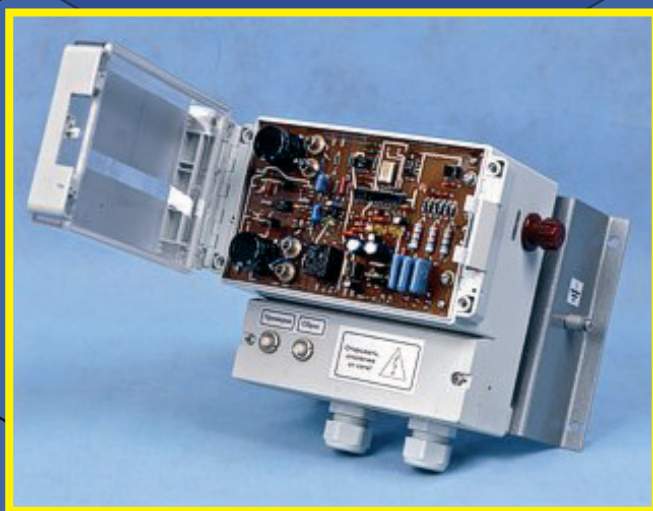


Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт энергетики и электротехники  
Кафедра «Промышленная электроника»

В.А. Медведев

# КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Электронное учебное пособие



© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2015

ISBN 978-5-8259-0842-7

УДК 621.314.632

ББК 32.852

Рецензенты:

д-р пед. наук, канд. техн. наук, заслуженный работник  
высшей школы Российской Федерации, профессор кафедры  
«Сервис технических и технологических систем» Поволжского  
государственного университета сервиса *Н.П. Бахарев*;  
канд. техн. наук, доцент Тольяттинского государственного  
университета *В.П. Певчев*.

Медведев, В.А. Конструирование преобразователей : электронное учеб. пособие / В.А. Медведев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 1 оптический диск.

В учебном пособии рассмотрены общие вопросы конструирования электронных устройств, методы расчета тепловых режимов работы полупроводниковых приборов на охладителях при различных видах охлаждения, особенности конструирования и компоновки отдельных узлов полупроводниковых преобразователей, средства и схемы защиты преобразователей.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 210100.62 Электроника и нанoeлектроника, всех форм обучения при изучении ими дисциплин «Конструирование преобразователей» и «Конструкции электронных устройств».

Текстовое электронное издание

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Reader.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2015

Редактор *О.И. Елисеева*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *Г.В. Карасева*

Дата подписания к использованию 18.12.2014.

Объем издания 2,4 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-72-13.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14  
тел. 8(8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	9
1.1. Классификация силовых полупроводниковых преобразователей .....	9
1.2. Общие требования, предъявляемые к конструкциям силовых полупроводниковых преобразователей .....	13
1.3. Унификация узлов полупроводниковых преобразователей .....	14
1.4. Технологичность конструкции полупроводниковых преобразователей .....	16
1.5. Надежность полупроводниковых преобразователей .....	17
1.6. Техническая эстетика и инженерная психология .....	21
1.7. Основные стадии разработки нового изделия .....	22
1.8. Виды конструкторской документации .....	24
2. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....	29
2.1. Способы передачи тепла .....	29
2.2. Основные виды тепловых потерь в силовых полупроводниковых преобразователях .....	45
2.3. Классификация способов охлаждения полупроводниковых преобразователей .....	49
2.4. Конструирование и тепловой расчет радиаторов и мощных полупроводниковых приборов при естественном воздушном охлаждении .....	54
2.5. Конструирование и тепловой расчет радиаторов систем принудительного воздушного охлаждения .....	68
2.6. Конструирование систем жидкостного охлаждения .....	75
2.7. Теплообменники для жидкостного охлаждения .....	80
2.8. Испарительное охлаждение .....	84

3. КОНСТРУИРОВАНИЕ УЗЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....	92
3.1. Компоновка силовых полупроводниковых преобразователей и их основных элементов .....	92
3.2. Силовые блоки .....	99
3.3. Блочные системы управления .....	113
3.4. Дроссели насыщения .....	123
3.5. Силовая ошиновка .....	126
3.6. Шкафы силовых полупроводниковых преобразователей .....	129
4. ЗАЩИТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ .....	135
4.1. Отказы полупроводниковых приборов, приводящие к ава- рийным режимам работы, и требования к их системам защиты	135
4.2. Средства защиты полупроводниковых преобразователей .....	136
4.3. Схемы защиты полупроводниковых преобразователей ...	144
4.4. Датчики защиты .....	150
Библиографический список .....	159

## ВВЕДЕНИЕ

*Силовые полупроводниковые преобразователи* – это статические устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии одного вида в электрическую энергию другого вида. В их главных цепях используются силовые полупроводниковые приборы, а основным показателем качества является коэффициент полезного действия (КПД). Практически вся электрическая энергия в настоящее время вырабатывается и передается в виде трехфазного переменного тока постоянной частоты. Для обеспечения возможности регулирования и повышения КПД при использовании этой электрической энергии возникает необходимость преобразовывать ее в электрическую энергию постоянного тока или переменного тока регулируемой частоты. Электрическую энергию, получаемую от электрохимических источников, очень часто приходится регулировать, стремясь сделать это с наименьшими потерями.

Развитие полупроводниковых приборов, которое привело в 60-е годы к появлению на рынке силовых кремниевых диодов и тиристоров, позволило создать силовые полупроводниковые преобразователи, которые являются почти идеальным средством преобразования электрической энергии. Схемные решения силовых полупроводниковых преобразователей быстро развивались в течение последних двадцати лет и в настоящее время практически стабилизировались. Определенный прогресс достигнут в последнее время в схемных решениях управляющих и регулирующих цепей за счет применения микропроцессоров и оптоэлектрических элементов. В силовых цепях начинают применяться запираемые тиристоры, симметричные тиристоры, высокочастотные приборы.

Что же касается конструктивных решений преобразователей, то они пока далеко не достигли такой степени развития, как схемные решения. Конструктивные решения силовых полупроводниковых преобразователей очень разнородны, не унифицированы и малоэффективны. Конструкция силовых полупроводниковых преобразователей имеет определенные специфические черты, которые отличают ее от конструкций другого электротехнического и электронного оборудования. Это большое количество разнородных элементов,

относительно малая серийность, необходимость согласованности с оборудованием, для которого преобразователи предназначены.

Основными чертами преобразователей являются силовые, а также управляющие и регулирующие цепи.

Силовые цепи включают электрически соединенные между собой силовые полупроводниковые приборы (тиристоры, транзисторы, диоды), защитные и коммутационные аппараты, резисторы, конденсаторы, дроссели и трансформаторы, контактные зажимы. К силовым цепям относятся также питающие и выходные сборные шины, кабели, силовые розетки и вилки.

В силовую часть входят и узлы системы охлаждения, такие как охладители (радиаторы), вентиляторы, воздухопроводы, насосы, теплообменники, фильтры, вентили и т. д. Всё это конструктивно объединяется несущим каркасом или шкафом.

Управляющие и регулирующие цепи, а также цепи контроля состоят из маломощных трансформаторов, дискретных и интегральных полупроводниковых элементов, пассивных элементов, миниатюрных реле, переходных контактов, устанавливаемых чаще всего на печатных платах. Платы устанавливаются в кассетах или закрепляются в преобразователях иными способами. К цепям контроля относятся устройства сигнализации, диагностики, датчики, измерительные приборы и т. д.

Большое количество очень разнородных элементов является причиной большого разнообразия вариантов схемных решений и конструктивных исполнений силовых полупроводниковых преобразователей. Малая серийность преобразователей в производстве вызвана тем, что они предназначены для разнообразных электроприводов и агрегатов как источники питания, а также для установок с очень разными значениями мощностей, токов, напряжений, диапазонов регулирования. В большинстве случаев справедливо правило, что чем больше мощность, тем меньше серийность производства. Следовательно, речь идет о широком ассортименте изделий, к чему должны быть приспособлены технологическая подготовка и организация производства. Эта характерная черта силовых полупроводниковых преобразователей требует, с одной стороны, высокой степени унификации узлов и деталей, чтобы преобразователи

различных типов могли выпускаться на базе небольшого числа универсальных блоков, с другой – заставляет стремиться к увеличению серийности производства преобразователей путем специализации их разработки и производства.

Необходимость согласованности преобразователей с оборудованием, для которого они предназначены, требует выпуска преобразователей с различной степенью защиты и различных исполнений для разных климатических условий. С этим связано и стремление встроить полупроводниковый преобразователь в единую с основным оборудованием конструкцию, например, в обрабатывающий станок. Это приводит к большому числу конструктивных вариантов даже при одинаковых или похожих схемных решениях.



# 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

## 1.1. Классификация силовых полупроводниковых преобразователей

Классификация силовых полупроводниковых преобразователей может быть проведена по целому ряду признаков:

- назначению (основной функции, выполняемой преобразователем);
- области применения;
- способу охлаждения силовых полупроводниковых приборов;
- мощности;
- конструктивным особенностям и др.

В зависимости от назначения силовые полупроводниковые преобразователи можно разделить на три основные группы.

1. Выпрямители, преобразующие переменный ток в постоянный. Их, в свою очередь, подразделяют по способу регулирования постоянного напряжения:

- на выпрямители с нерегулируемым напряжением на выходе;
- выпрямители с регулируемым напряжением на выходе;
- выпрямители со стабилизированным напряжением на выходе.

2. Инверторы, преобразующие постоянный ток в переменный с заданной или регулируемой частотой. Инверторы подразделяются по режиму работы на две подгруппы:

- 1) инверторы, работающие на сеть переменного тока большей по сравнению с ними мощности, – ведомые сетью инверторы;
- 2) инверторы, работающие на сеть, не содержащую генераторов переменного тока, – автономные инверторы.

3. Преобразователи частоты, преобразующие переменный ток одной частоты в переменный ток другой заданной или регулируемой частоты. Преобразователи частоты так же, как и инверторы, разделяются на две подгруппы:

- 1) ведомые преобразователи частоты, которые связывают две сети переменного тока, в каждой из которых имеются синхронные генераторы;

2) автономные преобразователи частоты – преобразователи, работающие на сеть, не содержащую других источников переменного тока.

По способу охлаждения силовых вентилях силовые полупроводниковые преобразователи разделяются на следующие группы:

- с естественным воздушным охлаждением;
- принудительным воздушным охлаждением воздухом, взятым непосредственно из окружающей среды или из специального устройства, понижающего температуру охлаждающего воздуха;
- естественным жидкостным охлаждением;
- принудительным жидкостным охлаждением;
- естественным испарительным охлаждением;
- принудительным испарительным охлаждением.

Систематизация преобразователей в соответствии с мощностью не имеет в литературе единых нормализованных критериев и используется редко. В обычной практике и с учетом специфических особенностей преобразователей в отдельных диапазонах мощностей можно разделить силовые преобразователи на следующие группы:

- малой мощности – до 10 кВт;
- средней мощности – от 10 до 250 кВт;
- большой мощности – от 250 до 1000 кВт;
- сверхбольшой мощности – свыше 1 МВт.

Преобразователи малой мощности – до 10 кВт – имеют в большинстве случаев компактное или встроенное исполнение и специальное целевое назначение. Серийность их изготовления относительно велика. В последнее время в качестве основных элементов силовых цепей в них используются силовые транзисторы.

Преобразователи средней мощности – от 10 до 250 кВт – являются наиболее распространенными. Они выполняются конструктивно в виде шкафа с использованием унифицированных блоков и узлов. В них применяются тиристоры и диоды со штыревым корпусом и интегральные силовые полупроводниковые модули с номинальным током до 250 А. Они обычно имеют естественное или принудительное воздушное охлаждение и размещаются в шкафах со стандартизованными размерами. Питаемые от них устройства могут

находиться на расстоянии десятков и сотен метров, причем часто используются дистанционное управление и контроль.

Преобразователи большой мощности – от 250 кВт до 1 МВт – конструктивно выполняются в виде шкафов. В них используются таблеточные тиристоры и диоды, часто с водяным охлаждением. Они обычно имеют специальное назначение, например: преобразователи для тяговых электродвигателей, для прокатных станков, для возбуждения синхронных машин, для транспортеров, для индукционного нагрева и др. Они часто поставляются совместно с технологическим оборудованием, для питания которого предназначены. В последнее время такие преобразователи снабжаются микропроцессорным управлением или же управляются от той же управляющей ЭВМ, что и вся технологическая линия или весь производственный процесс.

Преобразователи сверхбольшой мощности – свыше 1 МВт – всегда имеют специальное назначение. В них часто используются параллельное и последовательное соединения таблеточных полупроводниковых приборов с водяным или испарительным охлаждением. Они применяются в электроприводах предельной мощности, например, в электроприводах вращающихся цементных печей, мельниц, шахтных подъемников, прокатных станков, локомотивов, а также для линий электропередачи сверхвысокого напряжения, в статических конденсаторах и для установок индукционного нагрева. Конструктивно они выполняются в виде ряда шкафов или в виде самостоятельной части строительной конструкции – в специальном климатизированном зале.

В соответствии с особенностями конструкции преобразователи можно разделить на встраиваемые, компактные, шкафы и камерные.

Встраиваемый преобразователь представляет собой комплектное устройство, которое обычно без всякого защитного кожуха устанавливается и закрепляется внутри оборудования, для которого преобразователь предназначен. Электрические соединения силовых и управляющих цепей обеспечиваются винтовыми зажимами или электрическими разъемами. Встраиваемые преобразователи используются в обрабатывающих и текстильных станках, подъемниках, транспортных механизмах и др. Преобразователь в этом случае является неотъемлемой составной частью этого оборудования,

он приспособлен к нему своей формой, способом охлаждения, степенью защиты и климатическим исполнением.

Компактная конструкция преобразователя характерна тем, что конструктивные решения ее механической и электрической частей направлены на возможно более тесное размещение всех его элементов и узлов с учетом допустимых расстояний между токоведущими частями. Преобразователь выполняется в виде единой конструкции и закрывается кожухом — металлическим или изоляционным. Компактный преобразователь является самостоятельным изделием, предназначенным для крепления на стене, в распреустройстве или на оборудовании, которое он питает. К ним относятся зарядные устройства, небольшие преобразователи частоты для питания асинхронных двигателей, импульсные преобразователи постоянного тока и др.

Конструкция преобразователей типа шкафа чаще всего используется для преобразователей средней или большой мощности. Шкафы имеют в большинстве случаев стандартизованные размеры и форму, а также унифицированную технологию изготовления. Управляющие цепи конструктивно выполняются на больших платах и размещаются на дверях шкафа или в кассете, но всегда отдельно от силовых цепей. Шкафы обычно имеют принудительное воздушное охлаждение с нагнетательной или вытяжной вентиляцией. Водяное охлаждение используется, как правило, в преобразователях большой мощности.

Преобразователи сверхбольшой мощности выполняются камерной конструкции. При таком конструктивном решении защитная оболочка полностью отсутствует, а оборудование размещается в электропомещениях (камерах), которые специально строятся для этого преобразователя, или в помещении распреустройств вместе с другим электрооборудованием. Так выполняются преобразователи для передачи электроэнергии сверхвысоким напряжением постоянного тока и преобразователи для получения сверхбольших токов в электрохимии. Преобразователи на сверхбольшие токи устанавливаются в непосредственной близости от потребителей этого тока, чтобы длина токопроводов сверхбольших токов была минимальной. При этом уменьшается расход цветных металлов и снижаются потери энергии в токопроводах.

## 1.2. Общие требования, предъявляемые к конструкциям силовых полупроводниковых преобразователей

Требования, предъявляемые к конструкциям полупроводниковых преобразователей, весьма разнообразны и зависят от назначения и условий эксплуатации. Однако существуют общие требования, которым должны удовлетворять все полупроводниковые преобразователи.

1. Каждый элемент преобразователя должен надежно работать в нормальном режиме, безотказно выполнять свои функции в предусмотренных ненормальных режимах (перегрузка по току, короткое замыкание, понижение напряжения ниже номинального значения) и быстро восстанавливать работоспособность после отключения.

2. При номинальном режиме работы преобразователя температура нагрева токоведущих частей, изоляционных и конструкционных деталей не должна превосходить значений, устанавливаемых для данного элемента и его деталей соответствующими стандартами.

В табл. 1.1 приведены регламентируемые ГОСТ классы нагревостойкости изоляционных деталей.

Таблица 1.1

Классы нагревостойкости изоляции

Класс нагревостойкости изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
Максимально допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180

3. Токоведущие цепи преобразователя должны выдерживать без каких-либо остаточных деформаций, препятствующих дальнейшей работе, термические и электродинамические перегрузки, возможные в процессе его эксплуатации.

4. Изоляция каждого элемента преобразователя должна учитывать возможные перенапряжения, которые имеют место при работе в конкретной цепи, с некоторым запасом, учитывающим ухудшение свойств изоляции в процессе эксплуатации из-за старения и осадения пыли, копоти и влаги.

5. Полупроводниковый преобразователь должен иметь высокую степень заводской готовности, то есть быть выполненным в виде

укрупненных блоков, требующих минимума монтажных и наладочных работ на объектах.

6. Конструкция каждого элемента преобразователя должна обеспечивать удобство обслуживания с минимальными затратами на ремонт и последующую наладку.

7. Каждый полупроводниковый преобразователь должен по возможности иметь наименьшие габариты, массу и стоимость. Его конструкция должна быть технологична, допускать применение автоматизированных производственных процессов при изготовлении и обеспечивать благоприятные условия для эксплуатации.

8. Полупроводниковый преобразователь должен быть функционально целесообразным, эстетически выразительным, технически совершенным и экологически оправданным.

### **1.3. Унификация узлов полупроводниковых преобразователей**

Унификация является наиболее распространенным и эффективным методом повышения производительности труда и снижения затрат при изготовлении и эксплуатации. Под *унификацией* понимается рациональное сокращение числа типов, видов и размеров изделий одинакового функционального назначения. В основе ее лежит взаимозаменяемость, обеспечивающая бесподгонную сборку независимо изготовленных, сопрягаемых узлов и деталей. При проведении унификации необходимо выполнить:

- стандартизацию размеров, позволяющую наиболее полно использовать установочные, присоединительные и габаритные размеры изделий, входящих в комплект полупроводникового преобразователя;
- нормализацию конструкций, позволяющую использовать детали и узлы, заимствованные из различных нормалей и государственных стандартов;
- построение размерно-параметрических рядов, дающее возможность определить оптимальное количество унифицируемых параметров.

Следует отметить, что унификация не всегда дает непосредственный экономический эффект. Объясняется это тем, что при

проведении унификации узлов и деталей пользуются обычно принципом избыточного запаса. Это значит, что на изделия меньших типоразмеров устанавливаются, например, детали и узлы большей прочности, чем требуется, т. е. характерные для изделий более крупных типоразмеров. Например, если для преобразователей на токи 1000, 1500 и 2000 А унифицируется токоведущая деталь, то для перечисленных изделий приходится брать деталь, рассчитанную на 2000 А. Поэтому целесообразно учитывать общий экономический эффект, определяемый суммой технико-экономических показателей, наиболее характерных для каждого этапа создания унифицируемого узла и изделия, в котором этот узел применяется. В конечном счете унификация почти всегда дает выгоду, хотя подчас и трудно учитываемую в денежном выражении. Унификация дает следующие преимущества:

- сокращение количества типоразмеров, типоразмеров и разновидностей узлов и деталей, в том числе и запасных частей;
- ограничение сортамента материалов и полуфабрикатов;
- увеличение серийности выпуска деталей;
- уменьшение количества станков и видов инструмента;
- упрощение комплектации изделий;
- сокращение сроков конструирования;
- повышение технологичности изделия и снижение трудоемкости его изготовления;
- уменьшение себестоимости изделия.

Унификация осуществляется двумя путями:

- 1) выбором главного параметра (узла, детали) с целью замены имеющихся подобных параметров рассматриваемого ряда;
- 2) расчетом и разработкой нового главного параметра для замены ранее существовавших параметров рассматриваемого ряда.

Характерными особенностями параметров, подлежащих унификации, являются экономическая эффективность и экономическая целесообразность. Экономическая эффективность унифицируемых параметров определяется стоимостью покупных элементов схемы, изготовления узлов, материалов, трудоемкостью изготовления и сборки и т. д. Экономическая целесообразность характеризуется масштабом производства узлов и изделий с входящими в них элементами в настоящее время и их перспективностью.

## 1.4. Технологичность конструкции полупроводниковых преобразователей

Производство и эксплуатация полупроводниковых преобразователей так же, как и других изделий, могут обладать высокими технико-экономическими показателями лишь в том случае, если при их конструировании учтены принципы технологичности конструкции.

Понятие «*технологичность конструкции*» предусматривает конструирование, которое при соблюдении всех эксплуатационных качеств изделия (производительности, надежности, экономичности, удобства в обслуживании) обеспечивает минимальную трудоемкость изготовления, минимальные материалоемкость и себестоимость, а также возможность быстрого освоения серийного выпуска на базе применения современных высокопроизводительных методов изготовления деталей и сборки. Технологичность конструкции отрабатывается применительно к предполагаемому объему производства с учетом основных особенностей предприятия, на котором намечен выпуск проектируемого изделия.

При отработке конструкции на технологичность решаются следующие основные задачи.

1. Обоснованный выбор компоновочной схемы конструкции. Компоновка изделия, допускающая свободный доступ ко всем местам сочленения узлов и обеспечивающая удобство для монтажа, сокращает трудоемкость при изготовлении и уменьшает простой оборудования при эксплуатации.

2. Простота и целесообразность конструктивно-технологических решений узлов и деталей. Неоправданно сложная конструкция удорожает производство и затрудняет эксплуатацию и ремонт. При серийном производстве необходимо стремиться к упрощению конструкции узла за счет уменьшения количества деталей путем объединения их в одну, даже более сложной формы.

3. Построение изделия по блочно-узловому принципу. При этом сложные узлы расчленяются на части, обеспечивающие возможность параллельной независимой сборки, пооперационного контроля и наладки. Расчленение преобразователя на отдельные, функционально законченные узлы, а сложных узлов – на более простые сокращает цикл изготовления изделия благодаря организа-



ции параллельной сборки и монтажа, улучшает условия и качество выполнения работ, так как рабочие места можно специализировать и оснастить необходимым рабочим и измерительным инструментом. Кроме того, расчленение конструкции на простые узлы дает возможность применения их в различных преобразователях.

4. Взаимозаменяемость деталей и узлов полупроводникового преобразователя. Взаимозаменяемость имеет большое значение не только для обеспечения быстрой замены узлов и деталей, вышедших из строя в процессе эксплуатации, но и для возможности организации производительной и высококачественной поточной сборки преобразователей в процессе производства. Взаимозаменяемость бывает полной и неполной. При единичном и мелкосерийном производстве ограничиваются неполной взаимозаменяемостью по экономическим соображениям. Детали и узлы, имеющие повышенную интенсивность отказов, выполняются полностью взаимозаменяемыми. При серийном производстве полная взаимозаменяемость является основой для комплексной автоматизации всего технологического цикла, начиная от исходного материала, заготовок и полуфабрикатов и кончая готовыми деталями и узлами.

5. Унификация, нормализация и стандартизация материалов, деталей, узлов и комплектующей аппаратуры. Высокий процент использования освоенных ранее нормализованных узлов и деталей, малая номенклатура комплектующей аппаратуры являются одним из условий технологичности конструкции.

### **1.5. Надежность полупроводниковых преобразователей**

*Надежность* – это свойство изделия выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации при сохранении значений основных параметров в заданных пределах. Надежность зависит от количества и качества входящих в полупроводниковый преобразователь элементов, от условий эксплуатации (чем выше температура окружающей среды, больше относительная влажность воздуха, перегрузки при вибрации, тем меньше надежность) и других причин.

Надежность включает такие понятия, как безотказность, ремонтотпригодность, долговечность, сохраняемость.

*Безотказность* называется свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность и нормально выполнять все свои функции в пределах допусков в течение заданного интервала времени в режимах, определенных техническими условиями на изделие. Количественно безотказность оценивается длительностью или объемом бесперебойной работы или косвенными вероятностными показателями – интенсивностью отказов, наработке на отказ и др.

*Ремонтопригодность* – это свойство изделия, заключающееся в том, что изделие приспособлено: к предупреждению возможных причин возникновения отказа; к обнаружению причин возникшего отказа или повреждения; к устранению последствий возникшего отказа или повреждения путем ремонта или технического обслуживания. Количественно ремонтпригодность оценивается трудоемкостью восстановления работоспособности.

*Долговечность* называется свойство изделия сохранять работоспособность до наступления критического состояния при условии выполнения установленных требований по техническому обслуживанию и ремонту. Количественно долговечность характеризуется техническим ресурсом (продолжительностью периода от начала эксплуатации до изнашивания за вычетом времени ремонта).

*Сохраняемость* – это свойство изделия непрерывно находиться в исправном состоянии при хранении или транспортировании.

Надежность должна задаваться в техническом задании на разработку преобразовательного устройства. Чем выше требования к надежности, тем больше усилий и материальных средств требуется для ее обеспечения. Поэтому уровень надежности определяется как компромисс между «ценой» надежности и выигрышем, который получается в результате применения тех или иных мер по обеспечению надежности.

Так как надежность не является качеством, которое можно придать готовой аппаратуре, то рассмотрим пути повышения надежности при конструировании полупроводниковых преобразователей.

1. Применение надежных элементов. При проектировании преобразователя конструктор должен убедиться в высокой надежности комплектующих элементов и узлов. Когда промышленностью не освоено выпуск высоконадежных изделий, конструкторам приходится своими силами разрабатывать или модернизировать необходимые узлы.

2. Обеспечение нормального теплового режима работы элементов полупроводникового преобразователя, в первую очередь силовых вентиляей. Для этого при конструировании преобразователя необходимо учитывать следующие основные моменты:

- в преобразователях большой мощности с несколькими параллельно включенными полупроводниковыми приборами выход из строя одного прибора не должен вызывать отключения преобразователя;
- преобразователь должен работать непрерывно не менее восьми часов без ограничения предусмотренных нагрузочных режимов;
- необходимо изолировать термически активные элементы преобразователя (полупроводниковые силовые приборы, дроссели, трансформаторы, мощные резисторы, токоограничивающие реакторы, токоведущие шины) от термически пассивных элементов, чувствительных к температуре (конденсаторы, маломощные полупроводниковые устройства, другие элементы системы управления). Для этого термически активные элементы выносятся за пределы шкафа, устанавливаются в специальном отсеке шкафа, отгороженном от других элементов экранами или перегородками из теплоизолирующего материала, помещаются в непосредственной близости к стенкам шкафа, имеющим жалюзи или сетки;
- при использовании принудительного воздушного или жидкостного охлаждения необходимо воздух или жидкость направлять сначала через более холодные термопассивные элементы, а затем через нагретые термоактивные элементы.

3. Повышение технологичности полупроводникового преобразователя и его составных частей.

4. Унификация элементов и узлов преобразователя. Высокая степень унификации элементов и узлов является одним из факторов, обеспечивающих повышенную надежность преобразователей, в частности, она облегчает решение одного из вопросов надежности – снабжения запасными частями.

5. Повышение ремонтпригодности полупроводникового преобразователя, которое включает меры по предупреждению, обнаружению и устранению неисправностей и отказов.

Для предупреждения отказов во время работы конструкция преобразователя должна предусматривать: резервирование наиболее ответственных узлов с автоматическим переключением под нагрузкой на резервный элемент при выходе из строя основного с обязательной подачей сигнала на контрольную лампочку или табло; возможность контроля работы электрических систем полупроводникового преобразователя в процессе эксплуатации при помощи выведенных на двери шкафа или лицевую панель блока гнезд или зажимов для подключения измерительных приборов или осциллографа.

Для сокращения времени обнаружения неисправностей и отказов необходимо: обеспечить свободный доступ ко всем лицевым панелям блоков, на которые выведены контрольные зажимы, гнезда и элементы, требующие регулировки; на лицевых панелях блоков и дверях шкафов устанавливать сигнальные лампы, световые табло и мнемосхемы с соответствующими надписями; на всех функциональных узлах преобразователя укреплять таблички с обозначениями, а элементы схемы четко маркировать; плавкие предохранители снабжать визуальными указателями срабатывания или блок-контактами, включенными в цепь сигнализации.

Время простоя при ремонте можно уменьшить путем построения конструкции по блочно-узловому принципу. При применении этого способа всё изделие разбивается на отдельные функциональные законченные блоки и узлы, выполняемые в виде легкоъемных выемных конструкций, соединяемых между собой в электрическую схему при помощи штепсельных разъемов. Съёмные блоки должны быть электрически и механически взаимозаменяемы, то есть все электрические и механические допуски в блоках должны быть выбраны из условия обеспечения функционирования устройства после их замены запасными без специальной подгонки и наладки. В случае использования в преобразователе различных функциональных блоков выемной конструкции одинаковой формы и размеров необходимо предусмотреть механическую блокировку, исключающую возможность перестановки блоков в шкафу.

6. Повышение заводской готовности изделия. Под заводской готовностью понимается поставка оборудования, обеспечивающего эксплуатационную надежность, удобство монтажа и обслуживания,

выполненного в виде укрупненных блоков, рассчитанного на минимальный объем работ при монтаже и наладке, снабженного всеми устройствами для такелажа, крепления, сопряжения и присоединения внешних сетей, прошедшего на заводе-изготовителе регулировку, проверку, испытания и опробование, снабженного заводскими паспортами, протоколами испытаний и инструкциями по монтажу и эксплуатации. В случае больших габаритов и массы конструкция силового полупроводникового преобразователя должна предусматривать расчленение его на отдельные транспортабельные секции. При монтаже преобразователя на объекте отдельные секции должны сочленяться без специальной подгонки. В преобразователях необходимо тщательно прорабатывать конструкцию систем подключения внешних сетей. Оборудование должно быть снабжено необходимыми деталями и крепежом для подключения.

## **1.6. Техническая эстетика и инженерная психология**

Разрабатывая конструкцию любого промышленного изделия, в том числе и силового полупроводникового преобразователя, инженер-конструктор должен стремиться к тому, чтобы оно не только выполняло свои функции, было технологичным, надежным и долговечным, но и отвечало бы требованиям технической эстетики и эргономики.

*Техническая эстетика* — это наука, изучающая основные принципы и методы художественного конструирования, которое является составной частью процесса проектирования промышленных изделий. Цель художественного конструирования — обеспечить удобство пользования изделием в процессе эксплуатации, создать гармонически целостную форму изделия, повысить его эстетическое качество.

*Эргономика* — это наука, изучающая функциональные возможности человека с целью создания для него оптимальных условий труда, обеспечения необходимых удобств в работе, сохранения сил, здоровья и работоспособности. Инженерная психология является частью эргономики. Она решает проблему наилучшего приспособления изделия к человеку.

При конструировании полупроводниковых преобразователей следует учитывать основные требования технической эстетики и инженерной психологии.

1. Форма изделия должна соответствовать его назначению. При этом следует стремиться к простоте и целесообразности форм, размеров, применяемых материалов и отказу от украшательства.

2. При проектировании серии полупроводниковых преобразователей необходимо выдерживать единство конструктивных решений и форм для всей серии.

3. Высота шкафов силовых полупроводниковых преобразователей рекомендуется не более 2400 мм. Соотношение сторон шкафов должно выбираться по правилу «золотого сечения» с коэффициентом  $k_r = 1,4...2$ .

4. При построении преобразователей по блочно-узловому способу масса выемного блока не должна превышать 25 кг. Тяжелые блоки рекомендуется устанавливать в нижней части шкафа.

5. Ручки органов управления и регулировки должны находиться в удобной для обслуживания зоне, а количество их должно быть возможно минимальным.

6. Контрольно-измерительные приборы должны располагаться на уровне, удобном для снятия показаний.

7. Уровень акустических шумов при работе преобразователя на частотах 50...400 Гц не должен превышать 70 децибел при естественном воздушном охлаждении и 80 децибел при принудительном воздушном охлаждении.

8. При конструировании преобразователей необходимо предусматривать специальные меры, обеспечивающие качественную укладку и крепление монтажных проводов и четкую маркировку.

## **1.7. Основные стадии разработки нового изделия**

Государственный стандарт устанавливает следующие пять стадий разработки нового изделия: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочее проектирование.

Техническое задание относится к научно-исследовательской разработке (НИР) изделия. В нем должны содержаться данные о на-

значении изделия, его тактико-технических характеристиках, условиях эксплуатации, показателях качества, технико-экономических характеристиках, составе конструкторской документации. После согласования технического задания заказчиком и разработчиком оно становится основным документом, на основании которого выполняются все остальные этапы работы.

Техническое предложение также относится к НИР изделия. На этой стадии производится анализ технического задания, сравнительная оценка разрабатываемого и существующих изделий, оценка различных вариантов возможного решения поставленной задачи. На основании этих материалов дается техническое и технико-экономическое обоснование целесообразности разработки нового изделия. Работа над техническим предложением заканчивается составлением научно-технического отчета, утверждаемого заказчиком.

Эскизный проект относится к опытно-конструкторской разработке (ОКР) изделия. На этом этапе выбирают оптимальные варианты исполнения изделия, его структурную схему и принцип конструктивного исполнения. Для этого делают необходимые расчеты, разрабатывают схемы, эскизы, изготавливают макеты отдельных частей, выбирают элементную базу. Документация эскизного проекта должна содержать данные о назначении изделия, его основных параметрах и габаритных размерах.

Технический проект также относится к ОКР изделия. На этом этапе производят полный расчет принципиальной схемы, разбивку изделия на блоки и субблоки, делают чертежи и изготавливают по ним конструктивный макет, который является прообразом будущего изделия. Этот макет подвергают всесторонним испытаниям, по результатам которых вносят коррективы в схему и конструкцию изделия.

На стадии рабочего проектирования разрабатывают конструкторскую документацию опытного образца (опытной партии) изделия. По этой документации проводят изготовление опытных образцов, которые разработчик подвергает испытаниям на соответствие требованиям технического задания (заводские испытания). По результатам испытаний вносят коррективы в рабочую документацию и ей присваивают литеру «О». Положительные результаты заводских испытаний служат основанием для предъявления опытных об-

разцов изделия на государственные испытания, которые проводит государственная комиссия. По замечаниям, сделанным в результате государственных испытаний, в конструкторскую документацию вносят коррективы, и документации присваивается литера «О1». После этого изделие передают для подготовки серийного производства. При этом разрабатывают технологические процессы, конструируют и изготавливают инструмент, приспособления, оснастку и т. д. По оснащённому технологическому процессу выпускают установочную серию изделия. По результатам выпуска и испытаний установочной серии производят корректировку конструкторской документации, технологического процесса и изготовленного оборудования, а конструкторской документации присваивают литеру «А». После этого изготавливают и испытывают головную серию. По результатам выпуска и испытаний головной серии корректируют конструкторскую документацию, присваивают ей литеру «Б» и переходят к серийному выпуску изделия.

## **1.8. Виды конструкторской документации**

К конструкторским документам относятся графические и текстовые документы, содержащие данные, необходимые для разработки, изготовления, контроля, эксплуатации и ремонта изделия. Конструкторские документы разделяются на проектные и рабочие.

Проектные документы содержат данные, необходимые для разработки изделия. К ним относятся: техническое предложение, эскизный проект, технический проект.

В состав рабочей документации входят следующие виды конструкторских документов.

1. *Чертеж детали* содержит изображение детали и данные, необходимые для ее изготовления. Количество проекций, видов, размеров и сечений на чертеже должно быть минимальным, но достаточным для полного представления о форме детали. На чертеже указываются предельные отклонения размеров, чистота поверхности, покрытие, материал, из которого изготавливается деталь, и его свойства после обработки. Рабочие чертежи разрабатывают на каждую деталь. Допускается не делать чертеж на детали, изготовленные



из сортового материала резкой под прямым углом и из листового материала резкой по периметру прямоугольника или окружности без последующей обработки, на несложные деревянные конструкции. В этом случае в сборочных чертежах и их спецификациях указывают данные, необходимые для изготовления и контроля таких деталей. Если сборочная единица должна изготавливаться наплавкой на детали металла или сплава, опрессовкой их пластмассой или резиной, то на наплавляемый металл, резину или пластмассу отдельные чертежи не выпускают. В этом случае на сборочном чертеже показывают все необходимые размеры, допустимые отклонения и шероховатость поверхности.

2. *Сборочный чертеж (СБ)* показывает взаимную связь соединяемых частей. На сборочном чертеже должны быть указаны габаритные размеры, установочные размеры, присоединительные размеры, указания о характере сопряжения или способе соединения неразъемных соединений, номера позиций всех составных частей, совпадающие с номерами позиций в спецификации этого сборочного чертежа. Сборочные чертежи разрешается выполнять упрощенно.

3. *Габаритный чертеж (ГЧ)* используется организацией, проектирующей размещение изделия на объекте, где оно будет эксплуатироваться. Изображение изделия показывают с максимальными упрощениями. На габаритном чертеже проставляют габаритные, установочные и присоединительные размеры. Установочные и присоединительные размеры, определяющие связь изделия с другими изделиями, должны иметь предельные отклонения.

4. *Спецификация* – документ, определяющий состав сборочной единицы. Спецификацию выполняют на отдельных листах за исключением случая, когда сборочный чертеж и спецификацию можно разместить на формате А4. В общем случае спецификация состоит из разделов, расположенных в следующей последовательности: документация, сборочные комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, материалы, комплекты. В зависимости от состава сборочной единицы те или иные разделы могут отсутствовать.

5. *Ведомость спецификаций (ВС)* – документ, включающий перечень спецификаций всех составных частей изделия. Для каждой записываемой в ведомость спецификаций составной части изделия

указываются: обозначение спецификации составной части изделия; наименование составной части изделия в соответствии со спецификацией; обозначение спецификации, куда непосредственно входит составная часть изделия; количество составных частей изделия, входящих в каждую спецификацию.

6. *Схемы*, применяемые в аппаратуре, подразделяются на электрические, кинематические, гидравлические, пневматические, оптические. Внутри каждой группы в зависимости от основного назначения схемы разделяются на структурную, функциональную, принципиальную, соединений, подключения, общую, расположения. Рассмотрим основные особенности и область применения электрических схем указанных видов.

- Схема электрическая структурная (Э1) определяет основные части изделия, их назначение и взаимосвязь. Она дает общее представление об изделии. Разработка структурной схемы предшествует разработке других схем.

- Схема электрическая функциональная (Э2) предназначена для того, чтобы разъяснить процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях или изделии в целом. Для этого на схеме изображают функциональные части изделия, участвующие в процессе, иллюстрируемом схемой; связи между этими частями; поясняющие надписи или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени; параметры в характерных точках (форма и амплитуда импульсов, значения напряжения и др.). Функциональными схемами пользуются для изучения принципа работы изделия, при его наладке, контроле, ремонте.

- Схема электрическая принципиальная (Э3) определяет полный состав элементов и связей между ними и дает детальное представление о принципе работы изделия. На схеме изображают все электрические элементы и устройства, все связи между ними, а также электрические элементы (разъемы, зажимы и др.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Принципиальная схема должна содержать перечень всех элементов, изображенных на ней. Она применяется для изучения принципа работы изделия, при наладке, контроле и ремонте изделия.

- Схема электрическая соединений (Э4) показывает, как соединены между собой составные части изделия с помощью шин, кабелей, проводов, жгутов, а также места их присоединения и ввода.

- Схема электрическая подключения (Э5) содержит сведения о том, как должно быть подключено изделие в месте его установки к источникам питания или другим устройствам, с которыми изделие взаимодействует.

- Схема электрическая общая (Э6) показывает составные части комплекса и соединения между ними, которые выполняются на месте установки изделия.

- Схема электрическая расположения (Э7) показывает взаимное расположение составных частей изделия.

7. *Ведомость покупных изделий (ВП)* – документ, содержащий полный перечень покупных изделий, примененных в разработанном устройстве. Для каждого типа, вида и типоразмера покупных изделий записывают его полное наименование, номер стандарта или технических условий, количество покупных изделий, записанных в спецификации каждой составной части устройства и общее количество для каждого типоразмера.

8. *Технические условия (ТУ)* – документ, содержащий эксплуатационные показатели изделия и методы контроля его качества. Технические условия должны содержать вводную часть и разделы, располагающиеся в следующей последовательности: технические требования; правила приемки; методы контроля; транспортирование и хранение; указания по эксплуатации; гарантии поставщика. При необходимости в технические условия включаются и другие разделы.

9. *Эксплуатационные документы* содержат формуляр или паспорт на изделие, техническое описание, инструкцию по эксплуатации, инструкцию по монтажу и регулированию изделия на месте его установки, ведомость эксплуатационных документов и др.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение, какие устройства называют «полупроводниковый преобразователь».
2. Приведите классификацию полупроводниковых преобразователей.
3. Перечислите способы охлаждения полупроводниковых преобразователей.
4. Приведите классы нагревостойкости изоляции и допустимые температуры нагрева для каждого класса.
5. Что такое унификация в технике?
6. Какие меры используют при проведении унификации?
7. Какие выгоды приносит унификация?
8. Что такое технологичность конструкции?
9. Какие задачи решаются при обработке конструкции на технологичность?
10. Что такое надежность конструкции?
11. Какие технические понятия входят в понятие «надежность»?
12. Какие методы повышения надежности применяют при конструировании полупроводниковых преобразователей?
13. Что такое техническая эстетика?
14. Что такое инженерная психология?
15. Какие требования технической эстетики и инженерной психологии необходимо учитывать при конструировании преобразователей?
16. Перечислите основные стадии разработки нового изделия.
17. Что называется конструкторской документацией?
18. Дайте определение проектных документов и перечислите их состав.
19. Какие документы входят в состав рабочей документации?
20. Что содержит чертеж детали?
21. Что содержит сборочный чертеж?
22. Что включает спецификация?
23. Перечислите виды схем, применяемых в аппаратуре.
24. Перечислите типы электрических схем.
25. Что содержит схема электрическая структурная?
26. Что содержит схема электрическая функциональная?
27. Что содержит схема электрическая принципиальная?

## 2. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 2.1. Способы передачи тепла

Тепловое состояние полупроводникового прибора определяется мощностью выделяющихся в нем потерь и процессом передачи тепловой энергии в охлаждающую среду. Для отвода от прибора заданного количества тепла при сохранении допустимого уровня его нагрева в мощных полупроводниковых приборах используют специальные теплоотводящие устройства, называемые охладителями или радиаторами. Многообразие конкретных конструкций теплоотводящих устройств обуславливает наличие различных методов их тепловых расчетов. Однако в основе этих методов лежит рассмотрение уравнений трех видов передачи тепла конвекции, теплового излучения и теплопроводности. В большинстве случаев все три способа теплообмена действуют одновременно и определяют тепловой режим полупроводникового прибора. Передача тепла теплопроводностью имеет место в твердой среде. Этим способом тепло отводится от зоны тепловыделения к поверхностям прибора и радиатора, соприкасающимся с охлаждающей средой. Отвод тепла с поверхности нагретого прибора и теплоотводящего устройства в охлаждающую среду осуществляется либо за счет конвекции, либо за счет совместного действия конвекции и теплового излучения.

#### 2.1.1. Конвекция

*Конвекцией* называется процесс передачи тепла, связанный с перемещением микрообъемов газа или жидкости относительно поверхности нагретого тела. Конвекция бывает естественная (свободная) и искусственная (вынужденная).

Естественная конвекция возникает в неравномерно нагретых жидкости или газе. Частицы среды, соприкасающиеся с поверхностью нагретого тела, приобретают большую температуру, чем удаленные от поверхности частицы, и под воздействием разности давлений начинают перемещаться, унося с собой некоторое количество тепла

из зоны более высоких температур в зону более низких. Холодные частицы поступают на их место, и процесс повторяется.

Вынужденная конвекция происходит за счет энергии, сообщаемой охлаждающей среде посторонним источником – вентилятором для газа и насосом для жидкости.

Количество тепла, отводимое за счет конвекции, в простейшем случае определяется по формуле Ньютона:

$$P_k = \alpha_k \cdot S \cdot (t_s - t_c), \quad (2.1)$$

где  $t_s$  – температура нагретой поверхности тела в данной точке;  $t_c$  – температура охлаждающей среды, соприкасающейся с данной точкой нагретой поверхности;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $S$  – поверхность охлаждения нагретого тела.

Сложность расчета выделяемой тепловой мощности или температуры поверхности тела по формуле Ньютона заключается в том, что коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  зависит от физических параметров охлаждающей жидкой или газообразной среды (удельного веса, теплопроводности, вязкости, теплоемкости), вида охлаждаемой поверхности и ее расположения относительно потока охлаждающей среды и поля тяготения, скорости вынужденного движения среды, температуры нагрева охлаждаемого тела и охлаждающей среды и не может быть точно рассчитан аналитически. В инженерных расчетах для определения  $\alpha_k$  применяют эмпирические зависимости, выведенные на основе теории подобия.

Теория подобия позволяет на основании тщательного экспериментального изучения какого-либо явления получить данные для расчета других явлений, родственных изучаемому. Результаты экспериментального изучения можно применить только к явлениям, подобным изучаемому. В основе подобия физических явлений лежит подобие полей всех характерных величин при одинаковом геометрическом подобии. Если явления подобны, то существуют безразмерные комплексы из характерных физических величин, которые для всех подобных явлений сохраняют неизменное числовое значение. Эти безразмерные комплексы получили название критериев подобия.

Основные положения теории подобия сформулированы в трех теоремах подобия.

1. Подобные между собой явления имеют одинаковые критерии подобия.

2. Дифференциальные уравнения, описывающие явления, могут быть представлены в виде зависимостей между критериями подобия – критериальных уравнений.

3. Два явления подобны, если они описываются одной и той же системой дифференциальных уравнений и имеют подобные условия однозначности.

Основными критериями подобия, определяющими процессы конвективного теплообмена в полупроводниковых преобразователях, являются:

критерий гидродинамического подобия – критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}, \quad (2.2)$$

где  $V$  – скорость движения охлаждающей среды относительно поверхности нагретого тела, м/с;  $l$  – определяющий размер, характерный для тела данной геометрии (высота для цилиндра, диаметр для шара или трубы, меньшая сторона для прямоугольника и т. д.), м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости охлаждающей среды,  $m^2/c$ ;

критерий теплового подобия – критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности охлаждающей среды, Вт/(м·град);

критерий подъемной силы – критерий Грасгофа:

$$Gr = \beta \cdot g \cdot \frac{l^3}{\nu^2} (t_s - t_c), \quad (2.4)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения охлаждающей среды, 1/град;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

критерий, характеризующий физические свойства охлаждающей среды, – критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot g \cdot C_p}{\lambda}, \quad (2.5)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности среды ( $m^2/c$ );  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, Н·с/м;  $c_p$  – удель-

ная теплоемкость охлаждающей среды при постоянном давлении, Дж/(кг·град).

В общем виде критериальное уравнение теплообмена имеет следующий вид:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}). \quad (2.6)$$

В случае свободной конвекции из уравнения (2.6) выпадает критерий Рейнольдса, и оно приобретает вид

$$\text{Nu} = f(\text{Pr}, \text{Gr}). \quad (2.7)$$

При вынужденной конвекции часто пренебрегают влиянием свободного движения охлаждающей среды, и тогда

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}). \quad (2.8)$$

Каждый конкретный случай теплообмена имеет свои особенности, характеризующиеся геометрией полупроводникового прибора и охладителя, условиями обтекания поверхностей теплообмена охлаждающей средой и т. д. При тепловых расчетах полупроводниковых преобразователей конкретные случаи теплообмена сводятся к ограниченному количеству общих случаев, описываемых известными критериальными уравнениями, составленными по результатам экспериментальных исследований. Основная задача расчета состоит в том, чтобы на основании теории подобия правильно свести данный конкретный случай теплообмена к известному общему случаю.

При расчете теплоотдачи конвекцией, как правило, решают одну из двух задач – прямую или обратную. При решении прямой задачи известной является мощность тепловых потерь, выделяемых в теле, а определяется температура нагрева этого тела. Расчет ведется чаще всего методом последовательных приближений. Порядок расчета следующий.

1. Задаются температурой нагрева тела  $t_s$ .
2. По таблицам в справочниках выбирают физические параметры, необходимые для расчета критериев подобия.
3. Выбирают критериальное уравнение, описывающее общий случай, к которому сводится данный конкретный случай теплообмена, и находят критерий Нуссельта.
4. Рассчитывают коэффициент теплоотдачи конвекцией



$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}. \quad (2.9)$$

5. По формуле Ньютона определяют температуру нагрева тела. Если рассчитанная и заданная температуры нагрева тела примерно одинаковые, то расчет заканчивают. Если заданная и рассчитанная температуры нагрева тела сильно отличаются друг от друга, то задаются следующим значением температуры нагрева тела и повторяют расчет.

При решении обратной задачи по известной температуре нагрева тела, используя формулу Ньютона и необходимые критериальные уравнения, рассчитывают тепловую мощность, отдаваемую конвекцией от нагретого тела в охлаждающую среду.

### 2.1.2. Теплоотдача при естественной конвекции

Различные данные по экспериментальному исследованию теплообмена при естественном движении жидкости были обобщены М.А. Михеевым, в результате чего была получена следующая критериальная зависимость:

$$Nu = c \cdot [Gr \cdot Pr]^n, \quad (2.10)$$

где  $c$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от произведения  $[Gr \times Pr]$  и определяемые по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения коэффициентов для уравнения (2.10)

$Gr \times Pr$	$c$	$n$
до $1 \times 10^{-3}$	0,5	0
$1 \times 10^{-3} \dots 5 \times 10^2$	1,18	0,125
$5 \times 10^2 \dots 2 \times 10^7$	0,54	0,25
$2 \times 10^7 \dots 1 \times 10^{13}$	0,135	0,333

Уравнение (2.10) можно использовать и при расчете теплоотдачи свободной конвекцией в газообразную среду. В качестве определяющей температуры при выборе значения физических параметров охлаждающей среды принимается среднеарифметическая температура:

$$t_m = 0,5(t_c + t_s). \quad (2.11)$$

Путем преобразования уравнения (2.10) получен ряд формул, более удобных для фактических расчетов. Так, при расчете коэффициента теплоотдачи горизонтальных цилиндрических тел при произведении  $[Gr \times Pr] = 1 \times 10^{-3} \dots 5 \times 10^2$  можно воспользоваться следующим уравнением:

$$\alpha_K = A_1 \left( \frac{t_s - t_c}{d^5} \right)^{1/8}, \quad (2.12)$$

где  $d$  – диаметр цилиндра, м;  $A_1$  – коэффициент, являющийся функцией физических параметров охлаждающей среды.

Коэффициент  $A_1$  можно определить по табл. 2.2 либо по следующей формуле:

$$A_1 = 1,37 \cdot (\beta \cdot g \cdot Pr)^{1/8} \cdot \frac{\lambda}{\nu^{1/4}}. \quad (2.13)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией труб и вертикальных плит при  $[Gr \times Pr] = 5 \times 10^2 \dots 2 \times 10^7$  уравнение (2.12) можно преобразовать к следующему виду:

$$\alpha_K = A_2 \left( \frac{t_s - t_c}{l} \right)^{1/4}, \quad (2.14)$$

где  $A_2$  – коэффициент, зависящий от физических параметров охлаждающей среды.

Таблица 2.2

Значения коэффициента  $A_1$  для воздуха и воды

$t_m, ^\circ\text{C}$		0	20	40	60	80	100	120
$A_1$	Воздух	0,291	0,295	0,300	0,306	0,310	0,315	0,320
	Вода	9,350	13,100	15,700	17,600	19,000	20,000	–

При определении коэффициента теплоотдачи по уравнению (2.14) для ориентированных поверхностей необходимо учитывать различие между условиями теплообмена горизонтальной поверхности, обращенной вверх, и поверхности, обращенной вниз. Для верхней горизонтальной поверхности теплоотдача увеличивается по сравнению с вертикальной поверхностью на 30 %, и формула (2.14) имеет следующий вид:

$$\alpha_K = 1,3A_2 \cdot \left( \frac{t_s - t_c}{l} \right)^{1/4}. \quad (2.15)$$

Для нижней горизонтальной поверхности теплоотдача уменьшается на 30 %:

$$\alpha_k = 0,7 A_2 \cdot \left( \frac{t_s - t_c}{l} \right)^{1/4}. \quad (2.16)$$

Коэффициент  $A_2$  определяется по табл. 2.3 либо по формуле

$$A_2 = 0,63 \cdot (\beta \cdot g \cdot \text{Pr})^{1/4} \cdot \frac{\lambda}{\nu^{1/2}}. \quad (2.17)$$

Таблица 2.3

Значения коэффициента  $A_2$  для воздуха и воды

$t_m, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150	
$A_1$	Воздух	1,40	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245
	Вода	90	102	127	149	178	205	227	—	—	—

Для труб, сфер и вертикальных плит при  $[\text{Gr} \times \text{Pr}] > 2 \times 10^7$  уравнение (2.10) приводится к следующему виду:

$$\alpha_k = A_3 \cdot (t_s - t_c)^{1,3}. \quad (2.18)$$

Для горизонтальных поверхностей результаты, полученные по уравнению (2.18), следует увеличить или уменьшить на 30 %, в зависимости от ориентации этой поверхности вверх или вниз. Значения коэффициента  $A_3$ , зависящего от физических параметров охлаждающей среды, можно определить по табл. 2.4.

Таблица 2.4

Значения коэффициента  $A_3$  для воздуха и воды

$t_m, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100	150	
$A_3$	Воздух	1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33	1,23
	Вода	102	198	290	363	425	480	—

### 2.1.3. Теплоотдача при вынужденной конвекции

Из всего многообразия случаев теплообмена при вынужденной конвекции следует выделить три наиболее часто встречающихся случая:

- 1) теплоотдача при вынужденном движении охлаждающей среды вдоль плоской или цилиндрической поверхности;

- 2) теплоотдача при движении охлаждающей среды в трубах или каналах;
- 3) теплоотдача при поперечном обтекании тел различной формы.

Чтобы определить коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении охлаждающей среды, прежде всего необходимо подсчитать критерий Рейнольдса, численное значение которого в каждом конкретном случае указывает, в каком режиме происходит движение среды. Возможны два режима движения охлаждающей среды: *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихревой). Переход от одного режима к другому определяется значением критерия Рейнольдса, называемым критическим  $Re_{кр}$ . Величина  $Re_{кр}$  различна для различных случаев вынужденного движения охлаждающей среды.

При движении охлаждающей среды вдоль плоской или цилиндрической поверхности  $Re_{кр} = 10^5$ .

Для ламинарного режима течения ( $Re_{кр} < 10^5$ ) критериальное уравнение теплоотдачи имеет вид

$$Nu = 0,66Re^{0,5}. \quad (2.19)$$

Для турбулентного режима течения ( $Re_{кр} > 10^5$ )

$$Nu = 0,032Re^{0,8}. \quad (2.20)$$

В обоих случаях в качестве определяющей температуры, при которой выбираются все физические параметры охлаждающей среды, принимается температура набегающего потока, а в качестве определяющего размера — длина стенки  $l$  по направлению потока. Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется по уравнению (2.9).

При вынужденном движении охлаждающей среды в трубах или каналах  $Re_{кр} = 2000...2300$ . При подсчете критерия Рейнольдса в качестве определяющей скорости принимается средняя по сечению скорость потока  $v$ . Если известен объемный расход среды  $Q$  через трубу или канал и площадь их поперечного сечения  $F$ , то

$$v = Q/F. \quad (2.21)$$

Для каналов круглого сечения определяющим размером является диаметр канала  $d$ . Если форма поперечного сечения канала отличается от круга, то в качестве определяющего размера принимается гидравлический диаметр канала

$$d_{\Gamma} = \frac{4F}{\Pi}, \quad (2.22)$$

где  $\Pi$  – периметр поперечного сечения канала или трубы.

В качестве определяющей температуры принимается средняя температура среды в канале или трубе

$$t_m = 0,5 \cdot (t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}), \quad (2.23)$$

где  $t_{\text{вх}}$  и  $t_{\text{вых}}$  – соответственно температура охлаждающей среды на входе и выходе канала.

Для ламинарного режима течения ( $Re < 2000$ ) при расчете охлаждения используется следующее критериальное уравнение:

$$Nu = 1,86 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}, \quad (2.24)$$

где  $l$  – длина трубы или канала;  $\mu$  и  $\mu_s$  – коэффициенты динамической вязкости и охлаждающей среды при определяющей температуре  $t_m$  и при температуре стенок трубы  $t_s$ .

При развитом турбулентном течении охлаждающей среды в трубах или каналах для расчета коэффициента теплоотдачи используется следующее уравнение:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} \cdot \epsilon_l, \quad (2.25)$$

где  $Pr$  и  $Pr_s$  – значения критерия Прандтля соответственно при температурах  $t_m$  и  $t_s$ ;  $\epsilon_l$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы. Его значения приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Значения коэффициента  $\epsilon_l$

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\epsilon_l$	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

При переходных режимах течения охлаждающей среды ( $2000 < Re < 10\,000$ ) для расчета теплоотдачи в трубах и каналах рекомендуется следующее критериальное уравнение:

$$Nu = k \times E, \quad (2.26)$$

где  $k$  – табличный безразмерный коэффициент, значения которого приведены в табл. 2.6;  $E = Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25}$  – безразмерный параметр.

Таблица 2.6

Значения коэффициента  $k$

$Re \times 10^3$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	8	10
$k$	1,9	2,2	3,3	3,8	4,4	6,0	10,3	15,5	19,5	27	33,3

При движении охлаждающей среды в изогнутых трубах и каналах возникает центробежная сила, увеличивающая турбулентность потока и, следовательно, коэффициент теплоотдачи конвекцией. Расчет теплоотдачи для изогнутых труб и каналов производится по формулам для прямых труб (2.24)–(2.26) с последующим введением в качестве множителя поправочного коэффициента:

$$\alpha_{\text{Киз}} = \varepsilon_R \cdot \alpha_{\text{Кпр}}; \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \frac{d}{R}, \quad (2.28)$$

где  $R$  – радиус закругления трубы или канала в месте изгиба.

При поперечном обтекании тел различной формы наиболее полно исследованы случаи обтекания тел цилиндрической формы. По окружности поперечно обтекаемого тела теплоотдача неодинакова. Зона максимальных значений коэффициента теплоотдачи лежит на лобовой образующей цилиндра. По мере перемещения по поверхности цилиндра в направлении движения охлаждающей среды величина коэффициента теплоотдачи падает, а затем вновь возрастает в кормовой части. Средний коэффициент теплоотдачи вычисляется по следующему критериальному уравнению:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,4}, \quad (2.29)$$

где  $c$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от величины критерия Рейнольдса, которые определяются по табл. 2.7.

Значения постоянных  $c$  и  $n$ 

Re	$c$	$n$
50... 80	0,93	0,4
80... 5000	0,715	0,46
свыше 5000	0,226	0,6

*Тепловым излучением*, или *лучеиспусканием*, называется передача тепла путем излучения электромагнитных колебаний в ультрафиолетовом, световом и инфракрасном диапазоне.

Мощность теплового потока, передаваемого излучением с поверхности  $S_1$  на поверхность  $S_2$  или в окружающую среду, определяется следующим образом:

$$P_n = c_n \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot S_1, \quad (2.30)$$

где  $c_n$  – приведенный коэффициент лучеиспускания системы тел;  $T_1 = 273 + t_1$  – абсолютная температура тела, излучающего тепло;  $T_2 = 273 + t_2$  – абсолютная температура поверхности, воспринимающей тепло. Коэффициент  $c_n$  находим по формуле

$$c_n = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left( \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \right)}, \quad (2.31)$$

где  $c_1$  – коэффициент лучеиспускания поверхности  $S_1$ ;  $c_2$  – коэффициент лучеиспускания поверхности  $S_2$ ;  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела.

Введем некоторые понятия.

*Степень черноты тела*  $\varepsilon$  – это отношение энергии излучения реального тела к энергии излучения абсолютно черного тела при одинаковой температуре. Для реального тела  $0 < \varepsilon < 1$ . При  $\varepsilon = 0$  тело называется *абсолютно белым*, при  $\varepsilon = 1$  – *абсолютно черным*. Если выразить коэффициенты лучеиспускания через степень черноты, то получим:

$$c_n = \varepsilon_n \cdot c_0; \quad c_1 = \varepsilon_1 \cdot c_0; \quad c_2 = \varepsilon_2 \cdot c_0. \quad (2.32)$$

Коэффициент облученности  $\varphi$  показывает, какая часть лучистого потока, испускаемого излучающим телом, падает на облучаемую поверхность:

$$\varphi = \frac{S_1}{S_2}. \quad (2.33)$$

Подставив (2.32) и (2.33) в уравнение (2.31), получим:

$$P_{л} = \varepsilon_n \cdot c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot S_1, \quad (2.34)$$

где

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi}. \quad (2.35)$$

Так как теплоотдача лучеиспусканием осуществляется обычно совместно с конвекцией, то уравнение (2.35) желательно записать в форме, аналогичной формуле Ньютона для конвективного теплообмена:

$$P_{л} = \alpha_{л} \cdot (t_1 - t_2) \cdot S_1, \quad (2.36)$$

где  $\alpha_{л}$  – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием между двумя поверхностями:

$$\alpha_{л} = \varepsilon_n \cdot \varphi \cdot c_0 \cdot \frac{\left( \frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_2 + 273}{100} \right)^4}{t_1 - t_2} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}} \right]. \quad (2.37)$$

Для случая теплообмена излучением поверхности  $S_1$  с окружающей средой:  $\varphi = 1$ ;  $\varepsilon_n = \varepsilon_1$ ;  $t_2 = t_s$ .

При теплообмене излучением между двумя параллельными плоскостями, размеры которых значительно больше расстояния между ними:  $\varphi = 1$ ,

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1}.$$

При определении коэффициента облученности  $\varphi$  для других случаев теплообмена лучеиспусканием обычно используют справочные данные. На рис. 1 приведены значения коэффициента облученности двух одинаковых поверхностей, расположенных на расстоянии  $h$  друг от друга.



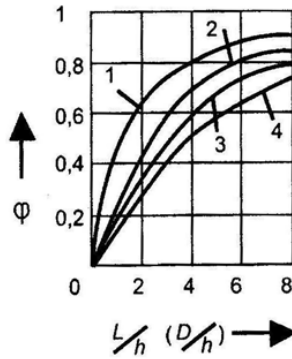


Рис. 1. Коэффициенты облученности параллельных плоскостей

Общий тепловой поток, отдаваемый от нагретого тела в окружающую среду совместным действием конвекции и теплового излучения, рассчитывается по формуле

$$P = P_k + P_l = \alpha_c \cdot (t_s - t_c) \cdot S, \quad (2.38)$$

где  $\alpha_c = \alpha_k + \alpha_l$  – результирующий коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением.

При проведении практических тепловых расчетов следует помнить, что теплоотдача лучеиспусканием рассчитывается только в случае теплопередачи в спокойную газообразную окружающую среду. Если теплоотдача с поверхности нагретого тела осуществляется в принудительно движущуюся газообразную среду либо в неподвижную или движущуюся жидкую среду, то коэффициент теплоотдачи излучением считают равным нулю, то есть теплоотдачей лучеиспусканием пренебрегают.

#### 2.1.4. Теплопроводность

*Теплопроводностью* называется процесс распространения тепла между непосредственно соприкасающимися частицами, связанный с тепловым движением молекул или атомов вещества, а в металлах – свободных электронов. Математически основной закон теплопроводности описывается уравнением Фурье:

$$d^2 Q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \cdot dS \cdot d\tau, \quad (2.39)$$

где  $d^2Q$  — количество тепла, передаваемого в направлении  $x$  за счет теплопроводности;  $\lambda$  — удельная теплопроводность;  $dS$  — поверхность, через которую проходит тепловой поток  $d^2Q$ ;  $d\tau$  — время, в течение которого проходит тепловой поток  $d_2Q$ ;  $\frac{\partial t}{\partial x}$  — градиент температуры, характеризующий скорость изменения температуры в направлении  $x$ , перпендикулярном  $dS$ .

Знак «минус» в уравнении (2.39) говорит о том, что тепловая энергия распространяется от точек с большей температурой к точкам с меньшей температурой, то есть противоположно направлению градиента температуры. В общем случае температурное поле может быть трехмерным, поэтому, рассматривая тепловой поток, передаваемый в направлении  $x$ , мы берем частную производную  $dQ/dx$ .

Дифференциальное уравнение теплопроводности само по себе не позволяет судить о качественной и количественной картине температурного поля. Для получения полной картины необходимо задание так называемых начальных и граничных условий задачи. Задание начальных условий состоит в задании температурного поля в какой-то момент времени, то есть должна быть известна функция  $t = f(x, y, z)$  в момент времени  $\tau = \tau_0$ . В граничных условиях формулируются условия теплообмена поверхности тела с окружающей средой. При граничных условиях первого рода задается распределение температуры по поверхности тела в функции времени; при граничных условиях второго рода задается плотность теплового потока на поверхности тела в функции времени; граничные условия третьего рода предполагают известным закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой, температура которой также известна. Граничные условия третьего рода являются наиболее распространенными при решении задач теплопроводности в системах охлаждения силовых полупроводниковых преобразователей и записываются в форме закона Ньютона.

Одним из наиболее распространенных случаев теплопроводности является передача тепла через стенки без внутренних источников тепловой мощности.

Рассмотрим распределение температуры в плоской стенке, разделяющей две среды (рис. 2). Стенка имеет во всех точках одина-

ковую, не зависящую от направления теплопроводность  $\lambda$ , а температура на обеих поверхностях стенки известна и равна  $t_1$  и  $t_2$ . Это задача расчета стационарной теплопроводности при одномерном температурном поле ( $dt/dy = dt/dz = 0$ ).

Перепишем уравнение (2.39) в виде

$$\frac{d^2 Q}{ds \cdot d\tau} = -\lambda \frac{dt}{dx} = \Phi_0, \quad (2.40)$$

где  $\Phi_0 = \frac{d^2 Q}{dS dt}$  — плотность теплового потока, равная количеству тепла, проходящего через поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$ . Для установившегося режима эта величина постоянная.

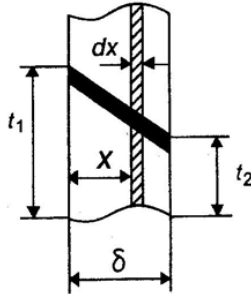


Рис. 2. Плоская стенка

Преобразуем уравнение (2.40) к виду

$$\int_0^{\delta} \frac{\Phi_0}{\lambda} dx = \int_{t_1}^{t_2} -dt. \quad (2.41)$$

При прохождении тепловым потоком толщины стенки от  $0$  до  $\delta$  ее температура меняется от  $t_1$  до  $t_2$ . Тогда:

$$\frac{\Phi_0 \cdot \delta}{\lambda} = t_1 - t_2. \quad (2.42)$$

Из уравнения (2.42) видно, что распределение температуры в стенке происходит по линейному закону. Если подставить в эту формулу значение полного потока  $\Phi$ , проходящего через поверхность  $S$  за  $1 \text{ с}$ ,  $\Phi = \Phi_0 \cdot S$ , то получим:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \Phi \frac{\delta}{\lambda \cdot S} = \Phi \cdot R_C, \quad (2.43)$$

где  $R_c = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}$  – тепловое сопротивление теплопроводности плоской стенки.

Уравнение (2.43) представляет собой закон Ома для тепловой цепи. Тепловая схема замещения плоской стенки без внутренних источников тепла приведена на рис. 3.

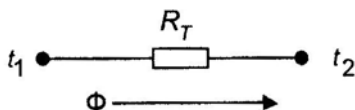


Рис. 3. Тепловая схема замещения плоской стенки

Если при рассмотрении задачи расчета температурного поля плоской стенки неизвестны температуры поверхности стенки, а известны температуры сред  $t_{1c}$  и  $t_{2c}$ , которые разделяет стенка, то вводят понятие теплового сопротивления теплоотдачи конвекцией:

$$R_K = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \quad (2.44)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией и тепловым излучением.

Суммарное тепловое сопротивление при переходе потока тепла через стенку в этом случае равно:

$$R_\Sigma = R_{k1} + R_c + R_{k2}, \quad (2.45)$$

где  $R_{k1}$  – тепловое сопротивление передачи тепла конвекцией от среды с температурой  $t_{1c}$  к поверхности плоской стенки с температурой  $t_1$ ;  $R_{k2}$  – тепловое сопротивление передачи тепла конвекцией и тепловым излучением с поверхности стенки с температурой  $t_2$  в окружающую среду с температурой  $t_{2c}$ .

Тогда тепловой поток через стенку:

$$\Phi = \frac{t_{1c} - t_{2c}}{R_\Sigma} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1 S} + \frac{\delta}{\lambda S} + \frac{1}{\alpha_2 S}}. \quad (2.46)$$

Тепловая схема замещения для данной задачи приведена на рис. 4.

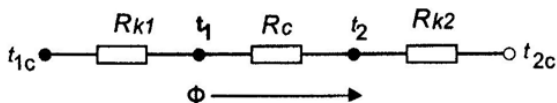


Рис. 4. Тепловая схема замещения

Интегрирование дифференциального уравнения (2.39) для цилиндрической стенки без внутренних источников тепла дает следующее выражение для теплового сопротивления теплопроводности:

$$R_c = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (2.47)$$

где  $r_2$  и  $r_1$  — соответственно наружный и внутренний радиусы стенки;  $l$  — высота стенки.

Для шаровой стенки

$$R_c = \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (2.48)$$

где  $r_2$  и  $r_1$  — соответственно наружный и внутренний радиусы шара.

## 2.2. Основные виды тепловых потерь в силовых полупроводниковых преобразователях

1. Потери мощности в проводниках при протекании по ним постоянного тока:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (2.49)$$

где  $R = \rho_0(1 + \alpha_c t) \frac{l}{S}$  — сопротивление проводника постоянному току;  $\rho_0$  — удельное электрическое сопротивление материала проводника при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_c$  — температурный коэффициент сопротивления;  $t$  — температура нагрева проводника;  $l$  — длина проводника;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника.

2. Потери мощности в неферромагнитных проводниках при протекании по ним переменного тока. При переменном токе потери мощности увеличиваются из-за неравномерного распределения тока по поверхности проводника. Так, в частях поперечного сечения, расположенных ближе к наружной поверхности, плотность тока оказывается больше, чем во внутренних его частях. Отношение потерь мощности в проводнике при переменном токе (действующее значе-

ние) к потерям при постоянном токе такой же величины называется коэффициентом поверхностного эффекта  $\kappa_n$ :

$$\kappa_n = \frac{P_{\sim}}{P} = \frac{I^2 R_{\sim}}{I^2 R} = \frac{R_{\sim}}{R}, \quad (2.50)$$

где  $R_{\sim}$  – сопротивление проводника протеканию переменного тока;  $R$  – сопротивление проводника протеканию постоянного тока.

Значения коэффициента поверхностного эффекта в зависимости от параметра  $\sqrt{f/R_{100}}$ , где  $f$  – частота переменного тока, а  $R_{100}$  – сопротивление проводника длиной 100 метров постоянному току; находятся по графикам (рис. 5), приведенным в справочниках.

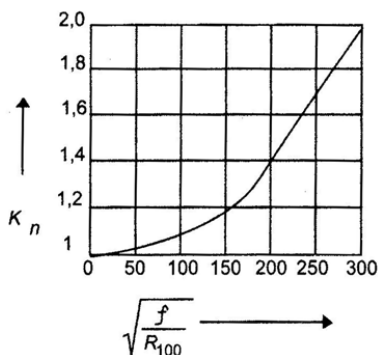


Рис. 5. Значения коэффициента поверхностного эффекта для сплошных круглых немагнитных проводников

Распределение тока по сечению проводника зависит не только от магнитного поля внутри проводника (поверхностный эффект), но и от магнитного поля, создаваемого другими, рядом находящимися проводниками (эффект близости).

Предположим, что имеются два проводника 1 и 2 (рис. 6, а), расположенных параллельно друг другу, по которым проходят токи  $i_1$  и  $i_2$  противоположного направления. Магнитный поток, созданный током  $i_1$ , будет пронизывать проводник 2, причем элементы проводника 2, расположенные ближе к проводнику 1, будут охватываться большим магнитным потоком. В результате в этих элементах будут наводиться неодинаковые по величине противо-ЭДС, и между ними будут проходить токи, встречные  $i_1$  – вблизи проводника 1 и

согласные с  $i_1$  – вдали от проводника 1. Таким образом, в элементах проводника 2, расположенных ближе к проводнику 1, наведенные токи складываются с  $i_2$ , а в противоположных элементах – вычитаются из  $i_2$ . Это приводит к неравномерному распределению тока по поперечному сечению проводника, а следовательно, к увеличению потерь в нем. При одинаковых направлениях токов  $i_1$  и  $i_2$  в проводниках 1 и 2 (рис. 6, б) токи, наведенные в проводнике 2, вычитаются из  $i_2$  с ближней к проводнику 1 стороны и складываются с  $i_2$  с дальней к проводнику 1 стороны.

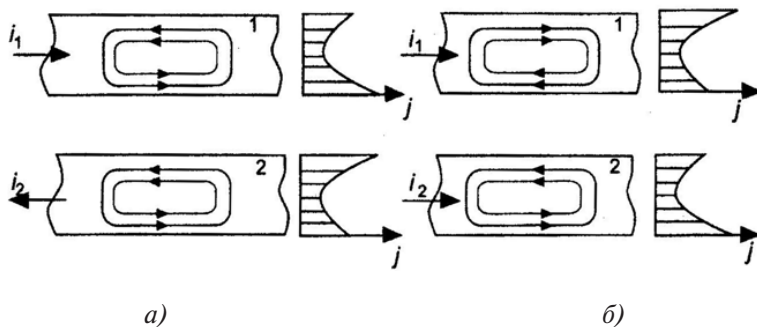


Рис. 6. К пояснению эффекта близости

Количественно эффект близости принято характеризовать коэффициентом близости, равным отношению активного сопротивления проводника, расположенного в непосредственной близости от других проводников с переменным током к его активному сопротивлению, когда он уединен, то есть не находится в магнитном поле других проводников:

$$k_{б} = \frac{R_{\sim}}{R_{\sim\text{уед}}} = \frac{R_{\sim}}{k_{п} R_{-}}. \quad (2.51)$$

Коэффициент близости зависит от частоты переменного тока, формы проводника, расстояния между проводниками, их взаимного расположения и определяется по графикам и таблицам, приводимым в справочниках.

Таким образом, тепловые потери в проводниках на переменном токе в общем случае равны:

$$P_{\sim} = P_{\sim} \cdot \kappa_{\Pi} \cdot \kappa_{\delta}. \quad (2.52)$$

3. *Потери мощности в ферромагнитных проводниках при переменном токе.* В ферромагнитных сплошных проводниках переменное электромагнитное поле проникает лишь на небольшую глубину, отсчитываемую от наружной поверхности проводника. Поэтому тепловые потери зависят не от площади поперечного сечения, а от периметра поперечного сечения проводника и определяются по формуле

$$P = \frac{I^2 l}{\Pi} \sqrt{\omega \cdot \mu_e \cdot \rho}, \quad (2.53)$$

где  $I$  – действующее значение тока, протекающего через проводник;  $\Pi$  – периметр поперечного сечения проводника;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $\mu_e$  – абсолютная магнитная проницаемость материала проводника;  $\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_c \cdot t)$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника.

4. *Потери мощности в нетоковедущих ферромагнитных частях.* При переменном токе в нетоковедущих ферромагнитных частях преобразователя (магнитопроводах дросселей, трансформаторов, оболочке шкафа и т. д.) возникают потери мощности за счет тепловых потерь на гистерезис и вихревые токи. Для уменьшения этих потерь магнитопроводы дросселей и трансформаторов выполняются шихтованными или витыми. Для расчета тепловых потерь в нетоковедущих ферромагнитных частях пользуются различными эмпирическими зависимостями, например:

$$P = (\alpha_r \cdot B_m^{1,6} + \alpha_b \cdot f \cdot B_m^2) \cdot f \cdot G, \quad (2.54)$$

где  $B_m$  – максимальное значение магнитной индукции;  $G$  – масса;  $\alpha_r$  и  $\alpha_b$  – соответственно, коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов.

5. *Потери в диэлектриках.* В преобразователях высокого напряжения помимо потерь в проводниках и ферромагнитных материалах необходимо учитывать и потери в изоляции, определяемые следующим образом:

$$P = \omega \cdot c \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.55)$$

где  $c$  – емкость изоляции;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.



### **2.3. Классификация способов охлаждения полупроводниковых преобразователей**

1. *Естественное воздушное охлаждение.* Это наиболее простой, надежный и дешевый способ охлаждения, осуществляемый без дополнительных затрат энергии. Интенсивность такого охлаждения невелика, поэтому использование этого способа возможно при небольших удельных мощностях рассеивания, то есть в преобразователях, работающих в облегченном тепловом режиме. При естественном воздушном охлаждении конвективный теплообмен осуществляется между элементами преобразователя и воздухом, причем воздух перемещается за счет энергии, рассеиваемой элементами преобразователя.

Различают две основные схемы естественного воздушного охлаждения блоков преобразователей: с герметичным корпусом и с перфорированным корпусом. В герметичном корпусе конвективный теплообмен осуществляется от элементов преобразователя к воздуху внутри корпуса, от воздуха к корпусу преобразователя и от корпуса в окружающую среду. При перфорированном корпусе теплообмен происходит между элементами преобразователя и окружающим воздухом, проникающим внутрь корпуса через перфорацию, жалюзи или сетки, выполненные в корпусе преобразователя. Естественное воздушное охлаждение с перфорированным корпусом позволяет обеспечить нормальный тепловой режим работы преобразователя при более высоких удельных мощностях рассеивания, чем при герметичном корпусе.

Интенсификация теплообмена при естественном воздушном охлаждении возможна за счет оптимального расположения элементов преобразователя и перфорации корпуса, применения теплозащитных экранов, оребрения отдельных поверхностей, использования теплопроводящих замазок и компаундов, окраски излучающих поверхностей с целью увеличения теплоотдачи лучеиспусканием и т. д.

2. *Принудительное воздушное охлаждение.* Для интенсификации конвективного теплообмена между преобразователем и окружающей средой используют принудительное движение воздуха, создаваемое вентилятором.

Различают три схемы принудительного воздушного охлаждения: внутреннее перемешивание, наружный обдув и продувка.

При внутреннем перемешивании для интенсификации теплообмена между элементами преобразователя и герметичным корпусом внутри корпуса устанавливают вентилятор. Теплообмен же между корпусом и окружающей средой происходит так же, как и при естественном воздушном охлаждении преобразователя с герметичным корпусом.

При наружном обдуве теплообмен между элементами преобразователя и воздухом внутри герметичного корпуса осуществляется так же, как и при естественном воздушном охлаждении, а для увеличения теплообмена между корпусом и окружающей средой снаружи устанавливается вентилятор, обдувающий корпус преобразователя.

В схеме с продувкой воздух из окружающей среды или предварительно охлажденный в специальных устройствах (теплообменниках, кондиционерах и др.) пропускается через отверстия или каналы в корпусе и охлаждает элементы преобразователя. Эта схема наиболее широко применяется в практике конструирования полупроводниковых преобразователей.

3. *Естественное жидкостное охлаждение.* Оно заключается в погружении платы с элементами или больших элементов преобразователя в бак с охлаждающей жидкостью. Интенсификация конвективного теплообмена происходит за счет более высоких коэффициентов теплоотдачи между элементами преобразователя и жидкостью по сравнению с воздухом. Однако этот метод охлаждения применяется в полупроводниковых преобразователях редко, так как конструкция преобразователя значительно усложняется и требуются специальные покрытия для его элементов.

4. *Принудительное жидкостное охлаждение.* Оно применяется при высоких удельных мощностях рассеивания. Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов, когда жидкость прокачивается насосом через специальные каналы в охлаждаемых узлах приборов. При отводе тепла от блоков жидкость прокачивается через каналы, выполненные в платах или кожухе блока.

В качестве жидких теплоносителей обычно применяются вода, водоспиртовые смеси (антифризы), трансформаторное масло, кремнийорганические и фторорганические жидкости. Выбор типа теплоносителя является одной из главных проблем при разработке принудительного жидкостного охлаждения. К жидким теплоносителям предъявляются следующие требования: высокие электроизоляционные свойства, высокий коэффициент теплопроводности, негорючесть, неагрессивность по отношению к конструкционным материалам, физиологическая пассивность и др.

Конструкция преобразователя при жидкостном охлаждении, как правило, значительно сложнее, чем при воздушном. Однако при высоких удельных мощностях рассеивания жидкостное охлаждение преобразователя является обязательным.

5. *Естественное испарительное охлаждение.* Оно позволяет повысить удельную мощность рассеивания преобразователя и применяется при охлаждении теплонагруженных блоков и больших элементов. Охлаждаемая поверхность погружается в жидкость, над которой имеется паровой объем. Отвод тепла осуществляется в процессе кипения жидкости на охлаждаемой поверхности. Движение жидкости происходит за счет разности ее плотности вблизи охлаждаемой поверхности и на границе раздела жидкость—пар. Разность температур между охлаждаемой поверхностью и кипящей жидкостью обычно мала, поэтому температура кипения выбранного теплоносителя при определенном давлении должна быть чуть ниже допустимой температуры охлаждаемой поверхности.

Рассматриваемый способ охлаждения имеет ряд особенностей. При определенном значении рассеиваемой мощности преобразователя жидкость на охлаждаемой поверхности начинает кипеть, возникают пузырьки, которые отрываются от этой поверхности и движутся к границе раздела жидкость—пар. Движение пузырьков вызывает перемешивание жидкости вблизи центров парообразования. По мере роста мощности, рассеиваемой охлаждаемой поверхностью, количество действующих центров парообразования и частота отрыва пузырьков возрастают и коэффициент теплоотдачи увеличивается. Этот режим кипения называется *пузырьковым* и часто применяется при естественном испарительном охлаждении пре-

образователя. При значительном увеличении мощности, рассеиваемой охлаждаемой поверхностью, возникающие на этой поверхности пузырьки сливаются в сплошную пленку, которая оттесняет жидкость от поверхности, и условия теплоотдачи резко ухудшаются. Этот режим кипения называется *пленочным* и сопровождается резким повышением температуры охлаждаемой поверхности. Значения удельной мощности рассеивания, коэффициента теплоотдачи и других параметров, соответствующих переходу пузырькового режима в пленочный, называют *критическими*, а само явление — *кризисом кипения*. Возникновение кризиса кипения зависит от многих факторов, но главным образом от типа теплоносителя, удельной мощности рассеивания и характера охлаждаемой поверхности. Возможен и обратный переход от пленочного режима кипения к пузырьковому. Поэтому различают два кризиса кипения: первый — при переходе от пузырькового кипения к пленочному, второй — при переходе от пленочного кипения к пузырьковому. На рис. 7 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от удельной мощности и рассеивания  $q$  при естественном испарительном охлаждении. При увеличении рассеиваемой мощности коэффициент теплоотдачи увеличивается по кривой АК1. При некотором значении мощности  $q_{кр2}$  происходит скачкообразное уменьшение коэффициента теплоотдачи, что соответствует переходу от пузырькового кипения к пленочному — первый кризис кипения. При дальнейшем увеличении рассеиваемой мощности коэффициент теплоотдачи меняется по кривой СВ. При снижении нагрузки и некотором значении  $q_{кр1} < q_{кр2}$  происходит переход от пленочного кипения к пузырьковому — второй кризис кипения. На практике  $q_{кр1} \approx 0,25 q_{кр2}$ .

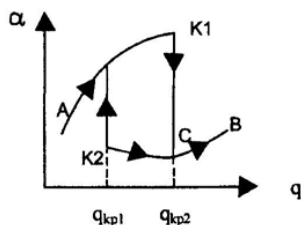


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельной рассеиваемой мощности

При конструировании полупроводникового преобразователя с естественным испарительным охлаждением необходимо обеспечить режим пузырькового кипения при всех рабочих и аварийных нагрузках преобразователя.

6. *Принудительное испарительное охлаждение.* Оно выполняется по такой же схеме, что и принудительное жидкостное охлаждение. Жидкость с помощью насоса прокачивается через специальные каналы в охлаждаемых узлах. Если допустимая температура охлаждаемой поверхности будет выше температуры кипения теплоносителя при данном давлении, а температура теплоносителя в ядре потока поддерживается равной или меньше температуры кипения, то в небольшом поверхностном слое вблизи охлаждаемой поверхности начнется режим пузырькового кипения. Возникающие в поверхностном слое пузырьки будут под действием потока жидкости удаляться с поверхности и конденсироваться в ядре потока. Зарождение, движение и конденсация паровых пузырьков вызывают интенсивный теплообмен между поверхностным слоем и ядром потока жидкости, особенно если оно недогрето. При этом плотность теплового потока может достигать очень больших величин. Предельные мощности рассеивания ограничены переходом пузырькового режима в пленочный. Однако благодаря интенсивному движению холодного ядра жидкости кризис кипения при принудительном испарительном охлаждении наступает при гораздо более высокой мощности рассеивания, чем при естественном испарительном охлаждении.

Принудительное испарительное охлаждение является самым эффективным из всех рассмотренных способов охлаждения и позволяет обеспечить нормальный тепловой режим работы преобразователя при максимальных удельных мощностях рассеивания.

## 2.4. Конструирование и тепловой расчет радиаторов и мощных полупроводниковых приборов при естественном воздушном охлаждении

### 2.4.1. Конструкция радиаторов для естественного воздушного охлаждения

В системах естественного воздушного охлаждения мощных полупроводниковых приборов чаще всего используются следующие типы радиаторов (рис. 8): с плоскими ребрами на плоской поверхности (рис. 8, а); с плоскими ребрами вдоль цилиндрической поверхности (рис. 8, б); с плоскими ребрами поперек цилиндрической поверхности (рис. 8, в) и с круглыми ребрами поперек цилиндрической поверхности (рис. 8, г).

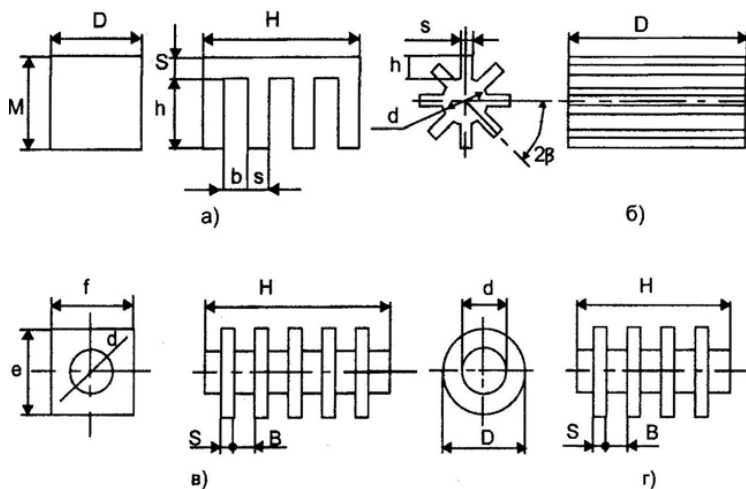


Рис. 8. Конструкции радиаторов для естественного воздушного охлаждения

К конструкции радиаторов для естественного воздушного охлаждения предъявляются следующие требования.

1. Для компенсации малого коэффициента теплоотдачи радиаторы должны иметь развитую поверхность охлаждения.

2. Для увеличения теплоотдачи излучением поверхность радиатора следует окрашивать.

3. При выборе расстояния между ребрами радиатора необходимо соблюдать условие отсутствия взаимодействия пограничных конвективных слоев воздуха, развиваемых на поверхности ребер. Расстояние между ребрами  $b > 2\Delta$ , где  $\Delta = \lambda_m / \alpha_k$  – толщина пограничного слоя;  $\lambda_m$  – теплопроводность окружающей среды при определяющей температуре  $t_m = 0,5(t_c + t_{ic})$ ;  $t_{ic}$  – температура окружающей среды в пространстве между ребрами;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности ребер. Предварительно можно принять  $\alpha_k = 5 \dots 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$  и затем уточнить при дальнейших тепловых расчетах радиатора.

4. При выборе длины ребра следует учитывать взаимное экранирующее влияние ребер друг на друга, возрастающее с увеличением длины ребра. В качестве материала для радиаторов используют медь, алюминий и его сплавы.

Медь имеет высокую теплопроводность, не создает гальваническую пару с поверхностью прибора. К недостаткам меди относятся ее высокий удельный вес и дороговизна. Применяется в преобразователях, предназначенных для работы во влажных и агрессивных средах.

Алюминий и его сплавы имеют малый удельный вес, более дешевы и технологичны в изготовлении по сравнению с медью. Недостатки: меньшая теплопроводность, возможность создания гальванической пары с поверхностью прибора, что вызывает коррозию прибора и радиатора. Применяются в преобразователях общего назначения.

#### **2.4.2. Расчет теплообмена радиатора в условиях естественного охлаждения**

При тепловом расчете вся поверхность радиатора разбивается на  $n$  частей, каждая из которых в общем случае имеет свои уравнения теплообмена с окружающей средой. В пределах каждой  $i$ -й поверхности температурное поле считается равномерным, а коэффициенты теплоотдачи – не зависящими от координат. Тепловая мощность, передаваемая со всей поверхности радиатора окружающей среде,

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n [\alpha_{ik} (t_i - t_{ic}) s_i + \alpha_{in} (t_i - t_{ic}) s_i], \quad (2.56)$$

где  $P_i$  — тепловая мощность, отдаваемая  $i$ -й поверхностью в окружающую среду;  $\alpha_{ik}$  и  $\alpha_{in}$  — соответственно, коэффициенты теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием  $i$ -й поверхности;  $t_i$  — температура  $i$ -й поверхности;  $t_{ic}$  — температура окружающей среды вблизи  $i$ -й поверхности.

Для упрощения расчета введем следующие допущения.

1. Вместо  $n$  неизвестных температур поверхностей  $t_i$  будем рассматривать одну среднеповерхностную температуру  $t_s$ .

2. Вместо  $n$  температур окружающей среды  $t_{ic}$  будем рассматривать две температуры окружающей среды: температуру окружающей среды в пространстве между ребрами радиатора  $t_{ic}$  и температуру окружающей среды вблизи остальных поверхностей, не отдающих тепло в пространство между ребрами  $t_c$ .

Из рассмотрения конвективного теплообмена между вертикальными поверхностями получена следующая зависимость между температурой в точке с координатами  $x$ ,  $y$  и физическими свойствами среды:

$$t_{ic} = t_s - (t_s - t_c) \cdot L(\eta), \quad (2.57)$$

где  $L$  и  $\eta$  — безразмерные критерии, зависящие от координат средней точки:

$$\eta = \frac{y}{x} \cdot (\text{Gr})^{1/4}. \quad (2.58)$$

При расчете  $\eta$  для радиаторов обычно принимают следующие координаты средней точки:  $y = 0,5b$ ;  $x = 0,5D$ . Для этого случая значения функции  $L(\eta)$  приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Значения функции  $L(\eta)$

$\eta$	0	0,2	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
$L(\eta)$	0	0,095	0,245	0,39	0,48	0,68	0,815	0,895	0,935	0,96	0,98	0,99

Коэффициент теплоотдачи конвекцией для каждой поверхности радиатора определяется по известной формуле

$$\alpha_{ik} = \frac{\text{Nu}_i \cdot \lambda}{l_i},$$



где  $Nu_i = f(Gr, Pr)$  – критериальное уравнение, определяемое для каждой поверхности в зависимости от вида поверхности, условий ее обтекания воздухом и т. д.

Коэффициент теплоотдачи излучением является функцией от  $\alpha_{in} = f(t_s, t_{ic}, \varphi_i)$  и рассчитывается по формуле (2.37). Коэффициенты облученности поверхностей  $\varphi_i$  зависят от типа радиаторов.

Для радиаторов с прямыми ребрами на плоскости (рис. 8, а)

$$\varphi = \frac{b}{b + 2h}. \quad (2.59)$$

Для радиатора с плоскими ребрами вдоль цилиндрической поверхности (рис. 8, б)

$$\varphi = \frac{(r + h) \cdot \sin \beta}{r\beta + h}, \quad (2.60)$$

где  $r = d/2$  – радиус несущего цилиндра.

Коэффициент облученности для радиаторов с круглыми ребрами поперек цилиндрической поверхности (рис. 8, в) определяем по графикам (рис. 9).

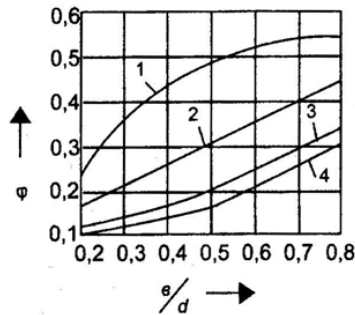


Рис. 9. Зависимость коэффициента взаимнооблученности от геометрических размеров радиатора

Для радиатора с прямыми ребрами поперек цилиндрической поверхности (рис. 8, в) можно воспользоваться графиками (рис. 9), определяя размер  $D$  как эквивалентный диаметр равновеликого круга:

$$D = \sqrt{\frac{4e \cdot f}{\pi}}. \quad (2.61)$$

Так как коэффициенты теплоотдачи являются функциями температуры поверхности радиатора  $t_s$ , то расчет теплообмена сводится к получению зависимости мощности, рассеиваемой радиатором от превышения среднеповерхностной температуры  $t_s$  над температурой охлаждающей среды  $t_c$ . Эта зависимость  $P = f(t_s - t_c)$  называется *тепловой характеристикой радиатора*.

### 2.4.3. Порядок расчета тепловых характеристик радиатора при естественном воздушном охлаждении

Рассмотрим последовательность операций при расчете тепловых характеристик радиатора в условиях естественного воздушного охлаждения на примере широко применяемого охладителя с прямыми ребрами на плоскости (рис. 8, а).

Исходные данные для расчета: геометрические размеры радиатора  $M, D, H, h, b, \delta$ ; количество ребер охлаждения  $n$ ; температура окружающей среды  $t_c$ ; степень черноты поверхности радиатора  $\epsilon$ .

#### *Порядок расчета*

1. Рассчитываем площади теплоотдающих поверхностей радиатора.

1.1. Внутренняя поверхность ребер радиатора:

$$S_1 = 2 \cdot (n - 1) \cdot h \cdot D. \quad (2.62)$$

1.2. Внутренняя поверхность между ребрами радиатора:

$$S_2 = (n - 1) \cdot b \cdot D. \quad (2.63)$$

1.3. Внешняя поверхность ребер радиатора:

$$S_3 = 2 \cdot M \cdot D. \quad (2.64)$$

1.4. Внешняя торцевая поверхность ребер радиатора:

$$S_4 = n \cdot \delta \cdot (D + 2h) + 2 \cdot (M - h) \cdot H. \quad (2.65)$$

1.5. Поверхность радиатора, на которую устанавливается полупроводниковый прибор:

$$S_5 = D \cdot H. \quad (2.66)$$

1.6. Суммарная поверхность охлаждения радиатора:

$$S = \sum_{i=1}^5 S_i. \quad (2.67)$$

2. Определяем среднеповерхностную температуру нагрева радиатора:

$$t_s = t_c + \Delta t_s, \quad (2.68)$$

где  $\Delta t_s$  – перепад температуры между поверхностью радиатора и окружающей средой, величиной которого задаются в зависимости от требуемой точности расчета.

3. Рассчитываем определяющую температуру для поверхностей  $S_3, S_4, S_5$ , отдающих тепло непосредственно в окружающую среду с температурой  $t_c$ :

$$t_{m3} = t_{m4} = t_{m5} = 0,5 \cdot (t_s + t_c). \quad (2.69)$$

4. Определяем безразмерный критерий  $\eta$ . Путем преобразования формулы (2.58) получено следующее уравнение для его нахождения:

$$\eta = A_4(t_m) \cdot b \cdot \frac{(t_s - t_c)^{0,25}}{D^{0,25}}, \quad (2.70)$$

где  $b$  и  $D$  – геометрические размеры радиатора, мм;  $A_4(t_m)$  – параметр, учитывающий свойства окружающей среды при температуре  $t_m$ , значения которого приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Значение параметра  $A_4$

$t_m, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120
$A_4$	0,395	0,375	0,36	0,35	0,335	0,325	0,315	0,303	0,293	0,28	0,26

5. По табл. 2.8 вычисляем значение функции  $L(\eta)$ .

6. Находим температуру окружающей среды в пространстве между ребрами радиатора:

$$t_{ic} = t_s - (t_s - t_c) \cdot L(\eta). \quad (2.71)$$

7. Рассчитываем определяющую температуру для поверхностей  $S_1$  и  $S_2$ , отдающих тепло в пространство между ребрами радиатора с температурой

$$t_{m1} = t_{m2} = 0,5 \cdot (t_s + t_{ic}). \quad (2.72)$$

8. По уравнениям (2.10), (2.14) или (2.18) находим коэффициенты теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{k1}$  и  $\alpha_{k2}$  с поверхностей  $S_1$  и  $S_2$ . При

этом за характерный геометрический размер тела принимается размер  $D$ .

9. Аналогично п. 8 выбираем критериальные уравнения и считываем коэффициенты теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{к3}$ ,  $\alpha_{к4}$  и  $\alpha_{к5}$  для поверхностей  $S_3$ ,  $S_4$  и  $S_5$ , отдающих тепло непосредственно в окружающую среду.

10. Определяем коэффициент облученности ребер:

$$\varphi = \frac{b}{b + 2h}. \quad (2.73)$$

11. По формуле (2.37) находим коэффициенты теплоотдачи лучеиспусканием с поверхностей  $S_1$  и  $S_2$ :

$$\alpha_{л1} = \alpha_{л1} = f(\varepsilon, \varphi, t_s, t_{ic}).$$

12. Аналогично п. 11 рассчитываем коэффициенты теплоотдачи лучеиспусканием с поверхностей  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$ , принимая коэффициент облученности  $\varphi = 1$ :

$$\alpha_{л3} = \alpha_{л4} = \alpha_{л5} = f(\varepsilon, t_s, t_c).$$

13. Определяем суммарные коэффициенты теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием для всех поверхностей:

$$\alpha_i = \alpha_k + \alpha_{лi}. \quad (2.74)$$

14. Находим тепловую мощность, отдаваемую с каждой поверхности:

$$\begin{aligned} P_1 &= \alpha_1 \cdot S_1 \cdot (t_s - t_{ic}); \\ P_2 &= \alpha_2 \cdot S_2 \cdot (t_s - t_{ic}); \\ P_3 &= \alpha_3 \cdot S_3 \cdot (t_s - t_c); \\ P_4 &= \alpha_4 \cdot S_4 \cdot (t_s - t_c); \\ P_5 &= \alpha_5 \cdot S_5 \cdot (t_s - t_c). \end{aligned} \quad (2.75)$$

15. Рассчитываем общую тепловую мощность, рассеиваемую радиатором:

$$P = \sum_{i=1}^5 P_i. \quad (2.76)$$

16. Задаемся следующим значением перепада температуры между поверхностью радиатора и окружающей средой  $\Delta t_s$  и повторяем расчеты по п. 2–15. По результатам строим тепловую характеристику  $P = f(t_s - t_c)$ .

#### 2.4.4. Расчет нагрева мощных полупроводниковых приборов в стационарном тепловом режиме при естественном воздушном охлаждении

В стационарном (установившемся) тепловом режиме температурное поле полупроводникового прибора и радиатора является функцией одних только пространственных координат. В тепловом отношении полупроводниковый прибор может быть представлен в виде многослойной стенки с различными теплофизическими параметрами ее составляющих. Основная часть тепловой мощности выделяется в зоне  $p-n$  структуры, имеющей высокое сопротивление. Сопротивление других составляющих стенки значительно ниже, так как они выполнены из металлов с высоким значением электрической проводимости. Полупроводниковый прибор даже в установившемся режиме подвержен переменной нагрузке из-за пульсирующего тока. Поэтому импульсный характер тепловых потерь в нем аппроксимируется некоторым средним значением потерь в приборе в течение некоторого интервала времени. Задачей теплового расчета является определение основного параметра теплового режима – температуры  $p-n$  структуры.

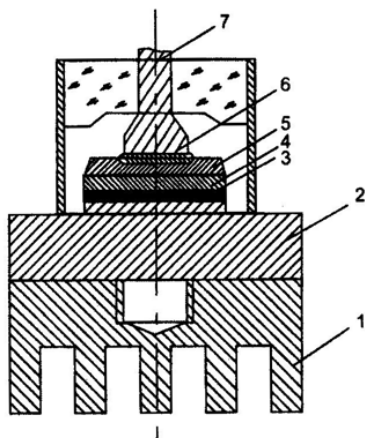


Рис. 10. Конструкция мощного прибора с радиатором: 1 – радиатор; 2 – корпус прибора; 3 – слой припоя; 4 – диск вольфрама; 5 – кремниевый кристалл; 6 – диффузионная область; 7 – силовой вывод

На рис. 10 рассмотрим пути, по которым происходит отвод тепла от зоны структуры к охлаждающей среде. Непосредственно от зоны тепловыделения тепловой поток направляется к корпусу прибора, преодолевая сопротивление многослойной стенки, состоящей из кристалла 5, кристаллодержателя 4 и припоя 3. Основная часть теплового потока, поступившего в корпус, направляется в радиатор, преодолевая при этом тепловое сопротивление контакта между корпусом и радиатором, а часть теплового потока рассеивается в окружающую среду непосредственно с поверхности корпуса. Некоторое количество тепловых потерь отводится от зоны  $p$ - $n$  структуры через гибкий силовой вывод 7 и далее с его поверхности рассеивается в окружающую среду.

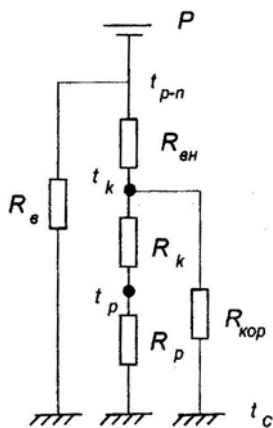


Рис. 11. Тепловая схема замещения полупроводникового прибора с охладителем:  $P$  – тепловые потери в  $p$ - $n$  переходе;  $R_{вн}$  – внутреннее тепловое сопротивление теплопроводности прибора;  $R_k$  – тепловое сопротивление теплопроводности между корпусом прибора и радиатором;  $R_p$  – тепловое сопротивление передачи тепла от поверхности контакта между радиатором и корпусом через радиатор в окружающую среду;  $R_{в}$  – тепловое сопротивление передачи тепла от  $p$ - $n$  перехода через гибкий вывод в окружающую среду;  $R_{кор}$  – теплоотдачи от корпуса прибора в окружающую среду

При расчете температуры  $p$ - $n$  структуры используется метод тепловых схем замещения, в основе которого лежит представление полупроводникового прибора и охладителя в виде системы одно-

родных тел, связанных между собой соответствующими процессами теплообмена. Тепловая схема замещения полупроводникового прибора с радиатором, составленная в соответствии с вышеизложенными представлениями о распределении тепловых потоков, представлена на рис. 11. При ее расчете принимаются следующие основные допущения:

- теплофизические параметры тел принимаются независимыми от координат и температуры;
- температура окружающей среды одинакова для всех теплоотдающих поверхностей;
- мощность тепловых потерь не зависит от температуры;
- коэффициенты теплоотдачи поверхностей полупроводниковых приборов не зависят от координат, а в случае принудительной конвекции с поверхности – и от температуры.

Рассмотрим расчет тепловых сопротивлений схемы замещения.

1. Внутреннее тепловое сопротивление  $R_{\text{вн}}$  в стационарном тепловом режиме для данного прибора является величиной постоянной и может быть вычислено как тепловое сопротивление многослойной стенки:

$$R_{\text{вн}} = \sum_{i=1}^4 \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot S_i}, \quad (2.77)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности материалов кристалла, диска, припоя и корпуса;  $\delta_i$  – толщина кристалла, диска, припоя и корпуса;  $S_i$  – поверхность, через которую проходит тепловой поток.

Теплофизические свойства материалов и геометрические размеры элементов полупроводниковых приборов могут быть неодинаковы даже для однотипных приборов, поэтому на практике величину  $R_{\text{вн}}$  определяют экспериментально и включают в паспортные характеристики приборов. Так, для диода ВЛ-50  $R_{\text{вн}} = 0,6$  °C/Вт, для диода ВЛ-200  $R_{\text{вн}} = 0,13$  °C/Вт, для тиристора ТБ-400  $R_{\text{вн}} = 0,05$  °C/Вт.

2. Тепловое сопротивление  $R_{\text{к}}$  между корпусом и поверхностью радиатора в месте контакта определяется характером теплопередачи в контактном слое и зависит от качества обработки контактирующих поверхностей, физико-механических свойств материалов, усилия в контакте, теплопроводящих свойств контактной смазки, которая может наноситься на соприкасающиеся между собой поверхности

прибора и радиатора. Тепловое сопротивление  $R_k$  обычно определяется экспериментально, и его значения указываются в справочниках по охладителям.

Приближенно сопротивление  $R_k$  можно рассчитать по формуле для плоской стенки:

$$R_k = \frac{\delta_k}{\lambda \cdot S_k}, \quad (2.78)$$

где  $\delta_k$  — зазор между корпусом прибора и охладителем;  $S_k$  — поверхность контактирования прибора и радиатора;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха или контактной смазки.

3. Тепловое сопротивление  $R_p$  складывается из теплового сопротивления теплопроводности радиатора и теплового сопротивления теплоотдачи от радиатора в окружающую среду, рассчитываемого при определении тепловых характеристик радиатора. Для некоторых типов охладителей имеются расчетные формулы, учитывающие обе составляющие сопротивления.

Для радиаторов с плоскими ребрами на плоской поверхности (см. рис. 8, а) выражение для расчета  $R_p$  выводится из уравнения температурного поля пластины и имеет следующий вид:

$$R_p = \frac{0,5\varphi'}{\lambda_p \cdot \delta_p}, \quad (2.79)$$

где  $\varphi' = f\left(\frac{r_0}{L_0}, \gamma\right)$  — функция, определяемая по таблице [7];

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha_{эфф} \frac{DH}{\pi} - r_0^2}{\lambda_p \cdot \delta_p \left(1 - \frac{r_0^2}{H^2 + D^2}\right)}} - \text{безразмерный параметр; } L_0 = \sqrt{\frac{H^2 + D^2}{2}};$$

$r_0$  — радиус области, занятой контактной поверхностью;  $\lambda_p$  — коэффициент теплопроводности материала радиатора;  $\delta_p$ ,  $D$ ,  $H$  — из

рис. 8, а;  $\alpha_{эфф} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i}{H \cdot D}$  — эффективный коэффициент теплоотдачи радиатора, приведенный к поверхности, на которой устанавливается полупроводниковый прибор;  $\alpha_i$ ,  $S_i$  — из теплового расчета радиатора.



Для радиаторов, ребра которых расположены на цилиндрической поверхности (рис. 8, б, в, г), выражение для расчета теплового сопротивления  $R_p$  выводится из уравнения температурного поля цилиндрического стержня:

$$R_p = \frac{ch(b_p \cdot l_p)}{a_p \cdot sh(b_p \cdot l_p)}, \quad (2.80)$$

где  $b_p = \sqrt{\frac{\alpha_{эфф} \cdot U_p}{\lambda_p \cdot f_p}}$ ;  $a_p = \lambda_p \cdot b_p \cdot f_p$ ;  $l_p$  – длина цилиндра, на котором расположены ребра охлаждения;  $f_p$  – площадь поперечного сечения цилиндра;  $U_p$  – периметр поперечного сечения цилиндра;

$\alpha_{эфф} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i}{f_p}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи радиатора.

4. При расчете теплового сопротивления  $R_b$  гибкого силового вывода делается упрощающее предположение о том, что температура в месте крепления вывода к шине равна температуре окружающей среды, то есть тепловой поток, отводимый через вывод, рассеивается, не доходя до места крепления вывода к шине. С учетом этого допущения, решая уравнение теплопроводности цилиндрического стержня, получим:

$$R_b = \frac{sh(b_b \cdot l_b)}{a_b \cdot ch(b_b \cdot l_b)}, \quad (2.81)$$

где  $b_b = \sqrt{\frac{\alpha_b \cdot U_b}{\lambda_b \cdot f_b}}$ ;  $a_b = \lambda_b \cdot b_b \cdot f_b$ ;  $l_b$  – длина вывода;  $U_b = \pi \cdot d_b$  – периметр поперечного сечения вывода для изолированных выводов ( $d_b$  – наружный диаметр изоляции);  $U'_b = 1,5 \cdot \pi \cdot d'_b$  – периметр поперечного сечения для неизолированных выводов ( $d'_b$  – диаметр вывода в месте выхода из корпуса; коэффициент 1,5 учитывает увеличение поверхности за счет неплотной укладки проводников вывода);  $f_b$  – площадь поперечного сечения вывода;  $\alpha_b = \alpha_{вк} + \alpha_{вл}$  – коэффициент теплоотдачи от вывода, определяемый по формулам для свободной конвекции  $\alpha_{вк}$  и лучеиспускания  $\alpha_{вл}$ .

5. Тепловое сопротивление  $R_{кор}$  передачи тепла с поверхности корпуса в окружающую среду:

$$R_{кор} = \frac{1}{\alpha_{кор} \cdot S_{кор}}, \quad (2.82)$$

где  $\alpha_{кор}$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса, определяемый по формулам свободной конвекции и лучеиспускания;  $S_{кор}$  — площадь теплоотводящей поверхности корпуса прибора.

Рассмотрим примерный порядок расчета температуры  $p$ - $n$  перехода в установившемся режиме по тепловой схеме замещения (рис. 11) методом последовательных приближений.

Исходные данные для расчета: геометрические размеры радиатора; тепловая мощность  $P$ , выделяемая в  $p$ - $n$  переходе; температура окружающей среды  $t_c$ ; степень черноты поверхности радиатора  $\epsilon$ .

1. Задаемся температурой  $p$ - $n$  перехода  $t_{p-n}$ .

2. Рассчитываем тепловое сопротивление  $R_b$  гибкого силового вывода по формуле (2.81).

3. Определяем тепловую мощность, отдаваемую в окружающую среду с поверхности гибкого силового вывода:

$$P_g = \frac{t_{p-n} - t_c}{R_g}. \quad (2.83)$$

4. Находим тепловой поток, проходящий через внутреннее сопротивление прибора:

$$P_{вн} = P - P_g. \quad (2.84)$$

5. Определяем по справочнику внутреннее тепловое сопротивление полупроводникового прибора  $R_{вн}$ .

6. Рассчитываем температуру внешней поверхности полупроводникового прибора:

$$t_k = t_{p-n} - P_{вн} \cdot R_{вн}. \quad (2.85)$$

7. Вычисляем тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности прибора в окружающую среду  $R_{кор}$  по уравнению (2.82).

8. Находим тепловую мощность  $P_{кор}$ , отдаваемую в окружающую среду с внешней поверхности прибора:

$$P_{кор} = \frac{t_k - t_c}{R_{кор}}. \quad (2.86)$$

9. Рассчитываем тепловой поток, поступающий в радиатор:

$$P_p = P_{вн} - P_{кор}. \quad (2.87)$$

10. Определяем по справочнику либо рассчитываем по формуле (2.78) тепловое сопротивление  $R_k$  контакта между корпусом прибора и радиатором.

11. Вычисляем температуру нагрева внешней поверхности радиатора:

$$t_p = t_k - P_p \cdot R_k. \quad (2.88)$$

12. Разбиваем радиатор на поверхности с одинаковыми условиями охлаждения и рассчитываем коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_i$  с каждой поверхности (см. подраздел 2.4.3).

13. Находим тепловое сопротивление  $R_p$  по уравнениям (2.79) или (2.80).

14. Вычисляем общее тепловое сопротивление схемы замещения  $R_\Sigma$ :

$$R_1 = R_p + R_k; \quad R_2 = (R_1 \cdot R_{\text{кор}})/(R_1 + R_{\text{кор}}); \quad R_3 = R_2 + R_{\text{вн}}; \\ R_\Sigma = (R_b \cdot R_3)/(R_b + R_3).$$

15. Определяем температуру  $p$ - $n$  перехода:

$$t'_{p-n} = t_c + R_\Sigma \cdot P. \quad (2.89)$$

16. Если  $t'_{p-n} = t_{p-n}$ , то расчет прекращается. Если  $t'_{p-n} \neq t_{p-n}$ , то задаемся следующим значением температуры  $p$ - $n$  перехода и повторяем п. 3–15.

Как правило, тепловой поток с поверхности корпуса прибора и по гибкому выводу учитывается лишь при проведении уточненных тепловых расчетов. В большинстве практических случаев с достаточной точностью можно считать, что весь тепловой поток отводится радиатором. Тепловой поток через корпус и гибкий вывод прибора составляет не более 10 % от общего теплового потока для резьбовых приборов, а для таблеточных приборов он вообще близок к нулю. Упрощенная тепловая схема замещения приведена на рис. 12. Расчет температуры  $p$ - $n$  перехода по упрощенной тепловой схеме замещения проводится в следующей последовательности.

1. Задаемся значением превышения среднеповерхностной температуры нагрева радиатора над температурой окружающей среды и определяем коэффициенты теплоотдачи и тепловой поток  $P$  с поверхности радиатора (см. подраздел 2.4.3).

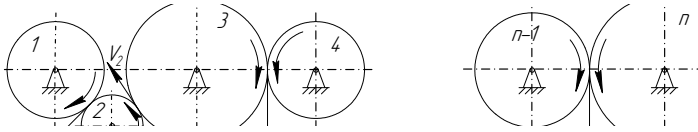


Рис. 12. Упрощенная тепловая схема замещения

2. Рассчитываем тепловое сопротивление радиатора  $R_p$  по уравнениям (2.79) или (2.80).

3. Определяем по справочнику или рассчитываем по формуле (2.78) тепловое сопротивление контакта между корпусом прибора и поверхностью радиатора  $R_k$ .

4. Определяем по справочнику внутреннее тепловое сопротивление прибора  $R_{вн}$ .

5. Вычисляем температуру  $p$ - $n$  перехода:

$$t_{p-n} = P \cdot (R_{вн} + R_k + R_p) + t_c. \quad (2.90)$$

6. Аналогично проводим расчет для других значений превышения среднесредней температуры радиатора над температурой окружающей среды и строим зависимость  $t_{p-n} = f(P)$ .

## 2.5. Конструирование и тепловой расчет радиаторов систем принудительного воздушного охлаждения

### 2.5.1. Конструкция радиаторов для принудительного воздушного охлаждения

С ростом тепловых нагрузок естественное воздушное охлаждение оказывается недостаточно эффективным и возникает необходимость в применении принудительного воздушного охлаждения. Наличие вентиляторов в системах принудительного воздушного охлаждения позволяет обеспечить необходимые скорости движения воздушного потока у теплоотводящих поверхностей, в результате чего существенно возрастают значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией по сравнению с естественным воздушным охлаждением. При принудительном воздушном охлаждении тепловой поток, отводимый лучеиспусканием, значительно меньше теплового потока, отводимого конвекцией, и в тепловых расчетах его, как правило, не учитывают.

К конструкции радиаторов, применяющихся в системах принудительного воздушного охлаждения, предъявляются следующие требования.

1. Радиаторы должны иметь развитую поверхность охлаждения и выполняться из материала с высокой теплопроводностью.

2. Теплоемкость радиатора должна быть достаточно высокой для аккумуляции тепла в случае возможных перегрузок при работе полупроводникового прибора.

3. Межреберные пространства, образующие каналы для прохода воздуха, следует выбирать с учетом того, что при уменьшении расстояния между ребрами возрастает аэродинамическое сопротивление системы, что приводит к необходимости увеличения габаритов вентилятора и мощности приводного электродвигателя.

4. При выборе длины ребра следует помнить, что по мере удаления от основания ребра температура его падает, а следовательно, количество тепла, отводимого с единицы поверхности на конце ребра, меньше у его основания. Таким образом, увеличение теплоотдающей поверхности радиатора за счет удлинения ребра сверх некоторой оптимальной длины оказывается совершенно неэффективным средством.

С точки зрения тепло- и электропроводности, а также коррозионной стойкости лучшими являются медные радиаторы с контактной поверхностью, покрытой серебром или оловом. Однако применение меди для изготовления радиаторов повышает стоимость полупроводникового преобразователя и увеличивает его массу.

Замена меди алюминием и его сплавами экономически выгодна, так как не только удешевляет и облегчает преобразователь, но и значительно упрощает технологический процесс изготовления радиаторов. Применение алюминия и его сплавов в качестве материала для радиаторов имеет и свои недостатки. В процессе работы под влиянием влажности среды и большой электрохимической разности потенциалов пары «серебряная медь – алюминий» между корпусом прибора и контактной поверхностью радиатора происходит коррозия алюминия. Для устранения этого явления литые радиаторы из алюминия и его сплавов армируют медными втулками или между прибором и радиатором прокладывают медную пластину, по кото-

рой электрический ток отводится, минуя охладитель и не разрушая контактную поверхность.

В настоящее время для изготовления радиаторов из чистого алюминия или алюминия с противокоррозионными присадками широко используется метод экструзии. Радиаторы изготавливаются из подогретого алюминиевого слитка путем продавливания под большим давлением через специальную матрицу. В результате получается полуфабрикат, представляющий собой профилированную полосу. Полоса разрезается на куски необходимой длины, каждый из которых проходит дальнейшую обработку: сверление, нарезание резьбы и т. д. Метод экструзии обеспечивает достаточную точность геометрических размеров, высокое качество поверхностей и уплотнение материала радиатора. Радиаторы из чистого алюминия или алюминия с противокоррозионными присадками, изготовленные методом экструзии, имеют высокую тепло- и электропроводность и устойчивость к коррозии, что позволяет успешно осуществлять не только тепловой, но и электрический контакт радиатора с прибором и сборной ошиновкой.

В настоящее время промышленность серийно выпускает множество различных конструкций радиаторов для принудительного воздушного охлаждения. В качестве примера некоторые из них приведены на рис. 13.

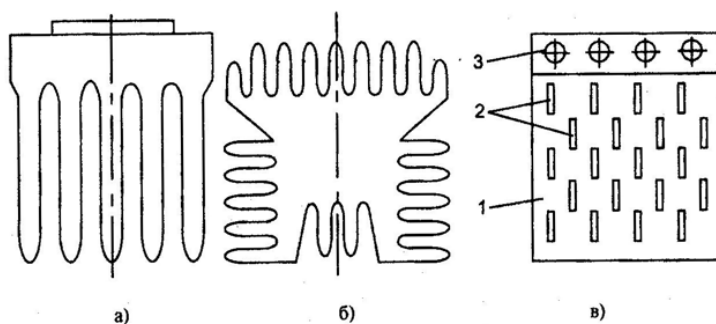


Рис. 13. Конструкция радиаторов для принудительного воздушного охлаждения

Отечественной промышленностью комплектно с мощными диодами и тиристорами поставляются радиаторы, показанные на рис. 13, *а*. Они изготавливаются из меди для тропического и морского исполнения и из алюминиевых сплавов для общепромышленного исполнения.

Радиатор (рис. 13, *б*) изготавливается фирмой Siemens из чистого алюминия или алюминия с противокоррозионными присадками методом экструзии и имеет большую эффективную поверхность охлаждения. На лицевой плоскости радиатора выполняются резьбовые отверстия для винчивания приборов с резьбами М6, М12, М16, М20 или отверстия для установки прижимного устройства для таблеточных приборов. Профиль радиатора может иметь самую различную конфигурацию с целью увеличения эффективности теплоотдачи от него. Теплоотдачу от радиаторов увеличивают переводом ламинарного режима течения воздуха между ребрами на турбулентный. Для этого на ребрах радиаторов выполняют выступы или углубления, расположенные поперек движения воздуха, что обеспечивает турбулентность и улучшает теплоотдачу от радиатора в окружающую среду.

На рис. 13, *в* показан радиатор, составленный из пластин 1 с отверстиями 2. Охлаждающие пластины 1 разделены дистанционными прокладками и стянуты заклепками 3 в компактный блок, с одной стороны которого образуется сплошная ровная поверхность для установки полупроводникового прибора. Пластины и дистанционные прокладки в местах контакта обрабатываются с целью увеличения шероховатости, снабжаются параллельными, западающими друг в друга бороздками и смазываются вазелином с высокой теплопроводностью. Охладители с пластинчатыми ребрами могут быть склепаны и с двух сторон, в результате чего образуются закрытые каналы и две полости для установки полупроводниковых приборов.

### 2.5.2. Расчет теплообмена полупроводникового прибора на радиаторе при принудительном воздушном охлаждении

Как видно из рассмотренных конструкций радиаторов для принудительного воздушного охлаждения, наибольшее применение в них нашли прямые ребра охлаждения. При расчете коэффициента теплоотдачи с внутренней поверхности прямых ребер за определяющий размер принимается гидравлический диаметр канала между ребрами с длиной  $h$  и расстоянием между ребрами  $b$ :

$$d_r = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4b \cdot h}{2(b+h)} = \frac{2b \cdot h}{b+h}. \quad (2.91)$$

При принудительном охлаждении радиатора и естественном охлаждении корпуса прибора и гибкого вывода тепловой поток с поверхности корпуса и вывода много меньше теплового потока, отводимого с поверхности радиатора. Поэтому при принудительном воздушном охлаждении тепловые сопротивления корпуса  $R_{\text{кор}}$  и гибкого вывода  $R_{\text{в}}$  считают равными бесконечности, и тепловая схема замещения прибора на радиаторе имеет вид, представленный на рис. 12.

При выводе формулы (2.79) для расчета сопротивления радиатора при естественном воздушном охлаждении принималось допущение, что из-за низких значений коэффициентов теплоотдачи в окружающую среду теплопроводность материала радиатора можно считать равной бесконечности. При принудительном охлаждении и сравнительно длинных ребрах радиатора величина теплового сопротивления теплопроводности ребер радиатора оказывается достаточно высокой и ее необходимо учитывать при расчете. Поэтому в уравнение (2.79) для расчета  $R_p$  при принудительном воздушном охлаждении представляют не реальный коэффициент теплоотдачи с поверхностей радиатора, рассчитанный по формулам вынужденной конвекции, а эквивалентный коэффициент теплоотдачи, определяемый по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{экв}} = \alpha \cdot c_3, \quad (2.92)$$

где  $\alpha$  – реальный коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формулам для принудительной конвекции;  $c_3 = (thK)/K$  – коэффициент эффективности ребра;  $K = h \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_p \cdot \delta}}$  – безразмерный параметр;



$\delta$  – толщина ребра охлаждения;  $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности материала радиатора.

Рассмотрим для примера последовательность расчета температуры  $p$ - $n$  перехода полупроводникового прибора на радиаторе с прямыми ребрами на плоской поверхности (рис. 14).

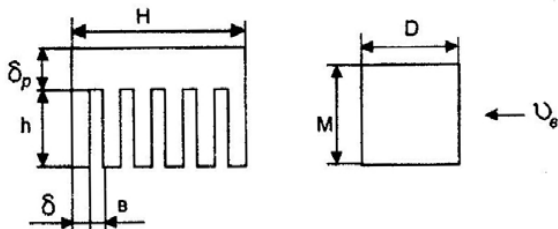


Рис. 14. Радиатор с прямыми ребрами на плоской поверхности

Исходные данные для расчета: геометрические размеры радиатора (рис. 14); тип полупроводникового прибора; температура охлаждающей среды  $t_c$ ; скорость движения воздуха, обдувающего радиатор  $V_g$ ; тепловые потери в приборе  $P$ .

1. Разбиваем всю поверхность радиатора на поверхности с одинаковыми условиями охлаждения и определяем их площадь.

1.1. Внутренняя поверхность между ребрами радиатора, внутри которой, как в канале, движется воздух:

$$S_1 = (n - 1) \cdot (b + 2 \cdot h) \cdot D. \quad (2.93)$$

1.2. Внешняя поверхность радиатора, вдоль которой движется охлаждающий воздух:

$$S_2 = (2M + n \cdot \delta) \cdot D. \quad (2.94)$$

1.3. Внешняя поверхность радиатора, поперек которой движется охлаждающий воздух:

$$S_3 = 2(n \cdot \delta \cdot h + H \cdot \delta_p). \quad (2.95)$$

1.4. Полная теплоотдающая поверхность радиатора:

$$S = \sum_{i=1}^3 S_i. \quad (2.96)$$

2. Определяем коэффициент теплоотдачи с поверхности  $S_1$ .

2.1. По уравнению (2.91) рассчитываем гидравлический диаметр канала  $d_r$ , образованного ребрами радиатора.

2.2. Вычисляем критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{V_g \cdot d_r}{\nu_g}, \quad (2.97)$$

где  $\nu_g$  – кинематическая вязкость воздуха при температуре  $t_c$ .

По величине критерия Рейнольдса определяем режим течения воздуха и выбираем расчетную формулу для нахождения критерия Нуссельта.

2.3. По рассчитанному критерию Нуссельта вычисляем коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_g}{d_r}, \quad (2.98)$$

где  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

2.4. По формуле (2.92) находим эквивалентный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{экр1}}$  с поверхности  $S_1$ .

3. Определяем коэффициент теплоотдачи с поверхности  $S_2$ . Это теплоотдача при продольном обтекании тела с характерным геометрическим размером  $D$ .

3.1. Вычисляем критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{V_g \cdot D}{\nu_g}. \quad (2.99)$$

По величине критерия Рейнольдса определяем режим течения воздуха и выбираем критериальное уравнение для расчета критерия Нуссельта.

3.2. Находим коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_g}{D}. \quad (2.100)$$

3.3. По формуле (2.92) рассчитываем эквивалентный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{экр2}}$  с поверхности  $S_2$ .

4. Определяем коэффициент теплоотдачи с поверхности  $S_3$ . Этот случай теплообмена можно свести к теплоотдаче при поперечном обтекании тела цилиндрической формы с эквивалентным диаметром:

$$d_{\text{ЭК}} = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4H \cdot D}{2(H + D)} = \frac{2H \cdot D}{H + D}. \quad (2.101)$$

4.1. Находим критерий Рейнольдса, по значению которого выбираем критериальное уравнение для расчета критерия Нуссельта:

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{в}} \cdot d_{\text{ЭК}}}{\nu_{\text{в}}}. \quad (2.102)$$

4.2. Вычисляем коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_3 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{г}}}{d_{\text{ЭК}}}. \quad (2.103)$$

4.3. По уравнению (2.92) рассчитываем эквивалентный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{экв3}}$  с поверхности  $S_3$ .

5. Определяем эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности радиатора:

$$\alpha_{\text{эфф}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \alpha_{\text{экв}i} \cdot S_i}{H \cdot D}. \quad (2.104)$$

6. По формуле (2.79) находим тепловое сопротивление радиатора  $R_{\text{р}}$ .

7. Определяем по справочнику либо рассчитываем по уравнению (2.78) тепловое сопротивление контакта между корпусом прибора и радиатором.

8. Определяем по справочнику внутреннее тепловое сопротивление полупроводникового прибора  $R_{\text{вн}}$ .

9. Пользуясь тепловой схемой замещения (рис. 12), рассчитываем температуру нагрева  $p$ - $n$  структуры:

$$t_{\text{p-n}} = P \cdot (R_{\text{вн}} + R_{\text{к}} + R_{\text{р}}) + t_{\text{с}}. \quad (2.105)$$

## 2.6. Конструирование систем жидкостного охлаждения

Наряду с воздушным охлаждением широкое применение в силовых полупроводниковых преобразователях нашли системы жидкостного охлаждения. Теплоемкость и теплопроводность жидких теплоносителей гораздо выше, чем газообразных, поэтому системы жидкостного охлаждения более эффективны, чем системы воздушного охлаждения. Недостатком систем жидкостного охлаждения по

сравнению с системами воздушного охлаждения является их большая сложность конструктивного исполнения и меньшая надежность.

Технико-экономические исследования ряда жидких теплоносителей, таких как вода, трансформаторное масло, глицерин, этиловый спирт, различные сложные композиционные жидкости, показали, что тепловая мощность, переносимая в равных условиях различными жидкостями, максимальна у воды. Поэтому вода получила особенно широкое распространение в качестве охлаждающей жидкости. Наряду с водой в ряде случаев применяется трансформаторное масло. Обе охлаждающие жидкости в силу своих специфических физических свойств имеют определенные сферы применения.

*Достоинствами трансформаторного масла* являются его высокие электроизоляционные свойства и способность предохранять от коррозии охлаждаемый объект.

Однако вязкость трансформаторного масла значительно выше вязкости воды. Поэтому для создания циркуляции масла, по эффективности соизмеримой с циркуляцией воды, требуются большие диаметры трубопровода и более высокий напор. Кроме того, высокая вязкость масла приводит к тому, что даже при больших скоростях движения жидкости режим ее течения остается ламинарным, что снижает теплосъем с охлаждаемой поверхности. Эксплуатация систем с масляным охлаждением требует также осуществления ряда мер противопожарного характера.

Все эти соображения обусловили *применение масляного охлаждения*, как правило, только в полупроводниковых преобразователях, конструктивно совмещенных с силовыми трансформаторами, уже имеющими масляное охлаждение.

При конструировании систем масляного охлаждения полупроводниковых приборов необходимо учитывать следующие условия:

- охладители, находящиеся под разными потенциалами, охлаждаются последовательно одним и тем же потоком масла;
- секции охладителей находятся на минимальном расстоянии друг от друга, определяемом только величиной пробивного напряжения;
- теплоотдающие поверхности, омываемые маслом, должны быть оребрены;
- ввиду отсутствия коррозии секции охладителей выполняются из алюминия или его сплавов.

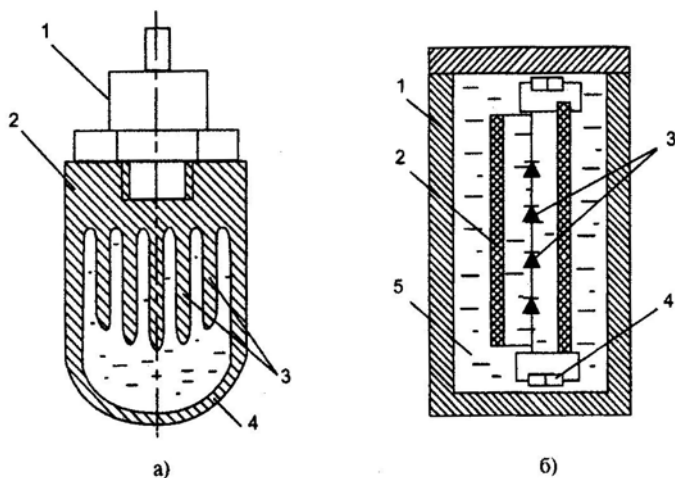


Рис. 15. Конструктивные схемы систем масляного охлаждения

На внешней поверхности охладителя 2 (рис. 15, а), изготовленного из алюминия, установлен полупроводниковый прибор 1. На внутренней поверхности охладителя 2 выполнены ребра охлаждения 3, которые омываются трансформаторным маслом 4.

В высоковольтных преобразователях часто используют столбы таблеточных силовых приборов. Эти столбы удобно изолировать и одновременно охлаждать маслом, что позволяет уменьшить габариты преобразователей (рис. 15, б). В баке 1, заполненном трансформаторным маслом 5, размещается столб таблеточных приборов 3 с выводами 4 в электроизоляционной трубе 2. При работе приборов масло в электроизоляционной трубе нагревается и перемещается вверх, а снизу в трубу поступает охлажденное масло, отдавшее тепло через стенки бака в окружающую среду. Таким образом, возникает автоматическая циркуляция масла, интенсивность которой зависит от мощности тепловых потерь, выделяемых в полупроводниковых приборах.

*Основными достоинствами воды как жидкого теплоносителя являются: высокая теплоемкость; незначительная вязкость, что позволяет создать достаточно эффективную систему охлаждения; невоспламеняемость.*

К недостаткам водяного охлаждения относятся:

- низкое удельное электрическое сопротивление воды, что приводит при охлаждении систем, элементы которых находятся под разностью потенциалов свыше 100 В, к появлению значительных токов утечки и электролитической коррозии, ведущей к разрушению поверхности канала;
- струйная эрозия, возникающая при повышенных скоростях протекающей в канале жидкости, когда поток воды срывает с поверхности канала частицы металла;
- насыщенность технической воды различными примесями, приводящая к оседанию на стенках канала накипи, что снижает эффективность теплосъема с поверхности канала.

*Водяное охлаждение* применяется:

1) в тех случаях когда на объектах уже предусмотрено водяное охлаждение систем, являющихся нагрузкой для полупроводниковых преобразователей, например, водяное охлаждение дуговых вакуумных печей;

2) в условиях, где воздушное охлаждение противопоказано в связи с загрязнением атмосферы токопроводящей пылью и взрывоопасными газами;

3) при необходимости создания в небольших объемах эффективной системы охлаждения с высокой удельной рассеиваемой тепловой мощностью.

Водяные системы охлаждения применяются как для индивидуального охлаждения вентилях, так и в групповых охладителях.

Полупроводниковый прибор 1 (рис. 16, а) смонтирован на охладителе 2, укрепленном на металлической трубе 3 круглого сечения. Изоляционная прокладка 4 изолирует теплоноситель от корпуса прибора, что позволяет применять систему охлаждения технической водой для всего ряда необходимых напряжений. Основной проблемой в этой конструкции является выбор материала изоляционной прокладки, которая должна обладать высокой теплопроводностью, низкой электропроводностью и механической прочностью. В рассматриваемой конструкции чаще всего применяются прокладки из лавсана.

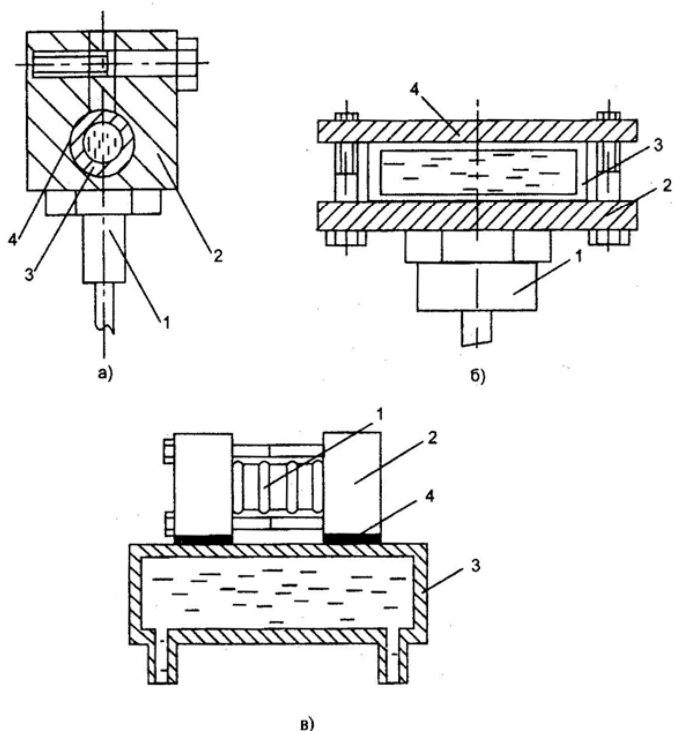


Рис. 16. Конструктивные схемы систем водяного охлаждения

На рис. 16, б приведена система непосредственного охлаждения вентилях технической водой фирмы General Electric (США). Полупроводниковый прибор 1 смонтирован на металлической трубе 3 прямоугольного сечения, по которой циркулирует вода. В качестве материала изоляционной прокладки используется майлар, перепад температур на котором составляет до 35 % от общего перепада температур между прибором и водой.

Часто применяемым способом водяного охлаждения является проточное охлаждение, при котором вода из водопровода непосредственно или после деионизации протекает через охладитель, а из него — в сточную систему. На рис. 16, в приведена для примера такая система охлаждения для таблеточных приборов.

Тепловой расчет полупроводниковых приборов с жидкостной системой охлаждения принципиально не отличается от расчета по-

лупроводниковых приборов с принудительной воздушной системой охлаждения. Без ущерба для точности расчета частью теплового потока с поверхностей корпуса и гибкого вывода можно пренебречь.

## 2.7. Теплообменники для жидкостного охлаждения

Тепловая мощность, забираемая жидкостью от полупроводникового преобразователя, должна передаваться в окружающую среду. Для этой цели используют теплообменники, в которых тепло передается от охлаждающей преобразователь жидкости в проточную воду или воздух через разделяющую их стенку.

К теплообменникам полупроводниковых преобразователей предъявляют следующие *основные требования*:

1) высокая эксплуатационная надежность, включающая герметичность теплообменника, малую засоряемость и доступность поверхностей к ремонту, осмотру и очистке;

2) высокие тепловые и гидродинамические качества поверхности нагрева, обеспечивающие максимальный теплосъем при минимальных затратах мощности;

3) конструктивно-технологические требования, заключающиеся в проектировании теплообменников с хорошими массогабаритными показателями и низкой стоимостью поверхности теплообмена.

Наиболее распространенными теплообменными аппаратами, применяемыми в системах жидкостного охлаждения полупроводниковых преобразователей, являются кожухо-трубчатые теплообменники, которые в основе конструкции имеют трубки. Схема простейшего кожухо-трубчатого теплообменника приведена на рис. 17.

Трубы 1 (рис. 17) разбиваются в трубной доске 2 по треугольнику (рис. 18, *а*) или по квадрату (рис. 18, *б*). Расстояние между осями трубок необходимо выполнять минимально допустимыми из условия заделки конца трубок в трубной доске. При этом увеличивается скорость теплоносителя в межтрубном пространстве и обеспечивается компактность теплообменника. В современных кожухо-трубчатых теплообменниках наиболее часто применяется разбивка по треугольнику с величиной перемычки  $\delta = 3$  мм.



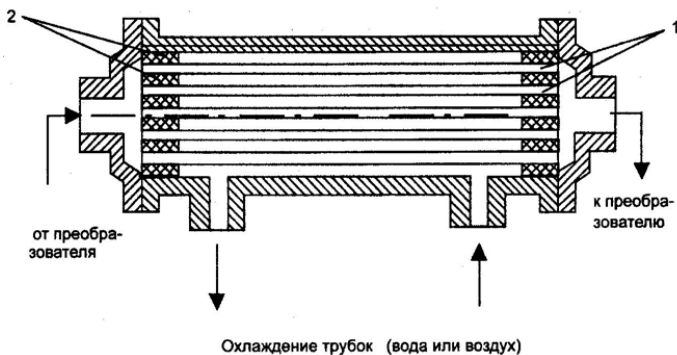


Рис. 17. Кожухо-трубчатый теплообменник

Широкое применение находят пластинчатые теплообменники, поверхность теплообмена которых образуется набором гофрированных пластин, отштампованных из тонкой листовой стали. Теплообмен между движущимися противотоком жидкостями осуществляется через стенки пластин. Рабочие жидкости движутся тонкими слоями в извилистых щелевых каналах, образуемых каждой парой пластин. За счет извилистого движения достигается усиленная турбулизация потока, что позволяет существенно интенсифицировать теплообмен. Пластинчатые теплообменники имеют удобный доступ ко всем теплообменным поверхностям для чистки и контроля, просты в сборке и разборке.

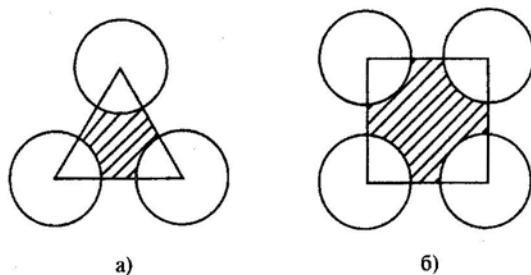


Рис. 18. Разбивка труб теплообменника

Для организации поперечного обтекания трубок или пластин и увеличения скорости движения охлаждающих их воды или воздуха применяются сегментные или кольцевые перегородки, устанавливаемые во внутренней полости теплообменника. Теплообменники с перегородками более эффективны по сравнению с теплообменниками с продольным обтеканием трубок, они могут быть выполнены с меньшим количеством трубок и имеют меньшие габаритные размеры, однако конструктивно и технологически сложны.

Вопрос о выборе той или иной конструкции теплообменника необходимо решать применительно к конкретному случаю, сопоставляя как массогабаритные, так и энергетические показатели.

Рассмотрим последовательность расчета кожухо-трубчатого теплообменника с продольным обтеканием трубок.

Исходные данные для расчета:

- суммарные отводимые от преобразователя через теплообменник тепловые потери  $P$ ;
- расход охлаждаемой жидкости внутреннего контура  $Q_B$ ;
- расход охлаждающей жидкости (воздуха) наружного контура  $Q_H$ ;
- температура жидкости внутреннего контура на входе в теплообменник  $t_3$ ;
- температура жидкости (воздуха) наружного контура на входе в теплообменник  $t_1$ ;
- наружный  $d_1$  и внутренний  $d_2$  диаметры трубок теплообменника.

### *Порядок расчета*

1. Вычисляем температуру охлаждающей жидкости внутреннего контура на выходе из теплообменника:

$$t_4 = t_3 - \frac{P}{c_B \gamma_B Q_B}, \quad (2.106)$$

где  $c_B$  и  $\gamma_B$  – соответственно теплоемкость и плотность жидкости внутреннего контура.

2. Рассчитываем температуру охлаждающей жидкости наружного контура на выходе из теплообменника:

$$t_3 = t_1 + \frac{P}{c_H \gamma_H Q_H}, \quad (2.107)$$

где  $c_H$  и  $\gamma_H$  – соответственно теплоемкость и плотность жидкости (воздуха) наружного контура.

3. Определяем среднее значение температуры жидкости внутреннего контура:

$$t_b = 0,5(t_3 + t_4). \quad (2.108)$$

4. Находим среднюю температуру жидкости наружного контура:

$$t_n = 0,5(t_1 + t_2). \quad (2.109)$$

5. Задаемся скоростью движения наружной жидкости в теплообменнике:  $V_n = 1...2$  м/с.

6. По формулам вынужденной конвекции (см. подраздел 2.1.3) рассчитываем коэффициент теплоотдачи  $\alpha_b$  от охлаждаемой жидкости к стенкам трубок теплообменника. В качестве определяющего размера принимаем внутренний диаметр трубок  $d_2$ .

7. Определяем коэффициент теплоотдачи конвекцией от наружных стенок трубок в охлаждающую жидкость (воздух) наружного контура  $\alpha_n$ . В качестве определяющего размера принимаем гидравлический диаметр межтрубного пространства, рассчитываемый по формуле (2.22).

8. Вычисляем общий коэффициент теплоотдачи от внутреннего контура к наружному:

$$K = \frac{\alpha_g \cdot \alpha_n}{\alpha_n + \alpha_g \cdot \frac{d_1}{d_2}}. \quad (2.110)$$

9. Находим среднелогарифмический перепад температуры между внутренним и наружным контурами:

$$\Delta t = \frac{(t_3 - t_1) - (t_4 - t_2)}{\ln \frac{t_3 - t_1}{t_4 - t_2}}. \quad (2.111)$$

10. Определяем необходимую поверхность охлаждения теплообменника с учетом загрязнения:

$$S = 1,1 \frac{P}{K \cdot \Delta t}. \quad (2.112)$$

11. Задаемся числом ходов жидкости наружного контура  $z_n = 1...2$ .

12. Рассчитываем необходимое количество охлаждающих трубок теплообменника и округляем до целого числа:

$$n = \frac{4Q_n \cdot z_n}{\pi \cdot d_2^2 \cdot V_n}. \quad (2.113)$$

13. Определяем рабочую длину трубок охлаждения:

$$l = \frac{S}{\pi \cdot d_1 \cdot n}. \quad (2.114)$$

## 2.8. Испарительное охлаждение

Самое интенсивное охлаждение достигается при использовании большой теплоты испарения жидкости. Испарительное охлаждение имеет ряд *преимуществ* по сравнению с воздушной и принудительной жидкостной системами охлаждения.

1. За счет высокой интенсивности теплоотдачи кипящей жидкости повышается нагрузочная способность полупроводниковых приборов.

2. Ускоряется становление температурного режима работы преобразователя с последующей его стабилизацией относительно температуры окружающей среды.

3. Исключается применение насосов для циркуляции жидкого теплоносителя, система работает бесшумно.

4. Достигается максимальная компактность блоков полупроводниковых приборов.

При испарительном охлаждении отвод тепла осуществляется за счет изменения агрегатного состояния теплоносителя путем превращения его в пар в процессе кипения. Коэффициент теплоотдачи при кипении воды составляет  $\sim 5,8 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С), что позволяет реализовать высокие плотности теплового потока при температурных напорах в 20...25 °С. Для сравнения, максимальные коэффициенты теплоотдачи для принудительного воздушного охлаждения: 60...80 Вт/(м<sup>2</sup> · °С), принудительного водяного охлаждения: 2000...2500 Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Процесс теплоотдачи при испарительном охлаждении включает три этапа:

- 1) отвод тепла с теплоотдающих поверхностей преобразователя кипящей жидкостью и накопление тепла в паровой фазе;
- 2) передача тепла от паровой фазы к поверхности теплообменника, воспринимающего тепло, сопровождаемая конденсацией пара;
- 3) передача тепла от теплообменника в окружающую среду.

Таким образом, циркуляция теплоносителя в испарительной системе охлаждения происходит естественным путем и не требует для своего осуществления дополнительных устройств.

К рабочей жидкости, используемой в системах испарительного охлаждения, предъявляются следующие требования: высокая электрическая прочность, достаточная термическая стабильность (то есть жидкость не должна разлагаться при длительном кипении), неагрессивность по отношению к конструкционным материалам, физиологическая пассивность, недефицитность, негорючесть. Чаще всего в качестве теплоносителя используют воду, органические и криогенные жидкости.

Испарительное охлаждение можно осуществить принципиально двумя способами: с помощью тепловых испарительных труб и погружным способом.

Тепловая труба (рис. 19) представляет собой герметичный корпус, стенки которого покрыты капиллярно-пористой структурой, называемой фитилем. Давление внутри трубы пониженное, чтобы жидкость испарялась при невысоких температурах. Тепловая труба заполняется рабочей жидкостью в таком количестве, чтобы фитиль был полностью насыщен ею.

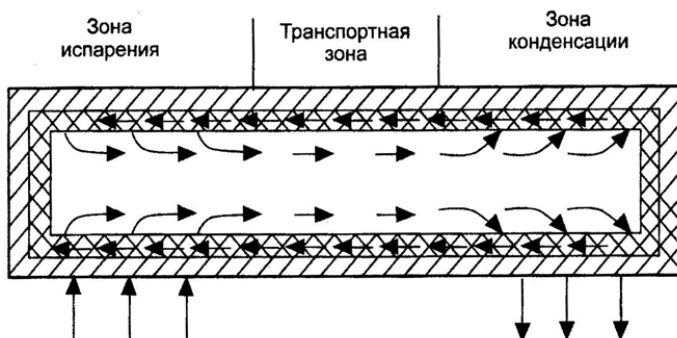


Рис. 19. Тепловая труба

При подводе тепла к зоне испарения, например от полупроводникового прибора, рабочая жидкость испаряется из фитиля, поглощая подведенное тепло. Давление пара внутри трубы увеличивает-

ся, что приводит к нарушению динамического равновесия системы «пар – жидкость», и пар начинает двигаться к холодному концу трубки по транспортной зоне. Здесь пар охлаждается, конденсируется и отдает конденсационное тепло, которое отводится в окружающую среду через стенки трубки и охладитель (зона конденсации). Сконденсировавшаяся жидкость осаждается в пористом покрытии трубки и под действием капиллярных сил перемещается в зону испарения. Этот процесс протекает непрерывно с минимальной разницей температур на концах трубы. Таким образом, с помощью тепловой трубы можно переносить значительное количество тепла на относительно большие расстояния при малом перепаде температур. Тепловая труба передает в 500 раз большее количество тепла, чем медный проводник такого же сечения при гораздо меньшем перепаде температуры на концах.

Тепловые трубы нашли широкое применение при охлаждении различной полупроводниковой аппаратуры. Они используются для охлаждения электронных блоков в спутниках связи, плат печатного монтажа, мощных транзисторов и тиристоров. Примеры конструктивного исполнения испарительных систем охлаждения на тепловых трубах приведены на рис. 20, где 1 – полупроводниковый прибор; 2 – корпус тепловой трубы; 3 – капиллярно-пористая структура; 4 – оребрение в зоне конденсации.

На рис. 20, *а* показана конструктивная схема установки мощного транзистора на тепловую трубу, которая может быть плоской или набираться из трубок круглого сечения, спаянных между собой. Недостатком этой схемы является наличие теплового сопротивления между транзистором и тепловой трубой, на котором существует перепад температур.

На рис. 20, *б* кристалл 1 мощного транзистора вмонтирован внутри тепловой трубы. Такая конструкция существенно усложняет прибор, но увеличивает надежность транзистора благодаря хорошему тепловому режиму.

На рис. 20, *в* показан пример применения тепловой трубы для охлаждения таблеточного тиристора или диода.

При погружном испарительном охлаждении полупроводниковый прибор или блок приборов погружают в жидкость с низкой

температурой кипения и хорошими электроизоляционными свойствами. В качестве рабочей жидкости часто используются фреоны, имеющие температуру кипения от 60 до 80 °С.

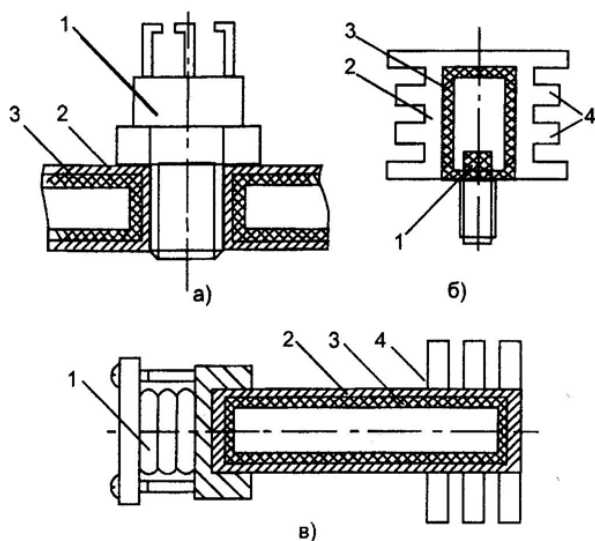


Рис. 20. Испарительные системы охлаждения на тепловых трубах

Рассмотрим принцип погружного испарительного охлаждения (рис. 21, а). В сосуде 1 помещен блок полупроводниковых приборов 2, а в сосуде 3 – проточный водяной охладитель 4. При работе блока жидкость в сосуде 1 испаряется под действием выделяющихся тепловых потерь. Пар перемещается из сосуда 1 в сосуд 3 и конденсируется на охладителе, отдавая ему тепловую мощность, отобранную у блока приборов.

Блок приборов и охладитель могут находиться и в общем сосуде, как показано на рис. 21, б, где 1 – сосуд, 2 – блок полупроводниковых приборов, 3 – проточный водяной охладитель.

Большим достоинством погружного испарительного охлаждения является постоянство температур полупроводниковых приборов при изменении выделяемой тепловой мощности в большом диапазоне. Это упрощает решение проблем, связанных с температурным расширением.

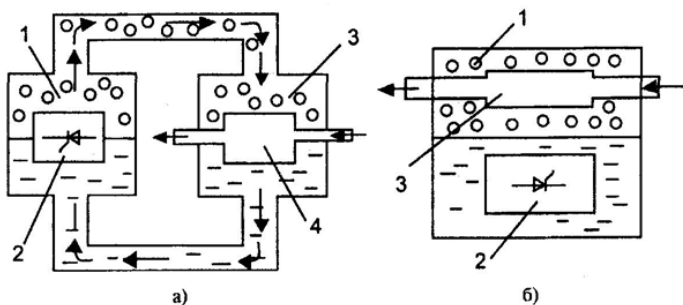


Рис. 21. Конструктивные схемы погружного испарительного охлаждения

Применяются испарительные охладители, у которых конденсация пара жидкости с низкой температурой кипения достигается с помощью воздушного охлаждения. Рассмотрим конструкцию полупроводникового прибора с такой системой охлаждения, запатентованную фирмой General Electric (рис. 22).

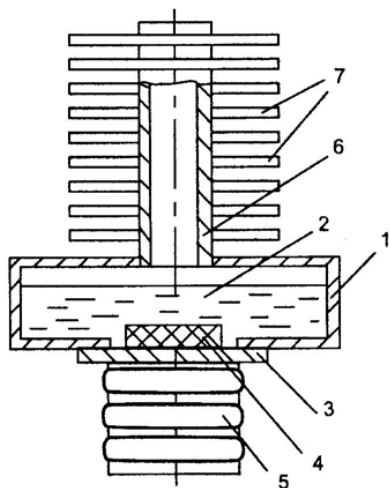


Рис. 22. Испарительное охлаждение таблеточного прибора:  
 1 – бак; 2 – охлаждающая жидкость; 3 – уплотнительная пластина;  
 4 – пористая насадка уплотнительной пластины; 5 – таблеточный полупроводниковый прибор; 6 – труба тепловая; 7 – ребра охлаждения



Бак 1 частично заполнен жидкостью 2 с низкой температурой кипения. Нижнее отверстие бака закрыто уплотнительной пластиной 3 с пористой насадкой 4, которая увеличивает поверхность контакта жидкости с пластиной. На стороне пластины, где расположен полупроводниковый таблеточный прибор 5, нанесен оксидный электроизоляционный слой  $\text{BeO}$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Полупроводниковый прибор прижат ко всей охлаждающей конструкции прижимным устройством (на рисунке не показано). Верхняя часть бака сообщается через отверстие с тепловой трубой 6, снабженной ребрами охлаждения 7. Пары жидкости поднимаются в тепловую трубу, где они охлаждаются, а конденсат стекает обратно в бак. Этот способ охлаждения называется термосифонным. От тепловой трубы он отличается тем, что внутри трубы нет пористого слоя, однако труба должна находиться приблизительно в вертикальном положении.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите способы передачи тепла.
2. Что такое конвекция и какие ее виды существуют?
3. Напишите и расшифруйте формулу Ньютона для конвективного теплообмена.
4. Дайте определение теории подобия и перечислите теоремы подобия.
5. Напишите и расшифруйте формулу по определению критерия Рейнольдса.
6. Напишите и расшифруйте формулу по определению критерия Нуссельта.
7. Напишите и расшифруйте формулу по определению критерия Грасгофа.
8. Опишите порядок расчета теплоотдачи при естественной конвекции.
9. Опишите порядок расчета теплоотдачи при вынужденной конвекции.
10. Что такое тепловое излучение?
11. Напишите и расшифруйте формулу по расчету коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием.
12. Что такое теплопроводность?

13. Напишите и расшифруйте уравнение Фурье для передачи тепла за счет теплопроводности.
14. Каким образом рассчитываются тепловые потери в проводниках при протекании по ним постоянного тока?
15. Каким образом рассчитываются тепловые потери в ферромагнитных проводниках при протекании по ним переменного тока?
16. Каким образом рассчитываются тепловые потери в ферромагнитных проводниках при протекании по ним переменного тока?
17. Каким образом рассчитываются тепловые потери в диэлектриках?
18. Назовите схемы естественного воздушного охлаждения и изобразите для них тепловые схемы замещения.
19. Перечислите схемы принудительного воздушного охлаждения и опишите их особенности.
20. Перечислите требования к рабочим жидкостям для жидкостного охлаждения.
21. Изобразите примеры конструкций охладителей для естественного воздушного охлаждения.
22. Перечислите требования к конструкции охладителей для естественного воздушного охлаждения.
23. Опишите порядок расчета тепловой характеристики охладителя для естественного воздушного охлаждения.
24. Изобразите тепловую схему замещения полупроводникового прибора на охладителе при естественном воздушном охлаждении и расшифруйте ее элементы.
25. Изобразите примеры конструкций охладителей для принудительного воздушного охлаждения.
26. Перечислите требования к конструкции охладителей для принудительного воздушного охлаждения.
27. Опишите порядок расчета тепловой характеристики охладителя для принудительного воздушного охлаждения.
28. Изобразите тепловую схему замещения полупроводникового прибора на охладителе при принудительном воздушном охлаждении и опишите порядок расчета температуры  $p-n$  перехода.

29. Опишите достоинства и недостатки трансформаторного масла как охлаждающей жидкости систем жидкостного охлаждения.
30. Приведите примеры конструктивного исполнения систем масляного охлаждения.
31. Опишите достоинства и недостатки воды как охлаждающей жидкости систем жидкостного охлаждения.
32. Приведите примеры конструктивного исполнения систем водяного охлаждения.
33. Приведите пример конструктивного исполнения теплообменника для систем жидкостного охлаждения.
34. Объясните принцип работы и особенности систем испарительного охлаждения.
35. Приведите конструктивную схему и опишите принцип работы тепловой трубы.
36. Приведите примеры конструктивного исполнения охлаждения полупроводниковых приборов с помощью тепловых труб.
37. Приведите примеры конструктивного исполнения систем погружного испарительного охлаждения.

## **3. КОНСТРУИРОВАНИЕ УЗЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

### **3.1. Компоновка силовых полупроводниковых преобразователей и их основных элементов**

#### **3.1.1. Общая компоновка силовых полупроводниковых преобразователей**

Общая компоновка преобразователя является первым и наиболее важным конструктивным решением в начальной стадии проектирования. Выбор компоновки прямо влияет на дальнейшую разработку конструкции. Поэтому конструктору очень важно иметь представление об основных требованиях, определяющих выбор оптимальной компоновки полупроводникового преобразователя.

Проблема компоновки полупроводникового преобразователя включает, как правило, два вопроса:

- 1) взаимное расположение основных элементов преобразователя;
- 2) взаимное расположение основных узлов каждого элемента.

Существует три разновидности компоновки основных элементов преобразователя в единый конструктивный комплекс: моноблочная, функционально-узловая, совмещенная.

Под *моноблочной* компоновкой преобразователя понимается такое конструктивное решение, когда все основные его элементы (трансформатор, силовая часть, система управления, коммутационная, защитная и сигнальная аппаратура) размещаются в одном шкафу или на щите и представляют собой единое конструктивное целое.

*Функционально-узловой* называется такая компоновка преобразователя, когда его основные элементы представляют собой функционально законченные изделия, каждое из которых оформлено в отдельное конструктивное целое. Преобразователи, построенные по этому принципу, могут компоноваться двумя способами:

- 1) основные элементы (трансформатор, силовой шкаф, шкафы распределительных устройств) устанавливаются вплотную друг к другу, сочленяются между собой механически и электрически и представляют единый конструктивный комплекс;

2) основные элементы преобразователя монтируются непосредственно на объекте в местах, для них предусмотренных, являются мобильными в случае демонтажа и установки в новом месте и соединяются между собой с помощью магистральных шинных трасс.

*Совмещенной* называется такая компоновка, при которой в целях уменьшения габаритов и массы преобразователя, производственных площадей под его монтаж, экономии расходов на изготовление и монтаж силовая часть преобразователя и трансформатор конструктивно оформляются в общий блок с общей системой охлаждения.

Основными предпосылками для выбора того или иного варианта компоновки преобразователя являются его номинальная мощность и целевое назначение.

При изготовлении полупроводниковых преобразователей малой мощности оптимальным вариантом компоновки считается моноблочный вариант, так как тепловой режим работы элементов преобразователя позволяет разместить их в одном шкафу и таким образом создать компактную и удобную в эксплуатации конструкцию.

При изготовлении силовых полупроводниковых преобразователей средней мощности, как правило, применяется функционально-узловая компоновка. Для поставки на строящиеся объекты, где габариты зданий подстанций зависят от размеров конструируемого преобразователя, целесообразно изготовление преобразователя в виде единого конструктивного комплекса. В случае поставки на реконструируемые объекты, где производится замена морально устаревшего оборудования, необходимо компоновать полупроводниковый преобразователь с учетом возможного использования остающегося электрооборудования (трансформаторов, реакторов, быстродействующих выключателей) или установки нового оборудования на прежних производственных площадях. В этом случае рациональным является второй вариант функционально-узловой компоновки преобразователя.

При компоновке силовых полупроводниковых преобразователей большой и сверхбольшой мощности используется функционально-узловой способ с отдельной установкой основных элементов. С целью уменьшения габаритов установки в целом и использования для охлаждения общего хладагента преобразователя большой мощ-

ности иногда выполняются с конструктивно совмещенным блоком выпрямитель-трансформатор. Как правило, охлаждающей средой совмещенных конструкций служит трансформаторное масло.

Независимо от принципа компоновки внешний вид конструкций должен отвечать требованиям технической эстетики и гармонизировать с внешним видом основных производственных механизмов, для которых они предназначены.

### **3.1.2. Компоновка основных элементов преобразователя**

Независимо от принципов компоновки основных узлов внутри элементов преобразователя, взаимное расположение деталей и узлов в шкафах должно наряду с общими отвечать и следующим требованиям.

1. Монтаж и демонтаж любого узла должны производиться при минимальном демонтаже сопряженных узлов и проводов.

2. Аппараты, приборы и проводной монтаж должны быть защищены от механических повреждений и возможных вредных воздействий окружающей среды.

3. Должна быть обеспечена безопасность обслуживания электрооборудования. Узлы электрооборудования должны быть заземлены согласно «Правилам эксплуатации электроустановок».

4. Размещение электрооборудования в шкафах должно подчиняться его функциональному назначению и создавать максимальные удобства при эксплуатации. Сигнальные лампы, характеризующие режим работы устройства, должны располагаться в местах конструкции, позволяющих оператору видеть сигнал четким и рельефным. Элементы, требующие периодического осмотра или контроля, должны быть размещены в наиболее удобных для обслуживающего персонала местах.

5. Коэффициент использования объема шкафа должен быть максимальным.

6. Выводы силовой ошиновки должны быть универсальными, рассчитанными на подсоединение магистральной ошиновки как сверху, так и снизу шкафа.

Компоновка преобразовательного шкафа во многом определяется способом охлаждения силовых приборов.

При естественном воздушном охлаждении необходимо:

- обеспечить возможность максимального обтекания воздушным потоком каждого вентиля;
- исключить вероятность подогрева вентилях другими греющими элементами конструкции;
- параллельно включенные вентиля устанавливать в одном ряду так, чтобы они охлаждались воздухом с одинаковой температурой.

При принудительном воздушном охлаждении компоновка шкафа преобразователя во многом определяется схемой расположения вентиляторов и характером работы вентиляции.

Применяются две схемы расположения вентиляторов – замкнутая и разомкнутая.

*Замкнутая* схема вентиляции применяется в тех случаях, когда рационально использование мощной централизованной охлаждающей установки. При этом вентилятор выполняется выносным и размещается в отдельном помещении. Подача и отвод воздуха в шкафы преобразователей и от них осуществляется с помощью специальных воздуховодов. Замкнутая система вентиляции дорога, сложна и поэтому целесообразна только для шкафов преобразователей большой мощности и при работе преобразователей в условиях запыленных и загазованных сред.

Наибольшее распространение, благодаря своей простоте, получили *разомкнутые* схемы вентиляции преобразовательных шкафов, при которых вентилятор встраивается непосредственно в шкаф, а забор охлаждающего воздуха производится из окружающей среды. С целью создания благоприятных условий для обслуживающего персонала предусматривается, как правило, выброс воздуха в верхней части шкафа, для чего в верхней части металлоконструкции предусматриваются отверстия, а крышки шкафов выполняются фасонными, создающими щели в местах их соприкосновения со шкафом. Забор воздуха осуществляется через сетку или жалюзи, расположенные в нижней части или в днище шкафа. Иногда забор воздуха производится через верх, а выброс – через нижнюю часть шкафа. Это увеличивает общее сопротивление воздушного тракта и начальную температуру охлаждающего воздуха, однако позволяет осуществить охлаждение более чистым воздухом

и охладить вначале элементы систем управления и защиты, а затем силовую часть преобразователя.

По характеру работы разомкнутая принудительная воздушная вентиляция может выполняться двух видов: 1) приточной, осуществляемой нагнетанием воздуха в шкаф; 2) вытяжной, осуществляемой путем «отсоса» воздуха из шкафа.

В случае приточной вентиляции вентилятор целесообразно располагать внизу шкафа.

К достоинствам приточной вентиляции относятся:

1) возможность создания более эффективного охлаждения за счет начальной турбулизации воздушного потока на выходе вентилятора;

2) возможность создания вентиляционной системы с меньшим уровнем воздушных шумов. Максимальный уровень шума наблюдается на выходе вентилятора в связи с резким изменением скорости воздушного потока. Шахта шкафа, подключенная к выходу вентилятора, служит естественным глушителем, в котором воздушный поток дробится и теряет значительную часть своей энергии;

3) возможность создания системы охлаждения с меньшим уровнем шумов, связанных с вибрацией вентилятора. При работе вентилятора, несмотря на тщательную динамическую балансировку подвижных частей, всегда имеет место вибрация его корпуса и двигателя, являющаяся источником дополнительных шумов. Будучи установленным внизу шкафа, вблизи фундамента, вентилятор может быть сочленен с шахтой с помощью резиновых прокладок или мягкого рукава из прорезиненной ткани, что сведет к минимуму роль металлоконструкций как резонатора вибраций вентилятора;

4) возможность свободного доступа обслуживающего персонала к вентилятору в процессе ремонта и эксплуатации.

К недостаткам приточной вентиляции относятся:

1) частичное превращение механической энергии работающего вентилятора в тепловую, поступающую на вход шахты преобразовательного шкафа;

2) убывание по высоте шкафа величины начальной турбулизации потока воздуха и количества охлаждающего воздуха за счет уте-



чек по мере протекания воздушного потока от менее нагретых рядов радиаторов к более нагретым.

В случае вытяжной вентиляции вентилятор целесообразно располагать вверху шкафа.

К достоинствам вытяжной вентиляции относятся:

- 1) увеличение интенсивности обдува наиболее нагретых, близлежащих к вентилятору верхних рядов вентиляей;
- 2) отдача тепловых потерь вентилятора и приводного электродвигателя в окружающую среду.

Недостатки вытяжной вентиляции:

- 1) высокий уровень воздушных шумов;
- 2) высокий уровень шумов, связанных с вибрацией вентилятора;
- 3) затруднен доступ к вентилятору при осмотре во время эксплуатации и при ремонте.

При компоновке шкафа преобразователя с принудительным жидкостным охлаждением необходимо учитывать следующее: полупроводниковые приборы на охладителях в шкафу должны располагаться таким образом, чтобы количество сочленений между элементами системы охлаждения было минимальным, а величина каждого сочленения кратчайшей; за счет высокой теплоемкости охлаждающей жидкости разница в условиях теплообмена и перепад температуры между крайними рядами охладителей обычно невелики.

Выбор системы вентиляции является важным, но не единственным фактором, обуславливающим ту или иную компоновку шкафа. На нее в неменьшей степени влияет принцип установки силовых полупроводниковых приборов и другой комплектующей электроаппаратуры. Их размещение в шкафу осуществляется, как правило, двумя способами: блочно-панельным и блочно-узловым. Предпочтения для выбора одного из указанных способов компоновки преобразовательного шкафа являются масштабы производства и номинальная мощность преобразователя.

При единичном и мелкосерийном производстве предпочтение отдается блочно-панельному принципу, не требующему сложной специальной оснастки. При серийном производстве к вопросу выбора компоновки следует подходить конкретно в каждом отдельном случае.

*Блочно-панельный* принцип компоновки шкафов является рациональным для преобразователей большой мощности, выпускаемых, как правило, малыми сериями. Параллельно включенные силовые полупроводниковые приборы располагаются на изоляционных панелях, установленных по высоте шкафа и образующих совместно с металлоконструкцией замкнутые шахты с радиаторами приборов внутри. Предохранители, делители и РС-цепочки, находящиеся в цепях вентилей, устанавливаются на отдельных панелях. Шкаф может комплектоваться поворотными блок-панелями, вращающимися вокруг вертикальной оси и выносящими радиаторы влицевую полость шкафа, удобную для проведения их профилактического осмотра и чистки.

Крупносерийное производство преобразователей характеризуется, как правило, *блочно-узловым* исполнением их конструкций. Достоинствами такого исполнения являются: наличие унифицированных силовых блоков и блоков управления, более полное использование объема шкафа, возможность параллельной сборки основных узлов преобразователя различного функционального назначения, возможность перевода работ по сборке основных узлов на поток, возможность оперативной замены дефектного узла на объекте.

Блочно-узловая компоновка нашла широкое применение при крупносерийном производстве тиристорных преобразователей различной мощности. Важным обстоятельством явилось то, что удалось в объеме унифицированных металлоконструкций блока создать многоцелевой блок, на базе которого можно компоновать тиристорные преобразователи всего диапазона мощностей и функциональные блоки управления для них.

Тиристорный преобразователь независимо от его номинальной мощности имеет следующие основные узлы: трансформатор или анодные реакторы, автоматические выключатели на стороне переменного и постоянного токов, силовые блоки (вентильная часть), система управления, защиты, сигнализации, система охлаждения, ошиновка переменного и постоянного тока с устройствами для равномерного деления тока между параллельно включенными приборами, силовые клеммные блоки, клеммные блоки цепей вторичной коммутации.

В шкафах преобразователей малой и средней мощности целесообразно все основные узлы размещать в одном шкафу, то есть компоновать шкаф по моноблочному принципу. В преобразователях большой и частично средней мощности рационально компоновать шкафы по функционально-узловому принципу, то есть группировать все силовые блоки в одних шкафах, а все блоки управления — в других. В силовых шкафах при этом размещаются также автоматические выключатели, система охлаждения, силовая ошиновка, силовые клеммные блоки, то есть вся комплектная аппаратура силовой части преобразователя.

### **3.2. Силовые блоки**

Силовым блоком полупроводникового преобразователя называется конструктивно законченный узел, состоящий из одного или нескольких управляемых или неуправляемых вентиляй, установленных на охладителях и собранных по определенной электрической схеме, аппаратуры защиты и управления вентилями и шинных выводов.

При разработке конструкции силового блока должны быть учтены следующие требования.

1. Максимальная, экономически целесообразная эксплуатационная надежность.
2. Создание силового блока как унифицированного модульного элемента, позволяющего получить различные варианты силовых схем, меняя число модулей и способы их соединения между собой.
3. Полная взаимозаменяемость силовых блоков одного и того же типа.
4. Экономически целесообразная взаимозаменяемость деталей и узлов блока.
5. Простота, экономичность и целесообразность конструкции. Сложные силовые блоки должны допускать возможность разделения на части для обеспечения параллельной независимой сборки.
6. Обеспечение равномерного распределения тока в параллельных полупроводниковых приборах.

7. Обеспечение единой системы охлаждения полупроводниковых приборов, входящих в блок. Создание наиболее благоприятных условий для охлаждения других греющихся элементов инструкции.
8. Минимум цепей, идущих через разъемные соединения.
9. Удобство сборки и монтажа, возможность пооперационного контроля и наладки.
10. Простота в обслуживании при эксплуатации и ремонте, свободный доступ к контактным частям, легкая замена вышедших из строя приборов и других элементов, а также свободный доступ к охладителям для очистки ребер от пыли (при воздушном охлаждении) и канала охладителя от нерастворимых осадков (при жидкостном охлаждении).
11. Удобство профилактического контроля в процессе работы.
12. Габаритные размеры, внешний вид и способ крепления силовых блоков должны быть согласованы с соответствующими параметрами блоков управления и систем регулирования.
13. Масса выемного силового блока не должна превышать 20...25 кг.
14. Максимальная унификация и стандартизация материалов, деталей и покупных изделий.
15. Технологичность конструкции.
16. Эстетичность конструкции.
17. Минимальная стоимость.

Конструкция силового блока зависит от мощности и условий эксплуатации преобразователя, типа применяемых силовых полупроводниковых приборов, масштаба выпуска силовых блоков, способа охлаждения преобразователя. Опыт конструирования показывает, что основным фактором, определяющим общность конструктивных решений силовых блоков является способ охлаждения полупроводникового преобразователя.

Однако прежде чем рассматривать особенности конструкции силовых блоков в зависимости от способа их охлаждения, рассмотрим некоторые общие вопросы конструирования силовых блоков.

### 3.2.1. Сочленение полупроводникового прибора с охладителем

Одним из основных условий обеспечения нормального теплоотвода от силового полупроводникового прибора является его высококачественное сочленение с охладителем. Применяются два вида сочленений вентиля с охладителем: резьбовое и прижимное.

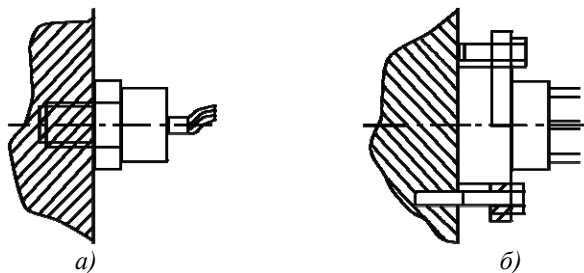


Рис. 23. Примеры сочленения полупроводниковых приборов с охладителем

При резьбовом соединении (рис. 23, а) тепловой и электрический контакт между вентиляем и охладителем осуществляются с помощью резьбового хвостовика прибора и отверстия в охладителе. При комплектации силовых блоков полупроводниковыми приборами с резьбовым соединением в технических условиях на сборку должны быть учтены следующие требования:

- 1) резьбовое отверстие в охладителе под винт вентиля должно быть строго перпендикулярно контактной поверхности прибора и охладителя;

- 2) контактная поверхность должна составлять не менее 95 % от поверхности соприкосновения прибора и охладителя. Поэтому поверхность охладителя должна тщательно обрабатываться, а поверхность вентиля не должна иметь вмятин;

- 3) для завинчивания вентиля в охладитель должны применяться специальные динамометрические ключи, ограничивающие наибольший закручивающий момент на гаечном ключе.

Прижимное соединение осуществляется двумя способами:

- 1) полупроводниковый прибор с плоским основанием прижимается к радиатору болтами с помощью накладного фланца (рис. 23, б);

2) таблеточный клапан соединяется с охладителем с помощью специального прижимного устройства (рис. 24).

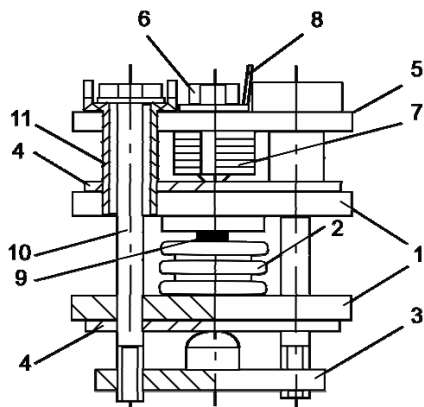


Рис. 24. Прижимное устройство фирмы Semikron: 1 – охладители; 2 – полупроводниковый прибор; 3 – нижнее ядро; 4 – прижимная пластина; 5 – верхнее ядро; 6 – прижимная гайка; 7 – тарельчатые пружины; 8 – контрольная прокладка; 9 – центрирующий штифт; 10 – стяжной болт; 11 – электроизоляционная манжета

В прижимном варианте можно создать большие усилия, а следовательно, уменьшить величину теплового сопротивления между прибором и радиатором. Назначение прижимного устройства в таблеточных приборах состоит в том, чтобы создать необходимое контактное давление между слоями в самом приборе, не имеющем внутри собственных элементов сжатия, и создать хороший тепловой и электрический контакт вентиля с охладителем и токоподводом.

При установке таблеточных приборов следует учитывать следующие требования.

1. Обеспечение заданного давления прижимным устройством, так как таблеточные приборы, в отличие от приборов с резьбовым соединением, предназначены для больших токов, и, соответственно, потери в них больше.

2. Обеспечение хорошего теплового контакта между вентилем и охладителем, для чего при монтаже таблеточных приборов необходимо смазать контактные поверхности теплопроводящей смазкой

(вазелином). Смазка наносится равномерно тонким слоем с помощью пульверизатора.

3. Возможна установка охладителей с одной или двух сторон таблеточного прибора.

4. Прижимная конструкция может быть соединена электрически с одним из выводов прибора или изолирована от обоих.

Рассмотрим пример прижимного устройства для таблеточных приборов, запатентованных фирмой Semikron (Германия). Между двумя охладителями 1 сжат таблеточный полупроводниковый прибор 2. Контактное давление обеспечивается тарельчатыми пружинами 7, которые с помощью гайки 6 заранее, на заводе-изготовителе, сжимаются до необходимого усилия 4500...12 000 Н. При установке прижимного устройства давление пружин 7 передается через стяжные болты 10, которые равномерно затягиваются до освобождения контрольной прокладки 8. Освобождение контрольной прокладки свидетельствует о том, что на прибор действует заданное усилие сжатия. Это прижимное устройство предназначено для двухстороннего сжатия и охлаждения таблеточных приборов, имеет несложную конструкцию, надежно и позволяет контролировать усилие сжатия. Используется для приборов на номинальный ток от 380 до 900 А.

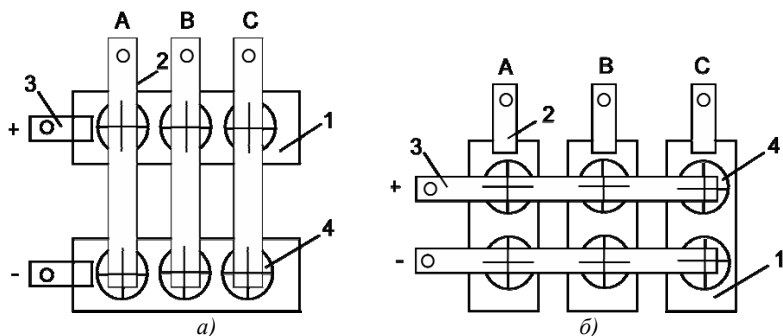


Рис. 25. Схемы установки выпрямительного моста на таблеточных приборах на групповые охладители: 1 – охладители; 2 – вход выпрямителя; 3 – выход выпрямителя; 4 – таблеточные приборы

При создании силовых блоков с таблеточными приборами можно выгодно использовать их конструктивную симметрию, так как таблеточный прибор можно установить на охладитель в любом из направлений проводимости. Это позволяет создать силовой блок трехфазного выпрямительного моста из шести тиристоров или диодов на двух (рис. 25, *a*) или трех (рис. 25, *б*) охладителях.

### **3.2.2. Параллельное и последовательное соединение полупроводниковых приборов**

В мощных преобразователях из-за ограниченных допустимых значений прямого и обратного напряжения одного силового прибора возникает необходимость в применении параллельного, последовательного или параллельно-последовательного соединения приборов. Параллельное и последовательное соединения применяются также для повышения надежности преобразователя. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов одного и того же типа существенно отличаются друг от друга, поэтому их параллельное и последовательное соединение связано с рядом трудностей. При параллельном соединении приборов из-за разброса прямых ветвей вольт-амперных характеристик общий ток нагрузки делится между приборами неравномерно, поэтому одни приборы будут перегружены по току, а другие недоиспользованы. На распределение тока в параллельных ветвях влияют не только характеристики приборов, но и их температура и идентичность активного сопротивления шинных выводов и взаимной индуктивности параллельных ветвей по отношению к окружающей ошиновке.

При последовательном соединении приборов разброс обратных ветвей вольт-амперных характеристик вызывает неравномерное распределение обратного напряжения между приборами, что может привести к пробоему одного из приборов и недоиспользованию по напряжению другого либо к произвольному открытию одного из последовательно включенных тиристоров.

Для обеспечения надежной работы преобразователя и оптимального использования полупроводниковых приборов при их параллельном и последовательном включении необходимо применять следующие меры для равномерного распределения токов между па-



раллельно включенными или напряжений между последовательно включенными приборами.

1. Параллельные ветви необходимо комплектовать приборами с согласованными прямыми ветвями вольт-амперных характеристик.

2. Последовательно включенные приборы должны иметь согласованные обратные ветви вольт-амперных характеристик.

3. Так как вольт-амперная характеристика полупроводниковых приборов зависит от температуры, то необходимо стремиться к тому, чтобы приборы, предназначенные для параллельной или последовательной работы, одинаково охлаждались. Этого можно добиться, размещая приборы на групповых охладителях. В случае применения вентиля с индивидуальными охладителями они должны быть расположены в силовых блоках так, чтобы при установке блока в шкаф преобразователя параллельно или последовательно включенные приборы размещались в местах с одинаковой температурой воздуха.

4. Падение напряжения в параллельных ветвях должно быть одинаковым. Подвод тока к параллельно включенным приборам должен быть таким, чтобы длина и сопротивление токоподводящих частей каждой ветви были одинаковыми. Для примера на рис. 26 показаны схемы неправильного (рис. 26, а, б) и правильного (рис. 26, в, г) токоподвода к параллельным вентилям.

5. Взаимная индуктивность отдельных параллельных ветвей по отношению к окружающей ошиновке должна быть одинаковой. В мощных преобразователях при токе в несколько тысяч ампер значение взаимной индуктивности настолько велико, что она оказывается основным фактором, влияющим на распределение тока между параллельно включенными вентилями. Величина взаимной индуктивности зависит от длины проводников параллельной ветви и от площади, охватываемой этой длиной, которые должны быть как можно меньше.

6. Количество контактных соединений в параллельных ветвях должно быть минимальным. Контакты должны быть стабильными, с малыми переходным и тепловым сопротивлениями.

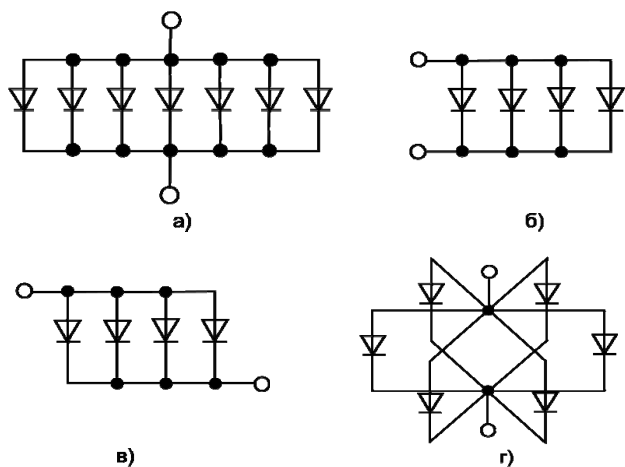


Рис. 26. Схемы параллельного соединения приборов

Применяются два основных метода выравнивания токов, протекающих через параллельно включенные приборы.

1. Последовательно с каждым прибором включается реактор без магнитопровода. Реактор представляет собой катушку, намотанную из медной шины плашмя или на ребро. Между соседними витками катушки имеются воздушные зазоры для лучшего охлаждения. Необходимая жесткость конструкции достигается за счет межвитковых и межслоевых прокладок из электрокартона, устанавливаемых в нескольких местах по окружности катушки. Конструкция реактора определяется необходимой индуктивностью, номинальным током, условиями охлаждения и т. д. Этот метод эффективен и рационален для тиристорных преобразователей, так как помимо основной функции реактор защищает тиристоры от опасных значений скорости нарастания тока и напряжения.

2. Применение выравнивающих реакторов с шихтованными или витыми сердечниками и двумя обмотками (рис. 27).

Обмотки  $w_1$  и  $w_2$  включены между собой встречно и находятся в цепях двух параллельных диодов VD1 и VD2. При увеличении тока  $i_1$  в цепи диода VD1 возникающее на обмотке  $w_2$  падение напряжения увеличивает ток  $i_2$  в цепи диода VD2. Этот метод чаще всего используется для параллельного включения диодов.

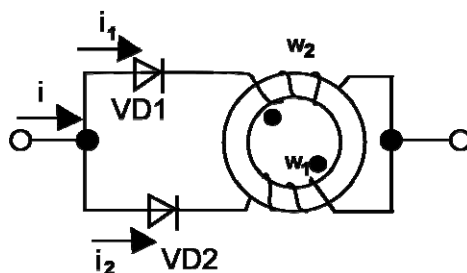


Рис. 27. Схема включения реактора на сердечнике

### 3.2.3. Силовые блоки с естественным воздушным охлаждением

При естественном воздушном охлаждении небольшие значения коэффициентов теплоотдачи в окружающую среду накладывают определенные требования на конструкцию силовых блоков.

1. Необходимо обратить особое внимание на качество соединения полупроводникового прибора и охладителя.

2. Конструкция силового блока должна обеспечивать возможность свободного отвода и рассеяния тепла в рабочем положении как от охладителя, так и от корпуса и гибкого вывода полупроводникового прибора.

3. В процессе работы преобразователя тепловыделяющие элементы силового блока (сопротивления, предохранители и т. д.) не должны подогреть силовые полупроводниковые приборы.

4. Радиатор должен иметь большую поверхность охлаждения.

Компоновка силовых блоков с естественным воздушным охлаждением в значительной степени определяется конструкцией радиаторов. Выбор радиатора, в свою очередь, зависит от режима работы блока. Существуют следующие стандартные режимы работы: длительный, кратковременный, перемежающийся (частный случай – повторно-кратковременный режим). Дать исчерпывающие рекомендации по выбору оптимальной конструкции радиатора для каждого режима работы в отдельности не представляется возможным, так как каждый из режимов работы силового блока имеет свои особенности и может представлять собой различное сочетание стандартных режимов.

Рассмотрим для примера некоторые особенности компоновки силовых блоков для конкретных преобразователей.

При работе полупроводникового преобразователя в длительном режиме силовые блоки важно комплектовать радиаторами, выпускаемыми серийно и предназначенными для работы при принудительном воздушном охлаждении. Однако при этом следует помнить, что максимальное значение тока, проходящего через полупроводниковый прибор, снижается до 25...30 % от номинального значения.

Силовые блоки для питания электроприводов с большим вращающимся моментом работают в режиме, близком к кратковременному. При пуске двигателя электропривода через его обмотки, а следовательно, и через полупроводниковые приборы протекают повышенные пусковые токи до  $20I_H$ , где  $I_H$  – номинальный ток. Поэтому такие силовые блоки нецелесообразно комплектовать радиаторами с резьбовой поверхностью охлаждения. В них силовые приборы следует охлаждать в период пуска за счет теплоемкости радиаторов. В период номинальной работы радиатор отдает тепло в окружающую среду. Таким образом, радиатор для рассматриваемых силовых блоков должен иметь большую теплоемкость и не очень развитую поверхность охлаждения.

Силовые блоки комплектных выпрямительных полупроводниковых подстанций, предназначенных для питания цеховых сетей постоянного тока промышленных предприятий, работают в перемежающемся режиме. Они должны допускать многократные (до 1 раза в минуту) эксплуатационные перегрузки до 100 % номинального тока длительностью до пяти секунд. Оптимальной конструкцией при компоновке такого силового блока является групповой охладитель с развитой поверхностью охлаждения, необходимой для обеспечения нормальной работы силовых полупроводниковых приборов во время протекания номинального тока через них, и массой с достаточно большой теплоемкостью для аккумуляции тепла в периоды кратковременных перегрузок.

### **3.2.4. Силовые блоки с принудительным воздушным охлаждением**

Характерной особенностью силовых блоков с принудительным воздушным охлаждением является многообразие их конструктивных решений, которое определяется целевым назначением блоков, условиями работы и видом производства.

При индивидуальном и мелкосерийном производстве мощных преобразователей оптимальной конструкцией силового блока является блок-панель, представляющая собой изоляционное основание, на котором смонтированы основные элементы схемы блока. Блок-панели устанавливаются в силовом шкафу на металлическом каркасе охладителями друг к другу и образуют совместно с каркасом воздушный канал для создания направленного потока охлаждающего воздуха.

При мелкосерийном и серийном производстве преобразователей малой мощности силовые блоки часто выполняются в виде блок-шахты. При такой компоновке панель с элементами силового блока закрывается металлическим желобом и образует совместно с ним шахту для направленного движения охлаждающего воздуха. На торце шахты устанавливается вентилятор.

При крупносерийном и массовом производстве преобразователей различных мощностей следует применять блок-модуль, являющийся законченным унифицированным функциональным узлом. При установке блок-модулей в шкаф можно, изменяя их количество и способы соединения между собой, выполнить все возможные варианты силовых схем. Конструктивно блок-модули могут выполняться с силовыми разъемами (втычное исполнение) и с разъемным болтовым соединением со сборными шинами (выемное исполнение).

В настоящее время отечественная промышленность и зарубежные фирмы для комплектации тиристорных преобразователей выпускают силовые блок-модули, состоящие из одного, двух, трех, четырех, шести, восьми и двенадцати тиристоров на номинальные токи от 150 до 500 А. Наиболее часто используются блок-модули из шести тиристоров, обладающие универсальностью схемы, оптимальными габаритами и массой и имеющие рациональное сечение шахты для направленного потока воздуха.

При принудительном воздушном охлаждении блок-модулей можно обдувать воздухом весь силовой блок или только охладители силовых приборов, выделив их в особую шахту. При обдуве всего блока из-за различного аэродинамического сопротивления его участков невозможно рационально использовать подводимый воздух и обеспечить преимущественное охлаждение полупроводниковых приборов. Кроме того, запыление корпусов приборов, элементов узлов управления и жгутов вторичной коммутации резко ухудшает качество изоляции, особенно между главными и убавляющими электродами тиристоров, и уменьшает надежность работы силового блока. Удалять пыль из этой части блока в процессе эксплуатации затруднительно. Поэтому чаще применяется принцип принудительного охлаждения воздухом только радиаторов с сохранением благоприятных условий для естественного охлаждения других греющихся частей блока. При этом интенсивность охлаждения силовых приборов по сравнению с обдувом всего блока снижается незначительно, так как обеспечивается направленный поток воздуха с необходимой скоростью внутри ребер охладителей.

Блок-модуль является полностью взаимозаменяемым изделием. Принцип взаимозаменяемости блоков осуществляется за счет относительно высокой точности изготовления всех сочленяемых деталей и узлов и применения самоустанавливающейся (плавающей) системы сочленений.

### **3.2.5. Силовые блоки с жидкостным охлаждением**

В полупроводниковых преобразователях с жидкостным охлаждением в качестве хладагента используются в основном вода, трансформаторное масло и синтетические диэлектрические жидкости.

Силовые блоки с жидкостным охлаждением комплектуются полупроводниковыми приборами на индивидуальных или групповых охладителях.

Индивидуальные охладители применяются при изготовлении полупроводниковых преобразователей малой мощности, требующих параллельного включения не более двух приборов, или при единичном и мелкосерийном производстве мощных преобразователей. К достоинствам индивидуальных охладителей относятся про-

стота конструкции и возможность установки в любом месте силового шкафа. Однако многочисленные соединения индивидуальных охладителей с помощью штуцеров уменьшают надежность системы охлаждения, увеличивают гидродинамическое сопротивление на пути потока жидкости, усложняют обслуживание силовых блоков при эксплуатации.

Групповые охладители применяются при серийном и крупносерийном производстве полупроводниковых преобразователей средней и большой мощности. Силовые блоки на групповых охладителях просты по конструкции, технологичны в изготовлении, имеют минимальное количество соединений в системе подвода охлаждающей жидкости. В качестве примера рассмотрим несколько конструкций силовых блоков с групповыми жидкостными охладителями (рис. 28).

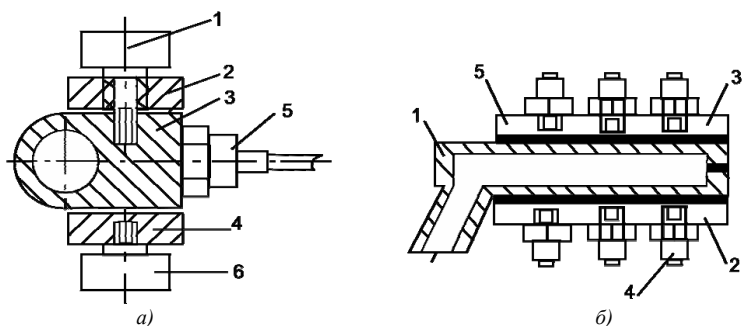


Рис. 28. Групповые жидкостные охладители

На рис. 28, а приведена конструкция группового охладителя силового блока, выполненного в виде *блок-шины*. На охладителе 3, выполненном в виде полой профильной шины и являющемся одним из выводов блока, установлены полупроводниковые приборы 5. Второй вывод представляет собой шину 4 и расположен по обе стороны охладителя на минимальном расстоянии, величина которого определяется возможными перенапряжениями. Охладитель с помощью специальных стоек-изоляторов 1, проходящих сквозь шины второго вывода, крепится к двум металлическим уголкам. От токоведущих шин стойки изолируются стеклобакелитовыми втулками 2.

Вывод крепится к этим же уголкам на таких же стойках-изоляторах 6, с помощью которых производится регулировка и фиксация зазора между выводом и охладителем. На обоих концах охладителя имеются фланцы со штуцерами для соединения с внешней системой охлаждения. Силовой блок является конструктивно законченным узлом и при установке в шкафу крепится несущими уголками к металлическому каркасу шкафа.

Однако в рассмотренной конструкции имеется ряд недостатков:

- 1) ввиду значительной длины охладителя в параллельных ветвях силового блока существует неравенство сопротивления электрических цепей отдельных приборов;
- 2) охлаждающая жидкость на входе и выходе охладителя имеет различную температуру, поэтому температуры приборов, расположенных у входа и выхода, различны;
- 3) круглая, квадратная или прямоугольная формы канала полого профиля не являются оптимальными с точки зрения теплообмена между шиной и охлаждающей жидкостью, так как имеют недостаточную поверхность соприкосновения и не способствуют турбулизации потока жидкости.

Охладитель *пластинчатого блока* (рис. 28, б) представляет собой разъемную конструкцию и состоит из двух пластин 1 и 2, на наружной поверхности которых в два ряда установлены полупроводниковые приборы 4 на основаниях 3. Между основаниями и пластинами охладителя вставляются электроизоляционные прокладки 5. Профиль внутренних поверхностей пластин, обращенных друг к другу, выполнен таким образом, что при их наложении друг на друга образуется щелевидный канал, обладающий максимальной поверхностью соприкосновения с жидкостью. Щелевидный канал может быть выполнен любой конфигурации в зависимости от параметров системы охлаждения. Для повышения турбулизации потока жидкости, большего развития поверхности теплоотдачи и увеличения коэффициента теплопередачи дно канала может выполняться гофрированным. Обе пластины охладителя скрепляются болтами. Между пластинами установлено уплотнение, герметизирующее щелевидный канал охладителя, а по обе стороны охладителя расположены штуцера для подсоединения с помощью шлангов к общей системе



охлаждения. Сборные шины присоединяются к охладителю с помощью болтов. Ввиду своей компактности такая конструкция силового блока обладает значительно меньшим разбалансом сопротивлений электрических цепей отдельных полупроводниковых приборов при более эффективном выравнивании температур всех приборов параллельной группы.

### **3.3. Блочные системы управления**

В силовых полупроводниковых преобразователях, построенных по блочно-узловому принципу, элементы систем управления и защиты скомпонованы в выемные комплектные устройства, структурно состоящие из следующих узлов: ячейка, блок, кассета (субрама).

Ячейкой управления называется минимальная конструктивная единица, являющаяся по схеме узким функциональным элементом. Ячейка представляет собой субблок, на шасси которого установлены разнообразные комплектующие изделия, например, резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, трансформаторы, соединенные между собой при помощи печатного или проводного монтажа. Входные и выходные цепи ячеек выведены на вилку штепсельного разъема. Ячейку управления, у которой в качестве шасси используется печатная плата, называют печатным узлом.

Блоком управления называется конструктивно законченный узел, являющийся по схеме унифицированным модульным элементом. Блок предназначен для размещения в нем ячеек управления и должен допускать установку защитной аппаратуры. На передней панели блока возможна установка контрольно-измерительных приборов и контактных гнезд контрольных цепей. Сзади блока устанавливаются вилки штепсельных разъемов.

Кассета встраивается в шкаф и представляет собой раму для установки блоков. На задней панели кассеты установлены розетки штепсельных разъемов и сборные клеммные блоки. В некоторых конструкциях преобразователей блоки и кассета отсутствуют. Их роль выполняет субрама, укрепляемая на поворотной раме шкафа. Узлы управления устанавливаются непосредственно на субраму.

При разработке конструкций блочных систем управления должны быть учтены следующие требования:

1) общие для блочных систем управления и силовых блоков: надежность, пооперационный контроль, минимальный вес, технологичность, эстетичность;

2) специфические для блочных систем управления:

- взаимозаменяемость ячеек управления и блоков управления одного и того же типа;
- бесперебойное выполнение своих функций в заданных тепловых и электрических режимах без изменения в процессе эксплуатации своих параметров свыше допустимых норм;
- возможность сочленяться и расчленяться быстро и вручную без применения каких-либо инструментов;
- защищенность аппаратуры блоков управления от воздействий окружающей среды и механических перегрузок;
- конструкция, предусматривающая специальные меры защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током;
- в блоках управления, предназначенных для компоновки совместно с силовыми блоками преобразователя, габаритные размеры, внешний вид и способ крепления должны быть согласованы с соответствующими параметрами этих устройств;
- обязательная унификация и полная взаимозаменяемость металлоконструкций ячеек управления и блоков управления внутри серии, унификация материалов, деталей и покупных изделий.

Работа по проектированию блочных систем управления должна начинаться с проработки типовой компоновки систем управления в шкафу и определения формы и габаритов унифицированных металлоконструкций их основных элементов для определенной серии, а если возможно, то и для группы серий, преобразовательных установок. Исходными данными для выбора компоновки системы управления в шкафу могут служить назначение полупроводникового преобразователя, предполагаемые габариты преобразовательного шкафа, требования эксплуатации, заданный уровень надежности преобразователя и т. д.

### 3.3.1. Конструирование печатных плат

По конструкции печатные платы подразделяются на однослойные и многослойные. Однослойные печатные платы всегда имеют один изоляционный слой, на котором находятся печатные проводники. Если печатные проводники расположены на одной стороне изоляционного основания, то такую плату называют односторонней, если на двух сторонах, то двухсторонней. Многослойная печатная плата состоит из нескольких печатных слоев, изолированных склеивающими прокладками.

Процесс изготовления печатной платы состоит из двух основных операций:

1) создание изображения печатных проводников. Существуют следующие способы нанесения изображения печатных проводников:

- *фотографический* – копирование изображения с позитива или негатива на светочувствительный слой;
- *офсетный* – нанесение изображения защитной краской с помощью печатных форм;
- *сеточнографический* – нанесение изображения защитной краской через сетчатый трафарет;
- *штамповка* – вырубка проводников из листа фольги специальным штампом;
- *ксерографический* – получение изображения с помощью пигментированных заряженных порошков;

2) создание токопроводящего слоя на изоляционном основании.

Широкое распространение при изготовлении печатных плат для полупроводниковых преобразователей получили три метода создания токопроводящего слоя:

- *химический* метод, при котором производится вытравливание незащищённой части фольги, предварительно наклеенной на диэлектрик;
- *электрохимический* метод, при котором методом химического осаждения создается слой металла толщиной 1...2 мкм, наращиваемый затем гальваническим способом до нужной толщины. При этом одновременно с проводниками металлизуются стенки отверстий, которые можно использовать как перемычки для соединения проводников, расположенных на разных сторонах платы.

– *комбинированный* метод, состоящий в сочетании химического и электрохимического метода. В этом случае проводники получают травлением фольги, а металлизированные отверстия – электрохимическим методом.

Кроме этих трех основных методов используют:

- *вжигание* серебра в изоляционное основание;
- *шоопирование* – разбрызгивание металла на изоляционное основание с помощью воздушного пистолета;
- *распыление* металла в вакууме;
- *запрессовку* металлических порошков на изоляционное основание нагретым штампом и др.

При изготовлении печатных плат для полупроводниковых преобразователей чаще всего используется химический метод, обладающий следующими достоинствами: высокая разрешающая способность; хорошее качество печатной схемы; полная идентичность плат при серийном производстве; возможность полной автоматизации всего процесса изготовления печатных плат.

В качестве материала для изготовления печатных плат используются:

- фольгированный текстолит СТПА-5-1, СТПА-5-2 толщиной 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2 мм;
- фольгированный стеклотекстолит СФ-1-35, СФ-2-35; СФ-1-50; СФ-2-50 толщиной 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 мм;
- фольгированный гетинакс ГФ-1-35, ГФ-2-35, ГФ-1-50, ГФ-2-50 толщиной 1; 1,5; 2; 2,5; 3 мм.

Фольгу делают из меди, в ответственных случаях – из серебра. Чаще всего используется фольгированный стеклотекстолит, имеющий высокие механические и диэлектрические свойства, высокую прочность сцепления фольги с изоляционным основанием, высокую нагревостойкость.

При конструировании печатных плат целесообразно руководствоваться следующими положениями.

1. При выборе толщины печатной платы и ее габаритных размеров необходимо учитывать требуемую жесткость конструкции, механические и климатические нагрузки при эксплуатации, особенности принятого метода изготовления и электрический режим

работы схемы. Рекомендуемый размер проектируемой печатной платы не более 220×380 мм. Применение плат с большим соотношением сторон в полупроводниковых преобразователях не рекомендуется, так как при этом уменьшается механическая прочность платы и увеличивается возможность коробления в процессе получения печатного монтажа. При выборе соотношения сторон платы следует использовать целые числа. Рекомендуемые соотношения сторон: 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 2:3, 2:5. При таких соотношениях проще собирать отдельные узлы в единую конструкцию.

2. Центры отверстий для крепления объемных элементов на печатную плату должны располагаться в узлах координатной сетки с шагом 2,5 мм. Допускается шаг сетки 1,25 мм.

3. Если устанавливаемый элемент имеет два вывода, расстояние между которыми не кратно шагу сетки, либо на плату устанавливается многоконтактный элемент (реле, разъем, импульсный трансформатор и т. д.), который в силу конструктивных особенностей не попадает выводами в узлы сетки, то центр отверстий под выводы располагается исходя из следующих соображений:

- 1) центр одного отверстия, принятого за основное, должен быть расположен в узле координатной сетки;
- 2) центры остальных отверстий должны располагаться на вертикальных или горизонтальных линиях сетки.

4. Все отверстия на печатной плате, служащие в качестве монтажных или переходных, должны быть металлизированы.

5. Диаметр отверстия в печатной плате должен быть больше диаметра вставляемого в него вывода. При диаметре вывода  $d \leq 0,8$  мм диаметр отверстия  $d_o = d + 0,2$  мм. При  $d > 0,8$  мм  $d_o = d + 0,3$  мм.

6. Отверстия, соединенные печатными проводниками, и отверстия под пайку выводов навесных элементов должны иметь монтажную площадку. Монтажная площадка должна иметь вид кольца с диаметром  $d_M = d_o + 2b$ , где  $b > 0,7$  мм – ширина кольца.

7. Отношение расстояния между краями близлежащих отверстий к толщине платы во избежание сколов при обработке должно быть не менее единицы.

8. Под печатный монтаж рекомендуется использовать только одну сторону платы. Если количество перемычек превышает 15 %

имеющихся на плате проводников, то целесообразно перейти на двусторонний печатный монтаж.

9. Протяженность печатного проводника не ограничивается, однако она должна быть по возможности минимальной.

10. Ширина печатного проводника: рекомендуемая – 1,2 мм, минимальная – 0,8 мм. Расстояние между проводниками: рекомендуемое – 1,5 мм, минимальное – 1,0 мм.

11. При ширине печатного проводника свыше 2,5 мм его рекомендуется расчленить на две и более параллельные ветви для уменьшения наводок от внешних полей. При этом зазор между параллельными проводниками: рекомендуемый – 1,5 мм, минимальный – 0,5 мм.

12. Печатные проводники не должны иметь резких переходов, перегибов и т. д. При наличии разветвленного проводника переход в ответвление также должен быть плавным. Ответвление рекомендуется выполнять от монтажных площадок. Также должен быть плавным и переход от проводника к монтажной площадке. Радиусы скругления должны быть не менее 1...2 мм. Плавные переходы устраняют местные механические перенапряжения и тем самым компенсируют разницу в тепловых деформациях фольги и диэлектрика.

13. Расстояние между проводником и краем платы или проводником и краем отверстия диаметром более 10 мм должно составлять не менее 2...4 мм.

14. Входные и выходные концы печатных проводников должны быть сведены в систему, удобную для подключения переходных элементов.

15. На печатной плате следует предусматривать не менее двух технологических отверстий.

16. Пересечение печатных проводников на плате устраняется с помощью перемычек. Длина каждой перемычки от 5 до 40 мм. Количество перемычек на плате с максимально допустимыми размерами не должно превышать десяти. Перемычки рекомендуется выполнять из луженой медной проволоки, помещенной в полихлорвиниловую трубку.

17. При двустороннем печатном монтаже следует избегать прокладки проводников и перемычек параллельно аналогичным дета-

лям, расположенным на противоположной стороне, во избежание возникновения паразитных емкостных связей.

18. Шероховатость неметаллизированной поверхности и платы  $R_z \leq 80$ , металлизированной поверхности  $R_z \leq 40$ .

19. После изготовления печатная плата покрывается лаком с целью восстановления поверхностного сопротивления изоляции платы, предохранения печатного монтажа от загрязнения в процессе транспортировки платы и установки навесных элементов, предохранения печатного монтажа от облуживания при пайке погружением.

### **3.3.2. Конструирование печатных узлов**

Печатным узлом принято называть печатную плату с установленными на ней элементами.

При конструировании печатных узлов важное значение придается вопросам расположения и установки навесных элементов на печатной плате. При этом целесообразно руководствоваться следующими положениями.

1. Навесные элементы могут располагаться на плате тремя способами:

- 1) установка элементов вплотную к поверхности платы. При этом уменьшается объем печатного узла и повышается его вибростойкость;
- 2) установка с зазором между элементами и платой. При этом уменьшается площадь поверхности платы, но увеличивается объем печатного узла и уменьшается его вибростойкость;
- 3) комбинированный способ установки элементов на плату. При этом способе элементы устанавливаются на плату в два слоя. В нижнем слое необходимо располагать детали с минимальной возможностью отказа в процессе эксплуатации, а в верхнем слое – элементы, требующие подстройки или менее надежные в эксплуатации.

2. Полупроводниковые приборы и микросхемы не следует располагать близко к элементам, выделяющим большое количество тепла, а также к источникам сильных магнитных полей (постоянным магнитам, дросселям, трансформаторам и др.).

3. Перед пайкой все выводы навесных элементов должны быть закреплены в отверстиях платы для предотвращения выпадания элементов в процессе транспортировки и групповой пайки.

4. Навесные элементы на печатной плате должны располагаться параллельными рядами или группами. Осевые линии корпусов навесных элементов должны быть параллельны или перпендикулярны друг другу.

5. Навесные элементы должны располагаться только со стороны платы, свободной от печатного монтажа, причем параллельно плате. Вертикальная установка элементов не рекомендуется в связи с недостаточной жесткостью крепления выводов.

6. Малогабаритные элементы с большим количеством выводов (импульсные трансформаторы, миниатюрные реле и др.) укрепляются на плате в зависимости от их конструктивных особенностей и механической прочности платы.

7. Навесные элементы со значительной массой (потенциометры, бумажные конденсаторы и др.); устанавливаются на плате с помощью держателей или вспомогательной арматуры, обеспечивающих жесткое крепление деталей к плате.

8. Навесные элементы, имеющие большие габариты и массу (трансформаторы, дроссели, электролитические конденсаторы большой емкости и др.), должны устанавливаться вне печатной платы и соединяться с ней проводным монтажом. В виде исключения допускается установка крупногабаритных элементов на плату при условии их крепления через плату к шасси блока управления.

Независимо от выбранного способа конструирования и от конструкции печатного узла существует ряд требований, которым должны удовлетворять все печатные узлы без исключения.

1. Конструкция печатного узла должна предусматривать доступ к любому элементу и детали и возможность их замены в процессе эксплуатации.

2. Крепление печатного узла в блоке не должно давать прогиба платы во избежание обрыва печатных проводников.

3. Во избежание замыкания печатных проводников на корпус должна быть предусмотрена изоляция печатной платы от корпуса блока.

4. После изготовления узла печатная плата покрывается лаком с целью увеличения поверхностного сопротивления изоляции и защиты печатного монтажа от воздействия климатических факторов. Таким образом, плата лакируется дважды: сразу после своего изготовления и после изготовления печатного узла.



5. Для придания механической прочности печатному узлу при его установке в блоке печатная плата может быть обрамлена по периметру металлическим обрамлением, одновременно служащим направляющим элементом печатного узла.

6. Рекомендуется к каждой печатной плате с лицевого торца крепить ручку из изоляционного материала. С помощью этой ручки оператору удобно вставлять весь печатный узел, собранный на базе такой платы, в посадочное место в блоке и извлекать его оттуда. Для однозначной установки печатного узла в определенное место блока на лицевой плоскости ручки целесообразно предусмотреть паз для установки табличек с номерами ячейки и блока, к которому он относится, что упрощает монтаж и демонтаж на объекте.

### **3.3.3. Компоновка блока управления**

Блок управления представляет собой комплектное устройство, состоящее из большого числа функционально связанных элементов и узлов, существенно отличающихся друг от друга. Приступая к компоновке блока, необходимо знать конструктивно-технологические и эксплуатационные требования, предъявляемые к проектируемому блоку и изделию в целом.

Компоновка комплектующих изделий внутри блока может производиться двумя методами.

1. *Моноблочный метод.* Все детали, узлы и приборы крепятся на общем шасси и соединяются между собой проводным монтажом с помощью пайки. Моноблочный метод компоновки обладает рядом недостатков: сложностью и длительностью поиска вышедшей из строя детали, длительным технологическим циклом изготовления блока. Требуется высокой квалификации персонала. Применяется при небольшом количестве деталей и узлов, входящих в блок, и при мелкосерийном производстве полупроводниковых преобразователей любой мощности.

2. *Функционально-узловой метод.* Блок разбивается на отдельные малогабаритные функциональные ячейки (узлы). Каждая ячейка имеет самостоятельное шасси, на котором устанавливаются детали, узлы и приборы, соединенные печатным или проводным монтажом при помощи пайки. Закрепление ячеек на общем основании про-

изводится так, чтобы установку и демонтаж каждой ячейки можно было производить быстро, без специального инструмента. Электрическое соединение ячеек внутри блока осуществляется с помощью разъемов. Такой метод обладает следующими преимуществами: значительно облегчается и ускоряется поиск неисправной ячейки; ремонт осуществляется путем замены вышедшей из строя ячейки без применения пайки; технологический цикл сборки упрощается и ускоряется, так как все ячейки можно собирать и налаживать параллельно; минимальное время установки ячеек в блок.

Независимо от метода компоновки блока управления необходимо при его конструировании придерживаться следующих рекомендаций.

1. Перед началом компоновки желательно проанализировать и разбить на группы все элементы и узлы, входящие в блок управления, в зависимости от массы, габаритов, особенностей монтажа, термоактивности, термочувствительности и т. д.

2. Целесообразно все элементы, входящие в блок управления, разделить на две группы: элементы с функциональным выходом на поверхность блока и элементы, входящие в монтажную часть. В первой группе следует выделить элементы, выносимые на лицевую панель (элементы управления, контроля, индикации), и элементы, которые могут быть вынесены на боковую или заднюю поверхность блока (разъемы, клеммы, защелки и др.).

3. Начиная компоновку, целесообразно выделить зону компоновки лицевой панели, которая определяется по максимальным габаритам элементов, выходящих на лицевую панель. В дальнейшем компоновка блока управления ведется за пределами обозначенной зоны.

4. Тяжелые детали следует размещать на шасси таким образом, чтобы масса их на шасси была сбалансирована. Центр тяжести скомпонованных элементов должен совпадать с геометрическим центром тяжести блока.

5. Термоактивные элементы (резисторы, силовые диоды, тиристоры, транзисторы и т. д.) должны иметь вокруг свободное пространство. Их нельзя располагать близко к термочувствительным элементам, например, электролитическим конденсаторам, мало-мощным транзисторам, микросхемам.

6. Элементы следует располагать на шасси с учетом возможной их замены. Элементы с повышенной частотой отказов должны располагаться так, чтобы при их замене не требовался демонтаж соседних элементов.

7. Элементы, требующие регулировки в процессе эксплуатации, должны быть доступны и безопасны для оператора.

8. При соединении элементов проводным монтажом следует избегать соединений натянутыми проводниками тяжелых элементов. Всегда нужно предусматривать некоторое провисание проводников: в противном случае при относительном перемещении под действием вибрации тяжелых деталей может произойти обрыв монтажных проводов.

9. Все провода, проложенные через металлические шасси, должны быть защищены изолирующими втулками и через определенные промежутки закреплены во избежание обрыва в местах соединения и истирания изоляции под действием вибрации и тряски.

### **3.4. Дроссели насыщения**

У многих энергоемких потребителей постоянного тока часто возникает необходимость в строгом поддержании заданной величины тока или напряжения независимо от изменения напряжения питающей сети или сопротивления нагрузки. Источником питания для таких потребителей могут быть управляемые выпрямители, в которых стабилизация напряжения осуществляется схемой управления за счет регулирования узла открытия тиристорov. Однако использование мощных выпрямителей на тиристорах в ряде случаев экономически не оправдано, и в промышленности нашли широкое применение выпрямительные устройства на диодах с системой автоматического регулирования.

Стабилизация выпрямленного напряжения или заданной величины тока производится путем регулирования напряжения, подводимого к выпрямительному блоку следующими способами.

1. Изменение коэффициента трансформации входного трансформатора путем переключения под нагрузкой его отпаек или путем использования трансформатора с подвижными катушками

или выдвигным сердечником. Этот способ экономичен, так как обеспечивает во всех режимах высокий коэффициент мощности, но применяется редко ввиду существенных недостатков: большой инерционности, наличия подвижных частей, возможности только ступенчатого регулирования, применения мощных переключателей с малым моторесурсом.

2. Изменение величины падения напряжения на дросселях насыщения. *Дроссель насыщения* – это регулируемая индуктивность, включаемая в питающую сеть выпрямителя и выполненная в виде катушки с замкнутым магнитопроводом из ферромагнитного материала с прямоугольной петлей гистерезиса. Катушка имеет не менее двух обмоток – рабочую, по которой протекает ток, равный фазному току трансформатора или току, протекающему через диоды (в зависимости от схемы включения), и обмотку управления. Дроссели насыщения включаются либо на первичной стороне силового трансформатора, либо между вторичными обмотками трансформатора и входом выпрямителя. При использовании дросселей насыщения регулирование осуществляется плавно и в широких пределах, инерционность системы регулирования мала, так как нет подвижных частей. Однако при регулировании в большом диапазоне дроссели получают большими и дорогостоящими, а коэффициент мощности сильно ухудшается.

3. Комбинированный способ. Грубое регулирование осуществляется с помощью переключения обмоток выходного трансформатора крупными ступенями, а плавное (внутри отпаек) – с помощью дросселей насыщения. При комбинированном способе регулирование осуществляется плавно, с достаточным быстродействием и сохраняется достоинство регулирования с помощью переключения отпаек трансформатора – его экономичность. При этом переключатель отпаек работает редко, только при больших величинах изменения нагрузки или напряжения питающей сети. Диапазон регулирования дросселя насыщения между двумя соседними отпайками обычно 18...24 В.

Основным элементом дросселя насыщения является сердечник, обоснованный выбор которого является решающим условием для создания оптимальной конструкции дросселя насыщения. Суще-

твуют следующие конструкции сердечников дросселей насыщения: шихтованный косой разрез; шихтованный П-образный с вкладышем; шихтованный в колодец; витой неразрезной.

Наиболее широкое применение при конструировании дросселя насыщения для полупроводниковых преобразователей нашли витые из холоднокатаной текстурованной электротехнической стали тороидальные сердечники, обладающие следующими достоинствами:

- 1) возможность максимального использования магнитных свойств материала сердечника, так как применение витого сердечника позволяет совместить направление магнитного потока в нем с направлением проката стали;
- 2) высокая технологичность изготовления, связанная с возможностью механизации и автоматизации процессов нарезания ленты, нанесения жаростойкого изоляционного покрытия, проведения намоточных работ;
- 3) оптимальные габариты и масса, максимальный коэффициент заполнения сердечника сталью;
- 4) отсутствие воздушных зазоров на пути магнитного потока, что улучшает характеристики сердечника;
- 5) минимум мощности управления при заданных габаритах и массе.

Для расчета основных параметров дросселя насыщения используется связь между падением напряжения на каждом дросселе насыщения и глубиной регулирования выпрямленного напряжения. Для трехфазной мостовой схемы выпрямления

$$Qw_p = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\Delta U_{dm}}{\omega \Delta B_m}, \quad (3.1)$$

где  $Q$  – сечение сердечника дросселя;  $w_p$  – число витков рабочей обмотки;  $\omega$  – угловая частота перемагничивания сердечника;  $\Delta U_{dm}$  – глубина регулирования выпрямленного напряжения;  $\Delta B_m$  – используемая индукция перемагничивания сердечника.

Величина  $\Delta B_m$  зависит от материала сердечника, конструкции сердечника и рабочего диапазона изменения индукции по петле гистерезиса. Глубина регулирования выпрямленного напряжения, как правило, задается в техническом задании. Разбивка произведения для определения сечения магнитопровода и числа витков рабо-

чей обмотки производится в зависимости от требований к данному выпрямительному устройству по минимуму массы и габаритов или минимуму потерь. При выборе конструктивных параметров сердечника следует учитывать, что при большой величине соотношения внешнего и внутреннего диаметров сердечника возможно ухудшение магнитных характеристик дросселя насыщения из-за неравномерного насыщения отдельных участков сердечника, когда его внутренние витки насыщаются быстрее, чем внешние. Рабочий диапазон  $\Delta B_m$  следует выбирать таким, чтобы иметь полное использование ненасыщенного участка кривой намагничивания, при этом номинальное значение коэффициента мощности будет наибольшим. Однако чрезмерное увеличение  $\Delta B_m$  приводит к увеличению мощности управления.

### 3.5. Силовая ошиновка

Правильный выбор материала и сечения токоведущих шин в силовых цепях полупроводниковых преобразователей и распределительных устройствах к ним, их размещение, соединение шин между собой и их подсоединение к аппаратуре имеют первостепенное значение для надежной работы преобразователя и его электрической и механической прочности в условиях нормального и аварийного режимов.

В преобразовательных устройствах преимущественно применяют медные шины прямоугольного сечения, иногда – алюминиевые или стальные прямоугольные шины. При выборе токоведущих шин следует придерживаться следующих рекомендаций.

1. При длительном протекании номинального тока температура нагрева токоведущих шин не должна превышать допустимого значения, обусловленного классом нагревостойкости близлежащей или соприкасающейся с ними изоляции.

2. При кратковременном протекании токов перегрузки или короткого замыкания температура нагрева шин не должна превышать допустимого значения для короткого замыкания, указываемого в справочниках и зависящего от материала шин и класса нагревостойкости изоляции.

3. Токоведущие шины должны выдерживать механические усилия, возникающие при протекании токов короткого замыкания. Механическое усилие на шину от взаимодействия токов короткого замыкания между фазами определяется по формуле

$$F = \sqrt{3} \cdot 10^{-3} i_y^2 \cdot \frac{l}{a} [\text{Н}], \quad (3.2)$$

где  $l$  – длина пролета шин между точками их опоры, м;  $a$  – расстояние между осями шин, м;  $i_y$  – ударный ток короткого замыкания, кА.

Максимальный изгибающий момент, действующий на шину,

$$M_m = F \cdot l. \quad (3.3)$$

Механическое напряжение в материале шины

$$\sigma = \frac{M_m}{W}, \quad (3.4)$$

где  $W$  – момент сопротивления шины,

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (3.5)$$

где  $b$  – ширина шины;  $h$  – толщина шины.

4. Механические усилия, передаваемые с шин на изоляторы, не должны превышать 60 % разрушающей нагрузки изолятора, задаваемой техническими условиями или ГОСТом на данный изолятор.

5. С точки зрения увеличения механической прочности ошиновки по отношению к электродинамическим усилиям целесообразно располагать шины различных фаз по отношению друг к другу своими узкими сторонами, то есть по максимальному моменту сопротивления. Недостатком такого расположения шин является увеличение размеров шкафа преобразователя.

6. При размещении ошиновки в шкафу необходимо строго соблюдать нормированные расстояния между токоведущими частями различных фаз, а также между ними и заземленными частями преобразователя, определяемые величиной пробивного напряжения.

Надежность работы преобразователя в значительной мере зависит от качества контактных соединений шин между собой и присоединения их к контактным выводам аппаратов. Контактные соединения шин должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1) не нагреваться выше допустимых для контактных соединений температур при длительном протекании тока;

2) быть механически и электрически устойчивыми при протекании токов короткого замыкания;

3) температура нагрева шин в местах их присоединения к контактным выводам аппаратов не должна превышать значений, допустимых для этих выводов.

Контактные соединения плоских шин между собой в преобразователях осуществляются электросваркой, на болтах и на сжимах. Присоединение шин к контактным выводам аппаратов осуществляется на болтах.

Сварные соединения шин наиболее полно отвечают основным требованиям, предъявляемым к контактным соединениям: они обладают малым электрическим переходным сопротивлением контакта, устойчивостью электрических и механических характеристик, устойчивостью к электродинамическим и термическим воздействиям токов короткого замыкания, не требуют обслуживания в процессе эксплуатации. В контактных соединениях, выполненных электросваркой, уменьшается расход цветного металла, так как сварка шин осуществляется, как правило, встык, в то время как в остальных случаях шины соединяются внахлестку. Основным недостатком сварных соединений является неразъемность токоведущих шин, что не всегда допустимо в конструкции преобразователя.

Болтовые контактные соединения шин обладают худшими электрическими характеристиками, чем сварные соединения, и требуют регулярного ухода в процессе эксплуатации. Однако возможность создания с помощью болтовых соединений разъемных конструкций, позволяющих, с одной стороны, перевести их изготовление на поток, с другой — оперативно демонтировать на объекте любое количество комплектующих конструкций узлов, привело к повсеместному применению болтовых соединений как внутри шкафа, так и при его сочленении с магистральными шинными трассами.

Соединения плоских шин при помощи сжимов имеют некоторые преимущества перед болтовыми соединениями за счет доброкачественного сочленения без необходимости точной пригонки шин в местах контактирования. Кроме того, являясь унифицированным



монтажным элементом и выполняя функцию шинодержателей, сжимы придают конструкции большую жесткость, связывая токоведущую ошиновку с каркасом шкафа. Однако стоимость сжимного контактного соединения выше, чем болтового, и поэтому оно целесообразно тогда, когда рациональность его применения диктуется конструктивными соображениями.

Шины преобразовательных установок должны окрашиваться в отличительные цвета фаз и полюсов. При переменном токе фаза А окрашивается в желтый цвет, фаза В – в зеленый, фаза С – в красный, нулевая шина – в фиолетовый. При постоянном токе положительная шина окрашивается в красный, а отрицательная – в синий цвет.

Расположение шин переменного тока должно осуществляться в строгой последовательности: фаза А – слева, фаза В – посередине, фаза С – справа, если смотреть со стороны обслуживания ошиновки.

### **3.6. Шкафы силовых полупроводниковых преобразователей**

Силовые полупроводниковые преобразователи чаще всего представляют собой комплектные преобразовательные устройства, в которых все элементы принципиальной электрической схемы и элементы системы охлаждения размещены в металлических шкафах. Шкаф предохраняет элементы, установленные в нем, от внешних статических и динамических перегрузок, ограждает обслуживающий персонал от возможных поражений электрическим током и является основной несущей конструкцией.

Общая компоновка, форма и размеры шкафов полупроводниковых преобразователей определяются следующими факторами:

- назначением и местом установки преобразователя;
- размерами и количеством встраиваемого электрооборудования с учетом удобства монтажа и эксплуатации, с соблюдением электрических расстояний между частями, находящимися под напряжением, и от них до заземленных частей;
- созданием надлежащих тепловых условий работы электрооборудования;

– видом производства и имеющимся на заводе-изготовителе технологическим оборудованием.

Шкафы преобразователей состоят из каркаса, оболочки и внутренних деталей конструкции.

Каркас шкафа образует сварная или сборная конструкция из профильного стального проката или легких алюминиевых сплавов. Сварные каркасы более прочны и компактны. Недостатком их является то, что после сварки они должны подвергаться механической обработке и только после этого окрашиваться. Манипулирование с таким объемом затруднительно и требует много места. Затруднительно и складское хранение готовых каркасов такого типа. Поэтому сварные каркасы могут применяться только при изготовлении опытных образцов и небольшого числа специализированных преобразователей. Сборные каркасы состоят из отдельных деталей из профильного проката, которые соединяются болтами непосредственно или с помощью вспомогательных деталей различной конфигурации. Детали сборных каркасов могут быть окрашены заранее, с ними легко манипулировать, и они не требуют много места для хранения. Они пригодны для автоматизированной сборки с использованием вычислительной техники в управлении складским хозяйством и монтажным участком. Недостатками сборных каркасов являются пониженная жесткость конструкции, большое количество деталей и опасность повреждения поверхностного покрытия при сборке.

Хорошее компромиссное решение, исключаяющее большинство недостатков, присущих обоим указанным выше конструктивным решениям, представляют собой комбинированные каркасы, состоящие из плоских (двухмерных) сварных элементов. Из профильного проката сваривают прямоугольные рамы, из которых с помощью болтов собирают шкаф. Рамы окрашиваются перед монтажом, с ними легко манипулировать при окраске, складском хранении и монтаже.

Оболочку шкафа образуют стенки, двери, дно и крышка. Стенки обычно выполняются из стального листа толщиной 1–2 мм. Края листа отгибаются под прямым углом, образуя ребра шириной 10–20 мм. Для окаймления кромки используются накладки из черной резины, а для защиты от проникновения пыли и воды – уплотнители из микропористой резины разнообразных профилей различного сечения (рис. 29).

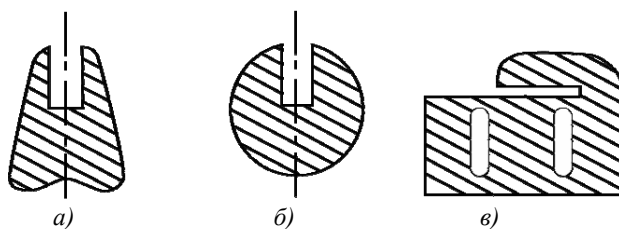


Рис. 29. Окантовка для стенок шкафа из черной резины (*а* и *б*) и уплотнитель из микропористой резины (*в*)

Стенки шкафа крепятся к каркасу чаще всего болтами, ввинчиваемыми в резьбу, нарезанную в отверстиях каркаса, или в гайки, приваренные к каркасу. Для того чтобы не нарушать целостность поверхности стенок шкафа, к их внутренней поверхности приваривают винты с резьбой. При установке стенки на каркас винты проходят в отверстия каркаса и затягиваются гайками с гроверными шайбами. Привариваемые винты могут быть стальными, латунными, медными и т. д. На конце, который приваривается, они расширены и снабжены небольшим центрирующим выступом.

Если преобразователь охлаждается воздухом, то оболочка шкафа должна иметь приточные и выпускные отверстия. Исполнение отверстий зависит от необходимой степени защиты. В общем случае действует следующий принцип: чем выше степень защиты, тем труднее обеспечить охлаждение. Отверстия выполняются в виде: перфорации в стенках или двери шкафа; проволочной сетки, приваренной к стенкам или двери; штампованных жалюзи, обеспечивающих защиту от капяющей воды.

Преобразователи, размещаемые в запыленных помещениях и охлаждаемые воздухом, всасываемым из этого помещения, должны иметь фильтр охлаждающего воздуха. Фильтр размещается, как правило, в нижней части двери или другой свободной части оболочки. Он состоит из фильтрующей ткани, которая в несколько слоев укладывается в прямоугольную раму, закрепляемую винтами на двери или другой части оболочки. Фильтрующая ткань снаружи и изнутри закрыта перфорированными листами.

Двери шкафа подвешиваются на петлях. В закрытом положении двери фиксируются замком с ручкой или без нее. Часто используется

фиксация в трех точках, при которой двери с помощью тяг фиксируются также в верхней и нижней частях. Более простым и дешевым решением является обычный замок в середине двери и магнитные прихваты с постоянными магнитами в двух или более местах. Механизм открывания дверей должен позволять их поворот на угол не менее 100 градусов.

Внутри шкафа в качестве деталей используются различные планки, рейки, перегородки, панели, скобы, а также различные элементы системы охлаждения, например, направляющие потока воздуха или арматура системы жидкостного охлаждения.

Для захвата стропами шкафа может снабжаться рым-болтами, укрепляемыми на его верхней раме. Эта рама должна быть достаточно жесткой, чтобы шкаф при транспортировке на стропях не деформировался.

К шкафам полупроводниковых преобразователей предъявляются следующие требования:

- несущая способность шкафа преобразователя до 500 кг;
- на дверях шкафа можно размещать нагрузку до 30 кг;
- рама шкафа должна иметь заземляющий зажим со знаком заземления;
- допустимая температура окружающей среды при эксплуатации шкафов общепромышленного применения от  $-10$  до  $+40$  °С;
- допустимый перегрев частей шкафа 30 °С;
- металлические части шкафа должны иметь антикоррозийное поверхностное покрытие.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите виды общей компоновки полупроводниковых преобразователей и дайте их краткую характеристику.
2. Назовите особенности компоновки преобразовательного шкафа при естественном воздушном охлаждении.
3. Назовите особенности компоновки преобразовательного шкафа при принудительном воздушном охлаждении.
4. Назовите особенности компоновки преобразовательного шкафа при жидкостном охлаждении.
5. Перечислите основные узлы преобразователя.

6. Перечислите основные требования к конструкции силового блока.
7. Назовите особенности резьбового сочленения вентиля с охладителем.
8. Назовите особенности прижимного сочленения вентиля с охладителем.
9. Перечислите основные требования к последовательному и параллельному соединению полупроводниковых вентиляей.
10. Назовите методы выравнивания токов и напряжений в параллельно и последовательно включенных вентилях.
11. Назовите особенности компоновки силовых блоков при естественном воздушном охлаждении в зависимости от режима работы преобразователя.
12. Назовите способы компоновки силовых блоков при принудительном воздушном охлаждении и дайте их характеристику.
13. Назовите способы компоновки силовых блоков при жидкостном охлаждении и приведите примеры конструктивных решений.
14. Перечислите основные узлы блочных систем управления.
15. Перечислите основные требования к конструкции блочных систем управления.
16. Приведите классификацию печатных плат.
17. Перечислите способы нанесения изображения печатных проводников на изоляционное основание.
18. Перечислите способы создания токопроводящего слоя на изоляционном основании.
19. Какие материалы применяют при изготовлении печатных плат?
20. Перечислите основные требования к конструкции печатных плат.
21. Перечислите основные требования к установке навесных элементов на печатную плату.
22. Перечислите виды компоновки блоков управления и дайте их краткую характеристику.
23. Назовите рекомендации к компоновке блоков управления.
24. Перечислите способы стабилизации и регулирования входного напряжения преобразователя.

25. Перечислите виды сердечников дросселей насыщения и приведите примеры конструкции.
26. Перечислите основные требования к силовым токоведущим шинам преобразователя.
27. Перечислите виды соединения токоведущих шин и дайте их краткую характеристику.
28. Перечислите основные узлы шкафа преобразователя.
29. Перечислите способы изготовления каркаса шкафа и дайте их краткую характеристику.
30. Перечислите основные требования к шкафу преобразователя.

## **4. ЗАЩИТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

### **4.1. Отказы полупроводниковых приборов, приводящие к аварийным режимам работы, и требования к их системам защиты**

Основными отказами полупроводниковых приборов, приводящими к аварийным режимам работы преобразователей, являются электрический пробой, тепловой пробой, потеря управляющей способности тиристоров, механические повреждения полупроводниковых приборов.

Электрический пробой возникает при приложении к полупроводниковому прибору напряжения, превышающего допустимое значение по амплитуде и продолжительности.

Тепловой пробой происходит при превышении током полупроводникового прибора допустимого значения по амплитуде и продолжительности или нарушении режима охлаждения прибора, приводящем к чрезмерному повышению температуры структуры. Превышение критического значения скорости нарастания тока у тиристоров вызывает местный перегрев структуры прибора и также приводит к его тепловому пробую. Электрический и тепловой пробой являются процессами необратимыми и приводят к полному отказу приборов.

Потеря управляющей способности тиристоров характеризуется самопроизвольным переключением их в проводящее состояние при отсутствии сигнала управления. Причиной этого является либо превышение приложенным к вентилю прямым напряжением значения напряжения включения тиристора, либо превышение критического значения скорости нарастания прямого напряжения. Подобное явление возникает также при заниженных напряжении и токе управления тиристора, в результате чего он включается от помехи. Если тиристор потерял управляющую способность при кратковременном нарушении режима и при этом не произошло изменения его параметров, то после ликвидации нарушения тиристор сможет нормально работать.

Возможны также отказы, связанные с механическими повреждениями полупроводниковых приборов, такими как обрыв управляющего электрода, нарушение пайки электродов и т. д.

Ввиду чувствительности полупроводниковых приборов к перегрузкам, коротким замыканиям, перенапряжениям для обеспечения надежной работы преобразователей к системам защиты предъявляются следующие основные требования:

- 1) максимальное быстродействие в целях ограничения аварийных токов по длительности и амплитуде значениями, определяемыми перегрузочной способностью полупроводниковых приборов;
- 2) ограничение всех видов внутренних и внешних перенапряжений допустимым значением;
- 3) безотказность в работе при различных видах повреждений;
- 4) отключение поврежденного участка без дополнительной нагрузки на оставшиеся в работе полупроводниковые приборы и недопустимого перенапряжения на них;
- 5) возможность применения автоматического повторного включения преобразователей после срабатывания защиты при условии ликвидации аварийного процесса.

Кроме этих требований системы защиты при аварийных режимах должны обеспечивать специфические требования, присущие отдельным видам полупроводниковых преобразователей.

## **4.2. Средства защиты полупроводниковых преобразователей**

### **4.2.1. Плавкие предохранители**

Плавкие предохранители широко применяются для защиты полупроводниковых преобразователей от токов короткого замыкания и являются самыми простыми и дешевыми защитными аппаратами. К быстродействующим плавким предохранителям для защиты полупроводниковых преобразователей предъявляются более жесткие требования, чем к плавким предохранителям общепромышленного применения. В основном эти требования сводятся к следующему:



- 1) полное или частичное согласование ампер-секундной характеристики предохранителя с ампер-секундной характеристикой защищаемого объекта;
- 2) высокая отключающая способность;
- 3) минимальные потери при номинальном токе;
- 4) отсутствие изменения характеристик предохранителя во времени;
- 5) эффективное токоограничение при аварийном режиме;
- 6) минимальная энергия, выделяющаяся в полупроводниковых приборах за время протекания аварийного тока;
- 7) конструкция и способ крепления предохранителей, обеспечивающие удобную компоновку с полупроводниковыми приборами.

На рис. 30 приведена принципиальная схема защиты трехфазного мостового выпрямителя с помощью плавких предохранителей.

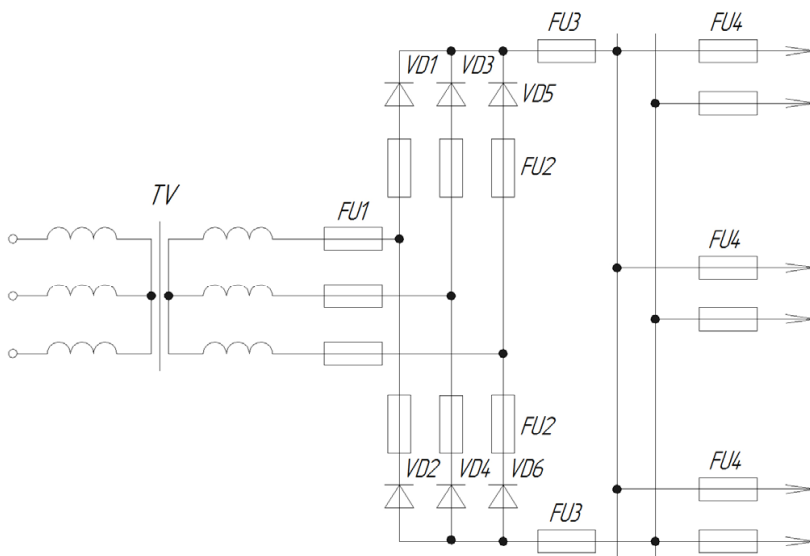


Рис. 30. Схема защиты выпрямителя

Предохранители могут быть установлены в фазных проводах переменного тока FU1, обеспечивая защиту от внешних повреждений, в цепях приборов FU2 для защиты от внутренних повреждений, в выходных цепях постоянного тока FU3 и в цепях отдельных потребителей FU4. Предохранители должны работать селективно.

Например, при внутренних повреждениях в схеме преобразователя должны сработать вначале предохранители FU2, а не FU1. При повреждении в цепи отдельного потребителя должны сработать быстрее предохранители FU4, а не FU3.

Для правильного выбора плавкого предохранителя необходимо знать:

- 1) действующее значение тока через предохранитель при номинальном режиме работы;
- 2) действующее или амплитудное значение напряжения между выводами предохранителя после его перегорания;
- 3) допустимый аварийный ток в отключаемой цепи;
- 4) допустимое для отключаемого объекта перенапряжение, возникающее после перегорания предохранителя;
- 5) аварийный ток, который должен быть отключен предохранителем.

Основным недостатком плавких предохранителей является разовость действия.

#### **4.2.2. Автоматические выключатели**

Достоинство многих типов автоматических выключателей в том, что в них совмещены устройство защиты и коммутационный аппарат, позволяющий производить включение и отключение преобразователя в нормальных режимах. Автоматические выключатели обеспечивают многократность действия и дают возможность дистанционного управления. Однако, в основном, автоматические выключатели уступают по быстродействию предохранителям. Отечественной промышленностью выпускаются быстродействующие выключатели серий ВАБ и ВАТ и общепромышленные выключатели серий А, АМ, АЕ, ВА и др.

Быстродействующие автоматические выключатели применяются для защиты мощных преобразователей при внешних коротких замыканиях и перегрузках в сочетании с предохранителями в качестве защиты от внутренних коротких замыканий. Быстродействующие выключатели применяются также для защиты линий постоянного тока – в обозначении таких выключателей имеется буква Л (линейный) – и для защиты полупроводниковых приборов при увеличе-

нии через них обратного тока – в обозначении имеется буква К (катодный). Для тиристорных преобразователей быстродействующие автоматические выключатели используются часто как резервное средство защиты, обеспечивающее отключение преобразователей при отказе основных средств защиты.

Выключатели общепромышленного применения используются в качестве коммутационных аппаратов и резервных средств защиты. Однако следует учитывать, что они почти на порядок уступают по быстродействию выключателям серий ВАБ и ВАТ.

#### **4.2.3. Короткозамыкатели**

Достоинством защиты полупроводниковых преобразователей с помощью короткозамыкателей является высокое быстродействие (1–3 мс) и полное отсутствие перенапряжений.

По команде датчиков защиты короткозамыкатель закорачивает вторичные обмотки питающего трансформатора, прекращая тем самым прохождение аварийного тока через полупроводниковые приборы, а отключение преобразователя производит автоматический выключатель, установленный на первичной стороне трансформатора. Каждое срабатывание короткозамыкателя приводит к глухому короткому замыканию трансформатора, что вызывает большие электродинамические усилия в его обмотках. Входные трансформаторы при использовании короткозамыкателей должны быть повышенной прочности и иметь увеличенное значение напряжения короткого замыкания.

Защита полупроводниковых преобразователей с помощью короткозамыкателей широко распространения не получила.

#### **4.2.4. Тиристорные выключатели постоянного тока**

Тиристорный выключатель постоянного тока (рис. 31) действует по принципу тиристорного ключа и основан на емкостном прерывании тока.

Он состоит из постоянно открытого основного тиристора VS1, прерывающего конденсатора С и прерывающего тиристора VS2. Конденсатор С предварительно заряжен от дополнительной схемы заряда (на рис. 31 не показана). При аварии в преобразователе в мо-

мент  $t_0$  ток  $i_d$  начинает возрастать. В момент времени  $t_1$  по сигналу с датчика защиты или команде от схем дистанционного управления подается управляющий импульс на тиристор VS2 и снимается управляющий импульс с тиристора VS1. Конденсатор C закрывает тиристор VS1, а ток  $i_d$  коммутируется из цепи тиристора VS1 в цепь конденсатора C и тиристора VS2. На интервале  $t_1-t_3$  конденсатор перезаряжается противоположной полярностью, и в момент времени  $t_3$  при токе  $i_d = 0$  тиристор VS2 закрывается. На интервале времени  $t_1-t_2$  к тиристорам VS1 приложено обратное напряжение и он восстанавливает свою запирающую способность.

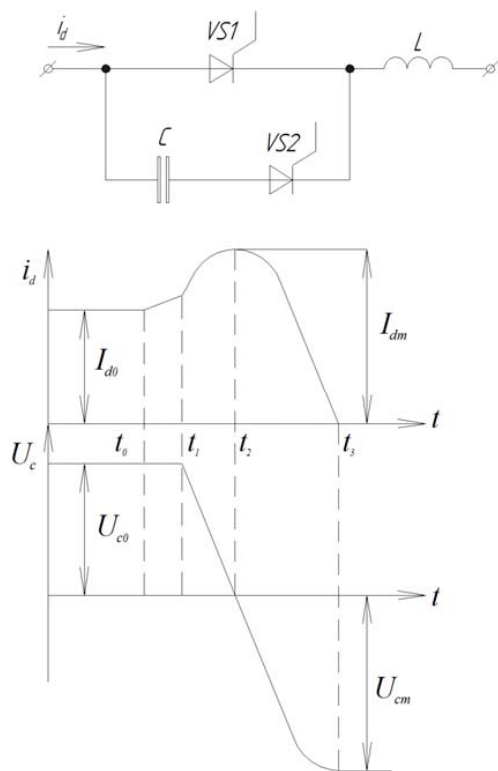


Рис. 31. Тиристорный выключатель постоянного тока

Для включения тиристорного выключателя необходимо подать управляющий импульс на VS1, предварительно перезарядив конденсатор С. Время отключения (интервал  $t_3 - t_1$ ), амплитуда напряжения на конденсаторе  $U_{cm}$  и амплитуда тока в отключаемой цепи  $I_{dm}$  зависят от емкости конденсатора С, индуктивности отключаемой цепи  $L$ , начального тока  $I_{d0}$  и начального напряжения на конденсаторе  $U_{c0}$ . Обычно время отключения тиристорного выключателя 2–3 мс.

Тиристорные выключатели, особенно для мощных цепей, должны иметь конденсаторы со значительной емкостью, которая обеспечивала бы как прерывание тока через тиристор VS1, так и поглощение энергии, запасенной в индуктивностях отключаемой цепи. Тиристор должен быть рассчитан на протекание аварийного тока при большой скорости его нарастания  $d_i/d_t$ , или же  $d_i/d_t$  необходимо ограничивать с помощью насыщающегося реактора.

#### 4.2.5. Импульсные дуговые коммутаторы

Импульсный дуговой коммутатор (ИДК) представляет собой быстродействующий бесконтактный аппарат, обеспечивающий включение устройства емкостного прерывания тока и рассеивание в электрической дуге энергии, запасенной в индуктивностях отключаемой цепи. Рассмотрим работу выключателя постоянного тока с ИДК (рис. 32). В нем ИДК заменяет прерывающий тиристор VS2 в тиристорном выключателе постоянного тока (рис. 31) и одновременно рассеивает электромагнитную энергию, запасенную в индуктивности  $L$ . Конденсатор С, шунтированный диодом VD, выполняет только функцию прерывания тока через основной тиристор VS1, что позволяет существенно уменьшить его емкость. Наличие диода дает возможность использовать электролитические конденсаторы, имеющие меньшие габариты.

ИДК (рис. 33) состоит из дугогасительной камеры с соплом, образованным параллельными электродами (рогами) Э1 и Э2 и дугогасительной решеткой (ДР), обмотки магнитного дутья  $\omega_1$  выводов для подключения ИДК к внешней цепи, поджигающих электродов Э3 – Э4 – Э5 и системы управления поджигом (рис. 34). Питание системы управления осуществляется от маломощного трансфор-

матора TV1. От того же трансформатора возможен заряд и прерывающих конденсаторов через дополнительную обмотку. Через резистор R1 заряжается конденсатор C1, а через резистор R2 – конденсаторы C2, C3, C4, причем конденсаторы C3 и C4 включены по схеме удвоения напряжения. Сигнал от датчиков защиты поступает на управляющий электрод тиристора VS. Тиристор открывается, и происходит разряд предварительно заряженного до напряжения 300–400 В конденсатора C1 на первичную обмотку импульсного трансформатора TV2. Одновременно в цепь разряда включается дополнительная обмотка  $\omega_2$  магнитной системы коммутатора. На вторичной обмотке TV2 возникает напряжение, достаточное для пробоя воздушного зазора между электродами Э3 и Э5 поджигающего устройства. Дуга между электродами Э3 и Э5 вызывает пробой воздушного промежутка между электродами Э3 и Э4 и разряд конденсатора C2. Под действием магнитного поля обмотки  $\omega_2$  происходит выдувание электрической дуги с электродов Э3 и Э4 и перенос ее на электроды Э1 и Э2. Дуга между электродами Э1 и Э2 поддерживается за счет протекания главного тока. Обмоткой  $\omega_1$  создается магнитное поле, перемещающее дугу вдоль электродов Э1 и Э2 на дугогасительную решетку, в которой и происходит рассеивание в дуге энергии, запасенной в индуктивностях отключаемой цепи.

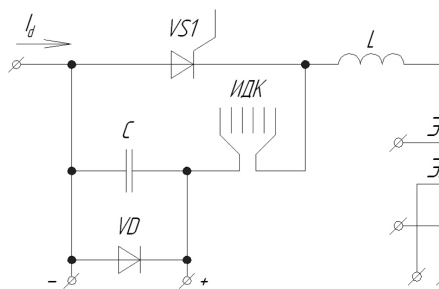


Рис. 32. Тиристорный выключатель постоянного тока с ИДК

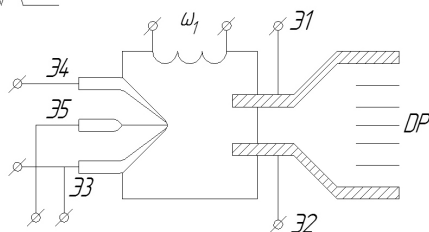


Рис. 33. Конструктивная схема ИДК



### 4.3. Схемы защиты полупроводниковых преобразователей

#### 4.3.1. Бесконтактная защита неуправляемых выпрямителей

На рис. 35 приведены схемы защиты неуправляемого выпрямителя с использованием тиристоров, установленных в цепи первичной обмотки трансформатора TV. По сигналу датчиков защиты прекращается подача управляющих импульсов на тиристоры, включенные встречно-параллельно в каждый фазный провод (рис. 35, а), или на тиристоры, обеспечивающие замыкание нулевой точки трансформатора (рис. 35, б). В обоих случаях время срабатывания защиты определяется как сумма времени срабатывания системы снятия управляющих импульсов и времени снижения тока до нуля, после чего тиристоры, проводившие ток, закрываются и выпрямитель отключается от источника питания. В схеме (рис. 35, а) можно вместо шести тиристоров установить три симистора.

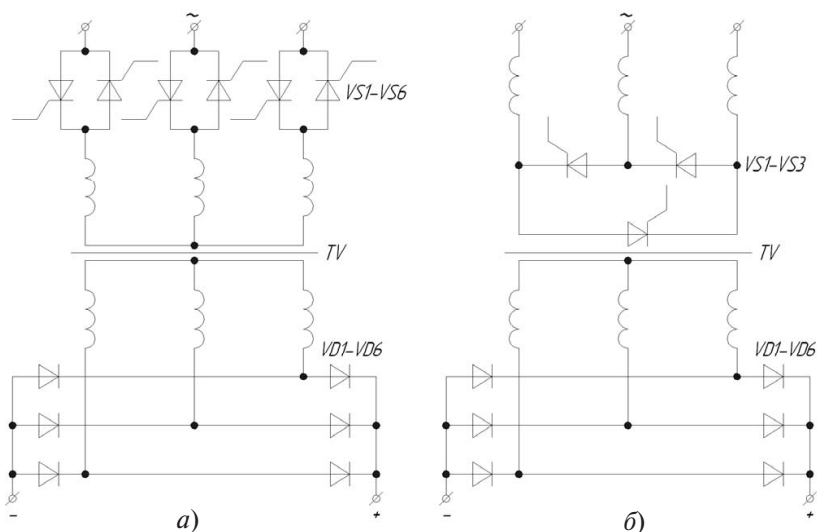


Рис. 35. Схемы защиты неуправляемого выпрямителя



Использование бесконтактных быстродействующих исполнительных элементов защиты более эффективно для выпрямителей, часто требующих включения и отключения нагрузки. Время отключения при этом, как правило, не более одного полупериода рабочей частоты.

#### 4.3.2. Защита тиристорного выпрямителя с емкостным прерыванием тока и использованием ИДК

ИДК применяют чаще всего для защиты мощных выпрямителей с большими аварийными токами. На рис. 36 приведена схема защиты управляемого выпрямителя с использованием ИДК. Конденсатор  $C$  предварительно заряжен от зарядного устройства  $ЗУ$  указанной полярностью. При поступлении сигнала от датчиков защиты на систему поджига ИДК загорается электрическая дуга между электродами ИДК, обеспечивая условие коммутации тока из цепи тиристоров  $VS1-VS6$  в цепь конденсатора  $C$ . После закрытия тиристоров  $VS1-VS6$  отключение аварийного тока осуществляется импульсным дуговым коммутатором. После заряда конденсатора  $C$  до исходного напряжения возможно повторное включение выпрямителя.

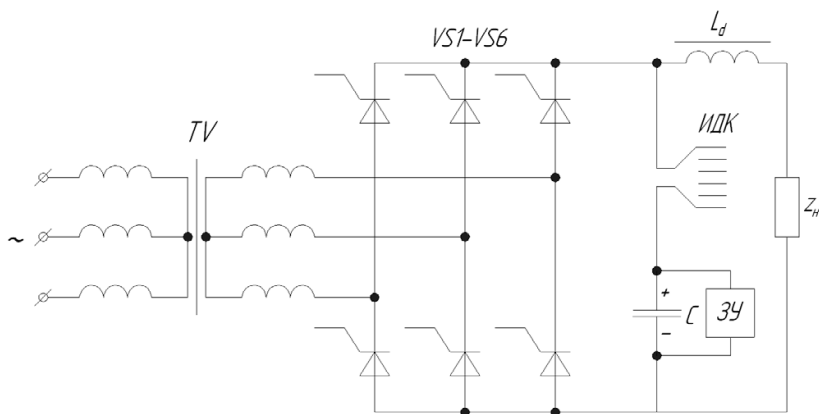


Рис. 36. Схема защиты управляемого выпрямителя

### 4.3.3. Защита автономного инвертора тока с помощью емкостного прерывающего устройства

На рис. 37 приведена принципиальная электрическая схема защиты автономного инвертора тока  $VS1-VS6$  с помощью емкостного прерывающего устройства. Конденсатор  $C$  предварительно заряжен указанной полярностью по цепи  $+U_d, R1, C, R2, -U_d$ . При возникновении аварийного режима датчики защиты выдают команду на снятие управляющих импульсов с тиристоров инвертора  $VS1-VS6$  и подачу управляющих импульсов на тиристоры  $VS7-VS9$ . Напряжение с прерывающего конденсатора  $C$  прикладывается к тиристорам инвертора в обратном направлении. Они закрываются, а конденсатор перезаряжается обратной полярностью по цепи  $+U_d, L_d, VS8, C, VS7, -U_d$ . После перезаряда конденсатора  $C$  тиристоры  $VS7, VS8$  закрываются, и конденсатор перезаряжается от источника питания  $U_d$  первоначальной полярностью через резисторы  $R1$  и  $R2$ . Тиристор  $VS9$  и резистор  $R3$  предназначены для гашения энергии, запасенной во входном дросселе  $L_d$  на резисторе  $R3$  при отключении инвертора.

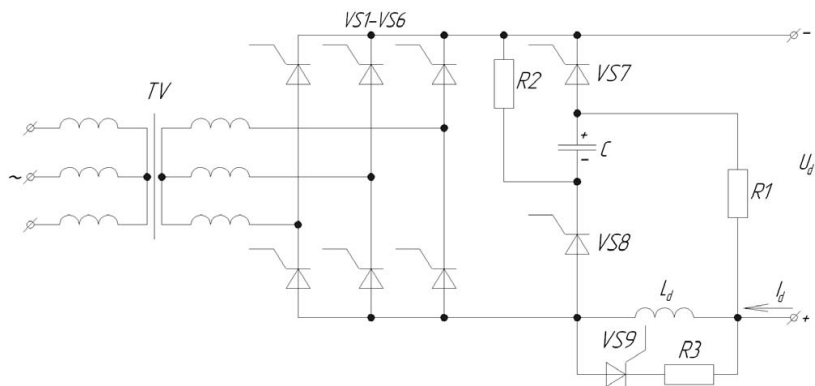


Рис. 37. Схема защиты автономного инвертора тока

#### 4.3.4. Защита автономного инвертора напряжения установкой тиристорного ключа на его входе

Высокое быстродействие защиты автономного инвертора напряжения можно обеспечить путем отключения питания постоянного тока тиристорным ключом, включенным последовательно с преобразователем. Рассмотрим схему защиты инвертора напряжения, работающего на асинхронный двигатель с низким коэффициентом мощности (рис. 38). При нормальной работе инвертора входной ток протекает через тиристор  $VS1$ , на управляющий электрод которого подается постоянно сигнал управления. Через диод  $VD1$  происходит возврат энергии, запасенной в нагрузке, в источник питания  $U_d$ .

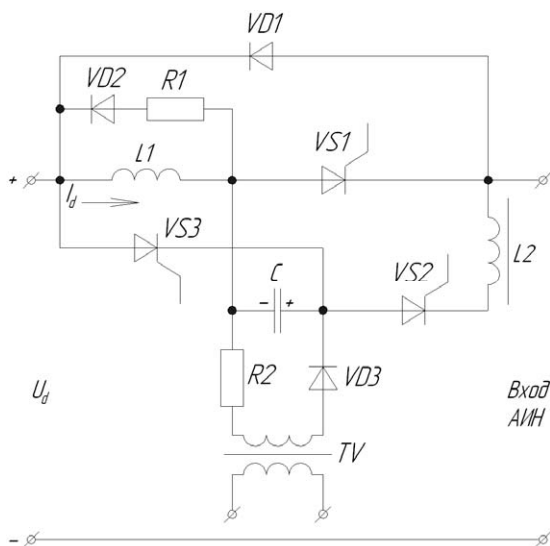


Рис. 38. Схема защиты автономного инвертора напряжения

Конденсатор  $C$  заряжен до напряжения указанной полярности от маломощного источника напряжения с большим внутренним сопротивлением, включенного через трансформатор  $TV$ . При недопустимых перегрузках или коротких замыканиях в нагрузке по команде датчиков защиты управляющий сигнал снимается с тиристора  $VS1$  и подается на тиристор  $VS2$ . Входной ток инвертора коммутируется в цепь с  $VS2$ , а после перезаряда конденсатора падает до нуля, и

тиристор VS2 закрывается. Насыщающийся реактор L2 ограничивает скорость нарастания тока через тиристор VS2 при его включении. На резисторе R1, включенном через диод VD2, рассеивается часть энергии, запасенной во входном дросселе L1, и тем самым снижается уровень напряжения на конденсаторе при его перезаряде. После выключения тиристора VS2 включением тиристора VS3 обеспечивается ускоренный перезаряд конденсатора C по цепи C, L1, VS3, C до напряжения исходной полярности с целью подготовки системы защиты к повторному включению инвертора.

#### **4.3.5. Защита автономного инвертора напряжения включением встречного полупроводникового прибора на входе инвертора**

Для работы автономного инвертора напряжения с высокими динамическими показателями его входная индуктивность должна быть близка к нулю, что приводит к большим аварийным токам при опрокидывании инвертора, особенно при его питании от источника с малым внутренним сопротивлением, например, от аккумуляторной батареи. В этих условиях, чтобы практически исключить входную индуктивность из цепи инвертора в нормальном режиме работы и обеспечить эффективное токоограничение при опрокидывании, целесообразно применение системы защиты с установкой в силовой цепи встречного диода или тиристора, шунтированного низковольтным источником тока. Принципиальная электрическая схема такой защиты приведена на рис. 39.

Вспомогательный низковольтный источник тока, состоящий из трансформатора TV и двухполупериодной схемы выпрямления на диодах VD2 и VD3, замкнут через реактор с большой индуктивностью L1 и тиристор VS1 на диод VD1, установленный встречно в цепи питания между емкостным фильтром  $C_{\phi}$  и входом инвертора. При включении тиристора VS1 в цепи вспомогательного источника устанавливается ток  $I_{\text{в}}$ . Если на входе инвертора ток  $I_{\text{и}}$ , то через диод VD1 будет протекать разность токов  $I_{\text{г}} = I_{\text{в}} - I_{\text{и}}$ . Пока будет выполняться условие  $I_{\text{в}} > I_{\text{и}}$ , диод VD1 будет открыт, что соответствует непосредственному подключению входа инвертора к источнику питания  $U_{\text{д}}$ , то есть отсутствие индуктивности на входе инвертора.

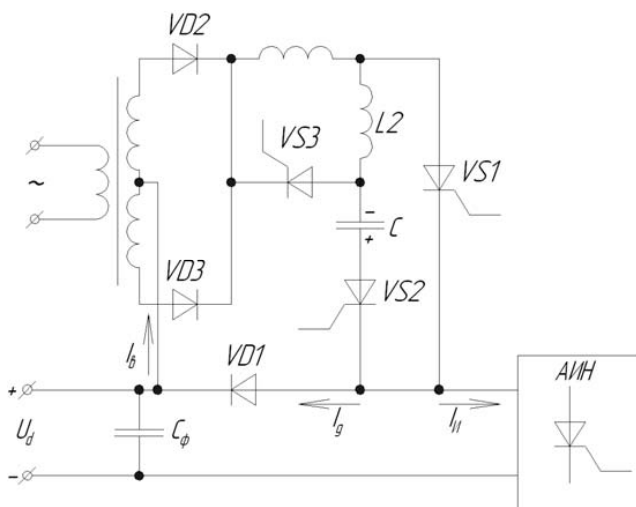


Рис. 39. Схема защиты автономного инвертора напряжения

При возрастании тока инвертора  $I_{и}$  и в аварийных режимах работы, когда  $I_{и} = I_{б}$ , диод VD1 закрывается, и дальнейшее увеличение тока инвертора  $I_{и}$  может произойти только через цепь с большой индуктивностью L1. Таким образом обеспечивается токоограничение в цепи приборов инвертора при случайном опрокидывании, перегрузке или коротком замыкании. Для отключения тока в цепи инвертора используется устройство емкостного прерывания тока, выполненное на тиристоре VS2, конденсаторе C, предварительно заряженном от вспомогательного источника с большим внутренним сопротивлением и указанной полярностью, и реакторе с индуктивностью L2. Тиристор VS3 создает контур рассеивания энергии, запасенной в L1 и L2 при отключении тока в цепи инвертора. При подаче управляющего импульса на VS2 происходит процесс коммутации тока  $I_{б}$  из цепи тиристора VS1 в цепь тиристора VS2 за счет энергии, запасенной в прерывающем конденсаторе C.

## 4.4. Датчики защиты

Датчики защиты обеспечивают сравнение контролируемого параметра (тока, напряжения и т. д.) с уставкой срабатывания датчика и выдают сигнал в последующие звенья цепи защиты при отклонении контролируемого параметра от уставки.

### 4.4.1. Датчики максимального тока

Контроль тока является одним из наиболее простых и эффективных способов своевременного обнаружения аварии в любом преобразователе. На рис. 40 приведена принципиальная схема датчика максимального тока, выполненного на стандартных трансформаторах тока, включенных в фазные провода силовой цепи преобразователя. Вторичные обмотки трансформаторов тока ТА через мостовую схему выпрямления на диодах включены на резистор R.

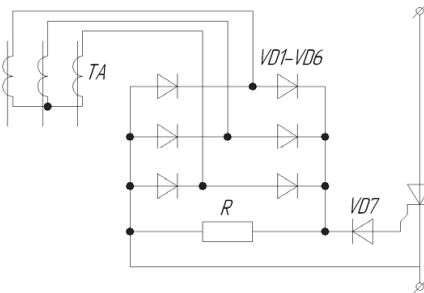


Рис. 40. Датчик максимального тока на трансформаторах тока

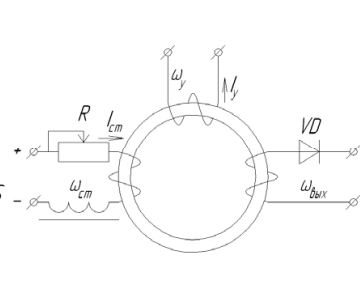


Рис. 41. Импульсный датчик максимального тока

Падение напряжения на резисторе через стабилитрон VD7 подается на базу транзистора или управляющий электрод маломощного тиристора VS. При увеличении тока в первичной цепи увеличивается напряжение на резисторе R. Когда это напряжение превысит напряжение стабилизации стабилитрона VD7, выходной тиристор или транзистор открывается, выдавая тем самым сигнал в последующие звенья защиты. Уставку срабатывания датчика можно менять выбором типа стабилитрона или изменением сопротивления резистора R. При установке датчика максимального тока на стороне постоянного тока преобразователя используются различные схемы

на транзисторах, контролирующие напряжение на шунте, установленном в цепи постоянного тока.

Более универсальным датчиком, пригодным для установки в цепях переменного и постоянного тока, является импульсный датчик максимального тока. Принципиальная схема его включения приведена на рис. 41. Датчик выполняется на сердечнике из материала с прямоугольной петлей гистерезиса. На тороидальном сердечнике имеются три обмотки: обмотка смещения  $\omega_{см}$ , обеспечивающая насыщенное состояние сердечника при номинальном режиме работы и определяющая уставку срабатывания датчика; обмотка управления  $\omega_{уп}$ , по которой протекает контролируемый ток, подключенная встречно обмотке смещения, и выходная обмотка  $\omega_{вых}$ , на которой появляется импульсный сигнал при превышении током управления значения тока уставки, т. е. в момент перемагничивания сердечника. Как правило, обмотка управления является одновитковой и представляет собой шину или кабель силовой цепи преобразователя, на которые надевается сердечник датчика. При аварийном режиме под действием избыточной МДС обмотки управления сердечник перемагничивается, и на выходной обмотке появляется импульс тока. Уставка датчика регулируется с помощью резистора R. Дроссель L в цепи обмотки смещения подавляет ЭДС, наводимую в этой обмотке при перемагничивании сердечника.

#### **4.4.2. Датчики дифференциальных защит**

Для защиты от внутренних повреждений силовой схемы преобразователя целесообразно использовать устройства дифференциальной защиты, позволяющие повысить быстродействие и увеличить чувствительность по сравнению с максимальной токовой защитой. Дифференциальная защита реагирует на разность входного и выходного токов преобразователя, что позволяет обнаружить повреждение в самом начале аварийного процесса и выдавать команду на отключение повреждения раньше, чем аварийные токи достигнут больших значений. В качестве датчика дифференциальной защиты преобразователей используется сердечник из материала с прямоугольной петлей гистерезиса, на котором расположены три обмотки. Входной и выходной токи сравниваются как по амплитуде, так и по направлению.

На рис. 42 приведена принципиальная схема дифференциальной защиты выпрямителя.

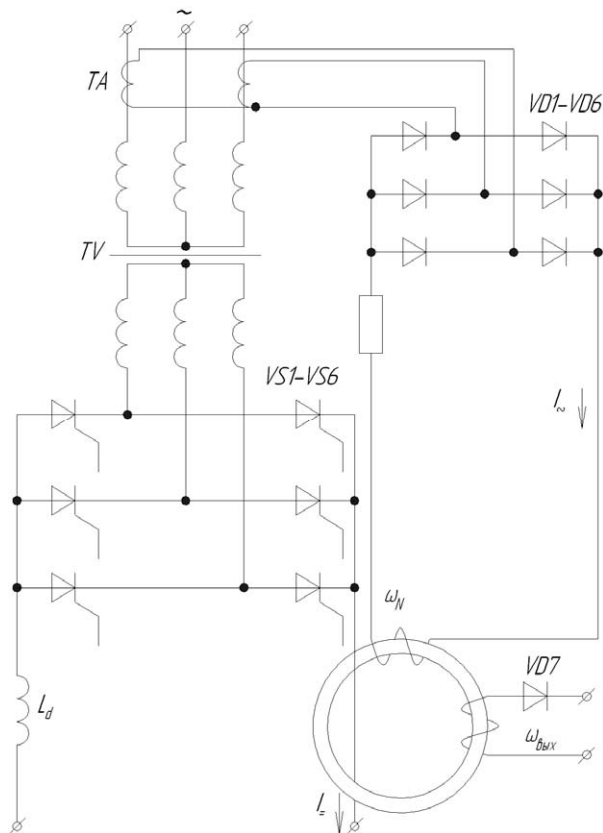


Рис. 42. Схема дифференциальной защиты выпрямителя

В качестве одной из обмоток датчика дифференциальной защиты используется шина постоянного тока, а по другой обмотке  $\omega_{\sim}$  протекает ток от трансформаторов тока  $TA$ , установленных на входе выпрямителя. Магнитное состояние сердечника определяется суммарным воздействием переменного тока  $I_{\sim}$  и постоянного тока  $I_{\underline{}}$ . При отсутствии внутренних повреждений постоянная МДС больше переменной. При внутренних повреждениях выпрямителя увеличивается входной ток  $I_{\sim}$  и уменьшается выходной ток  $I_{\underline{}}$ , что приводит



к изменению постоянной и переменной МДС и перемагничиванию сердечника. На выходной обмотке датчика  $\omega_{\text{вых}}$  появляется импульс тока. Число витков обмотки переменного тока:

$$\omega_{\sim} = \frac{I_{\sim} K_T}{I_{\sim} K_3}, \quad (4.1)$$

где  $K_T$  – коэффициент трансформации трансформатора тока;  $K_3 = 1, 1, 1-1, 5$  – коэффициент запаса.

#### 4.4.3. Датчики обратного тока

Датчики обратного тока подают сигнал на срабатывание защиты при пробое полупроводникового прибора, когда направление протекания тока в нем меняется на противоположное. Принцип их работы аналогичен датчикам, изображенным на рис. 40 и 41. Сердечники датчиков из материала с прямоугольной петлей гистерезиса могут быть надеты непосредственно на один из выводов полупроводникового прибора. При нормальном состоянии прибора магнитное состояние сердечника определяется токами прямого направления, протекающими через прибор в моменты его открытого состояния. В случае пробоя прибора обратный ток перемагничивает сердечник, и на выходной обмотке датчика появляется импульс тока, подаваемый на схему защиты. Чтобы устранить появление ложных сигналов, вызванных обратными токами, протекающими через прибор в нормальном режиме в моменты закрытия прибора, на сердечник датчика обратного тока наматывается обмотка смещения, МДС которой действует согласно с МДС намагничивания сердечника прямым током полупроводникового прибора.

Датчики обратного тока не уступают по быстродействию датчикам дифференциальной защиты, однако они не обеспечивают выдачу сигнала при внутренних повреждениях, не связанных с пробоем полупроводниковых приборов.

#### 4.4.4. Датчики защиты от опрокидывания инвертора

В большинстве случаев опрокидывание инвертора происходит не из-за внутренних повреждений, а из-за случайных явлений: перегрузок, сбоев в системе управления или коммутации и т. д. При наличии быстродействующей защиты и устройств автоматическо-

го повторного включения такие явления происходят практически незаметно для эксплуатации. Ликвидация опрокидывания тем успешнее, чем раньше датчики защиты обнаружат его и чем меньших значений достигнет аварийный ток к моменту срабатывания исполнительных элементов защиты инвертора. Поэтому в качестве основных датчиков защиты инвертора рекомендуется применять специальные датчики, реагирующие на отклонение от нормального режима, а датчики максимального тока — использовать в качестве резервных. Такое сочетание датчиков обеспечивает высокое быстродействие защиты и повышенную надежность.

Рассмотрим принципиальную схему защиты от опрокидывания инвертора, контролирующую продолжительность открытого состояния тиристоров инвертора (рис. 43).

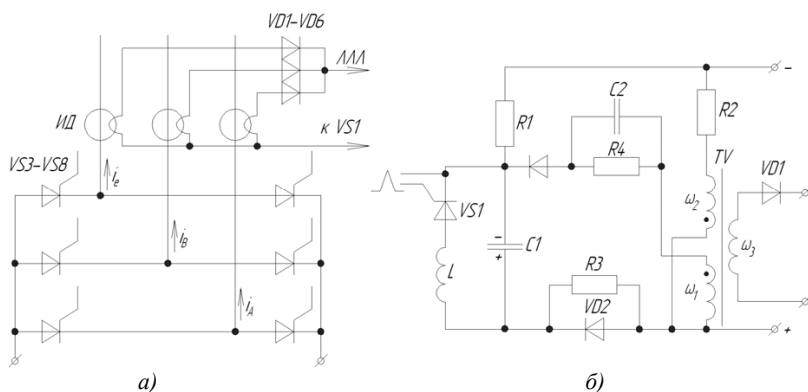


Рис. 43. Схема защиты, контролирующая продолжительность открытого состояния тиристоров инвертора

В качестве импульсных датчиков ИД используются тороидальные сердечники из материала с прямоугольной петлей гистерезиса, установленные в фазных проводах инвертора  $VS3-VS8$  (рис. 43, а). Под действием фазных токов датчики перемагничиваются при изменении полярности тока, и на выходных обмотках появляются импульсы положительной и отрицательной полярности. Импульсы одной полярности через диоды  $VD3-VD5$  поступают в цепь управления тиристора  $VS1$  (рис. 43, б). С приходом очередного импульса

тиристор VS1 открывается, и конденсатор C1 разряжается через индуктивность L. Разряд носит колебательный характер, что приводит к перезаряду C1 и спаду тока через тиристор VS1 до нуля. Тиристор VS1 закрывается, а конденсатор C1 через резистор R1 вновь заряжается напряжением прямой полярности. С приходом следующего импульса управления на тиристор VS1 процесс повторяется. Если очередной импульс управления не поступит на тиристор VS1, что бывает при опрокидывании инвертора и отсутствии коммутации, то конденсатор C1 продолжает заряжаться. Когда напряжение на нем достигнет уровня срабатывания динистора VS2, последний открывается. По обмотке  $\omega_1$  импульсного трансформатора TV начинает протекать ток, обусловленный зарядом конденсатора C2, что приводит к перемагничиванию сердечника трансформатора и появлению на его выходной обмотке  $\omega_3$  импульса тока, приводящего к срабатыванию защиты и отключению инвертора от источника питания. Постоянная времени заряда конденсатора C1 через резистор R1 выбирается такой, чтобы за время между двумя соседними сигналами от первичных датчиков ИД напряжение на конденсаторе C1 не успело достичь уровня срабатывания динистора VS2.

Известно, что при опрокидывании инвертора напряжение на мосту инвертора становится равным нулю. Это позволяет применить датчики защиты от опрокидывания инвертора, контролирующие уровень напряжения. Однако следует помнить, что при пуске автономного инвертора, а также при работе инвертора с большими углами опережения напряжение на мосту может кратковременно снижаться до нуля в моменты коммутации. Во всех этих режимах необходимо обеспечивать блокировку датчиков, предотвращая ложное срабатывание защиты.

Рассмотрим принципиальную схему датчика понижения напряжения на мосту инвертора (рис. 44). Датчик защиты подключается на вход инвертора через делитель, состоящий из резистора R1 и стабилитронов VD1 и VD2. При нормальной работе инвертора конденсаторы C1 и C2 заряжены до напряжения стабилизации стабилитрона VD1. Импульсный трансформатор TV намагничен током заряда конденсатора C1. Тиристор VS1 закрыт, так как закрыт транзистор

VT, включенный через резистор RU в цепь управления тиристором VS1. Закрытое состояние транзистора VT определяется положительным смещением, подаваемым на его базу от делителя на резисторах R2 и R3. При опрокидывании инвертора напряжение на входе датчика уменьшается, и на базу транзистора VT поступает отрицательное напряжение от предварительно заряженного конденсатора C2.

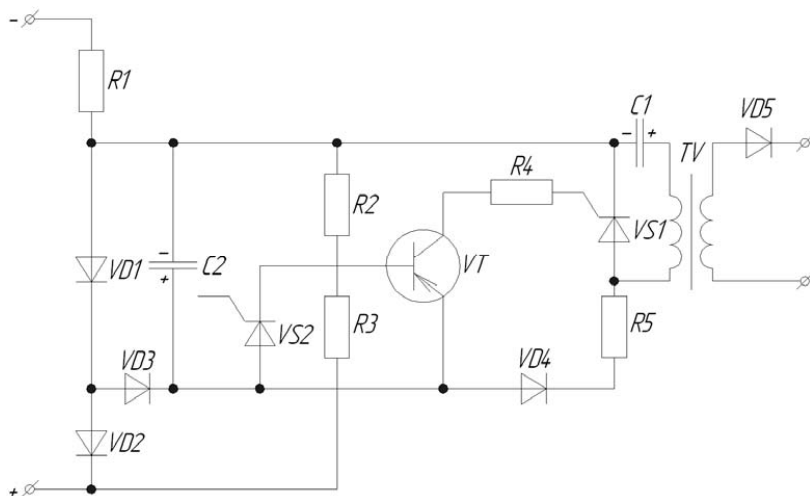


Рис. 44. Датчик понижения напряжения на мосту инвертора

Транзистор открывается, что приводит к открытию тиристора VS1 и разряду конденсатора C1 через тиристор VS1 и первичную обмотку импульсного трансформатора TV. На вторичной обмотке появляется сигнал о срабатывании датчика. Этот сигнал поступает в исполнительные устройства защиты, отключающие инвертор, и в устройства автоматического повторного включения. Резистор R5 ограничивает ток в цепи заряда конденсатора C1, диоды VD3 и VD4 предотвращают разряд конденсаторов C1 и C2 по обходным путям, образуемым в момент срабатывания датчика. Тиристор VS2 предназначен для предотвращения ложного пуска автоматического повторного включения инвертора при ручном или дистанционном отключении инвертора. На него подается управляющий сигнал од-

новременно с командой на отключение инвертора. Включение VS2 обеспечивает запирающие транзистора VT за счет соединения его эмиттера с базой и разряд конденсатора C2 после снижения напряжения на входе датчика. Конденсатор C1 остается заряженным, и сигнал на выходе датчика отсутствует, так как не подается сигнал управления на тиристор VS1.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите отказы полупроводниковых приборов, приводящие к аварийным режимам работы.
2. Перечислите основные требования к системам защиты полупроводниковых преобразователей.
3. Плавкие предохранители. Назначение и основные требования по их выбору для защиты полупроводниковых преобразователей.
4. Автоматические выключатели. Назначение и основные требования по их выбору для защиты полупроводниковых преобразователей.
5. Короткозамыкатели. Назначение, особенности применения.
6. Тиристорный выключатель постоянного тока. Схема, принцип действия.
7. Импульсный дуговой коммутатор. Схема включения, принцип действия.
8. Бесконтактная защита неуправляемых выпрямителей. Схема на шести тиристорах, принцип действия.
9. Бесконтактная защита управляемых выпрямителей. Схема на трех тиристорах, принцип действия.
10. Защита тиристорного выпрямителя с использованием ИДК. Схема, принцип действия.
11. Защита автономного инвертора тока с помощью емкостного прерывающего устройства. Схема, принцип действия.
12. Защита автономного инвертора напряжения установкой тиристорного ключа на его входе. Схема, принцип действия.
13. Защита автономного инвертора напряжения включением встречного полупроводникового прибора на входе. Схема, принцип действия.

14. Датчик максимального тока на трансформаторах тока. Схема, принцип действия.
15. Датчик максимального тока на ферромагнитном сердечнике. Схема, принцип действия.
16. Датчик дифференциальной защиты. Схема, принцип действия.
17. Датчик обратного тока. Схема, принцип действия.
18. Датчик защиты от опрокидывания инвертора. Схема, принцип действия.

## Библиографический список

1. Браун, М. Источники питания. Расчет и конструирование / М. Браун. — Киев : МК-Пресс, 2007. — 288 с.
2. Глух, Е.М. Защита полупроводниковых преобразователей / Е.М. Глух, В.Е. Зеленев. — М. : Энергоиздат, 1982. — 182 с.
3. Григорьян, С.Г. Конструирование электронных устройств систем автоматизации и вычислительной техники / С.Г. Григорьян. — Ростов н/Д : Феникс, 2007. — 303 с.
4. Конструирование силовых полупроводниковых преобразовательных агрегатов / С.Р. Резинский [и др.]. — М. : Энергия, 1973. — 288 с.
5. Медведев, А.М. Технология производства печатных плат / А.М. Медведев. — М. : Техносфера, 2005. — 360 с.
6. Медведев, В.А. Конструирование полупроводниковых преобразователей : учеб. пособие / В.А. Медведев. — Тольятти : ТГУ, 2005. — 90 с.
7. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О.К. Березин [и др.] ; под ред. В.А. Шахнова. — М. : КноРус, 2010. — 532 с.
8. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. — М. : ИД МЭИ, 2009. — 632 с.
9. Ромаш, Э.М. Электронные устройства информационных систем и автоматики : учеб. для студ. вузов / Э.М. Ромаш, Н.А. Феоктистов, В.В. Ефремов. — М. : Дашков и К°, 2011. — 247 с.
10. Славик, И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей / И. Славик. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 222 с.
11. Фрумкин, Г.Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры / Г.Д. Фрумкин. — М. : Высш. шк., 1989. — 463 с.