (запертом) состоянии их сопротивление достигает несколько мегаом. Значение сопротивлений нагрузочных резисторов в этом случае будет составлять несколько килоом. Отсюда вытекает все то же отношение сопротивления в диапазоне между 1:100 и 1:1000.

При измерении напряжения следует обратить внимание на то, какая точка схемы используется в качестве опорного потенциала для измерительного прибора.

Для правильного определения измеренного напряжения решающим фактором является то, относительно чего напряжение измеряется.

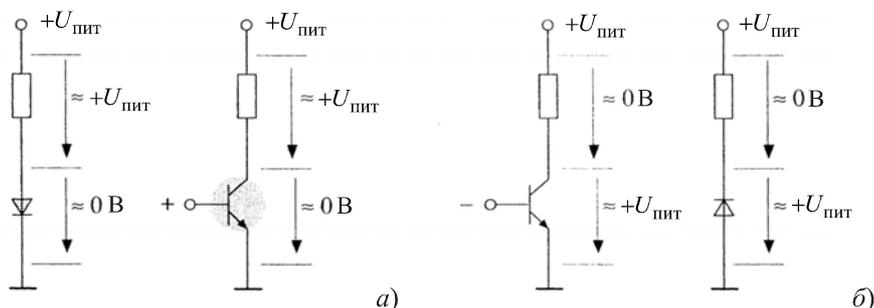


Рис. 6.1. Значения напряжения в цифровых схемах: диод и транзистор проводят ток (а); диод и транзистор не проводят ток (закрыты) (б)

Если, например, на полупроводниковом элементе напряжение измеряется относительно общего нулевого потенциала и составляет около  $0\text{ В}$ , то диод или же транзистор проводят ток. В этом случае в электрической цепи течет ток, который определяется величиной сопротивления нагрузочного резистора. Если же полупроводниковый элемент не проводит ток, то в этом случае на полупроводнике будет практически все напряжение питания, т. к. через резистор ток не течет.

Для интегральных схем (ИС), и в частности микросхем семейства ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика), имеются определенные нормы для различных уровней напряжения на рис. 6.2.

При определении входных уровней напряжения на ИС очевидно, что входной транзистор при низком логическом уровне напряжения Н (L — low) входного сигнала проводит ток (от  $0\text{ В}$  до  $+0,8\text{ В}$ ), а при высоком логическом уровне В (H — high) (от  $+2\text{ В}$  до  $+5\text{ В}$ ) не проводит ток, т. е. закрыт.

Выходной каскад, состоящий из двух подключенных последовательно транзисторов, меняет положение своих коммутирующих элементов с проводящего на непроводящее, или наоборот. В этом случае выходные уровни напряжений будут иными. При высоком логическом уровне напряжения (от  $+2,4\text{ В}$  до  $+5\text{ В}$ ) проводящим является верхний транзистор (открыт), в то время как нижний транзистор ток не проводит (закрыт).

При низком логическом уровне напряжения на выходе (от  $0\text{ В}$  до  $+0,4\text{ В}$ ) нижний транзистор проводит ток (открыт), а верхний — нет (закрыт).

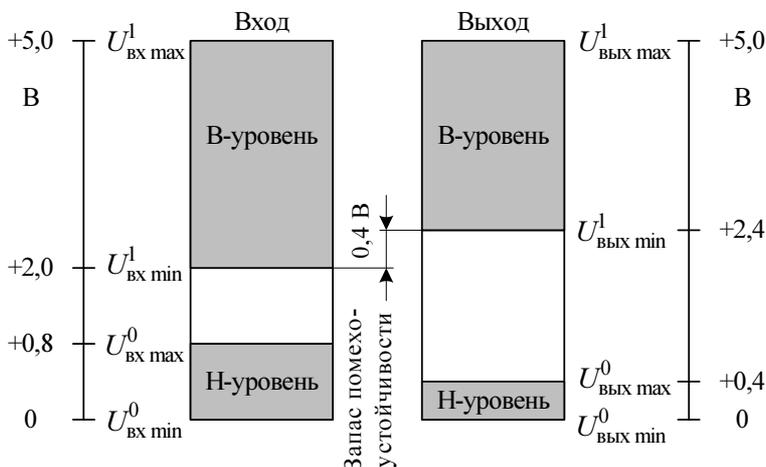


Рис. 6.2. Значения напряжений низкого Н и высокого В логических уровней для ТТЛ-микросхем

Запас помехоустойчивости между входом и выходом для высокого В (от +2 В до +2,4 В) и низкого Н (от +0,8 В до 0,4 В) логических уровней напряжения составляет в каждом случае 0,4 В.

Под *запасом помехоустойчивости* понимается напряжение, которое может быть между уровнями В и Н, в то время как вход управления вследствие напряжения помех регистрирует неправильный уровень и вместе с тем дает ложный сигнал.

В интегральных КМОП-схемах (на комплементарных металло-оксидных полупроводниках) напряжение питания может находиться в диапазоне между 3 и 15 В. Уровни логических напряжений для напряжения питания 5 В изображены на рис. 6.3.

Компоненты полевого МОП-транзистора состоят из дополнительного симметричного канала *p*- и *n*-типов, контакты выводом которого соединены между собой. Благодаря этому каждый транзистор получает правильную полярность рабочего напряжения. В обоих логических состояниях один из полевых транзисторов является открытым, а другой — закрытым.

При сравнении уровней напряжений ТТЛ- и КМОП-микросхем становится ясно, что запас помехоустойчивости (отношение сигнал/шум) логических схем на полевых транзисторах больше (1 В), чем у ТТЛ-логики (0,4 В).

*Выходы с тремя состояниями* помимо высокого и низкого логических уровней напряжений, соответственно ТТЛ- и МОП-микросхем, обладают еще *уровнем высокого импеданса* около 2,5 В при рабочем напряжении 5 В. Этот уровень в значительной степени зависит от подключенной на выходе суммарной нагрузки выходов и может опуститься до 0,5 В.

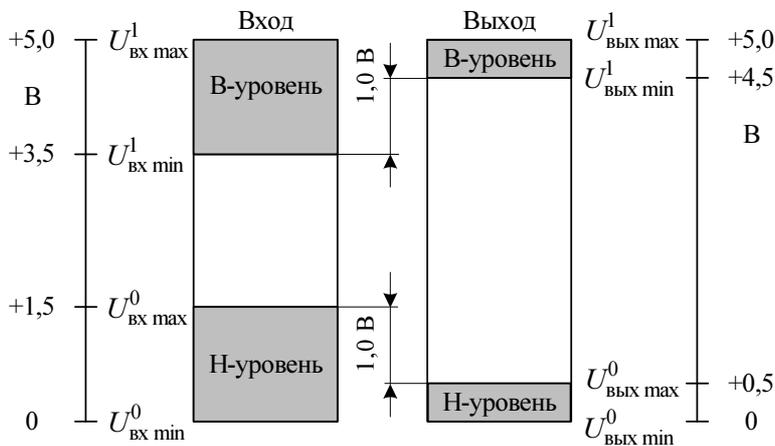


Рис. 6.3. Значения напряжений низкого N и высокого V логических уровней для КМОП-микросхем

## 6.2. Воздействия возможных коротких замыканий и внутренних обрывов

Работающие в импульсном и цифровом режимах полупроводниковые элементы, которые переключаются между уровнями низкого и высокого напряжения, при коротких замыканиях на входе могут моделироваться как низкий, так и высокий уровень напряжения. С другой стороны, это зависит от того, где именно имеется короткое замыкание или обрыв, и идет ли речь в данном случае о ТТЛ- или МОП-микросхеме.

На рис. 6.4 показан пример неисправности на входе схемы *ТТЛ-инвертора*. В большинстве случаев выхода из строя микросхемы неисправным оказывается диод защиты, установленный на входе, который и вызывает короткое замыкание относительно опорного нулевого потенциала (рис. 6.4, а).

Для выходного сигнала инвертора это имеет следующие последствия.

Из-за короткого замыкания напряжение на эмиттере входного транзистора становится равным опорному нулевому потенциалу.

Транзистор, таким образом, проводит ток и запирает следующий транзистор. Верхний по схеме выходной транзистор открывается, а нижний соответственно закрывается. Поэтому неисправный инвертор постоянно показывает высокий логический уровень напряжения на выходе, независимо от входного сигнала.

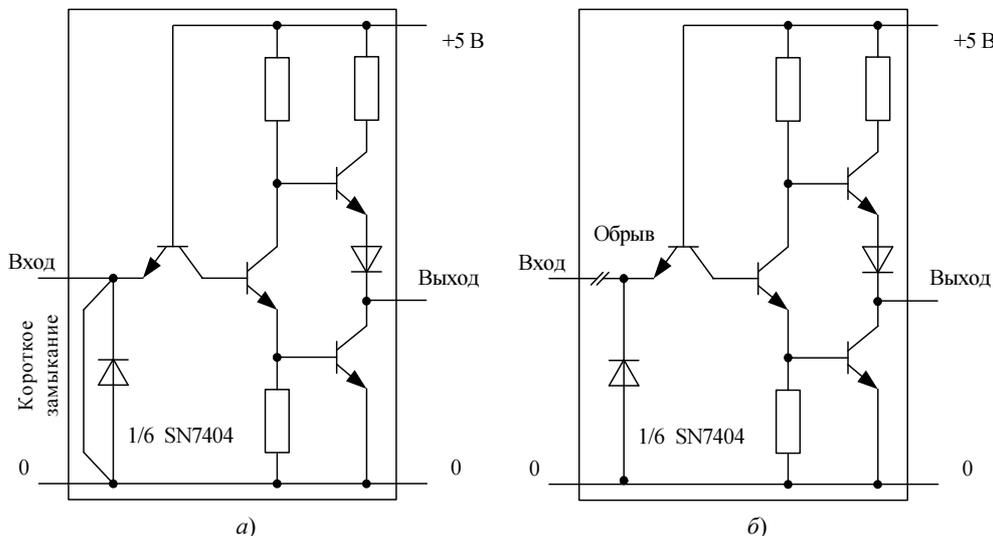


Рис. 6.4. Возможные неисправности на входе ТТЛ-микросхемы: короткое замыкание (а); внутренний обрыв (б)

Из-за закороченного (замкнутого накоротко) диода вход микросхемы всегда находится на низком логическом уровне напряжения. В работающей микросхеме, если она никуда не подключена, на входе будет измерен В-уровень.

Внутренний обрыв на входе, в подводящей к эмиттеру линии, тоже даст о себе знать (рис. 6.4, б). В этом случае на выходе схемы всегда будет присутствовать низкий логический уровень напряжения независимо от уровней на входе.

Короткие замыкания и внутренние обрывы в выходных транзисторах приведут к последствиям, показанным в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Уровни напряжений в ТТЛ-микросхеме при возможных неисправностях в выходных транзисторах

Уровень сигнала на входе	Верхний по схеме выходной транзистор	Нижний по схеме выходной транзистор	Уровень сигнала на выходе
Н	Короткое замыкание	Закрыт	В
В	Короткое замыкание	Открыт	Между Н и В
Н	Обрыв	Закрыт	Между Н и В
В	Обрыв	Открыт	Н
Н	Открыт	Короткое замыкание	Н

Таблица 6.1 (окончание)

Уровень сигнала на входе	Верхний по схеме выходной транзистор	Нижний по схеме выходной транзистор	Уровень сигнала на выходе
В	Закрыт	Короткое замыкание	Н
Н	Открыт	Обрыв	В
В	Закрыт	Обрыв	Между В и Н

Эти примеры показывают, что при определенных дефектах инвертор показывает себя "мнимым" в функционировании, например, строки 1, 4, 6 и 7. Отсюда следует, что нужно обязательно проверить обстоятельства переключения с помощью логических функций (результат "правда", результат "ложь"), тогда даже из двух комбинационных возможностей можно будет найти причину ошибки.

Входная схема КМОП логической микросхемы, приведенная на рис. 6.5, показывает соединенные между собой контакты затворов транзисторов. Короткое замыкание на этом входе влечет за собой выходной сигнал, который будет зависеть от полярности короткого замыкания.

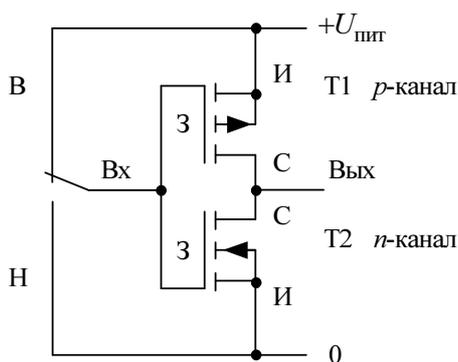


Рис. 6.5. Возможные дефекты на входе КМОП-микросхемы

Короткое замыкание на входе на напряжение питания закрыло бы у работающих транзисторов верхний по схеме транзистор, а нижний при этом стал бы открытым. Следствием этого на выходе был бы низкий уровень напряжения.

Короткое замыкание на опорный нулевой потенциал откроет верхний транзистор Т1, а нижний транзистор Т2 — закроет. Следствием этого был бы постоянный высокий логический уровень напряжения на выходе.

Внутренний обрыв на входе имел бы, как следствие, неопределенные уровни напряжений и уровни напряжений помех на входе и выходе весьма высокоомной схемы.

В случае возникновения неисправностей на выходе для этой логической КМОП-схемы можно строить рассуждения точно таким же способом, как и в случае с логической ТТЛ-схемой.

Воздействие элементов, оказывающих влияние на временную задержку цифровой схемы, может быть без затруднений установлено при уделении внимания функциональным характеристикам, а также схемному устройству и определению параметров замедляющих звеньев.

Конденсатор как элемент связи, изображенный на рис. 6.6, *а*, исполняет роль дифференцирующего звена, которое приводит к изменению формы прямоугольного импульса. Другой эффект достигается с помощью схемы, изображенной на рис. 6.6, *б*. Параллельное подключение конденсатора с сопротивлением, как элементом связи, должно противоположно воздействовать изменению формы импульса, т. е. корректировать ее.

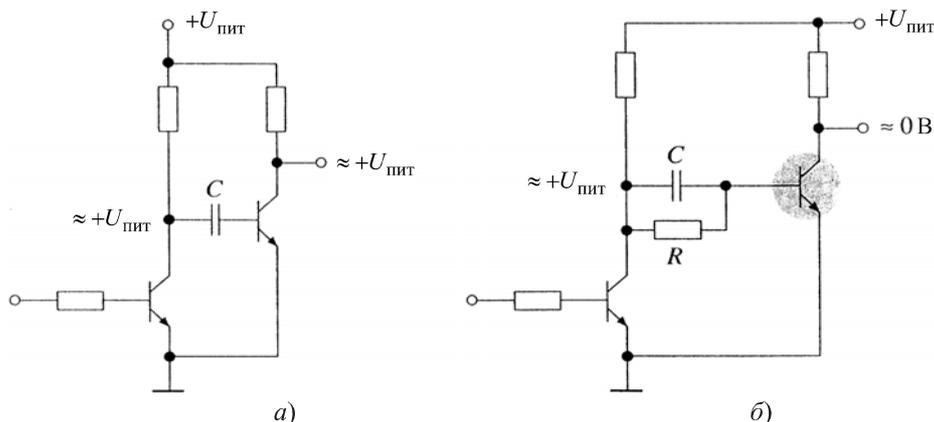


Рис. 6.6. Соединение транзисторных ключей: емкостно-связанный переключательный каскад (*а*); резистивная связь (*б*)

Далее следует обратить внимание на то, что конденсатор на рис. 6.6, *а* в состоянии покоя, когда отсутствует последовательность импульсов на входе, разделяет транзисторы по постоянному току. Поэтому оба транзистора не должны проводить ток, т. е. должны быть закрытыми.

На рис. 6.6, *б* используемая *резистивная связь*, напротив, способствует тому, что потенциал на выходе первого транзистора переносится на вход второго транзистора. Транзисторы, связанные таким способом, имеют постоянно противоположные выходные состояния. Если первый транзистор закрыт, то вто-

рой транзистор должен быть открытым. В свою очередь, если первый транзистор проводит ток (открыт), то второй транзистор вынужден оставаться закрытым.

Неисправные емкостные элементы связи имеют другие воздействия на характер функционирования схем, чем элементы прямой или резистивной связей.

При коротком замыкании конденсатора, показанного на рис. 6.6, *а*, второй транзистор будет проводить ток, т. е. будет открыт. На рис. 6.6, *б* короткое замыкание в состоянии выхода второго транзистора ничего не изменит, потому что этот транзистор уже проводил ток по элементам резистивной связи. Для обеих схем, однако, короткое замыкание базы второго транзистора на коллектор первого транзистора привело бы к разрушению этих транзисторов.

Внутренний обрыв емкостных элементов связи на выходах схем, согласно рис. 6.6, приведет к следующим изменениям.

При входном воздействии на схему, согласно рис. 6.6, *а*, второй каскад больше не управляется. В схеме же на рис. 6.6, *б* в этом случае в режиме по постоянному току не происходит никаких изменений, меняется лишь только форма выходного импульса, в особенности его фронт — (округление крутого и нисходящего фронтов импульса).

Использование в нагрузке добавочных и параллельных (шунтирующих) резисторов является одной из главных причин, которые влияют на измерение промежуточных значений и приводят к результатам, которые на основании состояний логических схем мы не ожидаем. Это случается, прежде всего, тогда, когда пассивные цепи логических схем подключаются последовательно. На рис. 6.7, *а*, в качестве примера, изображен простейший логический элемент "И". Если на входе присутствуют два входных сигнала высокого логического уровня, удовлетворяющих условию "И", то на выходе элемента должен присутствовать также высокий логический уровень напряжения (+12 В).

Однако в случае соединения резисторов  $R_k$  и  $R_n$  друг с другом, очевидно, этот уровень напряжения (+12 В) достигнут не будет.

Оба сопротивления образуют последовательное соединение, и напряжение питания  $+U_{пит}$  на выходе перераспределяется согласно отношению сопротивлений резисторов  $R_k$  и  $R_n$ . В этом примере напряжение на выходе равняется  $12 \text{ В} / 3 \times 2 = 8 \text{ В}$  (высокий логический уровень). При низком логическом уровне выходного сигнала коэффициент деления не играет никакой роли, потому что напряжение на выходе определяют проводящие ток диоды, которые располагаются параллельно нагрузочному сопротивлению  $R_n$ .

Подобные рассуждения применимы и в отношении уровней напряжения для транзисторного ключа (рис. 6.7, *б*). В соответствии с принципом отрицания

сказанное для схемы на рис. 6.7, а действует с точностью до наоборот для схемы инвертора, изображенного на рис. 6.7, б.

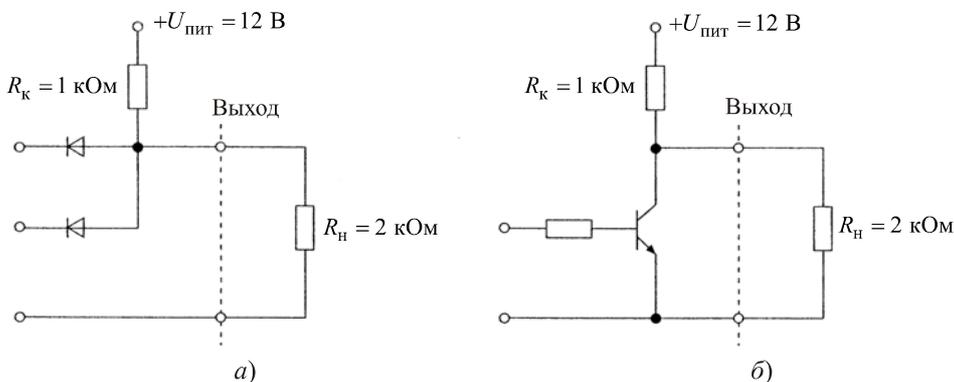


Рис. 6.7. Влияние нагрузки  $R_n$ : на элементарную логическую схему (а); на схему инвертора (б)

В этой схеме деление напряжения становится значимым, когда на входе присутствует сигнал низкого логического уровня (Н). В этом случае транзистор не проводит ток, поэтому на выходе устанавливается сигнал высокого логического уровня с напряжением 8 В, которое определяется резистивным делителем напряжения. Высокий уровень напряжения на входе переключает транзистор в проводящее состояние, так что включенное параллельно сопротивление нагрузки шунтируется очень маленьким сопротивлением перехода открытого транзистора. На выходе оказывается напряжение, равное 0,1 В.

### Мультивибраторы, триггерные и счетные схемы

Очень важно, чтобы в промышленных схемах правильно распознавать мультивибраторы и триггерные схемы. Обычно различают следующие виды подобных схем: автоколебательный мультивибратор, ждущий мультивибратор и мультивибратор с двумя устойчивыми состояниями — *триггер*, а также триггер Шмитта.

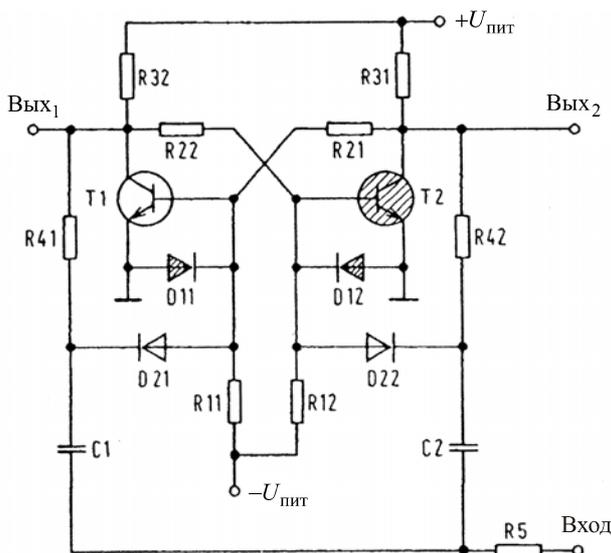
Эти схемы различаются в основном по виду соединения, как это представлено в табл. 6.2.

На примере триггера с двумя устойчивыми состояниями, приведенного на рис. 6.8, рассмотрим, как он используется в счетных схемах и какие наблюдения за функционированием и неисправностями должны проводиться в триггерах и мультивибраторах.

Основу схемы этого триггера составляют транзисторы Т1 и Т2, резисторы в коллекторной цепи R31 и R32, а также резисторы коллекторно-базовой связи R21 и R22.

**Таблица 6.2.** Разновидности мультивибраторов и триггерных каскадов и соответствующие им виды соединений

Схема	Соединение 1	Соединение 2
Автоколебательный мультивибратор Соединение между:	Конденсатор Коллектор Т1 — База Т2	Конденсатор Коллектор Т2 — База Т1
Ждущий мультивибратор Соединение между:	Конденсатор Коллектор Т1 — База Т2	Резистор Коллектор Т2 — База Т1
Мультивибратор с двумя устойчивыми состояниями — триггер Соединение между:	Резистор Коллектор Т1 — База Т2	Резистор Коллектор Т2 — База Т1
Триггер Шмитта Соединение между:	Резистор Коллектор Т1 — База Т2	Резистор Эмиттер Т2 — Эмиттер Т1



**Рис. 6.8.** Релаксационная схема (триггер) с емкостно-связанными (динамическими) входами

Диоды D11 и D12, как и относящиеся к ним добавочные сопротивления R11 и R12, образуют дополнительную схему защиты для входов транзисторов от сигналов помех, которые по своей амплитуде имеют напряжения выше, чем постоянное обратное напряжение диодов.

Схема имеет общий вход для внешних управляющих импульсов, которые воздействуют на входы транзисторов через конденсаторы C1 и C2, сопротивления R41 и R42, а также диоды D21 и D22.

По полярности диодов видно, что переключается триггер отрицательным синхронизирующим фронтом импульса. Это значит, что открывается один из транзисторов, например, транзистор T2. На входе закрытого транзистора T1 диод D21 блокируется положительным напряжением, которое поступает с резистора R41.

Короткое замыкание в диоде D11 или D12 должно замкнуть накоротко вход соответствующего транзистора и вместе с тем заблокировать влияние управляющих импульсов. В данном случае этот транзистор был бы закрыт, а другой транзистор — открыт.

Если бы один из этих диодов имел внутренний обрыв, то тогда соответствующий транзистор был бы закрыт частью отрицательного напряжения  $-U_{\text{пит}}$ , поступающего через резистор R11 или R12. И в этом случае будут очевидны признаки неисправности. Отличия можно определить исключительно только лишь благодаря различиям напряжений на базах транзисторов.

В нормальном работоспособном состоянии на базе закрытого транзистора замеряется отрицательное напряжение незапертого диода D11 или D12. При коротком замыкании на диоде напряжение база-эмиттер  $U_{\text{БЭ}}$  равнялось бы 0 В. Если же в диоде D11 или D12 имеется обрыв, то на базе замеряется напряжение, равное напряжению питания —  $U_{\text{пит}}$ . Диод база-эмиттер данного транзистора в этом случае с большой вероятностью выйдет из строя из-за этого высокого отрицательного напряжения питания.

Диоды D21 и D22, относящиеся к входной цепи, при коротком замыкании должны связать выход транзистора через сопротивления R41 и R42 с соответствующим входом. Это будет заметно из-за нестабильного состояния транзистора, т. к. он при этом может постоянно колебаться между открытым и закрытым состояниями. Благодаря входным импульсам это состояние будет периодически повторяться.

Более определенные признаки неисправности проявляются, когда имеется обрыв в одном из диодов D21 или D22. На оставшийся работоспособный вход оказывают влияние отрицательные запускающие импульсы. Если транзистор на соответствующей стороне однократно переводится в закрытое состояние, то схема так и остается в этом состоянии.

Эти рассуждения о ситуациях с неисправностями у триггеров показали, что после того, как убеждаются о состояниях транзисторов, целесообразно подвергнуть проверке также и работу диодов.

Замер напряжений на диодах и перепроверка потенциала на управляющих электродах транзисторов в данном случае быстрее всего приводит к успеху.

Если же причиной неисправности становятся не полупроводники, а другие элементы схемы, сюда можно отнести также обрывы токопроводящей дорожки печатной платы или же короткие замыкания в ней, то они неизбежно также регистрируются.

Проверка динамических входов должна выполняться при подключении импульсного сигнала, т. к. диоды D21 и D22 в состоянии покоя являются непроводящими, и отсюда при измерении напряжения прибором они не показывают никакого различия при внутреннем обрыве в диоде.

При небольших тактовых частотах, которые составляют менее 10 кГц, измерительным прибором все еще хорошо могут быть определены тактовые импульсы. Однако в этом случае нельзя определить измеряемые величины. При более высоких тактовых частотах за сигналом нужно наблюдать при помощи осциллографа.

При поиске ошибок в *счетных схемах*, под которыми, прежде всего, понимаются триггеры, двоичные счетчики и десятичные счетчики (*декады*), главным образом возникает проблема обнаружения дефектных счетных каскадов.

Прежде всего затрудняют эту задачу *десятичные счетчики*, которые создают различные десятичные коды. Определять код какой-нибудь неизвестной десятичной декады из структуры схемы — это длительное и требующее достаточного количества времени занятие, которое чаще всего не обещает большого успеха.

Часто в приложениях к схемам на счетных каскадах их производители приводят сведения о состояниях каскадов. Эти сведения кому-то, должно быть, уже помогли, потому что в этом случае можно однозначно установить, после какого счетного импульса должны измениться состояния соответствующих выходов.

В качестве примера мы возьмем *весовые значения* счетных разрядов каскадов (разрядов) десятичного счетчика:

Счетный разряд A =  $2^0 = 1$

Счетный разряд B =  $2^1 = 2$

Счетный разряд C =  $2^2 = 4$

Счетный разряд D =  $2^3 = 8$

На выходах разрядов *десятичного счетчика* все счетные выходы находятся на низком логическом уровне напряжения (Н) при соответствующем нулевом состоянии счетчика. Обнаружить неисправный дефектный каскад счетчика

можно, проследив состояния цифровых десятичных разрядов счетчика на его выходах при воздействии счетных импульсов по их порядковым номерам:

Номер	Единичное состояние разрядов	Состояние счетчика
0	Нет (исходное нулевое состояние)	$2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 0 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 0 = 0 + 0 + 0 + 0 = 0$
1	Разряд А	$2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 0 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 1 = 0 + 0 + 0 + 1 = 1$
2	Разряд В	$2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 0 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 0 = 0 + 0 + 2 + 0 = 2$
3	Разряды А и В	$2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 0 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 1 = 0 + 0 + 2 + 1 = 3$
4	Разряд С	$2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 0 = 0 + 4 + 0 + 0 = 4$
5	Разряды А и С	$2^1 \cdot 0 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 1 = 0 + 4 + 0 + 1 = 5$
6	Разряды С и D	$2^1 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 0 = 2 + 4 + 0 + 0 = 6$
7	Разряды А, С и D	$2^1 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 0 + 2^0 \cdot 1 = 2 + 4 + 0 + 1 = 7$
8	Разряды В, С и D	$2^1 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 0 = 2 + 4 + 2 + 0 = 8$
9	Разряды А, В, С и D	$2^1 \cdot 1 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 1 = 2 + 4 + 2 + 1 = 9$

Приведенный счетчик работает в коде Айкана: 1-2-4-2. Для других кодов последовательность состояний разрядов счетчика будет соответственно иной. Если к счетным декадам подключены индикаторные блоки, то поиск дефектных счетных разрядов становится еще проще, т. к. по отображению данных в цифровой форме можно тотчас же определить, какой разряд не считает должным образом. Для представленного в этом примере кода дефектные счетные разряды могут дать о себе знать следующим образом.

Пусть неисправен первый счетный разряд А (весовое значение  $2^0$ ).

В этом случае десятичный счетчик остается в исходном состоянии — все разряды имеют низкий логический уровень (Н), неисправный первый разряд также, предположительно, находится в исходном состоянии, а все другие счетные каскады в этом случае тоже не считают.

Если неисправен второй счетный разряд В (весовое значение  $2^1$ ).

В этом случае показания счетчика отображают только первый счетный импульс, поскольку работает только первый разряд счетчика. Предположительно, неисправный второй разряд, который постоянно находится в исходном состоянии.

Пусть неисправен третий счетный разряд С (весовое значение  $2^2$ ).

Тогда в десятичном счетчике будут работать два младших разряда счетчика. Выходной счетный импульс со второго разряда поступает на третий. Счетчик считает только до третьего счетного импульса. Здесь также предполагается, что третий разряд остался в исходном нулевом состоянии.

И последний вариант, когда неисправен четвертый счетный разряд D (весовое значение  $2^1$ ).

Десятичный счетчик в этом случае может досчитать до 7. Показатель счетчика после седьмого импульса останавливается.

Поиск ошибок в схемах, использующих десятичные счетчики, без применения индикации и тактовых счетных импульсов, а также при неизвестном значении кода счетчика требует большой трудоемкости.

Поэтому практик, который часто занимается счетными схемами, управляемыми тактовыми импульсами, должен иметь при себе хотя бы простейший генератор импульсов с ручным управлением, чтобы независимо от тактовых импульсов иметь возможность проверять все счетные схемы.

Очень простая и весьма полезная схема изображена на рис. 6.9, а. Эта схема состоит по большей части из четырех элементов: одного микропереключателя, двух резисторов и одного транзистора, которые напаяны на одной маленькой печатной плате. Подобный простейший генератор годится для тестирования дискретных, МОП- или ТТЛ-схем.

На рис. 6.9, б представлена схема, построенная на ТТЛ-логике.

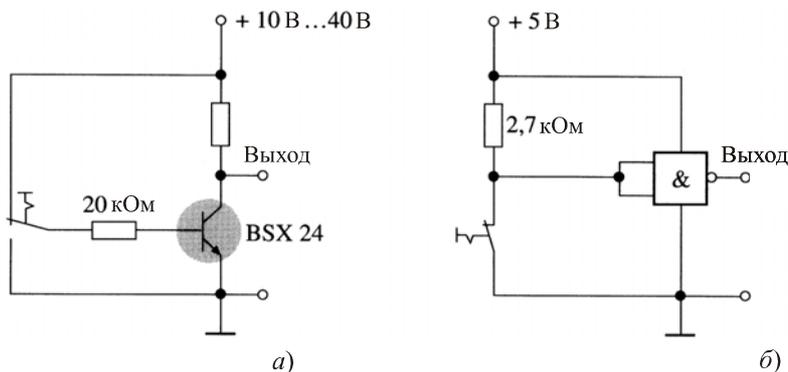


Рис. 6.9. Простейший генератор импульсов с ручным управлением: на транзисторе (а); на ТТЛ-логическом элементе (б)

Для обеих схем требуется три линии соединения. Две нужны для электропитания схемы — их берут от проверяемого устройства, и одна соединительная линия для выхода схемы генератора или входа проверяемого счетного устройства. Таким образом может быть точно проверено функционирование незнакомых счетных схем. С помощью ручного формирования тактовых импульсов можно установить любое счетное состояние проверяемого устройства и по каждому счетному импульсу путем измерения состояний выходов счетных разрядов проверить их работоспособность.

Кроме того, возможно определить, с каким синхронизирующим фронтом работают счетные каскады и какой каскад (разряд) является причиной неисправности.

В любом случае можно исходить из того, что счетный разряд в десятичном счетчике, код которого неизвестен, в процессе девяти введенных счетных импульсов должен изменить свое состояние, по меньшей мере, дважды и притом независимо от того, по какому счетному входу происходит подсчет. Если этого не происходит, то один счетный разряд или одно из его соединений является неисправным.

### 6.3. Систематизированный поиск ошибок в цифровой схеме

Размышления по поводу систематизированного поиска ошибок применимы не только для линейных схем (аналоговой техники), но также и для цифровой техники.

Примером здесь может послужить цифровая логическая схема прибора сбора и регистрации информации (рис. 6.10).

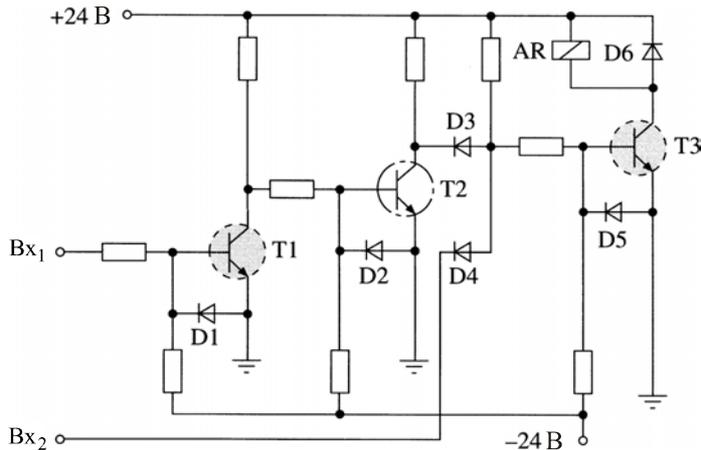


Рис. 6.10. Пример неисправной цифровой схемы

*Условие неисправности:* генератор тактовых импульсов (электронный счетчик) устройства не возвращается на ноль, потому что контакт реле AR не срабатывает, т. е. реле не включается при соответствующих сигналах на входах  $V_{x1}$  и  $V_{x2}$ .

Перед началом, собственно, поиска ошибок схему представляют (как это представлено для линейной техники в предыдущей главе 5) функционально-

ми узлами в виде блок-схемы. Из блок-схемы, представленной на рис. 6.11, видно, что транзистор Т3 управляется двумя входными сигналами  $V_{x1}$  и  $V_{x2}$ . Сигнал с входа  $V_{x1}$  после двух инвертирующих каскадов на транзисторах Т1 и Т2 подается на диод D3. Инверсия электромеханического входного сигнала  $V_{x1}$  в первом каскаде компенсируется во втором каскаде. Поэтому выходной сигнал с транзистора Т2, поступающий на диод D3, становится одинаковой полярностью с сигналом на входе  $V_{x1}$ . Второй входной сигнал, приходящий на вход  $V_{x2}$ , непосредственно подается на диод D4. Диоды D3 и D4 выполняют функцию двухвходовой логической схемы "И".

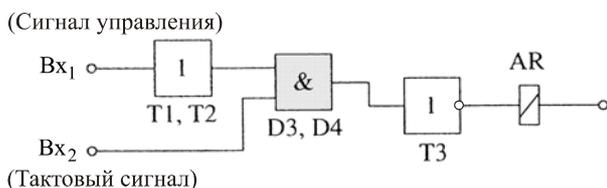


Рис. 6.11. Блок-схема неисправной цифровой схемы, показанной на рис. 6.10

Из рассмотрения этих функций можно выделить три функциональных блока рассматриваемой схемы:

- неинвертирующий усилительный блок на транзисторах Т1 и Т2;
- логическая схема "И" на диодах D3 и D4;
- каскад переключения на транзисторе Т3 с реле в коллекторной цепи.

Первая проверка производится на выходе схемы "И", где соединены оба сигнальных входа.

На схеме, согласно рис. 6.11, изображена логическая схема "И", выполненная на диодах D3 и D4.

Если оба входных сигнала поступали в верной последовательности, как это показано на рис. 6.12, то тогда на выходе схемы "И" можно было бы получить выходной сигнал в соответствии с рисунком.

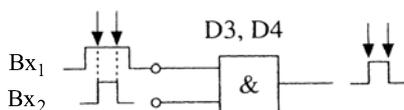


Рис. 6.12. Входные сигналы, поступающие на цифровую схему, приведенную на рис. 6.10

Если сигнал не удастся замерить, то на входе теоретически возможны следующие ситуации:

- сигнала на входе  $V_{x1}$  нет, но присутствует на входе  $V_{x2}$ ;
- сигнал на входе  $V_{x1}$  есть, но отсутствует сигнал на входе  $V_{x2}$ ;
- сигналы на входах  $V_{x1}$  и  $V_{x2}$  отсутствуют.

На практике возможные неисправности ограничиваются следующими рассуждениями.

Синхронизирующие тактовые импульсы на входе  $V_{x2}$  с большой вероятностью присутствуют, поскольку правильно работают все другие блоки в устройстве.

Поэтому следующим шагом проверяется сигнал управления на входе  $V_{x1}$  и одновременно с тем проводится дальнейшее деление схемы пополам согласно рис. 6.13.

Если замеряется импульс с полярностью, которая изображена на рис. 6.13, то первый инвертирующий каскад работает. Изменение полярности входного сигнала вызвано именно верной работой первого каскада на транзисторе Т1.

До этого времени для поиска неисправности потребовалось выполнить два измерения осциллографом (рис. 6.14).

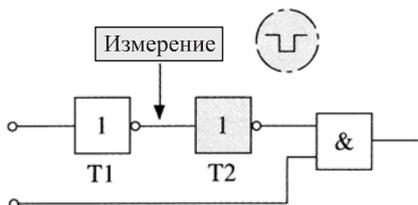


Рис. 6.13. Измерение напряжения между Т1 и Т2



Рис. 6.14. Шаги поиска ошибок

Сначала измерения проводились на выходе логической схемы "И", т. е. в точке соединения диодов D3 и D4 (первое деление пополам схемы). Второй замер согласно логике систематизированного поиска неисправности проводился путем дальнейшего половинного деления (со стороны входа), а именно на выходе транзистора Т1.

Если на входе транзистора Т2 сигнал присутствует, то только эта ступень может быть источником возникновения ошибки. О логической схеме D3, D4 здесь не может быть и речи, потому что невозможно, чтобы диод D3 имел внутренний обрыв. Даже в случае короткого замыкания этого диода путь для сигнала все же имелся бы.

Измерение напряжения коллектор-эмиттер доказывает, что транзистор Т2 не является проводящим, т. е. он закрыт (рис. 6.15).

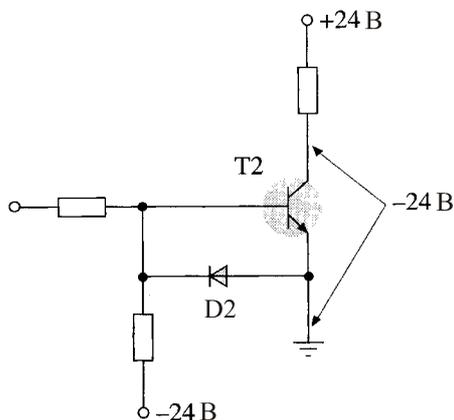


Рис. 6.15. Проверка выходного напряжения на транзисторе Т2

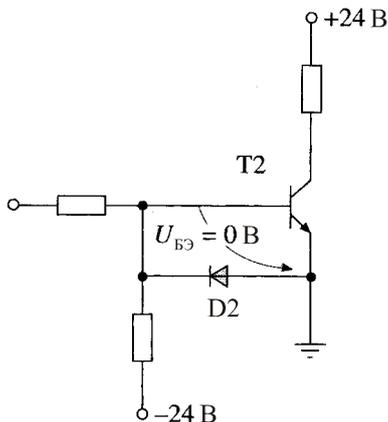


Рис. 6.16. Проверка напряжения база-эмиттер транзистора Т2

Измерение напряжения база-эмиттер  $U_{БЭ} = 0$  В, показанное на рис. 6.16, подтверждает результат измерения напряжения на коллекторе транзистора.

Поэтому на основании этих измерений называть транзистор Т2 неисправным было бы преждевременно, поскольку параллельно его выводам база-эмиттер подключен диод D2, о котором можно говорить, как об источнике неисправности.

Установив, что между базой и эмиттером транзистора не было измерено разности напряжения ( $U_{БЭ} = 0$  В), то тогда переход база-эмиттер транзистора Т2, так и диод D2 становятся потенциальными источниками неисправности (короткого замыкания). Поэтому обе возможные причины должны быть отделены друг от друга.

Сначала в обесточенном состоянии устройства демонтируется один из выводов диода D2 (рис. 6.17) и путем измерения сопротивления диода D2 в прямом и обратном направлениях определяют его работоспособность. Если в этом случае определяется короткое замыкание в диоде, то это значит, что этот диод и был причиной неисправности.

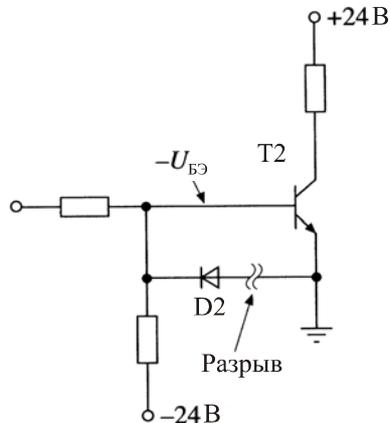


Рис. 6.17. Проверка входного напряжения при изолированном диоде

После замены "пробитого" дефектного диода D2 работу транзистора T2 нужно проверить еще раз. В первую очередь на выводе базы транзистора должно быть замерено напряжение база-эмиттер  $U_{БЭ}$  от  $-0,5$  до  $0,7$ . Это напряжение является напряжением смещения, которое генерируется напряжением питания  $U = -24$  В через сопротивление проводящего диода D2.

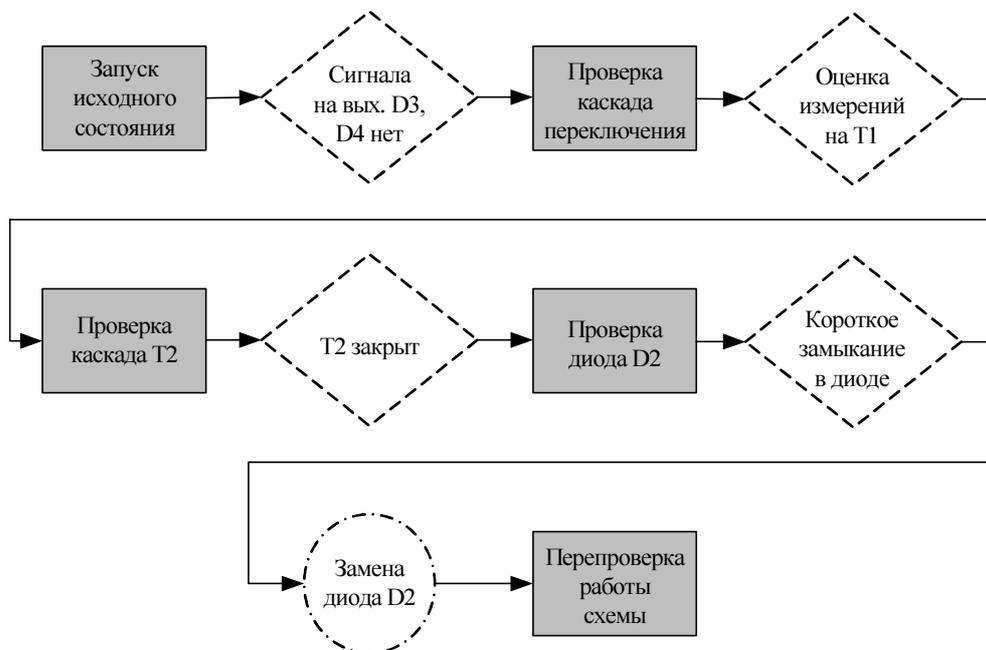


Рис. 6.18. Обзор систематического поиска ошибок

На рис. 6.18 еще раз представлены необходимые шаги для устранения неисправности в этом примере.

## 6.4. Ошибки в цифровых интегральных схемах

Систематизированный поиск неисправностей в устройствах на цифровых интегральных схемах ТТЛ- или КМОП-логики требует тех же самых правил, как и при поиске ошибок на дискретных схемах, только с тем отличием, что эти схемы ввиду своих входных и выходных параметров имеют некоторые специфические особенности. Сюда также можно отнести и специфические требования к структуре схемы.

Узлы ТТЛ уже при относительно небольших сигналах помех (паразитных сигналах) на входах реагируют с нежелательным или непредвиденным результатом.

Плохие *контакты* в соединительных проводниках, которые могут возникать из-за плохой пайки или резьбовых соединений, также являются характерными причинами неисправности. Помехи могут возникнуть также из-за длинных соединительных проводов. Иногда, чтобы вызвать импульсную помеху, достаточно лишь изменения разводки токопроводящих соединений.

Для ТТЛ-схем запас помехоустойчивости ограничивается величиной в 0,4 В (см. рис. 6.2). Высокая помехоустойчивость цифровых устройств связана с большим отличием сигналов высокого (например 2,4—5 В) и низкого (0—0,4 В) уровня. Ошибка возможна при таких помехах, когда высокий уровень воспринимается как низкий и наоборот, что мало вероятно.

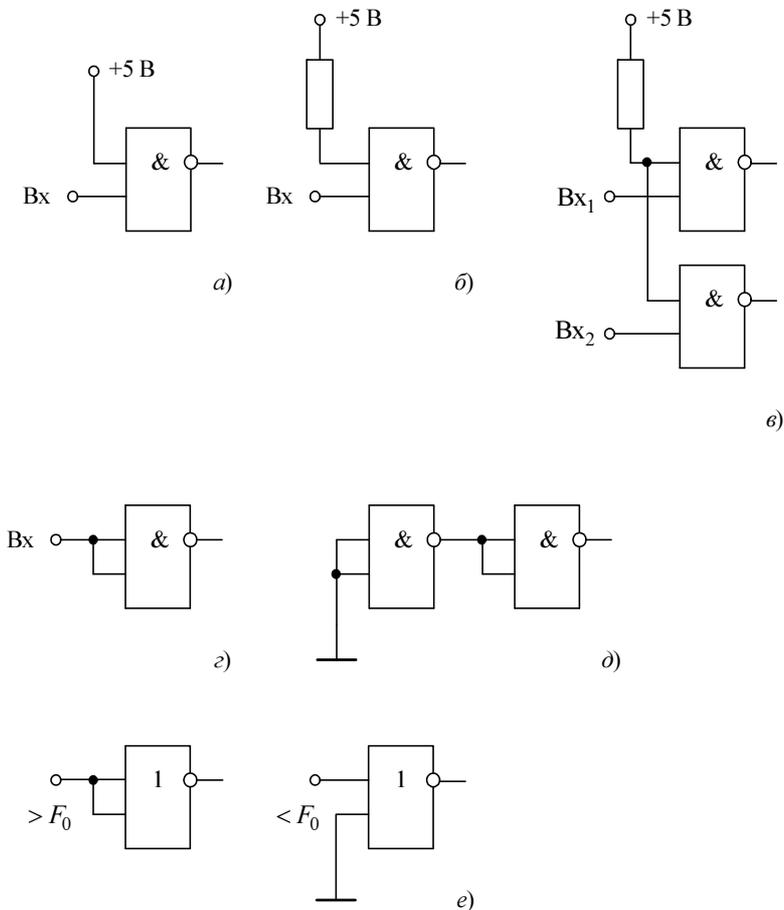
*Нагрузочная способность* выхода указывается в единичных нагрузках. Каждый вход цифровой интегрированной схемы представляет собой нагрузку для выхода предыдущей.

На основании расчета зависимости рабочего тока выходного каскада от температуры и питающего напряжения просто указывается, сколько ТТЛ-входов может быть подключено к ТТЛ-выходу. ТТЛ-вход соответствует стандартной *единичной нагрузке*. Нагрузочная способность стандартного ТТЛ-выхода составляет обычно 10 единичных нагрузок.

В ТТЛ-технике длительность фронта и время спада входных сигналов должны быть меньше 1 мкс. Если это не так, то при последовательном соединении ТТЛ-узлов могут возникать переходные процессы.

Неиспользуемые входы логических элементов "И" и "И-НЕ" могут быть непосредственно соединены с напряжением питания (рис. 6.19, а). Но это воз-

можно только в том случае, если можно констатировать, что напряжение питания не превышает 5 В. Если же это не гарантировано, то эти входы должны быть связаны с напряжением питания через сопротивление 1 кОм или больше (рис. 6.19, б). При этом несколько входов можно подключить к одному сопротивлению (рис. 6.19, в). Если нагрузочной способности настраиваемой схемы на высоком логическом уровне (В) не хватает, тогда можно подключить один или несколько неиспользованных входов логической схемы к используемому входу того же элемента (рис. 6.19, г).



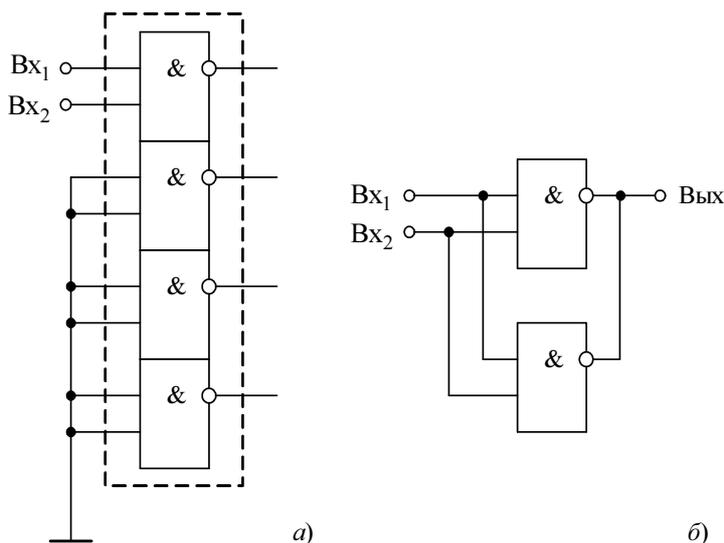
**Рис. 6.19.** Подключение неиспользуемых входов и выходов логических элементов ТТЛ-микросхем: соединение незанятых входов с питающим напряжением (а); соединение незанятых входов при превышении напряжения питания схемы величины 5 В (б); соединение незанятых входов между собой (в); соединение входов для повышения нагрузочной способности (г); подключение к выходам неиспользуемых логических элементов (д); подключение логических элементов "ИЛИ-НЕ" (е)

Ненужные входы использованных логических элементов можно подключить к находящемуся на высоком логическом уровне выходу неиспользованного логического элемента (рис. 6.19, *д*), к входам которого подключен сигнал низкого логического уровня, например, когда они подключены к нулевому потенциалу "земли". В этом случае также следует обратить внимание на нагрузочную способность.

Неиспользуемые или разделенные входы логического элемента "ИЛИ-НЕ" могут быть соединены с используемым входом того же логического элемента, если для этого хватит нагрузочной способности настраиваемой схемы (рис. 6.19, *е*, слева). Если же нет, то входы нужно соединить с опорным потенциалом (рис. 6.19, *е*, справа).

Если в четырехэлементных ТТЛ-микросхемах используются не все логические элементы, т. к. они не нужны или излишни, то в этом случае их входы подключают к опорному нулевому потенциалу. Таким путем сокращается потребление электроэнергии этой логической интегральной схемы (рис. 6.20, *а*).

Если же требуется повысить нагрузочную способность на выходе логического элемента, то второй логический элемент может быть подключен путем параллельного соединения их входов и выходов (рис. 6.20, *б*). Больше недопустимо.



**Рис. 6.20.** Возможные варианты подключения логических элементов: для уменьшения потребляемого тока (*а*); для повышения нагрузочной способности (*б*)

Требования к длительности фронта и спада синхроимпульсов для управления триггерными или счетными схемами еще выше, чем у простых логических элементов.

Триггер, синхронизируемый фронтом, нуждается в тактовом импульсе с длительностью фронта и временем спада (среза) —  $t_{\phi} = t_c < 250$  нс (наносекунд). Время переключения двухступенчатого триггера *MS-mana* (MS — Master-Slave (ведущий/ведомый)) составляет менее 500 нс.

Созданные из D-триггеров сдвиговые регистры и счетчики требуют для нормальной работы тактовый импульс с длительностью фронта  $t_{\phi} < 25$  нс. В случае, если на протяжении длительности синхроимпульса (высокий логический уровень на счетном входе) предполагается, что триггер находится в асинхронном состоянии, или если он возвращается в прежнее положение, то вход сигнала установки или тактовый вход должен быть задержан на низком логическом уровне до тех пор, пока синхроимпульс не закончится, т. е. пока он не перейдет на низкий уровень.

Для неиспользуемых входов триггера, как и для входов логических элементов, действуют те же самые указания. Правда, нужно внимательно следить за тем, чтобы инверсные неиспользуемые входы были соединены с сигналом высокого, а не низкого логического уровня (опорному нулевому потенциалу).

В общей сложности имеется четыре возможные неисправности, которые могут возникнуть внутри или вне микросхемы логического элемента.

Рассмотрим эти неисправности и их последствия.

### **Внутренний обрыв на входах и выходах**

Эта неисправность имеет различное воздействие, в зависимости от того, идет ли речь об обрыве на входе или выходе.

В TTL- или ДТЛ-схемах (диодно-транзисторная логика) на незамкнутом входе с внутренним обрывом устанавливается напряжение от 1,4 до 1,5 В. Это промежуточный уровень между высоким логическим уровнем (пороговое значение 2,0 В) и низким логическим уровнем (пороговое значение 0,4 В), который соответствует *неопределенному уровню*.

Если обрыв на выходе цифрового элемента, то все входы последующих схем, к которым подключен этот выход, управляются неопределенным уровнем. В данном случае выходы этих схем могут произвольно принимать либо низкий, либо высокий логический уровень.

Таким образом, если выход логического элемента имеет внутренний обрыв, то на штырьковом выводе микросхемы и на подключенных входах измеряется неопределенный уровень. Внешний обрыв, напротив, показывает, пра-

вильный уровень на штырьковом выводе микросхемы и неопределенный уровень на входе микросхемы, имеющей внутренний обрыв во входной цепи.

### **Короткие замыкания входов или выходов на напряжение питания или опорный (нулевой) потенциал**

Эти неисправности оказывают такое воздействие, что практически все входы и выходы, которые замыкаются накоротко с напряжением питания, имеют высокий логический уровень  $V = +U_{пит}$ . При коротком замыкании на нулевой потенциал, соответственно, имеют низкий логический уровень  $H = 0$  В. Эта неисправность обращает на себя внимание тем, что на этих входных или выходных выводах не возникает более никаких изменений напряжения.

### **Короткое замыкание между двумя входами или выходами**

Эту неисправность нельзя определить однозначно. Если два выхода замкнуты накоротко, то тут может появиться как высокий, так и низкий логический уровень. Эти уровни появляются независимо от входных уровней схемы.

Замкнутые накоротко входы закорачивают также расположенные перед ними выходы. Поэтому и в этом случае все сказанное ранее имеет силу.

### **Неисправности из-за внешнего монтажа**

Часто причинами возникновения неверных входных и выходных уровней сигналов являются узлы или элементы, которые используются для внешнего подключения к интегральной микросхеме; например, элементы связи, RC-цепи и др. Особенно затрудняется поиск ошибок в схемах на логических элементах с открытым коллектором (логическая схема "ИЛИ" или логическая схема "И").

Выходы этих блоков могут быть соединены друг с другом и работать на одну общую нагрузку, так что один неисправный выход может приводить к таким же неверным логическим уровням и на других выходах. Для локализации неисправного узла необходимо последовательно заменять узлы схемы другими, заведомо исправными, пока ошибка не устранится.

Как и во всех схемах, здесь также имеют место основные принципы выявления неисправности при помощи видимых проявлений неисправности или путем применения принципа разделения пополам для ограничения зоны поиска.

По большей части дефекты на печатных платах с интегральной микросхемой можно свести к восьми вариантам неисправностей. Внутренние неисправности интегральной логической микросхемы можно свести к следующим (рис. 6.21):

- внутренний обрыв входа или выхода (рис. 6.21, а);
- короткое замыкание входа или выхода на напряжение питания или опорный (нулевой) потенциал (рис. 6.21, б),
- короткое замыкание между входами или выходами (рис. 6.21, в);
- дефект функции, реализуемой логической схемой (рис. 6.21, г).

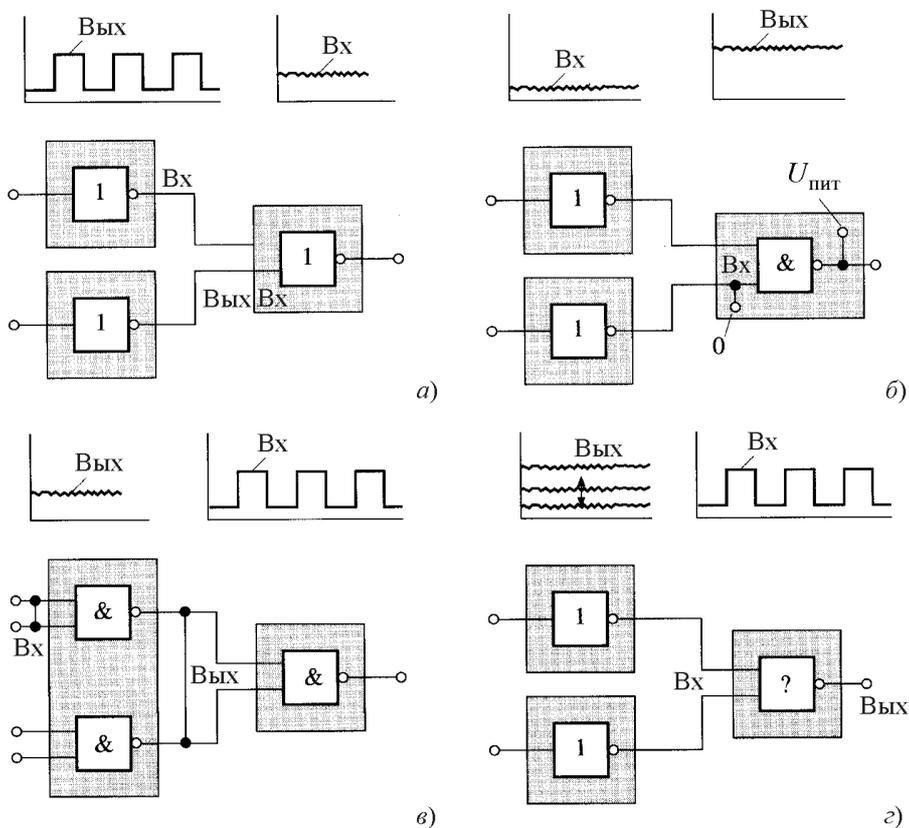


Рис. 6.21. Внутренние неисправности интегральных логических микросхем

Внешние неисправности также можно разделить на четыре возможные (рис. 6.22):

- короткое замыкание между линией связи и напряжением питания или опорным потенциалом (рис. 6.22, а);
- короткое замыкание между двумя линиями связи (рис. 6.22, б);
- внутренний обрыв линий связи (рис. 6.22, в);
- неисправный дискретный узел связи (рис. 6.22, г).

Сравнение рис. 6.21 и 6.22 показывает, что различные внутренние и внешние неисправности выражаются одинаковым их проявлением, к примеру, короткое замыкание или внутренний обрыв на входе или выходе внутри интегральных микросхем или же в соответствующей токопроводящей дорожке вне интегральных микросхем вызывает в итоге одинаковую ошибку.

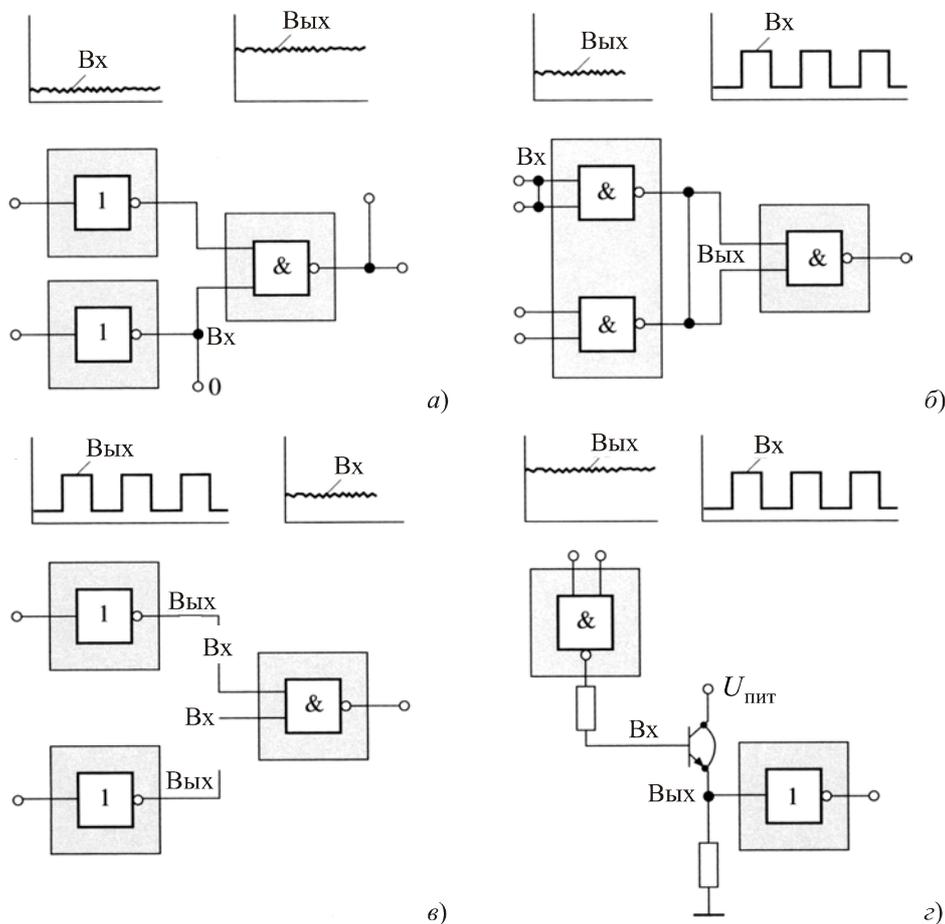


Рис. 6.22. Неисправности вне интегральных схем

Неисправности, приведенные на рис. 6.21, а и 6.22, в, показывают внутренний обрыв соединения между выходом и входом. В любом случае последовательность прохождения сигналов будет прервана.

На выходах можно измерить уровень сигнала. На входе устанавливается уровень напряжения от 1,4 до 1,5 В, который соответствует области для неопределенного уровня.

Представленные на рис. 6.21 и 6.22 короткие замыкания в добавление к этому действуют в соответствии с видами сигналов. Входы и выходы, которые соединены с напряжением питания ( $+U_{\text{пит}}$ ), принимают этот потенциал. Входы и выходы, которые соединены с опорным потенциалом, соответственно показывают напряжение, равное 0 В.

Короткие замыкания между выводами выходов или же входов друг с другом (см. рис. 6.21, *в* и 6.22, *б*) невозможно определить так же логично, как короткие замыкания с определенными потенциалами. Если накоротко замкнуты два входа, тогда они, как правило, перенимают уровень сигнала низкоомного источника управления.

На замкнутых выходах ИС результирующий выходной уровень зависит от состояний логических элементов на выходе. Если оба выхода синхронны, т. е. оба в любое время имеют один и тот же выходной уровень — высокий или низкий, то в этом случае здесь невозможно установить отличие от нормального режима работы без короткого замыкания выходов.

Если же оба выхода имеют противоположные уровни, тогда выходные транзисторы имеют дополнительные рабочие состояния. В случае высокого логического уровня на выходе элемента, верхний по схеме транзистор выходного каскада является открытым, а нижний — закрытым (рис. 6.23). Выходной каскад с низким логическим уровнем на выходе ведет себя противоположно. Таким образом, при замкнутых выходах двух каскадов на выходе схемы устанавливается низкий логический уровень, как это наглядно показано на рис. 6.23.

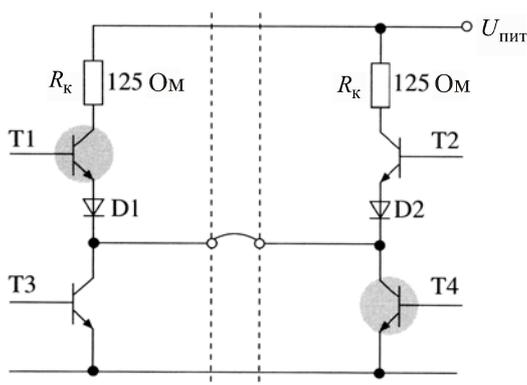


Рис. 6.23. Обоюдное влияние выходов

Путь тока через резистор  $R_k = 125 \text{ Ом}$ , по проводящим компонентам схемы — через открытый транзистор  $T1$ , диод  $D1$  и открытый транзистор  $T4$  — вызывает на сопротивлении коллектора  $R_k$  почти все падение напряжения, так что

на транзисторе Т4 и вместе с тем на выходе может быть установлен только низкий логический уровень напряжения.

Неисправность внутри цифровой логической схемы (см. рис. 6.21, з) может иметь в качестве последствий различные выходные уровни. Кроме определенных низкого и высокого уровней на выходе могут быть получены разные неопределенные уровни.

У схем на дискретных компонентах, в которых имеется неисправность, от ее причины зависит, какой уровень появится на выходе (см. рис. 6.22, з). Как правило, неисправные полупроводниковые элементы являются проводящими или непроводящими, так что на выходе появляются низкий (Н) или высокий (В) уровни. Схемное решение выходного каскада здесь также играет решающую роль для того, чтобы определить, какой в итоге уровень возникает (рис. 6.24).

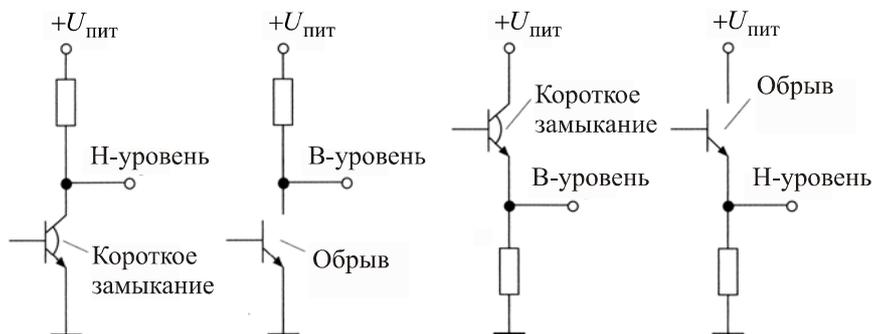


Рис. 6.24. Напряжение на выходах неисправных выходных каскадов

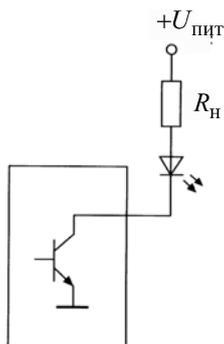


Рис. 6.25. Выход ИС с открытым коллектором

В случае отдельно подключенного выхода найти причину ошибок в ИС с открытым коллектором не вызывает никаких проблем (рис. 6.25). Если при на-

груженном с помощью резистора  $R_n$  выходе транзистор в интегральной микросхеме 7-сегментного двоично-десятичного дешифратора является открытым, то на выходе измеряется низкий логический уровень напряжения. В ненагруженном состоянии транзистор не проводит ток, а на выходе коллектора замеряется высокий уровень напряжения.

Более сложно складывается поиск ошибок в так называемых схемах "монтажное ИЛИ", или иначе "проводного ИЛИ". Здесь связаны несколько выходов логических ячеек, и с помощью внешнего нагрузочного резистора они подключены к напряжению питания  $+U_{пит}$  (рис. 6.26), т. е. все выходные транзисторы параллельно подключены через один общий нагрузочный резистор. Если в качестве неисправности имелся бы внутренний обрыв в выходном транзисторе, то эта ячейка оказывала бы такое же воздействие, как непроводящий (закрытый) транзистор, и не влияла бы на функционирование других узлов.

При коротком замыкании неисправный выходной транзистор должен принять низкий уровень напряжения, а также "навязать" этот уровень другому транзистору. Независимо от единичных последовательностей сигналов на единичных входах этот выходной уровень остается без изменения. И в этом случае уже невозможно определить дефектный инверсный каскад путем замера уровня напряжения.

В этом случае поступают также путем разделения отдельных выходов, и функция переключения проверяется отдельно для каждого элемента, чтобы определить неисправную интегральную схему или инвертирующий каскад (логическую схему "НЕ").

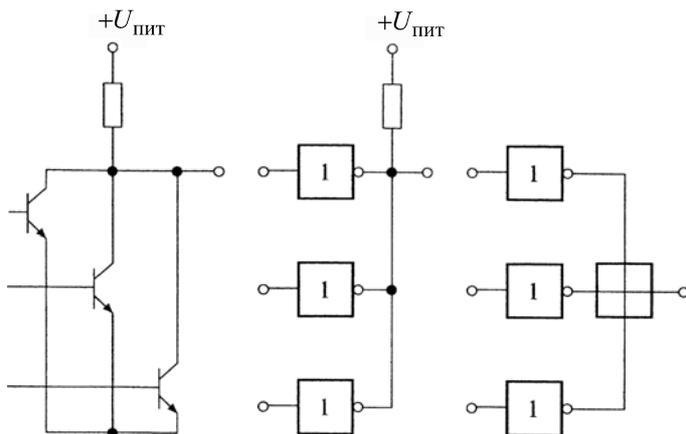


Рис. 6.26. Схема "монтажное ИЛИ"

## 6.5. Упражнения для закрепления полученных знаний

**УПРАЖНЕНИЕ 6.1.** На каких комбинационных элементах ТТЛ-схемы, изображенной на рис. 6.27, указанные уровни напряжения совпадают с логическими уровнями (высоким — В и низким — Н)?

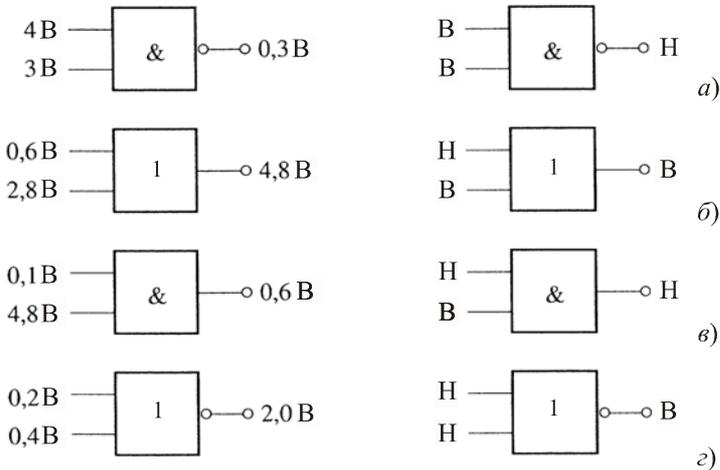


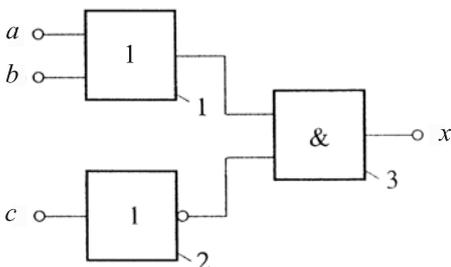
Рис. 6.27

**УПРАЖНЕНИЕ 6.2.** В приведенной схеме (рис. 6.28, слева) неисправен электронный логический элемент. Измерения напряжения выявили "таблицу истинности", показанную на рис. 6.28, справа.

Согласно полученным данным надо определить неисправный элемент.

Неисправным является:

- а) логический элемент 1;
- б) логический элемент 2;
- в) логический элемент 3.



<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>x</i>
0	0	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
1	1	0	1
0	0	1	0
1	0	1	1
0	1	1	0
1	1	1	1

Рис. 6.28

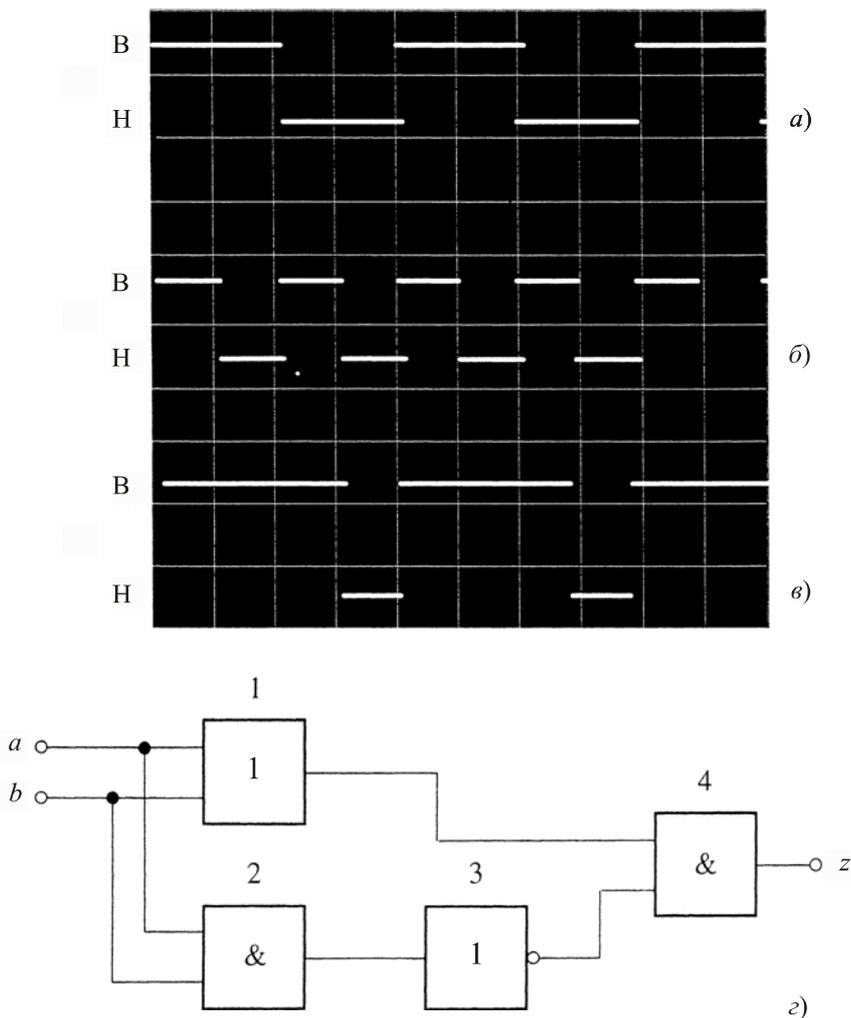


Рис. 6.29

**УПРАЖНЕНИЕ 6.3.** При измерении уровней напряжений с помощью осциллографа в цифровой комбинационной схеме (рис. 6.29, внизу) формируются представленные на рис. 6.29, а—в импульсы. Верхняя (рис. 6.29, а) и средняя (рис. 6.29, б) осциллограммы — это соответствующие сигналы на входах  $a$  и  $b$ , а нижняя осциллограмма (рис. 6.29, в) — на выходе  $z$  цифровой схемы.

Какое из высказываний соответствует действительности?

- а) Схема функционирует безукоризненно, т. е. комбинационные элементы схемы исправны.

- б) Неисправен логический элемент 1, т. к. на его входе, независимо от входных переменных, всегда обнаруживается высокий логический уровень.
- в) Неисправен логический элемент 2, т. к. на его выходе, независимо от входных переменных, всегда фиксируется низкий логический уровень.
- г) Неисправен логический элемент 3, потому что он не инвертирует.

Указания к решению задачи: составьте таблицу функционирования.

**УПРАЖНЕНИЕ 6.4.** В контрольных точках с КТ<sub>1</sub> до КТ<sub>5</sub>, т. е. на входах и выходах отдельных триггеров Тр<sub>1</sub>—Тр<sub>4</sub> четырехразрядного двоичного счетчика (рис. 6.30, а), были записаны осциллограммы, показанные на рис. 6.30, б.

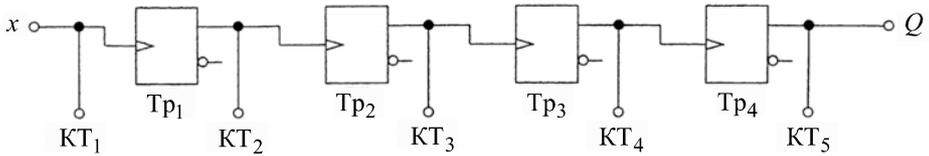


Рис. 6.30, а

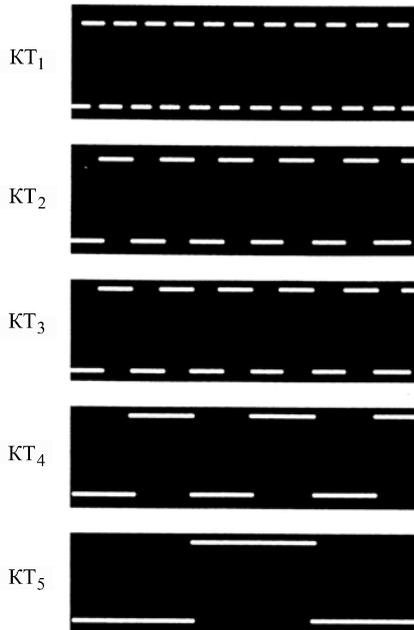


Рис. 6.30, б

Неисправной счетной ячейкой является:

- а) Триггер  $\text{Tr}_1$
- б) Триггер  $\text{Tr}_2$
- в) Триггер  $\text{Tr}_3$
- г) Триггер  $\text{Tr}_4$

**УПРАЖНЕНИЕ 6.5.** На рис. 6.31 показаны осциллограмма входного напряжения  $u_1$  и выходного напряжения  $u_2$  двоичного счетчика.

Этот счетчик выполняет коэффициент деления, равный:

- а) 2 : 1
- б) 4 : 1
- в) 8 : 1
- г) 16 : 1

Ответы можно посмотреть в приложении.

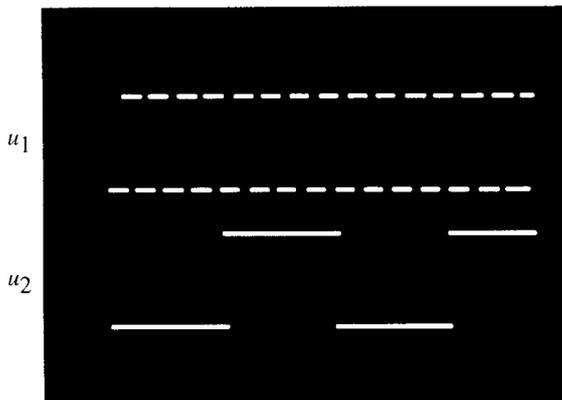


Рис. 6.31



## ГЛАВА 7

# Поиск неисправностей в системе с компьютерными схемами

### 7.1. Диагностика неисправностей в схемах с тремя состояниями

Применяемые в компьютерной технике электронные схемы отличаются от обычных цифровых схем всего лишь несколько другой структурой. Характерным для компьютерной схемы является наличие *шин*, состоящих из отдельных линий, к которым подключаются все входы и выходы схем, причем выходы имеют три состояния. В пассивном состоянии, когда не происходит передачи данных, все подключенные к линии шины выходы схем имеют самое высокое сопротивление.

*Интегральные схемы с тремя состояниями* отличаются от обычных цифровых ИС дополнительным управляющим входом, посредством которого, независимо от логического состояния на выходе (низкий или высокий уровень), могут быть включены в запертое (непроводящее ток) состояние оба выходных транзистора ИС, так что выход будет иметь очень высокое сопротивление (высокий импеданс). Сигналы управления разрешающие или запрещающие сигналы на выходе схем создаются специальной схемой управления, *микропроцессором* или микроконтроллером.

При *передаче данных* включается (разрешается) только предназначенный для отправки информации выход, и информация принимается на подключенных к линии входах. Это является принципом функционирования передачи данных в схемах с шинной архитектурой.

В качестве примера на рис. 7.1 изображена схема шины с тремя состояниями, в которой левая логическая схема, выступающая в качестве *передатчика* — в данном случае это схема "И-НЕ" с тремя состояниями, активна (имеется сигнал разрешения выхода), и на линии шины поэтому будет сформирован сигнал высокого логического уровня. Благодаря тактовому (стробирующему)

сигналу на ИС-приемнике данных (правый блок на рис. 7.1) этот высокий логический уровень считывается с шины.

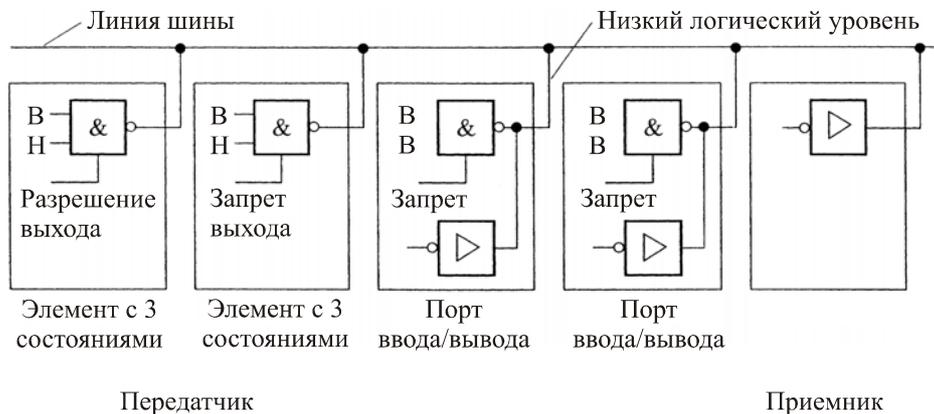


Рис. 7.1. Неисправная интегральная микросхема с тремя состояниями, подключенная к линии шины

Такая передача данных работает только при условии, что все интегральные схемы, подключенные к линии со стороны входа и выхода, сохраняют свою работоспособность.

На рис. 7.1 левый из двух *портов ввода/вывода* неисправен, а именно в нем не функционирует выход тремя состояниями, т. е. он не может быть включен в состояние высокого импеданса. Если эта интегральная микросхема на выходе будет постоянно иметь низкий логический уровень, то это приведет к тому, что на линии данных также установится низкий логический уровень, а не высокий, который должен бы быть при отсутствии неисправности. В результате сигнал ложного низкого уровня далее будет принят приемником. Таким образом, эта информационная линия в процессе передачи данных нагрузит этим низким логическим уровнем все подключенные и включенные на прием интегральные микросхемы. По подобным линиям передачи истинная информация может быть искажена, независимо от того, является ли эта шина адресной, управляющей или же шиной данных.

На рис. 7.2, в качестве примера, показана типичная выходная схема неисправного порта ввода/вывода, приведенного на предыдущем рис. 7.1.

В данном случае показанная неисправность — это короткое замыкание резистора, подключенного между напряжением питания и базой нижнего по схеме транзистора выходного каскада. В результате транзистор будет все время открыт, независимо от состояния информационного и управляющих входов. Таким образом, на выходе порта ввода/вывода постоянно будет присутство-

вать сигнал низкого логического уровня. Поиск ошибок в подобных схемах на печатной плате очень труден, поскольку все интегральные схемы, подключенные к этой линии шины, соединены параллельно.

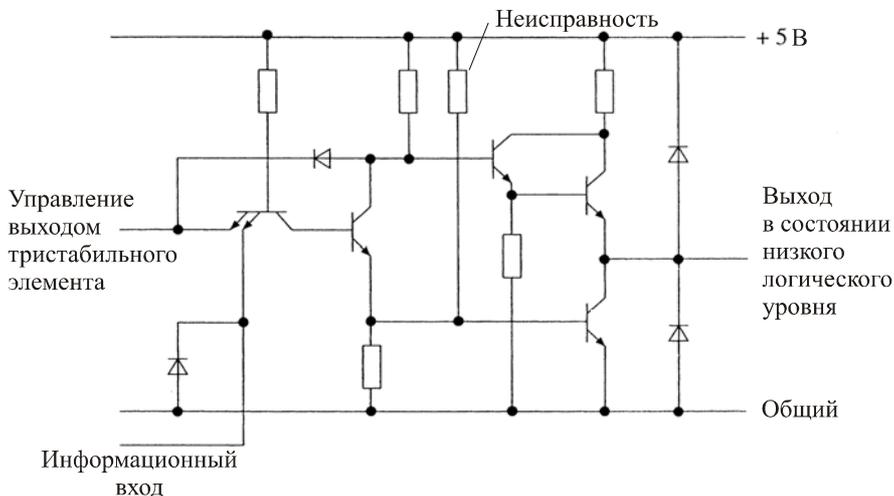


Рис. 7.2. Неисправность в интегральной микросхеме с тремя состояниями

Быстрая локализация повреждения возможна только при наличии контактной системы тестирования (см. главу 10) или логического анализатора, посредством которого может быть проверен поток данных шинной системы.

Для аппаратного обнаружения и устранения неисправностей на шине, кроме того, имеется еще только три следующие возможности:

- последовательно заменить интегральные микросхемы, которые подключены к неисправной линии и вставлены в панельки, установленные на плате;
- разъединить все подключенные выходы (путем выпаивания микросхем или разрезанием шин, что представляет собой достаточно трудоемкую задачу, занимает много времени и снижает надежность системы);
- сменить печатную плату.

## 7.2. Проверка статических функциональных параметров

При помощи измерения напряжения и тестирования логических уровней сигналов можно провести статические измерения. Так могут быть проверены статические параметры и состояния, а также замерены напряжения питания. Как и у других схем, здесь также можно измерить напряжение питания и ток

питания при помощи измерительных приборов. Информативные измерения состояний микрокомпьютера (функции шины управления, шины данных, адресной шины), т. е. динамические измерения, невозможно выполнить обычными измерительными приборами и даже логическими тестерами из-за высоких частот его работы.

В режиме ожидания (Wait) процессора уровень напряжения на отдельных линиях шины можно измерить всеми традиционными измерительными приборами (мультиметром, логическим тестером).

Здесь следует обратить внимание на линии шины, которые при работе в режиме ожидания (Wait) находятся в состоянии высокого импеданса. При недостаточно большом внутреннем сопротивлении измерительного прибора результаты измерений оказываются не точными. Благодаря простой эксплуатации и обслуживанию использование логических тестеров целесообразно при поиске неисправностей и для контроля отдельных уровней сигналов на микропроцессоре или микроконтроллере, которые с помощью сигнала низкого логического уровня на имеющемся входе готовности ( $\overline{\text{READY}}$ ) могут быть переведены в режим ожидания (Wait).

В этом случае следует использовать только те логические тестеры, у которых наряду с индикацией высоких и низких логических уровней имеется возможность отображения неопределенных ("плохих") уровней, находящихся вне спецификации интегральной схемы.

На представленной структурной схеме (рис. 7.3) статические функциональные входы RESET (сброс) и HOLD (запрос на захват шины) микропроцессора могут быть приспособлены для проверки работоспособности шины данных и адресной шины.

Статический вход RESET (активный высокий логический уровень) удерживает все адресные магистрали на низком логическом уровне (адрес 0) так долго, пока он не перейдет на уровень, равный 5 В. Это состояние можно проверить на каждой отдельной адресной магистрали через любой промежуток времени при помощи обычного измерительного прибора.

Сигнал HOLD на одноименном выводе переводит выводы шины данных, адресной шины, а также выводы, соответствующие шине управления, в состояние высокого импеданса. Вход HOLD может быть сколь угодно долго подключен к напряжению питания +5 В.

В этом состоянии можно проверить каждую отдельную линию управления и адреса при помощи измерительного прибора, измеряя напряжение, соответствующее состоянию высокого импеданса, т. е. напряжение между 2 и 3 В. При этом измерении большое значение имеет то, что все шины данных и адреса показывают примерно одинаковую величину напряжения.

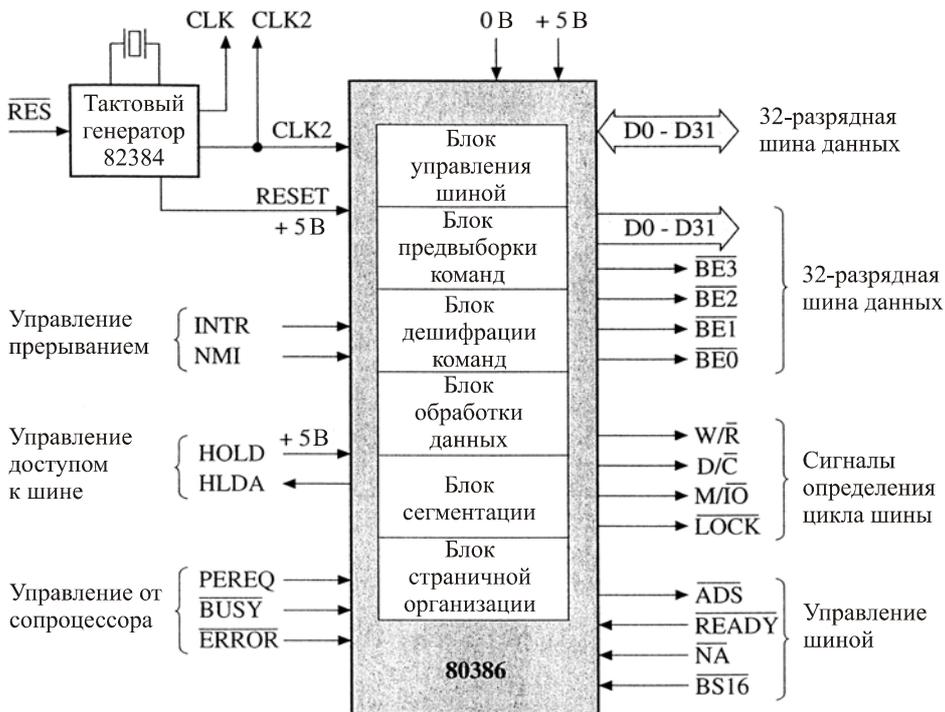


Рис. 7.3. Структурная схема микрокомпьютера на базе микропроцессора 80386

## 7.3. Проверка динамических функциональных параметров

Измерения на системных линиях (шинах адреса, данных и управления) целесообразны только при наличии двухканального, а еще лучше четырехканального осциллографа, потому что при большинстве измерений должны быть приняты в расчет данные и временные взаимосвязи сигналов, как минимум, двух линий, например, информация на линии передачи данных в зависимости от линии управления.

При помощи измерения в *микропроцессорных системах* (МПС) пытаются определить следующие основные сведения:

- временные соотношения сигналов*, т. е. в правильной ли взаимосвязи находятся сигналы на линиях адреса или данных по отношению к сигналам управления;
- состояние шин*, т. е. правильное ли значение информации в машинном коде имеют линии шин.

При измерении, согласно рис. 7.4, определение запускающего синхронизирующего импульса с правильным фронтом играет решающую роль для измерений с верным временным отношением сигналов.

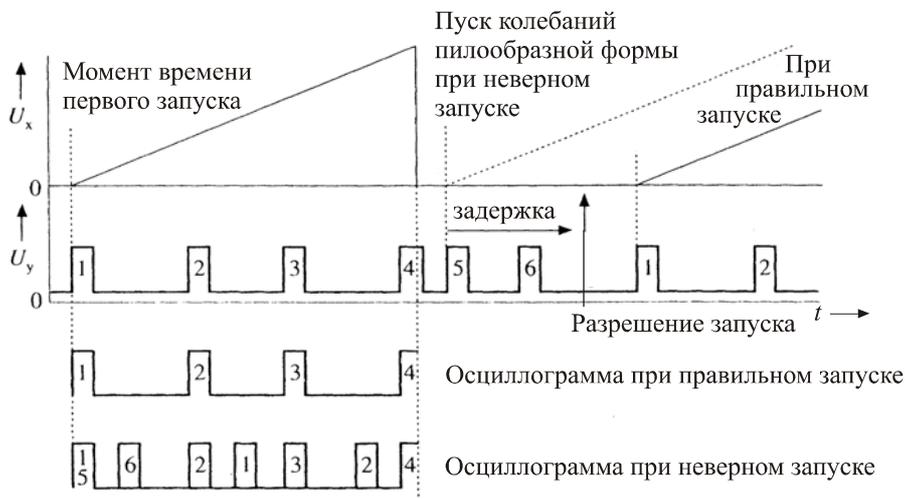


Рис. 7.4. Запуск развертки осциллографа с задержкой момента времени запуска и без него

При измерении очень важен правильный выбор сигнала синхронизации. Потому что все, что появляется на импульсных диаграммах осциллографа — *осциллограммах*, имеет отношение к временной точке запуска синхронизации. Если эта точка не одинакова для всех измерений, то тогда возникают погрешности и ошибочные оценки отображений импульсных данных, которые при известных условиях могут быть вообще не выявлены.

Рис. 7.4 показывает, что при постоянном значении времени развертки неподвижное изображение или же изображение без "импульсов призраков" (которые показаны на нижней осциллограмме при неверном запуске) возможно только тогда, когда осциллограф имеет задержку запуска синхронизации, а именно *ждушую синхронизацию*.

Методом проб и ошибок *ждушую синхронизацию* нужно настраивать до тех пор, пока не отобразится надлежащая временная диаграмма импульсов.

На рис. 7.5 показано, как можно получить верную диаграмму импульсов, если осциллограф не имеет *ждушую синхронизацию*. Разумеется, что при настройке генератора колебаний пилообразной формы развертки требуется очень тонкое чутье. Дело в том, что схема запуска развертки, после того как завершится формирование очередного импульса пилообразной формы, начинает формировать следующий импульс сразу же при появлении соответствующего фронта первого измеряемого импульса.

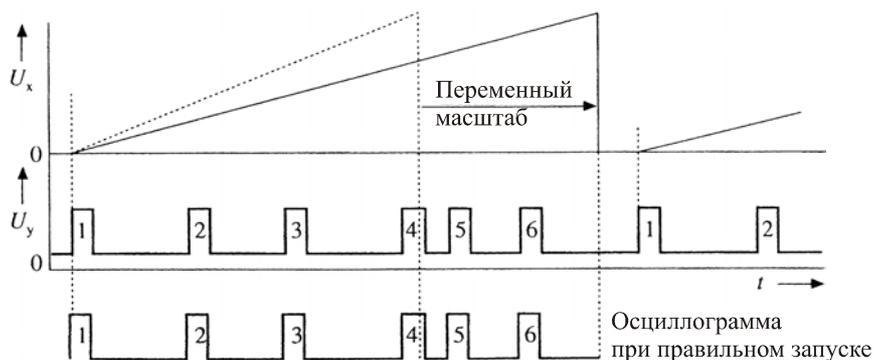


Рис. 7.5. Запуск развертки без задержки момента времени запуска

Если после одного из двух рассмотренных методов запуска развертки изменить программу, состоящую более чем из 5 машинных команд в последовательности ее импульсов, то интервал времени между сигналами запуска развертки будет слишком большим. В этом случае осмысленный анализ диаграммы импульсов теперь едва ли возможен. Если же у осциллографа все же имеется вторая временная развертка, то диаграмма импульсов может быть растянута как угодно (рис. 7.6).

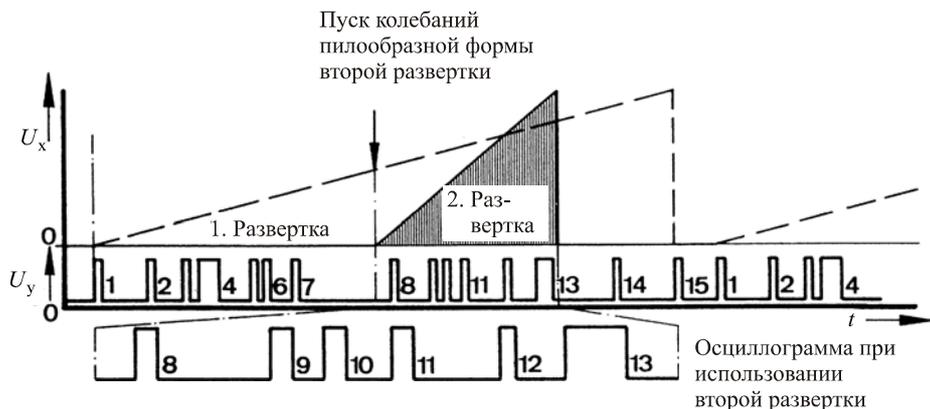


Рис. 7.6. Растяжение изображения со второй временной разверткой

При анализе импульсных диаграмм очень хорошо, когда удастся параллельно представить более двух цепочек импульсов. Потому что в этом случае становится возможным провести взаимосвязь друг с другом различных функциональных сигналов и сравнить их друг с другом в любой момент времени.

В отличие от осциллографа *логический анализатор* для поиска неисправностей в схемах (аппаратные проблемы) запоминает сигналы с помощью посто-

янного опроса входов (в зависимости от устройства может быть от 8 до 48 входных каналов).

Тактовая частота приема данных настраивается внутренне, или же ее можно подключить и внешне. Принимаемая информация постоянно сохраняется. Если память заполнена, то самая старая информация заменяется новой.

При помощи логической системы запуска и регулируемой задержки прием сигналов приостанавливается.

После произведенного запуска сохраняется та информация, которая появилась до момента запускающего импульса и установленной задержки.

Изображение импульсных диаграмм на экране происходит за счет постоянного чтения информации из памяти.

Логические анализаторы могут распознавать только логические уровни сигналов (высокий или низкий), поэтому они имеют пороговое устройство (триггер Шмитта) на всех входных каналах. Пороговое значение можно установить в соответствии с различными типами логических схем, например, для ТТЛ-, ЭСЛ- и КМОП-логики.

Путем запроса входящей информации с помощью сигнала считывания (опроса) импульсы могут быть сфальсифицированы или могут не появиться на импульсной диаграмме. Особенно важным при опросе является распознавание очень коротких импульсных помех (остроконечные импульсы на рис. 7.7).

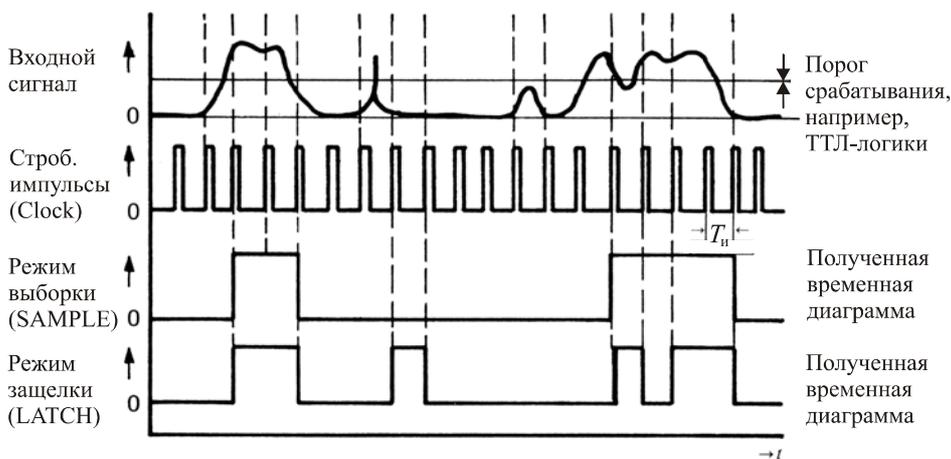


Рис. 7.7. Запуск логических анализаторов

В режиме работы SAMPLE (режим выборки) отображаются состояния, которые совпадают с фронтом входного считываемого сигнала.

В режиме работы LATCH (режим "защелки") входные сигналы фиксируются в триггерах типа "защелка", которые в дальнейшем могут быть опрошены фронтом сигнала считывания.

При запуске логических анализаторов имеется значительное отличие от осциллографа. У логических анализаторов для временной развертки не используются импульсы пилообразной формы, а информация сохраняется в запоминающем устройстве.

Поэтому при работе с логическими анализаторами обычно имеют дело с четырьмя различными режимами запуска.

#### □ *Предзапуск*

Здесь прием импульсов в память останавливается в тот момент, когда наступает событие переключения. Так становится возможным исследовать процессы перед переключением.

#### □ *Послезапуск*

Если требуется изучить функционирование исследуемого устройства после события переключения, то тогда используют этот режим записи, т. к. память в этом случае заполняется только после выбранного события переключения.

#### □ *Серединный (отцентрованный) запуск*

Этот режим запуска представляет собой смещение двух предыдущих режимов запуска. В этом режиме исследуемые импульсы фиксируются между одним и другим выбранным событием, т. е. находятся в середине между ними.

#### □ *Комбинаторный запуск*

Этот режим запуска позволяет выбирать различные логические уровни, которые определяют условие запуска логического анализатора. Каждый входной канал может быть настроен с помощью переключателя на режим срабатывания: "высокий уровень" (High), "низкий уровень" (Low) или "любой" (произвольный).

Кроме представления в качестве импульсной временной диаграммы при использовании логических анализаторов данные могут быть представлены и в виде аналогового отображения. Для этого применяется так называемый режим "Mapping" (отображение). Аналоговое отображение используется для лучшего визуального анализа содержимого памяти анализатора.

У специальных логических анализаторов для проверки программного обеспечения ход обработки данных компьютера изображается на дисплее в мнемонике, соответствующей типу процессора. Отсюда получают выборку из программ, по которой судят, как работает процесс.

Существенное различие между логическими анализаторами, ориентированными на программное (ПО) и аппаратное обеспечение (АО), связано с возможностями запуска.

У логического анализатора, ориентированного на программное обеспечение, запуск регулируется не аппаратным обеспечением, а программным, т. е. в распоряжении пользователя находятся машинные команды на запуск или элементы программы запуска. Такими элементами могут быть: события, команды, комбинированные события, комплементарные события, комбинированные команды и т. д. Поэтому возможно запустить логический анализатор словом данных, которые должны быть записаны в заданной подпрограмме в определенную ячейку памяти.

## 7.4. Систематизированный поиск неисправностей в компьютерной схеме

На рис. 7.8 изображена схема, представляющая собой интерфейс для работы с двумя шаговыми электродвигателями.

*Шаговые двигатели* используются, например, в АЦПУ (алфавитно-цифровом печатающем устройстве), в устройстве считывания с перфоленты, плоттерах, медицинских приборах, фотонаборных машинах, электромеханических счетчиках, CD-приводах (дисководах) и т. д.

Шаговый двигатель запускается постоянным током. У него есть две или более обмоток, через которые протекает ток и которые поэтому вызывают в статоре определенное магнитное поле. Таким образом, ротор задерживается в определенном положении. Количество обмоток определяет точность шагов. Если вал двигателя осуществляет пошаговое вращательное движение, то одна из обмоток должна быть переключена, выключена или включена. Так ротор перемещается в новое стабильное положение (шаг). В случае если в шаговый двигатель подается достаточно большое количество команд на переключение в секунду (частота переключений), то вал двигателя осуществляет непрерывное вращательное движение.

Токовые импульсы, необходимые для работы шагового двигателя, обеспечиваются транзисторами (транзисторными каскадами) с T01 по T08, использующими напряжение питания +26 В. Транзисторы управляются непосредственно с выходов микросхемы ввода/вывода DD1 типа 8212.

Для управления током в обмотках для каждой фазы (А и В) необходимо по два транзистора. При эксплуатации ток постоянно течет только через одну половину обмотки. Шаговые двигатели работают в униполярном (однополюсном) режиме (рис. 7.9, а).

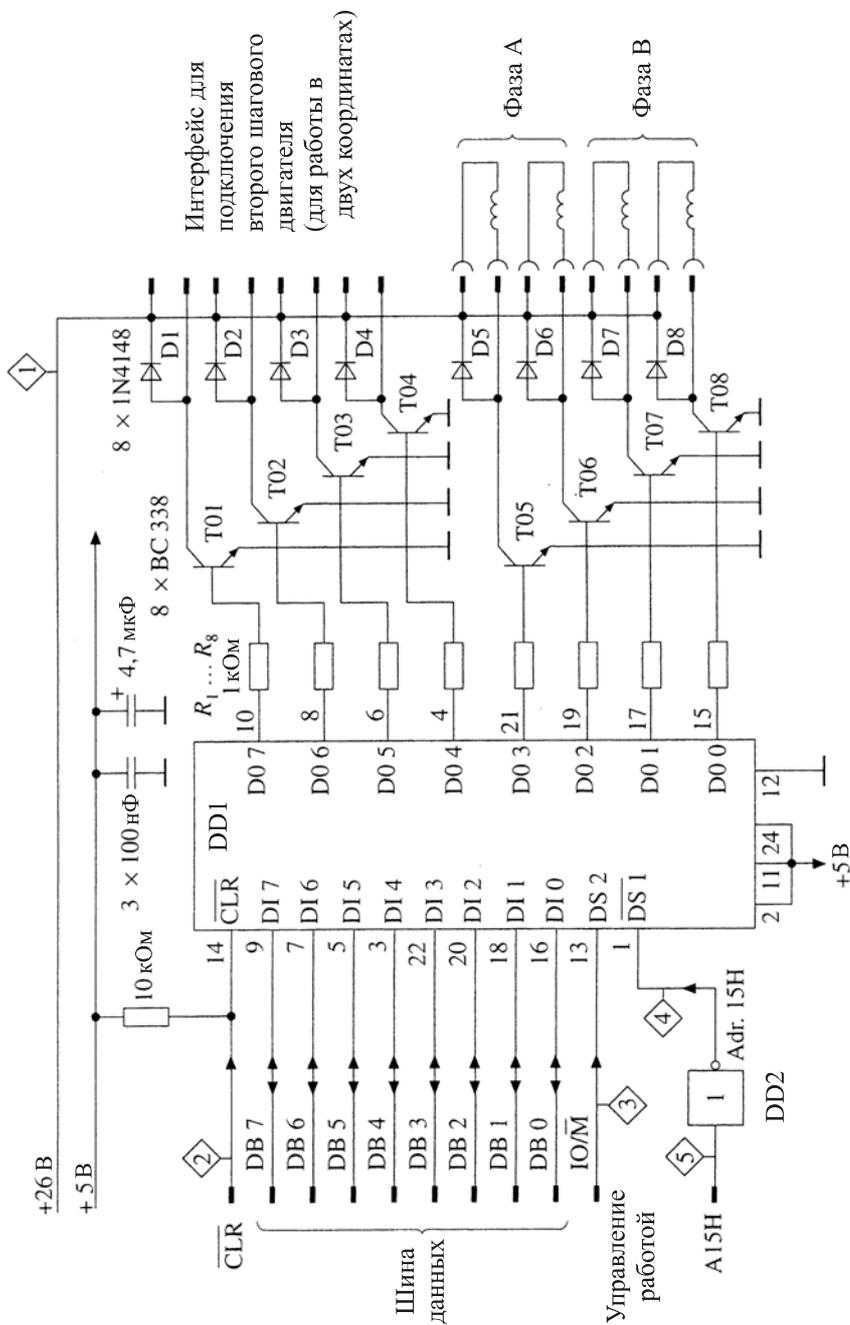


Рис. 7.8. Схема управления шаговым двигателем с помощью микропроцессора

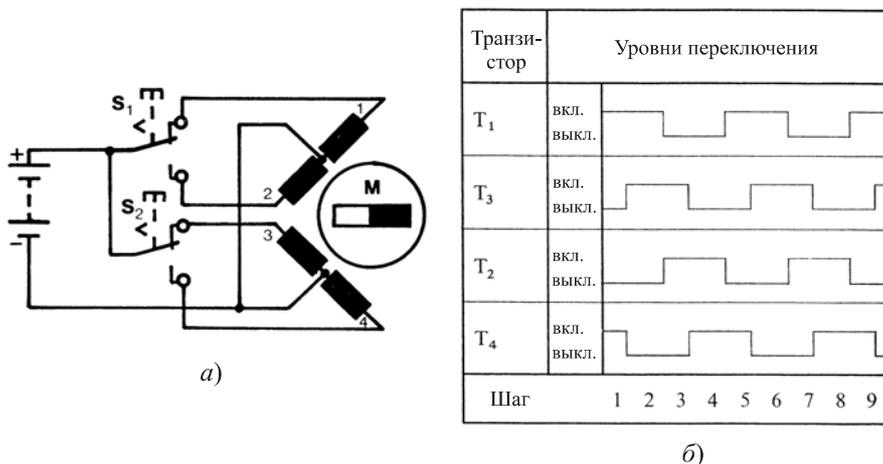


Рис. 7.9. Функционирование однополюсного шагового двигателя: устройство (а); диаграмма управляющих импульсов (б)

Если полярность статора меняется инверсией направления тока, то ротор выполняет один шаг. При каждом шаге одна из полуобмоток с помощью открытых (проводящих) транзисторов в фазах А и В проводит ток. Другие две полуобмотки с помощью двух других закрытых транзисторов — обесточены (рис. 7.9, б).

Для систематизированного поиска неисправности нужно исходить из того, что подключенный шаговый двигатель больше не управляется, несмотря на то, что он работоспособен, как и все другие функциональные узлы компьютера.

Поскольку двигателями управляет компьютер, то должны быть проверены как программное обеспечение (ПО) в виде управляющей программы, так и аппаратное обеспечение, т. е. схема управления (см. рис. 7.8).

Для проверки ПО имеется несколько различных возможностей. Если ранее функциональные узлы управлялись микропроцессором, то тогда о функционировании ПО можно не беспокоиться.

Выборочно, при помощи осциллографа, можно также перепроверить наличие импульсов на шине данных.

Нужно также проверить, зависит ли управление шагового двигателя от функционирования другого аппаратного обеспечения, например, токовой защиты или температурного автоматического выключателя.

Если эти проверки функциональности не выявляют никаких негативных результатов, то из практических соображений следует осуществить дальнейшие шаги поиска неисправности (рис. 7.10).

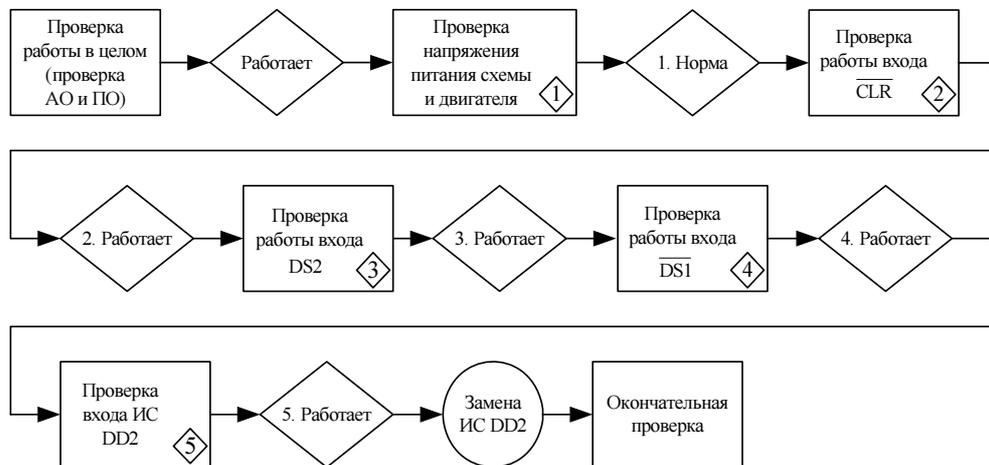


Рис. 7.10. Схема последовательности поиска неисправности

Так как шаговый двигатель вообще никак не работает, то тогда можно отгальвироваться от того, что выходы микросхемы ввода/вывода DD1 от DO 0 до DO 3 не являются неисправными.

Сюда же можно включить также 4 соответствующих резистора, транзисторы с T05 по T08 и диоды D5—D8.

Следующим шагом (<1> на рис. 7.10) является проверка напряжения питания схемы (+5 В) и двигателя (+26 В). Если значение замеренного напряжения питания находится в границе допуска, то далее по порядку должны быть проверены управляющие входы микросхемы ввода/вывода DD1. Эта микросхема имеет три управляющих входа:  $\overline{\text{CLR}}$ , DS 2 и  $\overline{\text{DS}} 1$ . Следует учесть, что управляющие входы  $\overline{\text{CLR}}$  и  $\overline{\text{DS}} 1$  имеют активный низкий логический уровень.

Следующим по порядку проверяется управляющий вход  $\overline{\text{CLR}}$  (шаг <2> на рис. 7.10). Этот вход через резистор сопротивлением 10 кОм во время отсутствия сигнала  $\overline{\text{CLR}}$ , т. е. при выполнении управляющей фазы двигателя, должен показать высокий логический уровень напряжения (+5 В), а при формировании этого сигнала микрокомпьютером на входе должен быть низкий логический уровень.

Измерения на управляющих входах должны быть проведены во время выполнения программы. Программа, управляющая работой шагового двигателя, формирует соответствующие шаговые импульсы на информационные входы от DI 0 до DI 7 только в фазе управления шаговым двигателем. Только в начале выполнения программы она должна сформировать сигнал первоначального сброса  $\overline{\text{CLR}}$ .

Поэтому вполне достаточно установить, что управляющая линия в процессе работы неоднократно меняют свой уровень. После выполнения проверки следует, что блок настраивался несколько раз, и входы управления реагируют соответствующим образом.

Следует обратить внимание на то, что исходное положение уровней на входах управления всегда соответствует неактивной рабочей фазе. Микрокомпьютер (или программа) включает микросхему DD1 на прием данных только, если она должна получить данные. В ином случае в ходе выполнения программы микросхема по линиям управления не выбрана на прием данных. Для сигнала  $\overline{\text{CLR}}$  это означает высокий логический уровень в состоянии покоя и низкий логический уровень при активизации программы управления шаговым двигателем.

Следующим шагом (<3> на рис. 7.10) проверяется вход DS 2 (Data Select — выбор данных), который управляется сигналом микрокомпьютера  $\text{IO}/\overline{\text{M}}$  (Input-Output/Memory — ввод-вывод/память). Этот вход в процессе выполнения программы также должен изменять свой уровень. В данном случае вход должен принимать низкий логический уровень в состоянии покоя и высокий логический уровень в активном состоянии, т. е. когда непосредственно осуществляется управление шаговым двигателем. После проверки также подтверждается наличие управляющего сигнала на входе DS 2.

Следующим шагом (<4> на рис. 7.10) проверяется вход  $\overline{\text{DS1}}$ . Это второй вход выбора данных, отличающийся от уже рассмотренного только низким активным логическим уровнем. На этом входе должен быть высокий логический уровень в состоянии покоя, т. е. когда нет управления шаговым двигателем, и низкий логический уровень в активном состоянии. Сигнал на этот вход поступает после инвертора DD2, на который в свою очередь сигнал A15H (15-й разряд адреса) приходит от микропроцессора. В процессе измерения выяснилось, что на этот вход постоянно поступает сигнал высокого логического уровня. Это приводит к тому, что не происходит отпириания информационных входов DI 0 до DI 7 микросхемы DD1 на ее выходы.

Поскольку на пути прохождения сигнала A15H имеется микросхема DD2, то следующим измерением (<5> на рис. 7.10) нужно проверить сигнал на входе этого инвертора. После измерения выясняется, что на вход приходят изменяющиеся по уровню импульсы с адресной шины.

Таким образом, в качестве неисправности локализован инвертор DD2, который необходимо заменить новой микросхемой.

После этого надо еще раз проверить все функции устройства, поскольку возможно, что другие инверторы этой шестизлементной микросхемы могут быть связаны с другими блоками устройства.

## 7.5. Поиск неисправностей в схемах интерфейсов

Поиск неисправностей в управляемых компьютером схемах из-за взаимовлияющих действий аппаратного и программного обеспечений является несколько трудоемким занятием, как это стало понятным из предыдущего раздела, а также предполагает, прежде всего, наличие знаний интегральных микросхем, используемых в интерфейсах, и учет следующих указаний и советов:

- контакты шины данных блока ввода/вывода не подключаются микрокомпьютером к шине, если для этого блока данные не передаются или когда микрокомпьютер не запрашивает их. При этом выходы переключаются в состояния высокого импеданса. Как правило, для этого используются специальные управляющие входы выбора режима работы MOD или MD (MODE — режим) для передачи на них микрокомпьютером сигнала низкого логического уровня;
- выбор аппаратного обеспечения блоков ввода/вывода происходит посредством входов DS (Data Select — выбор данных) или CS (Chip Select — выбор кристалла (микросхемы)). Эти входы в большинстве случаев спарены и объединены логической операцией "И" и имеют разные активные уровни. Выбор устройства по этим входам осуществляется сигналами RD (Read — чтение), WR (Write — запись) или по адресной шине микрокомпьютера;
- по входам CLR (Clear — очистить) и RESET (сброс) может стереться последнее сохраненное слово данных блока ввода/вывода.

Существенной особенностью управляемых компьютером схем является наличие специальных сервисных программ управления и сервисных интерфейсных модулей. Сервисные подпрограммы в управляющей программе, которые часто можно запросить у производителей блоков ввода/вывода, значительно облегчают поиск неисправности применительно к вопросу: ошибки аппаратного или программного обеспечения?

Ламповый тестер, обычно реализуемый на светодиодных и жидкокристаллических индикаторах, иногда предусматривается и для аппаратной стороны блока ввода/вывода. Таким путем можно очень быстро ответить на вопрос о неисправности.

На следующем примере в качестве причины возникновения неисправности в интерфейсе на светодиодах (рис. 7.11) предполагается, что горят постоянно два зеленых светодиода на выходе DO5, другие же диоды работают верно.

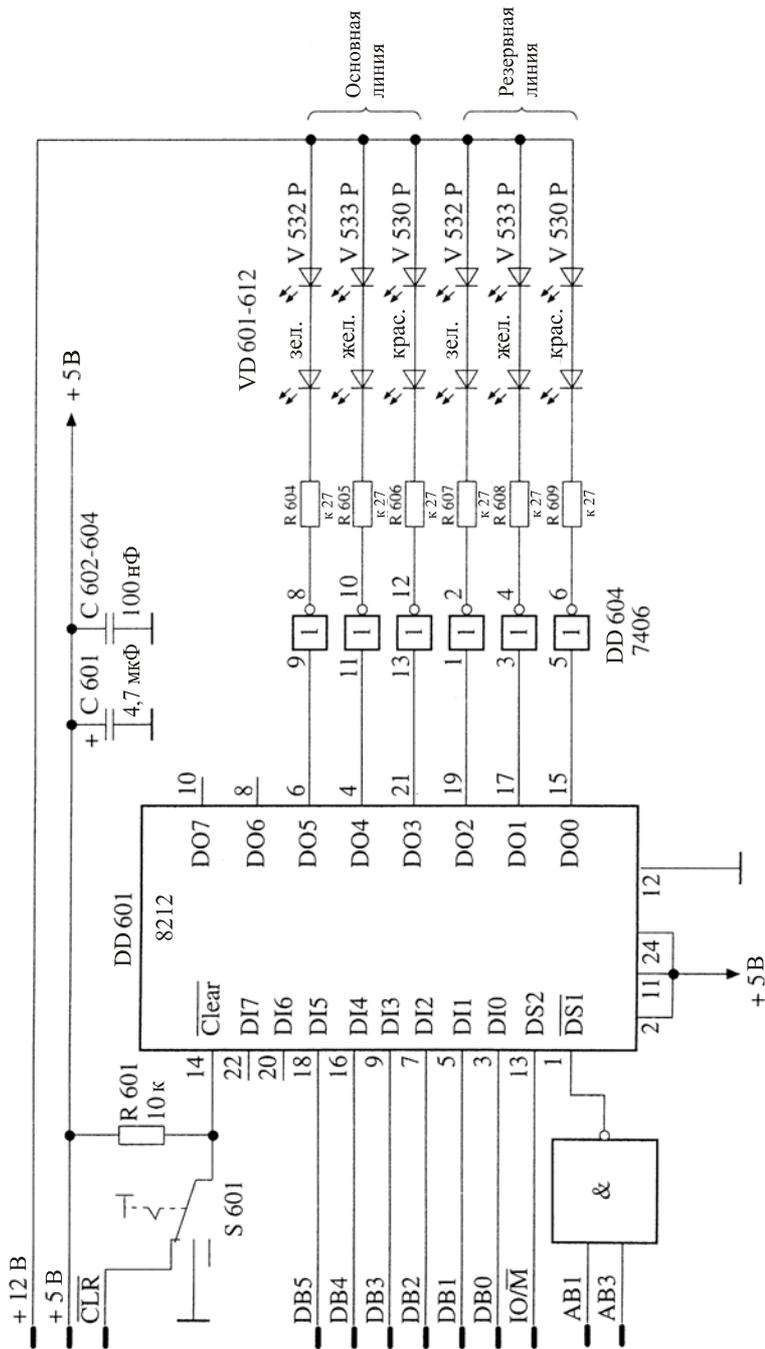


Рис. 7.11. Интерфейс на светодиодах

Для этого примера могут быть следующие возможные неисправности:

- неисправна программа;
- неисправна линия шины данных DB5;
- неисправна микросхема ввода/вывода DD601;
- неисправен инвертор DD604;
- неисправен резистор R604;
- исчезло напряжение питания.

Признаки неисправности и надлежащая работа других светодиодов исключают следующие возможные неисправности:

- линия шины данных DB5 не является дефектной, потому что другие светодиоды включатся в соответствии с программой, а для правильного выполнения программы нужны все линии шины данных;
- напряжения питания имеются, потому что все элементы интегральных схем и другие диоды работают.

Таким образом, остаются только следующие возможные неисправности:

- неисправен программный блок для управления этим светодиодом;
- неисправна микросхема ввода/вывода DD601;
- неисправен инвертор DD604;
- неисправен резистор R 604.

То, что в этом программном блоке образовалась дефектная структура данных, мало вероятно. Однако, несмотря на это, существует возможность, что по определенному адресу оперативной памяти (RAM) находится неисправный бит, и этот бит всегда остается на низком или высоком логическом уровне (0 или 1).

Поэтому сначала нужно провести сброс аппаратного обеспечения (напряжение питания) или сброс ПО (клавиша). Таким образом, все информационные функции ставятся в исходное положение, и проверяется память полупроводников. Если программа находится на дисковом накопителе (CD или жесткий диск), то ее можно проверить через обновленную перезапись *программы резервного копирования* (Back-up-программа).

Если программы сохранены на *стираемом программируемом постоянном запоминающем устройстве* (СППЗУ), то сначала нужно провести следующие проверки функциональности аппаратного обеспечения, прежде чем менять модуль памяти на печатной плате. Это предпринимается, потому что, как уже было сказано, вероятность ошибки программы и, следовательно, памяти при этой дефектной конфигурации очень мала.

Итак, в качестве вероятных неисправностей остаются три аппаратные ошибки, которые можно проверить следующим образом.

С помощью переключателя S 601 есть возможность стереть (очистить) информацию на выходах микросхемы ввода/вывода DD601. Вход Clear имеет низкий активный логический уровень, поэтому переключатель S 601 нужно поставить в среднее (нейтральное) положение.

В этом положении замеряется низкий логический уровень на выходе DO5, при этом два последовательно включенных зеленых светодиода должны погаснуть. Если же на выходе DO5 будет высокий логический уровень, то микросхему ввода/вывода DD601 на этом выходе можно считать дефектной. Если же на выходе DO5 замеряется напряжение низкого логического уровня, то причиной неисправности остается только инвертор DD604 или резистор R 604.

Два светодиода исключаются, потому что они оба постоянно горят. В случае неисправности они бы постоянно не горели.

Вместо переключателя S 601, который имеется в этом примере схемы, вход Clear можно было бы подсоединить к "земле" (GND) при помощи любого провода.

Следующий пример для управляемой компьютером схемы показан на рис. 7.12.

Двухразрядный (двухзначный) цифровой индикатор подключается через микросхему ввода/вывода 8212. 7 сегментов обоих десятичных разрядов индикатора управляются с выходов DO 0 по DO 6. Сигналом с выхода DO 7 осуществляется поочередное подключение разрядов индикатора к напряжению питания +5 В. В качестве неисправности устанавливается ошибочная индикация с последующими описываемыми характеристиками.

Введенные в компьютер данные отображаются индикатором неверно. Постоянно выводятся два одинаковых числа, причем левый старший разряд индикатора перенимает значение числа правого младшего разряда, например:

- введенное число 53 отображается как 33;
- введенное число 77 отображается как 77;
- введенное число 17 отображается как 77;
- введенное число 30 отображается как 00.

Для того чтобы можно было лучше проанализировать эту неисправность, нужно уяснить себе процесс функционирования программного и аппаратного обеспечения при помощи *блок-схемы программы*, приведенной на рис. 7.13.



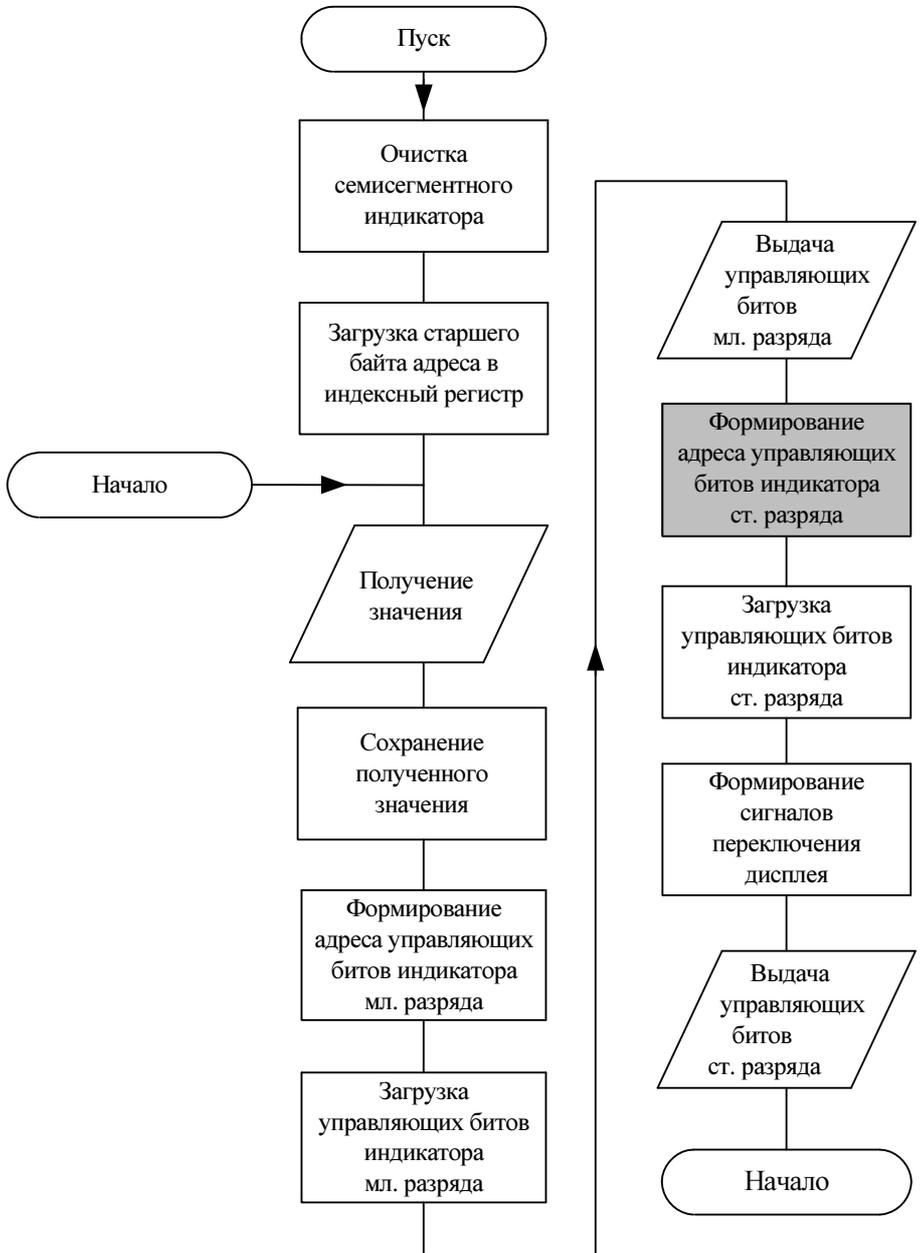


Рис. 7.13. Блок-схема программного обеспечения для схемы интерфейса индикатора, приведенной на рис. 7.12

Таким образом, младший правый разряд индикатора с помощью транзистора Т3 всегда подключен к напряжению +5 В, пока выход микросхемы DO7 не переключится на низкий логический уровень. Вместе с тем, при двухразрядном вводе чисел младший десятичный разряд числа сразу же выводится программой. Для индикации старшего разряда надо дополнительно сформировать сигнал переключения индикаторов на выходе DO7.

При выводе старшего разряда на индикаторе выход DO7 переключается на низкий логический уровень, соответственно транзисторы V2 и V3 закрываются, а транзистор V1 открывается. Таким образом, младший разряд не может перенять второе значение. Если же мы перенесем эти знания на погрешность показаний прибора, то тогда можно установить, что могут быть исключены неисправности в программе, неисправности в микропроцессоре, неисправности в шине данных и адреса или в напряжениях питания. Элементы индикации также не показывают неисправности в сегментах индикатора.

На основании ложного значения индикатора в качестве причины неисправности можно принять в расчет только микросхему ввода/вывода DD1 и переключающие транзисторы V1, V2 и V3. Функционирование микросхемы ввода/вывода может быть проверено с помощью переключателя.

В нейтральном (среднем) положении переключателя все выходы микросхемы DD1, в том числе и DO7, независимо от программного управления, переключаются на высокий логический уровень. Следовательно, показания индикаторов должны погаснуть.

Если так и происходит, то в этом случае в качестве причины возникновения неисправности во внимание принимаются только переключающие транзисторы V1 и V2 для управления старшего разряда индикатора.

Ошибочные показания позволяют сделать вывод, что старший разряд индикатора постоянно подключен к напряжению +5 В. Это может происходить из-за того, что или транзистор V2 постоянно заперт, а, соответственно, транзистор V1 постоянно открыт, или же из-за короткого замыкания в транзисторе V1 между базой и эмиттером он постоянно проводит ток.

## 7.6. Упражнения для закрепления полученных знаний

**УПРАЖНЕНИЕ 7.1.** Два накопительных регистра А и В соединены между собой шиной данных. Необходимо передать данные с регистра В в регистр А. В каком регистре нужно отключить режим работы с высоким импедансом HI (High Impedance), а какой следует тактировать или иначе стробировать?

- |           |              |
|-----------|--------------|
| HI        | Стробировать |
| а) Рег. А | Рег. В       |
| б) Рег. В | Рег. А       |

- в) Рег. А            Рег. А  
г) Рег. В            Рег. В

**УПРАЖНЕНИЕ 7.2.** В каком рабочем режиме микропроцессора при помощи измерительного прибора с внутренним сопротивлением 40 кОм можно проверить уровень напряжения на шине адреса и данных?

- а) в режиме готовности (Ready);  
б) в режиме ожидания (Wait);  
в) в режиме сброса (Reset);  
г) в режиме высокого импеданса (Hi).

**УПРАЖНЕНИЕ 7.3.** На скольких линиях шины адреса и данных можно одновременно проводить замеры при помощи двухлучевого осциллографа?

- а) на 8 линиях шины;  
б) на 4 линиях шины;  
в) на 2 линиях шины;  
г) на 1 линии шины.

**УПРАЖНЕНИЕ 7.4.** Какую функцию должен иметь осциллограф, чтобы при запуске с постоянным масштабом времени при измерении получилось стабильное импульсное изображение?

- а) внешний запуск;  
б) внешний вход усилителя горизонтальной развертки (по координате X);  
в) ждущую синхронизацию;  
г) синхронизацию от сети 50 Гц.

**УПРАЖНЕНИЕ 7.5.** На рис. 7.11 изображена схема интерфейса на светодиоде, в котором все светодиоды не горят. Проверка функционирования ПО не выявила никаких ошибок. Работа шины данных и шины адреса — безукоризненны. Рабочие напряжения в наличии.

Какие возможные неисправности здесь могут иметься?

- а) неисправна микросхема ввода/вывода DD601;  
б) неисправен переключатель S601;  
в) неисправен логический элемент "И-НЕ";  
г) неисправна микросхема DD604.

**УПРАЖНЕНИЕ 7.6.** Какие возможности по локализации неисправности имеются в упражнении 7.5 при использовании переключателя S601?

- а) можно проверить сам переключатель;
- б) можно проверить микросхему ввода/вывода DD601;
- в) можно проверить элемент "И-НЕ";
- г) можно проверить микросхему DD604.

**УПРАЖНЕНИЕ 7.7.** Схема управления шаговым электродвигателем (рис. 7.8) приводит в движение два шаговых двигателя. Только один шаговый двигатель вращается рывками, неравномерно. Второй шаговый двигатель работает нормально. Как можно наиболее быстро установить, какая причина неисправности имеется в данном случае?

- а) измерить напряжения на разъемах двигателя;
- б) проверить ПО;
- в) проверить выходные транзисторы;
- г) заменить двигатель и проверить с ним функционирование.

**УПРАЖНЕНИЕ 7.8.** Какие измерения, из представленных на рис. 7.14, можно осуществить при помощи логического анализатора?

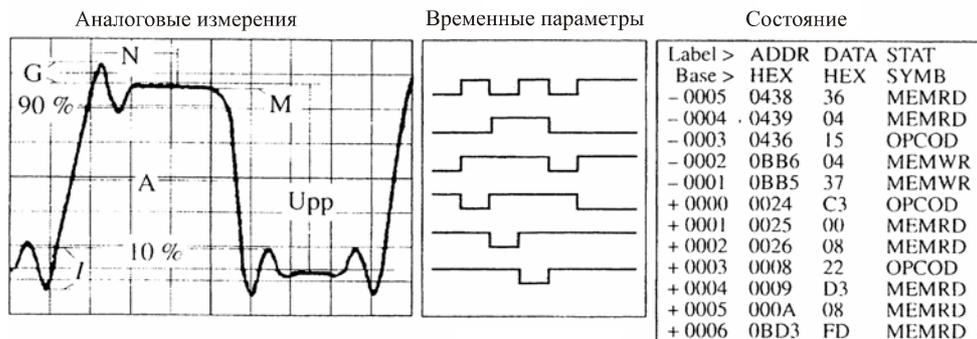
- а) выполнить аналоговые измерения (получить параметры сигналов);
- б) получить временные параметры (соотношения сигналов во времени);
- в) оценить состояние шины (функционирование шины).

Ответы можно посмотреть в приложении.

Как выглядит  
форма сигналов?

Появляются ли  
управляющие  
импульсы в верной  
последовательности?

Какие команды  
появляются на шине?



Параметры сигналов

Соотношения сигналов

Работа шины

Рис. 7.14



## ГЛАВА 8

# Поиск неисправностей в системах на программируемых контроллерах

Для поиска неисправностей в приборах и устройствах, управляемых программируемыми контроллерами, по возможности управления и диагностики сервисного программного обеспечения изначально нужно классифицировать программируемые контроллеры. Итак, схемы на программируемых контроллерах можно классифицировать на три группы.

*Малые программируемые контроллеры* обладают, как правило, разъемом для использования контроллера в персональном компьютере или небольшим терминалом ввода/вывода с дисплеем для индикации или изменения листинга программ.

*Средние программируемые контроллеры* имеют индицируемую программируемую диагностику (рис. 8.1), которая управляет всеми входными и выходными функциями вплоть до интерфейсов программного или аппаратного обеспечения, и показывают соответствующие сообщения об ошибках и неисправностях.

*Большие программируемые контроллеры* помимо управления логическими операциями имеют также возможности смешанного программного управления.

Виды управления логическими операциями описывают только статические взаимосвязи между функциями входа и выхода.

*Машинное управление*, наряду с осуществлением *управления логическими операциями*, требует также и временной взаимосвязи между входными и выходными функциями.

Устройства управления с заданной последовательностью шагов, которые последовательно переключаются с одного функционального шага на другой, в зависимости от условий, делают возможным пошаговый процесс.

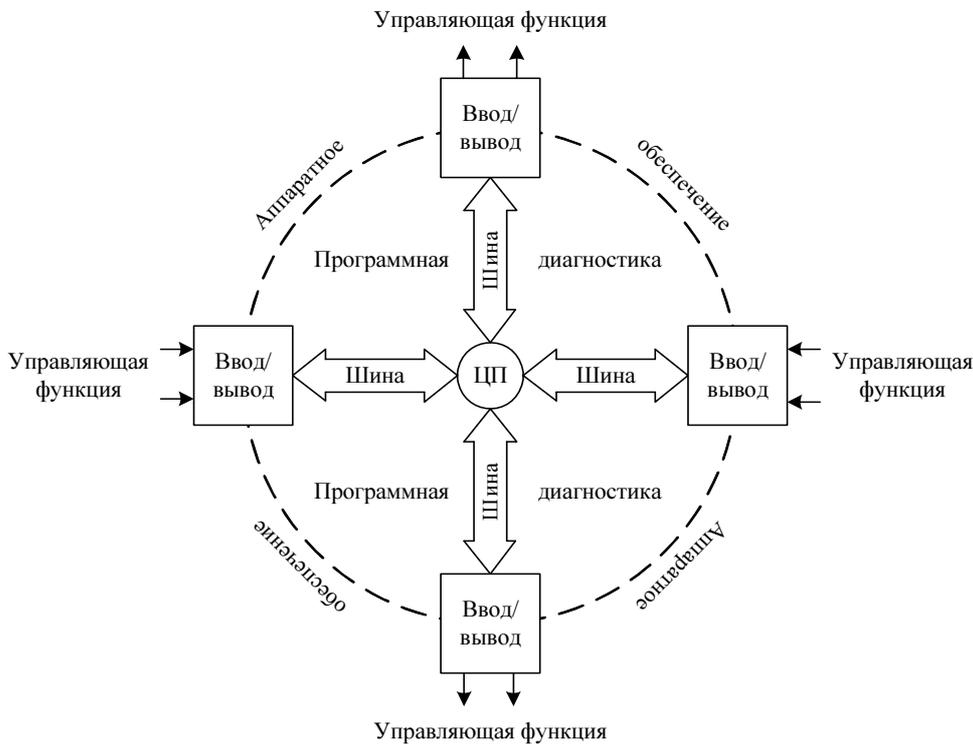


Рис. 8.1. Программная диагностика

Условия последовательного выполнения определенных действий или, иначе, шагов зависят от времени (ожидания и контроля) и сигналов (параметров) управляемого процесса.

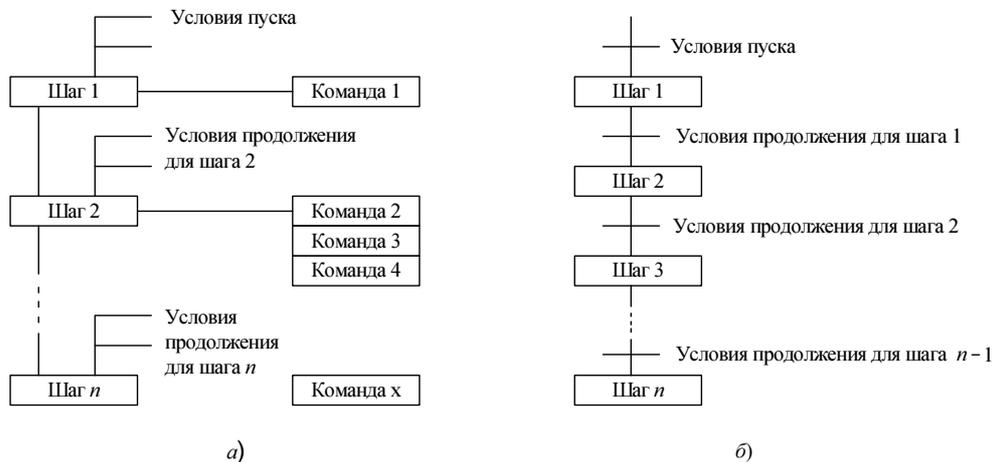
Поэтому для автоматического программного управления характерными являются шаги и условия их последовательного выполнения. Отсюда и наименование — устройства управления последовательностью шагов.

Любая задача, решаемая при проектировании системы автоматического программного управления, подразделяется на отдельные шаги. Каждому шагу присваиваются команды управления и условия последовательного их выполнения (рис. 8.2).

Командные шаги состоят из управляющих инструкций для внутреннего и внешнего выполнения (например, установить таймер, начать время отсчета, включить или выключить исполнительное звено).

Таким образом, система автоматического программного управления должна состоять из трех следующих функциональных элементов:

- блока выбора режима работы;
- блока переходов;
- блока выдачи команд.



**Рис. 8.2.** Автоматическое программное управление процессом: функциональная схема согласно германскому промышленному стандарту DIN 40719 (а); функциональная схема согласно стандарту IEC SC65A/WG6 (Internationale Elektrotechnische Kommission — Международная комиссия по электротехнике) (б)

В блоке *выбора режима* обрабатываются сигналы, поступающие в процессе эксплуатации. Результат передается блоку переходов и блоку выдачи команд в форме сигналов.

Блок *переходов* предназначен за управлением последовательностью пошагового выполнения тех или иных действий. В зависимости от условий для продолжения работы происходит переключение с одного шага на следующий шаг. Каждый шаг соответствует своему запоминающему элементу. В результате блок выдает команды, подготавливает установку следующего шага, а предыдущий шаг он размещает на прежнем месте. Блок переходов осуществляет периодическую выдачу управляющего сигнала в зависимости от условий для продолжения выполнения шагов. Выдача команд управления может произойти непосредственно блоком переходов, однако зачастую она производится с помощью блока выдачи команд.

Блок *выдачи команд* предназначен для выдачи команд исполнительным звеньям.

## 8.1. Проверка статических и динамических функциональных параметров

Как и в случае с компьютерными схемами, так и в схемах с программируемыми контроллерами вольтметром можно измерить напряжения питания, напряжения на входе и выходе — прежде всего, медленно включаемых электромеханических компонентов схемы.

В первую очередь на работоспособность, путем замера напряжения, могут быть проверены выходы, которые используются совместно с силовыми переключателями (реле, тиристорами, мощными транзисторами).

При помощи осциллографа можно проверить логические уровни входов и выходов.

Для иллюстрации приведем следующий пример.

Из сервисной документации становится очевидным, что один из выходов  $\text{Вых}_1$  программируемого контроллера в какой-то момент времени должен выполнять логическую операцию ИЛИ над сигналами, поступающими на два его входа  $\text{Вх}_1$  и  $\text{Вх}_2$  (рис. 8.3).

Предположим, что выход при определенных условиях функционирования не переключается, так что в качестве первого мероприятия проводится проверка входов.

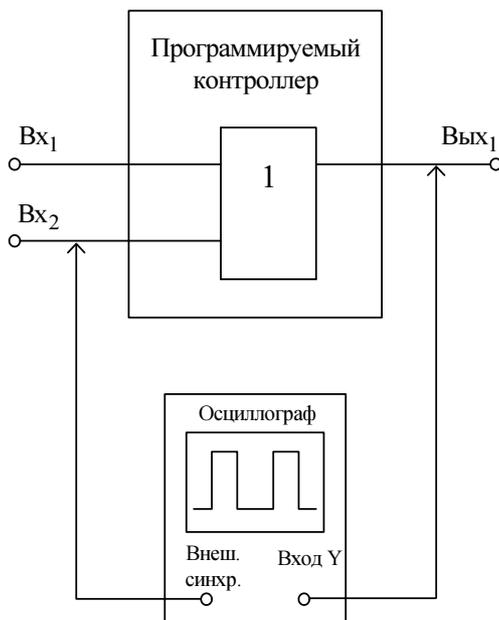


Рис. 8.3. Проверка функционирования с помощью внешней синхронизации

При помощи осциллографа с входом внешней синхронизацией замеряется выходной сигнал, а один из входов подключается в качестве сигнала синхронизации.

Если на вход не поступает сигнала, то не происходит запуска синхронизации на осциллографе. В результате на экране осциллографа не отображается постоянный соответствующий импульс, или вообще никакой.

Если же на входе сигнал присутствует, то на выходе отображается стабильный импульс, потому что временная развертка запускается входным, в данном случае синхронизирующим сигналом.

Таким способом можно проверить оба входа.

Если же для двух входов запуска синхронизации не выполняется, то, следовательно, в этом случае имеются две возможные неисправности:

- ни на один из этих двух входов не поступает сигнала;
- имеется ошибка или неисправна программа программируемого контроллера или же имеется неисправность самого контроллера.

## 8.2. Техническое обслуживание путем диагностики с помощью устройства визуального отображения

Система программной диагностики делает доступным получение разнообразных данных о функциональном состоянии устройства. Наряду с периодом работы и сроком износа о неполадках и дефектах, прежде всего, выдается следующая визуальная информация:

- вид неисправности;
- место неисправности;
- причина неисправности;
- устранение неисправности.

Состояние входов, выходов, *меркеров*<sup>1</sup> и т. д. может быть показано на экране и подготовлено для запуска. Такие системы диагностики поддерживают возможность эксплуатации путем управления действиями оператора со стороны системы в диалоге с ним; они задают условия включения той или иной установки во избежание неправильного ее обслуживания.

---

<sup>1</sup> *Меркеры* — биты системной памяти микропроцессора (контроллера), которые можно использовать как управляющие реле для хранения промежуточных результатов операций. — *Ред.*

Диагностические системы могут непрерывно регистрировать рабочие параметры (эксплуатационные данные) и представлять их в наглядной форме.

Некоторые функциональные признаки диагностических систем:

- запланированное составление диагностического изображения с поддержкой служебных и функциональных клавиш;
- графические вспомогательные средства для связывания и построения изображения с функциями машины и ходом процесса;
- рабочие инструкции и указания неисправностей в виде обычных текстовых сообщений;
- протоколирование сообщений с помощью принтера или обработка сообщений в вышестоящем компьютере для нахождения слабых мест;
- подытоживание всех неисправностей и их документирование и обоснование.

Одной из главных сервисных поддержек этой диагностической системы является анализ пошаговых последовательностей электрических цепей для управляющей программы. На рис. 8.4<sup>1</sup> показано наглядное изображение обзорного экрана после анализа пошаговой последовательности цепей. В верхней строке выводятся сведения об обозначении типа или модели изделия (WF 470) и языке программирования или системном программном обеспечении (Graph 5).

Обработка и анализ этих изображений, конечно же, предполагает базовые знания использованной структуры языка программирования.

Автоматическое программное управление процессом вместе с системным программным обеспечением обеспечивают двухуровневые изображения представляемой информации (рис. 8.5).

Из обзорного изображения определяется структура хода шаговой последовательности цепей. В этом представлении описываются шаги, а в особенности разветвления и соединяющие цепи. По визуальному представлению определяется содержание шагов и переходов. Также программируются процессы, которые происходят в шаге и которые выполняются при управлении в определенном состоянии или режиме. *Переходы* описывают условие последовательного подключения, при котором управление переходит из одного состояния в последующее состояние, т. е. переключается от одного шага к следующему/следующим.

---

<sup>1</sup> На данном и следующих рисунках, представляющих изображения экранов системы автоматического программного управления, приведена переведенная информация. — *Ред.*

Для этого системой выводится следующая информация (см. рис. 8.4):

№	— порядковый номер шаговой последовательности цепей
Инстр.	— номер инструкции (команды) в листинге
Состояние	— состояние цепи
Действие	— действие, выполняемое цепью

WF 470 Graph 5		Обзорный экран	
№	Инстр.	Состояние	Действие
17	017	***	Условия для включения автоматической линии
18	018	*	Погрузочное приспособление манипулятора
19	019		Черновая обработка фланца корпуса редуктора слева
20	020	***	Черновая обработка фланца корпуса редуктора справа
21	021		Унифицированная головка для сверления фланца слева
22	022	*	Унифицированная головка для сверления фланца справа
23	023	***	Чистовая обработка левой стороны фланца
24	024		Чистовая обработка правой стороны фланца
25	030		Технологическая позиция контроля для корпуса редуктора
26	000		
27	000		
28	000		
29	000		
30	000		
31	000		
32	000		

Нет *	Цепь запускается и работает
*	Цепь не запускается
***	Дефектная цепь

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Индивид. диагностика	Цепь +1	Цепь -1	Прокрутка вперед	Прокрутка назад	Экран +1	Экран -1	Основной экран

Рис. 8.4. Анализ пошаговой последовательности цепей на обзорном экране

Функциональные клавиши от F1 до F8, изображенные на рис. 8.4, имеют следующие назначения:

F1 Индивид. диагностика	— выбор номера цепи шаговой последовательности
F2 Цепь +1	— выбор следующей цепи шаговой последовательности
F3 Цепь -1	— выбор предыдущей цепи шаговой последовательности
F4 Прокрутка вперед	— прокрутить последовательность вперед

F5 Прокрутка назад	— прокрутить последовательность назад
F6 Экран +1	— вызвать следующий экран
F7 Экран -1	— вызвать предыдущий экран
F8 Основной экран	— перейти на основной экран

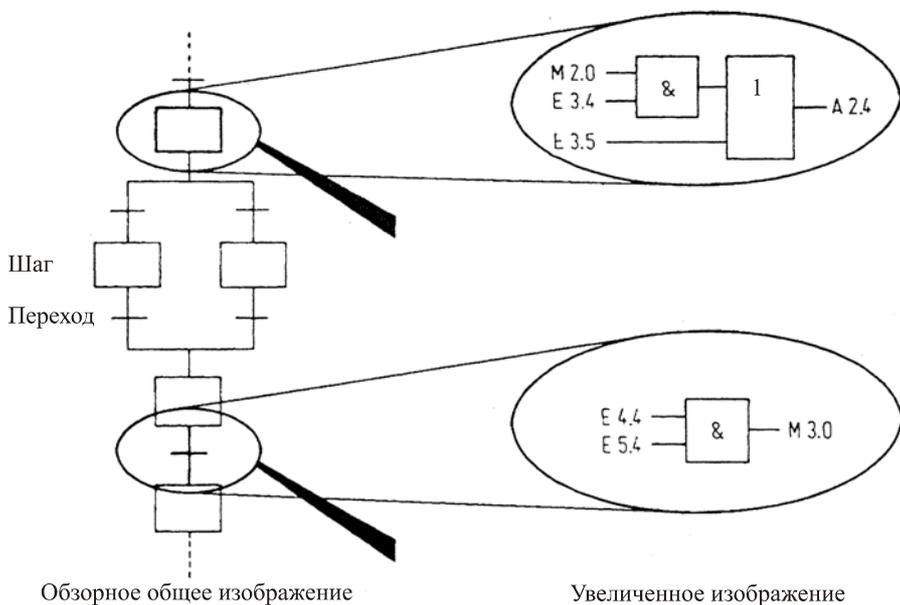


Рис. 8.5. Изображение шаговых последовательностей

Из обзорного экрана при помощи функциональной клавиши F1 можно перейти к *диагностическому экрану*, показанному на рис. 8.6. Это диагностическое изображение дает отдельные указания для условий работы функциональных блоков. В этом примере представлены условия включения для автоматической поточной линии. Рядом с текстом "Дефектные цепи" стоят номера цепей 17, 20, 23. Под текстом "Автоматика" (Automatik) приводятся следующие данные:

- номер дефектной текущей цепи — 17;
- номер инструкции (команды) в листинге — 017;
- номер перехода — 2;
- максимальное количество шаговых последовательностей цепей — 67.

В том числе происходит обзор разветвлений внутри функции шаговой цепи и вывод состояния.

WF470 Graph 5			Экран диагностики				
Дефектные цепи			17 20 23				
Автоматика			Условия для включения автоматической линии				
Текущая цепь	17		U E021.7 Давление смазки слишком мало или отсутствует				
Инстр.	017		U(				
Переход	2		UN E021.3 Деталь для тех. позиции загрузки отсутствует				
Макс. шаг	067		UN E021.4 Холостое тактирование не выбрано				
			UN E000.3 Включить средства охлаждения				
			U E000.6 Технологическая позиция не занята				
Ветвь	Шаг	Состояние	U E000.5 Холостое тактирование				
			)				
1	007		U E021.6 Сработало аварийное выключение на центральном пульте				
2	011	*	U(				
3	017	*>>	ON E021.4 Холостое тактирование не выбрано				
4	031		O E021.3 Отсутствует деталь для позиции загрузки				
5	34		)				
6	045						
7	000						
8	000						
F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Graph 5 Обзор	Цепь +1	Прокрут. +1	Прокрут. -1	Изменить вид работы	Переход +1	Ветвь +1	Основной экран

Рис. 8.6. Анализ пошаговой последовательности цепей на диагностическом экране

В примере на рис. 8.6 курсор стоит на третьем разветвлении шаговой цепи 017. Эта шаговая цепь обозначена звездочкой "\*", и таким образом она не запускается.

Обозначения ссылок непосредственно указывают на функциональные описания третьего разветвления. В данном сообщении указывается функция цепи *ON* (Oder-Nicht) — "ИЛИ-НЕ" для входа *E021.4* (Eingang — вход):

□ *ON E021.4 Холостое тактирование не выбрано*

На диагностическом экране имеется несколько иной набор функциональных клавиш:

- |                |   |
|----------------|---|
| F1 Graph Обзор | — переключение в обзорный экран                   |
| F2 Цепь +1     | — выбор следующей цепи шаговой последовательности |
| F3 Прокрут. +1 | — прокрутить выполнение последовательности вперед |

- F4 Прокрут. -1 — прокрутить выполнение последовательности назад
- F5 Изменить вид работы — запустить или отключить шаговую последовательность цепей
- F6 Переход +1 — вызвать следующий переход
- F7 Ветвь +1 — вызвать следующую ветвь
- F8 Основной экран — перейти на основной экран

Дальнейшие диагностические функции — это изображенные на рис. 8.7 сервисные сведения. Это изображение уведомляет о состоянии:

- входов;
- выходов;
- меркеров;
- делителей частоты;
- счетчиков.

#### WF470 Сервисный модуль

Управление		n/DL	n + 1/DR	HEX	DEZ	
EW	000	0000 0110	1100 0000	06C0	01728	
AW	000	1000 0100	1100 0000	84C0	33984	
MW	100	0000 0001	0000 0000	0100	00256	
Z	005	0000 0000	0000 0000	0000	0000	
T	102	0000 0000	0000 0000	0000	0000	100 мс
PW	129	1111 1111	1111 1111	FFFF	65535	
DB	030					
DW	001	0000 0000	0000 0001	0001	00001	
DW	002	0000 0000	0000 0101	0005	00005	
DW	003	0010 1000	0000 0000	4820	18464	

1 = Входное слово (EW)

2 = Выходное слово (AW)

3 = Меркерное слово (MW)

4 = Счетчик (Z)

5 = Временной каскад (T)

6 = Слово периферии (PW)

7 = Номер элемента данных (DB)

8 = Номер слова данных (D1)

1 = Стереть (удалить)

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Экран структуры	Управление оператором	Выбор элемента	Данные и время	Выбор признака	Свободен	Шаговая работа	Основной экран

Рис. 8.7. Экран сервисной информации

Эти сервисные сведения дополняются указаниями о номерах структурного элемента данных (DB) и номерах слова данных (DW). Сведения о состоянии выводятся в виде 16-битных слов данных, которые на этом же экране показаны в двоичном представлении, отдельно для младшей ( $n + 1/DR$ ) и старшей ( $n/DL$ ) половинки слова. Разделение 16-битного слова данных на две половины имеет свою причину в байтовой организации входов, выходов, меркеров, временных и счетных элементов, например, E021.0 до E021.7.

Функциональные клавиши в этом диагностическом экране имеют следующее назначение:

F1 Экран структуры	— выбор экрана структуры прибора
F2 Управление оператором	— выбор управления действиями оператора со стороны системы
F3 Выбор элемента	— выбор узлов управления
F4 Данные и время	— выбор ввода даты и времени
F5 Выбор признака	— выбор признаков
F6 Свободна	— не занята
F7 Шаговая работа	— выбор функционального анализа цепей
F8 Основной экран	— переход на основной экран

Отдельные биты состояния этого экрана могут быть установлены и стерты. Таким образом, становится возможным целенаправленно проверить отдельные функции на их работоспособность. Такой приведенный анализ шаговых последовательностей цепей и сервисных функций является только двумя примерами использования экранных диагностик.

В добавление к этому экранная диагностика используется для вывода условий запуска, рабочих сообщений, непосредственных неисправностей, а также сообщений о сбоях.

### **8.3. Систематизированный поиск неисправностей в схеме программируемого контроллера**

В противоположность традиционным электрическим схемам схемы на программируемых контроллерах, включающие в свой состав различные релейные и схемы защиты, позволяют при помощи визуального контроля и возможных ручных функций запуска получить точный и быстрый отчет о своей работоспособности или об имеющихся неисправностях.

По состоянию переключателей, электромагнитных контакторов и реле можно визуально определить включены ли они. Если выяснить, что ход их переключения точно соответствует состоянию определенных входов и выходов программируемого контроллера, то далее за функциональным состоянием схемы можно следить по светодиодным индикаторам входов и выходов программируемого контроллера. Важно правильно и быстро определить последовательность работы элементов в устройстве, т. е. иначе ход работы устройства, например, вначале работает угловой шаговый датчик, затем датчик приближения объекта, концевой выключатель, манипулятор, переключатель и т. д. В качестве примера поиска неисправностей рассмотрим режим набора для печатной машины.

При этом режиме ход работы устройства начинается с коммутации положения обслуживания и заканчивается главным двигателем привода.

В качестве причины неисправности выступает запрещение режима набора со стороны пульта управления печатной машины.

Неисправность в каждом случае может быть ограничена путем перепроверки последующих функций, которые имеют влияние на главный привод. Эта была бы, к примеру, проверка ведущего и отдельного устройства. Если проверка не выявляет никаких нарушений функционирования, то поиск неисправностей ограничивается до начала режима набора.

Для определения хода прохождения сигнала обычно рассматривают *коммутационную схему*. Обзор страниц схемы приводит нас на лист 28 (рис. 8.8) с наименованием "Набор на клавиатуре включен", на котором показана клавиша 3S 111 пульта, разрешающая режим набора. Клавиша непосредственно воздействует на вход I 111 (I 6.15) программируемого контроллера и не имеет фиксации. Светодиоды на этом входе должны включаться и выключаться при управлении клавишей. Если эта функция выполняется, то далее проверяется выход, который разрешает работу пульта.

Из логической схемы на рис. 8.9 видно, что выход Q4.10 способствует разрешению пульта для выполнения режима набора. Этот выход можно также найти на исходной выходной карте программируемого контроллера, которая изображена на листе 72 документации (рис. 8.10).

Светодиодная индикация выхода Q4.10 согласно функции, выполняемой схемой (см. рис. 8.9), имеет память, т. е. при каждом нажатии клавиши выходные светодиоды должны включиться или выключиться и остаться в этом состоянии. Проверка светодиодов на выходе Q4.10 не выявляет никаких изменений, т. е. они светятся постоянно, независимо от того, приведена ли в действие клавиша или нет. Пока еще непонятно, что в отдельности на программируемом контроллере является неисправным, программа или выход схемы?

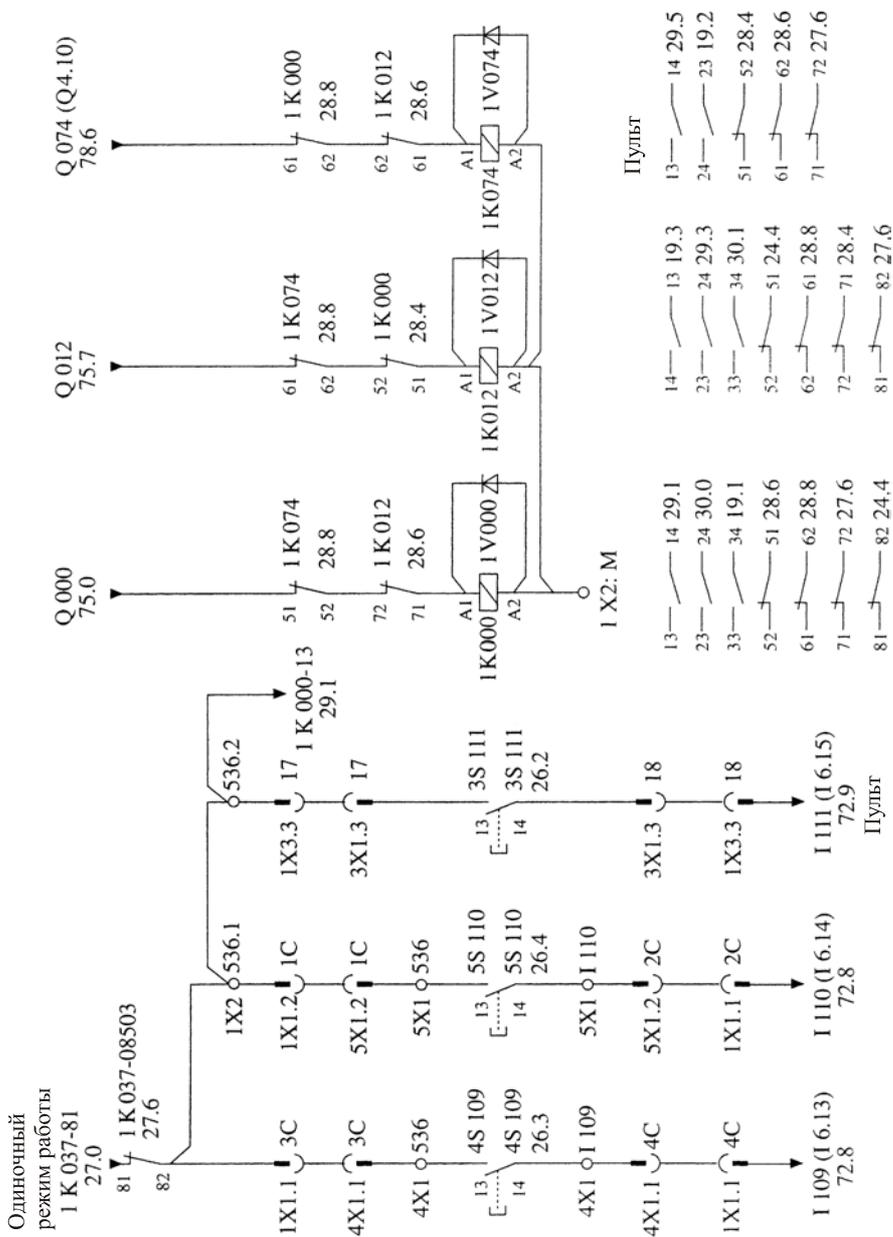


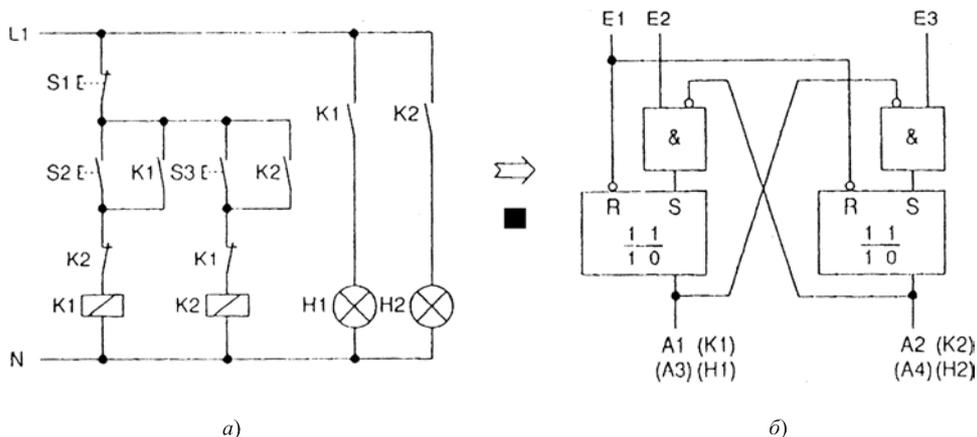
Рис. 8.8. Коммутационная схема "Набор на клавиатуре включен"





## 8.4. Упражнения для закрепления полученных знаний

**УПРАЖНЕНИЕ 8.1.** В примере на рис. 8.11 показана схема коммутации на реле с фиксацией контактов, т. е. согласно приведенной схеме можно включить только одно реле.



**Рис. 8.11.** Схема коммутации на реле с фиксацией состояния: аппаратное управление (а); управление программируемым контроллером (логическая схема) (б)

Если нажать кнопку S2, то реле K1 срабатывает и сохраняет свое состояние самоудерживающимся контактом. В это же время питание реле K2 прерывается нормально замкнутым контактом K1, и поэтому он не может включиться кнопкой S3. Такая же фиксация воздействует на реле K1.

Руководствуясь рис. 8.11, нужно заполнить табл. 8.1, сопоставив функциональные элементы или их обозначения на принципиальной схеме с обозначениями операндов (E1 до E3 и A1 до A4) в логической схеме.

**Таблица 8.1**

Функциональный элемент	Обозначение на принципиальной электрической схеме (рис. 8.11, а)	Соответствующий операнд
1		
2		
3		
4		
5		

Таблица 8.1 (окончание)

Функциональный элемент	Обозначение на принципиальной электрической схеме (рис. 8.11, а)	Соответствующий операнд
6		
7		

**УПРАЖНЕНИЕ 8.2.** Входы и выходы программируемого контроллера на рис. 8.11, б снабжены светодиодами. В исходном положении светится светодиод на выходе А1, но сигнальная лампа Н1 не светится. Какие неисправности возможны в этом случае?

**УПРАЖНЕНИЕ 8.3.** На схеме (рис. 8.12, а) изображен трехфазный электродвигатель, который посредством кнопок S1 и S2 может быть частично изменен в направлении вращения. Путем нажатия на кнопку S2 реле К1 включается в состояние правого вращения двигателя. Кнопка S1 включает левое вращение, что приводит к торможению мотора. Если отжать кнопку S2, а нажать кнопку S1, то двигатель будет тормозиться. Переключатель F3 — это автомат защиты по току. Сигнальные лампы извещают о включенном направлении вращения.

Необходимо заполнить табл. 8.2, в которой операнды в логической схеме по рис. 8.12, б нужно сопоставить функциональные элементы или их обозначения на принципиальной схеме (рис. 8.12, а).

Таблица 8.2

Функциональный элемент	Обозначение на принципиальной электрической схеме (рис. 8.11, а)	Соответствующий операнд
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

**УПРАЖНЕНИЕ 8.4.** Входы и выходы программируемого контроллера на рис. 8.12, б снабжены светодиодами. Двигатель работает по часовой стрелке (с правым вращением). Управление с помощью кнопки S1 для левого направления вращения (против часовой стрелки) не выявляет какого-либо воздейст-

вия. Светодиод на входе E1 контроллера не светится при нажатии кнопки (микрореле) S1. Какие неисправности тут могли бы быть?

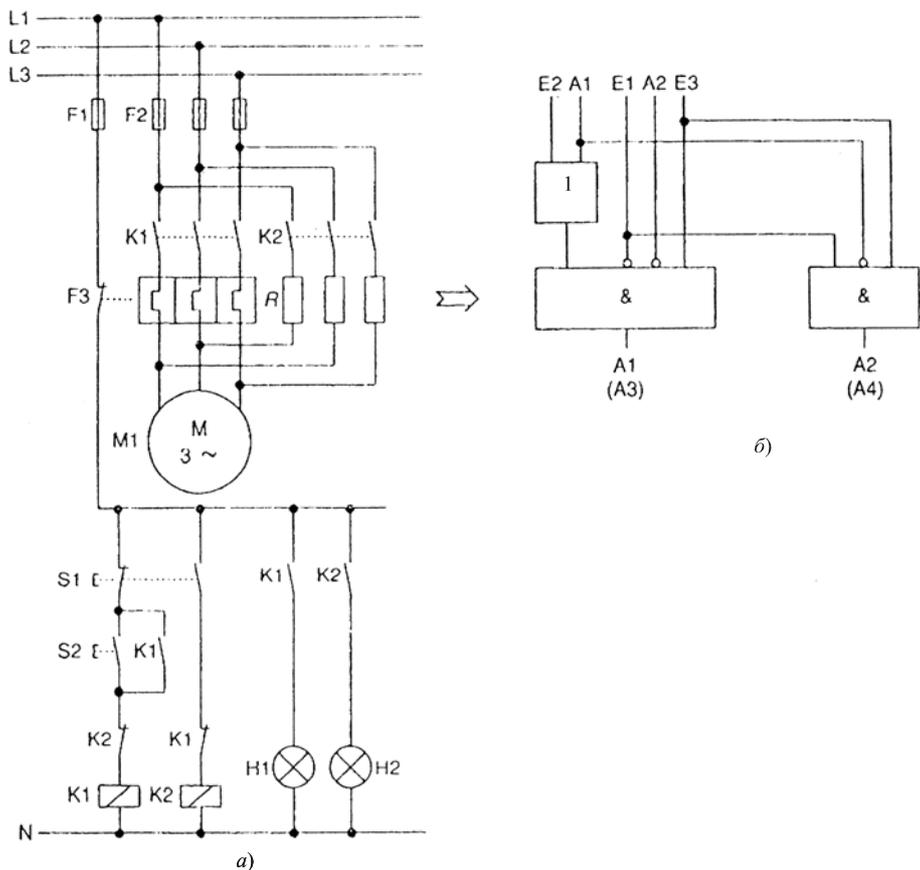


Рис. 8.12. Реверсивная схема управления двигателем: с помощью аппаратного обеспечения (а); с помощью программируемого контроллера (логическая схема) (б)

Ответы можно посмотреть в приложении.

## ГЛАВА 9

# Поиск неисправностей в системе с сетевым напряжением питания

Наиболее часто в приборах и устройствах дефекты или симптомы неисправностей выражаются в обеспечении их напряжением питания. Это частично объясняется высокой энерговооруженностью элементов схемы.

Поэтому очень полезно и рационально тщательно рассматривать работающие схемы на их функционирование, в том числе и при возможных неисправностях.

Постоянные напряжения питания для электрических схем получают из переменного сетевого напряжения с помощью выпрямления и стабилизации постоянных напряжений (рис. 9.1). Поиск неисправности в функционировании электрических схем в качестве одной из первых мер требует проверить питающее напряжение, а при определенных симптомах ошибок и сетевое напряжение.



Рис. 9.1. Блок-схема источника питания

## 9.1. Сетевые помехи и их воздействия

Многие сетевые помехи возникают из-за противодействия электрических устройств, которые получают из-за изменений напряжения при значительных изменениях нагрузки, асимметрии напряжений в сети трехфазного тока (односторонняя нагрузка фаз), напряжений гармоник (преобразователя частоты, выпрямителей) и напряжений на вентильных электроприводах).

Многие из названных сетевых помех приводят в электрических схемах к различным последствиям.

- Изменения сетевого напряжения приводят к изменению выпрямленных напряжений, а таким образом у электронно-стабилизированных постоянных напряжений к изменению внутреннего сопротивления схемы регулирования. Если изменения сетевого напряжения лежат вне области регулирования стабилизирующей схемы, то тогда меняются постоянные напряжения питания и *пульсирующее напряжение* переменного тока (остаточная пульсация сетевого напряжения).
- Асимметричные напряжения в сети трехфазного тока приводят к изменениям нагрузочной мощности потребителей трехфазного переменного тока, а у электронно-управляемых однофазных источников питания приводят к похожим воздействиям, как и при изменениях сетевого напряжения.
- Напряжения гармоник частоты сети и частоты вибропреобразователей (прерывателя) приводят к повышению мощности потерь и, вместе с тем, к нагреванию конденсаторов, двигателей, фильтрующих электрических цепей, заграждающего и сглаживающего дросселей, а также трансформаторов.

Диагностику сетевого напряжения и тока в сети можно провести при помощи осциллографа с памятью. Наиболее распространенные формы сигналов и их значение изображены на рис. 9.2.

На рис. 9.2, *а* изображены ток и напряжение, совпадающие по фазе в идеальной сети.

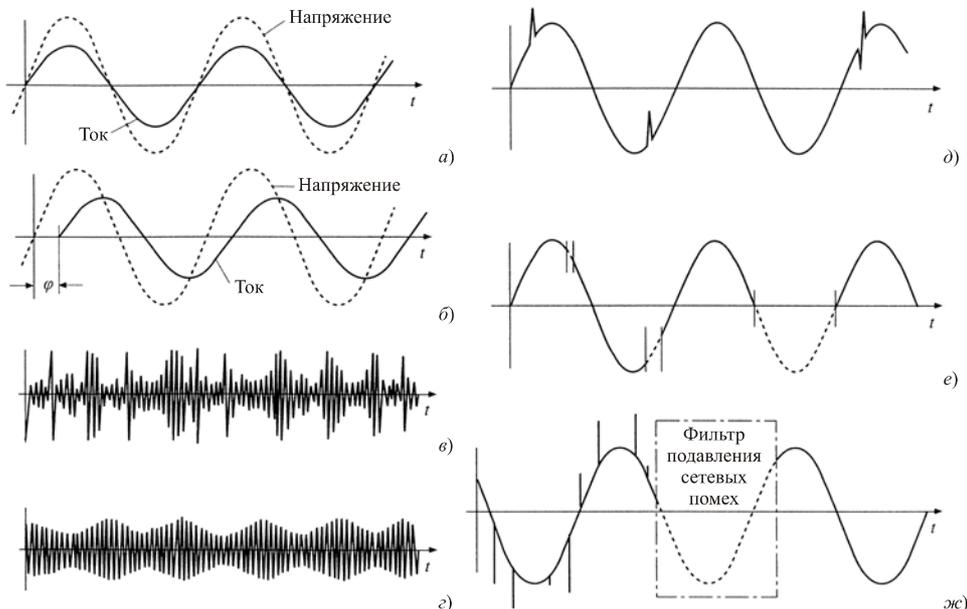
На рис. 9.2, *б* изображен сдвиг фаз между током и напряжением, возникающий из-за емкостной и индуктивной нагрузки потребителей электроэнергии.

Периодические и непериодические колебания напряжения представлены на рис. 9.2, *в* и 9.2, *г*.

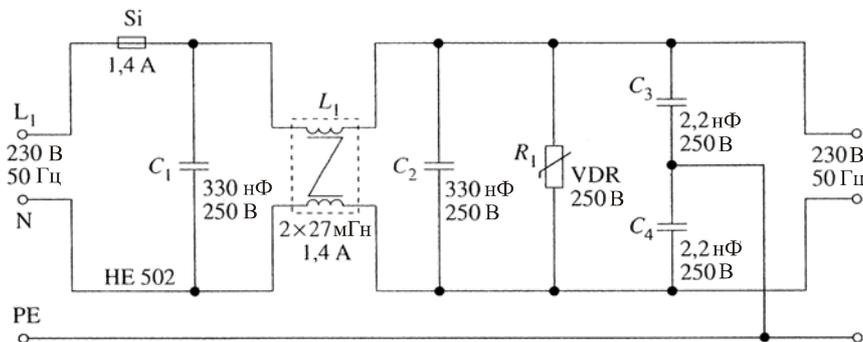
*Импульсные помехи и выбросы напряжения* в напряжении сети (рис. 9.2, *д*) могут вызываться выключателем двигателя, тиристорным регулятором, при сварке, замыкании/размыкании контактов и при атмосферных разрядах.

Кратковременные обрывы на рис. 9.2, *е* получаются за счет фазовой компенсации, перегрузки в сети, короткого замыкания или атмосферных воздействий.

Причиной безупречного функционирования всего подключенного к общей сети электроснабжения электрического оборудования является среди прочего то, что работа одного прибора не должна оказывать влияние на работу других приборов. Это значит, что в сети должны соблюдаться условия *электромагнитной совместимости*.



**Рис. 9.2.** Формы сетевого напряжения: идеальная сеть, в которой ток и напряжение совпадают по фазе (а); индуктивно- или емкостно-нагруженная сеть приводит к сдвигу фаз  $\varphi$  между током и напряжением (б); непериодические колебания напряжения (в); периодические колебания напряжения (д); ) нестационарные (переменные) помехи (д); кратковременные обрывы (е); коррекция сетевых помех сетевым фильтром (ж)



**Рис. 9.3.** Схема сетевого фильтра

Если сеть изобилует сетевыми помехами, которые не могут быть устранены в короткий срок, тогда для устранения сетевых неисправностей может быть подключен *сетевой фильтр*. На рис. 9.3 можно видеть пример подключения мощного сетевого фильтра. За счет частоты среза фильтра, равной 400 Гц, достигается демпфирование величиной 20 дБ на декаду, в результате чего

происходит эффективное подавление помех различного вида. Выходные клеммы фильтра замыкаются накоротко варистором  $R_1$ . Магнитные поля дросселя  $L_1$  взаимно уничтожаются. Для тока сети индуктивность электрических дроссельных катушек является поэтому очень незначительной и, таким образом, также и потеря напряжения за счет обмоток является незначительной. Односторонние помехи на фазном проводе или на нулевом проводе очень сильно демпфируются дроссельной катушкой. Среднечастотные или высокочастотные напряжения помех отводятся по конденсаторам  $C_3$  и  $C_4$

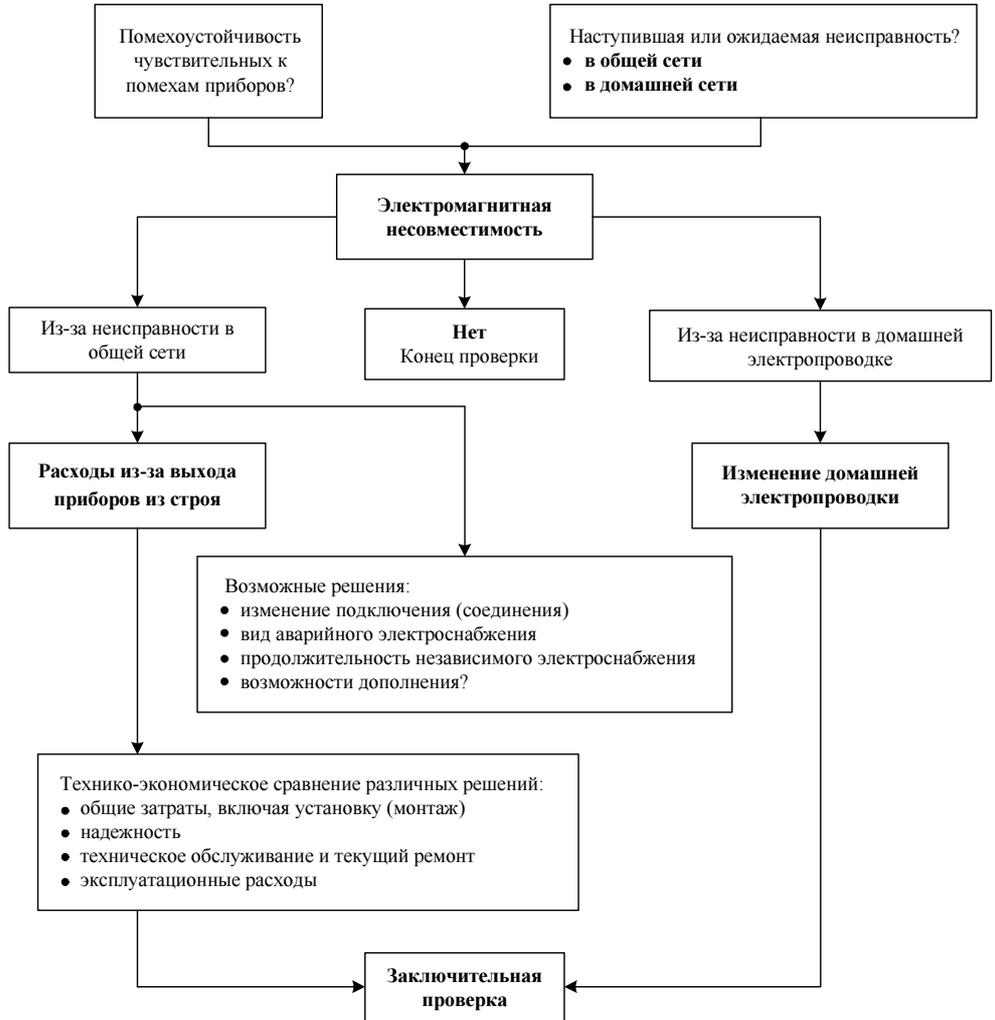


Рис. 9.4. Блок-схема поиска неисправностей в сетях

относительно защитного провода. Со стороны внешней сети конденсатор  $C_1$  воздействует на высокочастотные напряжения помех как короткое замыкание, а со стороны приборов такую же функцию выполняет конденсатор  $C_2$ . Сетевой фильтр поэтому активен в обоих направлениях.

Блок-схема на рис. 9.4 показывает отдельные шаги анализа для решения проблем сетевого напряжения для чувствительного к помехам прибора.

## 9.2. Поиск неисправностей в схемах выпрямителей

Каждый работающий от сети прибор нуждается в выпрямительной схеме, которая представляет собой один из наиболее частых источников неисправностей прибора. Это мы можем утверждать по двум основаниям: если в приборе возникает неисправность, которая влечет за собой появление более высокого рабочего тока, например, короткое замыкание структурного элемента, тогда выпрямительная схема дополнительно нагружается этим избыточным током и, при известных условиях, таким образом, перегружается.

Кроме того, в схеме регулирования мощности, которая входит в выпрямительную схему для обеспечения общей потребляемой мощности, вероятность возникновения неисправностей наиболее высокая.

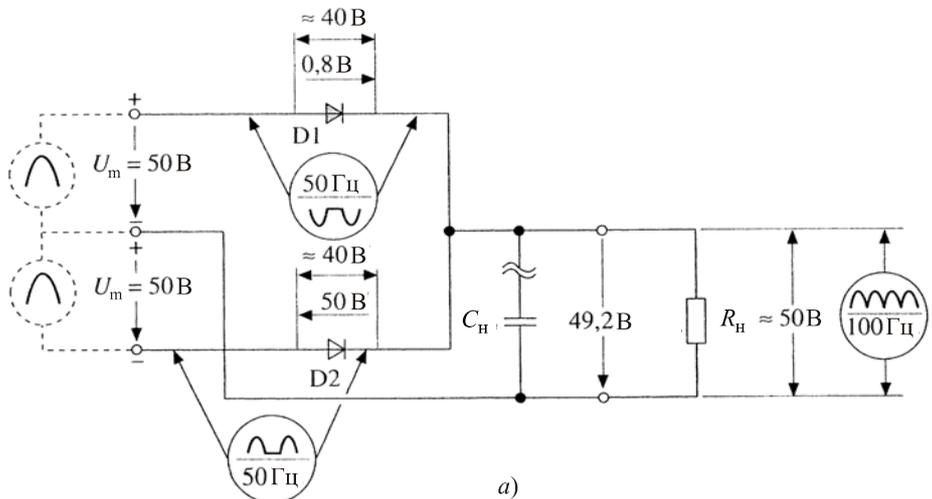
### Двухполупериодный и мостовой выпрямители

Наиболее частые симптомы неисправностей в дефектных выпрямительных схемах — это слишком высокие *напряжения пульсаций* переменного тока на выходе источника питания или полное отсутствие напряжения питания. В усилителе, работающем от сетевого выпрямителя, эти дефекты дают о себе знать, например, благодаря фону с частотой переменного тока, величиной в 50 или 100 Гц.

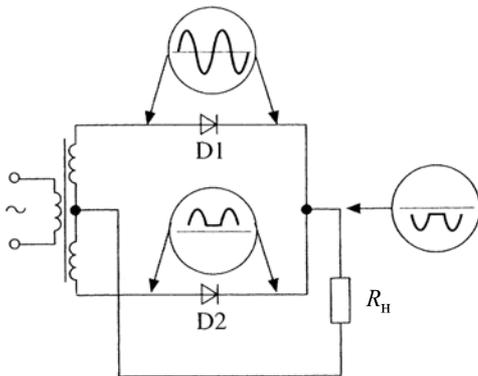
У неисправного устройства, питающегося от выпрямительной схемы, сначала замеряется выпрямленное напряжение питания и напряжения пульсаций переменного тока. Если оба значения более не совпадают с заданными (номинальными) значениями, то можно начать непосредственно с поиска неисправностей в выпрямительной схеме.

Для того чтобы при двухполупериодном или мостовом выпрямлении получить ясные представления о замеряемых значениях напряжения, считается рациональным представить себе, что за напряжения будут замерены. Эти рассуждения имеют то преимущество, что при помощи постоянного напряжения можно симулировать те же условия для мгновенных значений переменных напряжений.

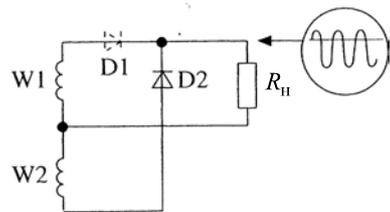
На рис. 9.5, а изображен *двухполупериодный выпрямитель*. Пиковое или, иначе, амплитудное напряжение  $U_m = 50 \text{ В}$  поступает с обмотки трансформатора. При показанной на рисунке полярности напряжений видно, что один диод D1 будет проводить ток, а другой D2 — нет, т. е. будет заперт. При перемене полярности значения напряжений на диодах ведут себя противоположным образом. Еще раз стоит упомянуть, что здесь речь идет о мгновенных значениях, которые можно измерить только посредством осциллографа, но не с помощью, например, обыкновенного прибора для измерения напряжения.



а)



б)



в)

**Рис. 9.5.** Схемы выпрямителей: проверка двухполупериодной схемы (а); измерения с помощью осциллографа для определения неисправных диодов (б); эквивалентная схема (схема замещения) для короткого замыкания в неисправных диодах

Измерительным прибором в режиме работы "Переменное напряжение" на всех диодах и на сопротивлении нагрузки (на разделенном конденсаторе) будет замеряться величина переменного напряжения около 40 В (см. рис. 9.5, а).

Это происходит по одной простой причине: измерительный прибор (комбинированный электроизмерительный прибор или вольтметр) не может различать отдельные мгновенные значения и показывает поэтому всегда интегрированное *действующее значение напряжения*. Таким образом, при использовании измерительного прибора становится значительно сложнее определить неисправность в выпрямительной схеме.

Поэтому измерение при помощи осциллографа является значительно эффективнее и содержательнее, как это видно на рис. 9.5, а.

Так как осциллограф отображает не только амплитуду, но и при соответствующем заданном времени развертки также форму сигнала, то можно очень хорошо распознать, как ведут себя отдельные элементы схемы при переменном напряжении.

Здесь бросается в глаза то, что на непроводящих диодах в каждом случае замеряется только полуволна (полупериод) с отрицательной полярностью. На нагрузочном сопротивлении  $R_n$ , в соответствии с работой схемы, обе полуволны синусоидального напряжения замеряются с одинаковой положительной полярностью.

На диодах это дает частоту в 50 Гц, потому что период полуволн составляет 20 мс.

На нагрузочном сопротивлении замеряется частота в 100 Гц, т. к. здесь период измеряемых полуволн составляет только 10 мс.

На рис. 9.5, б изображены осциллограммы для неисправной схемы выпрямителя. На диоде D1 замеряются полные синусоидальные периоды с положительными и отрицательными полуволнами. На диоде D2 сигналы соответствуют осциллограммам рис. 9.5, а. Измерение на нагрузочном сопротивлении  $R_n$  показывает результат как на диоде D2, только с противоположной полярностью.

Проведенные измерения на сопротивлении нагрузки  $R_n$  практически позволяют распознать причину неисправности, поскольку видно, что схема работает как однополупериодный выпрямитель. Измерение синусоидального напряжения на диоде D1 приводит к выводу, что этот диод имеет внутренний обрыв, т. е. что для обеих полярностей синусоидальных полуволн он обнаруживает очень высокое сопротивление.

Если же этот диод имел бы короткое замыкание, то тогда нужно было рассмотреть эквивалентную схему, приведенную на рис. 9.5, в. Из этой схемы видно, что нагрузочное сопротивление подключается прямо параллельно об-

мотке трансформатора W1. Поэтому измеряют синусоидальную форму переменного напряжения. Диод D2 подключен параллельно обмоткам W1 и W2. Диод работает в качестве нагрузочного сопротивления для обеих обмоток, но только с различным воздействием. Если диод проводит ток, то на практике он представляет собой схожее с замкнутым накоротко нагрузочным резистором для обмоток. При этой полуволне по обмоткам течет высокий ток, через который намагничивает до насыщения ферромагнитный стальной сердечник трансформатора. Во время этой нагрузки на обмотке W1, к которой подсоединено сопротивление нагрузки  $R_H$ , может быть эффективным только незначительное напряжение.

При поиске неисправностей в *мостовом выпрямителе* обычно исходят из тех же рассуждений. На рис. 9.6 показана работа схемы при положительном пиковом напряжении. Измерение постоянного напряжения в этот момент показывает, что диоды D1 и D3 являются проводящими ток — электрическая цепь замкнута по этим диодам и сопротивлению нагрузки  $R_H$ , а диоды D2 и D4 — закрыты. Таким образом, измерения постоянного напряжения будут соответствовать показанным на рис. 9.6.

Замеры переменного напряжения на элементах дадут те же результаты измерений, как и на рис. 9.5.

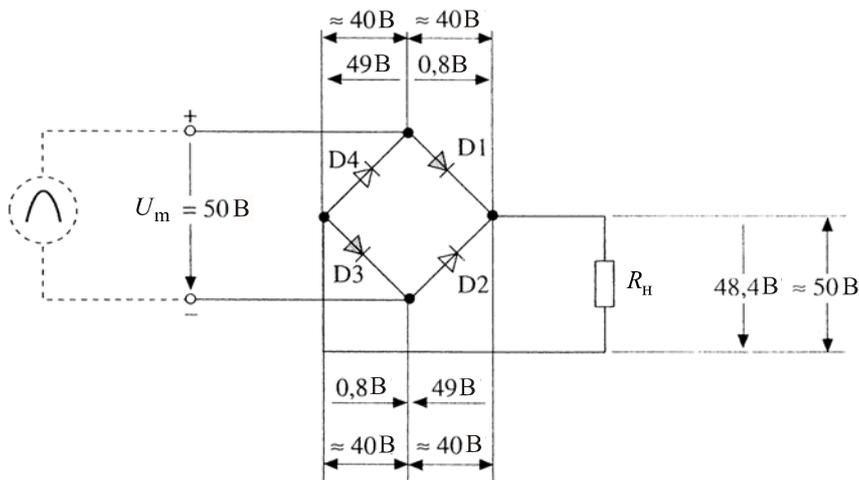


Рис. 9.6. Проверка схемы мостового выпрямителя

Замеры при помощи осциллографа выдают на диодах полуволны с различной полярностью и частотой 50 Гц. В соответствии со структурой диодов для диодов D1 и D3 вытекает та же полярность — при условии, что на диодах замеряется та же самая полярность, как и на диодах D2 и D4. Сравнение этих пар диодов между собой выявляет противоположную полярность. На сопро-

тивлении нагрузки  $R_H$  обнаруживаются полуволны с положительной полярностью и частотой 100 Гц.

Замеры при помощи осциллографа в схемах выпрямителей с подключенным накопительным конденсатором и элементами фильтра имеют несколько другие виды сигнала (рис. 9.7). Но также и здесь благодаря измеренной амплитуде напряжения пульсаций переменного тока и ее частоте можно вывести симптомы неисправностей.

Амплитуда напряжения пульсаций переменного тока дает разъяснения о том, в порядке ли коэффициент фильтрации фильтра. Пульсирующее напряжение становится больше, если сопротивление фильтра  $R_\Phi$  стало меньше, или когда меньше стала емкость накопительного или сглаживающего конденсатора.

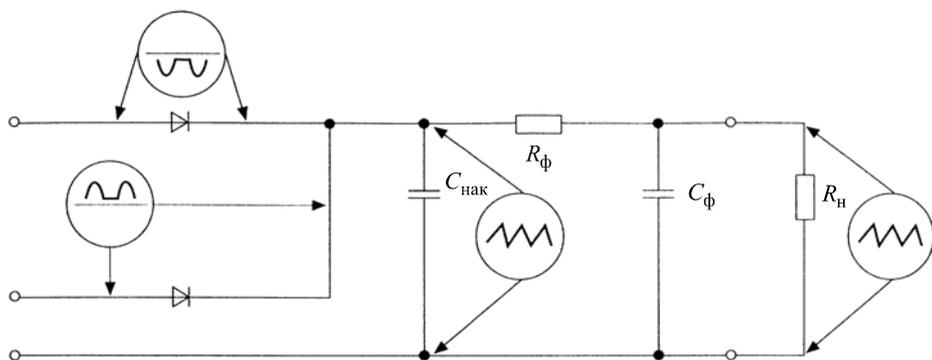


Рис. 9.7. Проверка электрического (режекторного) фильтра

Выполняет ли еще двухполупериодная или мостовая выпрямительная схемы для обеих полуолн свою функцию, можно узнать по частоте напряжения пульсаций переменного тока. При правильном функционировании схемы пульсирующее напряжение показывает частоту величиной 100 Гц. Если же ветвь выпрямителя вышла из строя, то измеряется пульсирующее напряжение с частотой 50 Гц. На диодах замеряется, как это было показано на рис. 9.5 и 9.6, полуолна с соответствующей амплитудой.

### 9.3. Поиск неисправностей в источниках питания

При поиске неисправностей в источнике питания, который ранее был работоспособным, вопрос звучит следующим образом:

"Имеется ли напряжение питания?"

Если же нет, то должно быть проверено, имеются ли на сетевом входе выпрямителя соответствующие напряжения питания.

Эта проверка регистрирует не только выпрямительную схему, но и общую схему, начиная от подключения к сети электропитания (рис. 9.8).

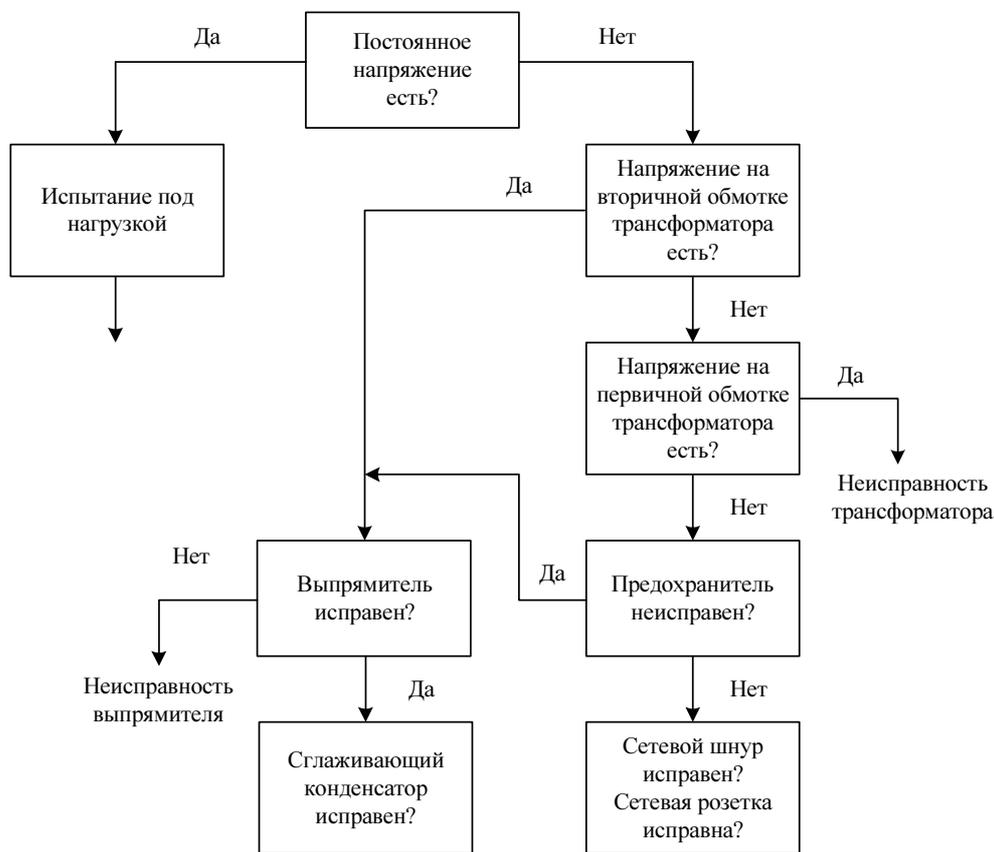


Рис. 9.8. Блок-схема поиска неисправностей в источниках питания

Источник питания с электронно-стабилизированными напряжениями питания изображен на рис. 9.9, а.

Это достаточно сложный источник питания обнаруживает избытие признаков неисправностей схемы, которые для успешного и систематизированного поиска неисправностей сначала нужно обнаружить и связать между собой.

У сетевого прибора с несколькими питающими напряжениями нужно проверить, в какой мере выходные напряжения зависят друг от друга. Блок-схема на рис. 9.9, б поясняет следующие взаимосвязи.

Стабилизаторы напряжения IC 503 (+5 В) и IC 501 (+5 В) получают постоянное напряжение от мостового выпрямителя D508. Ограничитель тока IC504



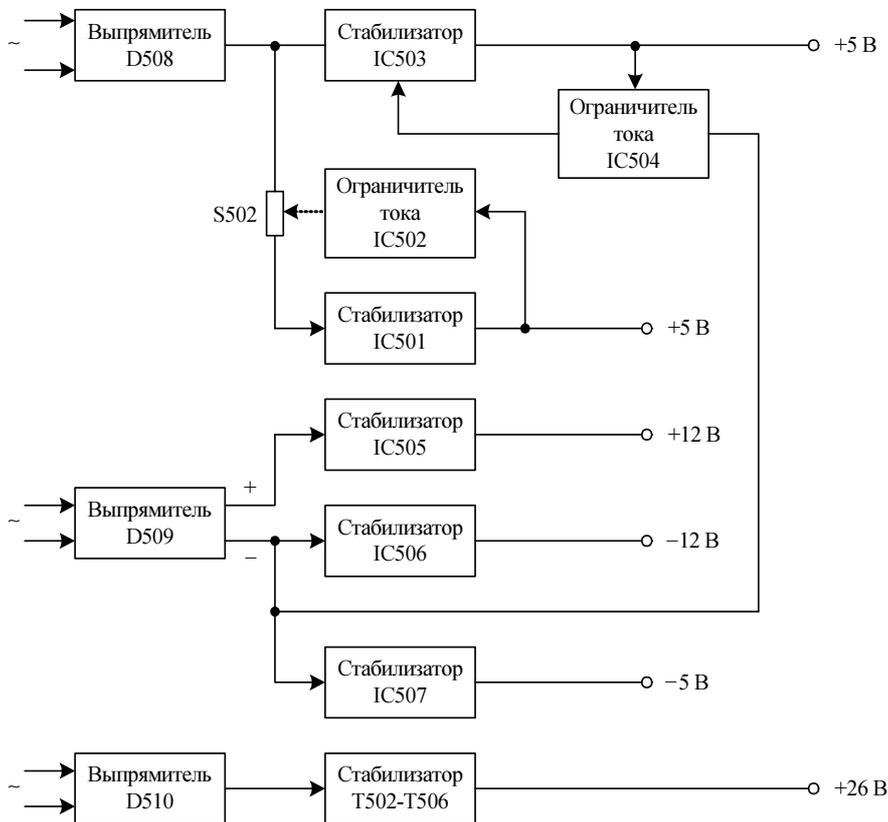


Рис. 9.9, б. Сетевой источник питания: блок-схема источника

в блоке стабилизатора, имеющего на выходе напряжение +5 В, получает напряжение питания от блока питания с напряжением -12 В. Мостовой выпрямитель D509 не связан с опорным нулевым потенциалом. Только стабилизаторы IC505 (+12 В), IC506 (-12 В) и IC507 (-5 В) относятся к общему опорному потенциалу.

Следует обратить внимание на распределение нагрузки, подключаемой к стабилизаторам с напряжением питания +12 В и -12 В. Любые подключенные к ним схемы, как сопротивления нагрузки, располагаются после стабилизатора IC505 на положительном полюсе и IC506 соответственно на отрицательном полюсе мостового выпрямителя D509. Нагрузочные сопротивления подсоединяются между напряжениями +12 В и -12 В и опорным нулевым потенциалом. Предельные изменения тока нагрузки в нагрузочном сопротивлении могут привести из-за этого к изменениям напряжения, которые оба стабилизатора более не смогут компенсировать (см. рис. 4.7). Таким образом, может заодно пострадать и стабилизатор IC507 с напряжением стабилизации -5 В.

Для схем регулирования отдельных питающих напряжений можно выделить следующие функциональные признаки.

Стабилизатор IC503 работает с внешним ограничителем тока, выполненного на микросхеме IC504 (операционном усилителе 741).

Опорное напряжение для внутреннего источника опорного напряжения задается делителем напряжения — резисторами R511 и R512.

Транзистор T501 присоединен к внутреннему регулятору мощности для повышения тока в нагрузке.

Ограничение тока для 5-вольтового стабилизатора IC501 осуществляется с помощью операционного усилителя IC502. При превышении верхней границы тока тиристор Th501 открывается, вследствие чего срабатывает плавкий предохранитель S502. Таким образом осуществляется защита 5-вольтового стабилизатора по току.

В 26-вольтовой схеме стабилизатора ток ограничивается посредством транзистора T506.

Напряжение регулируется с помощью источника опорного напряжения на стабилитроне D503 и дифференциального усилителя на транзисторах T504 и T505.

Транзистор T503 в соединении с диодами D505 и D506 служит температурной компенсации.

Способ действия для локализации неисправностей в подобных схемах стабилизации был подробно объяснен в *разд. 5.4* (см. рис. 5.25).

## 9.4. Упражнения для закрепления полученных знаний

**УПРАЖНЕНИЕ 9.1.** Источник питания (рис. 9.10) рассчитан на выходное напряжение  $U_2 = 250$  В при токе в нагрузке  $I = 0,05$  А. Измерение напряжения при этом потреблении тока выдало величину напряжения  $U_2 = 210$  В.

Какие из следующих причин неисправностей вероятны?

- а) неисправен диод D1;
- б) межвитковое (короткое) замыкание в сетевом трансформаторе;
- в) межвитковое (короткое) замыкание в катушке  $L_1$ ;
- г) неисправен конденсатор  $C_1$  (отсутствует емкость).

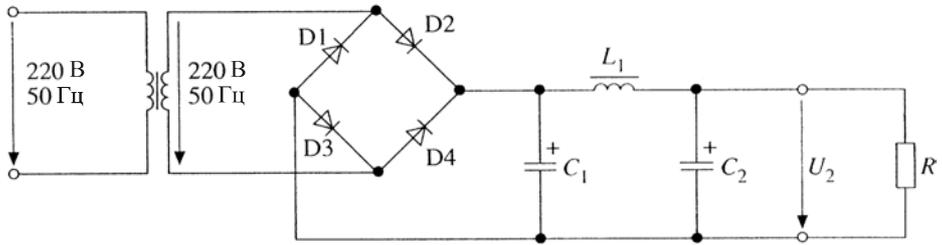


Рис. 9.10

**УПРАЖНЕНИЕ 9.2.** Напряжение стабилизации у стабилитронов на рис. 9.11, *a* равно 10 В. Входное напряжение  $u_1$  схемы ограничения имеет представленную на рисунке характеристику (синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц).

Какая характеристика выходного напряжения  $u_2$  из изображенных на рис. 9.11, *б* соответствует приведенной схеме?

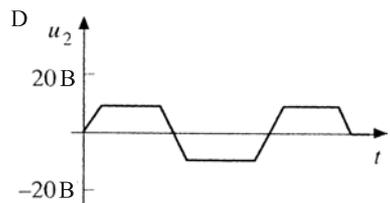
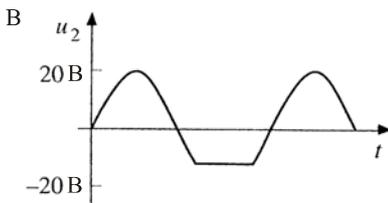
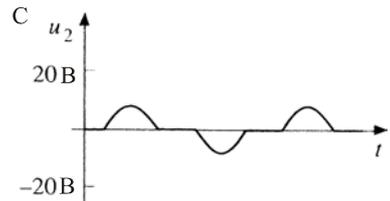
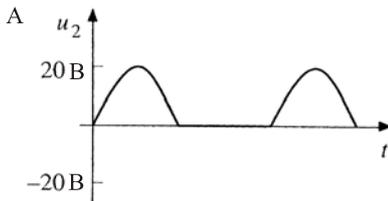
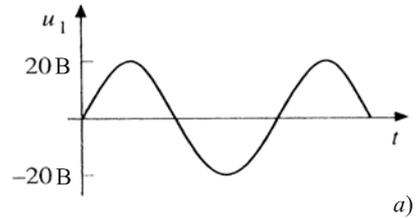
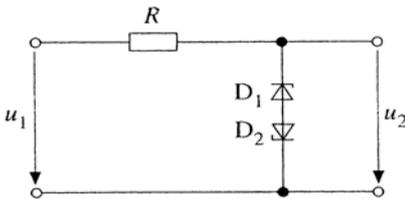


Рис. 9.11

*б)*

**УПРАЖНЕНИЕ 9.3.** При помощи работоспособной схемы, представленной на рис. 9.12, при изменяемом входном напряжении от 0 до 30 В нужно установить изменение выходного напряжения.

Какие из предложенных в табл. 9.1 измеряемых величин можно ожидать в данной схеме?

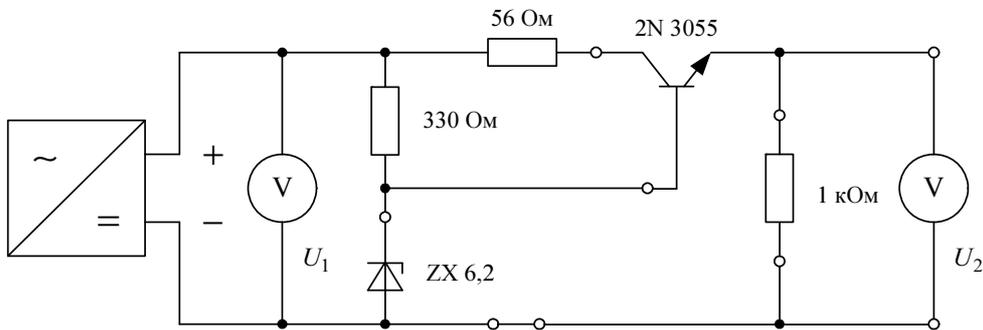


Рис. 9.12

Таблица 9.1

	$u_1$ (В)	4,5	5,5	6,6	7,0	12,0	20,0	30,0
<b>а)</b>	$u_2$ (В)	4,5	5,5	6,6	7,0	11,0	19,0	29,0
<b>б)</b>	$u_2$ (В)	4,5	5,5	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
<b>в)</b>	$u_2$ (В)	3,9	4,9	5,6	5,6	5,7	5,7	5,8
<b>г)</b>	$u_2$ (В)	4,5	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

**УПРАЖНЕНИЕ 9.4.** На схеме (рис. 9.13, а) при характеристике напряжения  $u$  (рис. 9.13, б) и характеристике запускающего напряжения  $u_T$  (рис. 9.13, в) выходное напряжение на нагрузке  $u_{R_n}$  выглядит как на рис. 9.13, г.

Какая из следующих причин неисправности наиболее вероятна:

- межвитковое (короткое) замыкание в трансформаторе;
- неисправен тиристор Т2 (внутренний обрыв);
- неисправен тиристор Т1 (внутренний обрыв);
- резистор нагрузки  $R_n$  разомкнут.

Ответы в приложении!

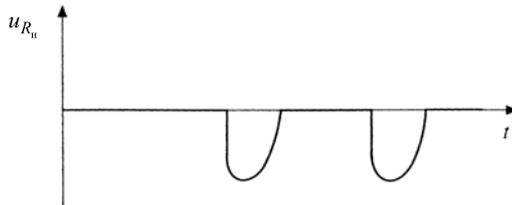
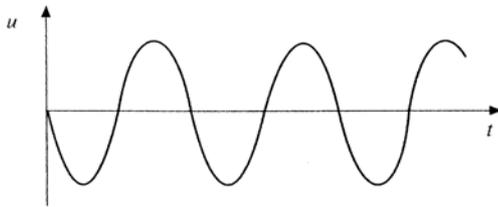
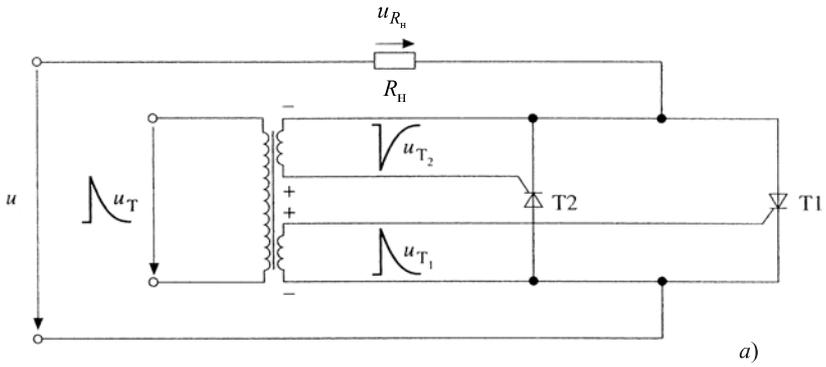


Рис. 9.13

# ГЛАВА 10

## Поиск ошибок в системах тестирования при обслуживании и производстве

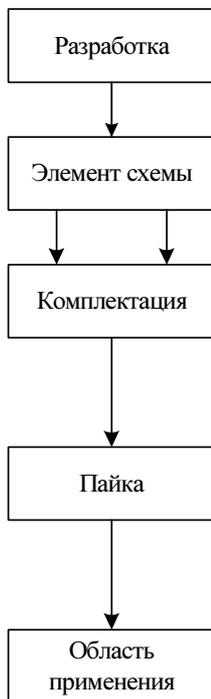
Рассмотренные в предыдущих разделах способы проверки работоспособности и поиска неисправностей при помощи мультиметра, осциллографа и логического анализатора касаются сервисного использования и технического обслуживания отдельных схем и мелких серий. Здесь затраты на тестовые диагностические программы и адаптер очень высоки. Однако применение контактных тестовых систем, прежде всего схем на печатных платах, может быть также полезным и при более масштабном производстве.

Проверка аналоговых и цифровых компонентов в схемах серийного производства и большого количества изделий осуществляется, как правило, с использованием контактных тестовых систем.

При производстве электронного блока на каждом уровне производства могут возникать те или иные неполадки (рис. 10.1), которые оказывают влияние на функциональность и надежность блока и которые поэтому необходимо искать с большими или меньшими затратами.

Для этих случаев контактная тестовая система предоставляет удобные инструменты для диагностирования большинства неисправностей в электронном блоке. В зависимости от уровня производства, имеющиеся при ремонте неисправности в блоке — разнообразны. После комплектации и пайки большинство неисправностей теперь являются производственными дефектами, как, например, отсутствующие или ошибочные элементы схемы, элементы с неправильной полярностью, короткие замыкания при пайке и неконтактные соединения (непропаянные выводы).

После монтажа блоков и ввода их в эксплуатацию имеют место преимущественно механические и электрические причины неисправностей из-за выхода из строя тех или иных элементов.

**Неверное предназначение:**

- Согласованность элементов схемы
- Проблемы допуска

**Неисправности компонентов схемы:**

- Электрические неисправности

**Ошибки комплектации:**

- Отсутствующий компонент схемы
- Неверный элемент схемы
- Элемент схемы с неправильной полярностью

**Неисправности из-за некачественной пайки:**

- Короткое замыкание
- Отсутствие пайки
- "Холодная" пайка

**Неисправности элементов и пайки:**

- Элемент поврежден механически
- Элемент поврежден электрически
- Состарившийся элемент
- "Холодная" пайка
- Единичная случайная неисправность

**Рис. 10.1.** Возможные неисправности при изготовлении и вводе в эксплуатацию

Система ремонта и диагностики, которая может быть введена на всех уровнях производства, для нахождения всех неисправностей должна поэтому иметь в распоряжении несколько методов испытания.

Предлагается множество различных методов тестирования и еще больше испытательных систем различной стоимостью для проверки блоков. При этом рентабельность будет зависеть от многих факторов, так, например, от доли дефектных изделий, размера блока, затрат на адаптацию, стоимости тестовых программ, цены и дополнительных затрат испытательной системы, квалификации сотрудников.

## 10.1. Внутрисхемное тестирование

Такое тестирование является одним из самых эффективных для диагностики неисправностей схем.

Полная проверка работоспособности элемента схемы может осуществляться путем электрического изолирования элемента от других элементов схемы.

При внутрисхемном тестировании испытуемый элемент схемы, например диод, транзистор, резистор, интегральная схема (ИС), проверяется во впаянном состоянии, при этом окружающие и взаимосвязанные с ним элементы не должны существенно исказить результаты измерений.

Цель внутрисхемного тестирования заключается только в проверке элемента схемы на его правильное место подключения и его функционирование. Однако такие параметры, как остаточные токи (токи утечки), обратные напряжения, предельные частоты и т. п., в схеме можно больше не проверять. Например, подведение высокого напряжения для проверки обратного напряжения диода может с высокой вероятностью разрушить другие соединенные с диодом полупроводниковые элементы.

### Линейное внутрисхемное тестирование

Под этим тестированием понимается проверка элементов в аналоговых схемах, таких как, например, проверка диодов, конденсаторов, резисторов, транзисторов, коротких замыканий между токопроводящими дорожками, обрывов в схеме.

Способ измерения сопротивления для проверки резистора в схеме изображен на рис. 10.2.

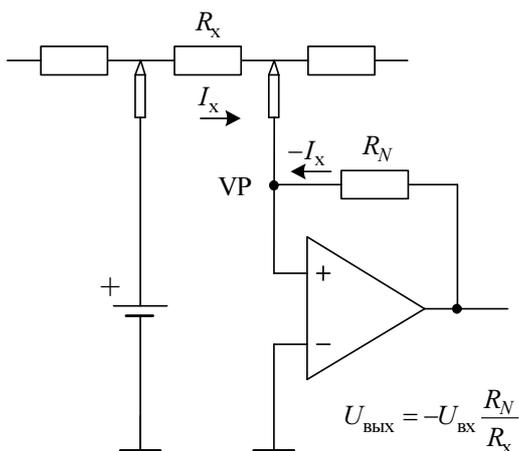


Рис. 10.2. Внутрисхемное измерение сопротивлений резисторов

На резистор  $R_x$  подается постоянное напряжение приблизительно 250 мВ. Затем с помощью инвертирующей усилительной схемы измеряется ток. На ри-

сунке VP (virtual point) — точка с виртуальным нулевым потенциалом. Пока измеряемое напряжение остается меньше, чем прямое напряжение диодов, которые возможно непосредственно подключены к схеме, а также диодов входных и выходных контактных выводов ИС не оказывают воздействия на измерение, т. к. в этом случае эти диоды являются высокоомными.

Если все же параллельно сопротивлению резистора  $R_x$  расположена цепь, то тогда значение сопротивления при этом измерении искажается. В примере согласно рис. 10.3, *а* параллельно резистору  $R_x$  сопротивлением 100 кОм включены два резистора  $R_1$  и  $R_2$ , каждый по 1 кОм. Таким образом, параллельно резистору с сопротивлением 100 кОм подключена цепь с общим сопротивлением 2 кОм. В этом случае сопротивление резистора  $R_x$  точно измерить не удалось бы, поскольку оно находится в поле допуска общего активного сопротивления.

На рис. 10.3, *б* показано, как можно измерить сопротивление резистора  $R_x$  в этой цепи узловым способом. Путем дополнительной узловой точки GP между двумя резисторами ток стекает через резистор  $R_1$  на нулевой потенциал "земли", таким образом не воздействуя на точку VP и, соответственно, на ток  $I_x$ .

Так как в узловой точке GP и в точке виртуального нулевого потенциала ОУ (операционного усилителя) имеется напряжение равное 0 В, то напряжение на резисторе  $R_2$  составляет те же 0 В. Таким образом, через резистор  $R_2$  к точке VP не течет паразитный ток, который бы фальсифицировал измеряемый ток  $I_x$ .

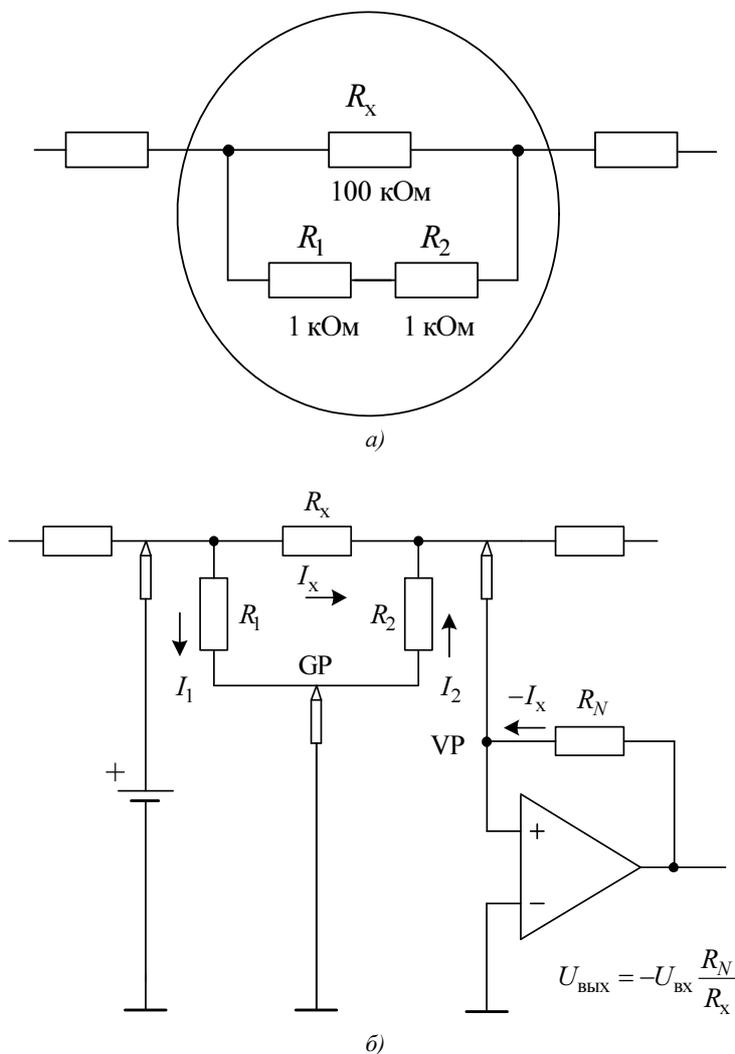
При помощи такого способа можно электрически изолировать сопротивление в цепи, имея возможность при этом механически не отключать параллельное включение. В данном случае можно говорить о трехпроводном способе измерений. Если же подключено несколько параллельных соединений, то тогда при помощи данного узлового способа можно аналогично устранить все дополнительные электрические цепи. При параллельном соединении двух резисторов можно измерять сопротивления не по отдельности, т. к. в этой схеме не может быть установлена дополнительная узловая точка.

Также при помощи узлового способа можно выполнить замер реактивного сопротивления в цепи, например, конденсатора или катушки. Для измерения реактивного сопротивления на месте создания постоянного напряжения создается переменное напряжение. Обычно все же в цепи активное и реактивное сопротивления подключены параллельно. Их нельзя исключить с помощью дополнительного узла, как это показано на рис. 10.4, *а*.

Измерение сопротивления осуществляется при постоянном напряжении. В этом случае измерение тока обычно не начинают до тех пор, пока конденсатор не будет полностью заряжен. Если изменение тока в конденсаторе за-

кончено, то измеряют ток через резистор  $R$  для определения активного сопротивления резистора.

Для определения емкости конденсатора  $C$  на рис. 10.4, *а* требуется четырехквadrантный измерительный мост, который дополнительно к значениям реактивного и активного напряжений также определяет положение фаз между реактивным и активным током. При известной частоте измерения отсюда можно вычислить емкость (рис. 10.4, *б*).



**Рис. 10.3.** Измерение сопротивления в электрической цепи: с параллельно подключенными резисторами (а); соответствующая измерительная схема (б)

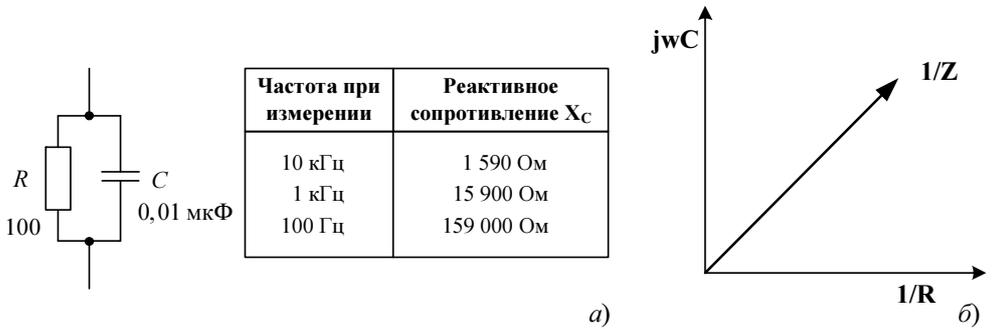


Рис. 10.4. Измерение полного сопротивления: параллельное включение резистора  $R$  и конденсатора  $C$  (а); четырехквadrантное измерение (б)

Не используя этот метод, емкости и индуктивности в цепи можно измерить лишь ограниченно и неточно.

Для тестирования диодов и транзисторов в цепи подводят стабильный ток и измеряют получившееся на диоде напряжение в прямом направлении (рис. 10.5, а).

На рис. 10.5, б изображена схемная реализация способа задачи стабильного тока через диод с помощью инвертирующего ОУ.

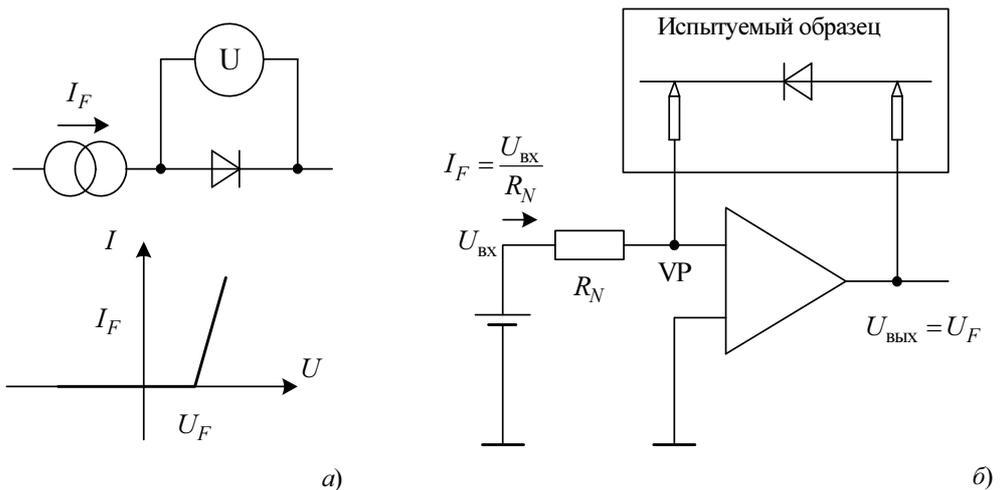


Рис. 10.5. Тестирование диодов: принцип измерения путем подачи стабильного тока и соответствующая вольт-амперная характеристика (а); пример схемы измерения на операционном усилителе (б)

При внутрисхемном тестировании транзистора средствами контроля диодов проверяется диод база-эмиттер и диод база-коллектор. На рис. 10.6, а пред-

ставлена диодная эквивалентная схема транзистора  $n-p-n$ , а на рис. 10.6, б — соответствующая диодная эквивалентная схема транзистора  $p-n-p$ .

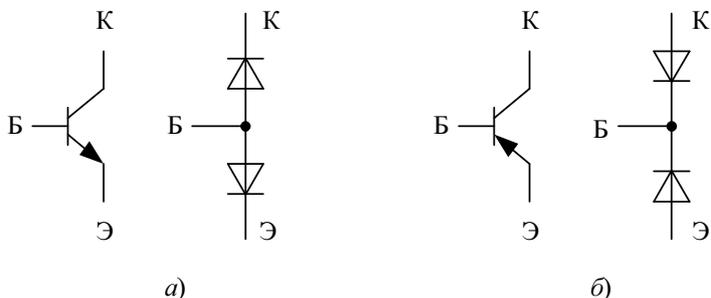


Рис. 10.6. Условное графическое обозначение и эквивалентная схема транзистора  $n-p-n$  (а) и транзистора  $p-n-p$  (б)

## Цифровое внутрисхемное тестирование

Благодаря данному тестированию проверяют цифровые интегральные схемы (ИС). При этом ИС проверяются на работоспособность в соответствии с их таблицей истинности (рис. 10.7, а). Не следует забывать, что на ИС должно быть подано соответствующее напряжение питания.

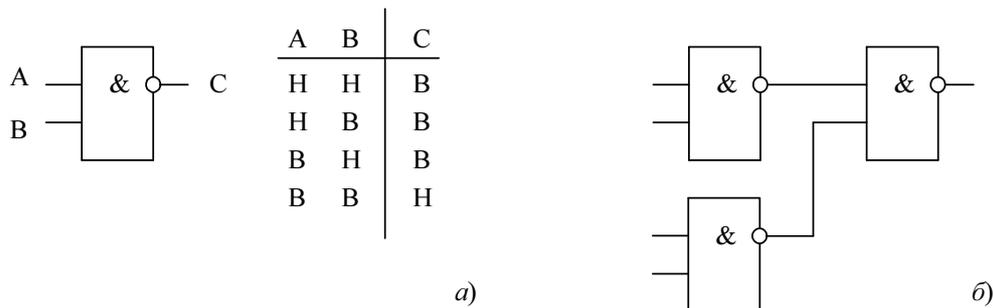
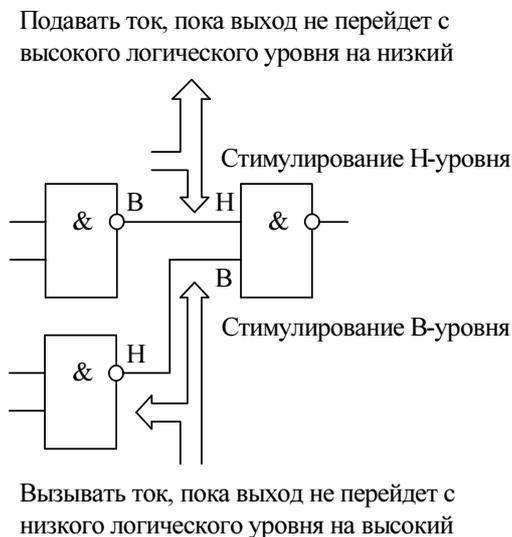


Рис. 10.7. Логический элемент "И-НЕ": условное графическое обозначение и таблица истинности (а); логический элемент "И-НЕ" в электрической схеме (б)

При тестировании цифровой ИС во впаянном состоянии входы ИС в соответствии с таблицей истинности должны быть установлены на высокий (В) и низкий (Н) логический уровни. Так как входы схемы управляются другими ИС или элементами схемы (рис. 10.7, б), которые также должны быть подключены к напряжению питания и, следовательно, являются активными, то обязательно нужно записать состояния выходов включенных ранее ИС или элементов схемы, чтобы получить требуемые комбинации высоких и низких

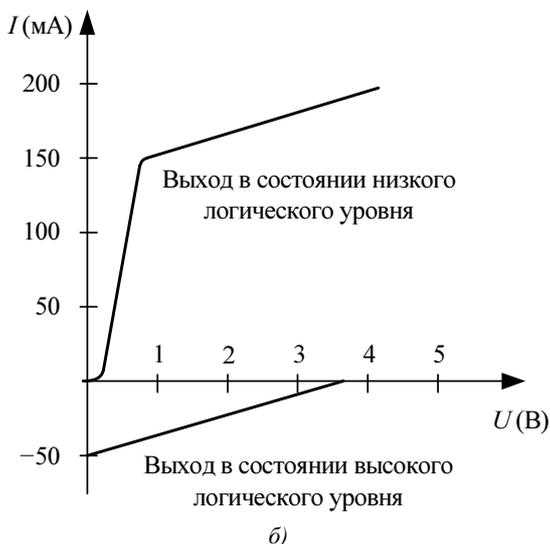
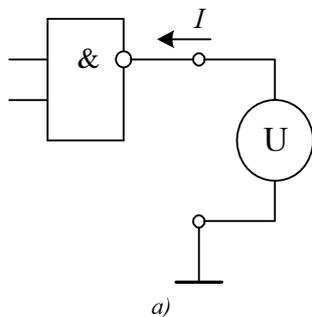
уровней напряжения на входах тестируемой ИС (рис. 10.8). Такой метод тестирования обозначают как *Backdriving* (установка узла схемы в нужное состояние "обратным путем"), *Node-forcing* (принудительная установка уровня сигнала в узле тестируемой схемы) или *Over-writing* (перезапись).



**Рис. 10.8.** Изменение входного логического уровня методом тестирования Backdriving

Для этого процесса проверки требуются соответствующие возбуждающие (задающие) каскады, которые могут создавать относительно высокие значения токов. Для интегральной схемы ТТЛ неблагоприятный случай наступает, когда низкий логический уровень напряжения на выходе схемы должен измениться на высокий логический уровень, поскольку ток, необходимый для изменения логического уровня на выходе элемента с высокого уровня на низкий, больше чем ток, требующийся для изменения уровня с низкого на высокий (рис. 10.9). Следует отметить, что при этой методике тестирования протекают намного более высокие токи, чем при нормальном режиме работы ИС, поэтому должны быть приняты соответствующие меры предосторожности для того, чтобы интегральную схему не вывести из строя.

Так, например, максимальное питающее напряжение при этом методе испытания составляет только 5 В. Даже когда схема приводится в действие КМОП-схемой с напряжением питания, равным 15 В, тестирование происходит только при 5 В. Это напряжение питания достаточно для тестирования, при котором ИС проверяется в цепи только на исправность и на отсутствие ошибок при пайке.



**Рис. 10.9.** Схема измерения (а) и полученная кривая зависимости ток-напряжение на выходе логического элемента "И-НЕ" (б)

Стандартные значения токов, требующиеся для метода тестирования Back-driving при напряжении питания равном 5 В, приведены в табл. 10.1.

Кроме ограничения тока также требуется ограничение времени тестирования, поскольку при соответствующем высоком значении тока и слишком длительном времени тестирования ИС будет перегрета и, таким образом, выведена из строя.

Для интегральной схемы ТТЛ-типа длительность тестирования должна быть менее 500 мс, а для ИС КМОП-типа — менее 100 мс. Если на входах проверяемой ИС не расположены никакие другие выходы или имеются выходы только в третьем (высокоимпедансном) состоянии, то в этом случае ограничение времени тестирования не требуется.

**Таблица 10.1.** Токи для метода тестирования Backdriving для различных семейств логических элементов

Семейство микросхем	Ток при изменении логического уровня на выходе ИС	
	с высокого на низкий	с низкого на высокий
ТТЛ (TTL)	75 мА	150 мА
Маломощные ТТЛ элементы (LS TTL)	60 мА	100 мА
КМОП (CMOS)	10 мА	10 мА
ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) (ECL)	150 мА	<1 мА
ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с диодами Шотки) (S TTL)	150 мА	300 мА

Помимо самого метода тестирования Backdriving, чтобы иметь возможность протестировать ИС в цепи, требуются также и другие действия. Так, если тестируемая ИС, к примеру, расположена на шине, то все другие подключенные к шине схемы должны переключиться в третье состояние (высокого импеданса). В противном случае входы тестируемой ИС будут испытывать на себе произвольное воздействие выходов других интегральных схем.

Если выполняется тестирование ИС1 (рис. 10.10), то ИС2 по входу  $\overline{CS}$  (Chip Select — выбор кристалла (микросхемы)) должна быть переведена в состояние высокого импеданса. При проверке же ИС2 в состояние высокого импеданса с помощью входа  $\overline{CS}$  должна быть переведена ИС1. Такая последовательность тестирования обозначается как Disabling — тестирование с блокировкой.

Если в блоке активным является генератор, например, кварцевый резонатор, то его работа должна быть остановлена (рис. 10.11). Этим предотвращается искажение процесса тестирования интегральных схем, связанное с генерированием импульсов. Если в схеме имеются логические обратные связи, то при проведении тестирования они также могут привести к помехам.

В примере, приведенном на рис. 10.12, обратная связь с выхода Q с помощью логического элемента "И-НЕ", поступающая на вход синхронизации JK-триггера при известных условиях приводит к тому, что JK-триггер посредством короткого импульса на тактовой шине снова опрокидывается. Таким образом, система тестирования будет сигнализировать будто бы о неисправном JK-триггере.

Во избежание ошибочных сообщений тестовой системы подобные обратные связи должны электрически блокироваться. В примере на рис. 10.12 из-за

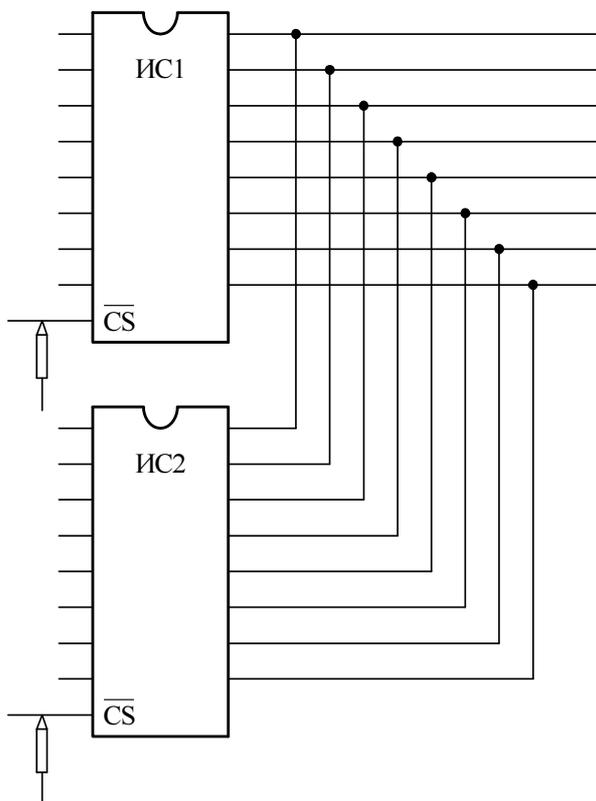


Рис. 10.10. Схема шины

на  $V_{пит}$  ( $V_{cc}$ ), GND (общий) или драйвер

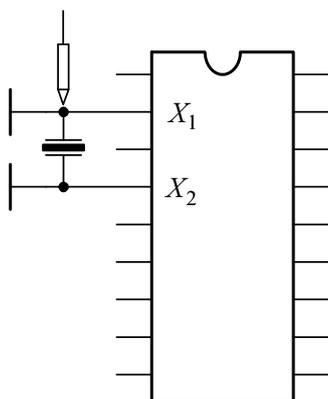


Рис. 10.11. Варианты отключения кварца

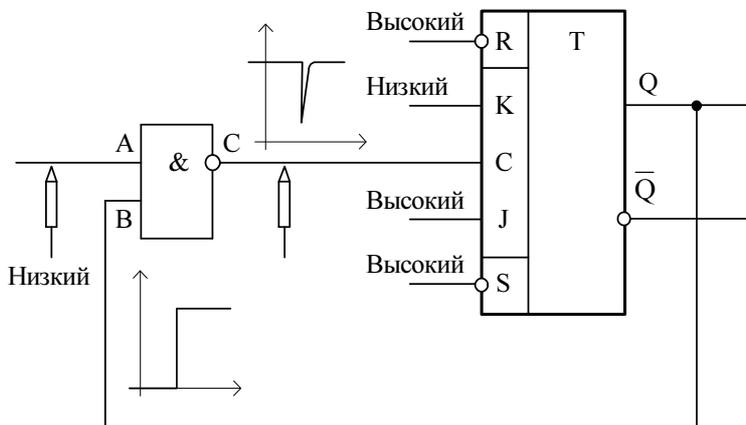


Рис. 10.12. Блокировка обратных связей путем запрещения

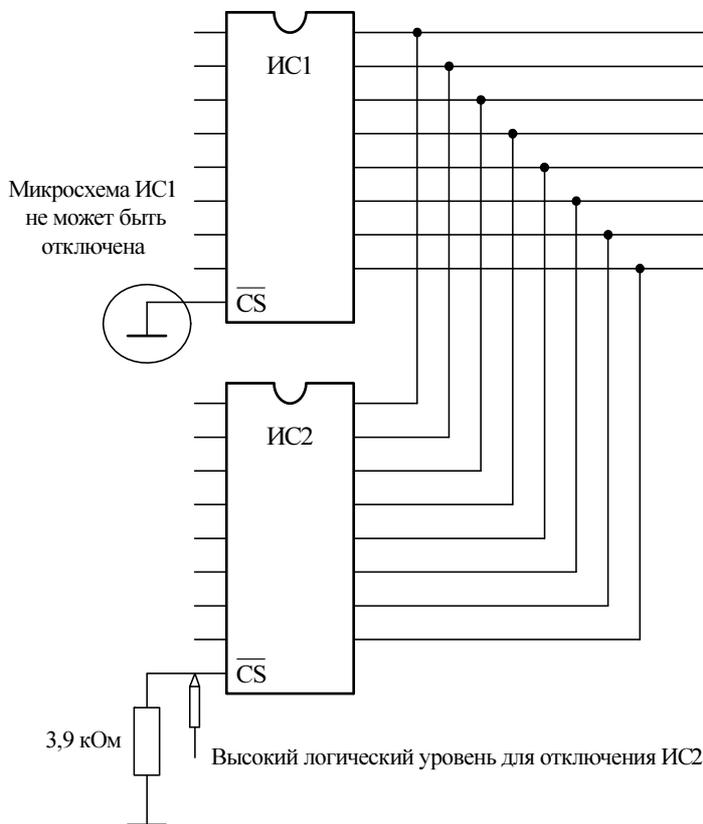
подачи низкого логического уровня на вход А логического элемента "И-НЕ" смена логического уровня на входе В не будет оказывать влияние на выход С, а следовательно, и на тактовый вход JK-триггера. Этот процесс тестирования обозначается как запрещение обратной связи.

В случае если разработка схемы не предусматривает возможность оперативного вмешательства, то некоторые элементы и части схемы при цифровом внутрисхемном тестировании не могут быть проверены, потому что некоторые ИС невозможно отключить от шины.

На рис. 10.13 приведен подобный пример. В данной схеме, вместо того чтобы присоединить вывод выбора кристалла  $\overline{CS}$  микросхемы ИС2 непосредственно к "земле", этот вывод подключен к "земле" с помощью резистора с сопротивлением 3,9 кОм. Таким образом, для отключения этой схемы на ее вывод  $\overline{CS}$  легко может быть подан необходимый высокий логический уровень напряжения.

Поэтому для всех схем, которые должны быть проверены в серийном производстве системой тестирования, действует правило, сохранять все входы управления и контролирования структурного элемента схемы управляемыми, т. е. не следует присоединять их непосредственно к "земле" или напряжению питания. В качестве примеров здесь можно назвать выводы сброса (RESET) и предварительной установки (SET) на счетчиках и триггерах, выводы выбора кристалла (Chip Select), вывод запроса на захват шины (HOLD) в микропроцессорах.

На рис. 10.14 в качестве примера изображена стандартная шинная система. Для того чтобы провести тестирование всех подключенных к шинной системе структурных элементов, все ИС устройства должны иметь возможность



**Рис. 10.13.** Пример иллюстрирующий, что некоторые микросхемы цифровой электрической схемы могут быть отключены от схемы, а некоторые нет

переключения в третье состояние, т. е. при необходимости могли бы быть отключены от шины. Если же этого сделать не удастся, то, следовательно, невозможно протестировать отдельную подключенную к шине интегральную схему.

Однако внутрисхемное тестирование может выявить не все неисправности в электронном блоке. В принципе, целью этой системы тестирования является проверка на наличие неисправностей отдельных элементов и дефектов пайки (короткие замыкания и обрывы).

Следовательно, такая система тестирования:

- может проводить только статические проверки;
- не может осуществлять полные функциональные тесты ИС;
- не может проводить проверку взаимного влияния структурных элементов;
- зачастую не может применяться под рабочим напряжением питания.

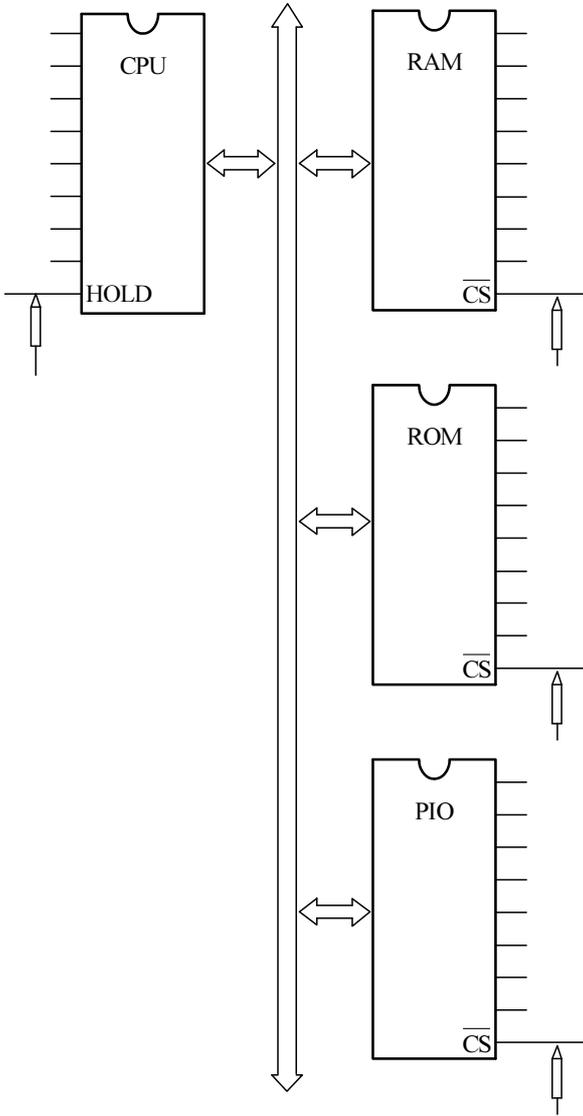


Рис. 10.14. Шинная схема с точками для отключения отдельных элементов схемы

## 10.2. Поиск неисправностей с помощью контактной системы тестирования

Для проверки элементов в схеме с помощью контактной системы тестирования имеется две возможности сопряжения с образцом для испытаний: либо

с помощью матрицы контактных штырьков, либо с помощью щупов с зажимами.

В первом случае на переключательной матрице на полупроводниковых или герконовых реле происходит стимулирование и измерение всех узлов блока. При этом аналоговые и цифровые элементы поддерживают контакт и замеряются последовательно с помощью матрицы.

На рис. 10.15 изображена принципиальная схема внутрисхемного тестирования.

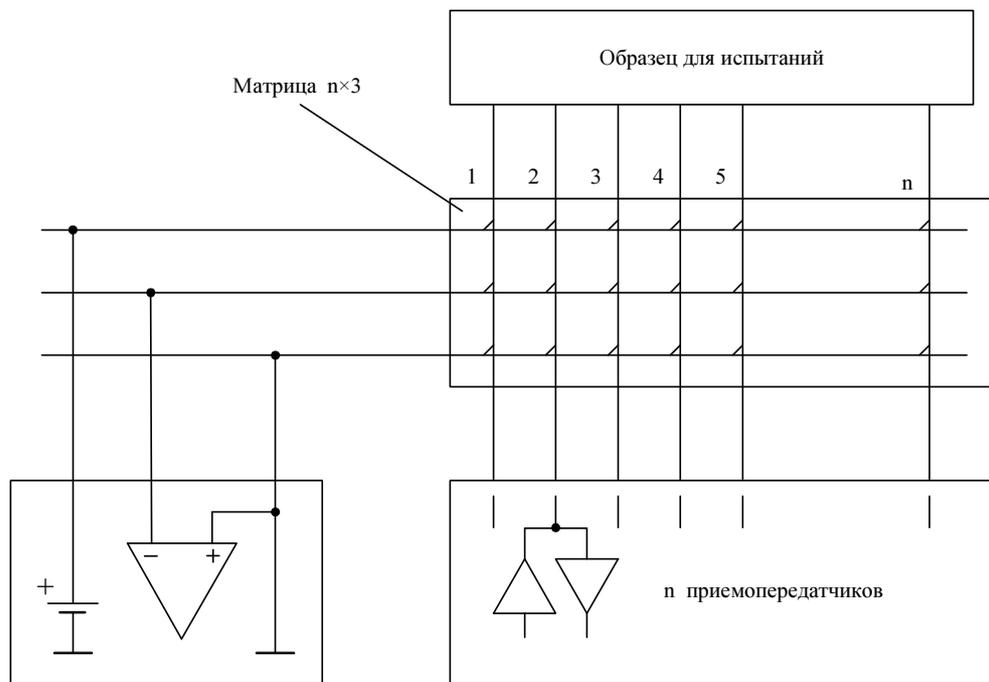


Рис. 10.15. Принцип схемы внутрисхемного тестирования

Помимо матрицы аппаратное обеспечение содержит соответственно мультиплексируемые выходы приемопередатчиков. Об автоматическом ходе заботится тест-программа, в которой предусмотрены все процессы защиты информации, исключения влияния параллельных компонентов на изменение параметров проверяемого компонента платы при внутрисхемном тестировании, методы блокировки отдельных элементов.

Для применения адаптера матрицы контактных штырьков требуется описание схемы и спецификация проверяемых блоков, которые не всегда имеются в наличии в сфере обслуживания.

В более простых ручных контактных системах тестирования контактирование с элементами осуществляется с помощью управляемых вручную зондов и клипс. Таким образом на аппаратное и программное обеспечение выпадают большие расходы. Для проверки серий подобное ручное тестирование требует очень больших затрат времени и поэтому является нерентабельным и годится только для поштучного испытания и, следовательно, для использования в сфере сервиса. Системы контактного тестирования, как правило, сопрягаются и управляются с помощью персонального компьютера (ноутбука).

Ручная система контактного тестирования обладает несколькими режимами работы для обнаружения неисправностей в цепи, так, например, линейными функциями:

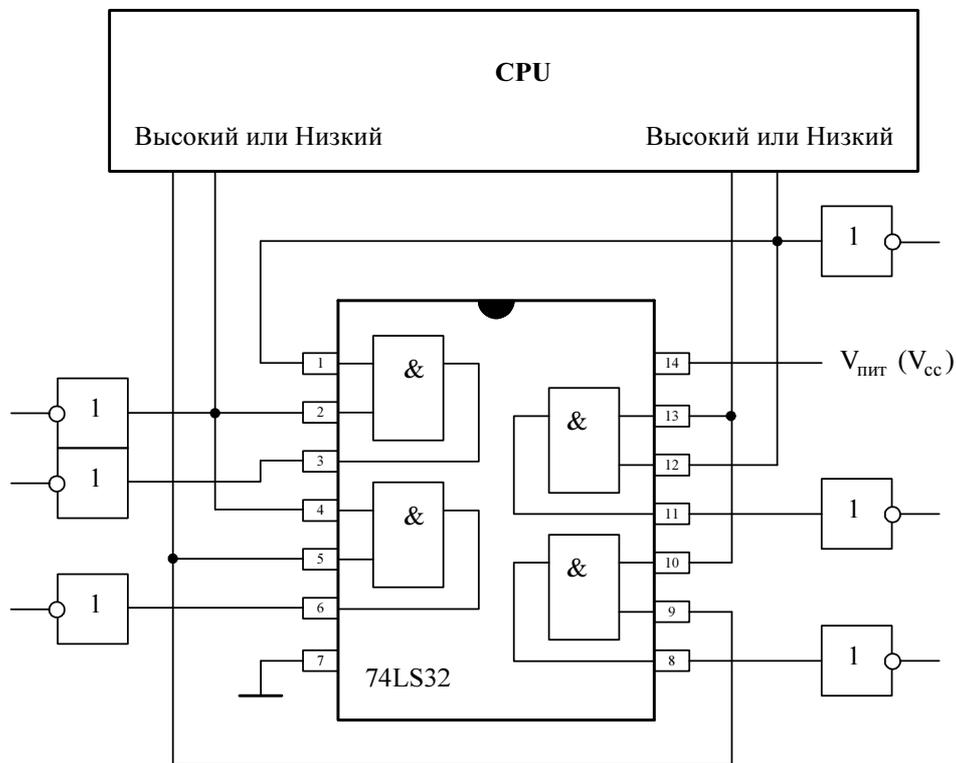
- проверки напряжений;
- проверки соединений;
- получения вольт-амперных характеристик;
- активизации проверок ИС (цифрового внутрисхемного тестирования).

Линейные процессы проверки (аналоговые сигнатуры) устанавливают статические функции, как, например, напряжения, полные сопротивления, соединения узлов или всех выводов ИС.

При проверке цифровых элементов схемы с помощью контактной системы тестирования контактирование происходит посредством стандартного тестового зажима (клипсы) для всех стандартных корпусов, которые надеваются на тестируемую ИС, например: *DIP* (Dual-In-Line Package — корпус ИС с двухрядным расположением штырьковых выводов), *SMD* (Surface Mounted Device — корпус с планарными выводами для монтажа на поверхность печатной платы) и *PLCC* (Plastic Leaded Chip Carrier — квадратный пластиковый корпус с контактами, расположенными по всем его сторонам, для микросхем, предназначенных для монтажа на поверхность платы).

Измерения напряжения при помощи мультиметров и осциллографов проводятся вручную и являются длительными по времени проверками для нахождения неисправностей.

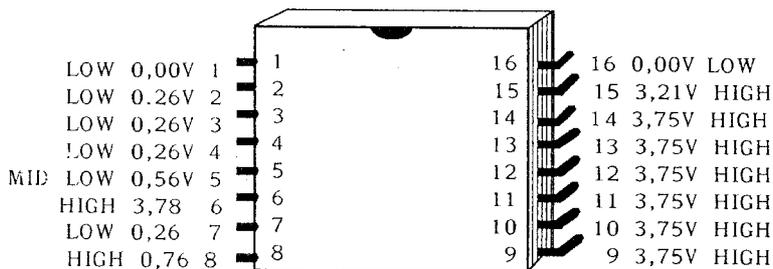
*Тестирование напряжений* при помощи контактной системы тестирования позволяет наблюдать за всеми штырьковыми выводами ИС одновременно. На экране отображаются все значения напряжений с соответствующими логическими уровнями. Тестирование напряжений показывает статическое состояние ИС непосредственно после подключения напряжения питания. На рис. 10.16, а изображена схема с применением ТТЛ-микросхемы SN74LS32



a)

UNDEFINIERT

16 PIN DUAL IN LINE IC



б)

Рис. 10.16. Тестирование напряжений: электрическая схема с микросхемой SN74LS32 (а); представление результата тестирования

(четыре двухвходовых логических элемента "ИЛИ") в цепи. На рис. 10.16, б показан соответствующий результат измерения напряжений на всех штырьковых выводах микросхемы. При этом измеренные напряжения классифицируют в соответствии с определенными пределами для высокого (HIGH) и низкого (LOW) логического уровня напряжения.

Стандартным уровнем для этой ТТЛ-микросхемы при этом является 2,4 В для высокого уровня напряжения и 0,5 В для низкого уровня.

Это значит, что все напряжения, которые равны или больше 2,4 В, соответствуют высокому логическому уровню, а те, что равны или меньше 0,5 В, — низкому логическому уровню.

Тестовым сообщением при этом обычно является UNDEFINIERT — "НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ", т. к. при этом тестировании еще нет сравнительных данных, например, с данными опорных (базовых) блоков. Измеренные значения напряжения зависят от схемы и поэтому не могут быть сохранены в библиотечном файле.

С помощью данного тестирования можно наблюдать за измеренным значением напряжения одного вывода по отношению к другим выводам элемента.

При тестировании напряжения цифровых элементов, которые, например, содержат триггеры или которые настраиваются унифицированными узлами, имеющими функции памяти, от теста к тесту могут появляться различные значения напряжения, поскольку триггеры при подключении к ним напряжения питания могут оказаться в произвольном состоянии, т. е. выходы могут принимать высокий либо низкий логический уровень напряжения. Чтобы заметить стабильность при тестировании напряжений, выполняют многократно повторяющиеся и следующие друг за другом тесты или один длительный тест — в данном примере тест выполнялся 36 раз — и наблюдают изменения на выводах тестируемой микросхемы. Так, в примере, согласно рис. 10.16, а, на выводах процессора (CPU) при каждом прогоне теста могут находиться различные высокие или низкие логические уровни, которые будут влиять на измерение напряжений на микросхеме 74LS32.

В следующем примере изображена электрическая схема (рис. 10.17, а) и результат тестирования напряжений цифровой ИС трехразрядного двоичного декодера/демультимплектора SN74LS138 (рис. 10.17, б). Для улучшения диагностики здесь дополнительно к логическим пороговым значениям HIGH (высокий) и LOW (низкий) определен еще один порог — *порог переключения* (рис. 10.17, в). Таким образом, более точно удастся определить промежуточный диапазон между высоким и низким логическими уровнями, это значит, уровни между логическим порогом высокого уровня (HIGH) и порогом переключения обозначаются как MID-HIGH, а уровни между логическим порогом низкого уровня (LOW) и порогом переключения — MID-LOW.

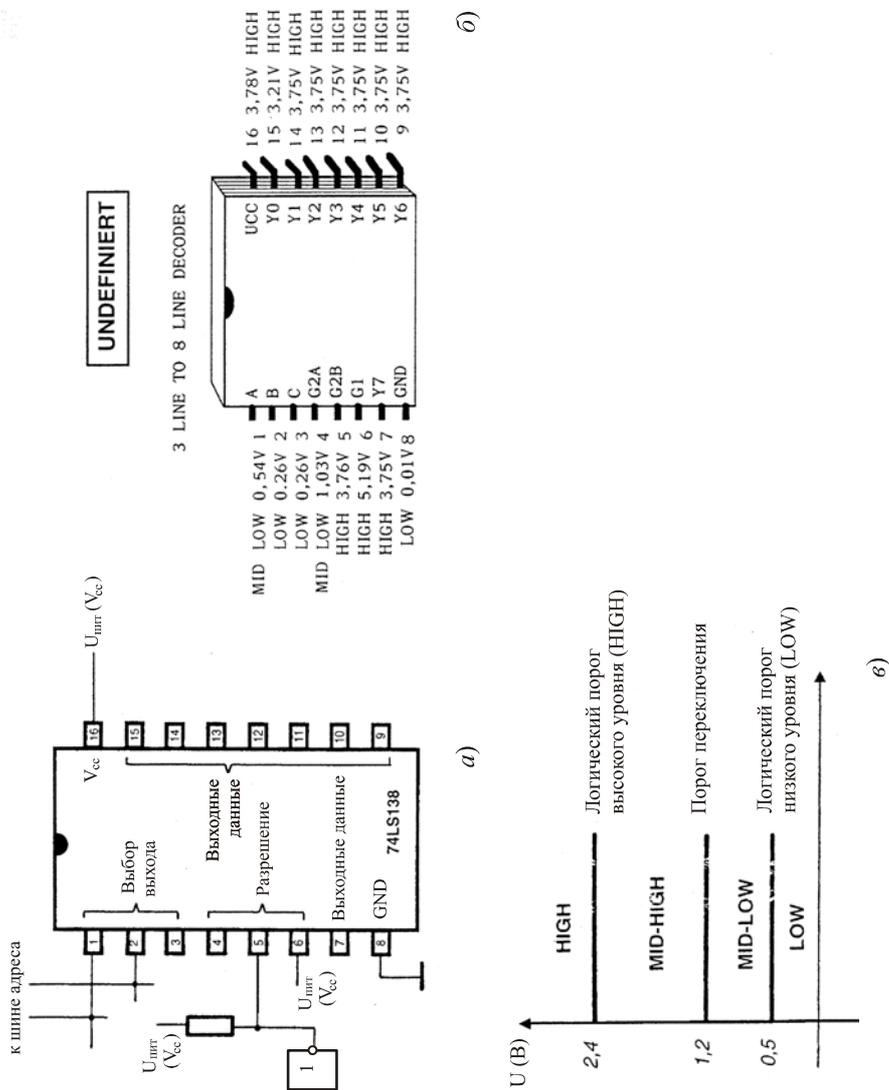


Рис. 10.17. Тестирование напряжений: электрическая схема с микросхемой SN74LS138 (а); представление результата тестирования (б); определение порога переключения при тестировании напряжений (в)



MASSE: вывод 7 находится на "земле"  
 VCC: вывод 14 находится на "земле"

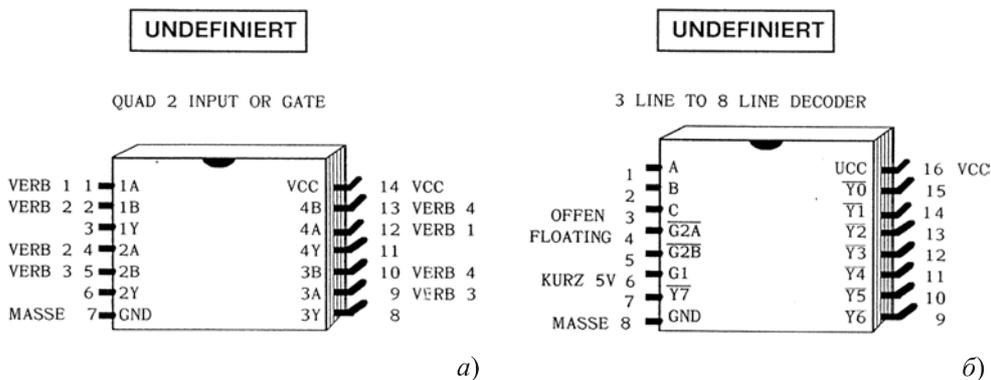


Рис. 10.19. Тестирование соединений: результат тестирования для ИС SN74LS32 (а); результат тестирования для ИС SN74LS138 (б)

На рис. 10.19, б изображен результат тестирования соединений для ИС SN74LS138 согласно схеме, приведенной на рис. 10.17, а. В этой схеме соединения выводов друг с другом отсутствуют. Однако вывод 8 находится на "земле", а вывод 16 на напряжении питания. Вывод 6 имеет короткое замыкание (kurzschluss) относительно источника с напряжением +5 В (KURZ 5V). При измерении на выводе 3 определено довольно высокоомное значение сопротивления (OFFEN — разомкнут), а на выводе 4 — немного низкоомное значение (FLOATING — свободный, "плавающий").

При тестировании соединения могут появиться следующие сообщения, и таким образом, они дают обзор соотношений сопротивлений для каждого вывода:

VERB n: выходы, которые низкоомно ( $< 10 \text{ Ом}$ ) соединены между собой  
 KURZ 0V: выходы, которые низкоомно ( $< 1,6 \text{ Ом}$ ) подключены непосредственно к "земле" (нулевому потенциалу)  
 KURZ 5V: штырьковые выходы, которые низкоомно ( $< 3,5 \text{ Ом}$ ) подключены непосредственно к напряжению 5 В  
 FLOATING: штырьковые выходы, на которые не воздействуют стандартные логические уровни (низкий или высокий)  
 OFFEN: выходы, которые являются разомкнутыми

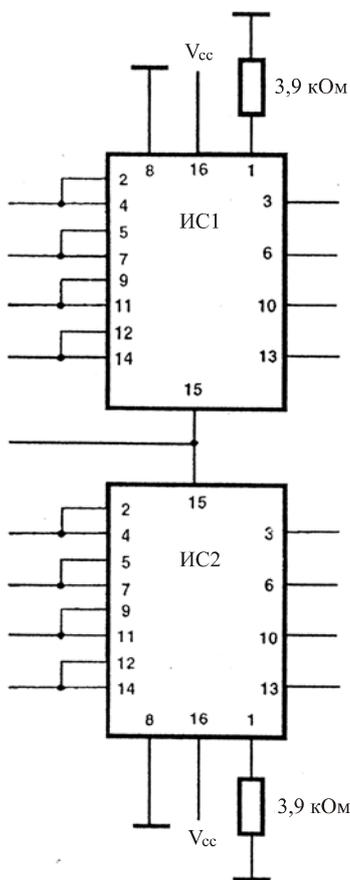
Сообщения результатов тестирования соединений в контактной системе тестирования также помечаются UNDEFINIERT — "НЕОПРЕДЕЛЕННЫЙ", т. к.

без опорного (базового) файла невозможно говорить о достоверности результатов.

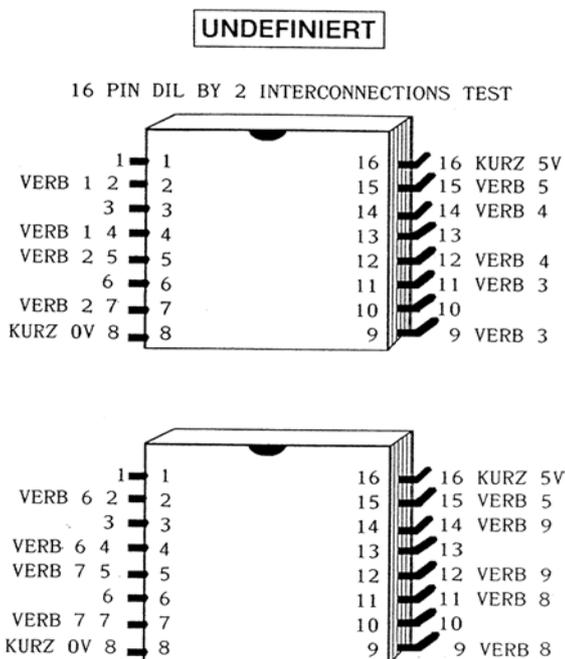
*Тестирование соединений между ИС* — это дополнительное тестирование соединений между интегральными схемами. Такое тестирование выполняется при помощи двух тестовых зажимов (клипс) для соответствующих ИС. Изменения в этом случае протекают аналогично, как и при тестировании соединений, причем в этом случае изображение на экране показывает обе тестируемые ИС. Согласно схеме на рис. 10.20, а получаются следующие результаты тестирования соединений (рис. 10.20, б):

VERB 1: вывод 2 ИС1 соединяется с выводом 4 ИС1

VERB 2: вывод 5 ИС1 соединяется с выводом 7 ИС1



а)



б)

Рис. 10.20. Тестирование соединений между ИС: пример электрической схемы соединения двух ИС (а); представление результатов тестирования (б)

- VERB 3: вывод 9 ИС1 соединяется с выводом 11 ИС1
- VERB 4: вывод 12 ИС1 соединяется с выводом 14 ИС1
- VERB 5: вывод 15 ИС1 соединяется с выводом 15 ИС2
- VERB 6: вывод 2 ИС2 соединяется с выводом 4 ИС2
- VERB 7: вывод 5 ИС2 соединяется с выводом 7 ИС2
- VERB 8: вывод 9 ИС2 соединяется с выводом 11 ИС2
- VERB 9: вывод 12 ИС2 соединяется с выводом 14 ИС2
- KURZ 0V: вывод 8 ИС1 и вывод 8 ИС2 подключены к напряжению 0 В
- KURZ 5V: вывод 16 ИС1 и вывод 16 ИС2 подключены к напряжению 5 В

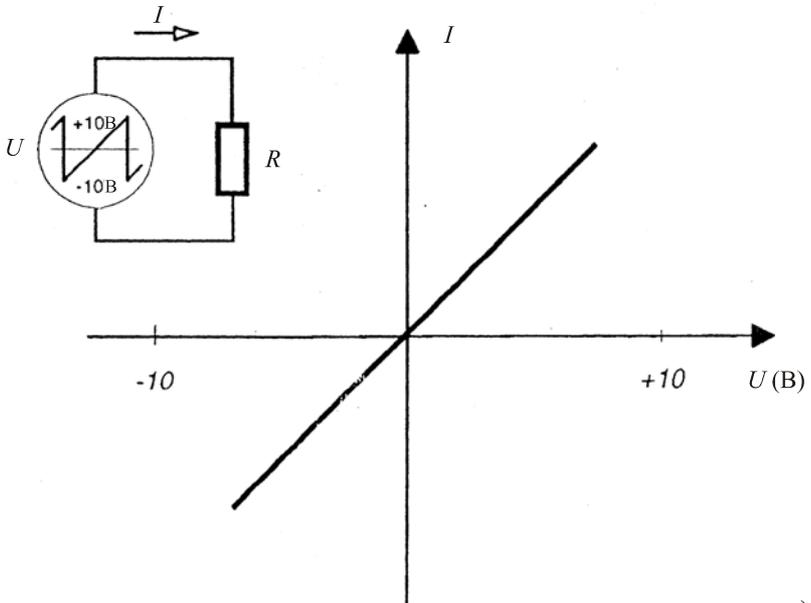
Тестирование соединений между ИС приносит пользу также в том случае, когда при ремонте блока в распоряжении нет принципиальной электрической схемы.

При *тестировании методом анализа вольт-амперных характеристик* или, иначе, *VI-тестировании* (английское наименование *VI-Traces* — метод вольт-амперного следа) регистрируются графические диаграммы "ток-напряжение" всех подключенных выводов микросхем и отдельных узлов относительно "земли". Системой тестирования на выводы схем последовательно подводится ограниченное по току высокоомное пилообразное напряжение в определенном диапазоне напряжений, например, от  $-10$  до  $+10$  В, а также регистрируется соответствующий ток. К испытываемому образцу не должно подводиться никакое другое напряжение, т. к. под воздействием этого пилообразного напряжения и находятся графические вольт-амперные характеристики.

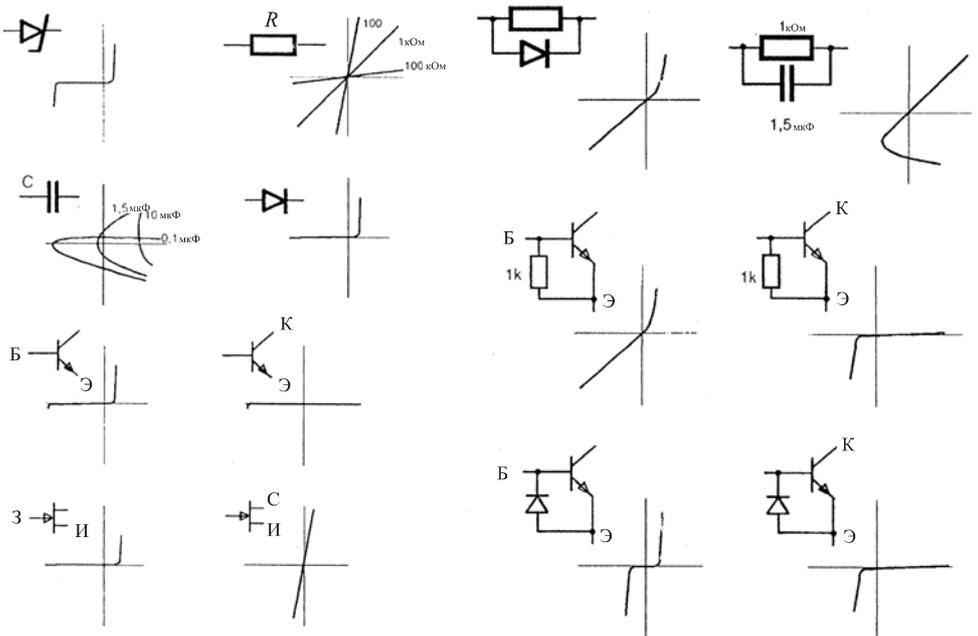
Тестирование методом анализа вольт-амперных характеристик (VI-тестирование) представляет собой аналоговую характеристику для выводов элементов, и он может применяться для тестирования аналоговых и цифровых ИС, а также дискретных элементов, при этом библиотечный образец не обязателен. При таком методе тестирования выдаются результаты тестирования, которые выявляют наиболее частые неисправности элемента схемы. Для этого не требуется никакого исключения влияния параллельных компонентов. При VI-тестировании на горизонтальной оси изображается напряжение, а на вертикальной оси — ток.

На рис. 10.21, *а* показана схема и соответствующая вольт-амперная характеристика для сопротивления, к которому подведено пилообразное напряжение, изменяющееся от  $-10$  до  $+10$  В.

В зависимости от типа элемента схемы получаются соответствующие стандартные кривые. Некоторые из графических характеристик элементов схемы в качестве примера приведены на рис. 10.21, *б*.



а)



б)

в)

Рис. 10.21. Вольт-амперные характеристики (кривые) при VI-тестировании: резистора (а); для неподключенных элементов (б); для элементов, подключенных в схему (в)

При тестировании дискретных элементов в схеме графические характеристики зависят от схемы подключения элемента. Это иллюстрируют некоторые примеры, приведенные на рис. 10.21, *в*.

При тестировании интегральных микросхем, включенных в схему вольт-амперные характеристики (кривые при VI-тестировании), последовательно получают для всех выводов ИС и могут изображаться в виде блоков, например, по 8 штук на экране.

Следует заметить, что при таком тестировании не должны подводиться какие-либо другие напряжения, а также напряжения питания.

На рис. 10.22, *а* изображены вольт-амперные характеристики при VI-тестировании микросхемы SN74LS32 согласно схеме рис. 10.16, *а*. Полученные таким образом кривые следует оценивать следующим образом.

Для выводов 8, 10, 11, 13 — это типичные кривые для узла, который включает соединение входного и выходного выводов маломощной ТТЛ-микросхемы (эквивалентная схема приведена на рис. 10.22, *б*).

Для выводов 9, 12 — это типичные кривые для узла, который включает только один или несколько входных выводов маломощной ТТЛ-микросхемы, а также еще один высокоомный выходной вывод другого семейства логических элементов.

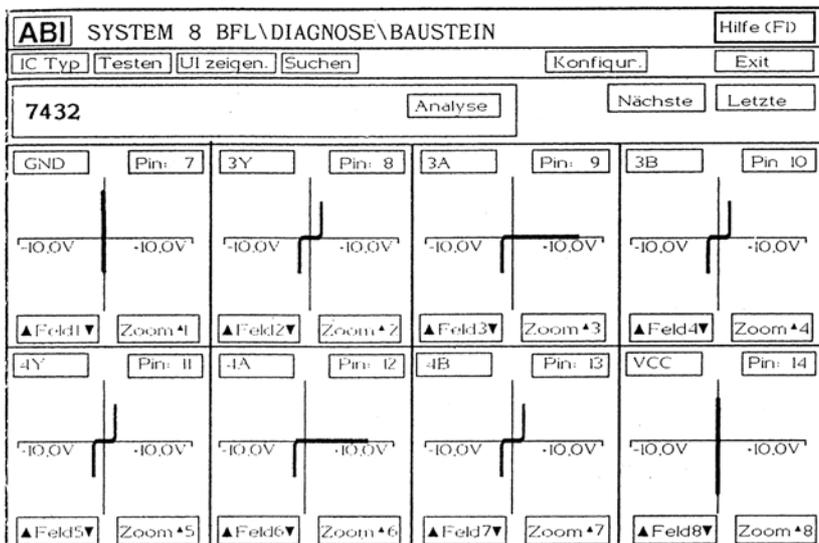
Для вывода 7 — типичная кривая вывода, на который подано напряжение "земли".

Для вывода 14 — типичная кривая для вывода, на который подано напряжение питания.

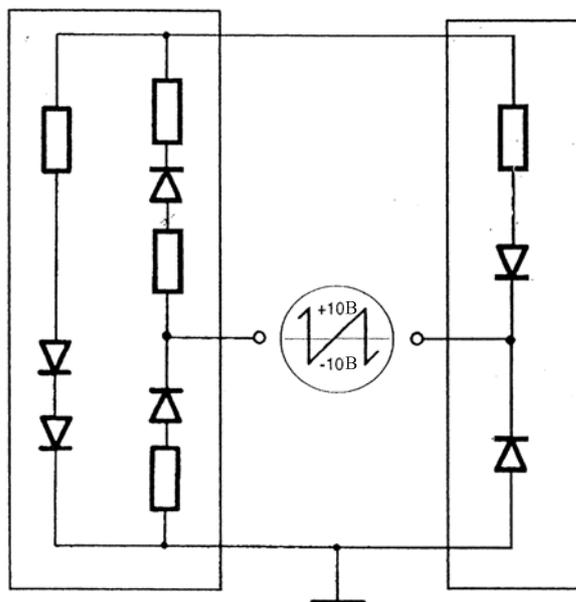
Итак, кривые при VI-тестировании зависят также от внутренней структуры входов и выходов различных семейств логических элементов. Таким образом, благодаря подобному тестированию отчасти могут быть обнаружены неправильные типы семейств логических элементов, включенных в схему.

При *функциональном тестировании* цифровых ИС в цепи речь идет о цифровом внутрисхемном тестировании методом Backdriving. Активация входов и проверка выходов микросхем происходит по таблице истинности. Система тестирования контактов имеет в своем распоряжении, как правило, большой библиотечный файл структурных элементов для всех стандартных ИС. Так как при внутрисхемном тестировании речь идет о статическом функциональном тесте с частотами тестирования в килогерцовом диапазоне, то в библиотеке имеются только базовые модели, например 7400 для SN7400 и SN74LS00 и т. д.

В библиотеке типовых элементов уже содержатся стандартные значения пороговых напряжений для отдельных ИС. При соответствующем монтаже ИС



a)



Выход

Вход

б)

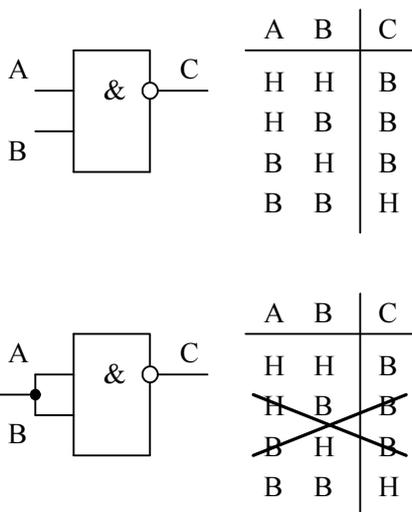
Рис. 10.22. VI-тестирование: результаты тестирования ТТЛ-микросхемы SN74LS32 (а); эквивалентная схема входов и выходов маломощных ТТЛ-микросхем (б)

эти значения, однако, иногда оказываются неподходящими и их нужно подгонять, устанавливая специализированные пороговые значения. В табл. 10.2 приведены типичные значения пороговых напряжений.

**Таблица 10.2.** Стандартные значения пороговых напряжений для цифровых интегральных микросхем

	Программируемый	В библиотеке	
		КМОП	ТТЛ
Низкий логический уровень, В	0,1—1,5	0,5	0,5
Порог переключения, В	1,0—3,0	1,2	2,5
Высокий логический уровень, В	1,9—4,9	2,4	4,0

Некоторую проблему представляют собой нестандартные схемы цифровых ИС в цепи, например, когда два входа двухвходового логического элемента "И-НЕ" соединены между собой (рис. 10.23).



**Рис. 10.23.** Функциональное различие схем, использующих двухвходовой логический элемент "И-НЕ"

При тестировании согласно стандартному библиотечному файлу для логического элемента "И-НЕ" происходит попытка на входе А и В вызвать разные логические уровни, что при соединенных входах невозможно. Поэтому контактная система тестирования должна распознать эту специальную схему и автоматически учесть ее.

В данном случае это означает, что 2-я и 3-я строки в таблице истинности должны быть исключены (см. рис. 10.23). Таким же образом штырьковые выводы ИС могут быть подключены к "земле" или напряжению питания, что, разумеется, в этом случае также должно быть соответствующим образом учтено в таблице истинности.

Для гарантирования этого необходимо выполнение нескольких предварительных тестов перед запуском функционального теста. Соответствующую автоматическую последовательность испытания иллюстрирует табл. 10.3.

Так как в файле библиотеки выводы с напряжением питания и "земли" известны, то путем выполнения тестов с номерами 1 и 2 может произойти автоматическое распределение всех штырьковых выводов микросхемы. Так становится возможным автоматическое определение выводов при произвольном подключении тестового зажима (клипсы) для выполнения функционального тестирования микросхемы.

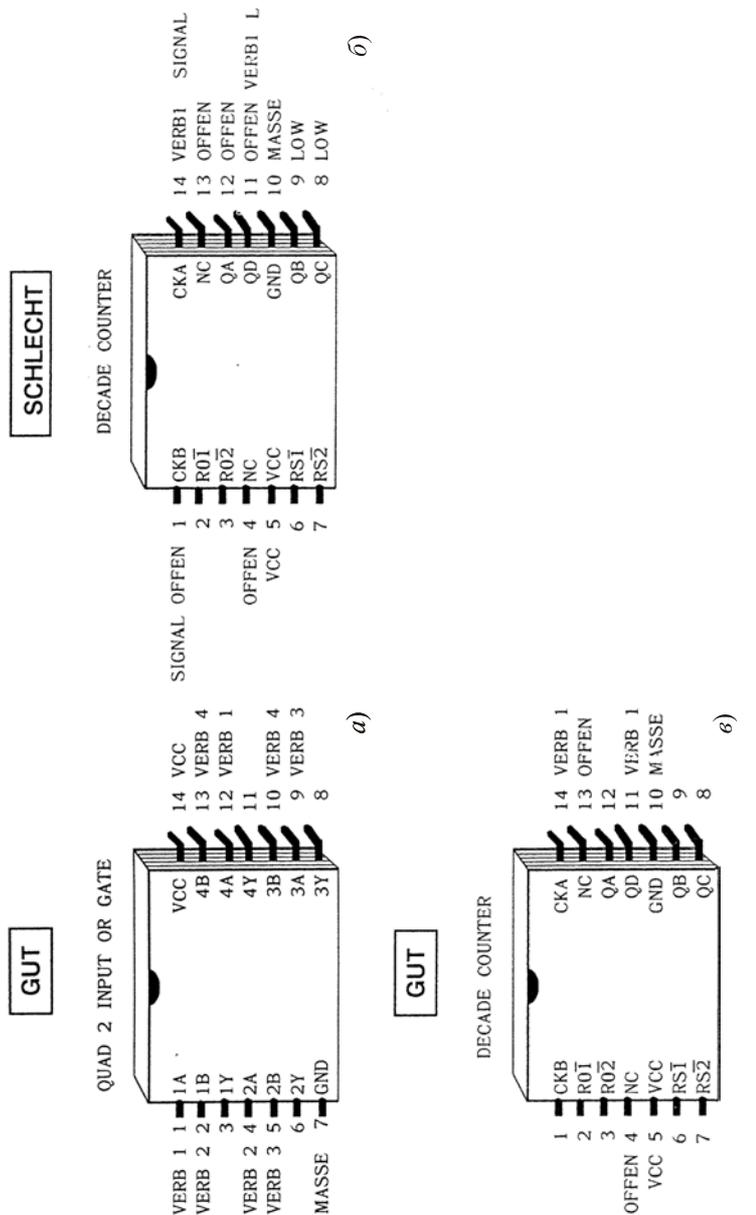
**Таблица 10.3.** Последовательность испытаний перед выполнением функционального тестирования

Номер теста	Выполняемое тестирование	Действия в соответствии с результатом тестирования
1	Тестирование питающего напряжения	Тестирование прерывается, если напряжение питания отсутствует или если оно меньше 4,5 В
2	Тестирование соединения с "землей"	Тестирование прерывается, если отсутствует "земля"
3	Тестирование соединений выводов с напряжением питания и "землей"	Коррекция таблицы истинности, если входы подключены к напряжению питания или "земле"
4	Тестирование соединений между выводами	Согласование таблицы истинности, если штырьковые выводы соединены между собой
5	Функциональное тестирование	

На рис. 10.24, *a* представлен результат функционального тестирования микросхемы SN74LS32 (см. рис. 10.16, *a*). Одновременно с этим показаны также и все результаты предварительно выполненных тестов.

После выполнения функционального тестирования можно сделать высказывание GUT ("ХОРОШИЙ") или SCHLECHT ("ПЛОХОЙ"), т. к. имеется библиотечный файл, согласно которого может быть проведено сравнение.

Как уже было описано ранее, и другие мешающие факторы могут оказывать неблагоприятное влияние на функциональное тестирование в схеме, так,



**Рис. 10.24.** Результаты выполнения функционального тестирования: микросхемы SN74LS32 (а), нестабильное выполнение тестирования из-за смены сигнала (б); стабильное выполнение тестирования благодаря отключению генератора (в)

например, активный генератор импульсов на блоке или структуры с общей шиной на выходах тестируемой ИС.

Активный генератор импульсов следует (временно) остановить. Предупредительная индикация SIGNAL ("СИГНАЛ") указывает на эту проблему (рис. 10.24, б). На выводе 1 и выводе 14 микросхемы контактная система тестирования устанавливает смену сигнала, таким образом, тестирование является нестабильным и заканчивается извещением об ошибке SCHLECHT ("ПЛОХОЙ"). Отключение генератора импульсов препятствует сменам сигналов, схема работает стабильно, а поэтому и тестирование завершается положительным результатом (рис. 10.24, в).

Подобное наблюдается у схем с шинной организацией, например, при тестировании микросхем оперативной памяти 2114. На рис. 10.25, а показаны соответствующие предупредительные сообщения KONFLIKT ("КОНФЛИКТ") на выводах 11, 12, 13 и 14, которые указывают на подобного рода ситуацию. Благодаря выключению всех ИС, подключенных к шине, это нарушение функционирования может быть ликвидировано, так что становится возможным изолированное тестирование исследуемой микросхемы, как это и показано на рис. 10.25, б.

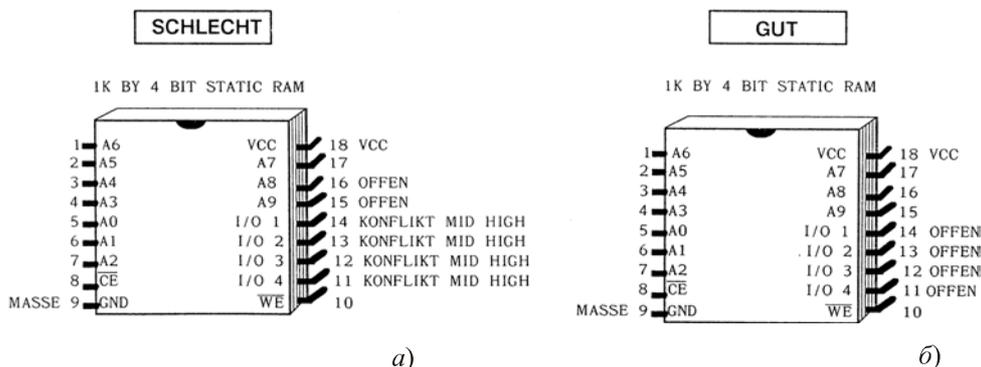


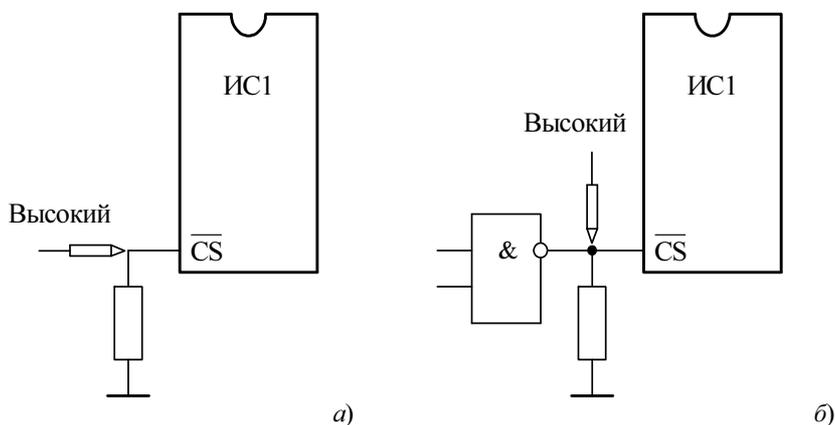
Рис. 10.25. Функциональное тестирование схем с шинной организацией: результат конфликтных ситуаций при тестировании микросхемы памяти (а); результат изолированного тестирования микросхемы памяти после отключения от шины других микросхем (б)

Для электрической изоляции цифровых ИС в схеме помимо выводов приемопередатчиков для тестирования ИС обязательны и другие активные выходы драйверов с возможностью применения метода тестирования Backdriving.

Контактирование с выводами микросхем происходит с помощью гибких эластичных линий со специальными тестовыми зажимами или клипсами на конце, посредством которых осуществляется отключение и приостановка нетестируемых микросхем.

Эти дополнительные драйверы подключаются только во время тестирования и при этом постоянно имеют высокий и низкий логические уровни напряжений.

На выводах ИС, которые не соединены с другими выходами ИС, можно применить цифровой способ исключения влияния параллельных компонентов при внутрисхемном тестировании путем подключения этих выводов непосредственно к напряжению питания или "земле", но тогда нет возможности применить метод тестирования Backdriving. Однако в этом случае не происходит короткого замыкания выходных выводов ИС относительно "земли" или напряжения источника питания (рис. 10.26).



**Рис. 10.26.** Цифровой способ исключения влияния параллельных компонентов при внутрисхемном тестировании: тестирование напряжения питания возможно, но применить метод тестирования Backdriving нельзя (а); необходим активный драйвер (б)

При помощи *поисковой системы* становится возможным идентифицировать неизвестные ИС или микросхемы с неразборчивыми, а также со специфическими фирменными обозначениями. При этом функция ИС сравнивается с функцией из библиотеки элементов. В качестве ввода данных обязательно только указание количества выводов ИС.

Основные условия для поисковой системы:

- ИС должна быть работоспособной;
- ИС должна быть в файле библиотеки;
- замыкания контактов должны быть безупречными;
- не должно быть каких-либо конфликтных проблем, а также проблем сигналов.

С помощью поисковой системы можно найти несколько эквивалентных элементов. Обычно это зависит от конфигурации схемы и совместимости контактов ИС.

Следует обратить внимание на то, что поисковая система может привести к увеличению длительности тестирования Backdriving.

При необходимости требуются соответствующие меры, такие как отключение подключенных ИС.

В стратегии тестирования для поиска по возможности бóльшего числа неисправностей могут комбинироваться несколько методов тестирования, а также протекать друг за другом. Один способ тестирования сам по себе не может найти все неисправности в блоке. Например, во время функционального тестирования не удастся заметить короткое замыкание между двумя входными штырьковыми выводами, т. к. такая неисправность может быть завуалирована автоматической коррекцией схемы.

Зато тестирование соединений между выводами эту неисправность выявит. Разомкнутые штырьковые выводы, вызванные плохой пайкой или разрывами токопроводящей дорожки, также не могут быть распознаны во время функционального тестирования в связи с тем, что контактирование посредством тестового зажима (клипсы) происходит непосредственно на корпусе ИС. Однако истинную функциональную неисправность цифровой ИС можно обнаружить только с помощью функционального тестирования. Из этих примеров видно, что при помощи одного вида тестирования найти все неисправности невозможно, однако только комбинация различных тестов расширяет спектр охвата неисправностей и, таким образом, облегчает ремонт.

В табл. 10.4 в обзоре приведен охват неисправностей для всех представленных методов тестирования.

**Таблица 10.4.** Обзор распознавания неисправностей отдельных методов тестирования

Неисправность	Тестирование				
	Напряжений	Соединений	Соединений между ИС	VI-тестирование	Функциональное
Обрыв на выводах ИС	Частичное	Частичное	Да	Частичное	Нет
Другие обрывы				Да	
Короткое замыкание на выводах ИС	Частичное	Частичное	Да	Частичное	Частичное
Другие короткие замыкания				Да	

Таблица 10.4 (окончание)

Неисправность	Тестирование				
	Напряжений	Соединений	Соединений между ИС	VI-тестирование	Функциональное
Неисправные цифровые ИС	Частичное	Нет	Нет	Нет	Да
Неисправные входы и выходы ИС	Частичное	Частичное	Частичное	Да	Частичное
Неисправные дискретные элементы				Да	

К обрыву на выводах ИС могут быть отнесены, к примеру, разрывы токопроводящих линий, плохая пайка и погнутые контактные выводы. Тестирование напряжений может распознать эти неисправности лишь тогда, когда монтаж ИС оказывает воздействие на значение напряжения.

Тестирование соединений между выводами распознает эти неисправности однозначно, пока они относятся к соединениям между выводами подключенных ИС или соединения выводов с "землей" и напряжением питания.

Тестирование соединений между ИС принципиальным образом находит все обрывы на штырьковых выводах ИС, если проверка существенных соединений происходит при помощи двух тестовых зажимов (клипс).

Благодаря VI-тестированию также могут быть обнаружены лишь те обрывы, которые способствуют изменению соответствующей кривой "ток-напряжение". Во время функционального тестирования эти неисправности вообще не обнаруживаются, кроме отсутствия напряжения "земли" или напряжения питания, поскольку с помощью тестовых зажимов имеется прямой контакт с ИС. Благодаря же способу исключения влияния параллельных компонентов при внутрисхемном тестировании (методом Backdriving, отключением, запрещением) ИС может тестироваться изолированно от окружения схемы.

Прочие разрывы — это обрывы в электрических соединяющих проводах и дефекты паки дискретных элементов схемы. Эти неисправности могут легко быть обнаружены благодаря VI-тестированию с помощью сравнения с образцом. Проблемы будут при параллельном подключении двух диодов, например, одного дискретного диода параллельно входному защитному диоду ИС. Так в случае обрыва в дискретном диоде, входной защитный диод ИС все еще будет показывать стандартную кривую для диодов.

Если налицо короткие замыкания на штырьковых выводах ИС, то охват дефектов при тестировании напряжений, соединений между выводами, соеди-

нений между ИС, а также VI-тестировании является аналогичным, как и при обрывах на выводах.

Функциональное тестирование все же может распознать короткие замыкания, которые влияют на функционирование, например, неправильные соединения на выходных выводах ИС.

Прочие короткие замыкания в схеме, как-то короткие замыкания пайки, электропроводки, замкнутые накоротко элементы схемы, касающиеся друг с другом провода и др., можно однозначно установить благодаря VI-тестированию.

Логические неисправности цифровых ИС могут быть распознаны при тестировании напряжений, если функциональная неисправность проявляется на входах уже без соответствующего стимулирования, например, постоянно высокий логический уровень напряжения на выходе логического элемента "И-НЕ", несмотря на то, что оба его входа имеют высокий уровень.

При помощи двух видов тестирования соединений и VI-тестирования логические неисправности функционирования ИС вообще не могут быть распознаны. Для распознавания таких неисправностей лучше всего подходит функциональное тестирование.

Неисправные дефектные входы и выходы ИС, вследствие разрушенных защитных элементов (диодов, сопротивлений и т. д.), или оборванные гибкие металлические проводники, соединяющие кристалл ИС с ее контактными выводами, являются наиболее частыми неисправностями, поскольку соединительные элементы ИС более всего подвержены выходу из строя из-за перенапряжения и перегрузки.

Также путем тестирования напряжений, соединений между выводами и соединений между ИС эти ошибки можно распознать только тогда, когда они непосредственно воздействуют на значения напряжения, а также сопротивления выводов ИС.

Благодаря же VI-тестированию найти такие часто встречающиеся неисправности очень легко, т. к. такие неисправности приводят к существенным отклонениям от стандартных кривых "ток-напряжение". При разрывах могут возникнуть проблемы, при которых другие однотипные выводы подключены параллельно. Такая неисправность, однако, может быть однозначно обнаружена с помощью функционального тестирования, потому что она оказывает влияние на функционирование элемента, напротив обрывы на выводах ИС таким тестом не определяются. Когда необходимо обнаружить неисправность дискретных элементов, то следует поступать так же, как и при прочих коротких замыканиях и других обрывах, т. е. использовать VI-тестирование, за исключением случаев параллельных соединений.

*Функциональное сравнение* является одним из наиболее быстрых и эффективных тестов для ремонта электронных блоков. При сравнении между хорошим и неисправным элементом существенно упрощается процесс тестирования, при котором нет необходимости в глубоком знании блоков и конструктивных элементов схемы.

Для сравнения принципиально возможны два следующих способа:

1. Сравнение с сохраненными данными.

При этом все результаты тестирования заведомо исправного блока сохраняются для дальнейшего сравнения.

2. Параллельное сравнение с заведомо исправным блоком.

При этом оба блока подключаются и стимулируются аналогичным образом. Для этого тестового сравнения необходимо дублирование аппаратного обеспечения контактной системы тестирования, поскольку в распоряжении обоих блоков параллельно должны быть одни и те же тестовые зажимы (клипсы), выводы приемопередатчиков, питающие напряжения и др.

Использование обоих способов сравнения зависит от выбранных видов тестирования и квалификации проводящего техническое обслуживание персонала.

Первый способ является рациональным в том случае, когда:

- обязательны специальные знания квалифицированного рабочего (проводящего обслуживание), которые архивируются одновременно с сохранением;
- выполняется обширное тестирование;
- трудно поддерживать контакт с электронным блоком;
- заведомо исправный блок имеется в распоряжении лишь ограниченное время или когда существует возможность его выхода из строя.

Второй способ напрашивается, когда средствами VI-тестирования последовательно хотят сравнить отдельные узлы. Так можно очень быстро и эффективно отыскать возможные неисправности.

На рис. 10.27 изображена схема и кривые, полученные при VI-тестировании RC-цепи исправной цепи (слева) и цепи с соответствующими дефектами (две кривые справа), т. е. когда отсутствует конденсатор или резистор.

В качестве следующего примера на рис. 10.28 представлены кривые для точек база-эмиттер (слева) и коллектор-эмиттер (справа) *n-p-n*-транзистора с резистором, подключенным между базой и эмиттером (вверху) и без резистора (внизу).

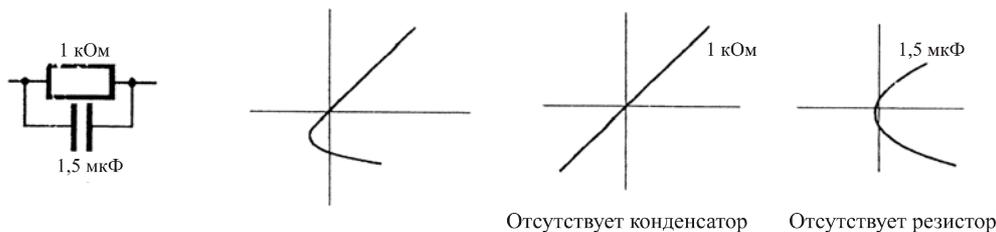


Рис. 10.27. Кривые, полученные при VI-тестировании RC-цепи: исправной цепи (слева); с ошибками (две кривые справа)

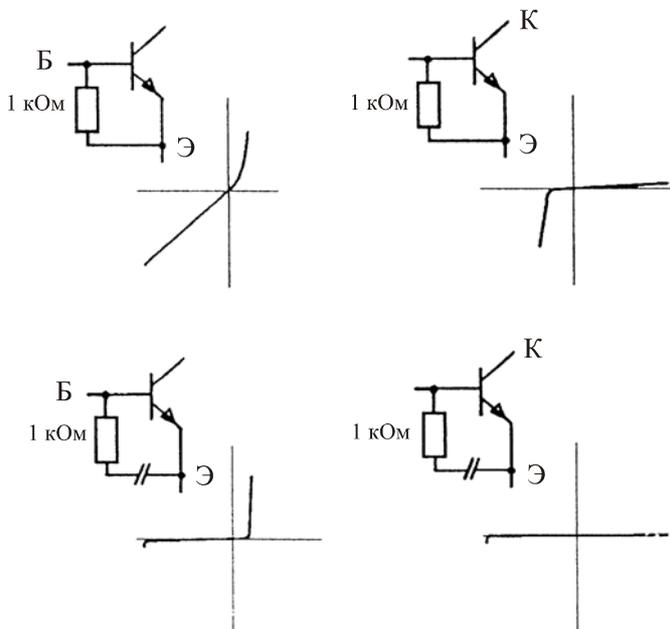


Рис. 10.28. Кривые, полученные при VI-тестировании исправной (вверху) и дефектной транзисторной схемы (внизу)

На рис. 10.29, *a* показан результат теста сравнения с записанными данными для ИС SN74LS32, в соответствии со схемой, приведенной на рис. 10.16, *a*. При этом проводилось тестирование соединений и функциональное тестирование. Отличающиеся выводы соответствующим образом маркировались.

Благодаря блокированию сохраненных библиотечных образцовых данных (рис. 10.29, *b*) можно тотчас распознать отклонения на маркированных выводах. В качестве результата теста появляются два сообщения. Первое сообщение показывает результат функционального тестирования (в примере GUT "ХОРОШИЙ"). При этом в качестве сравнения используется библиотека





элементов. Второе сообщение демонстрирует результат сравнения с записанными данными после тестирования соединений (в примере FALSCH "НЕПРАВИЛЬНЫЙ").

Следующий пример изображен на рис. 10.30, *а*, в котором приведены результаты после тестирования напряжений, соединений, VI-тестирования и функционального тестирования для микросхемы SN74LS138 (схема согласно рис. 10.17, *а*) и сравнения с сохраненными данными.

Отличающиеся выводы также маркированы, и путем запроса сохраненных данных их удастся сразу же проанализировать.

Неисправность на выводе 5 однозначно проявляется при сравнении кривых при VI-тестировании: на выводе 5 отсутствует резистор или с ним нет контакта (рис. 10.30, *б*).

По результатам сравнения в этом случае оказалось очень просто диагностировать неисправность. На практике же могут возникнуть более сложные структуры схем, поиск неисправности в которых потребует больших затрат времени и опыта от обслуживающего персонала.

## 10.3. Подготовка электронных блоков к тестированию

Прежде чем начать тестирование блоков, нужно принять во внимание и выполнить следующие подготовительные операции:

### □ *Очистить штырьковые выводы*

Для того чтобы можно было ожидать надежный результат тестирования, необходимо иметь хороший электрический контакт с тестируемой схемой. В особенности при контактировании с выводами ИС может потребоваться освобождение блока или выводов подключения от флюса, оставшегося при пайке, загрязнений и окисления.

### □ *Отключить имеющиеся генераторы*

Для проверки работоспособности ИС должны быть созданы статические условия тестирования. Поэтому во время тестирования нужно временно остановить работу генераторов на блоке. Зачастую электронный блок имеет переключку, при помощи которой генератор может быть легко отключен. Если такой переключки нет, то для этого можно использовать выводы дополнительного драйвера.

### □ *Применить цифровой способ исключения влияния параллельных компонентов*

Дополнительные драйверы с возможностью применения метода тестирования Backdriving используются для того, чтобы при необходимости по-

зволить осуществить требуемую электрическую изоляцию тестируемых цифровых ИС в схеме, например, путем:

- отключения микропроцессора путем подводки соответствующих сигналов к выводам сброса (RESET), запроса на захват шины (HOLD) или предоставления прямого доступа к памяти (DMA — direct memory access);
- отключения от шины неиспользуемых ИС, имеющих выходы с тремя состояниями, для того чтобы исключить возможные конфликты при тестировании.

## 10.4. Локализация коротких замыканий

При ремонте электронного блока поиск физического места возникновения неисправности является проблематичным. Если система тестирования установила короткое замыкание между двумя выводами или узлами, то место повреждения, таким образом, еще не определено.

Локализация места короткого замыкания может происходить визуально таким образом, что проверяются все токопроводящие линии узлов на видимое короткое замыкание. В случае сложных электронных блоков этот метод является очень трудоемким и длительным, потому что зачастую линии под элементами или между ними невидимы. Таким образом, из-за неисправных конструктивных элементов найти короткие замыкания вообще становится невозможно.

Если осуществляется попытка определить короткое замыкание при помощи измерительных средств, то тогда имеется возможность на два узла положить напряжение (рис. 10.31, *a*) и при этом отыскать текущий ток при помощи "токового шпика" (который воспринимает магнитное поле протекающего тока). Однако этот метод при сложных электронных блоках также затруднен, т. к. расстояния между токопроводящими линиями обычно очень маленькие, а отслеживание линий под ИС вообще невозможно.

Следующим способом поиска тока короткого замыкания является применение термочувствительных пленок. На практике существует еще две другие возможности. Первый способ — путем измерения различий напряжения на обтекаемых током проводящих дорожках (линиях), причем напряжение накладывается на два узла, о которых система тестирования сигнализирует как о замкнутых накоротко.

Второй метод с намного меньшими затратами — это определение места короткого замыкания посредством очень чувствительного омметра, с помощью которого на каждом узле соответственно ищется место с незначительным со-

противлением. На рис. 10.31, а показан принцип действия метода, а на рис. 10.31, б — соответствующее отображение этого процесса в контактной системе тестирования.

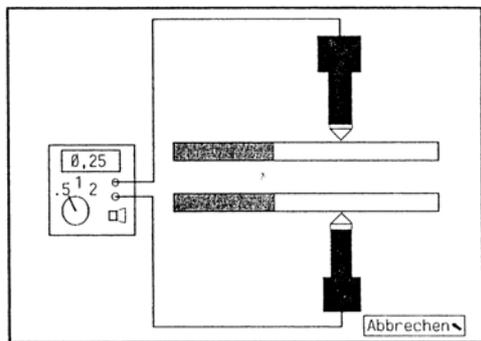
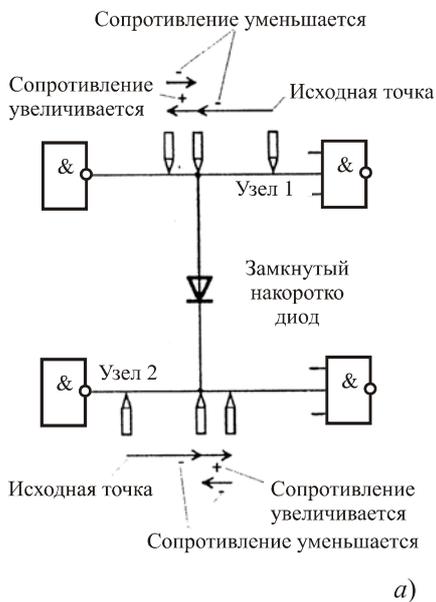


Рис. 10.31. Определение места положения короткого замыкания: ход проведения измерений (а); тестирование короткого замыкания в контактной системе тестирования (б)

## 10.5. Упражнения для закрепления полученных знаний

**УПРАЖНЕНИЕ 10.1.** В контактной системе тестирования имеется различие между логическим порогом и порогом переключения.

Какими функциональными признаками различаются эти пороги?

**УПРАЖНЕНИЕ 10.2.** Порог переключения контактной системы тестирования поддается программированию между значениями напряжений:

- а) 0,1 и 3,0 В
- б) 1,9 и 3,0 В,
- в) 1,0 и 3,0 В.

**УПРАЖНЕНИЕ 10.3.** Какой предварительный вид тестирования необходим при контактной системе тестирования?

- а) тестирование соединений между выводами;
- б) тестирование соединений с корпусом ("землей");
- в) функциональное тестирование.

**УПРАЖНЕНИЕ 10.4.** Какой из контактных видов тестирования наиболее лучшим образом подходит для дискретных элементов схемы:

- а) тестирование напряжений;
- б) тестирование соединений;
- в) VI-тестирование.

**УПРАЖНЕНИЕ 10.5.** Наиболее подходящим видом тестирования для неисправных цифровых ИС является:

- а) тестирование соединений;
- б) тестирование соединений между ИС;
- в) функциональное тестирование.

**УПРАЖНЕНИЕ 10.6.** Какой из контактных видов тестирования может распознать большинство причин возникновения неисправностей?

- а) функциональное тестирование;
- б) функциональное сравнение;
- в) VI-тестирование.

**УПРАЖНЕНИЕ 10.7.** Какой вид тестирования является наиболее быстрым контактным тестом для отыскания причин неисправностей в блоке?

- а) VI-тестирование;
- б) тестирование соединений между ИС;
- в) тестирование методом сравнения между исправным и неисправным блоком.

**УПРАЖНЕНИЕ 10.8.** Какой из видов контактного тестирования в наибольшей степени подходит для нахождения коротких замыканий?

- а) измерение тока;
- б) измерение напряжения;
- в) измерение сопротивления.

Ответы можно посмотреть в приложении.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Ответы к упражнениям

4.1 а) +0,8 В б) 0 В в) +10 В г) +8 В

4.2 а) -5 В б) 0 В в) -5 В г) -4 В

4.3 При неизменном напряжении питания сопротивление резистора  $R$  стало больше или уменьшилось сопротивление диода.

4.4 а) напряжение повысится

4.5 б) напряжение уменьшится

4.6 в) равное напряжению питания +15 В

4.7 в) база 0 В коллектор +15 В

4.8 в) разностное напряжение увеличится на 2,5 В

4.9 а) 15 В

4.10 Напряжение в точке "А" = 0 В, в точке "В" = +14,8 В (оба измерения относительно опорного потенциала 0 В). Разность напряжений на сопротивлении  $R = 14,8$  В.

4.11  $U_{КЭ} = 12$  В,  $U_{БЭ} = 0,5$  В

$$U_{R_k} = 24 - 12 = 12 \text{ В}$$

$$U_{КБ} = U_{КЭ} - U_{БЭ} = 12 - 0,5 = 11,5 \text{ В}$$

5.1  $u_1 = 10$  мВ,  $u_2 = 3$  В,  $K_{yc} = 300$

Транзистор Т1

$$U_{БЭ} = 1,3 \text{ В}, U_{К} = 10 \text{ В}, U_{Э} = 0,8 \text{ В}$$

Транзистор Т2

$$U_{БЭ} = 0,2 \text{ В}, U_{Э} = 0,2 \text{ В}$$

Транзистор Т3

$$U_{БЭ} = 1,6 \text{ В}, U_{Э} = 1 \text{ В}, U_{К} = 8 \text{ В}.$$

Согласно результатам измерений неисправен транзистор Т2, короткое замыкание между эмиттером и базой.

5.2 Ответ в схеме на рис. 5.35.

5.3 Схема D

6.1 Рис. 6.27, а

6.2 б) логический элемент 2

6.3 в) Неисправен логический элемент 2, т. к. на его выходе, независимо от входных переменных, всегда фиксируется низкий логический уровень.

6.4 б) триггер  $Tr_2$

6.5 б) 4 : 1

7.1 б) Рег. В Рег. А

7.2 б) в режиме ожидания (Wait)

7.3 в) на 2 линиях шины

7.4 в) ждущую синхронизацию

7.5 г) неисправна микросхема DD604

7.6 б) можно проверить микросхему ввода/вывода DD601

7.7 г) заменить двигатель и проверить с ним функционирование

7.8 в) оценить состояние шины (функционирование шины)

8.1

Функциональный элемент	Обозначение на принципиальной электрической схеме	Соответствующий операнд
1 Кнопка 1	S1 (контакт разомкнут)	E1
2 Кнопка 2	S2 (контакт замкнут)	E2
3 Кнопка 3	S3 (контакт замкнут)	E3
4 Реле 1	K1	A1
5 Реле 2	K2	A2
6 Сигнальная лампа 1	H1	A3
7 Сигнальная лампа 2	H2	A4

**8.2** Если светодиод светится на выходе А1 программируемого контроллера, а не светится сигнальная лампа Н1, то неисправность может быть в самой лампе Н1 или же имеется обрыв в соединениях.

**8.3**

Функциональный элемент	Обозначение на принципиальной электрической схеме	Соответствующий операнд
1 Кнопка 1	S1	E1
2 Кнопка 2	S2	E2
3 Реле защиты при максимальном токе	F3	E3
4 Реле 1 (правого вращения)	K1	A1
5 Реле 2 (левого вращения)	K2	A2
6 Сигнальная лампа 1	H1	A3
7 Сигнальная лампа 2	H2	A4

**8.4** Если светодиод на входе Е1 программируемого контроллера при нажатии кнопки S1 не светится, тогда неисправность может быть в самой кнопке (микрорелепереключателе) или в соединительных линиях.

**9.1** г) неисправен конденсатор  $C_1$  (отсутствует емкость)

**9.2** рис. 9.11, б (вариант D)

**9.3** табл. 9.1 (вариант в)

**9.4** в) неисправен тиристор Т1 (внутренний обрыв)

**10.1** С помощью порога переключения, выбранного между логическим порогом высокого (HIGH) и низкого (LOW) уровня, можно лучше определить эту промежуточную область посредством уровней MID-HIGH и MID-LOW.

**10.2** в) 1,0 и 3,0 В

**10.3** в) функциональное тестирование

**10.4** в) VI-тестирование

**10.5** в) функциональное тестирование

**10.6** в) VI-тестирование

**10.7** в) тестирование методом сравнения между исправным и неисправным блоком

**10.8** в) измерение сопротивления



# Предметный указатель

## В

Backdriving 202

## L

LC-генератор синусоидальных колебаний 83

## V

VI-Traces 217

VI-тестирование 217

## A

Автоколебания 95

Автоматическая поточная линия 13

Алгоритм определения неисправности 28

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) 87

Амплитудный ограничитель 49

Аппаратное обеспечение (АО) 146

◇ структура 7

## Б

Базовый потенциал 38

Блок

◇ выбора режима 163

◇ выдачи команд 163

◇ переходов 163

Блок-схема 10, 69

◇ программы 154

◇ УНЧ 71

## В

Ввод в эксплуатацию 17

Ведомость запчастей 17

Вентильный преобразователь частоты 76

Весовые значения 114

Внутрисхемное тестирование 196

◇ аналоговых элементов 197

◇ цифровых элементов 201

Временные соотношения сигналов 141

Входные уровни напряжения 104

Выбросы напряжения 180

Выдвижение гипотез 24

Выпрямитель:

◇ двухполупериодный 184

◇ мостовой 44, 186

Высокий логический уровень сигнала 104

Выходные уровни напряжений 104

Выходы с тремя состояниями 105

Выяснение информации 10

**Г**

- Генератор 67
- ◇ импульсов с ручным управлением 116

**Д**

- Датчики 15
- Действующее значение напряжения 185
- Делитель напряжения 58
- Десятичный счетчик 114
- Диагностический экран 168
- Диод 35
- Диодная мостовая схема 46
- ◇ с нагрузочным резистором 47
- Добавочный резистор 58

**Е**

- Емкостная связь 109

**Ж**

- Ждущая синхронизация 142

**З**

- Запас помехоустойчивости 105

**И**

- Измерение:
  - ◇ напряжения 31, 32
  - ◇ сопротивления 31
  - ◇ тока 31
- Измерительные мосты 44
- Изображения устройства 16
- Импульсные помехи 180
- Интегральная схема с тремя состояниями 137
- Интегратор 89
- Информация об устройстве 16
- Исполнительные элементы 15
- Источник питания 187

**К**

- Кварцевый резонатор 83
- Код Айкена 115
- Коммутационная схема 172
- Контакт 122
- Контактная система тестирования 208
  - ◇ VI-тестирование 217
  - ◇ поисковая система 225
  - ◇ тестирование напряжений 210
  - ◇ тестирование соединений 214
  - ◇ тестирование соединений между ИС 216
  - ◇ функциональное сравнение 229
  - ◇ функциональное тестирование 219
- Контрольный список 29
- Контурное усиление 77, 78
- Короткое замыкание 32, 33
  - ◇ локализация 234
- Корпус ИС:
  - ◇ DIP 210
  - ◇ PLCC 210
  - ◇ SMD 210
- Коэффициент фильтрации 187

**Л**

- Линейный усилитель 49
- Логический анализатор 143
  - ◇ комбинаторный запуск 145
  - ◇ послезапуск 145
  - ◇ предзапуск 145
  - ◇ режим 145
  - ◇ режим выборки (SAMPLE) 144
  - ◇ срединный запуск 145
- Логический элемент:
  - ◇ возможные неисправности 125
  - ◇ "И" 110, 122
  - ◇ "ИЛИ-НЕ" 124
- Локализация коротких замыканий 234

**М**

- Машинное управление 161
- Меркеры 165
- Метод тестирования Backdriving 202
- Микропроцессор 137
  - ◇ 80386 141

Микропроцессорная система (МПС) 141  
 Микросхема:  
 ◇ ДТЛ 125  
 ◇ КМОП 105  
 ◇ ТТЛ 104  
 Монтажная схема 16  
 Мостовая схема 44  
 ◇ диодная 46  
 ◇ диодная с нагрузочным резистором 47  
 ◇ резистивная 44  
 ◇ транзисторная 45  
 Мостовой RC-генератор 87  
 Мультивибратор 111  
 ◇ автоколебательный 112  
 ◇ ждущий 112  
 ◇ с двумя устойчивыми состояниями 112

## Н

Наблюдение 10  
 Нагрузочная способность 122  
 Напряжение:  
 ◇ действующее значение 185  
 ◇ питания 179  
 ◇ пульсирующее 180  
 ◇ пульсаций 183  
 ◇ рабочей точки 37  
 ◇ смещения 92  
 ◇ эталонное значение 50  
 Неисправность 12  
 ◇ алгоритм определения 28  
 ◇ диода 35  
 ◇ поиск 20  
 ◇ транзистора 37  
 Неопределенный уровень логического сигнала 125  
 Непосредственная связь 60  
 Низкий логический уровень сигнала 104  
 Номинальный потребляемый ток 91

## О

Обзор методов внутрисхемного тестирования 226

Область поиска 24, 25  
 Обслуживание 19  
 Общение с клиентом 5  
 Объект 12  
 Оконечный усилитель 96  
 Операционный усилитель 91  
 ◇ возможные неисправности 94  
 ◇ напряжение смещения 92  
 Опорный потенциал 38  
 Опрос 10  
 Осциллограмма 142  
 Отрицательная обратная связь 61, 64  
 ◇ коллекторная 65  
 ◇ по напряжению 65  
 ◇ по току 66  
 ◇ частотно-зависимая 64  
 ◇ частотно-независимая 64  
 ◇ эмиттерная 65  
 Оценка состояния устройства 21

## П

Падение напряжения 34  
 Панель управления 23  
 Передатчик 137  
 Передача данных 137  
 Переход 166  
 Переходное сопротивление 32, 33  
 ◇ определение 34  
 Плата расширения 174  
 Погрешность задержки 77  
 Подготовка блоков к тестированию 233  
 Поиск неисправностей 20  
 ◇ в выпрямителях 183  
 ◇ в источниках питания 187  
 ◇ в оконечном усилителе 96  
 ◇ в операционных усилителях 91  
 ◇ в предусилителях 95  
 ◇ в стабилизаторе напряжения 81  
 ◇ систематизированный 52  
 ◇ этапы 4  
 Положительная обратная связь 61, 67  
 Порог переключения 212  
 Порт ввода/вывода 138  
 Последовательная стабилизация напряжения 81

Последовательное соединение 39  
 ◇ нагрузка 39  
 ◇ стабилизаторов напряжения 39  
 Поток информации 14  
 Приемник данных 138  
 Приобретение 10  
 Проверка 19  
 Программа резервного копирования 153  
 Программируемые контроллеры 161  
 ◇ большие 161  
 ◇ малые 161  
 ◇ средние 161  
 ◇ поиск неисправностей 171  
 Программное обеспечение (ПО) 146  
 ◇ структура 7  
 Программы 16  
 Пропорционально-интегрально-  
 дифференциальный регулятор  
 (ПИД-регулятор) 80  
 Прямая связь 60  
 Пульсирующее напряжение 180  
 Пульт управления 17, 18  
 Путь прохождения сигнала 15

## Р

Рабочая точка 58  
 Разность напряжений 36  
 ◇ измерение 36  
 Режимы эксплуатации 23  
 Резистивная связь 109  
 Резистор:  
 ◇ нагрузочный 131  
 ◇ отрицательной обратной связи 92  
 Ремонт 19

## С

Сбор информации 9, 10  
 Сдвиг фаз 180, 181  
 Сетевой фильтр 181, 183  
 ◇ частота среза 181  
 Сетевые помехи 179  
 Сигнал:  
 ◇ HOLD 140  
 ◇ READY 140  
 ◇ RESET 140  
 ◇ параметры 159

Система 12  
 Соединительная связь 60, 61  
 Спротивление:  
 ◇ отрицательной обратной связи 92  
 ◇ переходное 32, 33  
 Состояние шин 141  
 Спецификация 17  
 Стабилизатор:  
 ◇ напряжения 81, 188  
 ◇ последовательное соединение 39  
 Стандартная единичная нагрузка 122  
 Стираемое программируемое  
 постоянное запоминающее устройство  
 (СППЗУ) 153  
 Стратегия тестирования 226  
 Структура и управление системы 16  
 Схема:  
 ◇ "монтажное ИЛИ" 131  
 ◇ "проводное ИЛИ" 131  
 ◇ коммутационная 172  
 ◇ монтажная 16  
 ◇ структурная 20  
 ◇ счетная 111, 114

## Т

Тестирование:  
 ◇ внутрисхемное 196  
 ◇ методом анализа вольт-амперных  
 характеристик 217  
 Техническое обслуживание 17  
 Ток покоя усилителя 96  
 Транзистор 36  
 Транзисторный мост 45  
 Триггер 111, 112, 125  
 ◇ MS-типа 125  
 ◇ неиспользуемые входы 125  
 ◇ Шмитта 49, 89, 111, 144  
 ТТЛ-инвертор 106

## У

Узел 12  
 Управление и программирование 17  
 Управление логическими операциями  
 161  
 Уровень высокого импеданса 105

Усилитель:

- ◇ мощности звуковой частоты (УМЗЧ) 94
  - ◇ низкой частоты (УНЧ) 51, 69
  - ◇ оконечный 96
  - ◇ операционный 91
- Устройство 12
- ◇ для обработки сигналов 15

## Ф

- Формирователь импульса 49
- Функциональное состояние 42
- Функция 12

## Ш

- Шаговый двигатель 146
- Шина 137
- ◇ функционирование 159

## Э

- Экранная диагностика 18
- Электромагнитная совместимость 180
- Электропривод трехфазного тока 76
- Элемент схемы 12, 33
- Эталонные значения напряжений 50
- Этапы поиска неисправностей 4

**Дитмар Бенда**

**Поиск неисправностей  
в электрических схемах**

*Перевод с немецкого*

**Группа подготовки издания:**

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Перевод с немецкого	<i>Натальи Шишлиной Владимира Унагаева</i>
Редактор	<i>Юрий Рожко</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 31.08.09.

Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,64.

Тираж 2000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию  
№ 77.99.60.953.Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой  
по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ГУП "Типография "Наука"  
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12