

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**"ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**  
Электротехнический институт

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ЭЛТИ

\_\_\_\_\_ А.П.Суржиков

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008г.

**ТИРИСТОРНОЕ КОММУТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО**

Методические указания и пример выполнения курсового проекта  
по дисциплине "Бесконтактные электрические аппараты"  
для студентов специальности 140602  
"Электрические и электронные аппараты"

Томск 2008

Тиристорное коммутирующее устройство:

Метод. указ. и пример выполнения курсового проекта по дисциплине "Бесконтактные электрические аппараты" для студентов специальности 140602 - "Электрические и электронные аппараты" - Томск: Изд. ТПУ, 2008. - 36 с.

Составитель: доц., канд. техн. наук Е.П. Богданов

Рецензент: доц., канд. техн. наук С.Г.Обухов

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры "Электрические машины и аппараты" ТПУ 14 февраля 2008 г.

Зав. кафедрой ЭМА  
доц., канд. техн. наук

О.Л.Рапопорт

## ***1. Задача курсового проектирования.***

В настоящих методических указаниях даются рекомендации и пояснения, помогающие студентам ориентироваться в расчете и конструировании тиристорных пускателей по литературе, государственным стандартам и требованиям по оформлению конструкторской и технической документации.

Задачей курсового проекта является обучение студентов основным методам проектирования бесконтактных коммутирующих устройств на примере тиристорного пускателя. Проект позволяет глубже усвоить особенности тиристорных ключей переменного тока, приобрести навыки расчета и конструирования силовых полупроводниковых устройств, исследования их рабочих режимов. В процессе работы над курсовым проектом студенты учатся самостоятельно квалифицированно решать задачи в области бесконтактных электрических аппаратов, закрепляют полученные теоретические знания.

## ***2. Тематика курсового проекта.***

Темой курсового проекта являются тиристорные пускатели различных моделей. Пускатели выпускаются в следующих модификациях: реверсивные и нереверсивные. Предназначаются для дистанционного включения, отключения и реверса трехфазных двигателей переменного тока. Нереверсивные пускатели могут использоваться для включения и отключения других видов трехфазных нагрузок. Пускатели предназначены для использования в условиях умеренного климата, на подвижных объектах и в стационарных условиях в шахтах, рудниках, на транспорте, в нефтяной, газовой, химической, металлургической промышленности и других отраслях при условии обеспечения защиты в соответствующих условиях эксплуатации.

В техническом задании на проектирование приводятся следующие данные:

- напряжение сети (действующее значение)  $U$  (В);
- частота питающей сети  $f$  (Гц);
- номинальный фазный ток (действующее значение)  $I$  (А);
- номинальное значение коэффициента мощности  $\cos \varphi$ ;
- пусковой ток, действующий в течение 0,4 с  $I_p$  (А);
- режим работы пускателя (продолжительный или повторно-кратковременный).

В различных вариантах курсового проекта могут быть заданы дополнительные условия, например, частота и форма кривой тока, закон изменения пускового тока, максимальная температура окружающей среды и другие.

### 3. Введение.

В последнее время находят широкое применение бесконтактные аппараты на силовых полупроводниковых приборах, которые выполняют функции пускателей. В частности, к ним относятся тиристорные пускатели. Это объясняется, тем что существенно возросли требования к надёжности, быстродействию и долговечности электрических аппаратов. Таким требованиям в значительной степени отвечают бесконтактные электрические аппараты.

Бесконтактные электрические аппараты - устройства, предназначенные для коммутации электрических цепей без физического разрыва самой цепи.

По сравнению с контактными, бесконтактные электрические аппараты обладают следующими преимуществами:

- отсутствие подвижной системы, следовательно, детали не изнашиваются механически;
- отсутствие электрической дуги при коммутациях делают аппарат незаменимым при работе во взрывоопасных и пожароопасных средах;
- высокая электрическая износостойкость ( $15 \times 10^6$  циклов);
- совмещённая защита от токов перегрузки и короткого замыкания, а также при потере фазы, что обеспечивает увеличение срока службы;
- допустимое число включений достигает 2000 в час;
- длительность отключения не превышает 0,02 с;
- высокая надёжность и долговечность, а также отсутствие необходимости в уходе при эксплуатации.

Бесконтактные аппараты находят преимущественное применение при небольших токах и напряжениях, для плавного управления и регулирования тока и как быстродействующий аппарат.

Недостатками являются сложность схемы и высокая стоимость.

Принцип действия бесконтактных аппаратов основан на использовании элементов, обладающих нелинейной вольтамперной характеристикой. Основными из них в электроаппаратостроении являются те, которые обладают нелинейной индуктивностью (ферромагнитные сердечники с обмотками), активным и нелинейным сопротивлением (полупроводниковые приборы). Нелинейные элементы включаются в рабочую цепь между источником питания и нагрузкой и могут изменять своё сопротивление электрическому току от сравнительно малого до большого. Это изменение сопротивления осуществляется обычно с помощью специальной цепи управления, причём небольшой затратой мощности в цепи управления управляют большой мощностью в нагрузке.

Согласно ГОСТ 15133-77 переключательные полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми состояниями, имеющими три или более р-п переходов, объединяются под общим названием *тиристоры*.

Тиристоры работают как ключи в импульсных режимах с токами, значительно превышающими допустимые постоянные токи в открытом состоянии. Предназначены для применения в схемах преобразователей электрической энергии, импульсных модуляторах, бесконтактной регулирующей аппаратуре, избирательных

и импульсных усилителях, генераторах гармонических колебаний, инверторах и других схемах, выполняющих коммутационные функции.

В зависимости от вида вольт-амперной характеристики (ВАХ) и способа управления они подразделяются на подклассы:

- **диодные тиристоры (динисторы)** имеют два вывода: анод и катод (у них отсутствует управляющий электрод) и переходят в проводящее состояние, когда приложенное прямое напряжение достигает определенного значения (напряжения переключения);

- **симметричные диодные тиристоры (диаки)** имеют приблизительно одинаковые характеристики на положительной и отрицательной ветвях вольт-амперной характеристики;

- **триодные тиристоры (тринисторы)** имеют три вывода: анод, катод и управляющий электрод; не проводят в обратном направлении, включаются с помощью тока управления в цепи управляющего электрода, выключаются путем уменьшения или прерывания протекающего через них тока. После включения тиристора ток управления можно сделать равным нулю. Благодаря внутренней положительной обратной связи прибор останется в режиме насыщения. В этом состоит принципиальное различие между приборами с р-п-р-п структурами и транзисторами; у последних открытое состояние сохраняется лишь при наличии тока питания в цепи базы. Действие управляющего электрода проявляется лишь в момент включения тиристора, а закрыть его или изменить ток через открытый прибор, изменяя ток управления, невозможно. Только специальные, так называемые запираемые тиристоры открываются положительным, закрываются отрицательным сигналами на управляющем электроде.

- **симметричные триодные тиристоры (триаки или симисторы)** имеют приблизительно одинаковые переключательные характеристики на положительной и отрицательной ветвях вольт-амперной характеристики и проводят ток в обоих направлениях, т.е. могут быть переключены из закрытого состояния в открытое и наоборот при любой полярности напряжения на основных электродах (переключение при подаче сигнала управления на управляющий электрод, а выключение — путем изменения полярности напряжения на основных электродах). Таким образом, симистор может управляться током как положительного, так и отрицательного направлений, т.е. имеет четыре режима включения. Однако целесообразно использовать симистор в трех режимах (1-при включении положительным сигналом управления при прямой полярности напряжения на основных электродах; 2-отрицательным сигналом управления при прямой полярности напряжения; 3-отрицательным сигналом управления при обратной полярности напряжения), т.к. в четвертом режиме при управлении положительным сигналом при обратной полярности напряжения требуется ток, значительно больший, чем в указанных трёх режимах..

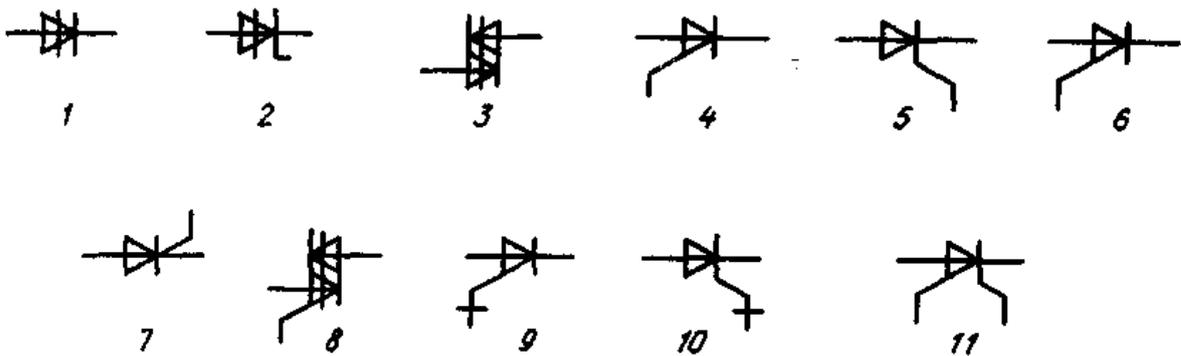


Рис. 1. Условные обозначения тиристоров.

1 - диодный, запираемый в обратном направлении; 2 - диодный, проводящий в обратном направлении; 3 - диодный симметричный; 4, 5 - триодные запираемые в обратном направлении с управлением по аноду и катоду; 6, 7 - триодные, проводящие в обратном направлении с управлением по аноду и катоду; 8 - триодные симметричные; 9, 10 - триодные, проводящие в обратном направлении выключаемые; 11 - тетродные, запираемые в обратном направлении.

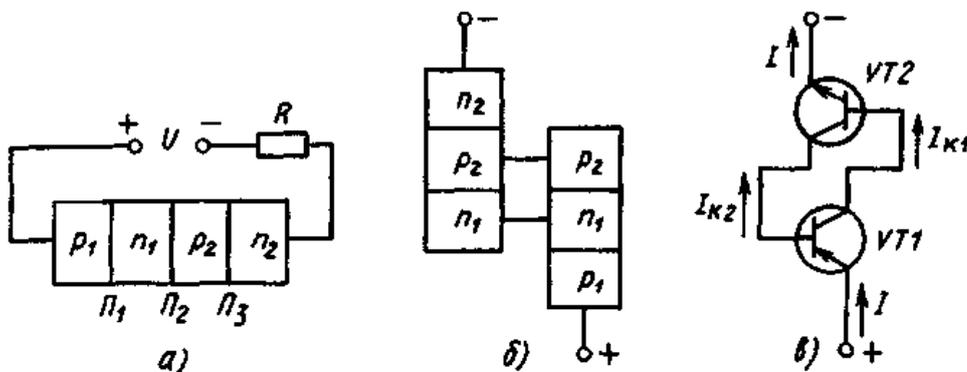


Рис. 2. Структура тиристора (а); структура и схема двухтранзисторного эквивалента тиристора (б), (в).

Простейшие диодные тиристоры, запираемые в обратном направлении, обычно изготавливаются из кремния и содержат четыре чередующихся  $p$  и  $n$ -области (рис. 2. а).

Область  $p1$ , в которую попадает ток из внешней цепи, называют анодом, область  $n2$  - катодом; области  $n1, p2$  - базами.

Если к аноду  $p1$  подключить плюс источника напряжения, а к катоду  $n2$  - минус, то переходы П1 и П3 окажутся открытыми, а переход П2 - закрытым. Его называют коллекторным переходом.

Так как коллекторный  $p$ - $n$  - переход смещен в обратном направлении, то до определенного значения почти все приложенное напряжение падает на нем. Такая структура легко может быть представлена в виде двух транзисторов разной электропроводности, соединенных между собой, как показано на рис. 2 б,

в. Ток цепи определяется током коллекторного перехода П2. Он однозначно зависит от потока дырок  $a_1$  из эмиттера транзистора  $p-n-p$  - типа и потока электронов  $a_2$  из эмиттера транзистора  $n-p-n$  - типа, а также от обратного тока  $p-n$  - перехода.

Так как переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, из них в области баз инжектируются носители заряда: дырки - из области  $p1$ , электроны - из области  $n2$ . Эти носители заряда, диффундируя в областях баз  $n1,2$  приближаются к коллекторному переходу и его полем перебрасываются через  $p-n$  - переход. Дырки, инжектированные из  $p1$  области, и электроны из  $n2$  движутся через переход П2 в противоположных направлениях, создавая общий ток  $I$ .

При малых значениях внешнего напряжения все оно практически падает на коллекторном переходе П2. Поэтому к переходам П1, П3, имеющим малое сопротивление, приложена малая разность потенциалов и инжекция носителей заряда невелика. В этом случае ток  $I$  мал и равен обратному току через переход П2, т. е.  $I_k^0$ . При увеличении внешнего напряжения ток в цепи сначала меняется незначительно. При дальнейшем возрастании напряжения, по мере увеличения ширины перехода П2, все большую роль начинают играть носители заряда, образовавшиеся вследствие ударной ионизации. При определенном напряжении носители заряда ускоряются настолько, что при столкновении с атомами в области  $p-n$  - перехода ионизируют их, вызывая лавинное размножение носителей заряда.

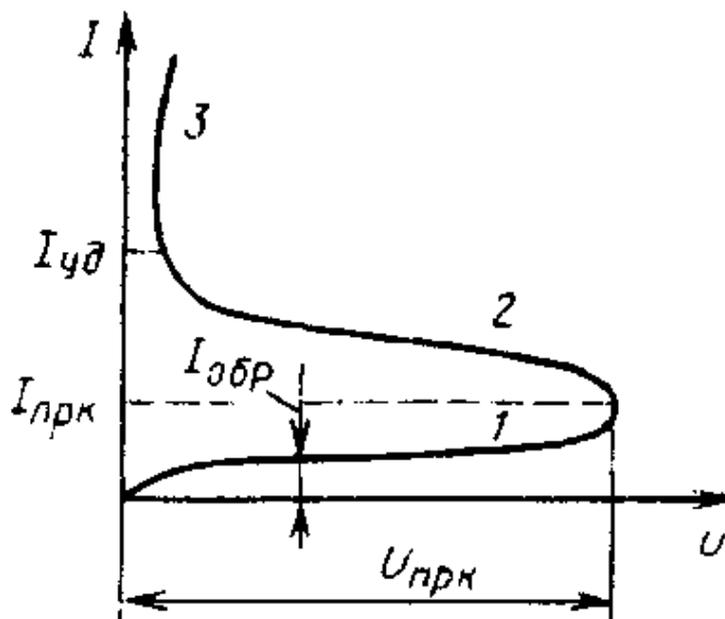


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика динистора (тиристора).

Образовавшиеся при этом дырки под влиянием электрического поля переходят в область  $p2$ , а электроны - в область  $n1$ . Ток через переход П2 увеличивается, а его сопротивление и падение напряжения на нем уменьшаются. Это приводит к повышению напряжения, приложенного к переходам П1, П3 и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока и увеличение токов инжекции. Процесс протекает лавинообразно и сопротивление перехода П2 становится малым.

Носители заряда, появившиеся в областях вследствие инжекции и лавинного размножения, приводят к уменьшению сопротивления всех областей тиристора, и падение напряжения на приборе становится незначительным. На вольт-амперной характеристике этому процессу соответствует участок 2 с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 3). После переключения вольт-амперная характеристика аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении (участок 3). Участок 1 соответствует закрытому состоянию тиристора.

С использованием тиристорov возможно осуществление следующих операций:

- 1) включение и отключение электрической цепи с активной и смешанной (индуктивной и емкостной) нагрузкой;
- 2) изменение тока нагрузки за счет регулирования момента подачи сигнала управления.

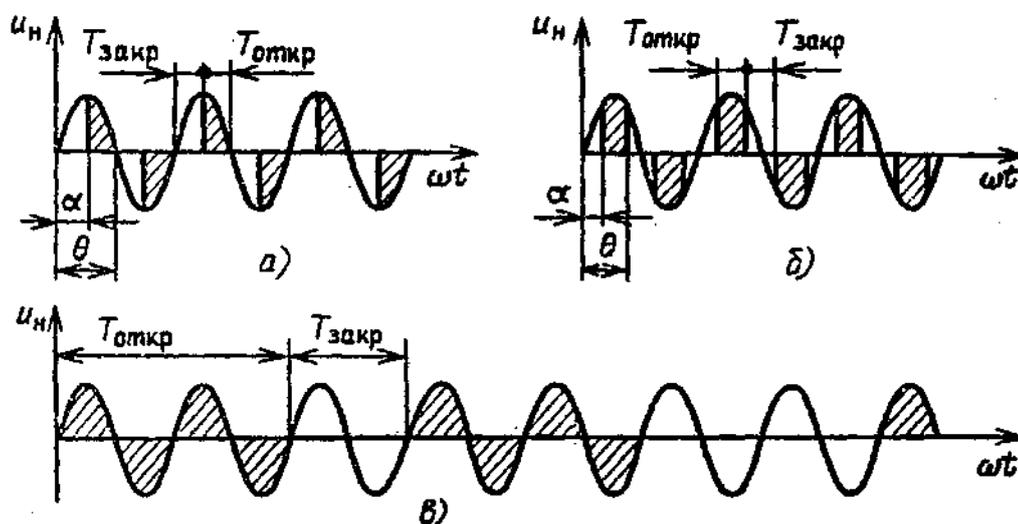


Рис.4. Напряжение на нагрузке при фазовом (а), фазовом с принудительной коммутацией (б) и широтно-импульсным (в) управлением.

Наиболее широкое применение в бесконтактных электрических аппаратах получили фазовое и широтно-импульсное управление (рис. 4).

В первом случае среднее и действующее значения тока меняются за счет изменения момента подачи на тиристор открывающего сигнала - за счет угла  $\alpha$ .

Угол  $\alpha$  называется углом управления. Действующее напряжение на нагрузке при двухполупериодной схеме и встречно-параллельном включении двух тиристоров – на рис. 5.

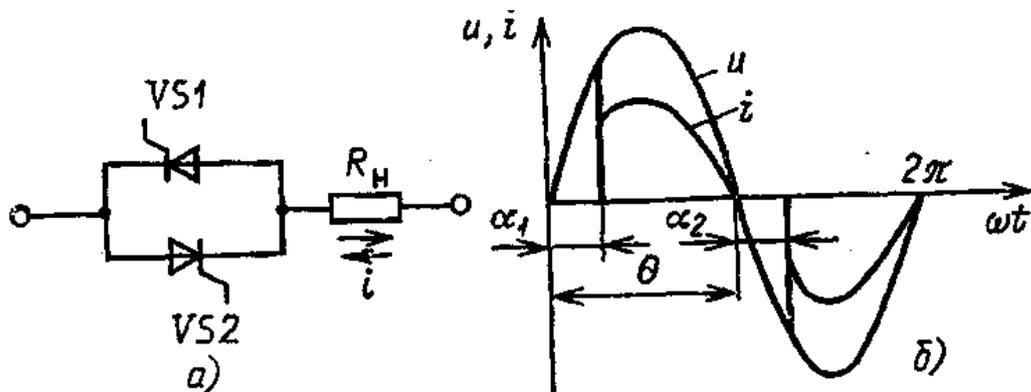


Рис. 5. Встречно-параллельное включение тиристоров (а) и форма тока при активной нагрузке (б).

Кривая тока в сети и в нагрузке несинусоидальна, что вызывает искажение формы напряжения сети и нарушения в работе потребителей, чувствительных к высокочастотным помехам. Для уменьшения искажений необходимы специальные меры.

При широтно-импульсном управлении (рис. 4, а) в течение времени  $T_{\text{откр}}$  на тиристоры подан открывающий сигнал, они открыты и к нагрузке приложено напряжение  $U_n$ . В течение времени  $T_{\text{закр}}$  управляющий сигнал снят и тиристоры закрыты.

Регулирование тока нагрузки возможно за счет изменения как угла  $\alpha$ , так и угла  $\beta$ . Принудительная коммутация ( $0 < \beta < 180^\circ$ ) осуществляется с помощью специальных узлов или специальных тиристоров, которые могут запираются подачей сигнала управления. При больших токах из-за сложности такие схемы не применяются. Создание транзисторов на большие токи (сотни ампер) и большие напряжения (сотни вольт) позволяет упростить принудительную коммутацию цепей постоянного и переменного тока, что особенно важно в аппаратах повышенного быстродействия.

**На основе тиристоров работают следующие бесконтактные электрические аппараты:**

- 1) тиристорные пускатели для прямого пуска асинхронных двигателей;
- 2) тиристорные пускатели для плавного пуска, реверса и останова асинхронных двигателей большой мощности (до 5000 кВт);
- 3) регуляторы мощности и напряжения;
- 4) автоматические выключатели переменного тока высокого и низкого напряжения повышенного быстродействия;
- 5) регулирующие аппараты для управления двигателями электрического транспорта переменного тока с рекуперацией энергии при торможении.

Для тиристорных аппаратов, как правило, необходима защита от токов перегрузки и КЗ, а также от недопустимого повышения температуры корпусов тиристоров. Защита от КЗ может осуществляться с помощью быстродействующих токоограничивающих предохранителей или автоматических выключателей и т.д.

### **Основные параметры тиристоров и их ориентировочные значения:**

1. Напряжение переключения (десятки - сотни В).
2. Напряжение в открытом состоянии - падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии (1-3 В).
3. Обратное напряжение - напряжение, при котором тиристор может работать длительное время без нарушения его работоспособности (единицы - тысячи В).
4. Постоянное прямое напряжение в закрытом состоянии - максимальное значение прямого напряжения, при котором не происходит включения тиристора (единицы - сотни В);
5. Неотпирающее напряжение на управляющем электроде - наибольшее напряжение, не вызывающее отпирания тиристора (доли В).
6. Запирающее напряжение на управляющем электроде - напряжение, обеспечивающее требуемое значение запирающего тока управляющего электрода (единицы - десятки В).
7. Ток в открытом состоянии - максимальное значение тока открытого тиристора (сотни мА - сотни А).
8. Ток удержания (десятки - сотни мА).
9. Обратный ток (доли мА).
10. Отпирающий ток управления - наименьший ток управляющего электрода, необходимый для включения тиристора (десятки мА).
11. Скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии - максимальная скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии (десятки - сотни В/мкс).
12. Время включения - время с момента подачи отпирающего импульса до момента, когда напряжение на тиристоре уменьшится до 0,1 своего начального значения (мкс - десятки мкс).
13. Время выключения - минимальное время, в течение которого к тиристорному должно прикладываться запирающее напряжение (десятки - сотни мкс).

### ***4. Выбор и описание принципиальной схемы пускателя.***

Основным элементом тиристорных коммутирующих устройств на переменном токе является ячейка, состоящая из двух тиристоров, включенных встречно-параллельно (рис.6) .

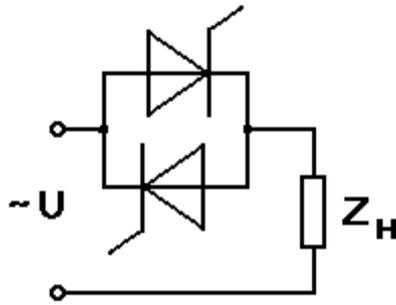


Рис.6. Основная схема тиристорного коммутатора.

Данная схема является наиболее распространенной, и тиристоры в ней выбираются как по обратному напряжению, так и по напряжению переключения.

Типичным примером построения бесконтактного коммутирующего аппарата является реверсивный *тиристорный пускатель серии ПТ* (рис.7).

Напряжение трехфазной питающей сети подается на выводы А, В, С. Нагрузка – асинхронный двигатель подключается к выводам А<sub>1</sub>, В<sub>1</sub>, С<sub>1</sub>. Включение пускателя осуществляется выдачей управляющих сигналов на реле КА1 или КА2 (при нажатии кнопок «В» или «Н» контакты реле замыкают цепи управления тиристорами и они включаются, если потенциал анодов вентиля положителен относительно катодов. При переходе тока через нуль тиристор выключается. Импульсы управления поступают синхронно с напряжением сети с длительностью, зависящей от характера нагрузки. Реверс двигателя осуществляется изменением порядка чередования фаз А и В путем изменения с помощью реле КА1 и КА2 цепей формирования управляющих импульсов тиристоров ячеек I, III или II, IV. Пускатели имеют максимально-токовую защиту и тепловую защиту от перегрузок. Термодатчик тепловой защиты устанавливается на охладителе тиристора. Тепловая защита настраивается на температуру корпуса тиристора 105<sup>0</sup>С. Перегрузка фиксируется устройством защиты, которое выдает сигнал на запираение транзисторного ключа в цепи питания реле управления. В результате обмотки реле обесточиваются, контакты в цепи управления тиристорами размыкаются и пускатель отключает нагрузку от сети.

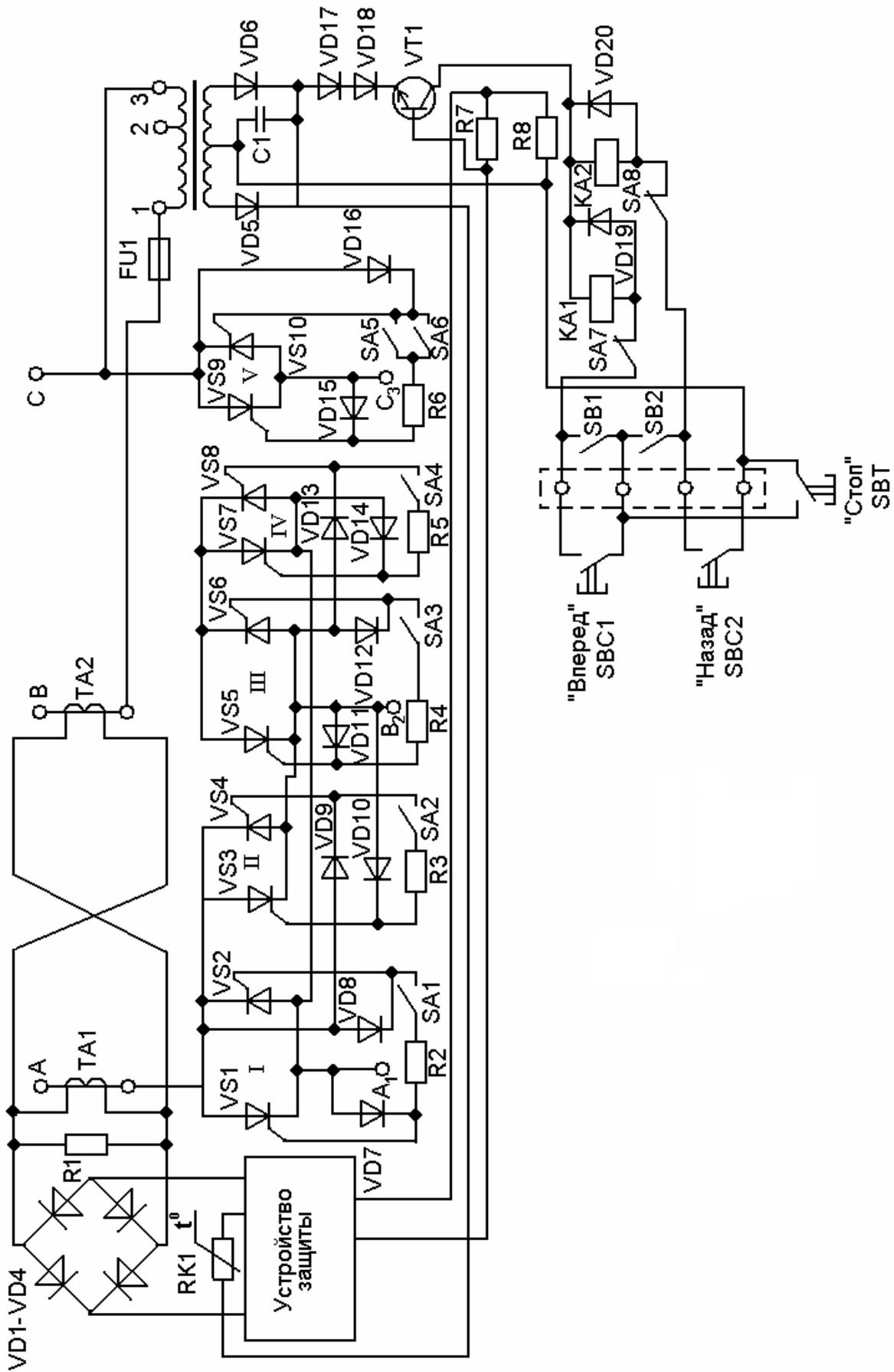


Рис. 7. Тиристорный пускатель серии ПТ.

*Тиристорный пускатель серии ПТУ* (рис. 8) предназначен для включения и отключения трехфазных асинхронных двигателей (или иной нагрузки) и для защиты их от коротких замыканий, перегрузок, понижения напряжения и отключения фазы. Тиристоры управляются от трехфазного трансформатора TV2. Показана цепь управления одного тиристора (остальные аналогичны). За счет выпрямления напряжения двух фаз сигнал управления каждого тиристора перекрывает анодное напряжение на  $5/6 T$ . Трансформатор TV1 питает трансформатор TV2 и выпрямители 1,3,5 (все выпрямители в схеме трехфазные и показаны условно).

Пускатель включается при нажатии на кнопку «П» напряжения выпрямителя 1 включает тиристор VS7, трансформатор TV2 получает питание и на управляющие электроды силовых тиристоров подаются сигналы управления. При нажатии на кнопку «С» выключаются тиристор VS7. Синхронный ключ S1 выполнен на транзисторе VT2 и включен последовательно с кнопкой «П», обеспечивая включения пускателя в начале периода напряжения питания. Этим достигается плавный пуск двигателя.

При действии защиты отрывается какой-либо из бесконтактных ключей транзисторы VT3, VT4, VT7 и через транзистор VT1 на импульсном трансформаторе TV4 (ждущий мультивибратор) формируется импульс включения вспомогательного тиристора VS8. С включением VS8 конденсатор C8 разряжается на VS7, запирает его (напряжение выпрямителя 3 примерно вдвое больше напряжения выпрямителя 2), и пускатель выключается.

Лампы сигнализируют: HL1 – о готовности пускателя к работе (есть напряжение питания); HL2 – о включении пускателя (есть напряжение на TV2); HL3 – о срабатывании защиты.

Существует *схема управления асинхронным двигателем* (рис.9) с помощью бесконтактного аппарата, имеющего тиристоры VS1..VS3, полупроводниковые диоды VD1..VD9, магнитный усилитель и другие элементы.

В каждую фазу двигателя включена ячейка, состоящая из параллельно и встречно включенных тиристоров VS1..VS3 и неуправляемых диодов VD1..VD3. Когда ток в цепи управляющих электродов тиристоров равен нулю, все три тиристора и неуправляемые диоды окажутся запертыми в течении всего периода частоты источника питания. Ток и напряжение в статорной обмотке двигателя, обусловленных токами утечки запертых диодов, близки к нулю. В этом случае силовая цепь отключена, двигатель не работает. Если на управляющие электроды тиристоров подать входные сигналы и открыть тиристоры, то ячейки из параллельно включенных элементов будут иметь малое сопротивление в прямом направлении. Напряжение на двигателе становится равным напряжению сети.

Особенность рассматриваемой схемы состоит в том, что обратное напряжение на тиристоре равно прямому напряжению на неуправляемом диоде.

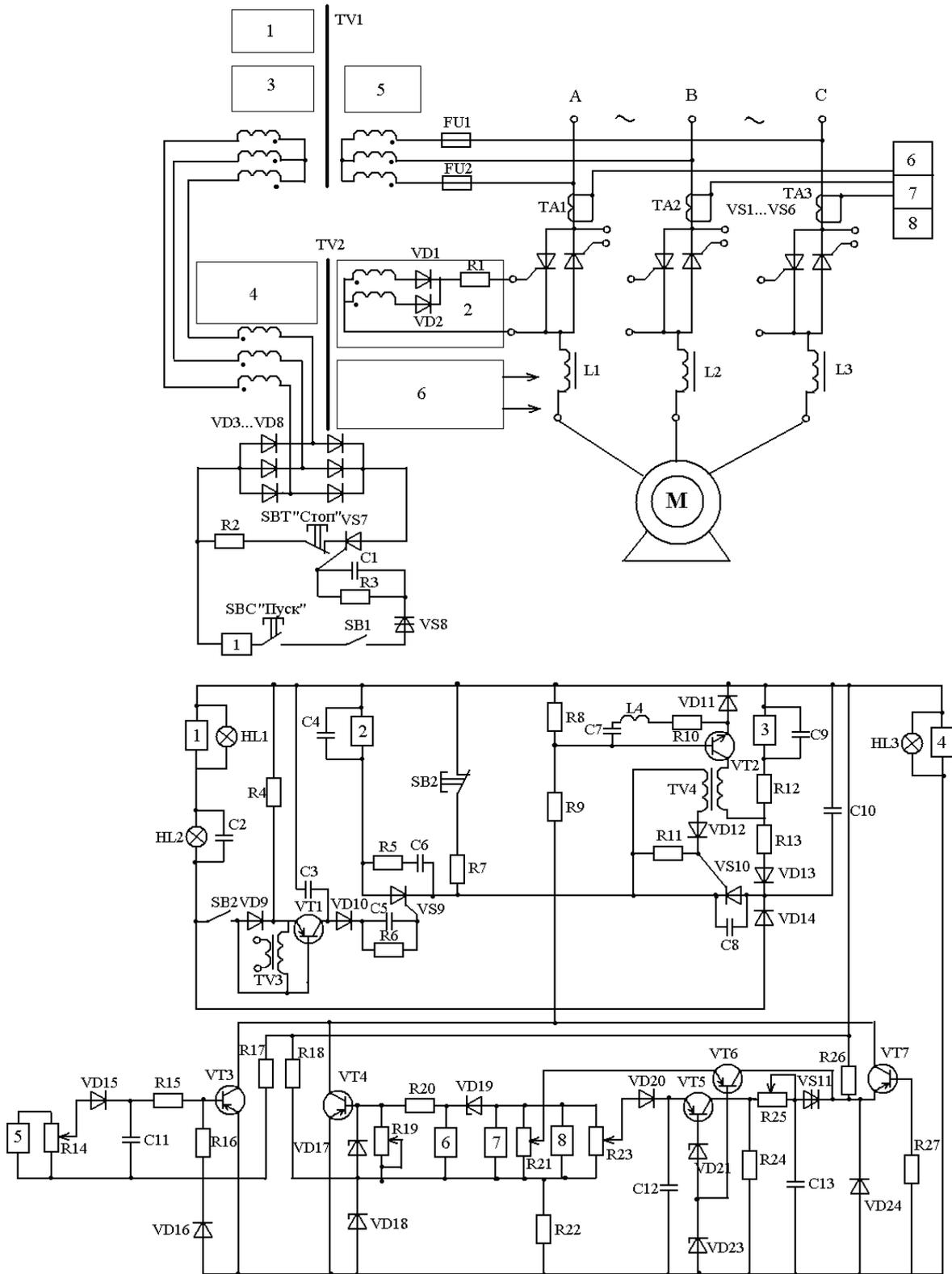


Рис.8. Тиристорный пускатель серии ПТУ.

Тиристоры оказываются защищенными от воздействия обратного напряжения, что существенно повышает надежность схемы.

Управление осуществляется от трех фазного магнитного усилителя с самоподмагничиванием. Это возможно при относительно высоком коэффициенте мощности ( $\cos\varphi = 0.8$ ).

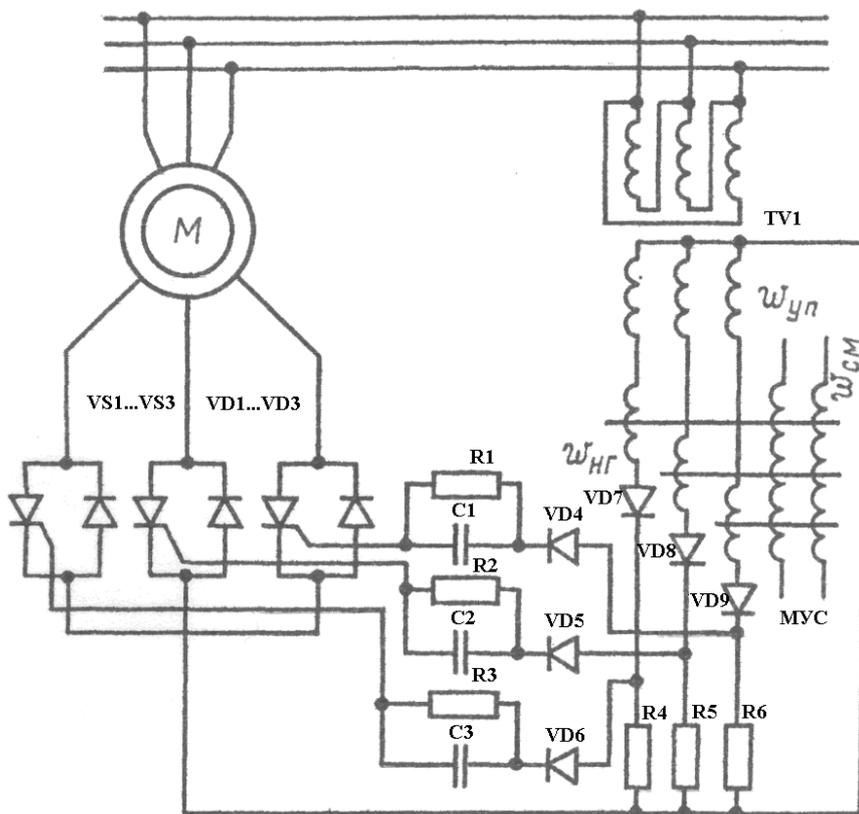


Рис. 9. Схема управления асинхронным двигателем.

Разделительный трансформатор TV1 обеспечивает необходимую гальваническую развязку управляемой и управляющей цепи. Если токи управления и смещения магнитного усилителя таковы, что при них создается минимальный ток в цепи нагрузки, то падение напряжения резисторов R1..R3 ниже порогового напряжения диодов VD7..VD9 и они практически не проводят тока. Токи в цепях управляющих электродов тиристоров равны нулю, тиристоры закрыты, двигатель отключен. Но если увеличить ток управления МУС и значительно повысить падение напряжения на сопротивлениях R1..R3, то в цепи управляющих электродов также появятся токи, которые вызовут отпирание тиристоров, а также пуск двигателя. Запирание тиристоров и остановки двигателя можно достичь при обратном направлении и определенном значении тока управления магнитного усилителя, когда токи в цепи управляющих электродов станут равными нулю. В этих условиях тиристоры запираются при первом прохождении тока в силовых цепях через нулевое значение.

## 5. Электрический расчет и выбор элементов схемы.

Для пускателей, работающих на промышленной сети, обычно используются низкочастотные тиристоры. Параметры тиристоров выбираются по максимальному амплитудному значению напряжения на закрытом тиристоре.

Действующее значение тока нагрузки.

$$I_{н.д.} = \frac{P}{3 \cdot U \cdot \cos \varphi_0} = \frac{30 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 08} = 56.82 A$$

Амплитудное значение тока

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{н.д.} = \sqrt{2} \cdot 56.82 = 80.36 A.$$

Среднее значение тока через тиристор.

$$I_{cp} = \frac{I_m}{K_a} = \frac{80.36}{3.14} = 25.59 A$$

где  $K_a$  - коэффициент амплитуды.

Амплитудное значение напряжения.

$$U_m = \sqrt{6} \cdot U_{д.ф.} = \sqrt{6} \cdot 220 = 538.89 A$$

Действующее значение тока тиристора

$$I_\delta = K_\phi \cdot I_{cp} = 1.57 \cdot 25.59 = 40.18 A$$

где  $K_\phi$  - коэффициент формы

Предельные значения тока и напряжения.

$$I_{пр} > I_{cp}; \quad U_{пр} = 1.5 U_m$$

По этим параметрам выбирается тиристор Т-160 [4, с.190], с параметрами:

$I_{п.к.} = 160 A$  - предельный ток тиристора,

$U_n = 100-1400 B$  - повторяющееся напряжение,

$U_0 = 1.18 B$  - пороговое напряжение,

$I_y = 300 mA$  - отпирающий ток управления,

$U_y = 7 B$  - отпирающее напряжение управления,

$[\Theta_{р.п.}] = 125^\circ C$  - максимально допустимая температура структуры,

$R_T = 1.48 ^\circ C/BT$  - общее установившееся тепловое сопротивление,

$R_{д.} = 107 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$  - дополнительное сопротивление,

$R_B = 0.21 ^\circ C/BT$  - внутреннее установившееся тепловое сопротивление тиристора.

## 6. Поверочный тепловой расчет.

Температура структуры

$$\Delta P = U_0 \cdot I_{cp} + (K_\phi \cdot I_{cp})^2 \cdot R_\theta = 1.18 \cdot 25.59 + (1.57)^2 \cdot (25.59)^2 \cdot 107 \cdot 10^{-5} = 31.92 \text{ Вт.}$$

$$\Theta_{p.n.} = \Theta_k + \Delta P \cdot R_B = 40 + 31.92 \cdot 0.21 = 46.7^\circ\text{C.}$$

$\Theta_{p.n.} < [\Theta_{p.n.}]$  - условие выполняется.

Так как наиболее тяжелым является режимом перегрузки, то производится проверка при

$I_{cp}' = 1.3 \cdot I_{cp}$ , так как перегрузка составляет 30 %.

$$I_{cp}' = 1.3 \cdot 25.59 = 33.27 \text{ А.}$$

$$\Delta P' = U_0 \cdot I_{cp}' + (K_\phi \cdot I_{cp}')^2 \cdot R_\theta = 1.18 \cdot 33.27 + (1.57)^2 \cdot (33.27)^2 \cdot 107 \cdot 10^{-5} = 42.18 \text{ Вт.}$$

$$\Theta_{p.n.} = \Theta_k + \Delta P' \cdot R_B = 40 + 42.18 \cdot 0.21 = 48.86^\circ\text{C.}$$

Условие  $\Theta_{p.n.} < [\Theta_{p.n.}']$  выполняется.

Таким образом, для режима перегрузки и нормальной работы пускателя в выбранной схеме можно использовать тиристор Т -160.

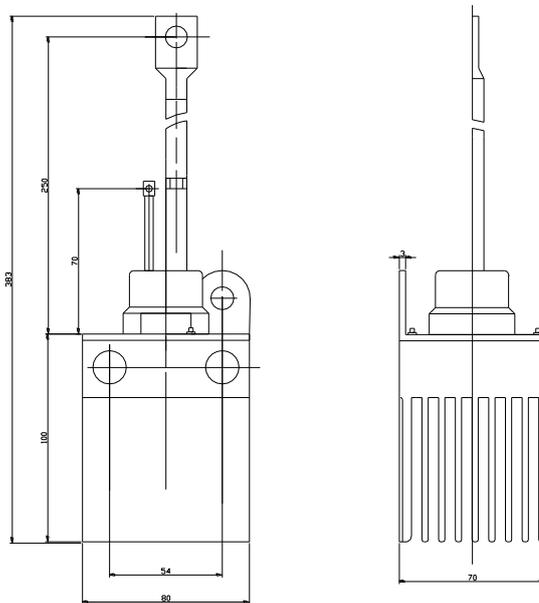


Рис. 10. Эскиз тиристора с охладителем.

## 7. Расчет повторно – кратковременного режима.

Для повторно – кратковременного режима характерной чертой является то, что пускатель работает в большой степени с пусковыми токами. Для асинхронного двигателя пусковые токи  $I_n = (5 \div 8) I_n$ . Рассматривается самый неблагоприятный случай (см. задание), то есть  $I_n = 6.5 I_n$ , время пуска  $t_n = 0.4 \text{ с}$ , число включений в час  $N = 145 \text{ вкл/час}$ .

$$\text{Время цикла} \quad T = \frac{3600t_n}{N} = \frac{3600 \cdot 0.4}{145} = 9.93 \text{ с}$$

$$\text{Время одного включения} \quad \tau = \frac{T}{2} = 4.97 \text{ с.}, \text{ т.к. время включения и}$$

отключения одинаковы.

$$\text{Пусковой ток } I_n = 6.5 \cdot I_n = 6.5 \cdot 25.59 = 166.34 \text{ А.}$$

Основные потери:

$$\Delta P_{\text{осн}} = U_0 \cdot I_n + (K_\phi \cdot I_n)^2 \cdot R_\phi = 1.18 \cdot 166.34 + (1.57)^2 \cdot (166.34)^2 \cdot 107 \cdot 10^{-5} = 248.93 \text{ Вт}$$

$$\text{Время установившегося режима } t_{\text{уст}} = \tau - t_n = 4.97 - 0.4 = 4.57 \text{ с.}$$

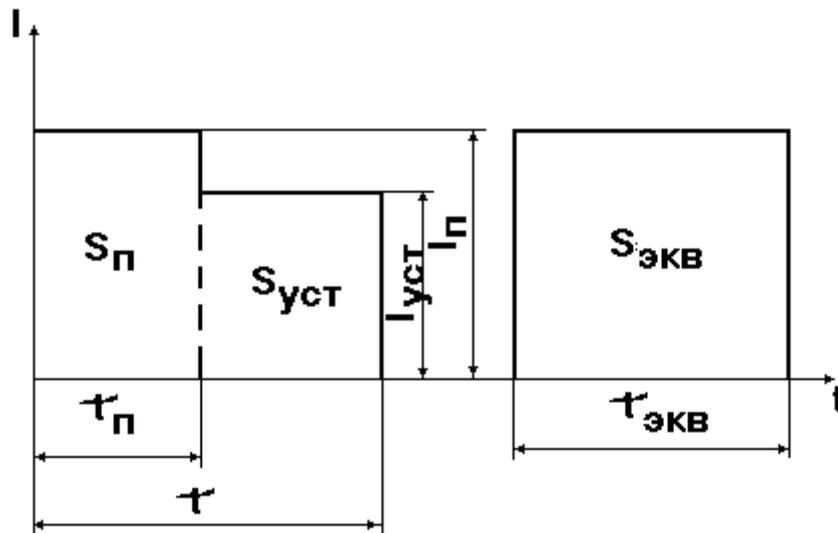


Рис.11.

Получается сложная фигура, показывающая работу двигателя (рис. 11). Для удобства расчета она сводится к четырехугольнику. Амплитуда остается той же, и расчет сводится к нахождению  $\tau_{\text{экв}}$ .

$$S_{\text{экв}} = S_{\text{пуска}} + S_{\text{уст}} = 0.4 \cdot 166.34 + 4.57 \cdot 25.59 = 183.49 \text{ ед}^2.$$

$$\tau_{\text{экв}} = \frac{S_{\text{экв}}}{I_n} = \frac{183.49}{166.34} = 1.1 \text{ с}$$

Температура структуры в конце серии импульсов.

$$\Theta_{\text{р.н.}} = \Theta_c + \left[ \frac{\tau_{\text{экв}} \cdot R_m}{T} + \left( 1 - \frac{\tau_{\text{экв}}}{T} \right) \cdot \tau_{\tau+m} - \tau_m + \tau_r \right] \cdot \Delta P$$

Тепловые сопротивления выбираются по графикам [15, с. 119]

$$\tau_{\tau+m} = 0.26^\circ\text{C/Вт}; \quad \tau_r = 0.25^\circ\text{C/Вт}; \quad \tau_m = 0.16^\circ\text{C/Вт}.$$

$$\Theta_{\text{р.н.}} = 40 + \left[ \frac{1.1 \cdot 1.48}{9.93} + \left( 1 - \frac{1.1}{9.93} \right) \cdot 0.26 - 0.25 + 0.16 \right] \cdot 248.93 = 114.68^\circ\text{C}.$$

$\Theta_{р.п.} < [\Theta_{р.п.}]$  - условие выполняется. Это означает, что тиристор Т160 выбран правильно.

### 8. Выбор элементов схемы управления.

Диоды в цепи управления выбираются по известным значениям тока и напряжения, действующих в цепи управления.

Выбирается диод Д229Ж [12, с.95] с параметрами:

$U_{обр} = 100$  В - обратное напряжение,

$I_{обр} = 50 \cdot 10^{-6}$  А - обратный ток,

$I_{пр. max} = 0,5$  А - максимально допустимый прямой постоянный ток,

$U_{пр.} = 0,65$  В - прямое напряжение,

$I_{пр. и max} = 7,5$  А - максимально допустимый прямой импульсный ток

$I_{пр. ср.} = 0,8 I_{пр. max} = 0,8 \cdot 0,5 = 0,4$  А - средний прямой ток

Сопротивление диода:

$$R_{\delta} = \frac{U_{пр}}{I_{пр. ср.}} = \frac{0,65}{0,4} = 1,625 \text{ Ом}$$

Во время включения тиристора, в первый момент времени (первый полупериод) возможно включение тиристора на гребне полуволны, вследствие чего ток управления резко увеличивается, что чревато дополнительными перегрузками тиристора. Обычно такие перегрузки не превышают 5-ти кратного значения тока управления:

$$I_{y.и.} = 5 \cdot 0,2 = 1 \text{ А};$$

$$R_y = \frac{U_y}{I_y} = \frac{7}{0,2} = 35 \text{ Ом}$$

Базовое сопротивление

$$R_{\delta} = \frac{U_{max}}{I_{y.и.}} - R_{\delta} - R_y,$$

$$\text{где } U_{max} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,126 \text{ В}$$

$$R_{\delta} = \frac{311,126}{1} - 107 \cdot 10^{-5} - 35 = 276,125 \text{ Ом.}$$

Из ряда сопротивлений [7, с.200] выбирается  $R_{\delta} = 280$  Ом.

Проверяется условие:  $\alpha < \varphi$

$\alpha$  - угол управления тиристором.

$$\cos \varphi = 0,8 \Rightarrow \varphi = \arccos 0,8 = 36,78^{\circ}$$

$$\sin \alpha = \frac{I_y \cdot R_{\Sigma}}{E_{\text{вфч}}} = \frac{0,2 \cdot 311,13}{220 \cdot \sqrt{2}} = 0,202^{\circ}$$

$$R_{\Sigma} = R_{\delta} + R_d + R_y = 276,125 + 107 \cdot 10^{-5} + 35 = 311,5 \text{ Ом.}$$

$$\alpha = \arcsin 0,202 = 11,53^{\circ} = 0,2 \text{ рад.}$$

Условие  $\alpha < \varphi$  выполняется

$$t_y = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{0,2}{314} = 6,37 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Средний установившийся ток на сопротивлении

$$I_{\text{ср.у.}} = 2 \frac{I_y \cdot t_y}{T} = 2 \frac{0,2 \cdot 6,37 \cdot 10^{-4}}{0,02} = 0,0127 \text{ А}$$

где  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с}$

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении

$$P_{\text{рб}} = 2 \cdot (I_{\text{ср.у.}})^2 \cdot R_{\text{б}} = 2 \cdot (0,0127)^2 \cdot 276,125 = 0,089 \text{ Вт}$$

По мощности рассеивания выбирается резистор серии С2-23 [14, с.63].

В результате выбирается диод Д229Ж и резистор серии С2-23, удовлетворяющие предъявленным требованиям.

### 9. Выбор реле и трансформатора.

По количеству контактных групп (5) и току через них выбирается реле РСЧ52 [15, с.171]. Параметры: 6 переключающих контактов, рабочее напряжение реле  $U_p = 27 \text{ В}$ , сопротивление обмотки реле  $R_p = 220 \text{ Ом}$ , ток срабатывания  $I_{\text{ср.}} = 0,87 \text{ мА}$ , ток отпущения  $I_{\text{от}} = 15 \text{ мА}$ , ток удержания  $I_{\text{удер.}} = 60 \text{ мА}$ .

Обозначение реле по ГОСТу – РСЧ. 4.523.201

Мощность, рассеиваемая на обмотке реле

$$P_p = \frac{U_p^2}{R_p} = \frac{27^2}{220} = 3,3 \text{ Вт}$$

Ток реле

$$I_p = \frac{U_p}{R_p} = \frac{27}{220} = 0,12 \text{ А}$$

По мощности реле и току срабатывания ( $I_{\text{ср.}} = 0,87 \text{ мА}$ ) выбирается универсальный трансформатор ТОЛ [9, с.311] (рис.12) на броневом сердечнике ШЛ 12×12, с параметрами:

$a = 9 \text{ мм}$                        $H = 31,5 \text{ мм}$

$c = 9 \text{ мм}$                        $c' = 36 \text{ мм}$

$h = 22,5 \text{ мм}$                  $B = 12 \text{ мм}$ .

Допустимый ток вторичных обмоток  $I = 0,1 \text{ А}$ , что обеспечивает работу реле.

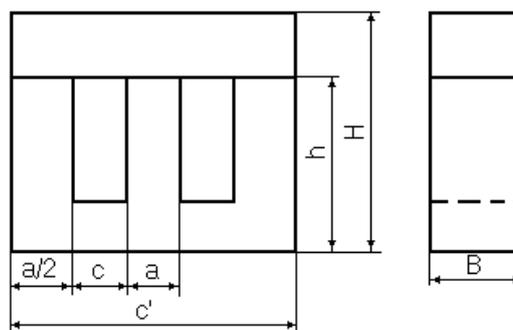


Рис.12. Конструкция трансформатора.

Так как выходные параметры трансформатора ( $U$  и  $I$ ) выбираются, как и у реле, то по ним подбирается диод и конденсатор.

Выбирается диод Д-7В [6, с.36] с параметрами:

$$U_{обр.маx} = 50В, I_{выпр.маx} = 0,3А, U_{пад} = 0,5В, I_{обр.} = 1мА.$$

Емкость должна быть выбрана таким образом, чтобы во время перехода выпрямленного тока с максимума одной полуволны на максимум другой падение напряжения на реле должно быть меньшим, чем допускается для постепенного удержания реле (чтобы не было вибрации контактов). Для этого должно выполняться условие: если за  $5\tau$  напряжение упадет до нуля, то за  $0,01с$  оно не должно упасть больше, чем на  $\Delta U = 2В$ , то есть

$$\frac{0,5\tau}{0,01} = \frac{27}{2} \Rightarrow \tau = 0,027с.$$

$$\text{Тогда } C = \frac{\tau}{R_{обм}} = \frac{0,027}{220} = 122,72\mu\text{кФ}$$

Из ряда емкостей выбирается емкость  $C = 130\mu\text{кФ}$ .

По [10, с.245] выбирается емкость марки К50-6.

### 10. Расчет транзисторного ключа.

Транзистор включен по схеме с общим эмиттером (рис.13). Для обеспечения режима отсечки при однополупериодном входном сигнале, поступающим с устройства защиты, в эмиттерную цепь транзистора включены диоды.

По известным параметрам обмотки управления реле выбирается транзистор. Определяется ток и напряжение базы трансформатора, при которых он работает в ключевом режиме.

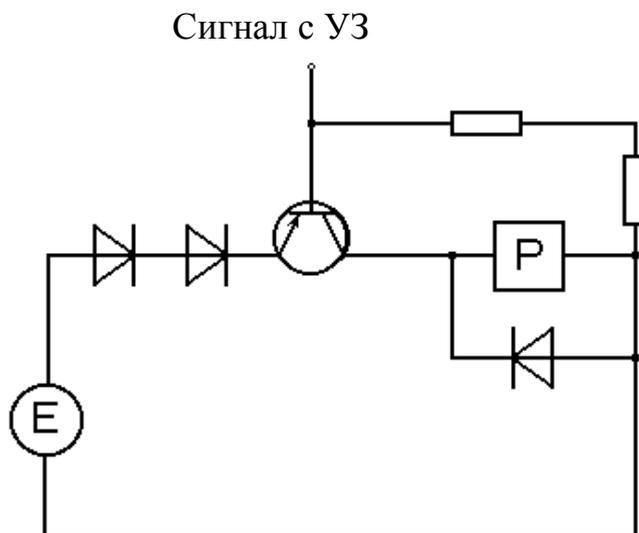


Рис. 13. Эквивалентная схема включения транзисторного ключа в цепи замещения.

По току обмотки и напряжению реле  $I_p=120мА$ ,  $U_p=27В$  выбирается транзистор КТ208У [11, с.142] со следующими параметрами:

$$\beta = 40...120; U_{к-э\max} = 45В; U_{к-б.\max} = 45В; I_k = 300мА; U_{к-э.\нас.} = 0,4В; [P] = 0,2Вт.$$

Выбираются диоды цепи защиты по тем же параметрам, что и транзистор:

Д-7А [ 12, с.36 ] с параметрами:

$$U_{\text{обр.мах.}} = 50\text{В}; I_{\text{выпр.мах.}} = 0,3\text{А}; U_{\text{пад.}} = 0,5\text{В}; I_{\text{обр.}} = 1\text{мА}.$$

Ток базы, необходимый для насыщения транзистора

$$i_{\sigma} = \frac{K_n \cdot (E - U_{\text{к-э.н}} - U_{\text{д}})}{\beta \cdot R_p} = \frac{1,5 \cdot (27 - 0,4 - 0,5)}{100 \cdot 220} = 1,8\text{мА}$$

где  $K_n = 1,2 \div 2$  – коэффициент насыщения;

$\beta$  – коэффициент усиления транзистора;

$R_p$  – активное сопротивление обмотки реле

$$R_p = 220\text{Ом}$$

$U_{\text{б0}} = (0,1 \div 0,3)\text{В}$  – напряжение базы транзистора, необходимое для отсечки транзистора

$$U_{\text{б}} = U_{\text{д}} - U_{\text{б0}} = 0,5 - 0,2 = 0,3\text{В} \text{ – входной сигнал отсечки транзистора.}$$

Проверка теплового режима производится по максимально допустимой мощности потерь, которая имеет место в режиме насыщения транзистора.

$$P = I_{\text{ки}} \cdot U_{\text{к-э}} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 0,12 \cdot 0,4 \cdot \left(1 + \frac{1}{100}\right) = 0,048\text{Вт},$$

следовательно условие  $[P] > P$  – выполняется.

Сопротивление цепи защиты:

$$2R_3 = \frac{E}{I_{\sigma}} = \frac{27}{1,8 \cdot 10^{-3}} = 15\text{кОм}$$

$$R_3 = 7,5\text{кОм}$$

Мощность, рассеиваемая на каждом из резисторов:

$$P_R = i_{\sigma}^2 \cdot R_3 \cdot (1,8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 7,5 \cdot 10^3 = 0,024\text{Вт},$$

Исходя из рассчитанной мощности выбирается резистор С2-23 номинальной мощностью  $P_n = 0,062\text{Вт}$ .

### **11. Расчет надежности схемы.**

Надежность – способность изделий выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации. На надежность влияют: степень загрузки элементов схемы, окружающая среда, технологические факторы и другие.

Надежность характеризуется средним временем безотказной работы  $T = 1/\lambda_{\Sigma}$ , которая в свою очередь зависит от интенсивности отказов  $\lambda$  (таблица 1).

Для пускателя опасность отказов определяется по формуле  $\lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ .

Вероятность отказов элементов схемы.

Наименование элементов	Количество	Вероятность отказов $\lambda$ , 1/час
тиристоры	10	$5,13 \times 10^{-6}$
диоды	16	$(0,03-0,4) \times 10^{-5}$
резисторы	7	$(0,003-0,013) \times 10^{-3}$
реле	2	$(1-2,7) \times 10^{-5}$
транзисторы	1	$(0,7-4) \times 10^{-5}$
конденсаторы	1	$(0,0014-0,018) \times 10^{-3}$
трансформаторы	1	$(0,4-0,6) \times 10^{-5}$

Минимальная опасность отказов схемы:

$$\lambda_{\min} = (5,13 \cdot 10 + 0,2 \cdot 16 + 3 \cdot 7 + 10 \cdot 2 + 7 \cdot 1 + 1,4 \cdot 1 + 4 \cdot 1) \cdot 10^{-6} = 1,095 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{час}}$$

Максимальное время безотказной работы:

$$T_{\text{оmax}} = \frac{1}{\lambda_{\min}} = \frac{1}{1,095 \cdot 10^{-4}} = 9132 \text{ часа.}$$

Максимальная опасность отказов схемы:

$$\lambda_{\max} = (5,13 \cdot 10 + 4 \cdot 16 + 13 \cdot 7 + 27 \cdot 2 + 40 \cdot 1 + 18 \cdot 1 + 6 \cdot 1) \cdot 10^{-6} = 3,243 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{час}}$$

Минимальное время безотказной работы:

$$T_{\text{оmin}} = \frac{1}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{3,243 \cdot 10^{-4}} = 3083,6 \text{ часа.}$$

Среднее время безотказной работы:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \frac{3083,6 + 9132}{2} = 6107,8 \text{ часа.}$$

Рассчитанное время безотказной работы больше минимального допустимого (5000 часов), следовательно, схема достаточно надежна.

## 12. Конструкторская часть.

### Расчет функционального узла печатной платы.

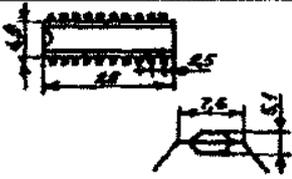
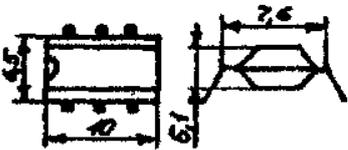
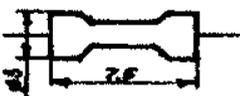
Определяются габариты элементной базы. В качестве примера приведена схема (рис.9).

Для решения задачи размещения элементов на печатной плате необходимо знать:

- габаритные (установочные) размеры;
- массу;
- потребляемую мощность;
- рабочее напряжение.

Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Название	Тип	Рисунок с размерами	Масса, гр	Место установки		
				ПП	ЛП	ЗП
Микросхема	КР572П1А1А		1.2	+		
Компаратор	К512СА1		0.6	+		
Операционный усилитель	К140УД10		0.6	+		
Резистор	С2-23-0,125		0.1	+		
Диод	КС168А		0.3	+		
Конденсатор	К50-35-25В		1.8	+		

Примечание: ПП- плата печатная, ЛП – лицевая панель, ЗП – задняя панель.

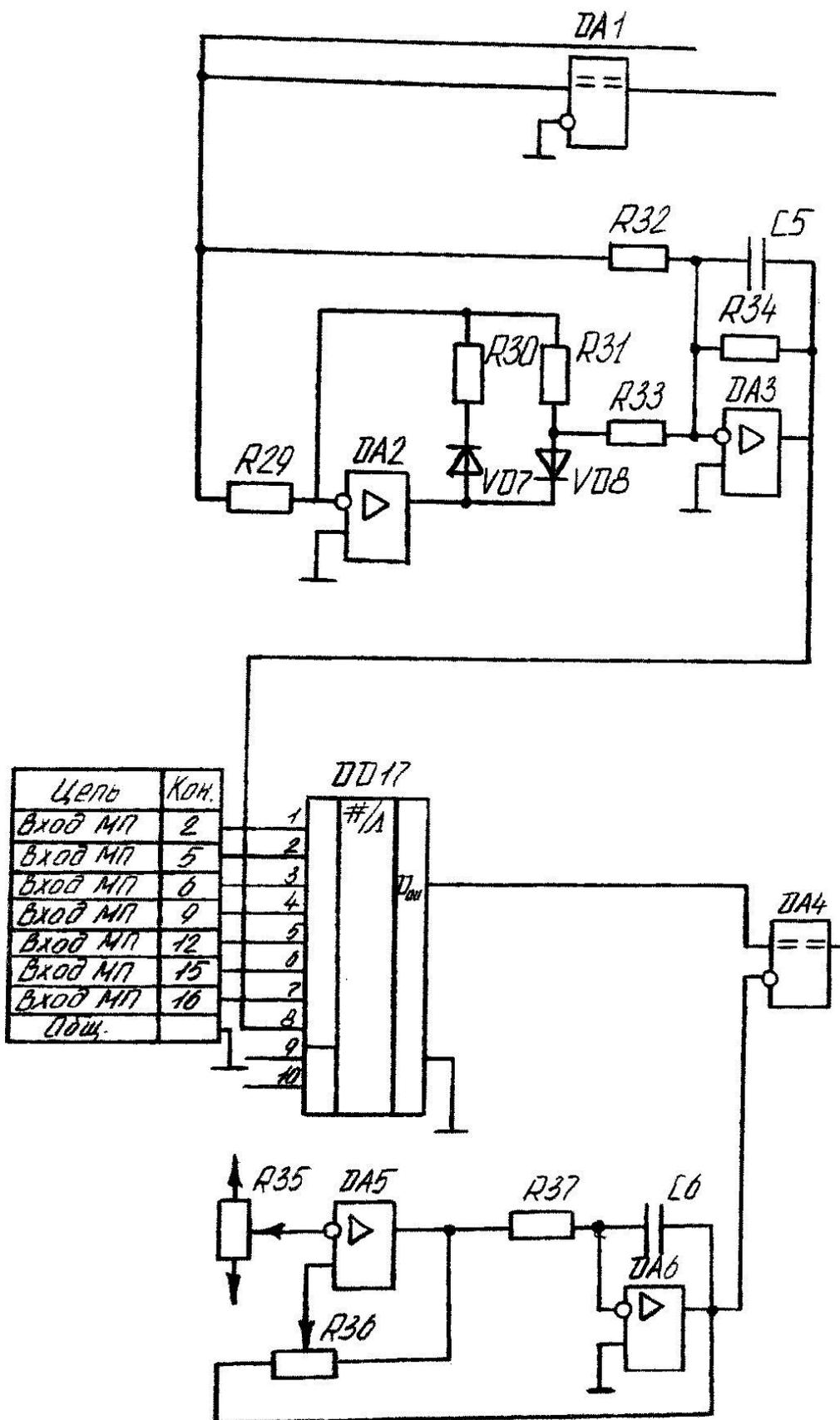


Рис.14.

### Расчет размеров печатной платы.

Чтобы рассчитать размеры печатной платы, нужно составить таблицу, в которой указываются следующие параметры: вариант установки; количество элементов; зазор между элементом и платой; габаритные размеры.

Результаты выбора элементов сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

Обозначение	Тип элемента	Вариант установки	Установочные размеры, мм					
			N(i)	Z <sub>0</sub>	XU	YU	ZU	SE, мм <sup>2</sup>
DD7	KP572ПА1А	8а	1	1	6,5	25	5,1	162,5
DA1, DA4	K512CA1	8а	2	1	6,5	10	5,1	130
DA2, DA3, DA5, DA6	K140УД10	8а	4	1	6,5	10	5,1	260
VD7, VD8	KC168А	1а	2	1	3	7,5	3	45
C5, C6	K50-35-25В	1а	2	1	6.3	6.3	1.6	79,38
R29...R33	C2-23-0,125	1а	5	1	1,6	4,6	1,6	36,8
R34...R37	C2-23-0,125	1а	4	1	4,6	1,6	1,6	29,44
Итого:			Z <sub>0max</sub> =	1		ZU <sub>0max</sub> =	16	743.12
h =	1,5	мм						
CZ =	0,3	-						
CF =	1,0	-						
X1 =	5	мм						
X2 =	5	мм						
Y1 =	5	мм						
Y2 =	5	мм						
SF =	2477,07	мм <sup>2</sup>						
XF =	50	мм						
YF =	50	мм						
XP =	60	мм						
YP =	60	мм						
ZP =	18,5	мм <sup>2</sup>						

Предпочтительная форма печатной платы - прямоугольная (рис.15). Она определяется размерами XP, YP, h и коэффициентом формы CF= XP : YP; XP > YP (от 1 до 3). X1, X2, Y1, Y2 - краевые поля, необходимые для удобства изготовления и закрепления платы. XF·YF = SF - размеры и площадь функциональной области, где размещаются элементы электрической схемы и соединительные проводники. Площадь, занимаемая элементами на плате, равна:

$$SE = \sum_{i=1}^n SU_i = 743,12 \text{ мм}^2 \quad (1)$$

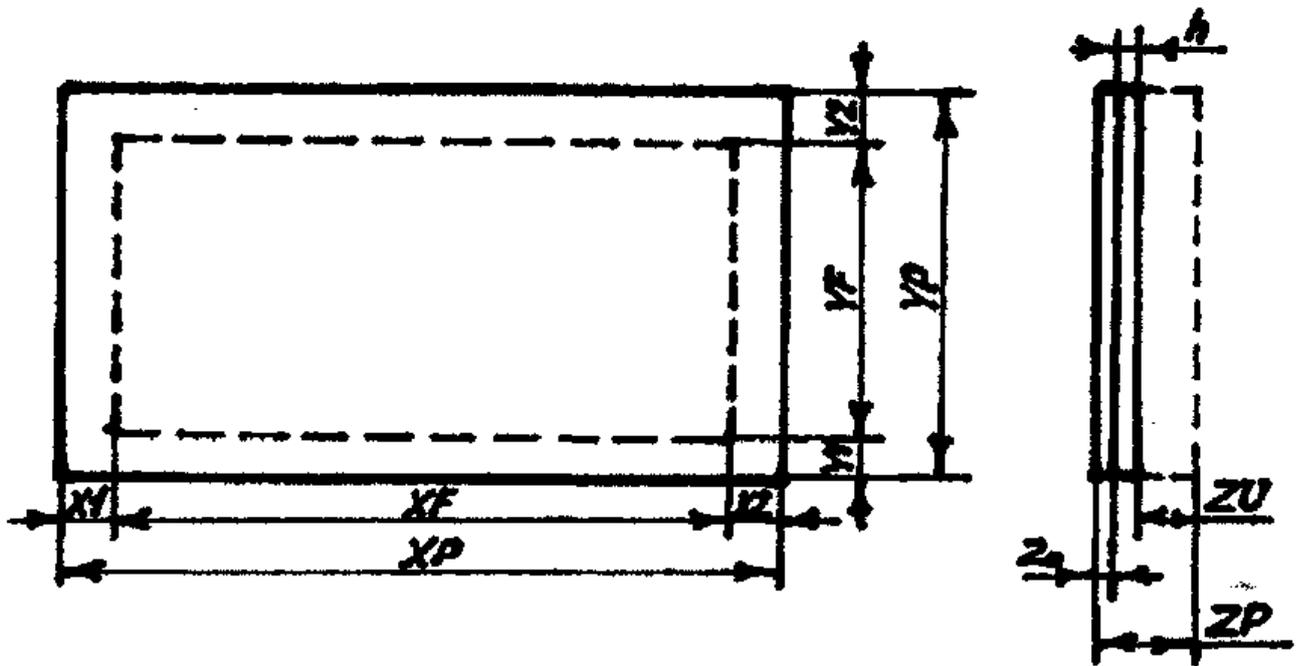


Рис. 15.

Согласно рис.15, размеры печатной платы определяются размерными цепочками:

$$XP = X1 + XF + X2; \quad YP = Y1 + YF + Y2. \quad (2)$$

Размеры печатного узла по третьей координате:

$$ZP = ZU_{\max} + h + Z_{0\max} = 16 + 1,5 + 1 = 18,5 \text{ мм} \quad (3)$$

где  $h = 1,5 \text{ мм}$  - толщина материала печатной платы.  $CZ$  - коэффициент заполнения по площади (статистическая величина) и составляет  $0,1 \pm 0,3$ . Принимается  $CZ = 0,3$ .

С учетом зазоров между элементами, площадь функциональной поверхности платы:

$$SF = SE : CZ = 743,12 : 0,3 = 2477,07 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Ширина краевых полей выбирается кратной шагу координатной сетки  $X1, X2, Y1, Y2 = 5 \text{ мм}$ .

Коэффициент формы платы  $CF = XF : YF = XP : YP$ . Согласно ГОСТ 10716-81  $1 < CF < 3$ .

Выбирается  $CF = 1,0$ .

Размеры функциональной области находятся по формулам:

$$XF = \sqrt{CF \cdot SF} = \sqrt{1,0 \cdot 2477,07} = 50 \text{ мм}; \quad (5)$$

$$YF = \sqrt{\frac{SF}{CF}} = \sqrt{\frac{2477,07}{1,0}} = 50 \text{ мк}$$

Диаметр контактной площадки  $DK = 2 \cdot XA + D$ , где  $XA = 1$  мм - ширина проводника.  
 $D$  - диаметр отверстий в плате для установки электровакуумных и полупроводниковых элементов  $V$ :

$$D = DV + 0,2 = 0,5 + 0,2 = 0,7 \text{ мм}, \quad (6)$$

где  $DV = 0,5$  мм.

$$DK = 2 \cdot 1,0 + 0,7 = 2,7 \text{ мм}.$$

В данном случае целесообразно использовать следующие размеры печатной платы:

$$XP = 5 + 50 + 5 = 60 \text{ мм};$$

$$YP = 5 + 50 + 5 = 60 \text{ мм},$$

Функциональные узлы, использующие интегральные схемы, работают на токах, не превышающие уровень  $10^{-2} \div 10^{-4}$  А через проводники сигнальных цепей. В данном устройстве токи не могут превышать  $10^{-3}$  А. Ширина проводника  $XA$  принимается равной 1 мм. Удельная плотность тока через печатный проводник  $\gamma = 25$  А / мм<sup>2</sup>. Подсчитывается значение толщины фольги по формуле:

$$TF = \frac{I}{\gamma \cdot XA} = \frac{10^{-3}}{25 \cdot 1,0} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

В результате расчетов получилась толщина фольги 40 мкм, принимается стандартная толщина фольги 50 мкм.

В результате расчета получены габаритные размеры функционального узла  $60 \times 60 \times 1,5$  мм, подходящий материал для изготовления печатной платы - стеклотекстолит фольгированный гальваностойкий СФ-2-50Г.

### **Расчет собственной резонансной частоты печатного узла.**

Функциональный узел на жесткой печатной плате, закрепленный в приборе, в условиях вибрационных нагрузок (например, при транспортировке прибора на автомобиле, самолете и т.д.), обладает собственными частотами механических колебаний или конструктивными резонансами. Если частота вибрационных воздействий совпадает с собственной частотой функционального узла, плата испытывает максимальные механические перегрузки, которые могут привести к ее разрушению, к разрушению элементов, к отрыву контактных площадок, паяных контактов и проводов.

Частота вибраций, которая определяется условиями эксплуатации прибора, обычно известна, собственная частота определяется его механическими характеристиками и находится из выражения для закрепления в четырех точках.:

$$F(fu) = 0,477 \cdot h \cdot [1 : X^2 + 1 : Y^2] \cdot \sqrt{\frac{\ddot{A} \cdot XP \cdot YP \cdot h}{MS}}$$

где  $XP, YP$  - расстояние между точками закрепления функционального узла, мм;

$E$  - модуль упругости материала платы,  $E = 3 \cdot 10^{10}$  Па;

$h$  - толщина печатной платы;

$MS = MP + ME + MR$  - масса функционального узла, гр.;

$MP = 0,001 \cdot XP \cdot YP \cdot h \cdot \rho_{\text{пт}}$  - масса печатной платы, гр.;

$\rho_{\text{пт}}$  - удельная плотность материала платы, г/см<sup>3</sup>; для СФ2  $\rho_{\text{пт}} = 2,05$  г/см<sup>3</sup>;

$ME = \sum ME_i$  - масса элементов на плате;

$N$  - количество элементов на плате;

$MR = KS \cdot M_i$  - масса припоя пайки на плате;

$KS$  - количество паек;  $M_i = 0,06 \pm 0,012$  - масса припоя одной пайки. Для определения массы функционального узла составляется таблица 4.

Таблица 4

Обозначение	Тип элемента	Масса $ME_i$	Количество $N_i$	Количество выводов $K_i$	Масса $ME_i \cdot Ni$	$K_i \cdot Ni$
DD17	КР572ПА1А	1,2	1	20	1,2	20
DA1,DA4	К512СА1	0,6	2	6	1,2	12
DA2,DA3, DA5,DA6	К140УД10	0,6	4	6	2,4	24
VD7,VD8	КС168А	0,3	2	2	0,6	4
С5,С6	К50-35-25В	1,8	2	2	3,6	4
R29...R37	С2-23-0,125	0,1	9	2	0,9	18
Итого:					9,9	82
$h =$	1,5	мм				
$E =$	$3 \cdot 10^{10}$	мм				
$\rho_{\text{пт}} =$	2,05	г/см <sup>3</sup>				
CF	XP	YP	VS	XF	YF	F(fu), Гц
1,0	60	60	25,89	50	50	1193

Масса печатной платы:

$$MP = 0,001 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 1,5 \cdot 2,05 = 11,07 \text{ гр.}$$

Масса припоя пайки на плате:

$$MR = 82 \cdot 0,06 = 4,92 \text{ гр.}$$

Определяется значение резонансной частоты для закрепления в четырех точках:

$$F(fu) = 0,477 \cdot 1,5 \cdot [1:50^2 + 1:50^2] \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{10} \cdot 50 \cdot 50 \cdot 1,5}{25,89}} = 1193 \text{ Å} \ddot{o}$$

В результате расчета получена резонансная частота функционального узла 1193 Гц. Она больше, чем максимальная резонансная частота, возникающая при транспортировке - 250 Гц. То есть частота не входит в диапазон частот механических колебаний, возникающих при транспортировке. Механические характеристики выбраны правильно.

### Расчет на изгиб печатной платы.

#### Расчет прочности платы.

Под действием вибрационных нагрузок плата испытывает изгибные деформации. Если нагрузка превышает предел изгибной прочности материала, происходит перелом в наиболее ослабленном сечении. Для количественной оценки этого явления предполагается многократный изгиб печатной платы под действием таких нагрузок, а сама плата рассматривается как прямоугольная пластина на двух опорах.

Ослабленное сечение XS выбирается по формуле:

$$YS = YF - \sum_{i=1}^{Ki} d_i = 50 - (12 - 0,5) - 1,0 \cdot 6,25 = 37,75 \text{ мм}$$

где  $K_i$  - количество отверстий в сечении XS.

Изгибающий момент в режиме резонансных колебаний находится как:

$$M_u = 0,25 \cdot P \cdot \eta(v) \cdot YP = 0,25 \cdot 0,254 \cdot 10 \cdot 0,06 = 0,0381 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $P = MS \cdot g = 25,89 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 = 0,254 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = 0,254 \text{ Н}$ ,

$\eta(v) = 10$  - коэффициент вибронгрузки.

Момент сопротивления изгибу для платы в виде прямоугольной пластины находится по формуле:

$$W = \frac{1}{6 \cdot YS \cdot h^2} = \frac{1}{6 \cdot 37,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5^2 \cdot 10^{-6}} = 14,16 \text{ мм}^3$$

Формула для расчета изгибной прочности:

$$\delta(e) = 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{MS \cdot \eta(v) \cdot YP}{YS \cdot h^2} = 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{25,89 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 60 \cdot 10^{-1}}{37,75 \cdot 10^{-1} \cdot 1,5^2 \cdot 10^{-2}} = 0,269 \text{ кг}/\text{см}^2$$

Конструкция считается прочной, если изгибная прочность удовлетворяет условию:  $\delta(e)_{\text{доп}} > \delta(e)$ . Для подобных устройств допустимая прочность равна  $\delta(e)_{\text{доп}} = 0,4 \text{ кг}/\text{см}^2$ . В данном случае  $0,269 \text{ кг}/\text{см}^2 < 0,4 \text{ кг}/\text{см}^2$ , следовательно конструкция достаточно прочная. Параметры функционального узла подобраны правильно.

### Определение жесткости печатного узла.

При вибрациях платы ломаются редко. Гораздо чаще под действием механических нагрузок ухудшается жесткость конструкции. Количественно жесткость платы оценивается по допустимому изгибу  $\Delta Z$ .

Допустимый прогиб определяется по формуле:

$$\Delta Z = 1,53 \cdot 10^3 \cdot \frac{MS \cdot \eta(\nu) \cdot X D^3}{E \cdot YS \cdot h^3} = 1,53 \cdot 10^3 \cdot \frac{25,89 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 60^3 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^{10} \cdot 37,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5^3 \cdot 10^{-9}} = 0,022 \text{ мм}$$

Конструкция считается жесткой, если стрела прогиба удовлетворяет условию:

$$\Delta Z \leq 0,01 \cdot X P.$$

В данном случае  $0,022 < 0,6$ . Следовательно, конструкция достаточно жесткая.

### 13. Технология изготовления печатных плат.

Печатные платы изготавливаются химическим методом. Прежде чем приступить к изготовлению печатных плат, необходимо проверить марку и толщину материала по клейму завода изготовителя, указанному на материале, убедиться что качество поверхности медной фольги соответствует стандарту на фольгированный диэлектрик (стеклотекстолит СФ-2-50Г).

После этого нарезать заготовки печатных плат с технологическим припуском  $10 \div 15$  мм на каждую сторону, спаять заусенцы, обдуть сжатым воздухом и переложить листами бумаги. Заготовки должны храниться в горизонтальном положении, в закрытом сухом и чистом помещении.

При подготовке к экспонированию необходимо произвести следующие операции:

- 1) Декапирование в  $5 \div 10\%$  растворе соляной или серной кислоты с последующей промывкой в проточной воде;
- 2) Зачистку поверхности заготовки шлифпорошком с венской известью, произвести промывку водопроводной водой;
- 3) Обезжирить поверхность заготовок венской известью, промыть в проточной воде до полного удаления обезжиривающего раствора;
- 4) Декапировать в растворе соляной кислоты и промыть в проточной воде;
- 5) Проверить качество подготовки заготовок внешним осмотром. На поверхности заготовок не должно быть окисной плёнки; хорошо подготовленная поверхность равномерно смачивается водой, при плохой смачиваемости подготовку повторить;
- 6) Сушить до полного высыхания с помощью настольных вентиляторов;
- 7) Нанести на поверхность заготовок светочувствительный слой методом окунания. Состав светочувствительного слоя :
  - Спирт поливиниловый  $70 \div 90$  г/л.
  - Аммоний двуххромовокислый  $10 \div 15$  г/л
  - Поверхностно-активные вещества  $5$  г/л
  - Спирт этиловый (ректификат)  $30 \div 50$  г/л

8) Сушить заготовки в центрифуге при температуре  $35\div 50^{\circ}\text{C}$  в течении  $5\div 8$  мин. Для обеспечения хорошего качества изображения можно нанести второй слой эмульсии. Светочувствительный слой должен быть равномерным, без пузырей, механических вкраплений, подтёков и непокрытых участков. Заготовки с нанесённым светочувствительным слоем хранить в тёмном шкафу до экспонирования не более трёх часов.

Экспонирование изображения рисунка схемы производится следующим образом: негатив накладывается эмульсионной стороной на покрытую светочувствительным слоем заготовку и помещается в установку для экспонирования. Время экспонирования подбирается опытным путём и зависит от плотности негатива. Недопустимо повышение температуры в зоне экспонирования выше  $35^{\circ}\text{C}$  во избежание усадки негатива и появления вуали.

Изображение проявляется в теплой воде, окрашивается в растворе метилвиолета. После промывки водопроводной водой дубить химически в растворе хромового ангидрида. После промывки водопроводной водой сушить на воздухе в вертикальном положении. Светочувствительный слой должен быть сплошным, без повреждений. После сушки необходимо провести световое (или тепловое) дублирование в течение  $40\div 60$  мин., ретушировать, удалить ненужные штрихи и загрязнения.

После этого необходимо произвести удаление меди с участков, незащищённых эмульсией. Травление производится в растворе хлорного железа концентрацией  $400\div 500$  г/л при температуре  $20\div 60^{\circ}\text{C}$  в течение  $5\div 15$  мин. После промывки проточной водой платы необходимо нейтрализовать в растворе кальцинированной соды.

Промыв заготовки тёплой проточной водой с них удаляется уайт-спиртом ретушь, затем эмульсия раздублируется и удаляется. Операция раздублирования производится в горячей ванне при температуре  $60\div 70^{\circ}\text{C}$  в течение  $4\div 5$  мин. Для раздублирования используется ванна следующего состава:

- Кислота щавелевая       $150\div 200$  г/л
- Натрий хлористый       $50\div 100$  г/л
- Натрий едкий               $300$  г/л

Затем заготовки промываются водопроводной водой; в случае наличия следов светочувствительной эмульсии допускается зачистка шлифпорошком или компаундом К-30-К. После этого платы сушатся при температуре  $35\div 40^{\circ}\text{C}$  в течение  $40\div 60$  мин.

Проводится окончательная зачистка компаундом К-30-К, обдув плат сухим воздухом, протираются салфеткой и проводится контроль. Печатные проводники должны быть чёткие, с ровными краями, без вздутий, обрывов, замыканий на соседний проводник, не должно быть нетравлёных участков меди между проводниками. Ширина печатных проводников и расстояние между ними устанавливаются требованиями чертежа.

Затем платы поступают на механическую обработку. Она заключается в штамповке по контуру и сверлению отверстий. После механической обработки

платы обдувают сжатым воздухом. Проводники защищают от окисления облуживанием сплавом Розе. Излишки сплава Розе удаляются ракилом из термостойкой резины или встряхиванием; платы промываются в горячей проточной воде; нейтрализуются в растворе пищевой соды концентрацией 100 г/л, затем промываются в проточной воде.

После этих операций платы продувают сжатым воздухом, сушат при температуре  $80\div 85^{\circ}\text{C}$  в термостате в течение  $2\div 3$  часов. После сушки проверяется сопротивление изолирующих участков (выборочно  $10\div 15\%$  выпускаемых плат).

Затем платы покрываются консервирующим флюсом со стороны схемы, сушатся на воздухе, а после – в термостате при температуре  $35\div 60^{\circ}\text{C}$  в течение  $1\div 2$  часов.

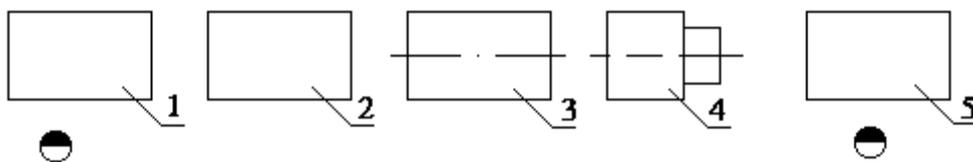
Готовые платы проходят 100%-ный визуальный контроль. Электрические параметры проверяют выборочно. Климатические испытания, порядок их проведения и требования выполняют в соответствии с частными техническими условиями.

Для хранения и транспортировки платы упаковывают в полиэтиленовые и полихлорвиниловые мешки, а затем картонные коробки или специальную тару.

В настоящее время химические методы являются основными при изготовлении односторонних печатных плат. Химический метод, при сравнительно простом технологическом процессе обеспечивает высокую прочность сцепления проводников с основанием (около 2 МПа), равномерную толщину проводников и их высокую электропроводность. Время химических воздействий на платы в процессе изготовления составляет примерно 25 мин. К недостаткам этого метода относятся необходимость в металлических втулках при двухстороннем монтаже и нерациональный расход меди в процессе травления. Схема технологического процесса изготовления печатных плат приведена в приложении.

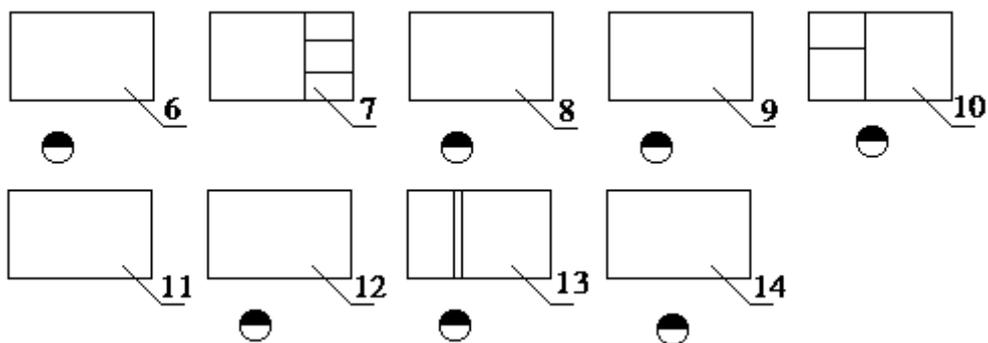
## Технологический процесс изготовления печатных плат.

### 1. Участок контроль-подготовка заготовок.



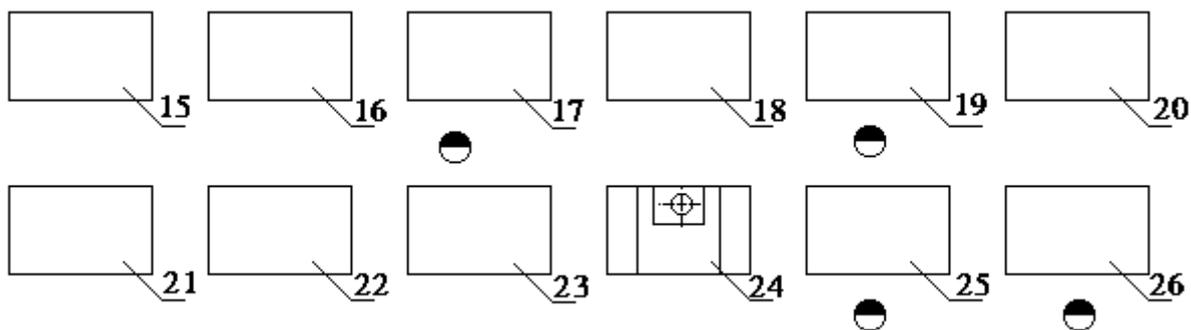
1. Контроль заготовок;
2. Дырпробивной пресс;
3. Снятие заусенцев;
4. Чистка отверстий сжатым воздухом;
5. Контроль.

## 2. Участок изготовления сетчатого трафарета.



6. Подготовка сетки трафарета;
7. Натяжение сетки на рамки;
8. Заклеивание рамки;
9. Промывка и нанесение фотокомпозиции;
10. Светокопировальная установка;
11. Ванна проявления;
12. Ретуширование;
13. Сеткографический станок;
14. Контроль и ретушь.

## 3. Участок травления.



15. Ванна для травления;
16. Ванна для промывки;
17. Контроль;
18. Смывка защитного рисунка;
19. Контроль;
20. Ванна декапирования;
21. Нанесение сплава Розе;
22. Промывка;
23. Сушка и контроль;
24. Сверление;
25. Контроль;
26. Маркировка и упаковка.

### *Список используемых источников:*

1. Шопен Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. - М.: Энергия, 1986.
2. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Сахаров Ю.В. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. - М.: Энергия, 1975.
3. Полупроводниковые приборы. Транзисторы. Справочник. Аронов В.А. и др.; / Под общ. ред. Горюнова Н.Н. - М. : Энергоиздат, 1982.
4. Справочник по полупроводниковым диодам. Бородин Б.А. и др.; / Под ред. Н. Ф. Николаевского. - М.: Связь, 1979.
5. Резисторы. Справочник. Андреев Б.Н. и др.; / Под ред. И.И.Четверикова. - М.: Энергоиздат, 1981.
6. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры./ Под ред. Р.Г. Варламова. - М.: Советское радио, 1972.
7. Поскробко А.А., Братолобов В.Б. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе. - М.: Энергия, 1978.
8. Лукутин Б.В. Силовые преобразователи электроэнергии. Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 1997.
9. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника, - М.: Высшая школа, 1982.

# ТИРИСТОРНОЕ КОММУТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Методические указания и пример выполнения курсового проекта

Составитель: Евгений Петрович Богданов

Подписано к печати

Формат 60×84/16. Бумага офсетная .

Плоская печать. Усл. печ. л. . Уч. изд. л. .

Тираж 50 экз. Заказ № . Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.97.

Изд-во ТПУ. 634050, Томск, пр. Ленина 30.