

В. М. Бардин

Кр

**Надежность  
силовых  
полупроводниковых  
приборов**





В. М. БАРДИН

Надежность  
силовых  
полупроводниковых  
приборов



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1978

ББК 31.264.5

Б 24

УДК 621.382.2/3.019.3

**Бардин В. М.**

**Б 24 Надежность силовых полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1978. — 96 с., ил.**

30 к.

В книге рассмотрены вопросы надежности силовых полупроводниковых приборов (СПП). В качестве базовых изделий выбраны диоды ВК2-200 и тиристоры Т160 (ВКДУ-150). Основное внимание при изложении материала уделено механизмам отказа СПП в наиболее распространенных режимах эксплуатации СПП. Кратко изложены методические вопросы проведения испытаний СПП на надежность и приведены результаты экспериментальных исследований.

Книга предназначена для специалистов, занятых как разработкой, так и применением СПП в различных преобразовательных устройствах.

Б  $\frac{30307-306}{051(01)-78}$  74-78

ББК 31.264.5

6П2.1.082

© Издательство «Энергия», 1978 г.

Силовые полупроводниковые приборы (СПП) к настоящему времени прочно завоевали репутацию надежных и долговечных изделий. Объем их выпуска непрерывно растет, а сфера применения расширяется. Возрастает сложность преобразовательных устройств, их мощность, а следовательно, и число полупроводниковых приборов в этих агрегатах. Преобразовательные установки для электроподвижного состава, прокатных станов, линий электропередачи насчитывают сотни и тысячи диодов и тиристоров. Это приводит к тому, что от надежности СПП начинает зависеть надежность преобразователя в целом. При расчете надежности силовых полупроводниковых преобразователей появляются серьезные затруднения, поскольку достоверной количественной информации по надежности СПП еще недостаточно. Это, в свою очередь, объясняется тем, что при определении надежности силовых полупроводниковых приборов встречаются значительные трудности.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает десятки типов и модификаций силовых диодов и тиристоров на токи до 1000 А и рабочее напряжение свыше 2000 В. Гарантийный срок службы приборов достигает 100 000 ч. Однако их надежность гарантируется только при определенных условиях эксплуатации. Реальные электрические и тепловые режимы эксплуатации СПП могут быть самыми разнообразными. Эксплуатационные данные показывают, что коэффициент нагрузки вентиля по току лежит в пределах от 0,3 до 0,9, по напряжению — от 0,6 до 1,0. Приборы могут подвергаться действию электрических и механических перегрузок, работать с большими значениями  $di/dt$ ,  $du/dt$  в циклическом режиме. Все это, естественно, отражается на надежности СПП и должно быть учтено в расчетах.

Классические методы определения количественных показателей надежности, когда на длительные испытания ставится большое количество изделий, при испытаниях СПП не являются оптимальными. Для этого приходится создавать огромные установки с большой установленной мощностью и проводить длительные испытания сотен и даже тысяч СПП в нескольких режимах. И при этом не исключено, что к концу испытаний полученные данные окажутся устаревшими, ибо техноло-

гия и конструкция приборов непрерывно совершенствуются. Это обстоятельство заставляет вести поиски более приемлемых методов получения количественной информации в более короткие сроки и с меньшими экономическими затратами. К таким методам могут быть отнесены различные способы форсированных испытаний, индивидуальное прогнозирование, математическое моделирование физических процессов и т. д.

Настоящая книга является одной из первых попыток обобщить имеющуюся информацию по надежности СПП. Здесь рассматриваются общие вопросы надежности СПП; дается обзор проблем, приводятся описание характера физических механизмов отказа приборов и методов получения количественных характеристик надежности, а также данные по надежности СПП.

В качестве базовых приборов выбраны диоды ВК2-200 и тиристоры Т160 (ВКДУ-150) как наиболее широко применяемые и достаточно изученные с точки зрения надежности. Однако рассмотренные методы испытаний при некоторой корректировке могут быть распространены и на другие типы СПП.

В порядке постановки вопроса сделана попытка наметить основные черты наиболее прогрессивных, по мнению автора, путей получения количественных сведений о надежности приборов. К ним отнесены: испытания в форсированных режимах, факторное планирование эксперимента, индивидуальное прогнозирование надежности. Этот раздел книги не является готовой рекомендацией, которая может быть безоговорочно принята на практике. Это, скорее, материал, для размышления.

Автор не ставил перед собой цель — решение всех имеющихся на сегодняшний день задач надежности, краткая классификация которых приведена в гл. 1. По многим вопросам надежности СПП пока вообще нет ни теоретических, ни экспериментальных работ и их решение — дело будущего.

Автор выражает благодарность канд. физико-мат. наук А. М. Григорьеву за внимательный просмотр рукописи и ценные рекомендации, позволившие улучшить ее содержание.

Все замечания и пожелания по содержанию книги следует направлять в адрес издательства «Энергия»: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

*Автор*

## ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

### 1. УСЛОВИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СПП В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Режим работы вентиля в преобразовательных устройствах зависит от назначения аппарата и определяется рядом показателей. Основными из них являются: коэффициенты нагрузки по току и напряжению, коэффициенты перегрузки, временные параметры — время нахождения под нагрузкой и в выключенном состоянии, рабочая частота и др.

За коэффициент нагрузки по току принимают отношение максимального тока, протекающего через прибор в рабочем режиме  $I_p$ , к предельному току этого прибора  $I_{II}$

$$K_I = I_p / I_{II}$$

Соответственно коэффициент нагрузки по напряжению

$$K_U = U_p / U_{кл.}$$

где  $U_{кл.}$  — классификационное значение напряжения.

Коэффициент перегрузки по току определяется отношением максимально возможного в рабочем режиме тока перегрузки  $I_{p.пер}$  к предельному току прибора  $I_{II}$

$$K_{II} = I_{p.пер} / I_{II}$$

Соответственно коэффициент перегрузки по напряжению

$$K_{UII} = U_{p.пер} / U_{кл.}$$

По условиям и режимам работы вентиля преобразовательные устройства можно подразделить на несколько групп [Л. 2, 3].

**Первая группа.** Преобразовательные установки (чаще выпрямители) с длительным (обычно круглосуточ-

ным) режимом работы при редких включениях и отключениях, незначительно изменяющейся нагрузке и малом колебании температуры окружающей среды. Наиболее типичными представителями этой группы являются мощные выпрямители для питания электролизных ванн.

**Вторая группа.** Установки с режимом длительной нагрузки и возможностью кратковременной работы в форсированном режиме. Сюда можно отнести преобразователи для возбуждения турбо- и гидрогенераторов, синхронных компенсаторов, двигателей постоянного тока.

**Третья группа.** Установки с резко изменяющейся нагрузкой. В эту группу входят преобразовательные агрегаты электроподвижного состава и различные общепромышленные преобразователи (например, двигательный электропривод). Здесь возможны частые колебания тока в пределах от 0,4 до  $(1,3-2)I_n$ , а также значительные перенапряжения в переходных режимах. Температура окружающего воздуха может меняться от минусовой до  $+40 \div +60^\circ\text{C}$ . Преобразователи электроподвижного состава при движении могут работать с номинальным током, а на остановках полностью обесточиваются. Число таких циклов может достигать до нескольких тысяч на 1 000 000 км пробега.

**Четвертая группа.** Устройства, работающие в ярко выраженном циклическом режиме. В таком режиме работают преобразовательные установки приводов крановых двигателей, подъемных механизмов, механизмов прокатных станов, сварочные аппараты, контакторы, пусковые устройства и т. д. Параметры циклического режима могут быть самыми разнообразными как по временному соотношению режима «включено — выключено», так и по коэффициентам нагрузки по току и напряжению силовых элементов во время периода включения. Число циклов, которые должны выдерживать вентили до разрушения в различных устройствах, может изменяться от нескольких тысяч до десятков миллионов. Следует заметить, что в условиях эксплуатации длительность цикла и амплитуда нагрузки являются величинами случайными, распределенными по тому или иному закону.

**Пятая группа.** Установки, работающие на повышенной частоте (0,4—10 кГц). Сюда можно отнести инверторы для гарантированного электроснабжения, питания высокоскоростного электропривода, люминесцентного



освещения, индукционного нагрева и плавки металлов и т. д. В таких преобразователях кривая анодного тока близка к полуволне синусоиды; последнее обусловлено либо тем, что тиристор и нагрузка входят в состав колебательного контура с достаточно высокой добротностью, либо тем, что кривая питающего напряжения синусоидальна. Работа тиристорov в высокочастотном режиме характеризуется относительно небольшими скоростями изменения тока при включении и отключении тиристорov, несмотря на высокую частоту и сравнительно малую длительность открытого состояния, а также сравнительно медленным (в большинстве схем) изменением напряжения на тиристоре. Отношение максимального значения анодного тока к среднему может составлять 1,5—10.

**Шестая группа.** Установки для формирования импульсов тока. К этой группе относятся импульсные генераторы и модуляторы, устройства для магнитной штамповки, электролова рыбы, испытательных стендов и т. п. Тиристоры в этих устройствах включаются на активную, активно-емкостную и реже индуктивную нагрузку. Динамика работы тиристорov при этом характеризуется значительной скоростью нарастания анодного тока (до 1000 А/мкс) и малой длительностью открытого состояния тиристора. Отношение максимального значения анодного тока к среднему может достигать 50—100 и более.

**Седьмая группа.** Устройства для коммутации тока. Сюда можно отнести широтно-импульсные и время-импульсные регуляторы постоянного тока, инверторы напряжения, автономные инверторы тока. Во всех этих устройствах осуществляется принудительная конденсаторная коммутация тиристорov. Для этого режима характерны резкое нарастание тока при включении и спад при отключении, значительные «скачки» прямого и обратного напряжений. Отношение максимального значения тока к среднему обычно не превышает 3—5.

**Восьмая группа.** Высоковольтные преобразовательные установки промышленной частоты. В эту группу можно отнести преобразователи для линий электропередачи постоянного тока, плавки гололеда на линиях электропередачи, питания радиопередатчиков, очистки газов. Рабочие напряжения в этих установках могут составлять от 10 до 100 кВ и выше. В аварийных и переход-

ных режимах скорость нарастания тока может достигать 50—200 А/мкс, скорость нарастания напряжения — до 1000 В/мкс, возможны кратковременные эпизодические перегрузки по току и напряжению.

Учитывая такое разнообразие режимов работы преобразователей, следует ожидать определенное отличие в причинах и механизмах выхода СПП из строя, а также в количественных показателях их надежности.

С точки зрения физики отказа особенности режимов работы СПП во всех восьми группах преобразователей можно свести к четырем основным режимам: статическому, циклическому, режиму ударных токов и режиму емкостной коммутации. Тогда любой частный режим работы СПП можно представить в виде композиции нескольких основных режимов.

Под *статическим* режимом понимается режим выпрямления, когда через прибор протекает ток не выше предельного и к прибору прикладывается напряжение, не превышающее напряжение класса. Режим работы длительный, без резких колебаний температуры структуры СПП.

К *циклическому* относится режим, который характеризуется значительным и частым по времени изменением теплового режима вентиляльного элемента и корпуса СПП.

В режиме *ударных токов* СПП подвергаются действию импульсов тока значительной амплитуды с периодическим или случайным характером повторения. Импульсы перегрузки могут быть как единичными, так и в виде серии. Как правило, за время между двумя соседними импульсами тока перегрузки полупроводниковая структура СПП остывает до своего установившегося значения, определяемого током нагрузки в рабочем режиме (или до температуры охлаждающей среды в случае аварийного отключения).

Режим *емкостной коммутации* характеризуется периодическим включением тиристоров при высокой скорости нарастания прямого тока  $di/dt$ .

С учетом такой классификации испытания СПП на надежность целесообразно проводить именно в этих основных режимах.

## 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ СПП

Надежность — это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные по-

казатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки [Л. 1]. Этот комплексный показатель обусловлен целым рядом конструктивных, производственно-технологических и эксплуатационных факторов. Следствием многообразия и сложного переплетения факторов, влияющих на надежность СПП, является случайный характер процессов изменения свойств приборов во времени, приводящий к деградации характеристик и отказам приборов, поэтому надежность СПП, как и других изделий, описывается вероятностно-статистическими закономерностями. Знание количественных характеристик надежности требуется при оценке технического уровня изделий, сравнении различных конструктивных и технологических решений, расчете надежности преобразовательных агрегатов и т. д.

Надежность СПП может быть охарактеризована рядом количественных показателей:

- функцией распределения времени безотказной работы до момента возникновения отказа  $F(t)$ ;
- вероятностью безотказной работы  $P(t)$ ;
- интенсивностью отказов  $\lambda(t)$ ;
- средним сроком службы  $T$ .

Под *вероятностью безотказной работы* понимается вероятность сохранения работоспособности и параметров прибора в установленных пределах в течение заданного промежутка времени и при определенных условиях эксплуатации.

*Интенсивность отказов* — это число отказов в единицу времени, отнесенное к числу элементов, которые остались исправными к рассматриваемому моменту времени:

$$\lambda(t) \approx \Delta n / (N - n) \Delta t, \quad (1)$$

где  $\Delta n$  — число изделий, вышедших из строя за отрезок времени  $\Delta t$ ;  $n$  — общее число элементов, отказавших за время  $t$ ;  $N$  — число изделий, поставленных на испытание.

Под *средним сроком службы* понимают среднюю продолжительность работы приборов данного типа в заданном режиме до выхода из строя.

Вероятность безотказной работы связана с интенсивностью отказов следующим соотношением:

$$P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right]. \quad (2)$$

К дополнительным данным, которые могут характеризовать надежность СПП, относятся:

значение циклоустойкости  $N_{ц}$ ;

зависимость интенсивности отказов от электрической нагрузки (или других воздействующих факторов);

скорость изменения определяющих параметров СПП в процессе работы;

начальные характеристики распределений основных параметров приборов и ряд других показателей.

Испытания СПП на надежность можно подразделить на два вида [Л. 5]: определительные испытания и контрольные испытания.

Определительные испытания проводятся на серийных и опытных приборах для определения основных параметров и характеристик надежности:

функции распределения срока службы приборов до отказа в характерных режимах работы;

интенсивности отказов приборов  $\lambda(t)$  в строго оговоренных нормированных режимах;

поправочных коэффициентов, учитывающих изменение интенсивности отказов в зависимости от специфики работы и нагрузки приборов в конкретных преобразовательных устройствах;

зависимости скорости изменения параметров — критериев годности от степени жесткости воздействующих факторов.

Только при наличии всех этих сведений может быть произведен расчет надежности вентильных блоков конкретных преобразовательных устройств.

Контрольные испытания проводятся с целью подтверждения гарантируемых для данного типа приборов показателей надежности. Как при определительных, так и при контрольных испытаниях оценка всех количественных показателей надежности производится путем статистической обработки экспериментальных данных по отказам СПП. Отказы могут быть полными или частичными. При полном отказе прибор выходит из строя, при частичном — ухудшаются отдельные характеристики

прибора и его дальнейшая эксплуатация становится невозможной или нежелательной. В связи с этим необходимо оговорить, какое абсолютное изменение параметров можно считать за частичный отказ, т. е. установить нормы на параметры — критерии годности приборов. Хотя эти нормы относительно условны, тем не менее можно рекомендовать три категории, указанные в табл. 1 [Л. 5].

Таблица 1

Категории годности СПП

Контролируемый параметр прибора	Нормы по категориям годности		
	I	II	III
Максимальное напряжение переключения (загиба) при максимальной рабочей температуре структуры	$U_{\text{пер(заг)}} \leq U_{\text{пер(заг)}}^*$	$U_{\text{пер(заг)}} \leq k U_{\text{пер(заг)}}^*$	$U_{\text{пер(заг)}} < 50 \text{ В}$
Обратный (прямой) ток утечки при $U = U_{\text{кл}}$ и максимальной рабочей температуре структуры	$I_{\text{ут}} \geq I_{\text{ут}}^*$	$I_{\text{ут}} > 2 I_{\text{ут}}^*$	$I_{\text{ут}} \geq 5 I_{\text{ут}}^*$
Прямое падение напряжения	$\Delta U \geq \Delta U^*$	$\Delta U \geq \Delta U_{\text{макс}}^*$	$\Delta U \geq \Delta U_{\text{кр}}$
Внутреннее тепловое сопротивление	$R_{\text{в}} \geq R_{\text{в}}^*$	$R_{\text{в}} \geq R_{\text{в, макс}}^*$	$R_{\text{в}} \geq R_{\text{в, кр}}$

Примечания: 1. Индекс \* обозначает норму ТУ.

2.  $\Delta U_{\text{макс}}^*$  — максимально допустимое значение параметра, при котором температура структуры прибора достигает значения  $\Theta_{\text{макс}}$ ;  $\Delta U_{\text{кр}}^*$ ,  $R_{\text{в, кр}}^*$  — значения падения напряжения на приборе и его внутреннее тепловое сопротивление, при которых напряжение переключения или загиба вольт-амперной характеристики становятся меньше напряжения класса;  $k$  — коэффициент запаса по напряжению, который вводится при классификации приборов:  $U_{\text{кл}} = k (U_{\text{заг}} \cdot U_{\text{пер}})_{\text{мин}}$ .

По категории годности I за отказ принимается переход прибора в более низкий класс, увеличение тока утечки до значения, превышающего значение, оговоренное в ТУ на данный прибор: переход прибора в следующую более высокую группу по падению напряжения или увеличение теплового сопротивления до значения, превышающего указанное в ТУ на прибор.

По категории годности II прибор считается отказавшим, если напряжение переключения или загиба его вольт-амперной характеристики стало ниже значения  $U_{\text{заг(пер)}} = k U_{\text{заг(пер)}}^*$ , ток утечки превышает более чем в 2 раза допустимое значение, падение напряжения или тепловое сопротивление увеличилось настолько, что температура структуры прибора стала превышать максимально допустимое значение  $\Theta_{\text{макс}}$ .

По категории годности III прибор считается отказавшим, если напряжение переключения или загиба его вольт-амперной характеристики снизилось до 50 В, ток утечки более чем в 5 раз превышает значение, указанное в ТУ, а падение напряжения или тепловое сопротивление возросли до такого значения, что прибор из-за нагрева начал быстро снижать свой класс.

Проблему надежности СПП следует рассматривать шире, чем простое определение количественных показателей надежности. Все вопросы, связанные с определением и обеспечением надежности СПП, можно разделить на три группы: технологическую надежность, определение количественных показателей надежности и обеспечение схемной надежности (рис. 1).

Вполне естественно, что надежность любых изделий, в том числе и СПП, закладывается еще на стадии изготовления. К основным факторам, которые могут оказать существенное влияние на надежность СПП на этом этапе, можно отнести:

- 1) влияние технологических операций и исходных материалов;
- 2) оперативный контроль и управление качеством технологического процесса изготовления СПП;
- 3) знание физических и химических процессов, приводящих к ухудшению характеристик и отказам приборов;
- 4) математическое моделирование технологического процесса;
- 5) разрушающий и неразрушающий контроль качества и методы отбраковки потенциально ненадежных приборов.

Для разработки научно обоснованных и экономически оправданных методов определения (или подтверждения) количественных показателей надежности приборов также необходимо решить целый ряд частных задач. К ним относятся:

- 1) оценка технико-экономической целесообразности применения классических методов для определения надежности СПП;
- 2) обоснование нормированных режимов и разработка методик определения количественных показателей надежности СПП в этих режимах;
- 3) разработка требований к точности измерения параметров СПП и заданий режима при испытаниях;

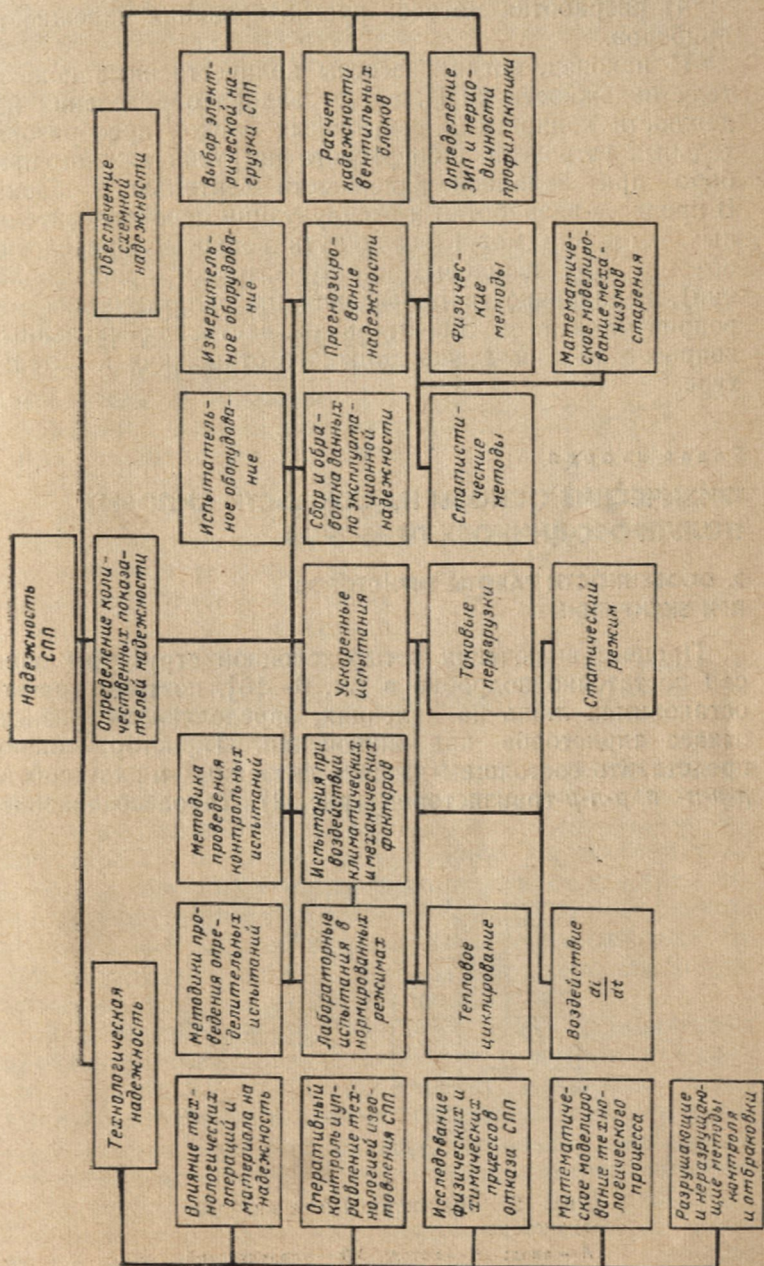


Рис. 1. Основные проблемы надежности СПП.

4) разработка методов прогнозирования надежности приборов.

И наконец, когда известны количественные показатели надежности СПП, встает задача определения надежности конкретных вентиляльных блоков преобразовательных устройств либо расчета нагрузки каждого прибора при заданной надежности вентиляльного блока. В процессе разработки и эксплуатации преобразовательных устройств могут возникнуть вопросы определения объема ЗИП (запасных инструментов и приспособлений), периодичности проведения профилактических мероприятий и т. д. Значительная часть перечисленных вопросов не нашла еще должного отражения в литературе.

## Глава вторая

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

#### 3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТИРИСТОРОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ

Процесс включения четырехслойной структуры описан достаточно подробно в [Л. 6—15], поэтому кратко остановимся лишь на явлениях, определяющих физику отказа тиристорov при включении. Тиристор можно представить состоящим из двух связанных между собой  $n$ - $p$ - $n$ - и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторов (рис. 2). Такое соединение

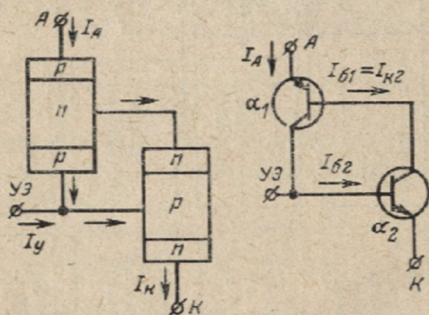


Рис. 2. Транзисторный эквивалент тиристора.

$A$  — анод;  $K$  — катод;  $УЭ$  — управляющий электрод.



обуславливает возникновение положительной обратной связи, если только коэффициенты усиления транзисторов по току ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) достаточно велики. Условие включения тиристора током управления  $I_y$  имеет следующий вид [Л. 6]:

$$I = \frac{I_y \alpha_1 + I_{к0}}{1 - \alpha_1 - \alpha_2}, \quad (3)$$

где  $I_{к0}$  — тепловой ток коллекторного перехода.

До тех пор, пока сумма  $\alpha_1 + \alpha_2$  остается меньше единицы, тиристор закрыт. Поскольку коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  зависят от тока, достаточно только увеличить  $I_y$ , чтобы знаменатель в уравнении (3) приблизился к нулю, а  $I \rightarrow \infty$ . Когда выполняется условие  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , нагрузочный ток через прибор начинает лавинообразно возрастать до значения, определяемого внешним нагрузочным сопротивлением. Однако нарастание тока происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени (рис. 3).

На кривой тока можно отметить три участка: время задержки  $t_3 = t_1 - t_0$  — время от момента подачи управляющего импульса до того момента, когда ток через структуру увеличится до  $0,1 I_{\max}$  или напряжение на структуре снизится до  $0,9 U_{\text{нач}}$ ; время нарастания тока  $t_{\text{н}} = t_2 - t_1$ , необходимое для резкого увеличения тока через структуру от  $0,1 I_{\max}$  до  $0,9 I_{\max}$ , и время установления  $t_{\text{уст}} = t_3 - t_1$ , необходимое для увеличения тока через структуру от  $0,9 I_{\max}$  до  $I_{\max}$  или снижения напряжения на структуре от  $0,1 U_{\text{нач}}$  до  $\Delta U$ .

Количественные значения всех трех составляющих времени включения свидетельствуют о том, что в основном времена  $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{уст}}$  определяют мощность потерь в  $p-n-p-n$ -структуре в момент коммутации, так как именно в течение  $t_{\text{н}} + t_{\text{уст}}$  ток через структуру уже велик, а напряжение еще не упало до стационарного значения.

Процесс переключения четырехслойной структуры является существенно неоднородным. Рассмотрим некоторые особенности включения тиристорov с большой

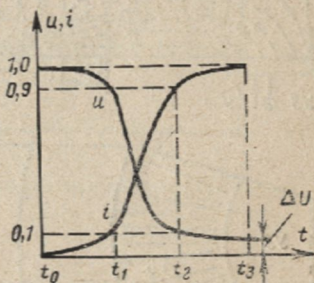


Рис. 3. Кривые изменения тока и напряжения при включении тиристора.

площадью. При включении по управляющему электроду в первый момент времени инжекция электронов из катодного эмиттера происходит только в зоне, наиболее близкой к управляющему электроду, поэтому первой будет переключаться именно эта зона. Неодновременное по площади включение тиристора обусловлено тем, что под влиянием объемного сопротивления  $p$ -базы ток управления протекает лишь через крайнюю часть перехода, расположенную рядом с управляющим электродом УЭ (рис. 4).

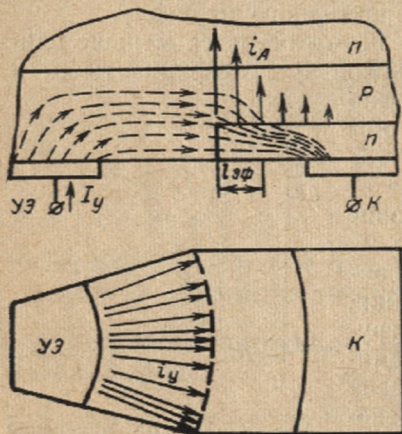


Рис. 4. Характер распространения тока управления при включении структуры.

Локализация области включения объясняется также неравномерной концентрацией тока управления в радиальном направлении, которая особенно сильно сказывается у структур с большой площадью. При этом, чем выше продольное сопротивление базовой области, тем неоднороднее распределена плотность инжектированного тока по площади прибора. В процессе лавинного роста тока максимум плотности

тока во включенной зоне, как и сама зона, перемещаются под омический контакт. Как только область прибора у управляющего электрода переключается в проводящее состояние, нагрузочный ток возрастает, напряжение на тиристоре убывает. Таким образом, часть прибора находится в открытом состоянии, а остальная — в закрытом.

С течением времени зона начального включения расширяется. Следует отметить, что понятие начальной зоны довольно условно, так как с момента появления тока через образец начинается распространение включенного состояния и поэтому трудно отделить область, обусловленную распространением включенного состояния, от первоначально включенной. Для определенности будем считать начальной проводящей площадью область, включаемую за время нарастания тока в тиристоре.

Механизм распространения включенной области довольно сложен. Большинство специалистов в настоящее время рассматривают два механизма: диффузионный и дрейфовый. Эти механизмы при разных условиях могут действовать как независимо, так и совместно.

Сущность диффузионного механизма распространения включенного состояния состоит в том, что вдали от управляющего электрода нарастание анодного тока через

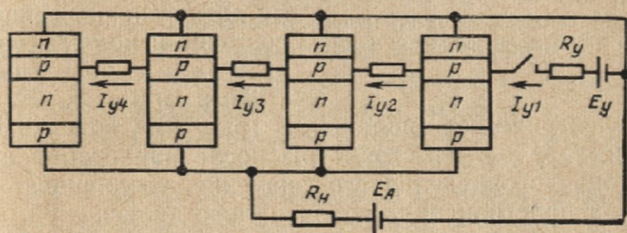


Рис. 5. Модель механизма включения тиристора ( $I_{y1} > I_{y2} > I_{y3} > I_{y4}$ ).

соответствующий участок  $p$ - $n$ - $p$ - $n$ -структуры происходит тогда, когда концентрация неравновесных носителей на этом участке превысит некоторое критическое значение. Источником неравновесных носителей в неключившихся областях структуры является диффузия из соседних включившихся участков. В этом случае прибор с большой площадью можно представить состоящим из многих параллельно включенных приборов (рис. 5).

Отметим, что в приборе, ближайшем к управляющему электроду, напряжение между катодом и управляющим электродом полное, в то время как напряжение на остальных приборах убывает на значение, равное падению напряжения на связывающих сопротивлениях. Так как ток через каждый прибор меняется экспоненциально с напряжением между его эмиттером и базой, через структуры, ближайшие к управляющему электроду, будет протекать основная часть тока, возникающего при импульсе напряжения в цепи управления. Как только неключенная область, смежная с областью включения, получит заряд носителей, достаточный для выполнения условия  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , она включается и, в свою очередь, начинает поставлять избыточные носители в смежные участки  $p$ - $n$ - $p$ - $n$ -структуры.

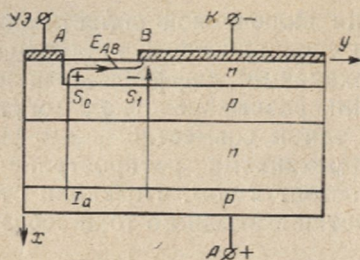


Рис. 6. Механизм действия поперечного поля при включении тиристора.

В диффузионной теории не учитывается влияние поперечных полей в базах. В реальных структурах из-за наличия сопротивления растекания баз процесс распространения включенного состояния определяется кроме диффузионных процессов еще и полями, создаваемыми поперечными токами в базах. Например, электрическое поле  $E_{AB}$  (рис. 6), возникающее в  $n$ -эмиттере  $p$ - $n$ - $p$ - $n$ -структуры после нарастания анодного тока до определенного значения, увеличивает скорость распространения первоначально включенной области и способствует перемещению проводящей области под катодный контакт. Наличие поперечных полей может привести к существенно неравномерному распространению области включения по площади структуры.

Каждый  $p$ - $n$ -переход структуры обладает определенной емкостью, которая нелинейно зависит от приложенного напряжения. Когда прибор включается, ближайшая к управляющему электроду область переключается, напряжение между анодом и катодом падает, а емкости переходов разряжаются. Однако в областях, далеких от управляющего электрода, быстрое падение напряжения на приборе приводит к тому, что заряд центрального перехода частично перераспределяется между эмиттерными переходами, в то время как на обоих эмиттерных переходах смещение меняется с прямого на обратное. В итоге возникают очень большие продольные падения напряжения и большие поперечные базовые токи. Эти токи текут из включенной области и уход оттуда носителей заряда оказывает воздействие на общий процесс включения. Возникающие в базах невключенной области поперечные токи стремятся препятствовать распространению включенного состояния и выключить проводящие участки [Л. 7]. Если первоначальное включение структуры происходит не в одной, а в нескольких точках, воздействие невключенной области может привести к выключению всех областей включения, за исключением одной, в которой процесс нарастания тока идет наиболее интенсивно.

Так или иначе включение тиристорной структуры током управления локализуется в небольшом участке, непосредственно примыкающем к электроду управления, а затем с определенной скоростью распространяется по площади *p-n-p-n*-структуры. Из-за малых размеров начальной проводящей площади и незначительной скорости распространения включенного состояния выделение мощности потерь в переходный период включения происходит в небольшом участке структуры, что приводит к сильному нагреванию этого участка и ограничению допустимой скорости нарастания тока ( $di/dt$ ).

Амплитуда мгновенной мощности при включении может достигать нескольких десятков киловатт, а температура локальных участков структуры — сотен градусов. Нагрев локального участка определяется мощностью, выделяемой за время переходного процесса, размерами первоначально включенного участка и скоростью распространения включенного состояния. Количество теплоты  $Q$ , которое выделяется во время переходного процесса, равно:

$$Q = 0,24 \int_0^t u(t) i(t) dt, \quad (4)$$

где  $i(t)$ ,  $u(t)$  — мгновенные значения анодного тока и напряжения.

Все тепло выделяется в основном в области объемного заряда среднего перехода, так как на этом переходе практически падает все анодное напряжение. При быстром включении нагревание областей кремния, расположенных рядом с включенной областью, пренебрежимо мало из-за инерционности процессов теплопередачи.

Размеры первоначально включенной зоны  $S_0$  обычно определяются экспериментально либо по площади кратера проплавления кремниевой пластины, либо путем регистрации рекомбинационного излучения. Однако оба эти метода имеют существенную погрешность. В первом случае погрешность определяется увеличением площади кратера проплавления химической обработкой (травлением) кремниевой пластины при препарировании структуры, а также зависимостью площади кратера от электрической мощности, выделенной после разрушения прибора в проплавленной зоне. Метод регистрации реком-

бинационного излучения имеет относительно небольшую разрешающую способность. Если считать, что распределение плотности тока во включенной области имеет вид колоколообразной функции, то погрешность определения зоны  $S_0$  может составлять 50% и более [Л. 8].

Эксперименты, проведенные разными авторами на разных структурах, показали, что ширина первоначально включенной зоны составляет 0,2—0,6 мм [Л. 9, 10]. Следует отметить, что площадь этой зоны зависит от тока управления. При малых значениях  $I_y$  для любой конструкции управляющего электрода включается только одна точка структуры. При  $I_y \geq 1$  А структура включается в нескольких точках, которые могут сливаться в одну зону, охватывающую области вблизи управляющего электрода. Количество точек и ширина начальной проводящей зоны зависят от однородности инжекции эмиттерной зоны под действием тока управления по линии раздела эмиттер — база. Исследования показали, что увеличение  $I_y$  выше 1,5—2 А не оказывает заметно-го влияния на увеличение площади  $S_0$ .

Как уже было сказано, наличие поперечных токов в базах структуры приводит к существенно неравномерному процессу распространения включенной области. Поскольку увеличение анодного напряжения приводит к возрастанию этих токов, следует ожидать, что рост анодного напряжения может привести к уменьшению области начального включения. Действительно, рядом авторов [Л. 11] экспериментально установлено, что с увеличением напряжения усиливается неравномерность распределения анодного тока. У некоторых образцов увеличение напряжения в 2 раза приводило к выключению ряда проводящих участков по линии раздела эмиттер — база и к уменьшению включенной области до размеров одной точки.

До недавнего времени считалось, что скорость распространения включенного состояния постоянна и примерно равна 0,1 мм/мкс. Однако более поздние исследования показали, что на разных этапах включения структуры и в разных ее частях скорость может быть различна. На первом этапе включения, когда проводящий канал  $S_0$  еще не переместился под зону катодного контакта, наличие сильного электрического поля на участке А—В (рис. 6), свободном от электрического контакта, приводит к увеличению скорости распространения.

В [Л. 14] указывается, что для некоторых образцов скорость распространения при плотности тока  $50 \text{ А/мм}^2$  достигала  $0,7 \text{ мм/мкс}$ . Когда включается вторая зона  $S_1$  и процесс распространяется под площадь металлического контакта, скорость распространения начинает падать.

Скорость распространения включенного состояния зависит от целого ряда факторов: анодного тока и напряжения, толщины баз, сопротивления кремния и т. д.

На рис. 7 приведены зависимости средней скорости  $v$  распространения включенного состояния на различных участках  $p-n-p-n$ -структуры от анодного тока. Из рис. 7

видно, что с ростом амплитуды тока, протекающего через структуру, скорость может увеличиваться в несколько раз. Низкие значения скорости свидетельствуют о том, что включенное состояние распространяется по площади  $p-n-p-n$ -структуры за счет диффузии носителей тока из включенной области в прилегающие участки, поэтому с ростом тока увеличиваются концентрация носителей тока в слоях структуры, градиент концентрации носителей от включенного участка к прилегающим областям и скорость. Этим же объясняется уменьшение скорости по мере удаления включенной зоны от управляющего электрода. Так как амплитуда импульса тока постоянна, то плотность тока в более удаленных от управляющего электрода точках структуры в процессе включения значительно меньше, чем в близлежащих, а связанное с этим уменьшение градиента концентрации носителей по мере распространения включенного состояния приводит к замедлению самого распространения. Однако в ряде случаев обнаруживается, что скорость  $v$  с удалением от управляющего электрода может на некоторых участках возрастать, что объясняется, вероятно, различной плотностью тока в отдельных участках структуры.

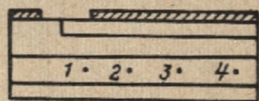
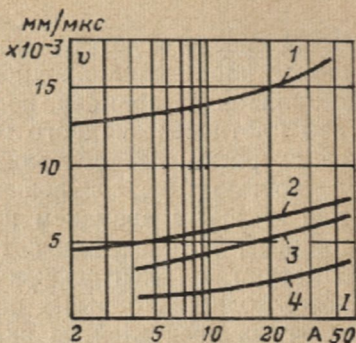


Рис. 7. Зависимость скорости распространения включенного состояния от анодного тока в разных точках структуры.

Интересно отметить, что скорость распространения на фронте нарастания анодного тока является величиной постоянной во времени, постепенно растущей с увеличением плотности анодного тока [Л. 8, 11]. В общем случае скорость распространения связана с мгновенной плотностью тока соотношением  $v = kj(t)^{1/n}$  и зависимостью  $v \approx t^{-1/c}$  с временем протекания тока;  $k$ ,  $n$ ,  $c$  — постоянные, которые зависят от конфигурации образца, геометрии и электрофизических параметров базовых слоев. Толщина базовых областей определяет поток избыточных носителей из включенной области в невключенную. Уменьшение толщины базовых областей при прочих равных условиях должно вызвать увеличение потока избыточных неосновных носителей, а следовательно, и скорости распространения включенного состояния.

Увеличение времени жизни неосновных носителей при заданном токе приводит к увеличению концентрации инжектированных носителей в базах, а следовательно, в соответствии с диффузионной теорией распространения — к увеличению скорости. Изменение удельного сопротивления исходного кремния приводит к изменению поперечного поля  $n$ -базы. А поскольку поперечные поля в базовых областях замедляют процесс распространения, то увеличение удельного сопротивления кремния при прочих равных условиях вызовет уменьшение скорости распространения включенного состояния.

Из анализа процессов, происходящих в структуре при включении, становится ясно, что разрушение под действием эффекта  $di/dt$  является следствием совместного действия электрического и теплового механизмов. При анализе и расчетах эффект  $di/dt$  в конечном итоге обычно сводится к чисто тепловому явлению. При однократных воздействиях сама по себе локализация тока и мощности может не привести к необратимым изменениям в тиристоре. Для того чтобы они наступили, требуется рассеять в тиристоре значительную энергию и нагреть структуру тиристора до некоторой критической температуры.

Температура нагрева локальной области при включении тиристора определяется размерами начальной проводящей площади, скоростью распространения включенного состояния и энергией, выделяющейся в начальном проводящем объеме за переходный период процесса включения. Все эти факторы не являются постоянными



ми в количественном отношении, поэтому и критическая температура может быть оценена весьма условно.

Возможно несколько механизмов отказа приборов при воздействии высокой скорости нарастания анодного тока, которые соответствуют двум режимам работы прибора: предельному и ресурсному. Предельным является такой режим работы, когда тиристор выходит из строя при однократном воздействии электрической нагрузки. Под ресурсным режимом понимаются все те условия работы, при которых прибор выполняет свои функции более или менее длительное время.

При предельной нагрузке воздействие эффекта  $di/dt$  сводится к чисто тепловому механизму: прохождение импульса тока приводит к выделению в локализованном объеме такого количества тепла, что температура этого объема повышается до температуры плавления кремния. А это приводит обычно к короткому замыканию структуры. Разные авторы дают несколько отличные значения температуры плавления  $\Theta=1100-1400^\circ\text{C}$ . При некоторых условиях выделение значительного количества энергии в период лавинного нарастания тока в небольшом начальном проводящем объекте может привести к шнурованию тока и термическому разрушению структуры.

Сущность эффекта шнурования тока заключается в том, что в зоне локализации тока температура достигает значения, при котором температурный коэффициент сопротивления становится отрицательным. Это вызывает дальнейшее повышение плотности тока в локальной зоне, возрастание энергии потерь и соответственно повышение температуры, т. е. процесс приобретает регенеративный характер. Критическая температура шнурования изменяется в диапазоне от  $300$  до  $600^\circ\text{C}$  в зависимости от электрофизических и геометрических параметров структуры [Л. 12, 14]. При этом проплавление происходит по линии раздела эмиттер — база.

При значениях  $di/dt$ , меньших критического значения, но больших некоторого уровня, при котором эффект  $di/dt$  никак не влияет на ресурс прибора, механизм разрушения носит усталостный характер. Например, у структур с поперечным полем в области  $n$ -эмиттера при работе с достаточно высокими значениями  $di/dt$  наблюдается искрение в зоне АВ, лишенной металлического контакта [Л. 14]. Искрение может наблюдаться

как в отдельных точках, так и по линии. Этот эффект приводит к сильному испарению, эрозии и разрушению кремния в области АВ. Испарение и эрозия связаны с электрическим пробоем, обусловленным полем  $E_{AB}$  и разогреванием эмиттерного слоя при протекании анодного тока по эмиттеру в направлении оси  $u$ . Участки кремния вблизи неровностей катодного контакта и в местах повышения концентрации фосфора разогреваются до испарения, так как именно в этих местах плотность тока повышена.

Эрозия отдельных участков кремния приводит к образованию вдоль линии Ni—Si (по направлению к управляющему электроду) глубоких «каналов». С течением времени «канал» углубляется до коллекторного перехода и тиристор теряет запирающие свойства. В зависимости от электрического режима работы процесс углубления «канала» может быть довольно длительным. Кроме того, возможно совместное действие описанных механизмов, когда нагрев участков границы Ni—Si, вызванный протеканием поперечного тока, и нагрев локального проводящего объема структуры приводят к шнурованию тока. При этом наблюдается сквозное проплавление структуры. Возможные дефекты структуры способствуют возникновению в этих местах аномально больших плотностей тока при включении  $n$ , следовательно, ускоряют процесс разрушения структуры.

При относительно небольших значениях амплитуды тока и  $di/dt$  возможно появление еще одного механизма повреждения. Периодическое нагревание и охлаждение (особенно при работе на повышенных частотах) может привести к возникновению местных усталостных деформаций кристаллической решетки в наиболее нагреваемых участках структуры. И наконец, возможен механизм так называемой тепловой неустойчивости. Сущность этого механизма состоит в следующем. При достаточно большой длительности импульса и высокой частоте повторения, когда период повторения становится сравним с постоянной времени тепловой релаксации, возможно как общее превышение температуры прибора, так и превышение температуры отдельных его участков относительно средней температуры структуры. Если эти участки оказываются расположенными в зоне вблизи управляющего электрода, они могут служить местом кумуляции энергии при включении. В разогретой обла-

сти начинается термическая генерация носителей заряда и ее проводимость становится выше проводимости соседних областей, также находящихся во включенном состоянии. В конечном итоге процесс приведет к шнурованию тока.

Исследования кратера проплавления кремниевой пластины показали, что он представляет собой конус с вершиной в области анода [Л. 13]. Центр кратера расположен в слое  $n$ -эмиттера, лишнего омического контакта. Конусность кратера проплавления можно объяснить следующими причинами. Электрическая мощность в начальный период лавинного роста тока рассеивается неравномерно по толщине пластины кремния. Большая ее часть рассеивается на толщине пластины, равной лишь ширине объемного заряда коллекторного перехода  $J_2$ , вплоть до момента инверсии отрицательного знака электрического поля на коллекторном переходе на положительный. Таким образом, в плоскости перехода  $J_2$  достигается максимальная температура, а по направлению к поверхностям пластины кремния возникают температурные градиенты и, следовательно, тепловые потоки. Если переход  $J_2$  расположен к катодной поверхности пластины ближе, чем к анодной, на расстояние, равное ширине  $n$ -базы, то энергия теплового потока у катодной поверхности будет значительно выше, чем у анодной. Это, вероятно, и является причиной конусности кратера проплавления [Л. 12].

#### 4. РАБОТА СПП ПРИ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ

При работе в преобразовательных устройствах важным показателем тиристора является его способность выдерживать кратковременные перегрузки большим током. Как правило, устройства токовой защиты преобразователей отключают систему формирования импульсов управления за время нарастания тока перегрузки, поэтому в большинстве случаев перегрузка носит характер однократного импульса синусоидальной формы. При применении в модуляторных и других устройствах промышленной электроники тиристоры подвергаются перегрузке импульсом тока прямоугольной формы с относительно малой длительностью.

Одним из основных факторов, ограничивающих значение и длительность импульса тока перегрузки, является

ся предельно допустимая температура кремниевой пластины. В зависимости от режима работы различают три значения предельной температуры:

$\Theta_1$  — предельная температура структуры в процессе прохождения импульса тока перегрузки;

$\Theta_2$  — предельная температура структуры в момент окончания импульса тока перегрузки. В большинстве схем в этот момент времени к СПП прикладывается обратное напряжение;

$\Theta_3$  — предельная температура структуры в момент приложения к прибору прямого напряжения.

К расчету температуры структуры при токовых перегрузках существуют два подхода. Наиболее простой способ заключается в приближенном расчете температуры с помощью переходного теплового сопротивления прибора. Для этого вначале расчетным путем определяется выделяемая в приборе мощность  $P$ , а затем температура структуры:

$$\Theta_{p-n}(t) = \Theta_0 + P(t)r(t), \quad (5)$$

где  $\Theta_0$  — температура охлаждающего агента;  $r(t)$  — переходное тепловое сопротивление прибора в соответствующий момент времени.

При этом предполагается, что выделение тепла во время токовой перегрузки происходит равномерно по всему объему кремниевой пластины. Однако такой метод определения температуры дает существенную ошибку из-за большой погрешности определения  $r(t)$  для малых значений  $t$  и из-за линеаризации прямой вольт-амперной характеристики (ПВАХ) прибора.

Для более точного расчета тепловых режимов тиристорov в условиях перегрузок требуется знать температурную зависимость основных параметров ПВАХ в широком диапазоне плотностей прямого тока, вплоть до  $1000 \text{ А/см}^2$ . Известно, что при увеличении плотности тока в структурах силовых полупроводниковых приборov

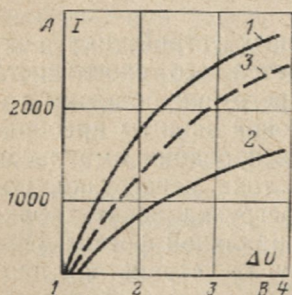


Рис. 8. Статические прямые вольт-амперные характеристики тиристорov типа T160.

1, 2 — граничные характеристики; 3 — типичная характеристика.

ров, начиная с 1—2 кА/см<sup>2</sup>, зависимость, описывающая связь напряжения на открытой структуре с током через нее, изменяется с линейной на квадратичную. Изменение характера зависимости объясняется снижением при таких плотностях тока эффективности эмиттеров и уменьшением подвижности носителей в результате рассеяния носителей на носителях, причем влияние этих факторов на увеличение падения напряжения с температурой резко возрастает, приводя в конечном итоге к еще большему увеличению рассеиваемой в структуре мощности и увеличению температуры.

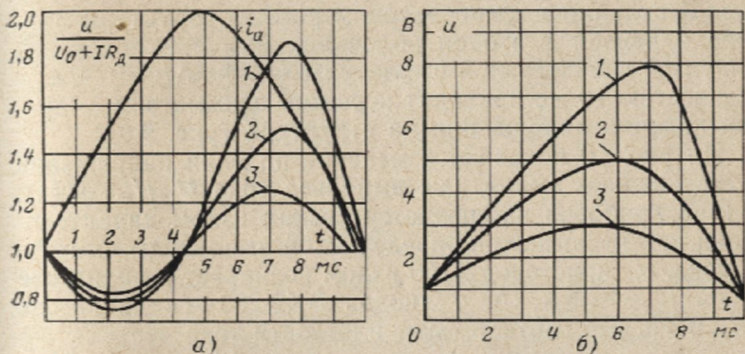


Рис. 9. Изменение падения напряжения на тиристоре от прямого тока.

*a* — отношение реального падения напряжения на тиристоре Т160 к расчетному при различных амплитудах полусинусоидального импульса прямого тока  $i_a$  длительностью 10 мс; *б* — падение напряжения на тиристоре Т160 при различных амплитудах импульса прямого тока; 1 — 7 кА, 2 — 6 кА; 3 — 5 кА.

Типичные экспериментальные ПВАХ тиристоров Т160 приведены на рис. 8 [Л. 18]. Нелинейность характеристик объясняется в основном температурной зависимостью динамического сопротивления.

На рис. 9, *a* показано изменение отношения реального падения напряжения на структуре  $u$  к расчетному ( $U_0 + IR_d$ ) для различных амплитуд тока и моментов времени [Л. 24]. Эти кривые указывают на резкое увеличение падения напряжения на структуре во второй части импульса анодного тока  $i_a$  по сравнению с падением напряжения при том же мгновенном токе в первой части импульса. Данное явление объясняется резким увеличением значения динамического сопротивления тиристоров  $R_d$  с температурой и плотностью тока.

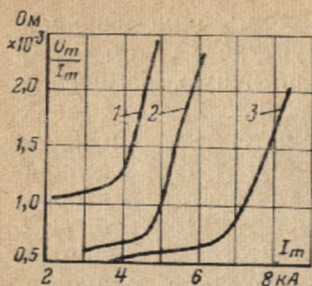


Рис. 10. Зависимость  $U_m/I_m=f(I_m)$  для различных типов приборов.  
1 — ТЛ2-150; 2 — Т160; 3 — ВК2-200.

Незначительное уменьшение падения напряжения в первой части импульса тока по сравнению с расчетным значением можно объяснить преобладанием на этом уча-

стке снижения напряжения отсечки  $U_0$  с температурой. Резкое отличие в температурном режиме структуры прибора в первой и второй половинах импульса тока при импульсе значительной амплитуды ( $I \geq 1$  кА/см<sup>2</sup>) и длительностью 10 мс приводит к резкой асимметрии в кривой падения напряжения на структуре (рис. 9,б).

На рис. 10 показано изменение падения напряжения с увеличением амплитуды импульса тока  $U_m/I_m=f(I_m)$ . У всех приборов наблюдается резкий излом характеристики при превышении определенной амплитуды импульса тока. У тиристоров Т160 излом возникает в диапазоне токов  $I_m=4-5,5$  кА, у диодов ВК2-200 — в диапазоне 7,5—8 кА, что соответствует плотности тока через активную часть структуры соответственно 1,3—1,8 и 2,2—2,7 кА/см<sup>2</sup> [Л. 19].

В последнее время предпринимаются попытки аналитического описания тепловых полей СПП при различных длительностях импульса силового тока. Так как при теоретическом анализе приходится иметь дело со сложной системой взаимосвязанных элементов конструкции, тепловые процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, аналитическое решение возможно только с применением цифровых ЭВМ или на основе метода электротепловой аналогии (ЭТА). Метод ЭТА основан на подобии дифференциальных уравнений и их решений для распространения теплового потока в однородном стержне и электрического тока в однородной линии. Известно, что одномерное уравнение теплопроводности для однородного слоя с равномерно распределенными внутренними источниками тепла имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{k} Q(t) \right], \quad (6)$$

где  $a = k/c\rho$ ;  $k$ ,  $c$ ,  $\rho$  — коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала слоя соответственно;  $Q(t)$  — плотность тепловых источников;  $\Theta$  — температура в точке с координатой  $x$  в момент  $t$ .

Для слоя без тепловыделения имеем:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}. \quad (7)$$

Аналогично одномерное уравнение электрической проводимости для однородного участка длиной линии с равномерно распределенными внутренними источниками тока имеет вид:

для участка с источниками

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{R_l C_l} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R_l I(t) \right]; \quad (8)$$

для участка без источников

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{R_l C_l} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где  $u$  — напряжение в точке с координатой  $x$  в момент времени  $t$ ;  $R_l$ ,  $C_l$  — электрическое сопротивление и емкость на единицу длины линии соответственно;  $I(t)$  — плотность источников тока.

При решении уравнения теплопроводности методом ЭТА обычно принимается целый ряд допущений. Основным из них является то, что температурное поле в конструкции и электрическое поле в модели считаются одномерными. С учетом подобия дифференциальных уравнений (6) — (9) можно построить электрическую модель, отражающую распределение температуры в СПП. При этом приводятся в соответствие следующие параметры:

$$U \rightarrow \Theta; R_l C_l \rightarrow R_\theta C_\theta; Q(t) \rightarrow I(t),$$

где  $R_\theta$  — тепловое сопротивление единицы длины слоя;  $C_\theta$  — теплоемкость единицы длины слоя.

Для точных количественных результатов необходимо также обеспечить подобие координат и времени, физических констант, краевых условий. С этой целью задаются соответствующие масштабные коэффициенты.

В качестве примера на рис. 11, а и б приведена конструкция серийного тиристора Т160 и его упрощенная электротепловая модель [Л. 20]. Граничные условия со

стороны анодного и катодного выводов тиристора моделируются эквивалентными электрическими сопротивлениями:  $R_1$  — со стороны анодного и  $R_2$  — со стороны катодного выводов. С помощью такой модели можно построить целый ряд зависимостей, необходимых при практической работе: переходное тепловое сопротивление при различных длительностях импульсов, зависимость превышения температуры от длительности, частоты, количества импульсов, угла проводимости, оценить температуру в различные моменты времени т. д.

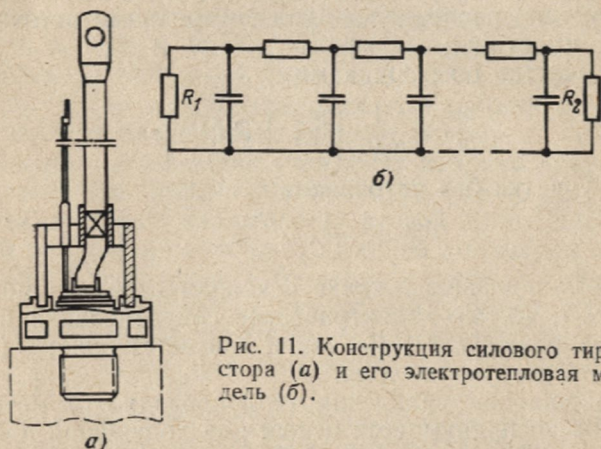


Рис. 11. Конструкция силового тиристора (а) и его электротепловая модель (б).

На рис. 12 приведена одна из таких зависимостей. Как видно из рисунка, максимум температуры на границе между кремниевой пластиной и вольфрамовым термокомпенсатором смещен в сторону больших времен по сравнению с максимумом импульса тока, а к моменту окончания импульса тока происходит выравнивание температуры по кремниевой пластине. Это естественно, поскольку импульс тока по времени значительно превосходит время диффузии тепла через кремниевую пластину и в последней успевает установиться квазистационарное распределение температуры.

Следует, однако, иметь в виду, что анализ импульсных тепловых режимов на основании решения уравнения теплопроводности для прибора одним из расчетно-теоретических методов, например численным анализом на цифровой ЭВМ или методом ЭТА, основан на ряде существенных допущений и не может, в частности, учесть

многочисленные неоднородности структур реальных приборов (дефекты кремниевой пластины типа неравномерной ширины баз, неоднородности удельного сопротивления материала по площади, непропаи контактных соединений и т. д.), поэтому расчетно-теоретические методы применимы только для приближенной оценки температуры структур.

Для отвода тепла от структуры используются медные теплоотводы с температурным коэффициентом линейного расширения, резко отличным от коэффициента линейного расширения кремниевой пластины ( $\alpha_{Si} = 2,5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{Cu} = 17 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ). Вследствие этого между пластиной и теплоотводами приходится устанавливать термокомпенсаторы (вольфрамовые или молибденовые), коэффициенты линейного расширения которых близки к кремнию  $\alpha_w = 4,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ . Однако при импульсных токовых воздействиях даже полная идентичность коэффициентов линейного расширения кремния и компенсаторов не исключает возникновения в пластине значительных термонапряжений. Эти термонапряжения есть следствие резкого градиента температур по толщине пластины и близлежащих элементов конструкции. Если они превысят предел прочности кремния, пластина может разрушиться и тиристор выйдет из строя. При импульсных токовых воздействиях термонапряжения в кремниевой пластине возникают не только в результате значительного отличия коэффициентов линейного расширения кремния и элементов конструкции, но и вследствие наличия градиента температур по толщине элементов.

Кратковременные токи перегрузок значительной кратности приводят к резкому перегреву кремниевой пластины. В то же время термокомпенсаторы перегреваются несколько меньше. Взаимодействие термокомпенсаторов и пластины, соединенных припоем, приводит к возникновению в пластине сжимающих напряжений,

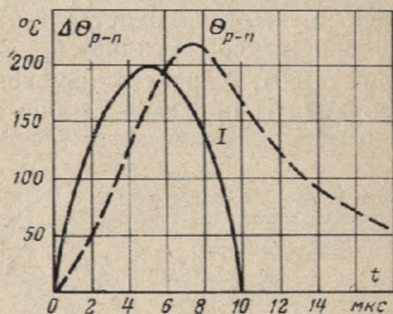


Рис. 12. Расчетная зависимость превышения температуры структуры тиристора Т160 при действии импульса тока  $I_m = 5,0$  кА.



наводящих растягивающие напряжения, перпендикулярные ее плоскости. Кроме того, в плоскости соединения пластины и компенсаторов возникают напряжения среза (касательные напряжения).

Картина механических напряжений, возникающих в системе в результате совместной деформации системы при отсутствии изгиба, приведена на рис. 13,а. На кремниевую пластину будет действовать радиальное усилие  $\sigma_r$ , окруженное усилие  $\sigma_z$  и сдвигающее усилие  $\sigma_c$  (рис. 13,б). Характер изменения этих напряжений от координаты приведен на рис. 13,в. Растягивающее уси-

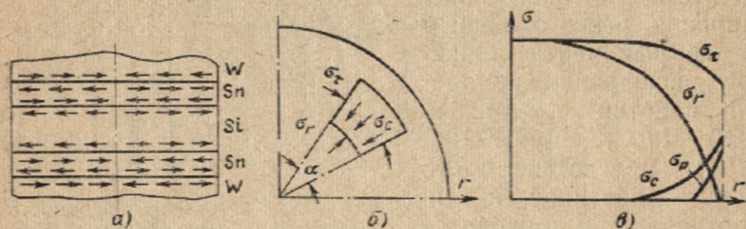


Рис. 13. Механические напряжения в кремниевой структуре.

а — механические напряжения, действующие в системе Si — W в результате ее совместной деформации при отсутствии изгиба; б — система усилий, действующих на элемент кремниевой пластины; в — характер изменения усилий, действующих в кремниевой пластине от координаты радиуса.

лие в пластине определяется суммарным воздействием радиального и сдвигающего усилий. Значение и направление максимальных напряжений в данном случае определяются соотношением [Л. 21]

$$\sigma_p = -\sigma_r/2 + \sqrt{(\sigma_r/2)^2 + \sigma_c^2}; \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = -\sigma_c/\sigma_p,$$

где  $\sigma_p$  — максимальное растягивающее напряжение;  $\sigma_c$  — напряжение сдвига;  $\sigma_r$  — радиальное напряжение;  $\alpha$  — направление плоскости действия максимальных растягивающих напряжений (или главных напряжений).

Из рис. 13,в видно, что максимальное растягивающее напряжение возникает в кремниевой пластине на периферии соединения ее с верхним вольфрамовым компенсатором, а плоскость действия этого напряжения направлена под углом около  $45^\circ$  к плоскости пластины по направлению к ее оси. Механизм этого явления можно объяснить следующим образом. Нижний компенсатор

напаян на медное основание, поэтому жесткость системы нижний компенсатор — основание много больше жесткости относительно свободного верхнего компенсатора. Таким образом, край верхнего компенсатора под действием механических усилий, возникающих из-за градиента температуры по его толщине в импульсном режиме, стремится отойти от плоскости пластины на расстояние, большее, чем край нижнего компенсатора. Эти усилия приложены к периферийным зонам кремниевой пластины, удерживающим компенсаторы от изгиба. В результате этого разрушение пластины происходит именно в периферийной зоне ее контакта с верхним компенсатором.

Приближенно максимальные перенапряжения можно определить также из соотношения [Л. 22]

$$\sigma_{p, \text{макс}} \approx \sqrt{\frac{E_{\text{Sn}} E_{\text{Si}} \Delta_{\text{Si}}}{\Delta_{\text{Sn}}}} (\alpha_{\text{w}} \Delta \theta_{\text{w}} - \alpha_{\text{Si}} \Delta \theta_{\text{Si}}), \quad (11)$$

где  $E_{\text{Sn}}$ ,  $E_{\text{Si}}$  — модули упругости олова и кремния;  $\Delta_{\text{Sn}}$ ,  $\Delta_{\text{Si}}$  — толщина слоя припоя и кремниевой пластины;  $\Delta \theta_{\text{w}}$ ,  $\Delta \theta_{\text{Si}}$  — перепад температур в термокомпенсаторе и кремниевой пластине.

Следует учитывать, что предел текучести олова составляет  $1,17 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, а предел прочности — около  $1,6 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, т. е. меньше, чем у кремния. В реальных условиях импульсных токовых воздействий напряжение, большее предела прочности припоя, не может быть передано через припой со стороны других элементов конструкции, поэтому оно не опасно для кремния. Однако по некоторым данным максимальные напряжения на периферии соединения пластины с компенсатором могут в 2—3 раза превышать средние расчетные значения. Это объясняется тем, что при динамическом приложении усилий к припоям предел прочности их значительно возрастает по сравнению с пределом прочности при статическом нагружении.

Разрушение кремниевой пластины под воздействием термонапряжений, возникающих при значительных импульсных токах перегрузки, имеет место при условии  $\sigma_{p, \text{макс}} \geq [\sigma_p]^1$ , поэтому, зная  $[\sigma_p]$  и  $\sigma_{p, \text{макс}}$  из условий импульсной стойкости тиристоров, можно оценить критические значения амплитуды импульса прямого тока  $I_{\text{мкр}}$ .

<sup>1</sup>  $[\sigma_p]$  — максимально допустимое растягивающее напряжение.

Стойкость СПП к токовым перегрузкам в значительной мере определяется равномерностью распределения тока по площади структуры. На распределение плотности тока по структуре оказывает влияние целый ряд факторов: равномерность удельного сопротивления, неоднородность фронта  $p-n$ -переходов, распределение концентрации примеси по поверхности, качество обработки поверхности кристалла, качество контактов и т. д. Например, если в процессе изготовления структуры диффузия донорной примеси проводится в структуру с неравномерным распределением поверхностной концентрации, в диффузионном слое происходит неравномерная компенсация атомов акцепторной примеси, т. е. сопротивление  $n$ -слоя модулируется. Условия переключения тиристорной структуры в разных точках оказываются разными. Это условие выполняется ранее в тех точках, где

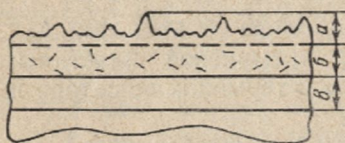


Рис. 14. Структура нарушенного слоя полупроводниковой пластины.

наблюдается заниженное значение поверхностной концентрации при получении  $p-n-p$ -структуры. Неравномерность включения может оказаться причиной неравномерного распределения тока по площади структуры.

Существенное влияние на получение однородных диффузионных слоев оказывает качество обработки поверхности полупроводника. Поверхностные нарушения вызывают локальные изменения коэффициента диффузии и поверхностной концентрации примесей. К таким нарушениям можно отнести царапины, неизбежные при шлифовке, микротрещины и т. д. Поверхность полупроводниковой пластины после механической шлифовки состоит из рельефного слоя  $a$ , слоя с механическими микротрещинами  $b$  и слоя механических деформаций  $в$  (рис. 14). Глубина нарушенного слоя ( $a$ ,  $b$ ,  $в$ ) зависит от размера абразива, скорости механической обработки, температуры, давления. Глубина этого слоя сильно влияет на падение напряжения. Так, на образцах с глубоким нарушенным слоем падение напряжения оказывается значительно больше, чем на образцах с мелким нарушенным слоем. Интересно отметить, что образцы с большим падением напряжения характеризуются большей

неоднородностью плотности тока, чем образцы с низким значением.

Для экспериментального исследования неоднородности распределения плотности тока в полупроводниковых приборах как в стационарных, так и в нестационарных условиях используется ряд методов:

- метод регистрации теплового излучения;
- метод термографического анализа;
- метод секционирования контактов;
- метод регистрации рекомбинационного излучения с торцевой поверхности.

Сущность метода регистрации теплового излучения состоит в том, что структура зажимается в специальное устройство вместе с охладителем. Для регистрации излучения с поверхности структуры в катодном прижимном контакте сверлятся отверстия небольшого диаметра. Исследуемая структура разогревается силовым током до установившегося теплового режима, температура поверхности регистрируется пирометром.

Метод термографического анализа основан на использовании термографических люминофоров, например фосфора, у которого эмиссия видимого света при облучении ультрафиолетовыми лучами заметно уменьшается с повышением температуры. Световое излучение с поверхности регистрируется с помощью специальной аппаратуры.

Сущность метода секционирования контактов заключается в том, что контакт со стороны катода тиристорной структуры разделяется на секции прямоугольной или круглой формы с одинаковой площадью поверхности. К каждой секции присоединяются шунты для измерения тока в секции. Метод секционирования контактов позволяет получить картину распределения тока по площади в абсолютных значениях. Он практически не вносит искажений ни в закон распределения тока между секциями, ни в закон изменения тока во времени в каждой секции. В качестве примера на рис. 15 приведена

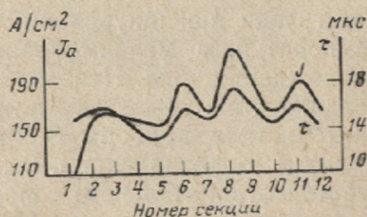


Рис. 15. Распределение плотности тока и времени жизни неосновных носителей в одном из сечений полупроводниковой структуры.

экспериментальная кривая распределения плотности тока, полученная для одного из образцов структуры методом секционирования контактов.

В соответствии с рассмотренной картиной термомеханических явлений при перегрузке СПП импульсами тока возможны следующие механизмы отказа.

1. **Растрескивание (или расслоение) кремниевой пластины.** Трещины начинаются, как правило, вблизи периферии вольфрамового термокомпенсирующего диска малого диаметра. Этот вид повреждения вызван появлением механических напряжений в кремниевой пластине вследствие разности температур кремниевой пластины и термокомпенсирующих дисков во время перегрузки.

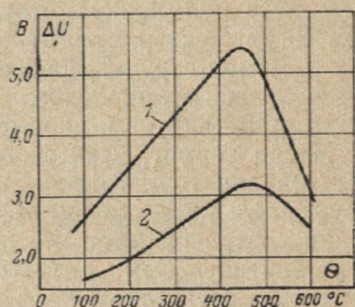
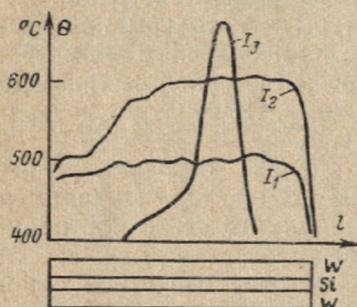


Рис. 16. Изменение распределения температуры вдоль образца при штуровании тока ( $I_1 < I_2 < I_3$ ).

Рис. 17. Температурная зависимость прямого падения напряжения для диодов при  $J_a = 600 \text{ A/cm}^2$ .  
1 —  $W/L = 5,5$ ; 2 —  $W/L = 3,0$ .

2. **Шнурование прямого тока.** Основным фактором, определяющим значение и длительность импульса тока перегрузки при шнуровании тока, является не разность температур, а максимальная температура в процессе прохождения тока. Необходимым условием начала шнурования тока является наличие на вольт-амперной характеристике прибора S-образного участка с отрицательным сопротивлением. В приборах на основе кремния участок отрицательного сопротивления может появиться вследствие того, что локальный нагрев при большой плотности тока приводит к увеличению собственной проводимости. При достижении в наиболее нагретой части структуры температуры, при которой собственная проводимость становится сравнимой с проводимостью, опре-

деляемой модуляцией базовой области ( $n$ -базы) инжектированными носителями, температурный коэффициент сопротивления этой локальной зоны становится отрицательным и между проводимостью и температурой структуры возникает положительная обратная связь, приводящая к концентрации в этой зоне структуры основной части тока. В этот момент на вольт-амперной характеристике тиристора появляется S-образный участок. Резкое увеличение плотности тока в шнуре и удельной мощности рассеяния и одновременное возрастание теплового сопротивления быстро приводят к выходу прибора из строя в результате локального проплавления кремниевой структуры.

Экспериментально процесс развития шнурования тока можно наблюдать с помощью регистрации теплового излучения. Типичная картина его развития приведена на рис. 16. Видно, что при достижении некоторой критической температуры шнурования происходит резкое изменение в распределении температуры по образцу, свидетельствующее о стягивании тока. Критическая температура начала шнурования прямого тока зависит от целого ряда факторов и в первую очередь от времени жизни носителей в  $n$ -базе, плотности прямого тока, толщины базы [Л. 14, 25, 26]. Например с уменьшением отношения толщины базы к диффузионной длине  $W/l$  плотность тока и температура, при которой начинается шнурование, возрастают.

На рис. 17 приведена зависимость прямого падения напряжения на диоде от температуры при двух значениях  $W/l$  [Л. 14]. Измерения проводились на коротких прямоугольных импульсах  $t_n=50$  мкс, не приводящих к заметному разогреву образца. Кривые имеют максимум, соответствующий началу появления участка с отрицательным сопротивлением, т. е. началу процесса шнурования.

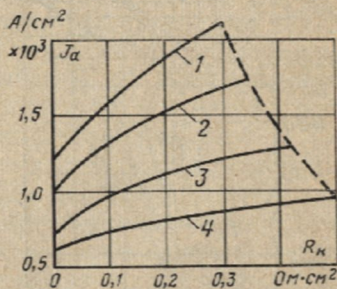


Рис. 18. Зависимость критической плотности тока от  $R_k$  и  $t_n$ .  
 1 —  $t_n=1$  мс; 2 —  $t_n=2$  мс; 3 —  $t_n=3$  мс;  
 4 —  $t_n=10$  мс.

Шнурование тока начинается при некоторой критической плотности прямого тока  $J_a$  в локальной зоне структуры. На рис. 18 приведены расчетные зависимости  $J_a(R_K, t_n)$ , где  $R_K$  — электрическое сопротивление контактов и крайних эмиттерных областей структуры [Л. 26]. Из этих зависимостей следует, что значение  $R_K$  оказывает стабилизирующее действие на распределение плотности тока по структуре, увеличивая  $J_a$  [Л. 25]. При превышении определенного значения  $R_K$  в структуре вообще не формируется шнур тока, так как в импульсной вольт-амперной характеристике исчезает участок отрицательного сопротивления. По мере уменьшения длительности импульса критическая плотность тока в структуре, начиная с которой формируется шнур, возрастает.

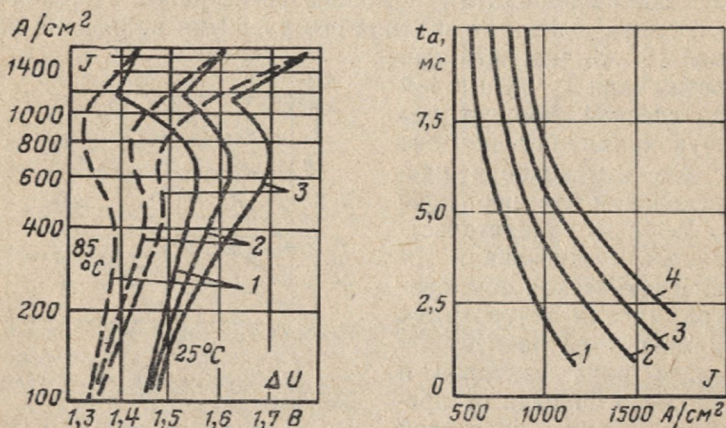


Рис. 19. Влияние предварительного нагрева тиристора на критическую плотность тока.

—  $\theta_{нач} = 250^\circ\text{C}$ ; — — —  $\theta_{нач} = 85^\circ\text{C}$ ; 1 —  $R_K = 0$ ; 2 —  $R_K = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>; 3 —  $R_K = 0,2 \cdot 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>; 4 —  $R_K = 0,3 \cdot 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>.

Рис. 20. Длительность достижения критических условий, приводящих к стягиванию тока в шнур.

1 —  $R_K = 0$ ; 2 —  $R_K = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>; 3 —  $R_K = 0,2 \cdot 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>; 4 —  $R_K = 0,3 \cdot 10^{-3}$  Ом · см<sup>2</sup>.

Влияние предварительного нагрева на условия формирования шнура тока в структуре к моменту появления импульса перегрузки можно оценить, проанализировав изменение с температурой импульсных вольт-амперных характеристик (рис. 19). Из рисунка видно, что предварительный нагрев структуры облегчает стягивание тока в шнур. Если локальная зона структуры, в которой

в силу совокупности физических факторов, формирование шнура наиболее вероятно, имеет повышенное локальное тепловое сопротивление, условия для шнурования облегчаются. Например, увеличение локального теплового сопротивления в 2 раза приводит при  $R_K=0,2 \times 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  к уменьшению  $J_a$  с 1050 до 600  $\text{А/см}^2$  [Л. 26].

Общее время формирования шнура прямого тока  $t_{ш}$  как следствие различных неоднородностей структуры с момента возникновения импульса тока перегрузки до выхода тиристора из строя в результате локального расплавления структуры можно условно разделить на три этапа:

$$t_{ш} = t_1 + t_2 + t_3, \quad (12)$$

где  $t_1$  — время с момента возникновения импульса тока перегрузки до момента достижения критических условий в одной из локальных зон структуры;  $t_2$  — время стягивания тока в шнур до конечного значения в этой зоне плотности тока;  $t_3$  — время с момента достижения конечной плотности тока в локальной зоне до начала расплавления кремниевой пластины (локального).

Из рис. 20 видно, что в диапазоне длительностей импульсов от 1 до 10 мс при локальной плотности тока в структуре менее 500  $\text{А/см}^2$  критические условия, приводящие к стягиванию тока в шнур, не могут быть достигнуты при всех  $R_K$ . Таким образом, увеличение  $R_K$  приводит к увеличению допустимой плотности тока и длительности импульса перегрузки [Л. 26].

**3. Шнурование обратного тока.** Этот эффект может проявляться, когда к тиристорам после прохождения импульса тока перегрузки прикладывается обратное напряжение. Шнур возникает в наиболее нагретой (в данном случае прямым током) части структуры в момент, когда проводимость, обусловленная концентрацией термически генерированных носителей в локальной зоне, достигает значения проводимости, обусловленной примесной (неравновесной) концентрацией носителей в  $n$ -базе. В этот момент выполняется в первом приближении условие, при котором температурный коэффициент сопротивления  $n$ -базы становится отрицательным и в локально нагретую зону, сопротивление которой начинает падать с ростом температуры, стягивается обратный ток со всей структуры, приводя к локальному расплавлению пластины,



Таким образом,  $\Theta_2$  является максимальной температурой структуры, при которой к тиристорам можно приложить обратное напряжение. Она зависит от целого ряда факторов. Существенными факторами являются интенсивность охлаждения, удельное сопротивление исходного кремния, способ защиты *p-n*-перехода, обратное напряжение и т. д.

4. Повреждение прибора под действием повторно приложенного прямого напряжения. Если температура структуры после прохождения импульса тока перегрузки к моменту приложения прямого напряжения будет превышать максимальную рабочую температуру, то возможна потеря структурой запирающих свойств в прямом направлении или стойкости к скорости нарастания прямого напряжения. Кривые температурной зависимости напряжения переключения, по которым можно оценить  $\Theta_3$ , имеются для каждого типа тиристоров. Однако определение температурной зависимости напряжения переключения производится при равномерном нагревании прибора в термостате, а при перегрузке импульсом тока происходит неоднородный нагрев тиристора, поэтому возможно некоторое занижение  $\Theta_3$  при таком способе ее оценки.

5. Расплавление припоев. В приборах, которые работают в схемах с небольшим рабочим напряжением, ток перегрузки может оказаться достаточным для частичного расплавления припоя в спаях кремний—вольфрам. Поскольку это явление является нежелательным, то при определении предельной температуры необходимо учитывать и такую возможность.

Таким образом, для оценки допустимого значения и длительности импульса тока перегрузки необходимо знать значения предельных температур  $[\Theta_1]$ ,  $[\Theta_2]$ ,  $[\Theta_3]$  и их зависимость от выделяемой мощности. Для определения допустимой амплитуды однократного импульса ударного тока длительностью 10 мс, обеспечивающей работоспособность тиристора в различных режимах, в [Л. 25] рекомендуется следующее соотношение:

$$[I_m] = -\frac{U_0}{2R_d} + \sqrt{\frac{U_0^2}{2R_d} + \frac{\Delta\Theta_{1,2,3}}{(\Delta\Theta/P_m)_{1,2,3}R_d}}, \quad (13)$$

где  $\Delta\Theta$  — допустимое превышение температуры над исходной температурой структуры с момента короткого

закрыва́ния по данному критическому фактору;  $\Delta\Theta/P_m$  — приведенное тепловое сопротивление тиристора.

В качестве критерия импульсной перегрузочной способности СПП обычно принимают параметр  $I^2t$ , который характеризует энергию, рассеиваемую в приборе при перегрузке. Однако этот параметр не является постоянным, а зависит от длительности импульса  $t$  (рис. 21). Изменение параметра  $I^2t$  от  $t$  определяется в основном ха-

рактером изменения во времени переходного теплового сопротивления СПП [Л. 27]. Так, для диодов ВК2-200 и тиристоров Т160 при увеличении длительности протекания тока с 1 до 10 мс  $I^2t$  увеличивается примерно в 2 раза.

В [Л. 28] приведены результаты испытаний большой партии приборов ВК2-200 и Т160 на токовую перегрузку при длительности полусинусоидальных импульсов 1 и 10 мс. На каждый прибор, нагретый внешним

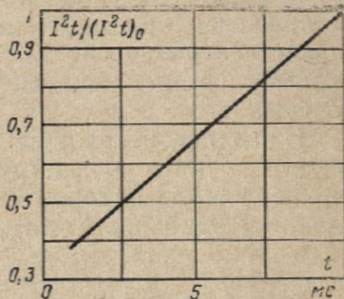


Рис. 21. Характер зависимости параметра  $I^2t$  от длительности импульса перегрузки.

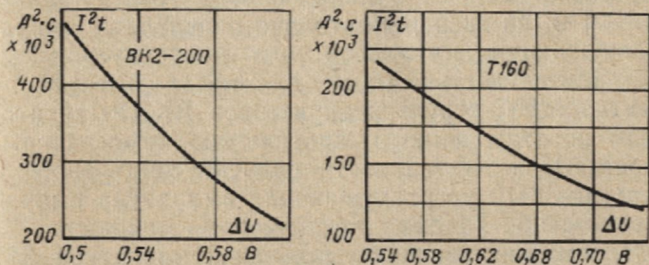


Рис. 22. Зависимость разрушающей величины  $I^2t$  для диодов и тиристоров от среднего значения падения напряжения при длительности тока 10 мс.

источником тепла до максимальной рабочей температуры, подавались возрастающие серии импульсов тока до повреждения прибора. В каждой серии было по пять импульсов тока с интервалами между ними 2 мин. В непроводящую часть периода к испытываемому прибору прикладывалось обратное напряжение. Зависимости раз-

рушающего значения  $I^2t$  от среднего значения падения напряжения при длительности импульса тока 10 мс представлены на рис. 22. Из рис. 22 видно, что с увеличением среднего падения напряжения значение  $I^2t$  уменьшается.

Из-за неконтролируемых отклонений в технологии изготовления и в конструктивных размерах элементов прибора тепловое сопротивление и прямое падение напряжения у приборов одного и того же типа имеют значительный разброс. Следовательно, будет различаться или температура структуры этих приборов при одном и том же токе перегрузки, или предельный ток перегрузки для одной и той же температуры структуры.

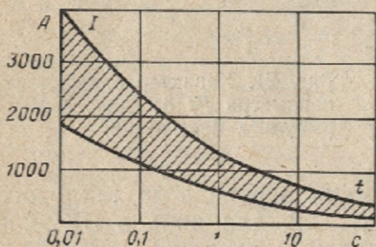


Рис. 23. Семейство перегрузочных характеристик вентилях ВК2-200.

На рис. 23 представлена область, в которой размещаются перегрузочные характеристики 180 вентилях типа ВК2-200 [Л. 29]. Из рисунка видно, что при  $t=0,01$  с токи перегрузки, нагревающие переход до температуры  $140^{\circ}\text{C}$ , располагаются в диапазоне от 1800 до 4000 А. В [Л. 29] были экспериментально определены амплитуды разрушающих импульсов тока полусинусоидальной формы длительностью 10 мс для предварительно прогретых до  $125^{\circ}\text{C}$  структур тиристоров ВКДУ-150 и рассчитаны по этим данным критические температуры и мощность. При длительности полусинусоидального импульса тока в 10 мс разрушающая амплитуда импульса составляет 4,5—7,5 кА, критическая мощность 22—40 кВт, критическая максимальная температура  $345\text{—}525^{\circ}\text{C}$ .

В справочных материалах на СПП обычно приводят данные по предельно допустимым амплитудам тока перегрузки для заданной длительности импульсов. Методика определения предельного значения ударного тока заключается в оценке максимального тока, который способен выдерживать прибор без ухудшения его параметров. Обычно испытания проводятся на партии приборов в режиме однократных полусинусоидальных импульсов прямого тока значительной скважности, длительностью

10 мс при температуре структуры  $20^{\circ}\text{C}$  (или предельной рабочей) без приложения обратного напряжения. Амплитуда импульсов изменяется небольшими ступенями либо до момента полного разрушения прибора, либо до начала резкого изменения его характеристик. В каждом диапазоне амплитуд прибор подвергают воздействию одного или нескольких одиночных импульсов. На основании полученных данных строят кривую распределения отказов, по которой с определенным коэффициентом запаса принимают значение предельного ударного тока для данного типа приборов.

Для проверки приборов на перегрузочную способность по току заводы-изготовители проводят соответствующий контроль. Общепринятая методика экспериментальной проверки перегрузочной способности заключается в подаче на предварительно нагретый до рабочей температуры прибор однократного синусоидального импульса тока длительностью у основания  $10 \pm 1$  мс. Прибор считается выдержавшим испытания, если он через 2 ч после прохождения токового импульса выдерживает приложенное напряжение, равное  $1,3U_{кл}$ .

При многократных импульсных перегрузках токами, меньшими предельных, механизм отказа и соответственно количественные значения показателей перегрузочной способности СПП будут несколько отличаться от ранее рассмотренных. Дело в том, что при теоретической или экспериментальной оценке максимальной температуры структуры СПП при токовых перегрузках предполагается равномерный нагрев всей структуры. Однако эта температура является не максимальной, а некоторой эффективной температурой, которая совпадает с максимальной только при действительно равномерном нагреве всей площади структуры. В то же время большинство эксплуатационных характеристик прибора определяется максимально перегретой зоной структуры. Неравномерность распределения тока по площади приводит к перегреву отдельных участков и нарастанию местных деформаций. При многократных воздействиях импульсов тока в этих местах начинают проявляться усталостные механизмы разрушения: появление микротрещин, постепенная эрозия кремния, взаимная диффузия контактирующих материалов и т. д. Со временем это может привести к полному разрушению прибора или значительному ухудшению его характеристик.

Например, в [Л. 28] указывается, что допустимые значения  $I^2t$  вентиляй и тиристоров в значительной степени зависят от количества перегрузок за срок службы. В табл. 2 приведены допустимые амплитуды импульсов тока и допустимые значения  $I^2t$  для двух режимов эксплуатации вентиляй и тиристоров в полупроводниковых преобразователях: частые короткие замыкания (но не более 500 за срок службы) и редкие, эпизодические короткие замыкания.

Таблица 2

Длительность импульсов тока, мс	Параметр	ВК2-200		Т160	
		Частые	Редкие	Частые	Редкие
1	$I_m, A$	12 000	15 000	7000	10 000
	$I^2t, A^2 \cdot c$	72 000	112 500	24 500	50 000
10	$I_m, A$	4000	6000	2500	3500
	$I^2t, A^2 \cdot c$	80 000	180 000	31 200	61 200

Все это говорит о том, что для устройств, в которых СПП подвергаются воздействию многократных токовых перегрузок, пользоваться типичными перегрузочными характеристиками надо с большой осторожностью. Более достоверные данные можно получить только на основании специальных испытаний СПП.

## 5. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СПП ПРИ ТЕПЛОМ ЦИКЛИРОВАНИИ

При сборке выпрямляющего элемента отечественных вентиляй применяются олово и припой типа ПСР-72, которые имеют достаточно высокий предел текучести. Соединение же выпрямляющего элемента с медным основанием осуществляется мягкими припоями типа ПОС-61 с низким пределом текучести. Это соединение и является наиболее слабым местом, которое определяет циклоустойкость серийных вентиляй с паяными соединениями.

Припой состоит из множества кристаллов, и поэтому их можно отнести к поликристаллическим материалам. Появление поликристаллической структуры объясняется характером затвердевания металла из расплава. При охлаждении расплава в нем одновременно образуется и растет множество ядер кристаллизации. Ядра по мере

своего роста расходуют жидкость до тех пор, пока стенки расширяющихся кристаллов не придут в контакт друг с другом по так называемым границам зерен. Так как ядра в момент роста имеют различную пространственную ориентацию, то поверхности контакта также расположены неопределенно. От характера кристаллизации сплава при данной конструкции паяного соединения зависят количество и распределение пустот в шве, значительно снижающих теплопроводность контакта.

Прочность припоя в основном определяется его составом. Характер изменения прочности  $\sigma_{пр}$  при изменении состава припоя показан на рис. 24 [Л. 32]. Прочность чистых олова и свинца много ниже прочности припоев, причем по мере приближения к чистым металлам она быстро падает. При рассмотрении физических свойств оловянно-свинцовых припоев следует иметь

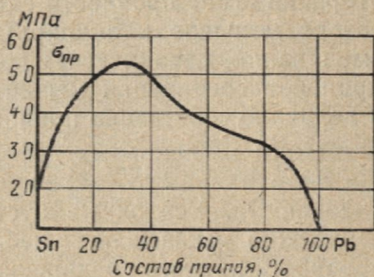


Рис. 24. Зависимость прочности припоя от его состава (содержание по массе).

в виду, что свойства собственно припоев могут отличаться от свойств припоев в соединении. На прочность шва существенное влияние оказывают температурный режим пайки, толщина слоя припоя, равномерность состава припоя, его жидкотекучесть и смачиваемость, состояние поверхностей паемых деталей и т. д.

Исследованиями установлено, что при пайке меди и никеля припоями на основе олова (ПОС-61, ПОС-40) для полного протекания растворно-диффузионных процессов температура пайки за несколько минут (2—3 мин) должна достигнуть 220—230°C. Именно в этих интервалах температур благоприятно сочетаются скорости протекания таких процессов, как растворение, диффузия, раскисляющее действие флюса и растекание припоя.

Пайка при более низких температурах приводит к получению адгезионного контакта, уменьшению эффективной площади спаев, неравномерному распределению напряжений в паяном шве. Длительное проведение процесса пайки вызывает появление интерметаллических

прослойки, которые резко снижают прочность паяного соединения. Например, в [Л. 34, 35] с помощью рентгеноструктурного анализа было установлено, что медь, попадающая в припой в процессе пайки, образует хрупкое соединение, которое существенно снижает прочность шва.

Известно, что прочность паяного соединения зависит от расстояния между паяными поверхностями. Оптимальным можно считать зазор в 0,075—0,1 мм, при котором прочность соединения получается наибольшей (гораздо выше прочности самого припоя). При большом зазоре меньшие капиллярные силы ухудшают условия смачивания, механическая прочность более толстого слоя припоя в соединении меньше и обычно приближается к величине собственно припоя.

Одним из основных дефектов, чаще всего встречающихся в паяном соединении, является отсутствие его сплошности. Усадочные пустоты и газовые пористости неизбежно оказывают неблагоприятное влияние на прочность паяного соединения, так как нарушают непрерывность слоя припоя. В зависимости от условий пайки площадь пустот в паяном соединении может изменяться в пределах от 5 до 60% по всей площади спаиваемых элементов, что, безусловно, оказывает влияние на его прочность. Особенно резко снижают усталостную прочность паяного соединения пустоты, расположенные у его края. Следует отметить, что расположение пустот влияет на искажение линий тока и приводит к местным перегревам. Не исключена возможность, что области местного перегрева являются центрами рекристаллизации припоя.

В процессе работы припой, хорошо сцепившийся с поверхностями соединяемых элементов, расширяется и сжимается вместе с ними. При этом полностью изменяются размеры лишь в осевом направлении. Радиальные же смещения припоя определяются разницей в коэффициентах линейного расширения соединяемых элементов. При нагреве вентиль припой, имеющий больший температурный коэффициент линейного расширения, сжимается, так как он жестко связан с контактами, при охлаждении — наоборот. Помимо этого припой испытывает сдвиг, так как контакты и прокладки расширяются неодинаково. Этот периодический нагрев и остывание вентиль приводят к возникновению в его элементах периодически меняющихся механических напряжений и как следствие к «расшатыванию» и разрушению паяных со-

единений и вентиля в целом. Число циклов, которое выдерживает прибор до разрушения, зависит от многих факторов: собственной прочности припоя в шве, режима пайки, толщины паяного соединения, наличия интерметаллических соединений, распределения пустот, режима циклирования и т. д.

Механизм разрушения припоев при знакопеременной нагрузке является сложным процессом и имеет межзеренный и внутризеренный характер. Уже после первых циклов нагружения начинают проявляться границы зерен. Одновременно из-за анизотропии коэффициента линейного расширения, а также из-за существования еще достаточно прочных связей между зернами припоя в них начинается сдвиговая деформация и появляются полосы скольжения. Сдвиги, как правило, зарождаются у границ зерен и распространяются в глубь зерна. Особенно ярко это проявляется там, где затруднена зернограничная деформация.

Одновременно с этими эффектами или несколько позднее начинает наблюдаться миграция границ зерен, которая обусловлена пластической деформацией приграничных областей. Степень миграции существенно зависит от состава сплава, причем скорость миграции велика в первые моменты циклического нагружения, а затем, когда начинается интенсивная сдвиговая деформация, резко падает. Это, вероятно, обусловлено тем, что миграция при усталостных испытаниях является результатом переменного давления дислокаций на границы зерен. После определения границ зерен начинается их взаимное перемещение относительно друг друга. На этой стадии разрушения возможно взаимное заклинивание зерен, что может привести к некоторому увеличению прочности припоя. Когда структура припоя достаточно рыхлется, начинают появляться микротрещины. Трещины распространяются по границам зерен.

Приведенный механизм разрушения хорошо согласуется с экспериментальными данными по изменению в процессе циклирования некоторых электрических и механических свойств припоя. На рис. 25 приведены типичные зависимости удельного сопротивления припоя  $\rho$  от числа термоциклов  $N$ . Для первого участка характерен некоторый спад значения  $\rho$ , что обусловлено наличием в припое неравномерно распределенных по сечению шва напряжений после пайки разнородных деталей. По-



сле нескольких термодвигов эти напряжения снимаются. На втором участке происходит медленное количественное накопление дефектов и появление отдельных микротрещин. И, наконец, на третьем участке происходит интенсивное образование микротрещин, количество и плотность которых достигают такого значения, при котором,

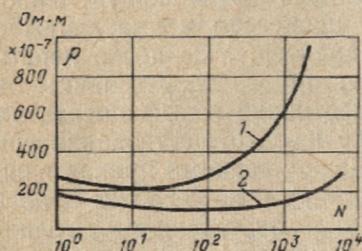


Рис. 25. Зависимость удельного сопротивления припоя от числа термодвигов.

1 — Sn+39% Pb; 2 — Sn+0.4% Ni.

соединяясь, они могут вызвать одну или несколько прогрессирующих магистральных трещин [Л. 34].

Рассмотренный механизм разрушения дает основание предполагать, что крупнозернистые припои должны иметь меньшую усталостную прочность по сравнению с мелкозернистыми. Это подтверждается данными экспериментов [Л. 36]. Вероятной причиной понижения

циклоустойкости с ростом зерна являются более благоприятные условия для распространения трещин — большая поверхность одного зерна.

После припайки выпрямляющего элемента к медному основанию, которая в случае применения припоя ПОС-61 производится при температуре около 190°C, и охлаждения прибора до температуры окружающей среды в припое возникают растягивающие, а в меди и вольфраме — сжимающие усилия. После охлаждения все элементы будут иметь определенную радиальную деформацию. Радиальная деформация в припое достигает наибольшего значения в слое, связанном с вольфрамом, где разность температурных коэффициентов оказывается максимальной:

$$\varepsilon = (\alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{W}}) \Delta\theta, \quad (14)$$

где  $\alpha_{\text{пр}}$ ,  $\alpha_{\text{W}}$  — температурные коэффициенты линейного расширения соответственно припоя и вольфрама;  $\Delta\theta$  — перепад температур.

Так как медь и припой имеют весьма небольшую разницу в коэффициентах линейного расширения ( $\alpha_{\text{Cu}} = 17 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{пр}} = 19 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ), с достаточной точностью уравнение (14) можно заменить выражением

$$\varepsilon = (\alpha_{\text{Cu}} - \alpha_{\text{W}}) \Delta\theta.$$

Припой, хорошо соединившийся с вольфрамом и медью, не может сжиматься и расширяться независимо от них, поэтому при охлаждении ниже определенной температуры припой будет течь. Как только наступит текучесть, напряжение в припое станет постоянным и равным

$$\sigma_{т.пр} = \frac{\varepsilon_{т.пр} E_{пр}}{1 - \mu_{пр}},$$

где  $\sigma_{т.пр}$  — напряжение текучести припоя;  $\varepsilon_{т.пр}$  — относительная деформация, при которой в припое начинается текучесть;  $E_{пр}$  — модуль упругости;  $\mu_{пр}$  — коэффициент Пуассона.

Это постоянное напряжение приложено к вольфраму и медному основанию. Радиальная деформация для вольфрама будет равна:

$$\varepsilon_w = -(\alpha_{пр} - \alpha_w) \Delta\theta + \sigma_{т.пр} (1 - \mu_w) / E_w.$$

Зная предел текучести припоя ПОС-61, равный  $\sigma_{т.пр} \approx 40$  МПа, можно определить, при какой температуре после сборки прибора наступит текучесть. Для ориентировочной оценки температуры начала пластического течения припоя можно трехдисковую систему вольфрам — припой — медь заменить двухдисковой вольфрам — припой и считать, что максимальные напряжения в припое возникают в основном из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения вольфрама и припоя. В зоне контакта радиальные смещения в дисках равны между собой, т. е.

$$\alpha_w \Delta\theta r + \varepsilon_w r = \alpha_{пр} \Delta\theta r + \varepsilon_{пр} r, \quad (15)$$

где  $r$  — радиус.

Радиальные напряжения предполагаются равными друг другу, но противоположными по знаку

$$\sigma_w = -\sigma_{пр}.$$

Так как

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)],$$

то для данной системы

$$\sigma_y = \sigma_x, \quad \sigma_z = 0,$$

поэтому

$$\sigma_x = E \sigma_x / (1 - \mu).$$

В итоге получаем:

$$\varepsilon_w E_w / (1 - \mu_w) = -\varepsilon_{пр} E_{пр} / (1 - \mu_{пр}). \quad (16)$$

После совместного решения (15) и (16) получим:

$$\varepsilon_W = \frac{(\alpha_{\text{пр}} - \alpha_W) \Delta\theta}{1 + E_W (1 - \mu_{\text{пр}}) / E_{\text{пр}} (1 - \mu_W)};$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{(\alpha_{\text{пр}} - \alpha_W) \Delta\theta}{1 + E_{\text{пр}} (1 - \mu_W) / E_W (1 - \mu_{\text{пр}})};$$

$$\sigma_{W.} = -\sigma_{\text{пр}} = \frac{(\alpha_{\text{пр}} - \alpha_W) \Delta\theta}{1 + E_{\text{пр}} (1 - \mu_W) / E_W (1 - \mu_{\text{пр}})}. \quad (17)$$

Подставив  $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{т.пр}}$  из (17), определим искомый перепад температур.

Например:  $\alpha_{\text{пр}} = 19 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_W = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{пр}} = 0,29$ ;  $\mu_W = 0,17$ ;  $E_{\text{пр}} = 3,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ;  $E_W = 3,6 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{\text{т.пр}} = 40 \text{ МН/м}^2$ , тогда

$$\Delta\theta_{\text{т.пр}} = \frac{\sigma_{\text{т.пр}}}{\alpha_{\text{пр}} - \alpha_W} \left( \frac{1 - \mu_W}{E_W} + \frac{1 - \mu_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}}} \right) \approx 62^\circ \text{C}.$$

Следовательно, при температуре  $\Theta = 183 - 62 = 121^\circ$  при охлаждении после сборки припой начинает течь. Текучесть будет наблюдаться до установившейся температуры.

При циклической работе полупроводниковых вентиляей механические напряжения, возникающие при переменных нагрузках, накладываются на термические напряжения, возникающие при сборке прибора.

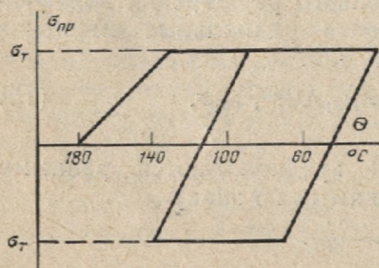


Рис. 26. Характер изменения напряжения в паяном соединении при тепловом циклировании.

Когда вентиль начинает вновь нагреваться под действием токовой нагрузки, растягивающие напряжения в припое сначала уменьшаются до нуля, затем меняют знак и становятся напряжениями сжатия. Если температура повышается до значения, при котором  $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{т.пр}}$ , вновь возникает явление текучести припоя (рис. 26). При охлаждении припоя напряжение меняется от  $-\sigma_{\text{т.пр}}$  до  $+\sigma_{\text{т.пр}}$ , причем процесс вначале носит упругий характер, пока вновь не будет достигнут уровень пластического течения.

Следует заметить, что поскольку в напряженных припоях с течением времени заметно проявляется релаксация напряжения, может оказаться, что после длительного хранения вентиляей напряжение в припое уменьшилось до нуля или имеет весьма небольшое значение. Так как абсолютные значения деформаций, а следовательно, и напряжения зависят от линейных размеров элементов, пластическое течение припоя будет происходить для вентиляей с разными диаметрами шайбы при разных значениях  $\Delta\theta$ . Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что в серийных приборах типов ВК2-200 и Т160 с диаметром выпрямляющей шайбы 25 мм текучесть припоя в процессе теплового циклирования наступает при перепаде температур в паяном соединении около 55—65°C.

С учетом физического процесса разрушения паяное соединение можно представить как статистический ансамбль большого числа первичных элементов, каждый из которых в той или иной мере является ответственным за прочность соединения в целом. Под действием механических напряжений, возникающих в результате температурного циклирования, происходит постепенное разрушение этих элементов. От появления первых пластических деформаций и до момента полного разрушения усталостное повреждение представляет собой случайный процесс. Число и свойства единичных элементов, из которых состоит паяное соединение, в общей совокупности можно охарактеризовать лишь при помощи некоторого распределения вероятностей. Развитие сдвигов и трещин при каждом последующем цикле также подчиняется некоторому распределению вероятностей и зависит от распределения вероятностей, достигнутого в результате предыдущих циклов. В силу этого процесс усталостных повреждений можно трактовать как случайный процесс марковского типа с непрерывным множеством состояний и дискретным временем. Вероятностные характеристики такого процесса к концу  $(k+1)$ -го цикла выражаются через характеристики  $k$ -го цикла и некоторые переходные вероятности, зависящие от механизма процесса и нагрузки  $(k+1)$ -го цикла.

Простейшей моделью процесса накопления усталостных повреждений может служить стержневая система, находящаяся под действием повторных нагрузок (рис. 27). Механические свойства ее первичных элементов

(модули упругости, предел текучести, сопротивление отрыву и т. д.) предполагаются случайными величинами. Разрыв единичных элементов соответствует появлению микроскопических трещин при усталостном разрушении. Кроме случайного характера самого процесса разрушения между аналогичными элементами полупроводниковых вентилях имеется случайная разница в размерах и свойствах. Имеется определенная разница и в условиях нагружения. Все это приводит к случайным колебаниям количества температурных циклов, которые выдерживают вентили до разрушения.

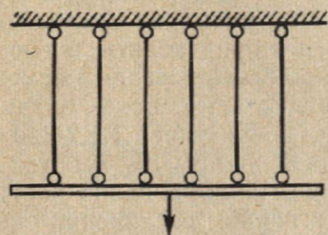


Рис. 27. Стержневая модель паяного соединения.

Процесс усталостного разрушения математически можно описать следующим образом. По мере накопления числа циклов идет постепенное накопление усталостных повреждений. Когда их число оказывается достаточно большим, равным, некоторому числу  $N$ , наступает разрушение. Обозначим через  $N_k$  число циклов, необходимых для накопления  $k$  единичных усталостных повреждений. Поскольку последние возникают в случайные моменты времени,  $N_k$  является случайной величиной. Переходы в системе предполагаются возможными только из предыдущего состояния в последующее, т. е. по схеме:

$$N_0 \rightarrow N_1 \rightarrow \dots \rightarrow N_k \rightarrow \dots \rightarrow N_n.$$

Для перехода из состояния  $N_{k-1}$  в состояние  $N_k$  необходимо некоторое дополнительное число циклов  $\Delta N_k$ , т. е.

$$N_k = N_{k-1} + \Delta N_k,$$

$\Delta N_k$  можно представить как

$$\Delta N_k = \gamma_k h(N_{k-1}),$$

где  $\gamma_k$  — некоторая случайная величина, которая характеризует интенсивность накопления повреждений (называемая вероятностью перехода);  $h(N_{k-1})$  — заданная функция величины  $N_{k-1}$ .

Если принять:

$$h(N_{k-1}) = N_{k-1}/\lambda,$$

где  $\lambda = \text{const}$ , то

$$\gamma_i = \lambda \Delta N_i / N_i.$$

Из общей теории надежности известно, что уравнение

$$P'(t) = -\lambda P(t) \quad (18)$$

соответствует случаю, когда вероятность возникновения повреждения за время от  $t$  до  $t + \Delta t$  может быть представлена в виде

$$\gamma(\Delta t) = \lambda \Delta t.$$

Через  $P(t)$  обозначена вероятность отсутствия повреждения за время  $0-t$ .

По аналогии с (18) можно записать:

$$\partial P(N) / \partial N = -\lambda P(N) / N,$$

что приводит к решению

$$P(N) = \exp\left(-\int_0^N \lambda dN/N\right) = \exp(-\lambda \lg N),$$

или плотность вероятности

$$f(N) = \lambda \exp(-\lambda \lg N) / N.$$

Тогда элемент вероятности

$$f(N) dN = \lambda \exp(-\lambda \lg N) dN / N.$$

Переходя к логарифмическим координатам времени, получаем:

$$f(N) dN = \lambda \exp(-\lambda \lg N) d \lg N,$$

что означает показательное распределение логарифма количества циклов. Вероятность отсутствия повреждений на участке от  $N_1$  до  $N_2$  может быть вычислена по формуле

$$P(N_1, N_2) = \exp[-\lambda (\lg N_2 - \lg N_1)] = \exp[-\lambda \lg (N_2/N_1)],$$

что приводит к дифференциальной функции условного распределения (при условии, что в момент  $N_1$  не было разрушения)

$$f_{N_1}(N_2) = \lambda (N_1/N_2) \exp[-\lambda \lg (N_2/N_1)].$$

Введем переменную  $u = N_2/N_1$ , тогда

$$f_{N_1}(u) = \lambda \exp(-\lambda \lg u) / u$$

и, следовательно, имеем:

$$f_{N_1}(u) du = \lambda \exp(-\lambda \lg u) (1/u) du = \lambda \exp(-\lambda \lg u) d \lg u.$$

Таким образом, случайная величина

$$\lg u = \lg (N_2/N_1) = \lg N_2 - \lg N_1$$

имеет показательное распределение.

Переходя к логарифмической шкале времени  $\lg N$ , имеем возможность представить общее время жизни как

$$Z = \lg N = \lg N_1 + (\lg N_2 - \lg N_1) + \\ + (\lg N_3 - \lg N_2) + \dots + (\lg N_n - \lg N_{n-1}),$$

где случайная величина

$$\lg N_i - \lg N_{i-1} = \lg (N_i / N_{i-1}) = \lg u_i$$

имеет показательное распределение и величины  $\lg u_i$  независимы. В этом случае можно применить теорему Ляпунова, из которой следует, что сумма этих случайных величин имеет распределение, близкое к нормальному

$$f(\lg N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} e^{-\frac{(\lg N - a)^2}{2S^2}}, \quad (19)$$

где

$$a = M(\lg N); \quad S = \sqrt{D(\lg N)}.$$

Поскольку

$$f(N) = f(\lg N) |dZ/dN|,$$

то плотность вероятности  $N$  можно представить как

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} e^{-\frac{(\lg N - a)^2}{2S^2}} \frac{1}{N}. \quad (20)$$

Распределение с такой плотностью является логарифмически нормальным. Экспериментальные данные, приведенные в гл. 3, хорошо подтверждают этот вывод.

Одним из основных вопросов надежности СПП является вопрос о связи циклоустойкости приборов с режимом циклирования. Из литературы известно, что при заданном режиме циклирования число циклов до повреждения является функцией от перепада температуры при постоянном диаметре выпрямляющей шайбы [Л. 39—41]

$$N(\Delta\theta) = A\Delta\theta^{-k}, \quad (21)$$

где  $A$  и  $k$  — постоянные.

Логарифмируя обе части этого уравнения, получаем линейную зависимость

$$\lg N = \lg A - k \lg \Delta\theta.$$

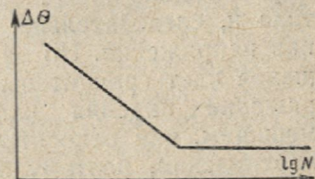
Это позволяет просто определить неизвестные постоянные  $A$  и  $k$  по двум-трем экспериментам при различ-

ных  $\Delta\theta$ . Очевидно, что

$$\lg A = \lg N \text{ при } \Delta\theta = 1; \\ k = (\lg N + \lg A) / \lg \Delta\theta = \text{ctg } \alpha.$$

Зависимость (21) справедлива только в определенном диапазоне значений  $\Delta\theta$ . Ниже некоторого уровня  $\Delta\theta$  явление усталости не наблюдается (рис. 28).

Так как процесс разрушения припоев при циклическом нагружении носит случайный характер, то можно говорить лишь о вероятностном соотношении  $N$  и  $\Delta\theta$ . Как правило, кривая усталости для СПП  $N = N(\Delta\theta)$  строится по средним значениям распределений циклоустойкости при разных значениях  $\Delta\theta$ . Это является удобным при сравнении циклоустойкости различных партий приборов, но не всегда приемлемо при расчете надежности преобразовательных схем.



С вероятностной точки зрения наиболее общая формулировка свойств кривой усталости состоит в задании совместной функции распределения  $F(\Delta\theta, N)$ , равной вероятности усталостного разрушения при числе циклов, меньшем, чем  $N$ , и перепаде температур, меньшем, чем  $\Delta\theta$ . На плоскости  $\Delta\theta, N$  эта вероятностная зависимость может быть представлена в виде семейства кривых  $F(\Delta\theta, N) = \text{const}$ , каждая из которых соответствует некоторой фиксированной вероятности разрушения. Функции  $F(\Delta\theta, N)$  соответствуют плотности условной вероятности  $f(\Delta\theta/N)$  и  $f(N/\Delta\theta)$ . В логарифмических координатах кривые  $F(\Delta\theta, N)$  заменяются соответствующими ломаными линиями. Наиболее удобной на практике и общепринятой является зависимость типа  $f(N/\Delta\theta)$ .

Анализ физических процессов, происходящих в приборе при токовом циклировании, показывает, что основной причиной отказа является разрушение паяных соединений. Главными следствиями этого явления могут быть: увеличение теплового сопротивления, повышение температуры структуры при неизменном токе, увеличение падения напряжения, возрастание тока утечки, снижение напряжения класса. Возрастание тока утечки и

Рис. 28. Характер кривой циклической усталости.

снижение напряжения класса являются следствием повышения температуры структуры и характеризуют в основном явления в кремнии и на поверхности выпрямляющей шайбы, поэтому за основные критерии циклической устойчивости могут быть приняты первые три параметра:  $R_{в}$ ,  $\Theta_{р-н}$ ,  $\Delta V$ . Измерение температуры структуры каждого вентиля в процессе испытаний и тем более в процессе работы какого-либо агрегата в настоящее время представляет еще значительные трудности и поэтому возможно только при лабораторных экспериментах. При достаточно больших питающих напряжениях изменение рабочей площади контактов приводит к увеличению плотности протекающего через вентиль тока и, следовательно, к некоторому увеличению падения напряжения. Но на начальных этапах, когда разрушение идет сравнительно медленно, относительное приращение падения напряжения оказывается намного меньшим, чем относительное приращение теплового сопротивления, поэтому за меру разрушения разумнее принять прежде всего тепловое сопротивление вентиля  $R_{в}$ , для измерения которого разработаны специальные установки.

Рассматривая процесс разрушения при циклировании, можно полагать, что каждый цикл нагружения приводит к определенному приращению  $R_{в}$ . Когда будет достигнуто число циклов нагружения, при котором происходит образование множества зон разрушения и ускоренное окончательное разрушение, то значение  $R_{в}$  достигнет своего предельного значения  $R_{в.л}$ . При достижении этого значения структура вентиля будет перегреваться выше допустимого предела и он может выйти из строя. Следует, однако, иметь в виду, что у приборов с различными падениями напряжения  $\Delta U$  предельная температура будет достигнута при разных  $R_{в.л}$ .

### Глава третья

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

### 6. ПОДГОТОВКА ИСПЫТАНИЙ

При решении задач надежности приходится иметь дело с определенным объемом статистической информации. Например, распределения параметров СПП позво-

ляют судить о совершенстве технологического процесса и отклонениях от нормы, дают возможность рассчитать режимы работы приборов, прогнозировать срок службы и т. д. В результате ресурсных испытаний на надежность также получается некий статистический материал, по которому с той или иной степенью достоверности делается оценка количественных характеристик надежности.

Испытания на надежность делятся на две группы. Первая группа — предварительные испытания, когда о законах распределения тех или иных показателей ничего не известно; вторая группа — априорно известен вид распределения и требуется по результатам испытаний определить количественные характеристики этого распределения. В том и другом случае требуется отобрать для испытаний некоторое количество приборов. Существуют определенные правила формирования выборок и обработки результатов, при соблюдении которых можно установить вид кривой распределения и определить количественные характеристики. Рассмотрим эти правила.

*Правила отбора выборки для построения распределений.* При выборочных испытаниях очень существенно, чтобы отобранная из генеральной совокупности выборка удовлетворяла следующим требованиям: она должна быть случайной, представительной (репрезентативной) и принадлежать к однородной, в статическом смысле, совокупности. Требование однородности означает, что любые две достаточно большие и одинаковые выборки из одной и той же контролируемой совокупности должны описываться одной и той же функцией распределения. Представительность выбора обеспечивает уверенность, что взятая совокупность элементов имеет те же особенности, что и генеральная совокупность. Требование случайности означает, что для любого элемента генеральной совокупности вероятность оказаться включенным в выборку одна и та же. Для обеспечения случайного отбора изделий из совокупности на практике существует много возможностей. Обычно используются два метода:

- 1) вся партия тщательно перемешивается и затем «вслепую» отбираются изделия;
- 2) все изделия партии последовательно нумеруют и, пользуясь какой-нибудь из таблиц случайных чисел, выбирают изделия с номерами, определяемыми этой табли-

цей. Нарушение требований однородности, репрезентативности и случайности приводит к неверным результатам и выводам после статистической обработки информации, поэтому при отборе приборов для испытаний следует постоянно следить за выполнением этих требований.

Кроме выбора методики отбора изделий из генеральной совокупности, следует решить вопрос о необходимом для исследования числе приборов. Обычно требуется составить представление о доле значения данного изучаемого свойства в общей совокупности на основании доли этого значения в частичной совокупности. Требуется установить достаточный объем этой частичной совокупности, чтобы с той или иной «степенью уверенности» можно было считать, что отклонение неизвестной доли от наиболее вероятной не превышает некоторой допустимой ошибки. Задача сводится к тому, чтобы установить, с какой вероятностью можно утверждать, что ошибка, допущенная при оценке параметра, не превосходит некоторого наперед заданного значения. Например, требуется найти вероятность того, что неизвестное значение  $T_{cp}$  будет заключено в пределах

$$T^* - \varepsilon \leq T_{cp} < T^* + \varepsilon,$$

где  $T^*$  — параметр, определенный из испытаний.

Обозначим эту вероятность через  $\gamma$ , тогда

$$\gamma = P\{T^* - \varepsilon \leq T_{cp} < T^* + \varepsilon\},$$

или

$$\gamma = P\{|T^* - T_{cp}| \leq \varepsilon\}. \quad (22)$$

Вероятность  $\gamma$  принято называть доверительной вероятностью;  $\gamma$  есть вероятность того, что случайный интервал  $J_\gamma [(T^* - \varepsilon), (T^* + \varepsilon)]$  включает точку  $T_{cp}$ . Интервал  $J_\gamma$ , который с вероятностью  $\gamma$  включает в себя эту точку, называется доверительным интервалом, а границы интервала называются доверительными пределами. Доверительный интервал характеризует точность полученного результата, а доверительная вероятность — его достоверность. Эти понятия широко используются при проведении испытаний на надежность и обработке статистического материала. Можно, например, задавшись значениями  $\gamma$  и  $\varepsilon$ , определить число отказов  $n$ , которое необходимо получить при испытаниях, чтобы оценить  $T_{cp}$  с заданной точностью  $\pm \varepsilon$  и достоверностью  $\gamma$ , или,



имея экспериментальные данные по времени  $T$  до отказа приборов, можно вычислить по ним  $T^*$  и далее по таблицам определить  $\gamma$  при заданном значении  $\varepsilon$ .

При определении объема выборки следует различать две задачи: определение числа приборов для построения распределений параметров и определение объема испытаний в приборо-часах при испытаниях на надежность и ресурс.

Рассмотрим первую задачу. При неизвестной функции распределения какого-либо параметра объем выборки можно определить на основании закона больших чисел.

Для практического применения составлены специальные таблицы достаточно больших чисел [Л. 40]. Ниже приводится одна из таких таблиц (табл. 3).

Таблица 3

Таблица достаточно больших чисел

$P$	$\varepsilon$					
	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
0,80	41	50	64	83	114	164
0,85	51	63	80	105	143	207
0,90	67	83	105	138	187	270
0,91	71	88	112	146	199	287
0,92	76	94	119	156	212	306
0,93	82	101	128	167	227	328
0,94	88	109	138	180	245	353
0,95	96	118	150	195	266	384
0,96	105	130	164	215	292	421
0,965	111	137	173	226	308	444
0,970	117	145	183	240	327	470
0,975	125	155	193	256	348	502
0,980	135	167	211	276	375	541
0,985	147	182	231	301	410	591
0,990	165	204	259	338	460	663

Степень уверенности  $P$  определяется вероятностью, с которой делается соответствующее заключение. В практике исследований обычно принимается  $P=0,95$  или  $P=0,99$ . Допустимая ошибка  $\varepsilon$  при исследованиях устанавливается в зависимости от природы изучаемого явления. В большинстве случаев ошибка принимается равной 0,05. Пусть  $P=0,95$ ,  $\varepsilon=0,05$ , тогда из табл. 3  $n=384$ . В случае, когда известен вид кривой распределения, правила отбора приборов для испытаний остаются

ся теми же, но число этих приборов значительно уменьшается и существенно зависит от вида распределения. Необходимый объем выборки обычно определяют с учетом доверительных интервалов генеральных характеристик [Л. 44].

Приведем формулы для приближенного определения объема испытаний для наиболее часто встречающихся на практике распределений.

*Нормальное распределение.* Доверительные границы для генеральной средней в этом случае определяются по формуле

$$\varepsilon \approx Z_p \sigma / \sqrt{n}, \quad (23)$$

откуда

$$n \approx Z_p^2 \sigma^2 / \varepsilon^2.$$

Здесь  $\varepsilon$  — допустимая ошибка в определении генеральной средней;  $\sigma^2$  — дисперсия выборки;  $Z_p$  —  $P$ -квантиль нормального распределения, который определяется по табл. 4.

Таблица 4

Квантили нормального распределения

$P$	$Z_p$	$P$	$Z_p$	$P$	$Z_p$	$P$	$Z_p$
0,5	0,674	0,86	1,476	0,91	1,695	0,96	2,054
0,6	0,842	0,87	1,514	0,92	1,751	0,97	2,170
0,7	1,036	0,88	1,555	0,93	1,812	0,98	2,326
0,8	1,282	0,89	1,598	0,94	1,881	0,99	2,576
0,85	1,440	0,90	1,645	0,95	1,960	0,995	2,807

На практике значение  $\sigma^2$  не всегда бывает известно. В этом случае сначала, исходя из имеющейся информации об измеряемой величине и измерительных средствах, задаемся ориентировочным значением  $\sigma$  и по (23) находим  $n$ . Далее проводим  $n$  испытаний и определяем ошибку по формуле

$$\varepsilon = t_\alpha S / \sqrt{n},$$

в которой  $S$  — выборочное среднеквадратичное отклонение и  $t_\alpha$  — квантиль распределения Стьюдента с  $k = n - 1$  степенями свободы. Значения  $t_\alpha$  в зависимости от  $\alpha$  и  $k$  приведены в табл. 5. Если вычисленная ошибка  $\varepsilon$  пре-

восходит заданную, то уточняют значение  $\sigma$  по результатам испытаний и находят новое  $n'$  по (23). Производят дополнительно  $n'$  испытаний и находят новое значение  $\varepsilon$  и т. д. Таким образом, можно всегда добиться определения генеральных характеристик выборки с желаемой точностью.

Таблица 5

Значения  $t_\alpha$ , удовлетворяющие условию  $\alpha = P\{|t| \leq t_\alpha\}$  для случая, когда  $t$  распределяется по закону Стьюдента с  $k$  степенями свободы

$k$	$\alpha$					
	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
1	1,336	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	1,250	1,638	2,353	3,189	4,541	5,844
4	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
8	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
10	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
14	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
18	1,067	1,330	1,734	2,103	2,552	2,878
22	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
26	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
30	1,55	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617

*Гамма-распределение.* В случае гамма-распределения плотность вероятности имеет вид:

$$\varphi(z) = \frac{z^{m-1}}{C^m (m-1)!} e^{-z/C}. \quad (24)$$

Рассмотрим случай испытаний, на которых определяется неизвестный параметр  $c$ , а параметр  $m$  известен. Пусть  $\delta$  — заданная относительная ошибка в определении  $c$ , тогда коэффициент для определения доверительных границ равен:

$$r_1 = 1 + \delta, \quad (25)$$

$r_1$  определяется по табл. 6.

Методика пользования табл. 6 такова. По (25) вычисляем  $r_1$ , в табл. 6 в столбце с соответствующим  $\alpha$

Находим наиболее близкое значение  $r_1$  и соответствующее значение  $m'$ . Далее по формуле

$$n = m' / m \quad (26)$$

находим необходимый объем испытаний.

**Экспоненциальное распределение.** Плотность вероятности в случае экспоненциального распределения имеет вид:

$$\varphi(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (27)$$

Это распределение является частным случаем гамма-распределения при  $m=1$  и  $c=1/\lambda$ . Если  $\delta$  — заданная относительная ошибка в определении  $\lambda$ , то, вычислив  $r_1=1+\delta$ , по табл. 6 определим  $m'$ . Объем выборки определяется как  $n=m'$ .

**Планирование и определение объема испытаний.** Приведенные в предыдущем разделе зависимости позволяют оценивать объем выборки, необходимый для определения характеристик функций распределения изучаемых параметров. Но для того чтобы получить количественные характеристики надежности, мало скомплектовать представительную выборку, необходимо подвергнуть ее достаточно длительным испытаниям в выбранном режиме до отказа всех или части приборов. Длительность испытаний определяется как особенностями самих приборов, так и объемом выборки. Проведение испытаний на надежность может быть организовано многими путями.

В зависимости от правил, в соответствии с которыми будут проводиться испытания, говорят о том или ином плане их проведения. План испытаний определяет, в частности, число приборов для испытаний, длительность испытаний, момент окончания испытаний, порядок замены отказавших приборов, время проведения измерения параметров и т. д.

Для удобства записи можно использовать следующие обозначения: обозначим буквой  $B$  планы, в которых отказавшие приборы не заменяются новыми, буквой  $B$  — в которых каждый отказавший прибор заменяется новым. Предполагаем, что отказы приборов фиксируются в моменты их возникновения. Через  $r$  обозначим планы, в которых испытания ведутся до момента появления  $r$ -го отказа, через  $T$  — планы, при которых испытания ведутся в течение времени  $T$ . Иногда используются смешанные планы, когда испытания ведутся до мо-

Значения коэффициентов  $r_1$  и  $r_2$  для определения доверительных границ в случае распределения Пуассона и гамма-распределения

$m'$	$\alpha$					
	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800

Значения коэффициента  $r_1$ 

1	1000	100	40	19,5	9,50	4,48
2	44,0	13,5	8,26	5,63	3,77	2,42
3	15,7	6,88	4,84	3,66	2,73	1,95
4	9,33	4,85	3,67	2,93	2,29	1,74
5	6,76	3,91	3,08	2,54	2,05	1,62
10	3,38	2,42	2,08	1,83	1,61	1,37
15	2,59	2,01	1,78	1,62	1,46	1,28
20	2,23	1,81	1,64	1,51	1,37	1,24
25	2,02	1,68	1,55	1,44	1,33	1,21
30	1,89	1,60	1,48	1,39	1,29	1,18
40	1,72	1,50	1,40	1,32	1,24	1,16
50	1,61	1,43	1,35	1,28	1,21	1,14
60	1,56	1,38	1,31	1,25	1,19	1,12
80	1,47	1,32	1,26	1,21	1,16	1,10
100	1,40	1,28	1,23	1,19	1,14	1,09
150	1,31	1,22	1,18	1,15	1,12	1,07
200	1,26	1,19	1,16	1,13	1,10	1,06
300	1,21	1,15	1,12	1,10	1,08	1,05
400	1,18	1,13	1,11	1,09	1,07	1,04
500	1,16	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04

Значения коэффициента  $r_2$ 

1	0,11	0,15	0,18	0,21	0,26	0,33
2	0,18	0,24	0,28	0,32	0,38	0,47
3	0,23	0,30	0,34	0,39	0,45	0,55
4	0,27	0,35	0,39	0,44	0,50	0,60
5	0,30	0,38	0,43	0,48	0,54	0,63
10	0,41	0,50	0,54	0,59	0,65	0,73
15	0,48	0,56	0,60	0,65	0,70	0,78
20	0,53	0,60	0,65	0,69	0,74	0,81
25	0,56	0,64	0,68	0,72	0,76	0,83
30	0,59	0,66	0,70	0,74	0,78	0,84
40	0,63	0,70	0,73	0,77	0,81	0,87
50	0,66	0,73	0,76	0,79	0,83	0,88
60	0,69	0,75	0,78	0,81	0,84	0,89
80	0,72	0,78	0,80	0,83	0,86	0,90
100	0,74	0,80	0,82	0,85	0,88	0,91
150	0,78	0,83	0,85	0,87	0,90	0,93
200	0,81	0,85	0,87	0,89	0,91	0,94

мента  $t_r$  появления  $r$ -го отказа, если  $t_r < T$ , или до момента  $T$ , если  $t_r > T$ . Такие планы будем обозначать через  $(r, T)$ .

Запись разных планов ведется следующим образом: указывается число  $N$  испытываемых приборов, наличие или отсутствие замены отказавших приборов и длительность испытания. Обычно при испытаниях каких-либо изделий применяется один из шести планов:

$$NBT; NBr; NB(r, T); NBT; NBr; NB(r, T).$$

Выбор того или иного плана производится исходя из требуемого объема испытаний и испытательного оборудования. Так, при испытаниях СПП в выпрямительном режиме все отказавшие приборы необходимо заменять новыми, в противном случае может нарушиться нормальная работа испытательного стенда. Если работа каждого прибора в стенде независима, то отказавшие приборы не обязательно заменять новыми. Однако большая длительность испытаний, их высокая стоимость и желание получить наибольшее количество данных по отказам приводят к необходимости отдавать предпочтение планам типа  $NBT$  или  $NBr$ .

Объем испытаний на надежность существенно зависит от вида закона распределения, от точности определения характеристик надежности, от доверительной вероятности, с которой принимается то или иное решение, и от плана, по которому испытываются приборы.

В качестве примера рассмотрим определение объема испытаний для случая экспоненциального закона распределения длительности срока службы приборов. Задача ставится следующим образом: сколько приборов нужно испытывать и сколько времени, чтобы получить из опыта средний срок службы с ошибкой, не превосходящей заданную.

Заданную предельную ошибку запишем в виде

$$\varepsilon = \delta T_{ср},$$

где  $T_{ср}$  — опытный средний срок службы;  $\delta$  — заданная предельная относительная ошибка. Рассмотрим эту задачу для двух разных планов испытаний на надежность.

Случай 1. Испытывается  $n$  элементов в течение времени  $t_n$ . Вычислив предварительно значение  $r_1 = 1 + \delta$ , по табл. 6 определим необходимое число отказов  $m$  при заданной достоверности  $\alpha$ .

Теперь найдем время испытаний  $t_n$  и число элементов  $n$ , чтобы получить при испытаниях не менее  $m$  отказов с вероятностью не ниже заданной  $\alpha_1$ . Это значение определяется из соотношения

$$nt_n = mT_{ср}/r_3, \quad (28)$$

где  $T_{ср}$  — ожидаемое значение среднего срока службы испытываемых приборов. Коэффициент  $r_3$  определяется по табл. 7.

Значение коэффициента  $r_3$  для определения доверительных границ в случае распределений Пуассона и гамма-распределения

$m$	$\alpha$					
	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800
1	0,14	0,22	0,27	0,33	0,43	0,62
2	0,22	0,30	0,36	0,42	0,51	0,67
3	0,27	0,36	0,42	0,48	0,57	0,70
4	0,31	0,40	0,46	0,52	0,60	0,73
5	0,34	0,43	0,49	0,55	0,62	0,75
10	0,44	0,53	0,58	0,64	0,70	0,80
15	0,50	0,59	0,64	0,68	0,74	0,83
20	0,54	0,63	0,67	0,72	0,77	0,85
25	0,58	0,66	0,70	0,74	0,79	0,86
30	0,60	0,68	0,72	0,76	0,80	0,87
40	0,64	0,71	0,75	0,78	0,83	0,88
50	0,67	0,74	0,77	0,80	0,84	0,89
60	0,70	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90
80	0,73	0,78	0,81	0,84	0,87	0,91
100	0,75	0,80	0,83	0,86	0,88	0,92
150	0,79	0,84	0,86	0,88	0,90	0,93
200	0,81	0,86	0,88	0,89	0,92	0,94
300	0,84	0,88	0,90	0,91	0,93	0,95
400	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,96
500	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,96

**Пример.** Определить объем испытаний СПП в выпрямительном режиме, если ожидается  $\lambda=10^{-5}$  и заданы  $\delta=0,15$ ,  $\alpha=0,95$ ,  $\alpha_1=0,80$ .

**Решение.** Определяем  $T_{\text{ср}}=10^5$ ,  $r_1=1,15$ . По табл. 6 для  $\alpha=0,95$  и  $r_1=1,15$  находим  $m=150$ . Для  $\alpha_1=0,8$  и  $m=150$  по табл. 7 определяем  $r_3=0,93$ . И, наконец, из (28) получаем:

$$nt_{\text{н}}=150 \cdot 10^5 / 0,93 = 161 \cdot 10^5.$$

**Случай 2.** Испытывается  $n$  элементов в течение времени  $t_{\text{н}}$ . Здесь объем испытаний определяется значениями  $n$  и  $t_{\text{н}}$ . При достаточно малом отношении  $m/n$  необходимое число отказов определяется из табл. 8 с учетом соотношения

$$R_1=1+\delta.$$

Объем испытаний для получения этого числа отказов можно получить из (28).

После того как проведены измерения параметров на выборке приборов или испытания этой выборки на надежность, необходимо осуществить обработку полученных статистических данных. В частности, необходимо рассчитать статистические характеристики выборки:

среднее арифметическое

$$\bar{x} = \sum x_i / N;$$

Значения коэффициента  $R_1$  при  $\alpha=0,95$ 

$m$	$m/n$					
	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
1	19,5	19,5	19,6	19,6	19,7	19,7
2	5,63	5,53	5,44	5,35	5,26	5,15
3	3,66	3,60	3,52	3,44	3,36	3,27
4	2,93	2,87	2,81	2,74	2,67	2,59
5	2,54	2,49	2,43	2,37	2,31	2,25
6	2,29	2,26	2,20	2,15	2,09	2,04
8	2,01	1,98	1,93	1,89	1,84	1,79
10	1,83	1,81	1,78	1,74	1,70	1,66
15	1,62	1,60	1,58	1,54	1,51	1,48
20	1,51	1,49	1,46	1,44	1,41	1,39
30	1,39	1,37	1,35	1,34	1,31	1,29
40	1,32	1,31	1,30	1,28	1,26	1,24
50	1,28	1,27	1,26	1,24	1,23	1,21
60	1,25	1,25	1,23	1,22	1,21	1,20
80	1,21	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17
100	1,19	1,18	1,17	1,16	1,16	1,15
150	1,15	1,14	1,14	1,13	1,12	1,12
200	1,13	1,12	1,12	1,11	1,00	1,10
250	1,11	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09

дисперсию

$$S^2 = \sum_1^N [(x_i - \bar{x})^2 / (N - 1)];$$

среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{S^2};$$

коэффициент вариации

$$C_V = \sigma / \bar{x};$$

коэффициент асимметрии

$$C = \Sigma [(x_i - \bar{x})^3 / N\sigma^3];$$

эксцесс

$$E = \Sigma [(x_i - \bar{x})^4 / N\sigma^4].$$

Далее, если до опыта не была известна функция распределения исследуемого параметра, необходимо провести статистическое моделирование исходной выборки для определения закона распределения. В принципе методы математической статистики не дают возможности полностью формализовать процесс принятия гипотезы о каком-то виде закона распределения ограниченной выборки, они позволяют только с определенной достоверностью не отбросить верную гипотезу. Формально положительные результаты проверки на соответствие закона и выборки, какими бы сильными они ни были, не могут служить основанием для принятия гипотезы, в то же время даже один надежный экспериментальный факт, противоречащий гипотезе, вынуждает отказаться от выбранного закона. На практике приходится

руководствоваться соображениями об «устойчивости» статистического материала и принимать одну из традиционных гипотез, если она дает большее согласие с выборкой по сравнению с другими законами. Для проверки этого согласия служат специальные критерии. Наиболее универсальными и удобными являются критерий  $\chi^2$  Парсона и критерий Колмогорова.

Иногда для быстрой ориентировочной оценки характера функции распределения прибегают к графическим методам. Эти методы применимы для некоторых семейств  $F(t, \alpha, \beta)$ , содержащих два неизвестных параметра  $\alpha, \beta$ . График функции распределения  $F(t, \alpha, \beta)$  можно представить в виде совокупности точек  $(t, P)$  на плоскости, где  $P = F(t, \alpha, \beta)$ . Основная идея графического метода состоит в том, что подбирается такая непрерывная замена координат, при которой график функции распределения становится прямой линией. По этой прямой легко оцениваются значения  $\alpha$  и  $\beta$ . Графический метод применим для любого из планов испытаний.

Для удобства использования существует специальная вероятностная бумага. Полученные в результате испытаний значения некоторой случайной величины наносятся на эту вероятностную бумагу в виде эмпирической функции распределения. Если экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую линию, это означает, что полученная функция распределения соответствует используемому закону. Для проверки соответствия теоретической функции распределения и экспериментальных данных следует определить отклонение  $D$  наиболее удаленной экспериментальной точки от интерполяционной прямой и по этому отклонению рассчитать критерий согласия Колмогорова. Этот критерий определяется по формуле

$$D\sqrt{k},$$

где  $k$  — общее число экспериментальных точек.

Если  $D\sqrt{k} \leq 1,0$ , то экспериментальное распределение хорошо согласуется с теоретическим.

На рис. 29 приведены координатные сетки для экспоненциального, нормального и нормально-логарифмического законов. Знание функций плотности распределения и его параметров позволяет однозначно определить и другие показатели: интегральную функцию отказов, интенсивность отказов и т. д.

Рассмотрим в качестве примера задачу определения среднего срока службы приборов при экспоненциальном законе распределения (что равносильно определению интенсивности отказов). Остановимся на планах  $NBT$  и  $NBr$ .

**План  $NBT$ .** Планируем длительность испытаний  $t_n$ . Каждый отказавший прибор немедленно заменяем новым. Случайным является число отказов  $m$ .

В соответствии с [Л. 44]  $T_{ср}$  находим из уравнения:

$$T_{ср} = nt_n/m.$$

Доверительные границы определяем по выражениям:

$$T_{ср.в} = r_1 T_{ср};$$

$$T_{ср.н} = r_2 T_{ср},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  находим по табл. 6.



В случае  $m=0$  можно определить только  $T_{ср.н}$ :

$$T_{ср.н} = nt_n / r_0.$$

**План NBr.** Испытания ведем до получения  $m$ -го отказа. Каждый отказавший прибор немедленно заменяем новым. Случайным результатом является длительность испытаний.

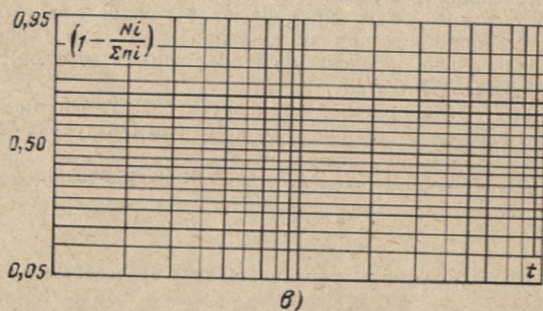
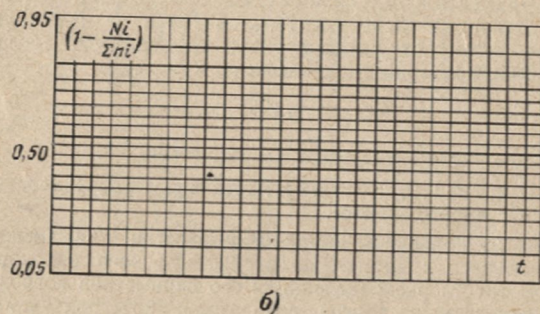
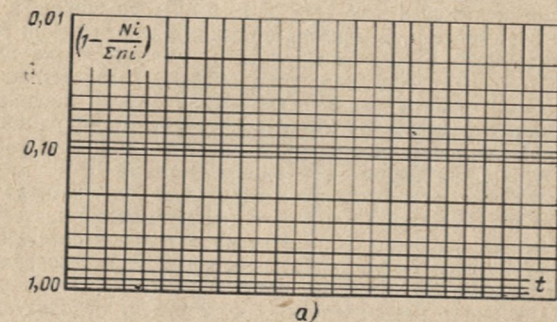


Рис. 29. Вероятностная бумага для экспоненциального (а), нормального (б) и нормально-логарифмического законов (в).

Искомые параметры определяем по формулам:

$$T_{ср} = nt_n / m;$$

$$T_{ср.в} = r_1 T_{ср};$$

$$T_{ср.н} = r_3 T_{ср}.$$

## 7. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Оборудование, предназначенное для испытания СПП на надежность и ресурс, должно отвечать целому ряду требований. Основными из них являются следующие:

- минимальные затраты мощности;
- удобство доступа и замены испытываемых приборов при изменении параметров и отказах;
- возможность изменения в широких пределах воздействующих факторов;
- высокая точность задания и поддержания режимов;
- высокая надежность испытательного оборудования, систем управления, охлаждения, защиты и т. д.
- высокое быстродействие защиты;
- наличие системы сигнализации об отказах испытываемых приборов;
- наличие системы блокировки и защиты от попадания посторонних предметов и поражения обслуживающего персонала;
- желательность осуществления оперативного контроля параметров приборов без снятия их с установки.

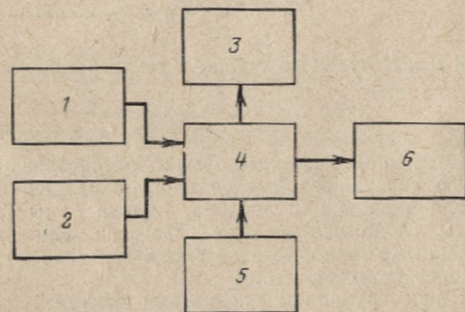


Рис. 30. Структурная схема стенда для испытания тиристоров в статическом режиме.

1 — источник высокого напряжения; 2 — источник низкого напряжения; 3 — блок контроля; 4 — блок испытываемых тиристоров; 5 — система управления тиристорами; 6 — нагрузка.

Ниже приводится краткое описание ряда испытательных стендов.

**Стенд статических испытаний.** Структурная схема стенда показана на рис. 30. Испытание силовых полупроводниковых приборов на надежность в статическом (выпрямительном) режиме — длительный, энергоемкий и дорогостоящий процесс. Испытания проводятся при предельных токе и напряжении. Мощность, отдаваемая в нагрузку в расчете на один тиристор, составляет десятки киловатт при потерях мощности на самом тиристоре около 100—200 Вт. Если не принять соответствующих мер, то при испытании нескольких сотен приборов в течение даже тысячи часов будут потеряны в виде тепла

сотни тысяч киловатт-часов электроэнергии. Ясно, что такие испытания являются непроизводительной роскошью, поэтому для обеспечения минимального потребления электроэнергии в стенде испытательных источники высокого и низкого напряжения выполнены отдельными.

Чтобы при всех режимах сохранить неизменным угол включения тиристоров, прямой ток через тиристоры изменяется ступенями, путем переключения нагрузки. Регулирование высокого напряжения осуществляется с помощью автотрансформаторов. Обратное напряжение прикладывается к испытываемым приборам сразу же после окончания силового тока. Выравнивание обратного напряжения на последовательно соединенных тиристорах может производиться с помощью шунтирующих сопротивлений в процессе отладки стенда. Система управления обеспечивает формирование отпирающих импульсов необходимой формы и мощности, которые через импульсные

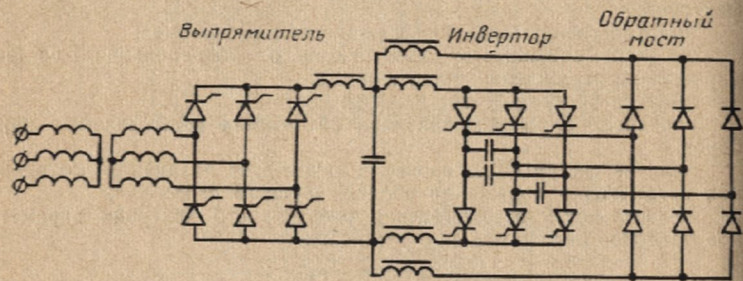


Рис. 31. Схема испытательного стенда с рекуперацией энергии.

трансформаторы поступают на тиристоры. Для отвода тепла от испытываемых тиристоров стенды обычно обеспечиваются системой принудительного воздушного или водяного охлаждения. На случай отключения подачи воды или воздуха должна быть предусмотрена система защиты блока вентиля от перегрева. Иногда применяют два эшелона защиты: тепловые реле блока вентиля и струйное или ветровое реле системы охлаждения.

Поскольку при групповом соединении вентиля текущий контроль параметров каждого прибора без снятия его со стенда оказывается невозможным, конструкция вентиляльного блока должна быть удобной для демонтажа.

Стенды для длительных испытаний большого числа тиристоров в целях экономии электрической энергии могут быть выполнены с рекуперацией энергии в питающую сеть или другой источник. Так, для испытания тиристоров в режиме выпрямления и инвертирования тока удобна схема, изображенная на рис. 31. Схема состоит из управляемого выпрямителя, инвертора и обратного моста. Входной выпрямитель с фильтром служит источником энергии постоянного тока для инвертора. Нагрузкой инвертора является обратный выпрямитель, который возвращает часть энергии на вход инвертора. Наличие обратного моста позволяет достаточно просто осуществить загрузку тиристоров инвертора до номинального режима при сравнительно небольшой мощности, потребляемой из сети. Применение управляемого входного выпрямителя позволяет обеспечить необхо-

димый режим для тиристоров инвертора, облегчает процесс пуска, а также дает возможность осуществить быстродействующую защиту при срыве коммутации инвертора путем снятия управляющих импульсов с тиристоров выпрямителя.

Стенд для испытания вентиля в режиме токовых перегрузок. Силовая часть установки состоит из трех блоков: блока задания тока подогрева 1, блока перегрузки 2 и блока обратного напряжения 6 (рис. 32). Блок задания тока подогрева 1 обеспечивает нагрузку испытываемого тиристора силовым током, не превышающим предельного. Блок перегрузки 2 позволяет задавать необходимую амплитуду и частоту следования импульсов тока перегрузки. Регулируемое обратное напряжение формируется блоком обратного напряжения 6. Своевременное включение испытываемого тиристора 4 и тиристором силовой схемы обеспечивается с помощью системы управления 5. Эта же система обеспечивает изменение частоты сле-

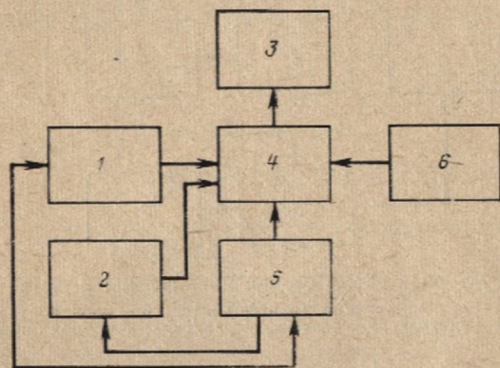


Рис. 32. Структурная схема стенда для испытания вентиля в режиме токовых перегрузок.

1 — блок задания тока подогрева; 2 — блок перегрузки; 3 — блок обратного напряжения; 4 — блок испытываемых тиристоров; 5 — система управления тиристорами; 6 — блок обратного напряжения.

дования импульсов токовой перегрузки от 50 до 0,2 Гц. Для фиксации числа импульсов тока перегрузки, прошедших через испытываемый тиристор, стенд должен быть снабжен счетчиком. Ток подогрева, обратное напряжение и амплитуда импульса тока перегрузки контролируются с помощью блока контроля режима 3.

Стенд циклических испытаний. Испытания вентиля на циклоустойчивость могут проводиться в номинальном и форсированном режимах. При номинальном режиме ток через вентиль выбирается равным предельному, а длительность открытого и закрытого состояний вентиля — достаточной для нагрева системы вентиль — радиатор до установившегося значения и ее остывания до температуры охлаждающего агента. При форсированных испытаниях ток через вентиль выбирается больше предельного, но при этом сокращается длительность его протекания таким образом, чтобы нагрев структуры не превышал допустимого или заданного значения.

Структурная схема стенда приведена на рис. 33. Силовая часть стенда состоит из блока испытываемых вентилях 4, понижающего трансформатора 2, контактора 1 и нагрузки 7. Полупроводниковый контактор 1 служит для прерывания тока через испытываемые вентили в соответствии с заданным временным циклом. Силовой понижающий трансформатор 2 предназначен для обеспечения необходимого тока через испытываемые приборы и уменьшения установленной мощности стенда за счет снижения рабочего напряжения на испытываемых приборах до 10—15 В. Изменение нагрузочного тока в данном стенде обеспечивается переключением нагрузки. Могут

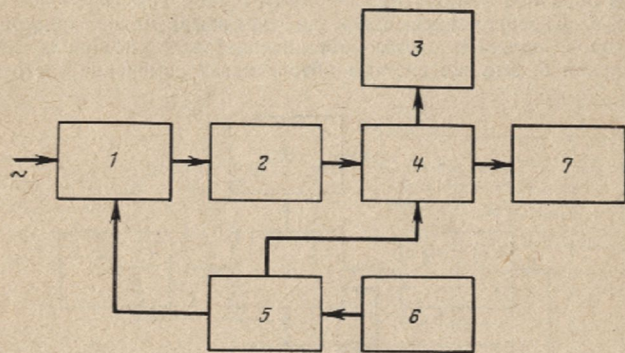


Рис. 33. Структурная схема стенда циклических испытаний.

1 — контактор; 2 — понижающий трансформатор; 3 — блок контроля; 4 — блок испытываемых вентилях; 5 — система управления; 6 — блок задания цикла; 7 — нагрузка.

быть реализованы и другие варианты, например подключение на вход стенда регулируемого автотрансформатора или переключение отпаек вторичной обмотки понижающего трансформатора. При испытании тиристоров регулирование тока при неизменном сопротивлении нагрузки можно осуществить изменением угла включения.

Блок контроля режима 3 предназначен для измерения тока через тиристоры, сигнализации о перегрузке приборов, счета числа циклов. Блок задания цикла 6 определяет время включенного и выключенного состояния контактора и соответственно время протекания тока через испытываемые приборы. К этому блоку предъявляются повышенные требования по стабильности задания времени цикла. Дело в том, что при форсированных испытаниях, когда ток нагрузки превышает предельный, даже незначительные колебания времени цикла могут привести к большому разбросу перепада температуры  $\Delta\theta$  у испытываемых приборов, исказить результаты эксперимента или же привести к выходу приборов из строя. Следует указать, что в данном варианте стенда испытания вентилях проводятся без приложения к ним высокого напряжения, что дает несколько повышенные значения циклической устойчивости. При необходимости блок высокого напряжения может быть введен в схему стенда без особых затруднений.

Стенд для испытания тиристоров при воздействии  $di/dt$ . Структурная схема стенда приведена на рис. 34. Для получения досто-

верных результатов необходимо обеспечить для всех испытываемых тиристоров одинаковый режим работы. Поскольку процесс включения определяется параметрами сигнала управления, током нагрузки, напряжением перед включением и т. д., должна быть обеспечена возможность регулирования этих параметров. Учитывая разброс параметров испытываемых приборов, а также трудности формирования импульсов тока с высокими значениями  $di/dt$  (100 А/мкс и выше), испытательный стенд целесообразно строить из отдельных ячеек, в каждой из которых испытывается один тиристор.

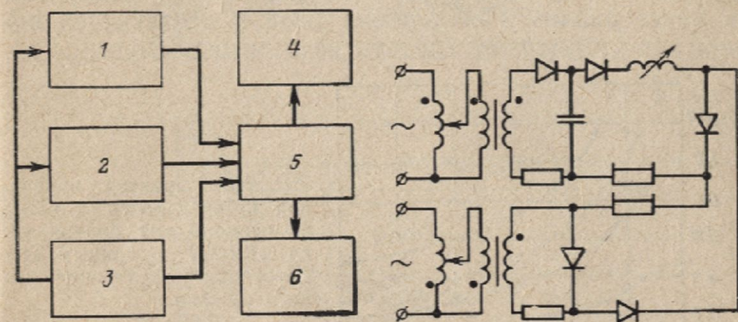


Рис. 34. Структурная схема стенда для испытания тиристоров на воздействие скорости нарастания  $di/dt$ .

1 — блок задания тока; 2 — блок формирования  $di/dt$ ; 3 — система управления; 4 — блок защиты и сигнализации; 5 — блок испытываемых тиристоров; 6 — блок контроля режима.

Рис. 35. Схема ячейки стенда для испытания тиристоров на воздействие  $di/dt$ .

Блок задания силового тока 1 обеспечивает протекание через испытываемый тиристор 5 после его включения необходимого греющего тока. Источником тока может быть либо выпрямитель с регулируемым выходным напряжением при фиксированном сопротивлении нагрузки, либо источник постоянного напряжения. Но во втором случае необходимо предусмотреть схему прерывания силового тока спустя некоторое время после включения испытываемого тиристора. Источником формирования импульса прямого тока 2 с заданной скоростью нарастания  $di/dt$  обычно является конденсатор, который заряжается от выпрямителя. Изменение  $di/dt$  осуществляется регулируемой индуктивностью, включенной последовательно с тиристором в разрядную цепь конденсатора.

При построении стенда следует обратить внимание на обеспечение одинаковых параметров включающих импульсов во всех ячейках. С помощью блока контроля режима 6 осуществляется контроль прямого напряжения на испытываемом тиристоре перед включением, прямого тока, значения  $di/dt$  и параметров отпирающих импульсов. Блок защиты и сигнализации 4 предназначен для индикации о пробое того или иного тиристора в процессе испытаний и отключения либо всего стенда, либо соответствующего канала.

На рис. 35 приведен один из возможных вариантов силовой схемы ячейки испытательного стенда.

## 8. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СПП

Большая трудоемкость испытаний силовых приборов в нормированных режимах и отсутствие надежных методов ускоренных испытаний предопределили тот факт, что накоплено и систематизировано еще недостаточно данных, чтобы с высокой степенью достоверности дать количественные характеристики надежности СПП. Тем не менее анализ и обобщение даже существующей информации позволяют сделать некоторые выводы.

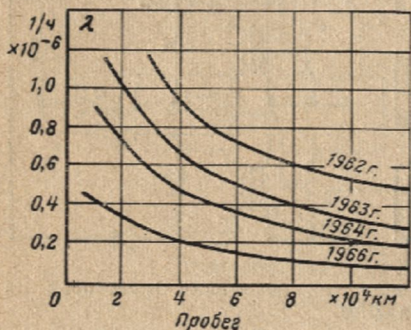


Рис. 36. Характер изменения интенсивности отказов во времени для диодов типа ВК2-200 по данным эксплуатации электроподвижного состава.

Для получения данных по количественным характеристикам надежности и выявления характера закона распределения отказов были проведены специальные испытания тиристоров Т160 в статическом (выпрямительном) режиме в течение нескольких тысяч часов. Для контроля полученных данных была также проанализирована информация по эксплуатационным отказам тиристоров этого типа и диодов типа ВК2-200 в большом числе выпрямительных агрегатов. Анализировались также данные по надежности вентилях, работающих в преобразователях электроподвижного состава [Л. 47]. Экспериментальные зависимости, полученные по всем этим данным, представлены на рис. 36—39.

Характер изменения кривых, приведенных на рис. 36, дает определенные основания предполагать, что после некоторого периода приработки интенсивность отказов приближается к постоянному значению, т. е. надежность в первом приближении может быть описана экспоненциальным законом. Период приработки обычно не превышает 1500—3000 ч, что с учетом ресурса приборов, который оценивается изготовителями в 100 000—150 000 ч, является вполне правдоподобным.

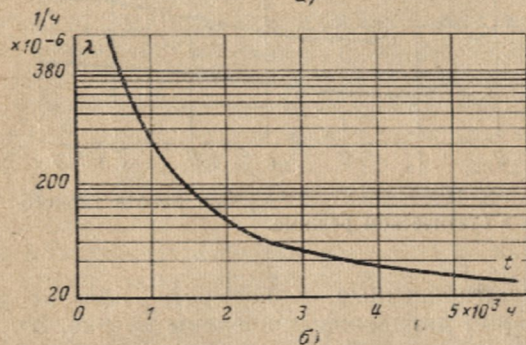
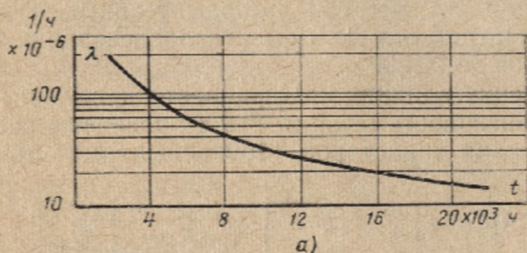


Рис. 37. Расчетные зависимости изменения интенсивности отказов от времени наработки.

*a* — для тиристоров Т160 в агрегатах типа ВАКС, общий объем наработки 1 000 000 ч; *б* — для диодов ВК2-200 в агрегатах типа ВАКЭЛ, общий объем наработки 1 400 000 ч.

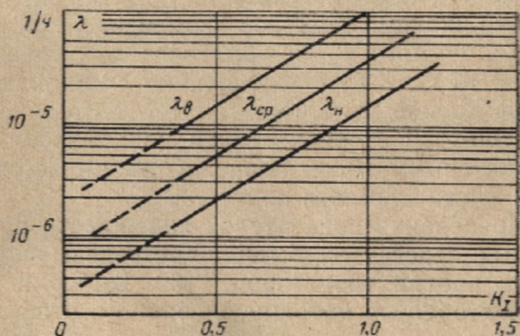


Рис. 38. Характер изменения  $\lambda$  тиристоров Т160 от коэффициента нагрузки по току  $K_T$ .

На рис. 37 приведены расчетные зависимости интенсивности отказов СПП, полученные по результатам эксплуатации более чем 150 выпрямительных агрегатов. Нарботка агрегатов до момента обследования составила от 2000 до 20 000 ч.

Для оценки влияния коэффициента нагрузки по току  $K_I$  на интенсивность отказов были проведены специальные испытания тиристоров Т160 в выпрямительном ре-

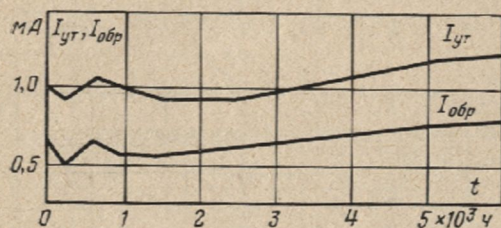


Рис. 39. Изменение  $I_{ут}$ ,  $I_{обр}$  при работе тиристоров в статическом режиме.

жиме. Ориентировочные зависимости для верхней и нижней границ диапазона приведены на рис. 38. Общее число испытанных приборов составило 60 шт. За отказ принимался пробой тиристора рабочим напряжением. Коэффициент нагрузки по напряжению при испытаниях был равен 0,8. Испытания проводились в течение 3000 ч при двух значениях  $K_I$ .

Контроль основных параметров, который проводился в процессе длительных испытаний приборов, показал, что сколько-нибудь заметное изменение наблюдается только для прямого  $I_{ут}$  и обратного  $I_{обр}$  токов утечки (рис. 39). Это связано с ухудшением состояния поверхности выпрямляющего элемента. Действительно, вскрытие вышедших из строя вентилях показывает, что наиболее характерным видом повреждения является пробой выпрямляющего элемента по фаске.

Для определения показателей надежности при действии токовых перегрузок были произведены испытания нескольких партий тиристоров Т160. Выборки тиристоров комплектовались методом случайного отбора. Испытания проводились при постоянной частоте повторения импульсов тока перегрузки ( $f=0,8$  Гц) синусоидальной формы и нескольких значениях тока предварительной нагрузки и обратного напряжения. До испытаний и

в процессе испытаний измерялись основные параметры тиристоров. Всего было испытано более 300 приборов. Результаты исследований показывают, что характер распределения отказов существенно зависит от перегрузки. Так, при токах перегрузки, близких к предель-

ным, плотность распределения отказов хорошо описывается нормально-логарифмической функцией. Снижение  $I_{уд}$  до 4,0 кА при прочих равных условиях уже вызывает изменение кривой распределения. Характер кривой позволяет сделать вывод, что она может быть описана суперпозицией двух функций (рис. 40). И, действительно, применение вероятностной бумаги и критерия Колмогорова показывает, что с достоверностью не ниже 0,95 функция плотности распределения отказов может быть описана суммой двух нормально-логарифмических кривых:

$$f(N) = P_1 \frac{0,4343}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 N_i} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lg N_i - c_1}{\sigma_1} \right)^2 \right] + P_2 \frac{0,4343}{\sqrt{2\pi}\sigma_2 N_i} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lg N_i - c_2}{\sigma_2} \right)^2 \right], \quad (29)$$

где  $c_1=1,25$ ;  $\sigma_1=0,61$ ;  $c_2=3,86$ ;  $\sigma_2=0,50$ .

Существенное влияние на долговечность СПП при наличии токовых перегрузок оказывает ток предварительной нагрузки. На рис. 41 приведены зависимости, отражающие это влияние. Измерения параметров, кото-

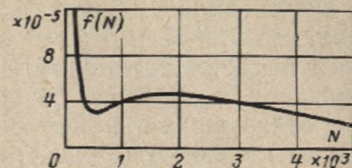


Рис. 40. Характер изменения функции плотности распределения отказов тиристоров Т160 от числа циклов.

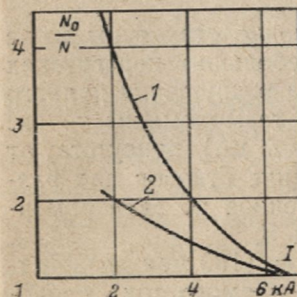


Рис. 41. Относительное изменение ударостойкости тиристоров ВКДУ-150 при изменении тока предварительной нагрузки  $I_n$ .

1 —  $I_n=200$  А; 2 —  $I_n=150$  А;  $N_0$  — число импульсов ударного тока, выдержанных тиристорами до отказа при  $I_n=0$ .

рые проводились в процессе испытаний приборов, показали, что при всех режимах испытаний падает напряжение класса, растут токи утечки, изменяются падения напряжения и тепловое сопротивление. Вскрытие приборов, отказавших при ресурсных испытаниях током 5,5 кА (70 шт.) и 4,0 кА (83 шт.), показало, что, как и следовало ожидать, наблюдается несколько картин повреждения. При больших токах перегрузки из-за значительных механических напряжений в элементах вентиля происходит растрескивание кремниевой пластины на перифе-

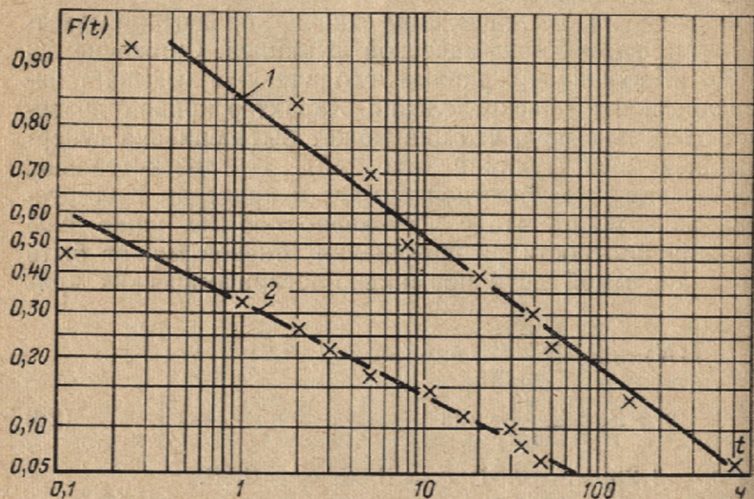


Рис. 42. Экспериментальные графики функции распределения отказов тиристорных вентиляторов Т160 при двух значениях  $di/dt$ .  
1 —  $di/dt=100$  А/мкс; 2 —  $di/dt=130$  А/мкс.

рии диска. Возможно и проплавление структуры из-за эффекта шнурования тока. При небольших перегрузках отказы наступают в основном из-за разрушения паяного соединения кремния с нижним термокомпенсатором. В зоне умеренных перегрузок (3—4 кА) присутствуют отказы всех трех видов. Соотношение отказов для разных режимов перегрузки, определенное по экспериментальным данным, приведено в табл. 9.

Ресурсные испытания тиристорных вентиляторов Т160 при воздействии высокой скорости нарастания прямого тока проводились при значениях  $di/dt$ , превышающих номинальные

(от 50 до 150 А/мкс). Результаты испытаний двух партий (по 12 шт. каждая) при значениях  $di/dt$ , равных 100 и 130 А/мкс, приведены на рис. 42. За отказ принимался пробой тиристора.

Таблица 9

Распределение тиристорных вентиляторов по характеру повреждения при токовых перегрузках (в процентах)

Ток перегрузки, кА	Проплавление	Растрескивание	Разрушение припоя
5,5	23	75	2
4,0	16	50	34

Характер расположения экспериментальных точек дает основание предполагать, что закон распределения близок к нормально-логарифмическому. Проверка этого предположения с помощью критерия Колмогорова дала

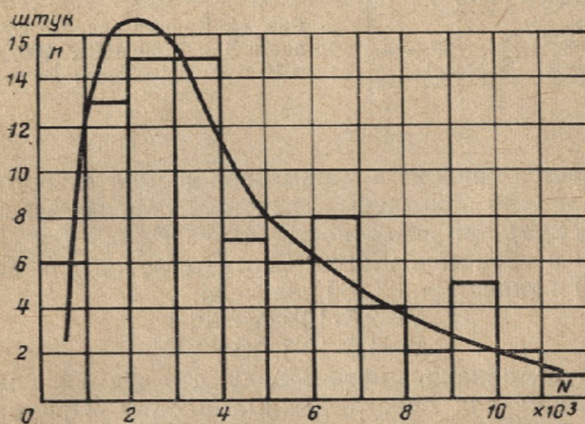


Рис. 43. Распределение отказов вентиляторов ВК2-200 при циклической работе.

удовлетворительные результаты. Интересно отметить, что существенного изменения каких-либо параметров, кроме обратного напряжения, в процессе испытаний, вплоть до момента пробоя, не наблюдалось.

Для сокращения времени испытания СПП на циклическую устойчивость обычно проводятся в форсированных режимах, когда ток через испытываемый прибор превышает предельное значение. Так, при определении

функции плотности распределения отказов были проведены испытания тиристоров Т160 в режиме: 10 с — включено; 25 с — выключено, ток нагрузки — 250 А. По результатам испытания 327 приборов построена гистограмма и найдена огибающая кривая (рис. 43). Плотность распределения отказов в данном режиме хорошо описывается нормально-логарифмическим законом:

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma} (N_i - N_0)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\lg(N_i - N_0) - c}{\sigma} \right]^2 \right\} \quad (30)$$

с параметрами  $c=3,9$ ;  $\sigma=1,7$ ;  $N_0=0,5 \cdot 10^3$ .

Характер закона сохраняется и при всех других режимах циклирования. Подобные результаты получены и другими авторами [Л. 46]. Как уже говорилось ранее, циклическая устойчивость зависит от конструктивных

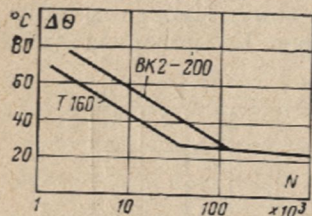


Рис. 44. Кривые циклической усталости для Т160 и ВК2-200,  $\tau_{вкл}=10$  с,  $\tau_{выкл}=25$  с.

особенностей прибора и параметров испытательного цикла. На рис. 44 приведены экспериментальные зависимости  $N=f(\Delta\theta)$  при вероятности отказа  $P=0,5$  для диодов ВК2-200 и тиристоров Т160. Соответственно для диодов ВК2-200 и тиристоров Т160 получено:

$$N=2,5 \cdot 10^{12} \Delta\theta^{-4,8};$$

$$N=1,5 \cdot 10^{13} \Delta\theta^{-5,5}.$$

Следует, однако, иметь в виду, что эти зависимости справедливы для одного режима работы. При других параметрах цикла и нагрузке необходимо вводить соответствующие поправки [Л. 40, 41].

#### Глава четвертая

### НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

#### 9. ОСНОВЫ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Ускоренными испытаниями на надежность являются такие, которые позволяют оценить требуемые характеристики надежности в более короткий срок по сравнению с временем испытаний в нормированном режиме.

Физической основой ускоренных испытаний является принцип, иногда называемый принципом Седякина [Л. 48], согласно которому надежность изделия в некотором режиме работы зависит только от выработанного им ресурса в прошлом и не зависит от того, как выработан этот ресурс.

В зависимости от способа сокращения времени испытаний можно выделить два основных вида испытаний:

1) испытания в форсированном режиме с последующим пересчетом результатов к нормированным условиям работы. Сокращение времени испытаний достигается за счет ужесточения режимов, что ведет к более быстрой выработке ресурса;

2) испытания в нормированном режиме. Сокращение времени достигается за счет использования априорной информации и определенных статистических моделей.

Задача форсированных испытаний включает в себя несколько частных вопросов:

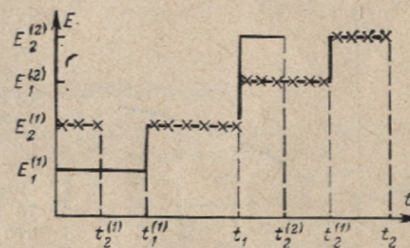
1) определение составляющих нагрузки и выбор этих составляющих;

2) выбор критерия отказа приборов;

3) определение на основании предварительных исследований функции пересчета результатов ускоренных испытаний к нормированному режиму;

4) проведение ускоренных испытаний и определение достоверности результатов.

Вектор нагрузки может быть охарактеризован набором составляющих, представляющих собой совокупность значений воздействующих факторов. Например, при статических испытаниях СПП такими факторами являются ток и напряжение, при испытаниях на перегрузку — ударный ток и ток предварительной нагрузки, при циклировании за факторы режима можно принять ток, рабочее напряжение, временные параметры цикла. Форсирование осуществляется путем ужесточения одной или нескольких составляющих режима по сравнению с нормированным режимом. Например,



при циклировании ток нагрузки выбирается больше предельного тока прибора; при испытаниях на воздействие ударного тока этот ток может превышать значения, оговоренные в нормативных документах, и т. д. Естественно полагать, что чем более жестким будет выбранный режим испытания, тем короче будет время испытаний. Однако чрезмерное ужесточение режима может привести к изменению механизма процессов разрушения прибора по сравнению с механизмами разрушения в нормированном режиме. В этом случае будет нарушен так называемый принцип автомодельности и результаты форсированных испытаний нельзя будет пересчитывать на нормированный режим.

Прежде чем осуществлять выбор предельного (форсированного) режима испытаний, необходимо оговорить критерий отказа прибора.

Прежде чем осуществлять выбор предельного (форсированного) режима испытаний, необходимо оговорить критерий отказа прибора.



при испытаниях. Применительно к СПП можно рекомендовать в качестве такого критерия либо полный отказ, либо выход какого-либо определяющего параметра за допустимые границы (см. табл. 1).

Для определения предельного значения нагрузки, при которой еще соблюдается принцип автомодельности, можно рекомендовать метод немонотонной ступенчатой нагрузки [Л. 45]. Сущность метода заключается в следующем. Весь диапазон возможного изменения нагрузки разбивается на несколько поддиапазонов.

Из партии приборов отбираются две выборки. Одна из них ставится на испытания в режиме  $E_2^{(1)}$  и испытывается в течение времени  $t_2^{(1)}$  (рис. 45). Другая выборка испытывается в режиме  $E_1^{(1)}$  в течение  $t_1^{(1)} > t_2^{(1)}$  до тех пор, пока вероятности отказов  $q$  у обеих выборок не совпадут, т. е.

$$q [E_1^{(1)}, t_1^{(1)}] = q [E_2^{(1)}, t_2^{(1)}].$$

Затем обе выборки испытываются до некоторого времени  $t_1$  в одинаковом режиме  $E_2^{(1)}$ . Если в момент времени  $t_1$  значения вероятностей отказа для обеих партий совпадают, условия автомодельности не нарушены и испытания продолжают. Вторую выборку испытывают в режиме  $E_2^{(2)}$  до некоторого времени  $t_2^{(2)}$ , а первую выборку — до времени  $t_1^{(2)}$ , когда вероятности отказов для обеих выборок опять будут равными. Затем обе выборки испытывают до времени  $t_2$ , сравнивают вероятности и т. д.

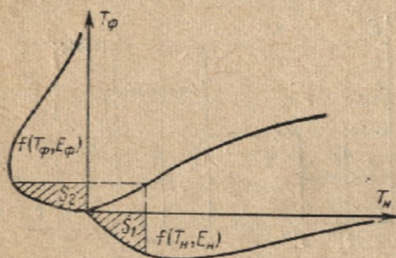


Рис. 46. Схема построения функции пересчета.

Испытания по аналогичной схеме продолжают до тех пор, пока эти вероятности перестанут быть равными. Верхнюю границу предыдущего поддиапазона нагрузки принимают за предельный режим  $E_{\max}$ . При сравнении полученных из опыта значений  $q$  следует помнить, что они представляют собой оценку неизвестных истинных значений вероятностей отказа, поэтому судить о равенстве или неравенстве  $q$  между собой следует с помощью вероятностных критериев.

Задачей предварительных исследований является определение функции перерасчета результатов форсированных испытаний на нормированный режим, которая в общем случае является нелинейной и сохраняется от партии к партии:

$$T_\phi(E_\phi, q) / T_\pi(E_\pi, q) = \varphi(E_\pi, E_\phi, q), \quad (31)$$

где  $T_\pi, E_\pi$  — время и нагрузка при испытаниях в нормированном режиме;  $T_\phi, E_\phi$  — время и нагрузка при испытаниях в форсированном режиме.

Определение этой функции может быть произведено следующим образом [Л. 45]. Для испытаний берут две случайные выборки из одной партии приборов и испытывают их в нормированном и форсированном режимах. По полученным экспериментальным данным на-

ходится функция (31) как геометрическое место точек, соответствующих равным квантилям (рис. 46), где  $f(T_n, E_n)$  и  $f(T_\phi, E_\phi)$  — плотности вероятности отказов соответственно в режимах  $E_n, E_\phi$  и  $s_1 = s_2$ . В частном случае, который назван линейным, зависимость  $T_n$  от  $T_\phi$  не зависит от уровня  $q$  и представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. Линейность функции в некоторой области режимов будет сохраняться только тогда, когда остается неизменным вид закона распределения сроков службы. Если функция связи не зависит от уровня, то

$$\varphi(E_n, E_\phi, q) = \varphi(E_n, E_\phi) = c,$$

что равносильно равенству  $T_n = cT_\phi$ .

Проведение форсированных испытаний на надежность для линейных моделей значительно облегчается по сравнению с общим случаем. Однако не всегда результаты форсированных испытаний удовлетворяют критериям линейности. В ряде случаев путем соответствующего преобразования масштабов нелинейные модели можно свести к линейным.

В заключение следует указать, что результаты форсированных испытаний оказываются менее точными и достоверными, чем результаты обычных испытаний при одинаковых объемах выборок. Это объясняется тем, что функция пересчета (31) может быть получена на основании опыта, имеющего конечный объем. Следовательно, для этой функции должны быть указаны границы, в пределах которой заключено ее истинное значение. Кроме того, сами ускоренные испытания проводятся выборочным методом и, следовательно, позволяют определить количественные характеристики с определенной вероятностью.

## 10. ФАКТОРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При решении задач надежности СПП неизбежно проведение различных экспериментов, как правило, довольно длительных и трудоемких. Эксперименты необходимы, например, при изучении степени влияния параметров приборов на их ресурс, при оценке влияния отдельных факторов нагрузки на ресурс приборов, при выборе ускоряющих факторов для проведения форсированных испытаний и т. д.

Большую пользу при подготовке и проведении таких экспериментов может оказать теория факторного планирования эксперимента [Л. 50, 51]. Сущность факторного эксперимента в приложении к задачам надежности СПП можно трактовать следующим образом. Полупроводниковый прибор в процессе его эксплуатации можно рассматривать как объект, на который действует комплексная нагрузка, имеющая ряд составляющих  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . О качестве прибора можно судить по некоторому интересующему нас результату  $y$ , например по значению его ресурса. Ставится задача проведения такой серии экспериментов, которая позволила бы получить математическую модель, связывающую выбранный показатель  $y$  с факторами  $X_i$ . При этом желательно знать степень влияния каждого из факторов на показатель  $y$ . В общем случае модель находится в виде неполного квадратичного полинома типа

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} x_i x_j. \quad (32)$$

Определение коэффициентов полинома, которые указывают на влияние каждого фактора, осуществляется после проведения серии специальных проведенных экспериментов. Для этого в соответствии с формализованными правилами составляется и реализуется матрица полного (ПФЭ) или дробного (ДФЭ) факторного эксперимента. Число опытов  $N$ , которые необходимо провести в соответствии с матрицей ПФЭ, зависит от числа факторов  $n$  и определяется формулой  $N=2^n$ . Дробный факторный эксперимент позволяет это число существенно сократить.

Применение многофакторного планирования возможно при выполнении ряда условий: искомая функция  $y=f(x)$  — гладкая; первичные факторы могут варьироваться в ходе эксперимента независимо друг от друга; опыты с различными факторами воспроизводимы; факторы должны быть совместимы; погрешность задания факторов должна быть мала по сравнению с диапазоном их варьирования.

При построении модели (32), которая называется функцией отклика, необходимо: определить число и диапазон варьирования воздействующих факторов; выбрать план эксперимента; провести эксперимент; вычислить оценки коэффициентов регрессии; провести статистический анализ результатов эксперимента и, в частности, оценить воспроизводимость эксперимента, значимость коэффициентов регрессии и адекватность модели.

Рассмотрим последовательность построения матрицы ПФЭ на примере задачи определения степени влияния составляющих нагрузки на срок службы тиристоров в режиме емкостной коммутации.

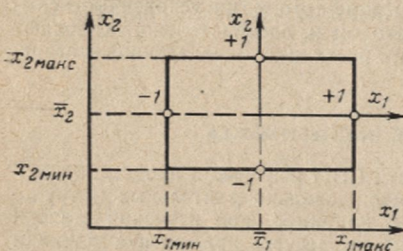


Рис. 47. Изменение координат при нормировании воздействующих факторов.

Изменения параметров электрической схемы факторы имеют различную размерность и разный порядок по величине, необходимо их нормировать. Для осуществления этой операции требуется прежде всего выбрать исходную область экспериментирования, т. е. задать верхние и нижние пределы изменения каждого фактора в ходе эксперимента. Операция нормирования сводится к переносу начала координат факторного пространства в точку с координатами  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n$ , где

$$\bar{X}_i = (X_{i\max} + X_{i\min})/2,$$

и переходу к безразмерным величинам всех первичных факторов

$$x_i = (X_i - \bar{X}_i) / (\bar{X}_i - X_{i\min}) = (X_i - \bar{X}_i) / (X_{i\max} - \bar{X}_i).$$

Значения  $X_i - X_{i\min} = X_{i\max} - \bar{X}_i$  называют интервалами варьирования.

Нетрудно видеть, что в новой системе координат после введения относительных единиц верхние и нижние уровни варьирования факторов будут равны соответственно +1 и -1 (рис. 47). Теперь можно приступить к построению матрицы ПФЭ. Правила построения матриц достаточно подробно изложены в [Л. 50], поэтому на этом вопросе останавливаться не будем.

Матрица ПФЭ для трех факторов приведена на рис. 48. Для сокращения записи все +1 обозначены символом «+», а все -1 — символом «-». План эксперимента, показывающий, какими следует выбирать значения  $x_i$  в опытах, выделен рамкой. Все остальные столбцы носят вспомогательный характер и используются лишь для

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_i$
1	-	-	-	+	+	+	-	$y_1$
2	+	-	-	-	-	+	+	$y_2$
3	-	+	-	-	+	-	+	$y_3$
4	+	+	-	+	-	-	-	$y_4$
5	-	-	+	+	-	-	+	$y_5$
6	+	-	+	-	+	-	-	$y_6$
7	-	+	+	-	-	+	-	$y_7$
8	+	+	+	+	+	+	+	$y_8$

Рис. 48. Матрица ПФЭ для трех факторов.

расчетов коэффициентов аппроксимирующего полинома. Нетрудно заметить, что число столбцов равно числу членов полинома (32), включая все возможные взаимодействия факторов, т. е. с помощью плана ПФЭ можно определить все коэффициенты полинома при линейных членах и всех взаимодействиях факторов.

В ряде случаев требуется определить не все коэффициенты полинома, а только при факторах  $x_1 - x_3$ . Тогда ПФЭ дает избыточную информацию. Так, при  $n=3$  мы будем искать четыре коэффициента, а выполним восемь опытов. Правда, полученный избыток информации позволяет более строго оценить, достаточна ли аппроксимация, содержащая лишь линейные члены; но и эту оценку можно сделать

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_i$
1	-	-	+	+	-	-	+	$y_1$
2	+	-	-	-	-	+	+	$y_2$
3	-	+	-	-	+	-	+	$y_3$
4	+	+	+	+	+	+	+	$y_4$

Рис. 49. Матрица ДФЭ типа  $2^{3-1}$ .

по меньшему числу опытов, поэтому при большом числе факторов есть смысл переходить к дробному факторному эксперименту.

Матрица ДФЭ типа  $2^{3-1}$  для трех факторов, но содержащая лишь четыре опыта, приведена на рис. 49. При ДФЭ в матрице появляются одинаковые столбцы и уже не удается найти в чистом виде все коэффициенты при факторах и их взаимодействиях. Как принято говорить, оценки коэффициентов будут смешанными. Однако если есть основание считать, что парные взаимодействия незначимы, т. е. коэффициенты при них близки к нулю, то ДФЭ дает возможность определить коэффициенты при основных факторах при меньшем числе экспериментов. Если же таких оснований нет, то придется реализовать ПФЭ. Для проверки гипотезы о равноточности измерений рекомендуется повторить опыты нескольких случайно выбранных строк матрицы, вычислить значение критерия значимости (например, Кохрена) и принять решение о прекращении эксперимента или повышении точности задания факторов. Если воспроизводимость опытов удовлетворительная, вычисляют коэффициенты регрессии, проверяют их значимость и составляют уравнение регрессии (32). Заключительным этапом работ является проверка адекватности полученного уравнения, после чего принимается решение о согласовании выбранной модели с результатами эксперимента.

## 11. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Для обеспечения необходимого уровня качества и надежности выпускаемых приборов в технологический процесс вводят различные испытания, цель которых — отбраковка потенциально ненадежных образцов. Задача разбраковки возникает и при прогнозировании срока службы приборов, когда необходимо для конкретной партии приборов гарантировать заданную надежность (или срок службы  $T$ ) по результатам неразрушающих и достаточно кратковременных испытаний в течение времени  $t \ll T$ . Решение той и другой задачи может быть осуществлено с помощью метода распознавания образов. Идея этого метода заключается в следующем [Л. 52].

Полупроводниковый прибор характеризуется  $k$  параметрами  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ , которые полностью характеризуют его качество, в том числе и ресурс. Можно предполагать, что группа приборов, имеющая идентичную совокупность параметров  $\{\xi\}$ , будет иметь примерно равный ресурс или другой показатель качества. Иными словами, группа приборов, имеющая равный ресурс, будет отличаться от приборов, не входящих в эту группу, вектором состояния, который однозначно определяется координатами — параметрами  $\xi$ . Таким образом, предполагается, что существует определенная статистически устойчивая связь между ресурсом и сочетанием  $\xi$ .

Процесс установления этой связи осуществляется на основании априорной информации и называется обучением. Естественно, что предъявление для обучения приборов с набором параметров  $\xi$  сопровождается указанием, к какому классу по ресурсу принадлежит предъявляемый прибор. Осуществляя вероятностную и статистическую обработку векторов  $\xi$  внутри каждого класса  $R_i$ , можно описать каждый класс с помощью эталонного вектора или функции плотности распределения. Таким образом, в процессе обучения устанавливается, какие векторы формируют класс с ресурсом  $T_1$ , а какие с ресурсом  $T_2$  и т. д.

После описания классов возникает задача построения математической модели распознавания, которая позволила бы на основании текущей информации о приборе отнести его к тому или иному классу. Решение этой задачи сводится к построению разделяющей функции, т. е. уравнения поверхности, разделяющей классы  $R_1$  в  $k$ -мерном пространстве. Если разделяющая функция будет найдена, то распознающий алгоритм на основе информации о распознаваемом объекте с учетом характера разделяющей функции относит этот объект к тому или иному классу либо дает отказ от распознавания.

Существует несколько методов построения разделяющей функции: метод зон, метод максимального правдоподобия, метод потенциальных функций, метод дискриминантного анализа и ряд других. Выбор того или иного метода во многом определяется постановкой задачи, наличием априорной информации, информативностью выбранных параметров и другими соображениями.

К наиболее универсальным следует отнести метод потенциальных функций и метод дискриминантного анализа. Метод потенциальных функций базируется на гипотезе, что если классы  $R_1$  и  $R_2$  в пространстве параметров не пересекаются, то существует по крайней мере одна разделяющая эти классы функция. Разделяющая функция аппроксимируется с помощью разложения ее в ряд по известной системе функций. При реализации этого метода решающее правило может быть представлено в виде [Л. 53]

$$d = \text{sign} \sum_{i=1}^n c_i \varphi_i(\xi),$$

где  $d$  — ответ распознающей системы о принадлежности объекта к тому или иному классу;  $\varphi_i(\xi)$  — система заранее известных функций;  $c_i$  — заранее неизвестные коэффициенты, подлежащие определению в процессе обучения.

Разделяющие поверхности можно описать также некоторыми скалярными функциями  $g(\xi)$ , где  $\xi = \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  — вектор параметров прибора. Эти функции называются дискриминантными и выбираются таким образом, чтобы для всех  $\xi \in R_\lambda$  функция  $g_\lambda(\xi)$  принимала наибольшее значение по сравнению с другими дискриминантными функциями. Если дискриминантные функции непрерывны на разделяющих поверхностях, то поверхность, разделяющая смежные классы  $R_1$  и  $R_2$ , определяется уравнением

$$g_1(\xi) - g_2(\xi) = 0.$$

Чтобы выяснить, к какому классу следует отнести распознаваемый прибор, необходимо определить, какая из функций  $g_1(\xi)$  и  $g_2(\xi)$  больше. Это можно сделать, определив знак дискриминантной функции  $g(\xi) = g_1(\xi) - g_2(\xi)$ . Если  $g(\xi) > 0$ , то прибор принадлежит к классу  $R_1$ , если  $g(\xi) < 0$ , то к  $R_2$ .

## 12. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

При оценке индивидуальной надежности, например срока службы СПП, эффективным методом является параметрическое прогнозирование, которое заключается в построении некоторой математической модели, позволяющей предсказать изменение состояния прибора в будущем на основании результатов измерения его параметров в прошлом.

При прогнозировании можно рассматривать два подхода:

- 1) прогнозирование на основании измерений некоторых параметров, прямо или косвенно характеризующих процесс отказа;
- 2) прогнозирование на основании достаточно строгих математических моделей, отражающих физико-химические процессы деградации приборов.

В первом случае строится некоторая статистическая модель процесса деградации. Во втором случае процесс отказа описывается системой дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. Все задачи первого типа в конечном итоге сводятся к одной — определению корреляционных связей между характером процесса в контролируемый период времени и характером процесса в последующем. Оценке, как правило, подлежит время, при котором прогнозируемый процесс выходит за допустимую границу.

При индивидуальном прогнозировании обычно применяется дискретный контроль параметров. В этом случае информацию о состоянии СПП можно представить двумерной матрицей

$\xi$	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$\dots$	$t_n$
$\xi_1$	$\xi_{10}$	$\xi_{11}$	$\xi_{12}$	$\dots$	$\xi_{1n}$
$\xi_2$	$\xi_{20}$	$\xi_{21}$	$\xi_{22}$	$\dots$	$\xi_{2n}$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$\xi_m$	$\xi_{m0}$	$\xi_{m1}$	$\xi_{m2}$	$\dots$	$\xi_{mn}$

Параметры, входящие в матрицу, с точки зрения прогнозирования не все имеют одинаковую значимость. Поэтому на предварительных этапах работы требуется тем или иным способом оценить их информативность. Это можно сделать либо чисто математическими методами, либо путем изучения их связи с физико-химическими процессами деградации.

Успех прогнозирования во многом определяется выбором математической модели процесса. В общем случае состояние объекта исследования можно характеризовать вектором в  $m$ -мерном пространстве координат-параметров. В процессе выработки ресурса происходит изменение положения конца вектора. Прогнозирование заключается в построении по результатам текущих измерений аналитического описания траектории движения вектора и определения момента его пересечения гиперповерхности допустимых значений параметров. Решение этой задачи получается достаточно сложным и вряд ли может быть рекомендовано для инженерной практики. Более приемлемым может оказаться метод обобщенного параметра, идея которого состоит в замене многопараметрического процесса одномерной функцией, численные значения которой зависят от измеряемых параметров. Обобщенный параметр может не иметь конкретного физического смысла, так как является математическим выражением целого ряда различных по физической природе величин.

В инженерной практике прогнозирование часто осуществляют на основе результатов измерения одного определяющего параметра. Тогда задача сводится к прогнозированию одномерных временных рядов. К этому случаю сводится и многомерный процесс, если воспользоваться обобщенным параметром. При такой постановке основ-

ной задачей является построение такого математического описания, которое давало бы минимальную ошибку прогноза. А это будет определяться тем, насколько точно будут найдены неизвестные коэффициенты прогнозирующей модели. Наиболее часто для построения прогнозирующих моделей применяются различные интерполяционные полиномы. В общем виде такой полином описывается выражением

$$W(t) = \sum_{l=1}^m A_l F(x, t),$$

$$W(t) = A_l F(x, t),$$

где  $F(x, t)$  — базовые функции;  $A_l$  — степенные коэффициенты.

В качестве базовых можно использовать целый ряд функций: интерполяционную функцию Лагранжа, ортогональный полином Чебышева, преобразованный ряд Тейлора и т. д. Иногда удается для описания процесса использовать некоторые элементарные и эмпирические функции типа линейной, квадратичной, показательной, экспоненциальной, степенной. Все эти функции путем преобразования легко сводятся к линейным. Оценки входящих в них неизвестных коэффициентов находятся методом наименьших квадратов.

К числу наиболее важных показателей качества прогнозирования относится точность, которая характеризуется разницей между прогнозируемой и действительной величинами. Ясно, что абсолютно точный прогноз получить невозможно, а реальную ошибку можно оценить только ориентировочно. В общем случае ошибка зависит от нескольких факторов:

- 1) от степени изученности прогнозируемого процесса;
- 2) от количества и качества произведенных замеров, по которым строится прогнозирующая зависимость;
- 3) от выбранной математической модели прогнозирования;
- 4) от кратности прогноза.

Весьма эффективным методом прогнозирования количественных характеристик надежности может оказаться сочетание математического моделирования процессов с физическим экспериментом. Корректировка модели по результатам текущих измерений позволит приблизить математическое описание процесса к реальности и, следовательно, приведет к увеличению точности и кратности прогнозирования.

К прогнозированию надежности СПП тесно примыкают различные методы отбраковки потенциально ненадежных приборов (ПНП). Потенциально ненадежные приборы являются результатом различных неконтролируемых отклонений в технологическом процессе, внутренних дефектов в применяемых материалах и многих других причин. Все это приводит к тому, что часть приборов имеет явные аномальные отклонения в своих характеристиках, в том числе и надежностных. Естественно, что такие приборы должны быть отбракованы до их поступления потребителю. Поэтому в основе всех методов отбраковки лежит представление о дефектности, которая может быть выявлена с помощью какого-либо внешнего воздействия и которая обязательно должна проявиться в параметрах и характеристиках прибора.

С учетом конструктивно-технологических особенностей и режимов эксплуатации СПП можно выделить три группы типичных причин отказов:

1) причины, обусловленные эффектами на поверхности полупроводниковой структуры;

2) причины, обусловленные объемными дефектами кремниевой пластины;

3) дефекты омических контактов.

Цель методов отбраковки — обнаружить эти дефекты в готовом приборе.

По способу выявления приборов с дефектами все методы отбраковки можно свести к двум группам:

1) методы, использующие предварительную тренировку приборов (как правило разрушающие);

2) косвенные, неразрушающие методы, не требующие предварительной тренировки (методы электрофизической диагностики).

Наиболее разработанным методом, входящим в первую группу, является так называемый метод выжигания ПНП. Его сущность состоит в том, что приборы подвергаются предварительной тренировке при нагрузках, в качественном и количественном отношении близких к эксплуатационным. При этом происходит «выжигание» ПНП. Неразрушающие методы электрофизической диагностики основаны на наличии некоторых измеряемых параметров и характеристик СПП, которые однозначно характеризуют тот или иной дефект или группу дефектов. Эффективность методов во многом определяется степенью изученности характера дефектов и их связи с контролируемыми стандартизованными и нестандартными параметрами СПП. Достоинством методов электрофизической диагностики является то, что результаты отбраковки позволяют не только повысить надежность проверяемой партии приборов, но и соответствующим образом скорректировать технологический процесс.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность в технике. Термины. ГОСТ 13377-75. М., 1969, с. 1.
2. Анализ условий работы силовых полупроводниковых приборов в схемах преобразователей. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1972, вып. 10, 11, с. 30—32.
3. Лабунцов В. А., Тугов Н. М. Классификация тиристоров по электрическому режиму эксплуатации. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1974, вып. 6, с. 7—9.
4. Маликов И. М. Надежность судовой электронной аппаратуры и систем автоматического управления. Л., «Судостроение», 1967. 315 с.
5. Аппаратура и методы контроля параметров силовых полупроводниковых вентиляей. М., «Энергия», 1971. 184 с. Авт.: В. М. Бардин, Л. Г. Моисеев, Ж. Г. Сурочан, О. Г. Чебовский.
6. Управляемые полупроводниковые вентили. М., «Мир», 1967. 455 с. Авт.: Ф. Джентри, Ф. Гутцвиллер, Н. Голоныяк, Э. фон Застров.
7. Дерменжи П. Г., Евсеев Ю. А. О процессах, протекающих в неключенной области *p-n-p*-структуры большой площади в период нарастания анодного тока. — «Физика и техника полупроводников», 1969, т. 3, вып. 10, с. 1452—1454.
8. Бурханов Ш. Д., Горохов В. А., Родов В. И. Об области максимальной кумуляции тока при включении тиристора по управляющему электроду. — «Известия вузов. Радиоэлектроника», 1969, т. 12, № 12, с. 1421—1423.
9. Арро И., Ашкинази Г., Румма К. Новая методика и аппаратура для исследования начального этапа процесса включения *p-n-p*-структур. — «Изв. АН Эстонской ССР. Физика — математика», 1972, № 2, с. 169—173.
10. Молибог Н. П., Шмелев Е. В. Разработка и исследование процесса включения мощных импульсных тиристоров. — В кн.: Некоторые вопросы производства и применения средств силовой преобразовательной техники в народном хозяйстве. М., Информэлектро, 1970, с. 33—43.
11. Исследование начального этапа процесса включения тиристоров путем регистрации рекомбинационного излучения. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1970, вып. 5, с. 15—16. Авт.: А. Ф. Белов, В. Б. Воронков, И. В. Грехов, Н. Н. Крюкова.
12. Чесноков Ю. А., Шмелев В. В. Эффект  $di/dt$  и температура перегрева структуры тиристора. — В кн.: Числовые полупроводниковые приборы. М., Информэлектро, 1969, с. 65—39.
13. Исследование причин отказов тиристоров при работе в импульсном режиме. — «Полупроводниковые приборы в технике электротехники».

тросвязи», 1970, № 6, с. 145—156. Авт.: Ш. Д. Бурханов, А. М. Баширов, В. В. Гаршенин и др.

14. Крюкова Н. Н. Исследование физических процессов в тиристорах при включении и кратковременной перегрузке током большой амплитуды. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, 1970 (ЛФТИ).

15. Лабунцов В. А., Тугов Н. М. Параметризация эффекта локализации энергии в тиристорах. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1971, № 19, с. 6—7.

16. Лабунцов В. А., Тугов Н. М. Экспериментальное исследование эффекта локализации энергии в тиристорах. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1971, № 18, с. 6—8.

17. Грехов И. В., Линийчук И. А., Шулекин А. Ф. Перемещение токопроводящего канала по площади *p-n-p-n*-структуры. — «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, вып. 5, с. 960—963.

18. Эпштейн Л. Д. Некоторые особенности работы тиристорov при повышенных плотностях тока. — В кн.: Применение тиристорных преобразователей в электроэнергетике, 1972, ч. 1, вып. 3, с. 165—171.

19. Чесноков Ю. А. Исследование предельно допустимых режимов работы тиристорov и разработка конструктивных мероприятий по повышению стойкости приборов к токам нагрузки. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1969 (ВЭИ).

20. Чесноков Ю. А., Рабинерсон А. А., Челноков В. Е. Определение температуры перегрева структуры тиристора в импульсных режимах методом электротепловой аналогии. — В кн.: Силовые полупроводниковые приборы. М., Информэлектро, 1969, с. 79—90.

21. Механические напряжения в слое полупроводника при прохождении мощного импульса тока через полупроводниковый вентиль. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1970, № 4, с. 11—16. Авт.: И. В. Грехов, О. А. Киреев, Э. В. Палко, А. И. Уваров.

22. Чесноков Ю. А. Определение термических напряжений в тиристорах и их стойкости к перегрузке прямым током. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1970, № 2, с. 8—13.

23. Тугов Н. М. Переходный процесс включения тиристорov в режиме больших токов. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1974, № 7, с. 6—10.

24. Чесноков Ю. А., Евсеев Ю. А. Оценка импульсной стойкости силовых полупроводниковых приборов методом неразрушающих испытаний. — В кн.: Некоторые вопросы производства и применения средств силовой преобразовательной техники в народном хозяйстве. Ч. 2, М., Информэлектро, 1970, с. 3—12.

25. Чесноков Ю. А. Влияние толщины кремниевой пластины тиристорov на их работоспособность в режиме короткого замыкания. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1973, № 3, с. 5—7.

26. Чесноков Ю. А., Евсеев Ю. А. Влияние неоднородности структуры на эффект шнурования прямого тока. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1970, № 3, с. 11—15.

27. **Чесноков Ю. А.** Параметр  $I^2t$  силовых полупроводниковых приборов. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1973, № 4, с. 12—15.

28. **Остренко В. С.** Стойкость вентиля и тиристоры к воздействию токов короткого замыкания. — «Горная электромеханика и автоматика», 1971, вып. 19, с. 31—35.

29. **Алексеев А. Е., Гришуков Л. С., Ситченко Л. С.** Исследование перегрузочных характеристик силовых полупроводниковых вентилях. — «Сборник трудов ЛИИЖТ», 1972, вып. 336, с. 84—90.

30. **Козлов Ю. И., Чесноков Ю. А.** Влияние толщины сплава в соединении кремниевого диска с термокомпенсатором на стойкость вентиля в режиме перегрузки импульсом прямого тока. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1971, № 20, с. 9—13.

31. **Долгих В. А., Лавров Н. Н., Сальман М. А.** Испытания полупроводниковых вентилях на перегрузочную способность по току в открытом состоянии. — «Передача энергии постоянным током. Труды НИИПТ», 1972, вып. 18, с. 57—66.

32. **Говард Г., Манко Г.** Пайка и припой, М., «Машиностроение», 1968, с. 79.

33. **Механизм образования паяных соединений в силовых полупроводниковых приборах и технологические пути повышения их надежности.** — В кн.: Некоторые вопросы производства и применения средств силовой преобразовательной техники в народном хозяйстве. М., Информэлектро, 1970, с. 114—119. Авт.: Д. П. Ловцов, В. М. Рюмшин, И. М. Семенов и др.

34. **Пузаков В. И., Булкин А. Д., Щелконогов В. Я.** Изменение свойств контактных сплавов силовых полупроводниковых вентилях в процессе циклирования. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1973, № 2, с. 4—6.

35. **Исследование некоторых физико-механических свойств припоев в процессе термоциклирования.** — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1970, № 3, с. 8—10. Авт.: П. Я. Агеев, В. И. Ивлев, Л. Н. Крылов и др.

36. **Большанина М. А., Елсукова Т. Ф.** Влияние легирования на время жизни и структуру свинцовых сплавов при усталостных испытаниях. — «Изв. вузов. Физика», 1967, № 12, с. 7—13.

37. **Тимошенко С. П.** Сопротивление материалов. Ч. 2. М., Физматгиз, 1960. 379 с.

38. **Кордонский Х. Б., Корсаков А. В.** Расчеты усталостной долговечности методами теории вероятностей. — «Труды Рижского института инженеров воздушного флота», 1961, вып. 5, с. 15—18.

39. **Шаламов Б. С., Булкин А. Д., Бардин В. М.** Надежность вентилях при работе в циклическом режиме. — «Силовая полупроводниковая техника», М., Информстандартэлектро, 1967, вып. 8, с. 2—10.

40. **Чесноков Ю. А.** Расчет циклоустойкости силовых полупроводниковых приборов с паяными контактными соединениями в различных режимах. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1973, вып. 3, с. 4—6.

41. **Тиристоры** (Технический справочник). Пер. с англ. М., «Энергия», 1971. 560 с.

42. **Бардин В. М.** Критерии усталостной прочности силовых вентилях. — В кн.: Полупроводниковая преобразовательная техника. Саранск, Мордовский государственный ун-т, 1970, с. 45—50.

43. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., Наука, 1971. 576 с.

44. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М., «Советское радио», 1962. 552 с.

45. Перотте А. И., Карташов Г. Д., Цветаев К. Н. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. М., «Советское радио», 1968, с. 45, 80—81.

46. Алексеев А. Е., Гришуков Л. С., Ситченко Л. С. Характеристики циклоустойчивости полупроводниковых вентилях в преобразовательных установках. — «Электротехника», 1974, № 1, с. 4—6.

47. Тепман И. А., Бардин В. М., Сурип А. В. Эксплуатационная надежность силовых полупроводниковых вентилях. — «Силовая полупроводниковая техника». М., Информстандартэлектро, 1967, вып. 8, с. 17.

48. Седакин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности. — «Изв. АН СССР. Техническая кибернетика», 1966, № 3, с. 16—18.

49. Пешес Л. Я., Степанова М. Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. Минск, «Наука и техника», 1972. 263 с.

50. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., «Наука», 1971. 283 с.

51. Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электромеханике. М., «Энергия», 1975. 184 с.

52. Гаскаров Д. В., Голинкевич Т. А., Мозгалевский А. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Советское радио», 1974. 223 с.

53. Энциклопедия кибернетики. Т. 2. Киев, «Советская Энциклопедия», 1974, с. 107, 194, 265—266.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<i>Глава первая</i>	
<b>Основные вопросы надежности силовых полупроводниковых приборов</b>	
1. Условия и особенности работы СПП в преобразовательных устройствах . . . . .	5
2. Общие вопросы надежности СПП . . . . .	8
<i>Глава вторая</i>	
<b>Физические основы надежности силовых полупроводниковых приборов</b>	
3. Особенности работы тиристоров при включении . . . . .	14
4. Работа СПП при токовых перегрузках . . . . .	25
5. Механизм разрушения СПП при тепловом циклировании . . . . .	44
<i>Глава третья</i>	
<b>Методические основы определения надежности силовых полупроводниковых приборов</b>	
6. Подготовка испытаний . . . . .	55
7. Испытательное оборудование . . . . .	69
8. Некоторые результаты испытаний СПП . . . . .	74
<i>Глава четвертая</i>	
<b>Некоторые перспективные методы исследования надежности силовых полупроводниковых приборов</b>	
9. Основы ускоренных испытаний . . . . .	80
10. Факторное планирование эксперимента . . . . .	83
11. Индивидуальное прогнозирование надежности . . . . .	86
12. Индивидуальное параметрическое прогнозирование . . . . .	91
Список литературы . . . . .	91

**Вадим Михайлович Бардин**

**НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ**

Редактор Н. М. Тугов

Редактор издательства Л. А. Решмина

Обложка художника Н. Т. Ярешко

Технический редактор М. П. Осипова

Корректор Г. А. Полонская

ИБ № 886

Сдано в набор 20.02.78

Подписано к печати 28.04.78

Т-08099

Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>

Бумага типографская № 2

Гарн. шрифта

литературная

Печать высокая

Усл. печ. л. 5,04

Уч.-изд. л. 5,50

Тираж 12 000 экз.

Зак. 558

Цена 30 к.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10  
Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

