

## Оглавление

<b>1. Расчет и выбор электрорадиоэлементов, деталей и сборочных единиц симисторного пускателя .....</b>	<b>7</b>
1.1 Электрический расчет силовой части и выбор элементов схемы	7
1.1.1 Выбор силовых симисторов .....	7
1.1.2 Проверочный тепловой расчет силовой части .....	10
1.1.3 Расчет повторно-кратковременного режима .....	12
1.2 Выбор элементов схемы управления .....	14
1.2.1 Выбор и расчет оптопары .....	14
1.2.2 Предварительный выбор транзисторного ключа .....	18
1.2.3 Выбор трансформатора напряжения для цепи управления .....	20
1.2.4 Проверка трансформатора напряжения на нагревание .....	22
1.2.5 Расчет транзисторного ключа.....	25
1.2.6 Расчет теплового режима транзисторного ключа .....	32
1.2.7 Расчет элементов защиты оптопары.....	33
1.2.8 Выбор диодов системы управления.....	36
1.3 Выбор и расчет элементов блока защиты .....	37
1.3.1 Выбор стабилитрона.....	37
1.3.2 Выбор трансформатора тока.....	38
1.3.3 Проверка трансформатора тока на нагревание .....	39
1.3.4 Выбор потенциометра R1 .....	42
1.3.5 Расчет защиты при потере фазы.....	44
1.3.6 Расчет и выбор конденсатора блока защиты .....	46
1.3.7 Расчет и выбор динистора и резистора для выводов 7, 8.....	48
1.4 Выбор предохранителя.....	50

1.4.1 Принцип выбора предохранителя при пуске двигателя.....	50
Математическое моделирование пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	51
Актуальность.....	51
Принципы, методы и средства исследования.....	52
Описание имитационной модели.....	53
Результаты математического моделирования .....	55
1.4.2 Расчет предохранителя.....	58
1.5 Тепловой расчет .....	60
1.5.1 Обоснование выбора типа охлаждения.....	60
1.5.2 Расчет вентилятора.....	62
1.6 Расчет надежности схемы .....	66
1.7 Расчет собственной резонансной частоты печатного узла.....	68
1.8 Расчет прочности печатной платы .....	72
1.8.1 Расчет на изгиб печатной платы .....	72
1.8.2 Определение жесткости печатного узла .....	74
Создание платы управления с помощью программного обеспечения Proteus 8.1 Professional.....	75
Выбор климатического и защитного исполнения симисторного пускателя.....	78
Создание 3-D модели симисторного пускателя.....	81
Заключение .....	83
Список использованных источников .....	85

## Введение

Бесконтактные симисторные реверсивные пускатели с опторазвязкой (далее ПБСО) применяют для безопасной коммутации трехфазных двигателей, приводов мощных насосов, транспортеров, вентиляторов, компрессоров и другого оборудования, питаемого напряжением 220/380 вольт. Сегодня они находят широкое применение во многих отраслях промышленности, таких как: машиностроение, металлургия, производство строительных материалов, сельское хозяйство и во многих других.

Пускатели включают как по стандартной схеме, так и с применением контроллеров, дающих управляющие сигналы, обычно напряжением в 24 вольта. Симисторные пускатели могут работать в широких температурном и влажностном диапазонах, однако окружающая среда не должна содержать токопроводящих загрязнений и агрессивных веществ, способных разрушить металл и изоляцию.

Бесконтактный симисторный реверсивный пускатель работает на базе симисторных ключей, способных выдерживать токи в сотни ампер. В данной работе модель симисторного пускателя номиналом 63 А может легко выдержать десятикратную токовую перегрузку в течение 20 мс.

Пускатель содержит пять силовых симисторов, элементы управления и защиты, а также индикаторы режима работы и разъемы для включения прибора в схему управления двигателем.

Симисторные пускатели обеспечивают плавный пуск и защиту электродвигателя от перегрузок, от обрыва фазы. Обладают высокой надежностью при повышенной частоте коммутации, долговечностью. Дают значительное снижение эксплуатационных расходов по сравнению с контактной аппаратурой.

Реверсивные пускатели обеспечивают реверс (изменение направления вращения) двигателя путем бесконтактного переключения фаз с

заданным токоограничением.

В Приложении 1 показана электрическая принципиальная схема бесконтактного симисторного пускателя с опторазвязкой. Силовой блок Б1 содержит силовые симисторы VS1—VS5, рассчитанные на номинальный и пусковой токи двигателя М. При подаче сигнала управления на управляющие электроды, симисторы открываются и двигатель подключается к сети. При снятии сигнала управления (при перегрузке, потере фазы, нажатии кнопки «Стоп») симисторы закрываются и двигатель отключается от сети. В этот момент по симисторам протекает лишь небольшой ток утечки. Сигналы управления тиристорами формируются в блокинг-генераторе Б2, который получает напряжение от блока питания Б3.

При нажатии кнопки «Пуск» включается тиристор VS6 и все напряжение прикладывается к резистору R6. При этом транзистор VT3 закрыт, так как напряжение на резисторе R6 больше, чем на резисторе R4. По мере заряда конденсатора C2 наступают условия для открытия транзистора VT3 и конденсатор C2 начинает разряжаться. Электродвижущая сила, наводящаяся при этом, способствует быстрому и полному открытию транзистора VT3. При разряде конденсатора напряжение на резисторе R6 возрастает, транзистор VT3 закрывается и снова начинается заряд конденсатора C2. Таким образом, генерируются импульсы тока и в оптотиристорах ТО1 и ТО2 появляются управляющие импульсы.

Аналогичные схемы могут управляться сигналами постоянного тока или переменным током низкой частоты. Использование блокинг-генератора даст возможность быстро включать тиристор и уменьшить нагрузку по его управляющему электроду. При нормальном режиме транзистор VT2 блока Б2 насыщен и лампа L2 не горит. Если на контакты 7, 8 блока Б2 подано напряжение с одноименных контактов блока защиты Б4, тиристор VS10 открывается и блокинг-генератор лишается питания. Блок питания Б3 включается только на резистор R8. При потере питания генерация в блоке Б2 прекращается и тиристор VS6 отключается. Одновременно транзистор VT2

закрывается и загорается лампа L2, сигнализируя об отключении пускателя от защиты. В случае потери фазы в выходном напряжении (после диодов VD1—VD2) появляется пауза. В эту паузу блок Б2 останавливается и тиристор VS6 отключается, что ведет к закрытию силовых тиристоров. Блок Б4 защиты двигателя и силовых тиристоров от перегрузки питается от трансформаторов тока ТА1—ТА3. Напряжение с нагрузочных резисторов выпрямляется и подается на потенциометр R18. Параметры трансформаторов ТА1—ТА3 и резисторов R18, R15—R17 выбираются так, что при номинальном токе во всех трех фазах напряжение, снимаемое с потенциометра R18, меньше напряжения пробоя стабилитрона D13. До тех пор, пока напряжение на стабилитроне меньше напряжения пробоя ( $U_{стаб} < U_{пр}$ ), сопротивление стабилитрона очень высоко. При этом ток базы транзистора VT1 недостаточен для его открытия. Если ток хотя бы в одной фазе превысит номинальное значение, то возникает неравенство  $U_{стаб} > U_{пр}$ , сопротивление стабилитрона резко падает, ток в базе VT1 возрастает и он насыщается. Ток стабилитрона ограничивается резистором R19 до допустимого значения. Если восстановится неравенство  $U_{стаб} < U_{пр}$ , то сопротивление стабилитрона снова возрастет, транзистор VT1 закроется. После открытия транзистора VT1 начинается заряд конденсатора C3. Напряжение с конденсатора C3 на выход 7, 8 не подается до тех пор, пока не превысит напряжение переключения динистора VD14. Динистор имеет такую же вольт-амперную характеристику, как и тиристор. Если перегрузка была настолько кратковременной, что конденсатор C3 не успел зарядиться, то напряжение на выходе 7, 8 не появится и пускатель останется в работе. Если  $U_c$  станет больше напряжения переключения динистора VD4, произойдет разряд конденсатора C3 на цепь управления тиристора VS10 блока Б2 и последний откроется. При этом прекратится генерация импульсов, открывающих VS1—VS5, и двигатель остановится. Параметр срабатывания блока защиты регулируется потенциометром R18. За счет усложнения блока защиты можно создать выдержку времени в зависимости от условия перегрузки. Защита двигателя и силовых тиристоров от токов КЗ в данном

пускателе осуществляется быстродействующими предохранителями FU1—FU3 типа ПИ57-3738.

По сравнению с контактными, бесконтактный пускатель обладает следующими преимуществами:

1. Отсутствие электрической дуги при коммутациях делает аппарат незаменимым при работе во взрывоопасных и пожароопасных средах;
2. Высокая электрическая износостойкость ( $10^5$ - $10^6$  циклов);
3. Совершенная защита от токов перегрузки и КЗ, а также при потере фазы, что обеспечивает увеличение срока службы двигателей;
4. Допустимое число включений достигает 2000 в час;
5. Длительность отключения не превышает 0,02 с;
6. Высокая надежность и долговечность, а также отсутствие необходимости в уходе при эксплуатации;
7. Низкая потребляемая мощность цепей управления.

Недостатками бесконтактного пускателя являются:

1. Сложность схемы;
2. Более высокая стоимость аппарата, по сравнению с контактными;
3. Бесконтактные аппараты не создают видимого разрыва цепи, что важно с точки зрения техники безопасности.

# 1. Расчет и выбор электрорадиоэлементов, деталей и сборочных единиц симисторного пускателя

## 1.1 Электрический расчет силовой части и выбор элементов схемы

### 1.1.1 Выбор силовых симисторов

Для пускателей, работающих на промышленной сети, обычно используются низкочастотные симисторы. Параметры симисторов выбираются по максимальному амплитудному значению напряжения на закрытом симисторе [1].

Действующее значение тока нагрузки:

$$I_{H.д.} = \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{30 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,9} = 57,4 \text{ A}$$

Амплитудное значение тока:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{H.д.} = 1,41 \cdot 57,4 = 81 \text{ A}$$

Среднее значение тока через симистор:

$$I_{cp} = \frac{I_m}{K_a} = \frac{81}{3,14} = 25,8 \text{ A}$$

Где  $K_a = 3,14$  – коэффициент амплитуды.

Амплитудное значение напряжения:

$$U_m = \sqrt{6} \cdot U_H = 2,45 \cdot 220 = 539 \text{ B}$$

Действующее значение тока симистора:

$$I_\delta = K_\phi \cdot I_{cp} = 1,57 \cdot 25,8 \text{ A}$$

Где  $K_\phi = \frac{K_a}{2} = \frac{3,14}{2} = 1,57$  – коэффициент формы

Пределные значения тока и напряжения:

$$I_{np} > I_{cp} \quad U_{np} = 1,5 \cdot U_m$$

По этим параметрам выбираем симистор ТС151-100 с параметрами [3]:

Таблица 1 – Максимально-допустимые параметры симистора

Наименование параметра	Условное обозначение	Значения параметров			Единица измерения
		мин.	тип.	макс.	
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, $T_j = -60\text{ °C} \dots +125\text{ °C}$	$V_{DRM}$	300	-	1300	В
Неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, $T_j = -60\text{ °C} \dots +125\text{ °C}$	$V_{DSM}$	200	-	1400	
Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии, $T_j = 125\text{ °C}$ , $V_D = V_{DRM}$	$I_{DRM}$	-	-	10	мА
Максимально допустимый действующий ток в открытом состоянии, $f = 50\text{ Гц}$ , $T_C = 85\text{ °C}$	$I_{TRMS}$	-	-	100	А
Ударный ток в открытом состоянии, $T_j = 125\text{ °C}$ , $t_p = 20\text{ мс}$	$I_{TSM}$	-	-	1	кА
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии, $V = 0,67V_{DRM}$ , $I_T = 160\text{ А}$ , $I_{FG} = 1\text{ А}$ , $t_r = 1\text{ мкс}$ , $f = 50\text{ Гц}$ , $T_j = 125\text{ °C}$	$(di_T/dt)_{crit}$	-	-	63	А/мкс
Критическая скорость нарастания коммутационного напряжения, $V_D = 0,67V_{DRM}$ , $T_j = 125\text{ °C}$ , $I_T = I_{TRMS}$ , $t_p = 10\text{ мс}$	$(dV_D/dt)_{com}$	2,5	-	50	В/мкс
Максимальная мощность управления, постоянный ток	$P_{GM}$	-	-	1	Вт
Квадранты управляемости		1, 3, 4			
Температура перехода	$T_j$	- 60	-	+ 125	°C
Температура хранения	$T_{stg}$	- 60	-	+ 50	

Таблица 2 – Рабочие характеристики симистора

<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>					
Импульсное напряжение в открытом состоянии, $I_T = 113 \text{ A}$ , $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$V_{TM}$	-	-	1,80	В
Пороговое напряжение, $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ , $I_T = 50 - 170 \text{ A}$	$V_{(TO)}$	-	-	1,5	
Динамическое сопротивление, $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ , $I_T = 50 - 170 \text{ A}$	$r_T$	-	-	3,5	МОм
Отпирающее постоянное напряжение управления, $V_D = 12 \text{ В}$ , $T_J = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$V_{GT}$	-	-	8,5 3,0 2,5	В
Отпирающий постоянный ток управления, $V_D = 12 \text{ В}$ , $T_J = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$I_{GT}$	-	-	700 300 150	мА
Неотпирающее постоянное напряжение управления, $V_D = 0,67V_{DRM}$ , $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$V_{GD}$	0,25	-	-	В
<b>ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ</b>					
Тепловое сопротивление переход - корпус	$R_{thjc}$	-	-	0,22	°C/Вт
Тепловое сопротивление корпус - охладитель	$R_{thch}$	-	-	0,15	

**Вывод:** предварительно выбираем симистор ТС151-100, который удовлетворяет рассчитанным характеристикам.

## 1.1.2 Проверочный тепловой расчет силовой части

Как и любой полупроводниковый элемент, симистор очень чувствителен к температуре. Поэтому очень важным фактором является температура полупроводниковой структуры симистора, при его работе. Проведем тепловой расчет, чтобы удостовериться в том, что симистор не будет перегреваться выше допустимых значений.

Температура структуры:

$$\Delta P = U_{TO} \cdot I_{cp} + (K_{\phi} \cdot I_{cp})^2 \cdot R_T = 1,5 \cdot 25,8 + (1,57)^2 \cdot (25,8)^2 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 44,44 \text{ Вт}$$

$$T_j = T_{окр} + \Delta P \cdot R_{thjc} = 45 + 44,44 \cdot 0,22 = 54,8^{\circ}\text{C}$$

Где  $T_{окр}$  – максимальная температура окружающей среды.

$$T_j < [T_j] \quad 54,8^{\circ}\text{C} < 125^{\circ}\text{C} \text{ - условие выполняется.}$$

Так как наиболее тяжелым является режимом перегрузки, то производится проверка при  $I_{cp}^* = 1,25 \cdot I_{cp} = 1,3 \cdot 25,8 = 32,25 \text{ А}$ , так как перегрузка составляет 25%.

$$\Delta P^* = U_{TO} \cdot I_{cp}^* + (K_{\phi} \cdot I_{cp}^*)^2 \cdot R_T = 1,5 \cdot 32,25 + (1,57)^2 \cdot (32,25)^2 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 57,35 \text{ Вт}$$

$$T_j = T_{окр} + \Delta P^* \cdot R_{thjc} = 45 + 57,35 \cdot 0,22 = 57,6^{\circ}\text{C}$$

$$T_j < [T_j] \quad 57,6^{\circ}\text{C} < 125^{\circ}\text{C} \text{ - условие выполняется.}$$

Таким образом, для режима перегрузки и нормальной работы пускателя в выбранной схеме можно использовать симистор ТС151-100 (рис.1).

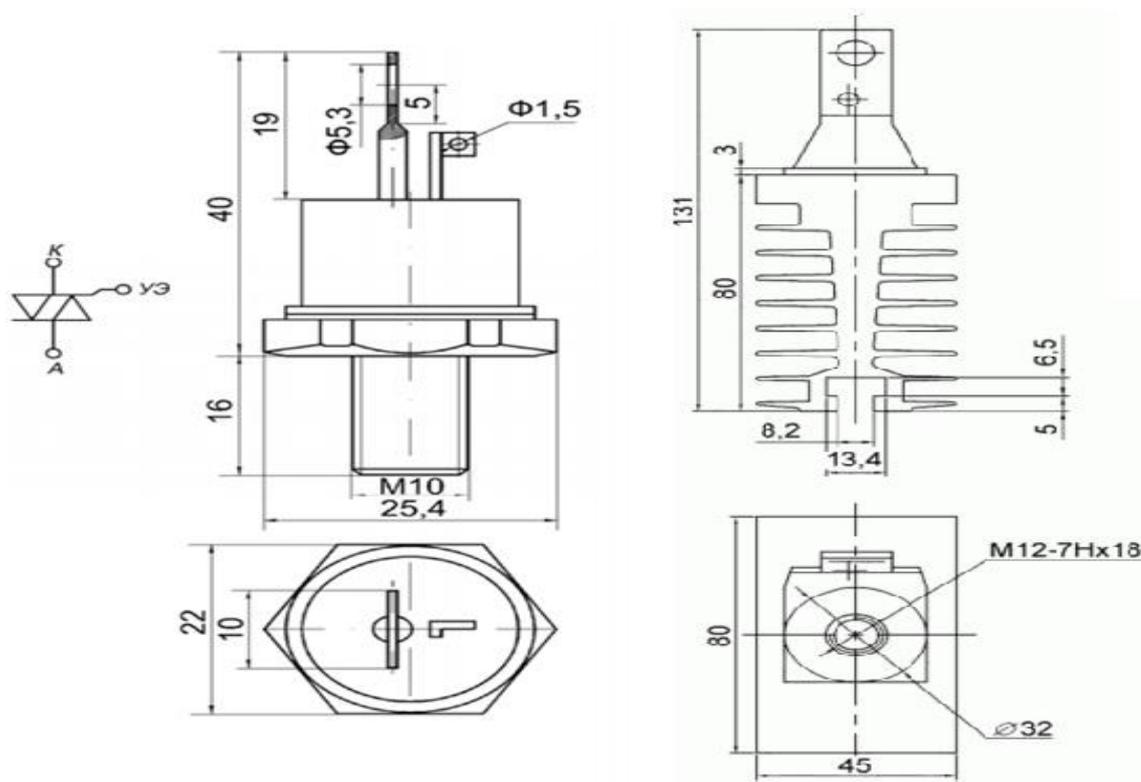


Рисунок 1 - Симистор TC151-100 и охладитель O151

Выбранный симистор имеет стержневую конструкцию, вследствие чего охладитель O151 должен крепиться к нему через резьбовое соединение, выполненное на корпусе тиристора, и при монтаже будет расположен горизонтально.

**Вывод:** выбранный симистор проходит проверку на нагрев. Для его естественного охлаждения выбираем охладитель O151.

### 1.1.3 Расчет повторно-кратковременного режима

Для повторно-кратковременного режима характерной чертой является то, что пускатель работает в большой степени с пусковыми токами. Для асинхронного двигателя по заданию пусковой ток равен  $I_n = 5 \cdot I_H$ , время пуска  $t_n = 0,5c$ , число включений в час  $N = 100 \text{ вкл} / \text{час}$ .

$$\text{Время цикла } T = \frac{3600 \cdot t_n}{N} = \frac{3600 \cdot 0,5}{100} = 18 \text{ c.}$$

Время одного включения  $\tau = \frac{T}{2} = 9 \text{ c.}$ , т.к. время включения и отключения одинаковы.

$$\text{Пусковой ток } I_n = 5 \cdot I_{cp} = 5 \cdot 25,8 = 129 \text{ A.}$$

Основные потери:

$$\Delta P_{осн} = U_{ГО} \cdot I_n + (K_{\phi} \cdot I_n)^2 \cdot R_T = 1,5 \cdot 129 + (1,57)^2 \cdot (129)^2 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 337 \text{ Вт}$$

Время установившегося режима:

$$t_{уст} = \tau - t_n = 9 - 0,5 = 8,5 \text{ c.}$$

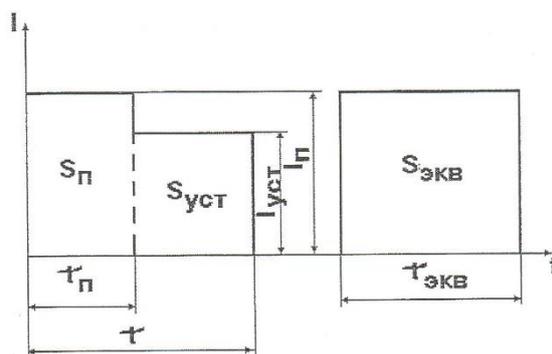


Рисунок 2 - Эскиз для расчета работы двигателя

Получим сложную фигуру, показывающую работу двигателя (рис. 2). Для удобства расчета сведем ее к четырехугольнику, амплитуда остается той же, и расчет сводится к нахождению  $\tau_{эКВ}$ :

$$S_{\text{экв}} = S_{\text{пуска}} + S_{\text{уст}} = 0,5 \cdot 129 + 8,5 \cdot 25,8 = 283,8 \text{ ед}^2.$$

$$\tau_{\text{экв}} = \frac{S_{\text{экв}}}{I_n} = \frac{283,8}{129} = 2,2 \text{ с.}$$

Температура структуры в конце серии импульсов:

$$T_{\text{с.и.}} = T_{\text{окр}} + \left[ \frac{\tau_{\text{экв}} \cdot R_{\text{thjc+thch}}}{T} + \left( 1 - \frac{\tau_{\text{экв}}}{T} \right) \cdot R_{\text{thch}} \right] \cdot \Delta P_{\text{осн}} = 45 + \left[ \frac{2,2 \cdot 0,37}{18} + \left( 1 - \frac{2,2}{18} \right) \cdot 0,15 \right] \cdot 337 = 104,6^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{с.и.}} < [T_j] \quad 104,6^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C} \text{ - условие выполняется.}$$

**Вывод:** расчет повторно-кратковременного режима показал, что симистор ТС151-100 выбран правильно, температура после серии импульсов не превышает допустимую.

## 1.2 Выбор элементов схемы управления

### 1.2.1 Выбор и расчет оптопары

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

Выбирается оптосимистор (оптотиристор) 5П19Т (аналог МОС3042) [4] с параметрами:

Таблица 3 – Электрические параметры оптосимистора

Наименование параметра	Обозн.	Ед. изм.	Мин.	Значен. тип.	Макс.	Режим измерения
Входное напряжение	$U_{вх}$	В	1	1,2	1,5	$I_{вх} = 10 \text{ мА}$
Остаточное напряжение в откр. сост.	$U_{ост}$	В	-	1	2	$I_{вх} = 10 \text{ мА}$ $I_{вых} = 1 \text{ А}$
Ток утечки на вых. в закрытом сост.	$I_{ут}$	мкА	-	0,1	100	$U_{вх} = 0,8 \text{ В}$ $U_{вых} = 400 \text{ В}$
Напряжение изоляции	$U_{из}$	В	1500	-	-	$T = 1 \text{ мин}$
Сопротивление изоляции	$R_{из}$	Ом	-	10	-	-
Проходная емкость	$C_{пр}$	пФ	-	3	-	-
Время срабатывания	$T_{ср}$	мс	-	4	-	-

Таблица 4 – Особенности оптопары, назначение выводов и схема включения

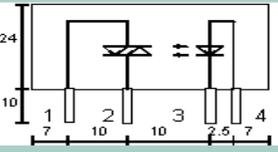
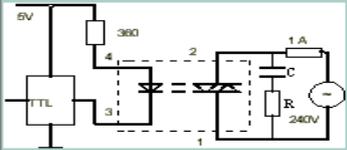
<p><b>Особенности</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- коммутируемое напряжение 240В</li> <li>- коммутируемый ток 1 А</li> <li>- ток управления 10 мА</li> <li>- габариты 37x24x11 мм</li> </ul> <p><b>Применение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- замена электромагнитных реле</li> <li>- промышленная автоматика</li> <li>- мощный интерфейс</li> </ul>	<p><b>Назначение выводов</b></p> 	<p><b>Рекомендуемая схема включения</b></p>  <p>RC-демпфирующая цепь R=0.1 мкФ, C=100 Ом</p>
---	--	---

Таблица 5 – Предельно-допустимые режимы эксплуатации

Параметры режима	Ед. изм.	Мин.	Макс.	Примечание
Напряжение коммутации (ср. знач.)	В	50	240	-
Ток коммутации (ср. знач.)	А	0,25	1	-
Ток коммутации импульсный	А	-	10	$T_{имп} = 500 \text{ мс}$
Вх. Ток во включенном состоянии	мА	10	25	-
Вх. Ток в выключенном состоянии	мА	0	0,25	-
Критическая скорость нарастания вых. напр.	В/мкс	5	-	-
Раб. диапазон температур	С	-60	85	-

Оптосимисторы полезны при осуществлении контроля за более мощными симисторами. Аналогичные оптосимисторы были выбраны для реализации связи между нагрузкой, которая питается переменным напряжением 220 вольт и системой управления с низким уровнем напряжения.



Рисунок 3 - Оптосимистор MOC3042

Оптосимисторы полезны при осуществлении контроля за более мощными симисторами. Аналогичные оптосимисторы были выбраны для реализации связи между нагрузкой, которая питается переменным напряжением 220 вольт и системой управления с низким уровнем напряжения.

Оптосимисторы, как правило, выпускаются в компактном DIP-корпусе, имеющим шесть контактов. Его внутренняя схема, параметры, а также распиновка, показаны на рис. 4, 5.

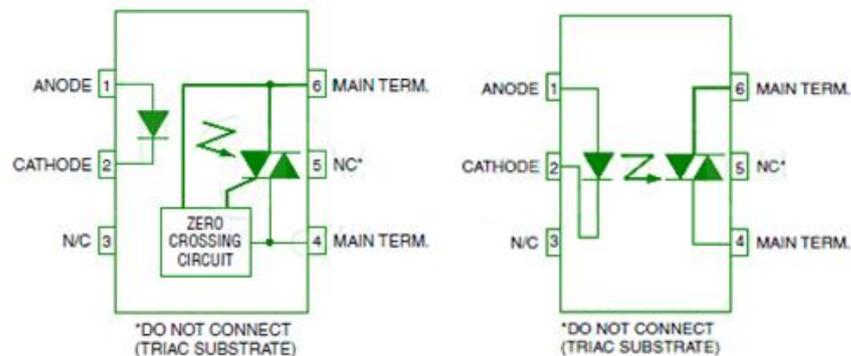


Рисунок 4 - Внутренняя схема оптосимистора MOC3042

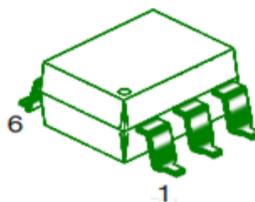


Рисунок 5 - Распиновка оптосимистора MOC3042

Сопротивление оптосимистора:

$$R_{oc} = \frac{U_{ex}}{I_{ком}} = \frac{1,5}{1} = 1,5 \text{ Ом}$$

Проверяется условие:  $\alpha < \varphi$

$\alpha$  - угол управления симистором.

$$\cos \varphi = 0,9 \Rightarrow \varphi = \arccos 0,8 = 25,84^\circ$$

$$\sin \alpha = \frac{I_{GT} \cdot R_{\Sigma}}{U_{\max}} = \frac{0,3 \cdot 1037,1}{311,126} = 1^\circ$$

$$R_{\Sigma} = R_{\sigma} + R_y + R_{oc} = 1025,6 + 10 + 1,5 = 1037,1 \text{ Ом}$$

$$\alpha = \arcsin 1 = 1,57^\circ = 0,027 \text{ рад}.$$

Условие  $\alpha < \varphi$  выполняется.

$$t_y = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{0,027}{314} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Средний установившийся ток на сопротивлении:

$$I_{\text{ср.у.}} = 2 \cdot \frac{I_{GT} \cdot t_y}{T} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 9,55 \cdot 10^{-4}}{0,02} = 0,02865 \text{ А}$$

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

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении:

$$P_{\text{рас}} = 2 \cdot (I_{\text{ср.у.}})^2 \cdot R_{\sigma} = 2 \cdot (0,02865)^2 \cdot 1025,6 = 1,68 \text{ Вт}$$

По мощности рассеивания выбирается резистор серии С2-23 [5, с.81].

**Вывод:** в результате проведенных расчетов, выбирается оптосимистор МОС3042 и резистор серии С2-23 с номиналом 1,05 кОм.

## 1.2.2 Предварительный выбор транзисторного ключа

Для пропускания импульсов управления блокинг-генератора необходимо правильно выбрать и рассчитать транзистор, который будет работать в ключевом режиме.

По известным параметрам тока управления  $I_{ex} = 10 \text{ mA}$  и входного напряжения  $U_{ex} = 1,5 \text{ B}$  оптосимистора выбирается транзистор 2N300 р-п-р-типа (рис. 6) [6] с параметрами:

Таблица 6 – Максимально-допустимые параметры транзистора

Параметр	Значение
Тип материала	Ge
Полярность	р-п-р
Максимальная рассеиваемая мощность	0,02 Вт
Максимально допустимое напряжение коллектор-база, $U_{кб}$	7 В
Максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер, $U_{кэ}$	4 В
Максимально допустимое напряжение эмиттер-база, $U_{эб}$	5 В
Макс. пост. ток коллектора, $I_k$	0,02 А
Предельная температура р-п-перехода, $T_j$	85°C
Граничная частота коэффициента передачи тока, $f_t$	40
Емкость коллекторного перехода, $C_c$	4 пФ
Статический коэф. передачи тока, $\beta$	10

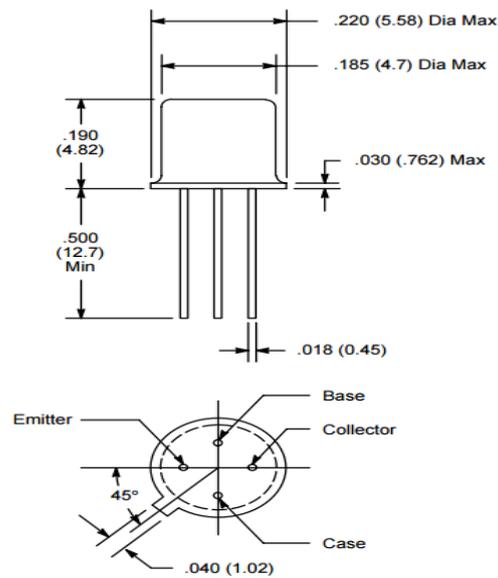


Рисунок 6 - Эскиз транзистора 2N300

Далее необходимо определить ток и напряжение базы транзистора, при которых он работает в ключевом режиме. Это станет возможным после выбора трансформатора для цепи управления и защитных элементов для оптосимистора.

**Вывод:** предварительно выбираем транзистор 2N300. Окончательно судить о правильности выбора данного транзистора можно будет после расчета.

### 1.2.3 Выбор трансформатора напряжения для цепи управления

Трансформатор для цепи управления выбирается по наибольшему напряжению полупроводниковых элементов. Так как  $U_{\text{ex.oc}} = 1,5 \text{ В} < U_{\text{ex.транз.}} = 4 \text{ В}$ , то трансформатор на вторичной обмотке должен иметь значение напряжения  $U_{\text{втор.обм.}} \geq 4 \text{ В}$ . Выбирается трансформатор ТПП214 127/220 50 [7, стр. 88] броневого конструкции с характеристиками:

Таблица 7 – Характеристики трансформатора ТПП214 127/220 50

Параметр	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{тр}}$ , В*А	3,25
Ток первичной обмотки $I_{\text{тр1}}$ , А	0,045/0,025
Ток вторичной обмотки $I_{\text{тр2}}$ , А	0,147
Напряжение на вторичной обмотке, $U_{\text{тр2}}$ , В	4
Типоразмер магнитопровода	ШЛ12x20

Трансформаторы малой мощности типа ТПП предназначены для работы в устройствах, собранных на полупроводниковых приборах в радиоэлектронной аппаратуре, аппаратуре средств связи и электронно-вычислительных машинах, а также в бытовой РЭА при питании от промышленной и специальной сети переменного тока напряжением 40, 115, 127 и 220 В с частотой 50 и 400 Гц. Эти трансформаторы охватывают широкий диапазон напряжений и токов при мощности до 500 В\*А. Общий вид и габаритные размеры трансформатора питания малой мощности броневого конструкции с обмотками из круглого провода и медной ленты показаны на рис. 1244135. Конструктивные размеры приведены в таблице 8.

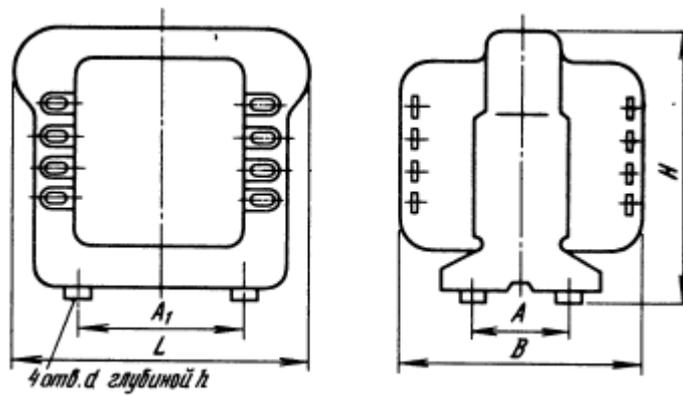


Рисунок 7 - Эскиз трансформатора ТПИ 214

Таблица 8 – Размеры и масса трансформатора ТПИ214

Параметр	Значение
$B_{\max}$ , мм	56
$A$ , мм	30
$A_1$ , мм	35
$H_{\max}$ , мм	56
$L_{\max}$ , мм	52
$d$ , мм	M3
$h$ , мм	5,5
Масса, г.	420

**Вывод:** для питания цепи управления выбираем трансформатор напряжения ТПИ214 127/220 50.

## 1.2.4 Проверка трансформатора напряжения на нагревание

Превышение температуры обмоток и сердечника трансформатора над температурой окружающей среды можно оценить по формуле [8, стр. 22]:

$$\Theta^0 = \frac{P_k + P_c}{\lambda_T (S_{об} + S_c)} + \Delta\Theta^0$$

Где  $P_k$  - суммарные потери в обмотках трансформатора;

$P_c$  - магнитные потери в сердечнике;

$\lambda_T = (10-20) \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду с поверхности обмоток и сердечника трансформатора;

$\Delta\Theta^0 = (10-15)^\circ\text{C}$  - перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным;  $S_c$  - открытая поверхность сердечника трансформатора,  $\text{см}^2$ ;

$S_{об}$  - открытая поверхность обмоток трансформатора,  $\text{см}^2$ .

Для расчета  $S_c$  и  $S_{об}$  целесообразно предварительно выполнить эскиз сердечника (рис. 8), проставить размеры (таблица 9), а затем определить  $S_c$  и  $S_{об}$ .  
Таблица 9 – Размеры магнитопровода трансформатора ТПП214

Типоразмер магнитопровода	а, мм	h, мм	с, мм	L, мм	H, мм	В, мм	h1, мм	Масса, г. не более
ШЛ12х20	12	30	12	48	42	20	6	169

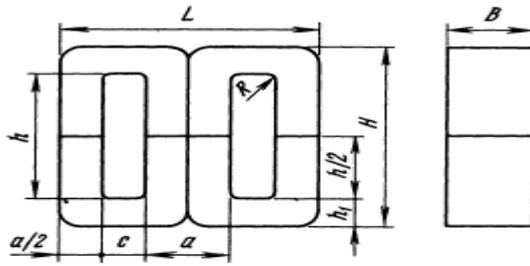


Рисунок 8 - Эскиз сердечника трансформатора ТПП 214

Принимаем  $k_{30} = 0,4$  - коэффициент заполнения окна для маломощных трансформаторов, согласно [8, стр. 16].

$$S_c = 2 \cdot B \cdot H + 2 \cdot (L \cdot H - H \cdot h) + L \cdot B =$$

$$= 2 \cdot 20 \cdot 42 + 2 \cdot (48 \cdot 42 - 42 \cdot 30) + 48 \cdot 20 = 4152 \text{ мм}^2 = 41,52 \text{ см}^2$$

$$S_{об} = (B_{\max} - B) \cdot l + 2 \cdot (B_{\max} - B) \cdot h + 2 \cdot (l \cdot h) =$$

$$= (56 - 20) \cdot 21,6 + 2 \cdot (56 - 20) \cdot 30 + 2 \cdot 21,6 \cdot 30 = 4233,6 \text{ мм}^2 = 42,336 \text{ см}^2$$

Где  $l = 2 \cdot k_{30} \cdot c + a = 2 \cdot 0,4 \cdot 12 + 12 = 21,6 \text{ мм}$  - ширина обмотки,  $B_{\max} = 56 \text{ мм}$  - длина обмотки.

Суммарные потери в обмотках для маломощного трансформатора  $P_k$  можно принять, как  $P_k \approx P_{эл}$ .

Где  $P_{эл}$  - суммарные электрические потери трансформатора.

Выразим и рассчитаем суммарные потери по формуле [8, стр. 19]:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{эл} + P_c} \Rightarrow P_{эл} + P_c = \frac{P}{\eta} - P = \frac{3,25}{0,98} - 3,25 = 0,07 \text{ Вт}$$

Где  $\eta = 0,98$  - КПД трансформатора (рис. 9),  $P$  - номинальная мощность трансформатора.

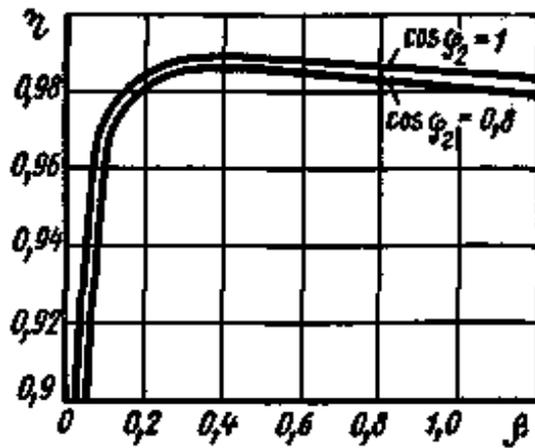


Рисунок 9 - График зависимости КПД от коэффициента мощности трансформатора

Проверяем трансформатор на нагревание, при худших условиях:

$$\Theta^0 = \frac{P_k + P_c}{\lambda_T (S_{об} + S_c)} + \Delta\Theta^0 = \frac{0,07}{10 \cdot (42,3 + 41,5)} + 15 = 15,1^\circ\text{C}$$

Полный перегрев трансформатора:

$$\tau = \Theta_0 + \Theta^0 = 40 + 15,1 = 55,1^\circ\text{C}$$

где  $\Theta_0 = 40^\circ\text{C}$  - принятая температура окружающей среды.

$$\tau < [\tau] \quad 55,1^\circ\text{C} < 85^\circ\text{C} \text{ - условие выполняется.}$$

Где  $[\tau]$  - максимально допустимая температура окружающей среды, для работы трансформатора [7, стр. 87].

Рассматриваемая конструкция трансформатора типа ТПП способна противостоять механическим и климатическим воздействиям, определяемым условиями эксплуатации. Конструкция сохраняет работоспособность при повышенной влажности и во всех случаях температурных воздействиях и обеспечивает необходимый запас электрической прочности изоляции обмоток с учетом категории размещения трансформатора.

**Вывод:** выбранный трансформатор напряжения ТПП214 удовлетворяет условию на нагрев, значит трансформатор напряжения выбран правильно.

## 1.2.5 Расчет транзисторного ключа

Переключающие схемы, кратко именуемые ключами, — необходимые элементы практически всех импульсных и цифровых устройств. В одной из простейших реализаций ключа используется транзисторный каскад с общим эмиттером (ОЭ).

В ключевом режиме работы транзистора напряжение, приходящее на оптосимистор превышает предельно допустимые значения  $U = 4 В > U_{\max} = 1,5 В$ . Для уменьшения напряжения в цепь коллектора необходимо поставить последовательное включение, состоящее, как правило из нескольких диодов, которое в свою очередь будет создавать падение напряжения.

Падение напряжение должно составлять не менее  $U_{\text{нн}} \geq U - U_{\max} \geq 2,5 В$ .

Также необходимо учитывать падение напряжения на тиристоре, который пропускает ток на оптосимистор.

Тиристор выбирается по известным параметрам: максимально допустимому напряжению на оптопаре  $U_{\text{oc.max}} = 1,5 В$  и максимально допустимому току оптопары  $I_{\text{oc.max}} = 0,02 А$ . Выбирается тиристор 2У102А с параметрами [9, стр. 430]:

Таблица 10 – Характеристики тиристора 2У102А

Параметр	Значение
Напряжение открытого состояния, $U_{\text{oc}}$	2,5 В
Ток открытого состояния, $I_{\text{oc}}$	50 мА
Ток управления, $I_y$	20 мА
Отпирающее импульсное напряжение управления, $U_{\text{uy}}$	7 В
Ток в закрытом состоянии, $I_{\text{zc}}$	0,1 мА
Частота не более, $f_y$	1000 Гц

Тиристор кремниевый, диффузионный, структуры р-п-р-п. Предназначен для применения в качестве переключающего элемента малой мощности. Выпускаются в металлостеклянном корпусе с гибкими выводами. Масса тиристора не более 1,2 г.

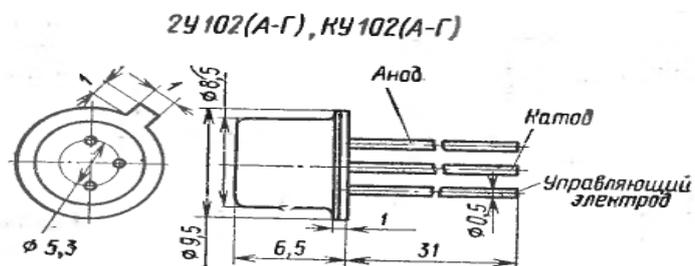


Рисунок 10 - Эскиз тиристора 2У102А

Также выбирается диод ГД107Б [9, стр. 79] с параметрами:

Таблица 11 – Параметры диода ГД107Б

Параметр	Значение
Постоянное прямое напряжение, $U_{пр}$	0,4 В
Постоянный прямой ток, $I_{пр}$	10 мА

Диод германиевый, точечный. Выпускается в стеклянном корпусе с гибкими выводами. Масса диода не более 0,3 г.

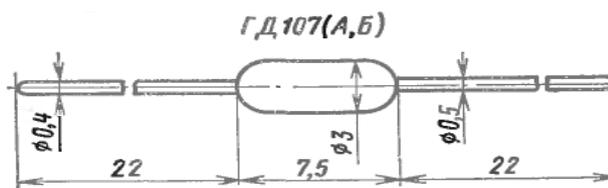


Рисунок 11 - Эскиз диода ГД107Б

Тогда падение напряжения составит:

$$U_{пн} = U_{пр.тир.} + U_{пр.д.} = 2,5 + 0,4 = 2,9 \text{ В} \approx 3 \text{ В}$$

Где  $U_{пр.тир.}$  - прямое напряжение тиристора;

$U_{пр.д.}$  - прямое напряжение диода.

По мере увеличения управляющего напряжения обеспечивается базовый ток, достаточный для насыщения транзистора. Транзистор оказывается в режиме насыщения, то есть, открыт. Имеем состояние ключа: включено. Напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения ( $U_{кн}$ ) очень мало (как и положено для замкнутого ключа). В случае германиевых транзисторов можно считать  $U_{кн} \approx 0,4 В$ .

$I_{кн}$  — ток коллектора насыщения, определяется сопротивлением  $R_к$  в цепи коллектора и напряжением источника питания  $E_к$  на выходе [10]:

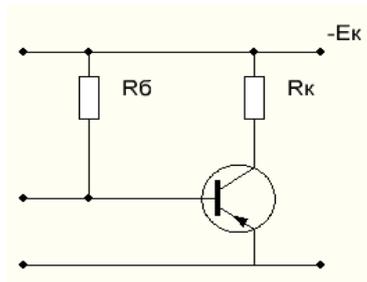


Рисунок 12 - Схема транзистора с сопротивлениями коллектора и базы

$$I_{кн} = \frac{E_к - U_{нп}}{R_к} = \frac{U_{\max}}{R_к} = \frac{1}{300} = 3,3 \text{ мА}$$

Где  $R_к = 2 \cdot R_д = 2 \cdot \frac{U_{нп}}{I_{нп}} = 2 \cdot \frac{1,5}{10 \cdot 10^{-3}} = 300 \text{ Ом}$  - общее сопротивление цепи коллектора.

Ключевой режим характеризуется низким падением напряжения коллектор-эмиттер (порядка 0,1 В). Для перевода транзистора в этот режим необходимо в базу транзистора подать ток, больший чем ток насыщения базы  $I_{бн}$ :

$$I_{бн} = \frac{I_{кн}}{\beta} = \frac{3,3}{10} = 0,33 \text{ мА}$$

Ток насыщения базы задается с помощью резистора с сопротивлением  $R_{бн}$ , равным:

$$R_{бн} = \frac{E_к - U_{бэ0}}{I_{бн}} = \frac{4 - 0,6}{0,33} = 10303 \text{ Ом}$$

где  $U_{бэ0}$  - пороговое напряжение перехода база-эмиттер. Для германиевых транзисторов  $U_{бэ0} = 0,6 В$ .

Выбираем, согласно ГОСТ 28884-90, резистор из ряда E96 с допуском  $\pm 1\%$  с номинальным значением  $R_0 = 10,2 \text{ кОм}$ .

Сопротивление эмиттера в режиме насыщения описывается следующим выражением:

$$R_3 = \frac{E_k}{I_{кн}} - R_k = \frac{4}{3,3 \cdot 10^{-3}} - 300 = 912 \text{ Ом}$$

Независимо от сопротивления резисторов R1 и R2 делителя напряжения ток насыщения базы определяется из выражения:

$$I_{бн} = \frac{K_n}{\beta} \cdot I_{кн} = \frac{1,5}{10} \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} = 0,5 \text{ мА}$$

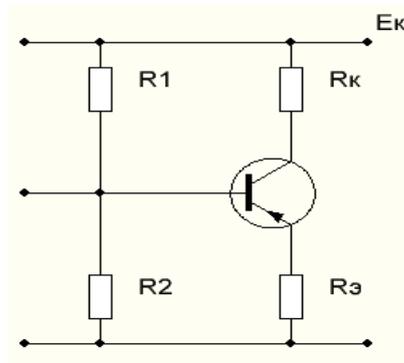


Рисунок 13 - Схема делителей напряжения

где  $K_n = 1,2 \div 2$  - коэффициент насыщения;  $\beta = 10$  - статический коэффициент передачи тока;

Напряжение  $U_б$  на базе равно:

$$U_б = E_k \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_k} + U_{б0} = 4 \cdot \frac{912}{912 + 300} + 0,6 = 3,6 \text{ В}$$

Это же напряжение задается делителем напряжения. Зная  $E_k$  и  $U_б$ , можно определить отношение сопротивлений плеч делителя:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{E_k - U_б}{U_б} = \frac{4 - 3,6}{3,6} = \frac{1}{11}$$

Суммарное сопротивление делителя обычно выбирается так, чтобы ток, протекающий через него был примерно в 10 раз меньше тока коллектора. Составив систему уравнений и решив её, можно найти сопротивления  $R_1$  и  $R_2$

плеч делителя, которые обеспечивают ток базы, необходимый для перевода транзистора в режим насыщения.

$$I_{дел} = \frac{I_{\kappa}}{10} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{10} = 2 \text{ мА}$$

Тогда полное сопротивление резисторов:

$$R_1 + R_2 = \frac{E_{\kappa}}{I_{дел}} = \frac{4}{2 \cdot 10^{-3}} = 2000 \text{ Ом}$$

Найдем сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = 2000 \\ \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{11} \end{cases}$$

Решая систему уравнений, находим:

$$R_2 = 1833 \text{ Ом}$$

$$R_1 = 167 \text{ Ом}$$

По резисторному ряду, в связи с тем, что через резистор  $R_2$  течёт ещё и ток базы, согласно ГОСТ 28884-90 выбираем резистор в сторону уменьшения из ряда E24 с допуском  $\pm 5\%$ :  $R_2 = 1,8 \text{ кОм}$ .

Для сопротивления  $R_1$  выбираем, согласно ГОСТ 28884-90, резистор из E96 с допуском  $< \pm 5\%$ :  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ .

Для защиты транзисторов от перенапряжений, наведенных внешними источниками и возникающих в цепях питания, целесообразно использование быстродействующих диодов, стабилитронов или специальных полупроводниковых ограничителей напряжения, включаемых между коллектором и эмиттером [11, стр. 35].

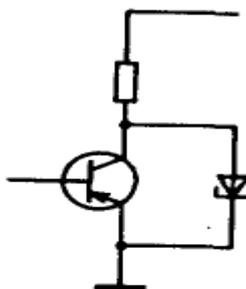


Рисунок 14 - Схема включения защитного стабилитрона

Выбирается стабилитрон 2С143Д-1 [9, стр.277] по напряжению стабилизации, которое должно граничить с предельно допустимым напряжением коллектор-эмиттер транзистора  $U_{ст} \geq U_{кэ}$  и по предельно допустимому значению тока стабилизации  $I_{ст} = 12 \text{ мА}$ . При этом рассеиваемая мощность  $P_{ст} = 50 \text{ мВт}$ .

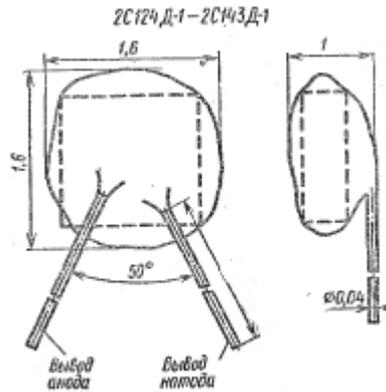


Рисунок 15 - Эскиз стабилитрона 2С143Д-1

Для формирования импульсных сигналов в транзистор, а затем на оптосимистор, в схеме к эмиттеру транзистора подключается конденсатор. Для количественной оценки коммутационных параметров можно воспользоваться следующими выражениями [12]:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{сп}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40} = 0,004$$

где  $f_{сп}$  - граничная частота коэффициента передачи тока;

Тогда емкость конденсатора в цепи эмиттера транзистора вычисляется:

$$C_u = \frac{\tau}{R_k} = \frac{0,004}{300} = 1,33 \cdot 10^{-5} = 133 \text{ мкФ}$$

Из ряда емкостей, согласно ГОСТ 28884-90, выбирается емкость  $C_u = 13 \text{ мкФ}$ . По [13, стр.402] выбирается марка конденсатора К50-9.

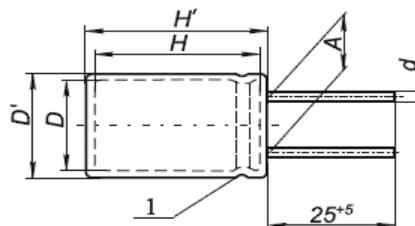


Рисунок 16 - Эскиз конденсатора К50-9

Рассчитанная емкость в 133 мкФ с индуктивностью образует колебательный контур. Для расчета индуктивности воспользуемся формулой Томсона, при частоте 50 Гц:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Преобразуем формулу Томсона, для расчета индуктивности:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot C} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} = 76 \text{ мГн}$$

Выбираем индуктивность, согласно [14], с кодовой маркировкой 783J.

Разделительные конденсаторы выбирают исходя из требуемой амплитудно-частотной характеристики (полосы пропускания). Для нормальной работы транзисторных ключей на частотах до 1000 Гц необходимо выбирать конденсаторы номиналом не менее 5 мкФ. Каждый каскад со своим конденсатором добавляет свой спад АЧХ. Обычно, достаточно разделительной емкости 5,0 мкФ. Но из-за емкости на эмиттере, емкость следует увеличить до 500,0-2000,0 мкФ.

Выбирается конденсатор К50-29 [13, стр. 307]  $C_p = 1000 \text{ мкФ}$ , согласно ГОСТ 28884-90.

**Вывод:** выбранный ранее транзистор 2N300 удовлетворяет расчетным условиям, также выбраны элементы защиты: стабилитрон 2С143Д-1, конденсатор К50-29 и токоограничивающие резисторы.

## 1.2.6 Расчет теплового режима транзисторного ключа

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

$$P_{mp} = I_k \cdot U_{кн} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 0,02 \cdot 0,4 \cdot \left(1 + \frac{1}{10}\right) = 0,009 \text{ Вт},$$

$$20 \text{ мВт} > 9 \text{ мВт}$$

Следовательно условие  $P_c > P_{mp}$  выполняется.

Мощность, рассеиваемая на каждом из резисторов:

$$P_{R1} = I_{дел}^2 \cdot R_1 = (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 200 = 0,0008 \text{ Вт}$$

$$P_{R2} = I_{дел}^2 \cdot R_2 = (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1800 = 0,007 \text{ Вт}$$

$$P_{R\sigma} = I_{дел}^2 \cdot R_{\sigma} = (0,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10200 = 0,0025 \text{ Вт}$$

$$P_{R_3} = I_{кн}^2 \cdot R_3 = (3,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 912 = 0,01 \text{ Вт}$$

Исходя из рассчитанных мощностей, по ГОСТ 28884-90, выбираются резисторы типа С2-23 номинальной мощностью  $P_n = 0,062 \text{ Вт}$  [5, стр.80].

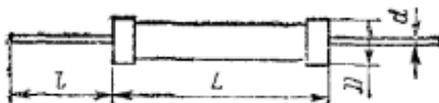


Рисунок 17 - Эскиз резистора С2-23

**Вывод:** транзистор 2N300 удовлетворяет условию по максимально-допустимой мощности рассеивания, значит транзистор выбран правильно. По рассчитанным значениям рассеиваемой мощности резисторов, выбирается тип резисторов С2-23.

## 1.2.7 Расчет элементов защиты оптопары

В схеме (рис. 18) имеется два элемента, которые необходимо рассчитать: защитные сопротивления  $R_D$ ,  $R_G$ .

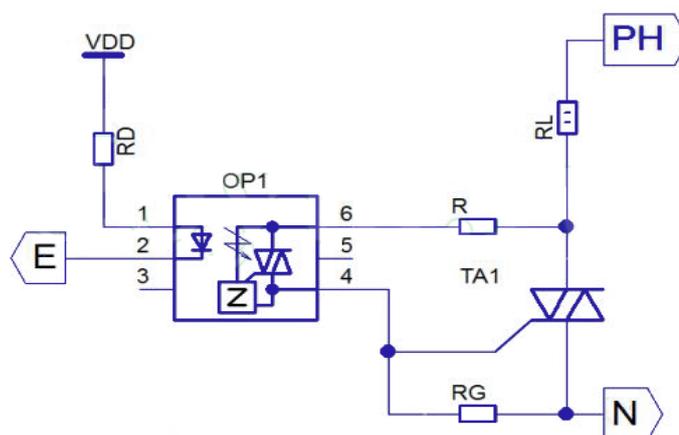


Рисунок 18 - Схема соединения и защиты оптопары

Расчет параметра резистора  $R_D$ . Вычисление сопротивления данного резистора влияет от наименьшего прямого тока ИК светодиода, обеспечивающего открытие симистора. Таким образом,

$$R_D = \frac{E_k - U_{oc.max}}{I_{ex.min}} = \frac{4 - 1,5}{10 \cdot 10^{-3}} = 250 \text{ Ом}$$

Необходимо сделать  $I_{ex.min} = 15 \text{ mA}$  с учетом понижения эффективности свечения светодиода в течении срока службы (добавить 5 mA) получаем:

$$R_D = \frac{E_k - U_{oc.max}}{I_{ex.min}} = \frac{4 - 1,5}{15 \cdot 10^{-3}} = 167 \text{ Ом}$$

Выбирается резистор из ряда E192  $R = 167 \text{ Ом}$ , согласно ГОСТ 28884-90.

Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R_D$ :

$$P_{RD} = \frac{(E_k)^2}{R_D} = \frac{4^2}{167} = 0,096 \text{ Вт}$$

Выбирается тип резистора C2-23 с номинальной мощностью  $P_n = 0,125 \text{ Вт}$  [5, стр.80].

Расчет параметра сопротивления  $R$  был проведен ранее, при выборе оптосимистра  $P_R = 1,68 \text{ Вт}$ .

Резистор  $R_g$  подключается, только если электрод симистора имеет повышенную чувствительность. Как правило, сопротивление  $R_g$  находится в диапазоне от 100 Ом до 5 кОм. Желательно применять 1 кОм.

Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R_g$ :

$$P_{R_g} = \frac{(U_{oc.max})^2}{R_g} = \frac{(1,5)^2}{1000} = 0,00225 \text{ Вт}$$

Для сопротивления  $R_g$  выбирается тип резистора С2-23 с номинальной мощностью  $P_n = 0,125 \text{ Вт}$  [5, стр. 80].

Сигнал, поступающий от оптосимистора на управляющий электрод симистора, нужен только для его открывания. Но при большой частоте переключения коммутируемого напряжения, возникает большая вероятность спонтанного включения управляемого симистора, даже если отсутствует сигнал управления.

Факторами ложных срабатываний могут быть выбросы напряжения при включении ключа, подключенного к индуктивной нагрузке, импульсные помехи в линиях питания нагрузки. Действенный способ устранения данных неприятных моментов – применение в схеме снабберной (демпфирующей) RC – цепочки, которая подключается параллельно выходу ключевого блока.

Рекомендуемая схема подключения снабберной цепочки представлена в разделе выбор и расчет оптопары. Параметры демпфирующей RC-цепочки (таблица 4):

$$C_{демп} = 0,1 \text{ мкФ} ; R_{демп} = 100 \text{ Ом}.$$

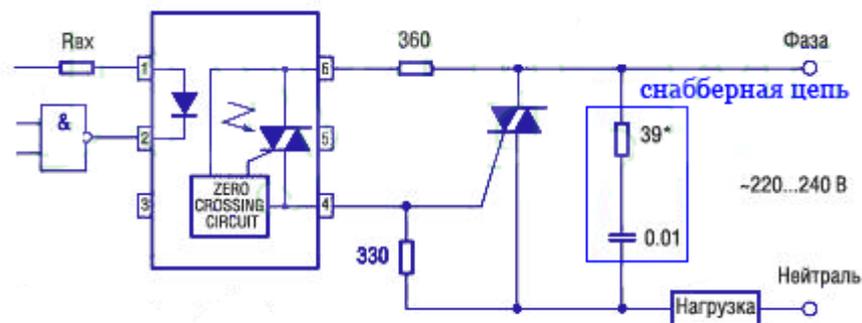


Рисунок 19 - Схема включения снабберной цепи

Выбирается конденсатор К73-17, согласно [13].

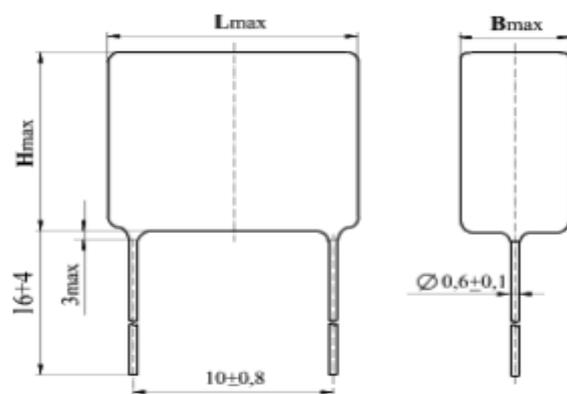


Рисунок 20 - Эскиз конденсатора K73-17

**Вывод:** рассчитанную снабберную цепь устанавливаем на печатной плате управления симисторным пускателем, подключаем параллельно силовым симисторам.

## 1.2.8 Выбор диодов системы управления

Ранее, в разделе расчета транзисторного ключа, был выбран тиристор для платы управления 2У102А, отпирающий постоянный ток управления тиристора  $I_{y.om} = 20 \text{ мА}$ . Исходя из параметров напряжения  $U_{np} = 2,5 \text{ В}$  и тока управления тиристора, выбирается диод для системы управления КД103А [15, стр. 37] со значением прямого тока  $I_{np.d.} = 50 \text{ мА}$ .

Необходимо выбрать ограничивающий резистор, который будет выполнять защитную функцию диода, а также обеспечивать необходимый ток. Ток, открывающий тиристор должен быть больше отпирающего постоянного тока управления тиристора  $I_{y.mup.} > I_{y.om.}$ , при этом ток диода не должен превышать предельного значения, отсюда условие  $I_{np.d.} > I_{y.mup.} > I_{y.om.}$ .

Сопротивление резистора:

$$R_y = \frac{E_k}{I_{y.mup.}} = \frac{4}{30 \cdot 10^{-3}} = 133 \text{ Ом}$$

Согласно ГОСТ 28884-90, выбирается резистор из ряда Е96 сопротивлением  $R_y = 133 \text{ Ом}$ .

При этом мощность, рассеиваемая на резисторе:

$$P_y = \frac{(E_k)^2}{R_y} = \frac{4^2}{133} = 0,12 \text{ Вт}$$

Марка резистора С2-23 с номинальной рассеиваемой мощностью  $P_n = 0,125 \text{ Вт}$  [5, стр. 80].

**Вывод:** выбрали диод управления КД103А с токоограничивающим резистором типа С2-23.

## 1.3 Выбор и расчет элементов блока защиты

### 1.3.1 Выбор стабилитрона

Выбор и расчет элементов блока защиты удобнее всего начать, исходя из характеристик транзистора, т.к. для унификации платы управления, транзисторы лучше выбирать одинаковыми. Зная параметры транзистора, а именно ток базы  $I_b = 20 \text{ мА}$  и максимальное значение напряжения база-коллектор  $U_{бк} = 7 \text{ В}$ , можно выбрать стабилитрон. Стабилитрон выбирается, исходя из условия, что ток стабилизации будет больше тока базы транзистора, чтобы последний перешел в ключевой режим, а напряжение стабилизации не должно превышать максимально допустимого значения напряжения коллектор-база. Выбирается стабилитрон 2С156Б [9, стр. 284] с параметрами:

Таблица 12 – Параметры стабилитрона 2С156Б

Параметр	Значение
Ток стабилизации, $I_{ст}$	10 мА
Напряжение стабилизации, $U_{ст}$	5,6 В
Максимальный ток стабилизации, $I_{ст.маx}$	18 мА
Рассеиваемая мощность, $P_{рас}$	0,1 Вт

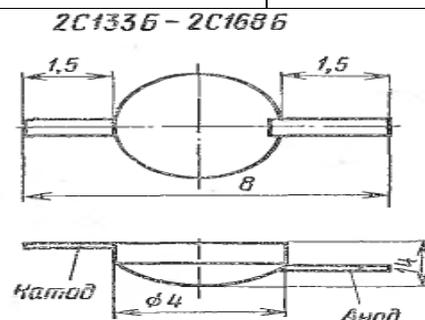


Рисунок 21 - Эскиз стабилитрона 2С156Б

**Вывод:** выбран стабилитрон блока защиты 2С156Б. Для дальнейшего проектирования необходимо выбрать трансформаторы тока ТА1-ТА3.

### 1.3.2 Выбор трансформатора тока

Параметры трансформаторов ТА1-ТА3 и резисторов R1, R5-R7 выбираются так, что при номинальном токе во всех трех фазах напряжение, снимаемое с потенциометра R1, меньше напряжения пробоя стабилитрона  $U_{R1} < U_{cm}$ .

Выбирать трансформатор нужно исходя из условий, что напряжение не должно быть меньше напряжения питания, а также не больше напряжения стабилизации  $U_{cm} > U_{TA} \geq E_k$ , в противном случае, необходимо будет создать падение напряжения, чтобы выполнялось условие  $U_{R1} < U_{cm}$ .

Выбираем трансформатор ТА1-127/220-50М [7, стр.181].

Электрические параметры анодных трансформаторов ТА на 50 Гц, 127/220 В — с уменьшенным расходом меди представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Параметры трансформатора ТА1

Тип трансформатора	Мощность, ВА	Ток первичной обмотки, А. 127/220 В	Номинальные напряжения вторичных обмоток, В.				Допустимые токи вторичных обмоток, А.			Тип и размеры сердечника, мм.
			11-12	15-16	19-20	21-22	11-12	15-16	9-20	
			13-14	17-18			13-14	17-18	21-22	
ТА1-127/220-50М	15	0,17/0,1	28	8	6	6	0,13	0,09	0,13	ШЛМ20x20

Трансформатор тока по существу представляет собой маломощный трансформатор с первичной и вторичной обмотками. Первичная обмотка имеет малое число витков ( $W1 = 1 \div 3$ ), а вторичная  $W2$  - несколько сот витков. Во вторичной цепи ТА должно быть включено незначительное сопротивление (обычно не более одного Ома), так как нормальным для ТА является режим короткого замыкания.

**Вывод:** выбран трансформатор тока ТА1-127/220-50М. Во вторичную обмотку трансформатора подключаем резисторы с сопротивлением 1 Ом.

### 1.3.3 Проверка трансформатора тока на нагревание

Превышение температуры обмоток и сердечника трансформатора над температурой окружающей среды можно оценить по формуле [8, стр. 22]:

$$\Theta^0 = \frac{P_k + P_c}{\lambda_T (S_{об} + S_c)} + \Delta\Theta^0$$

Где  $P_k$  - суммарные потери в обмотках трансформатора;

$P_c$  - магнитные потери в сердечнике;

$\lambda_T = (10-20) \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду с поверхности обмоток и сердечника трансформатора;

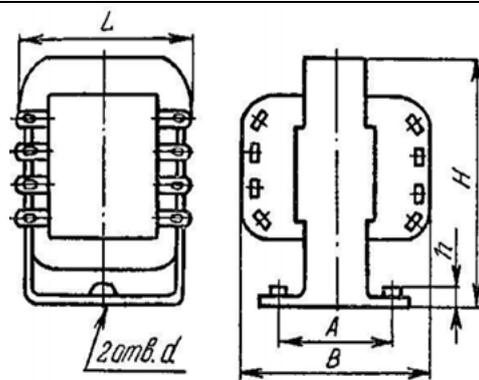
$\Delta\Theta^0 = (10-15)^\circ\text{C}$  - перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным;

$S_c$  - открытая поверхность сердечника трансформатора,  $\text{см}^2$ ;

$S_{об}$  - открытая поверхность обмоток трансформатора,  $\text{см}^2$ .

Габаритные и установочные размеры, масса трансформатора ТА на 50 Гц, 127/220 В на броневых сердечниках ШЛМ, конструкция с уменьшенным расходом меди представлены в таблице 14 [7]:

Таблица 14 – Размеры и конструкция магнитопровода трансформатора ТА1

Тип и размер сердечника	Размеры, мм							Масса, г.	Конструкция
	A	A1	B	H	h	L	d		
ШЛМ20x20	35	46	63	75	6,5	68	M4	750	
ШЛМ20x25	40		68					850	
ШЛМ20x32	46		75					1000	

Конструктивные размеры ленточных магнитопроводов типа ШЛМ представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Размеры магнитопровода ШЛМ20x20

Типоразмер магнитопровода	a, мм	b, мм	c, мм	A, мм	H, мм	h, мм	h1, мм
ШЛМ20x20	20	20	12	64	56	36	10

Для расчета  $S_c$  и  $S_{об}$  целесообразно предварительно выполнить эскиз магнитопровода, проставить размеры, а затем определить  $S_c$  и  $S_{об}$ .

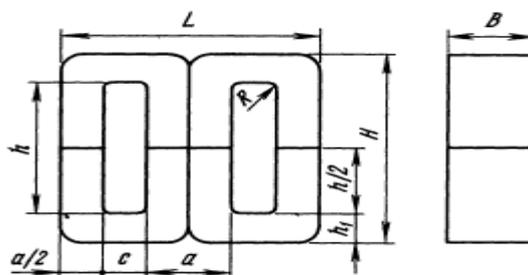


Рисунок 22 - Общий вид ленточных броневого магнитопроводов типа ШЛ, ШЛМ, ШЛО, ШЛП

Принимаем  $k_{30} = 0,4$  - коэффициент заполнения окна для маломощных трансформаторов, согласно [8, стр. 16].

$$S_c = 2 \cdot B \cdot H + 2 \cdot (L \cdot H - H \cdot h) + L \cdot B =$$

$$= 2 \cdot 20 \cdot 56 + 2 \cdot (68 \cdot 56 - 56 \cdot 36) + 68 \cdot 20 = 5392 \text{ мм}^2 = 53,9 \text{ см}^2$$

$$S_{об} = (B_{\max} - B) \cdot l + 2 \cdot (B_{\max} - B) \cdot h + 2 \cdot (l \cdot h) =$$

$$= (57 - 20) \cdot 29,6 + 2 \cdot (57 - 20) \cdot 36 + 2 \cdot 29,6 \cdot 36 = 5890 \text{ мм}^2 = 58,9 \text{ см}^2$$

где  $l = 2 \cdot k_{30} \cdot c + a = 2 \cdot 0,4 \cdot 12 + 20 = 29,6 \text{ мм}$  - ширина обмотки,  $B_{\max} = 56 \text{ мм}$  - длина обмотки.

Суммарные потери в обмотках для маломощного трансформатора  $P_k$  можно принять, как  $P_k \approx P_{эл}$ ,

где  $P_{эл}$  - суммарные электрические потери трансформатора.

Выразим и рассчитаем суммарные потери по формуле [8, стр. 19]:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{эл} + P_c} \Rightarrow P_{эл} + P_c = \frac{P}{\eta} - P = \frac{15}{0,98} - 15 = 0,3 \text{ Вт},$$

где  $\eta = 0,98$  - КПД трансформатора,  $P$  - номинальная мощность трансформатора.

Проверяем трансформатор на нагревание, при худших условиях:

$$\Theta^0 = \frac{P_k + P_c}{\lambda_T (S_{об} + S_c)} + \Delta\Theta^0 = \frac{0,3}{10 \cdot (58,9 + 53,9)} + 15 = 15,1^\circ\text{C}$$

Полный перегрев трансформатора:

$$\tau = \Theta_0 + \Theta^0 = 40 + 15,1 = 55,1^\circ\text{C}$$

где  $\Theta_0 = 40^\circ\text{C}$  - принятая температура окружающей среды.

$$\tau < [\tau] \quad 55,1^\circ\text{C} < 85^\circ\text{C} \text{ - условие выполняется,}$$

где  $[\tau]$  - максимально допустимая температура окружающей среды, для работы трансформатора [7, стр. 87].

**Вывод:** выбранный трансформатор ТА1 полностью удовлетворяет условиям допустимых рабочих температур.

### 1.3.4 Выбор потенциометра R1

Потенциометр R1 в блоке защиты – это регулятор напряжения для стабилитрона и соответственно для транзистора. При превышении напряжения на потенциометре напряжения стабилизации  $U_{R1} > U_{ст}$  стабилитрон будет переходить в проводящее состояние. Поэтому необходимо подобрать сопротивление потенциометра таким образом, чтобы в нормальном режиме работы пускателя стабилитрон был заперт, а при аварийных ситуациях (перегрузке, потере фазы) стабилитрон переходил в открытое состояние, тем самым размыкая цепь управления.

Для выпрямления напряжения с трансформаторов тока в цепь ставятся диоды, которые выбираются в соответствии с номинальным током вторичной обмотки трансформатора  $I_{TA2} = 130 \text{ мА}$ .

Выбирается диод КД106А с параметрами [15]:

Таблица 16 – Параметры диода КД106А

Параметр	Значение
Постоянное прямое напряжение, $U_{np}$	1 В
Постоянный прямой ток, $I_{np}$	300 мА
Постоянный обратный ток, $I_{обр}$	10 мкА
Постоянное обратное напряжение, $U_{обр}$	100 В
Время обратного восстановления не более, $t_{обр}$	0,45 мкс

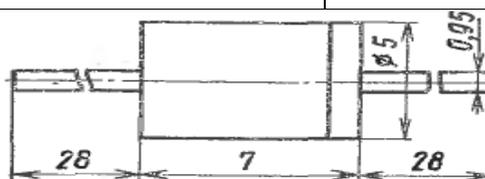


Рисунок 23 - Эскиз диода КД106А

Тогда значение выпрямленного напряжения на потенциометре:

$$U_{R1} = U_{TA} - U_{np.д} = 6 - 1 = 5 \text{ В}$$

Выбирается потенциометр AD8400 [16] с параметрами:

Таблица 17 – Параметры потенциометра AD8400

Параметр	Значение
Номинальное напряжение на потенциометре, $U_{nn}$	5 В
Номинальное сопротивление потенциометра, $R_{nn}$	330 Ом
Максимальное сопротивление потенциометра, $R_{n.max}$	1 кОм

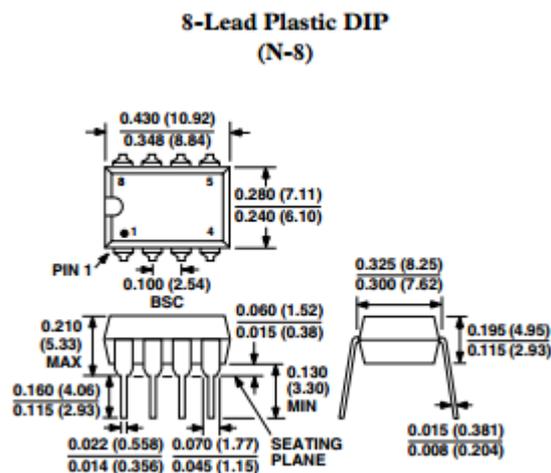


Рисунок 24 - Эскиз и распиновка потенциометра AD8400

Тогда ток, протекающий через потенциометр:

$$I_n = \frac{U_{nn}}{R_{nn}} = \frac{5}{330} = 0,015 \text{ A.}$$

Мощность, рассеиваемая на потенциометре:

$$P_n = \frac{U_{nn}^2}{R_{nn}} = \frac{25}{330} = 0,076 \text{ Вт}$$

**Вывод:** выбран потенциометр AD8400 и выпрямляющий диод КД106А для блока защиты.

### 1.3.5 Расчет защиты при потере фазы

Переход электродвигателя в однофазный режим сопровождается перераспределением токов и напряжений между фазами. Если обмотки двигателя соединены по схеме "звезда", то после потери фазы образуется схема, показанная на рис. 25. Две последовательно соединенные обмотки двигателя оказываются включенными на линейное напряжение  $U_{AB}$ , двигатель при этом оказывается в однофазном режиме работы.

Сделаем небольшой расчет, определим токи, протекающие по обмоткам двигателя и сравним их с токами при трехфазном питании.

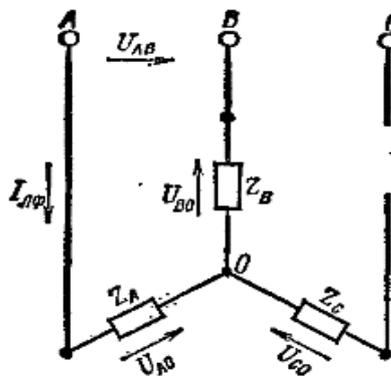


Рисунок 25 - Соединение обмоток двигателя по схеме "звезда" после потери фазы

Так как сопротивления  $Z_A$  и  $Z_B$  соединены последовательно, напряжения на фазах А и В будут равны половине линейного:

$$U_{AO} = U_{BO} = \frac{U_{AB}}{2}$$

Приблизительно величину тока можно определить исходя из следующих соображений.

Пусковой ток фазы А при потере фазы:

$$I_{1\phi} = \frac{U_{AO}}{Z_A} = \frac{U_{AB}}{2 \cdot Z_A}$$

Пусковой ток фазы А при трехфазном режиме:

$$I_{3\phi} = \frac{U_{AO}}{Z_A} = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3} \cdot Z_A}$$

где  $U_{AO}$  — фазовое напряжение сети.

Отношение пусковых токов:

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86$$

Из соотношения следует, что при потере фазы пусковой ток составляет 86% от величины пускового тока при трехфазном питании. Если учесть, что пусковой ток короткозамкнутого асинхронного двигателя в 6 - 7 раз больше номинального, то получается, что по обмоткам двигателя протекает ток  $I_{1\phi} = 0,86 \times 6 = 5,16 I_n$ , т. е. в пять с лишним раз превышающий номинальный. За короткий промежуток времени такой ток перегреет обмотку.

Из приведенного расчета видно, что рассматриваемый режим работы весьма опасен для двигателя и в случае его возникновения защита должна отключить с незначительной выдержкой времени.

**Вывод:** обрыв фазы для асинхронного двигателя является аварийным режимом. Расчет показал, что ток протекающий по обмоткам двигателя при обрыве фазы будет составлять  $5,16 \cdot I_n$ . За скорость срабатывания блока защиты отвечает конденсатор  $C1$ , который посылает импульсы на динистор  $VD4$ , который в свою очередь является ключом в цепи управления тиристора  $VS4$ . Поэтому очень важно правильно рассчитать и выбрать конденсатор  $C1$ .

### 1.3.6 Расчет и выбор конденсатора блока защиты

После открытия транзистора  $VT1$  начинается заряд конденсатора  $C1$ . Для правильного выбора конденсатора необходимо рассчитать его емкость. Для этого воспользуемся следующими формулами [17]:

Вычисляем время заряда конденсатора (в течение которого ток потребляется от сети). Так как напряжение изменяется по синусоидальному закону:

$$t_{\text{зар}} = \frac{\arccos \frac{U_{\min}}{U_{\max}}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\arccos \frac{5}{8,46}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,003 \text{ с},$$

где  $U_{\min} = U_{cp} = 5 \text{ В}$  - минимальное напряжение на конденсаторе,  
 $U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{cp} = 1,41 \cdot 5 = 8,46 \text{ В}$  - максимальное напряжение на конденсаторе.

Вычисляем время разряда конденсатора:

$$t_{\text{раз}} = T - t_{\text{зар}} = 0,0067 - 0,003 = 0,0037 \text{ с},$$

где  $T = \left(\frac{1}{f}\right) / 3 = \frac{1}{50} / 3 = 0,0067 \text{ с}$  - период для трехфазного однополупериодного выпрямителя.

Находим емкость конденсатора, на которой за время  $t(\text{раз})$  при токе нагрузки  $I_{\text{нагр}}$  напряжение с  $U_{\max}$  уменьшится до  $U_{\min}$ :

$$C = I_{\text{нагр}} \cdot \frac{t_{\text{раз}}}{U_{\max} - U_{\min}} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,0037}{8,46 - 5} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

где  $I_{\text{нагр}} = I_{\kappa} = 0,02 \text{ А}$ .

Находим пиковый зарядный ток:

$$I_{\text{мик}} = C \cdot \frac{dU}{dt} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3,46}{0,003} = 23 \text{ мА},$$

где  $dU = U_{\max} - U_{\min}$ , а  $dt$  - это время заряда конденсатора, т.е.  $t(\text{зар})$ .

Находим среднеквадратичное значение импульсного тока через конденсатор по формуле:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_{\text{зар}}^2 + I_{\text{раз}}^2} = \sqrt{9^2 + 11^2} = 14,2 \text{ мА},$$

где  $I(\text{зар})$ -среднеквадратичный ток через конденсатор на цикле заряда, а  $I(\text{разр})$  - среднеквадратичный ток через конденсатор на цикле разряда.

$$I_{\text{зар}} = I_{\text{мик}} \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{зар}}}{T}} / 3 = 23 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{0,003}{0,0067}} / 3 = 9 \text{ мА}$$

На интервале разряда через конденсатор течет ток нагрузки, поэтому

$$I_{\text{раз}} = I_{\text{нагр}} \cdot \frac{t_{\text{раз}}}{T} = 0,02 \cdot \frac{0,0037}{0,0067} = 11 \text{ мА}$$

Из ряда емкостей, согласно ГОСТ 28884-90, выбирается емкость  $C = 20 \text{ мкФ}$ . По [13, стр.393] выбирается марка конденсатора К50-3Б.

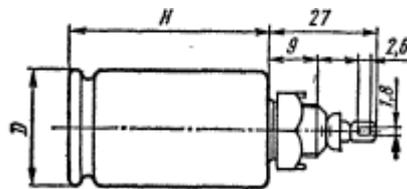


Рисунок 26 - Эскиз конденсатора К50-3Б

**Вывод:** По результатам проведенных расчетов выбран конденсатор для блока защиты К50-3Б.

### 1.3.7 Расчет и выбор динистора и резистора для выводов 7, 8

Напряжение с конденсатора  $CI$  на выход 7, 8 не должно подаваться до тех пор, пока не превысит напряжение переключения динистора  $VD4$   $U_{пер.дин.} > U_{C1max}$ . Отсюда следует, что напряжение переключения динистора  $U_{пер.дин.} > 8,5 В$  - это является условием выбора динистора в блок защиты. Но при этом следует учитывать тот факт, что разница с расчетной величиной напряжения должна быть минимальной, иначе в противном случае, динистор сработает слишком поздно.

Выбирается динистор 2Н102А [9, стр.423] с параметрами:

Таблица 18 – Параметры динистора 2Н102А

Параметр	Значение
Напряжение в открытом состоянии, $U_{oc}$	1,5 В
Ток в открытом состоянии, $I_{oc}$	200 мА
Импульсное отпирающее напряжение при $R_n = 500 Ом$ , $U_{отп}$	20 В
Импульсное неотпирающее напряжение при $R_n = 500 Ом$ , $U_{неотп}$	2 В
Время выключения $t_{выкл}$ , не более	40 мкс

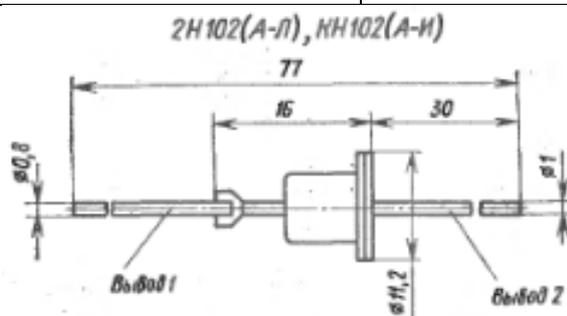


Рисунок 27 - Эскиз динистора 2Н102А

Динистор перейдет в открытое состояние при импульсном напряжении переключения  $U_{пер} \geq 20 В$  при сопротивлении нагрузки  $R_n = 500 Ом$ . Т.к. рассчитанное номинальное сопротивление потенциометра  $R_{nn} = 330 Ом$ , то динистор перейдет в открытое состояние при напряжении (ток остается неизменным):

$$U_{отк.дин} = \frac{R_{nn} \cdot U_{отк}}{R_n} = \frac{330 \cdot 20}{500} = 13,2 В$$

Также необходимо выбрать токоограничивающий резистор для управляющего электрода тиристора:

$$R_{выв.8} = \frac{U_{пер} - U_{тир}}{I_{у.т.}} = \frac{20 - 2,5}{20 \cdot 10^{-3}} = 875 Ом,$$

где  $U_{тир}$  - прямое напряжение тиристора,  $I_{у.т.}$  - ток управления тиристора.

Выбирается резистор, согласно ГОСТ 28884-90, с номинальным сопротивлением  $R_{выв.8} = 876 Ом$ , тип резистора С2-23, согласно [5].

Рассчитаем мощность, рассеиваемую на резисторе:

$$P = \frac{U_R^2}{R_{выв.8}} = \frac{17,5}{876} = 0,35 Вт,$$

где  $U_R = U_{пер} - U_{тир}$  - напряжение на резисторе.

**Вывод:** выбран динистор 2Н102А и резистор типа С2-23 для блока защиты.

## 1.4 Выбор предохранителя

### 1.4.1 Принцип выбора предохранителя при пуске двигателя

Основным условием, определяющим выбор плавких предохранителей для защиты асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, является отстройка от пускового тока.

Все электродвигатели разбиты на две группы по времени и частоте пуска. К первой группе относятся двигатели с легким пуском. Такими двигателями считаются двигатели вентиляторов, насосов, металлорежущих станков и т. п., пуск которых заканчивается за 3 - 5 с, пускаются эти двигатели редко, менее 15 раз в 1 ч.

К двигателям с тяжелым пуском относятся двигатели подъемных кранов, центрифуг, шаровых мельниц, пуск которых продолжается более 10 с, а также двигатели, которые пускаются очень часто - более 15 раз в 1 ч. К этой категории относят и двигатели с более легкими условиями пуска, но особо ответственные, для которых совершенно недопустимо ложное перегорание вставки при пуске. Выбор номинального тока плавкой вставки для отстройки от пускового тока производится по выражению:  $I_{вс} \geq I_{пд} / K$ ,

где  $K$  – коэффициент, учитывающий условия пуска двигателя. Для правильного выбора предохранителя, необходимо знать время пуска и пусковой ток двигателя. Для решения этой задачи воспользуемся математическим моделированием в среде MatLab/Simulink.

# **Математическое моделирование пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

## **Актуальность**

**Моделирование** – это исследование какого-либо объекта или системы объектов путем построения и изучения их моделей. Это использование моделей для определения или уточнения характеристик и рационализации способов построения вновь конструируемых объектов.

На идее моделирования базируется любой метод научного исследования, при этом, в теоретических методах используются различного рода знаковые, абстрактные модели, в экспериментальных - предметные модели.

При исследовании сложное реальное явление заменяется некоторой упрощенной копией или схемой, иногда такая копия служит лишь только для того чтобы запомнить и при следующей встрече узнать нужное явление. Иногда построенная схема отражает какие - то существенные черты, позволяет разобраться в механизме явления, дает возможность предсказать его изменение. Одному и тому же явлению могут соответствовать разные модели. Задача исследователя - предсказывать характер явления и ход процесса.

## **Принципы, методы и средства исследования**

Обычно под имитационной моделью понимается комплекс программ для ЭВМ, описывающий функционирование отдельных блоков систем и правил взаимодействия между ними. Использование случайных величин делает необходимым многократное проведение экспериментов с имитационной системой (на ЭВМ) и последующий статистический анализ полученных результатов.

Таким образом, работа с имитационной системой представляет собой эксперимент, осуществляемый на ЭВМ. В чем же заключаются преимущества?

- Большая близость к реальной системе, чем у математических моделей;
- Использование зависимостей более сложного характера, не описываемых простыми математическими соотношениями.

## Описание имитационной модели

Имитация - это "численный метод проведения на вычислительных машинах с математическими моделями, описывающими поведение сложным систем в течение продолжительных периодов времени". Принципиальное отличие имитационного эксперимента от реального заключается в том, что в процессе имитации эксперимент проводится не с самой системой, а с ее моделью. Имитационная модель создается в рабочей среде Simulink с использованием блоков. Блок – это графический, функциональный инструмент, с помощью которого составляется имитационная модель. Каждый блок в среде Simulink описан математическими уравнениями. Поэтому для моделирования достаточно знать исходные данные, которые необходимо внести в каждый блок, чтобы результат имитации получился максимально приближен к ожидаемому результату.

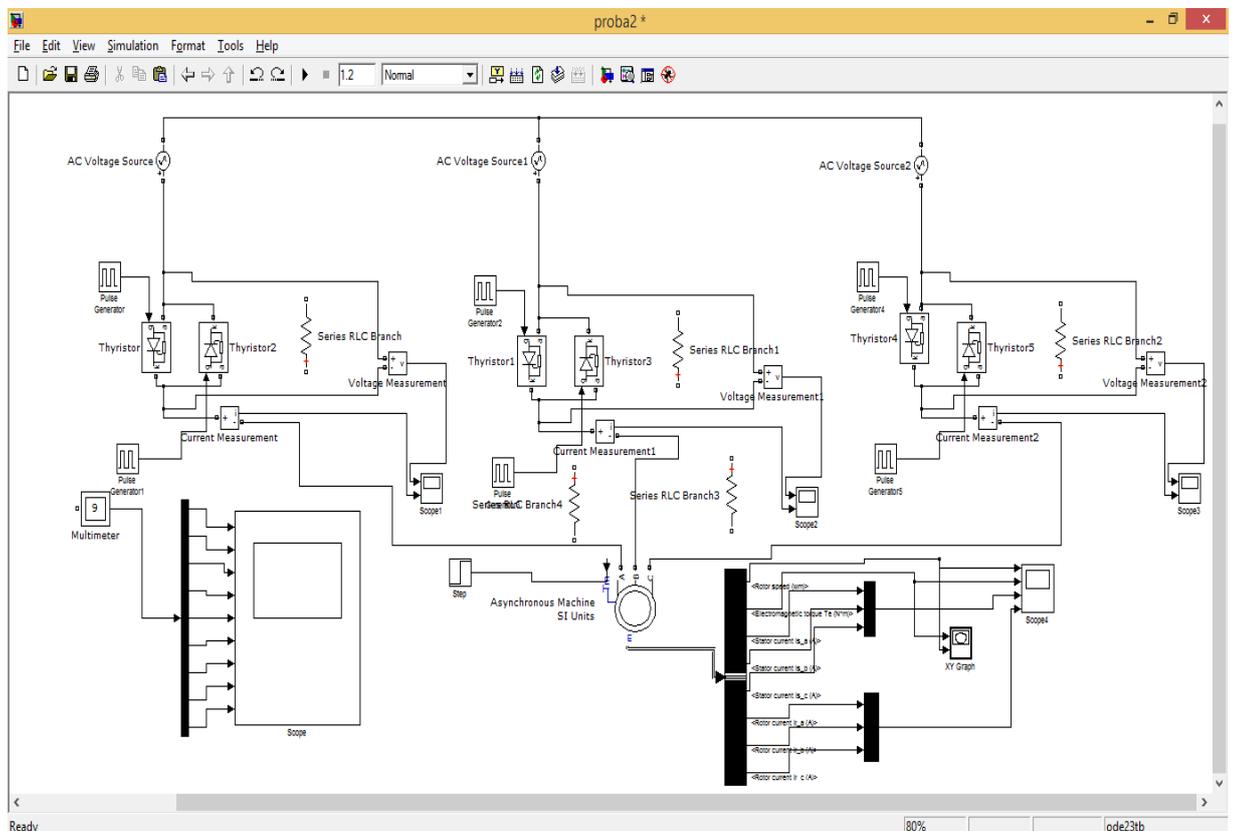


Рисунок 28 - Имитационная схема силовой части пускателя в среде MatLab/Simulink

Основными блоками в имитационной схеме являются симисторная ячейка, состоящая из двух встречно-параллельных тиристоров, и блок асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Для каждого блока задаются рассчитанные параметры (рис. 29, 30).

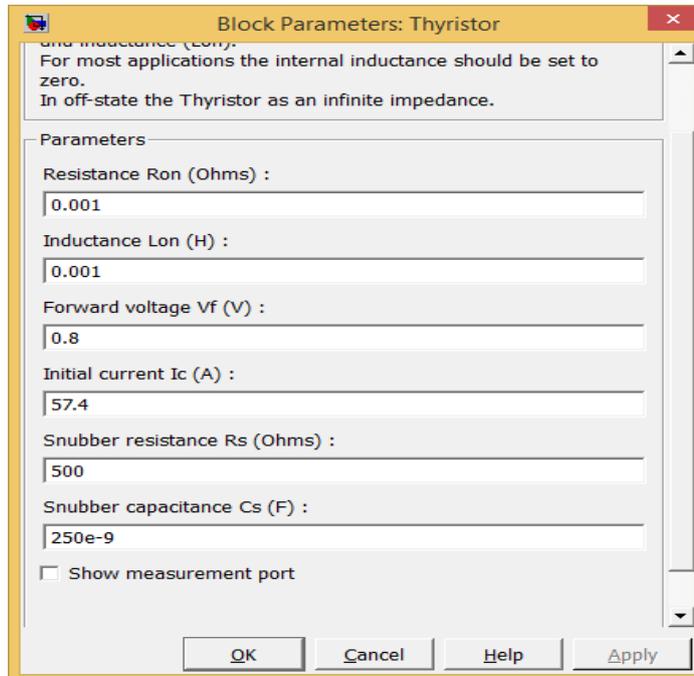


Рисунок 29 - Окно параметров блока тиристора

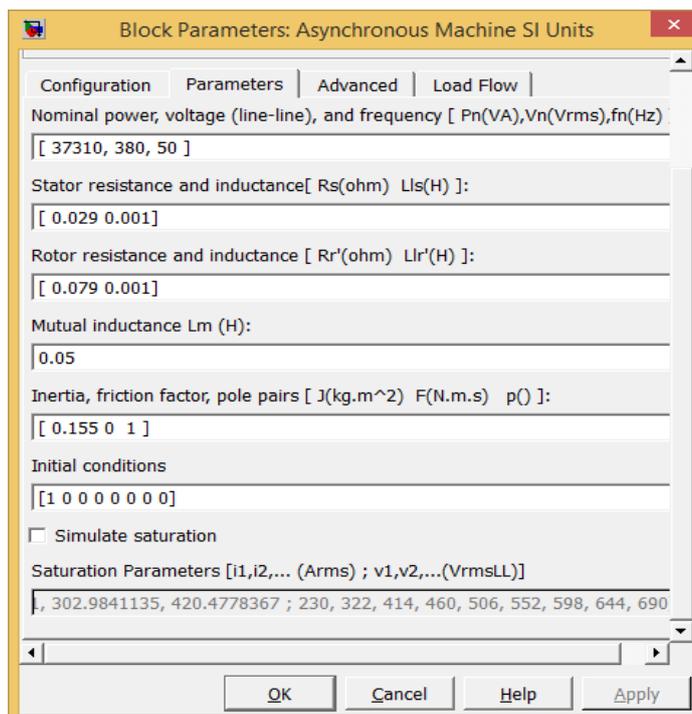


Рисунок 30 - Окно параметров блока АД с КЗ

## Результаты математического моделирования

Для проверки адекватности модели, а также снятия необходимых характеристик были получены осциллограммы (рис. 31) пуска двигателя при номинальном вращающем моменте  $T_m = 80 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и механическая характеристика (рис. 32). Угол управления тиристорами  $2^\circ$ . Синусоиды токов и напряжений можно наблюдать на рис. 33.

Как видно из рис. 31, пуск двигателя проходит  $\approx 2,3 \text{ с}$ , поэтому можно судить, что пуск двигателя легкий. Для нахождения величины пускового (ударного) тока, воспользуемся увеличенным изображением синусоид токов двигателя (рис.34). Точное значение ударного тока статора составляет 707 А.

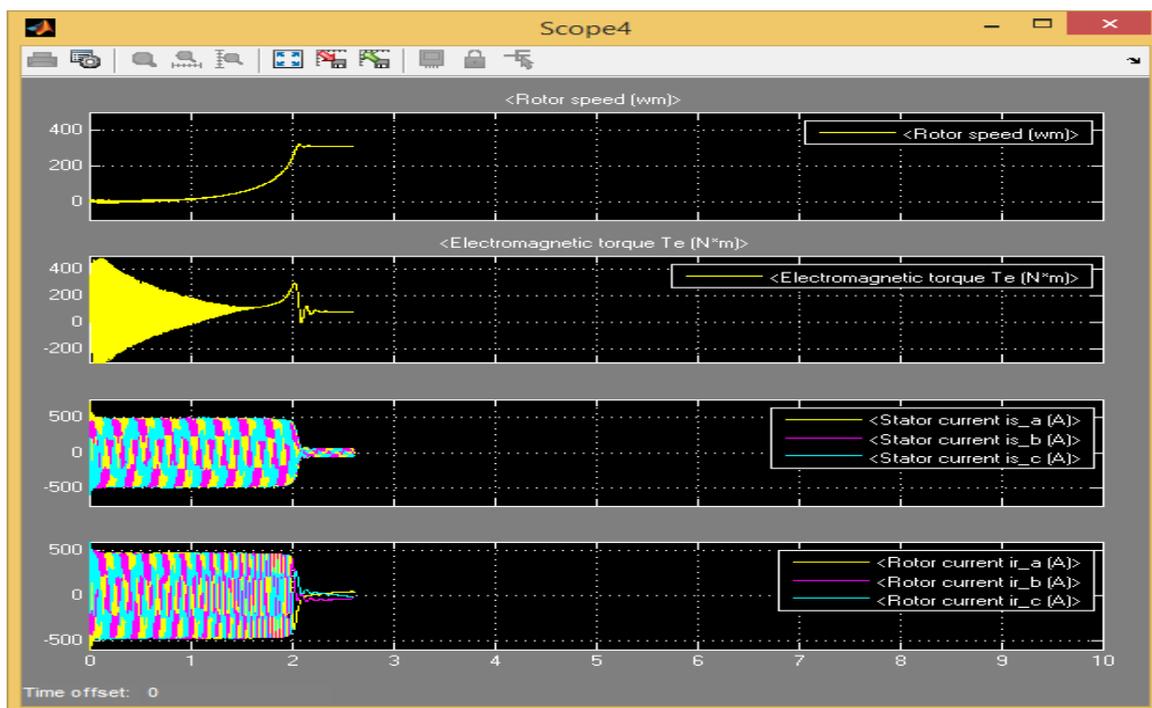


Рисунок 31 - Полученные в результате математического моделирования характеристики пуска АД с КЗ

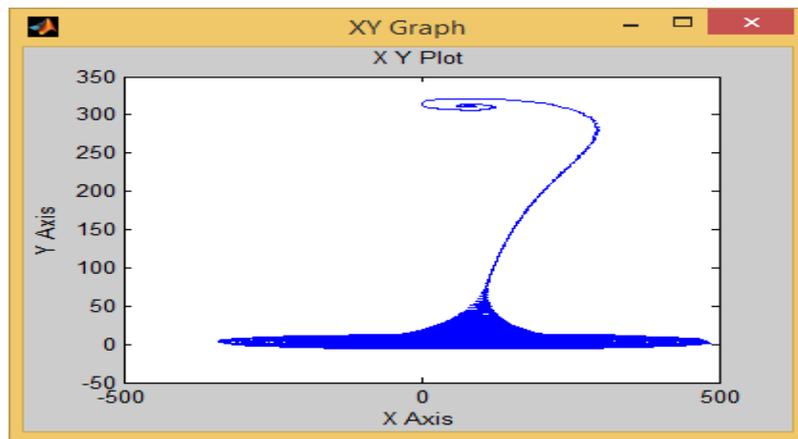


Рисунок 32 - Полученная в результате математического моделирования механическая характеристика АД с КЗ

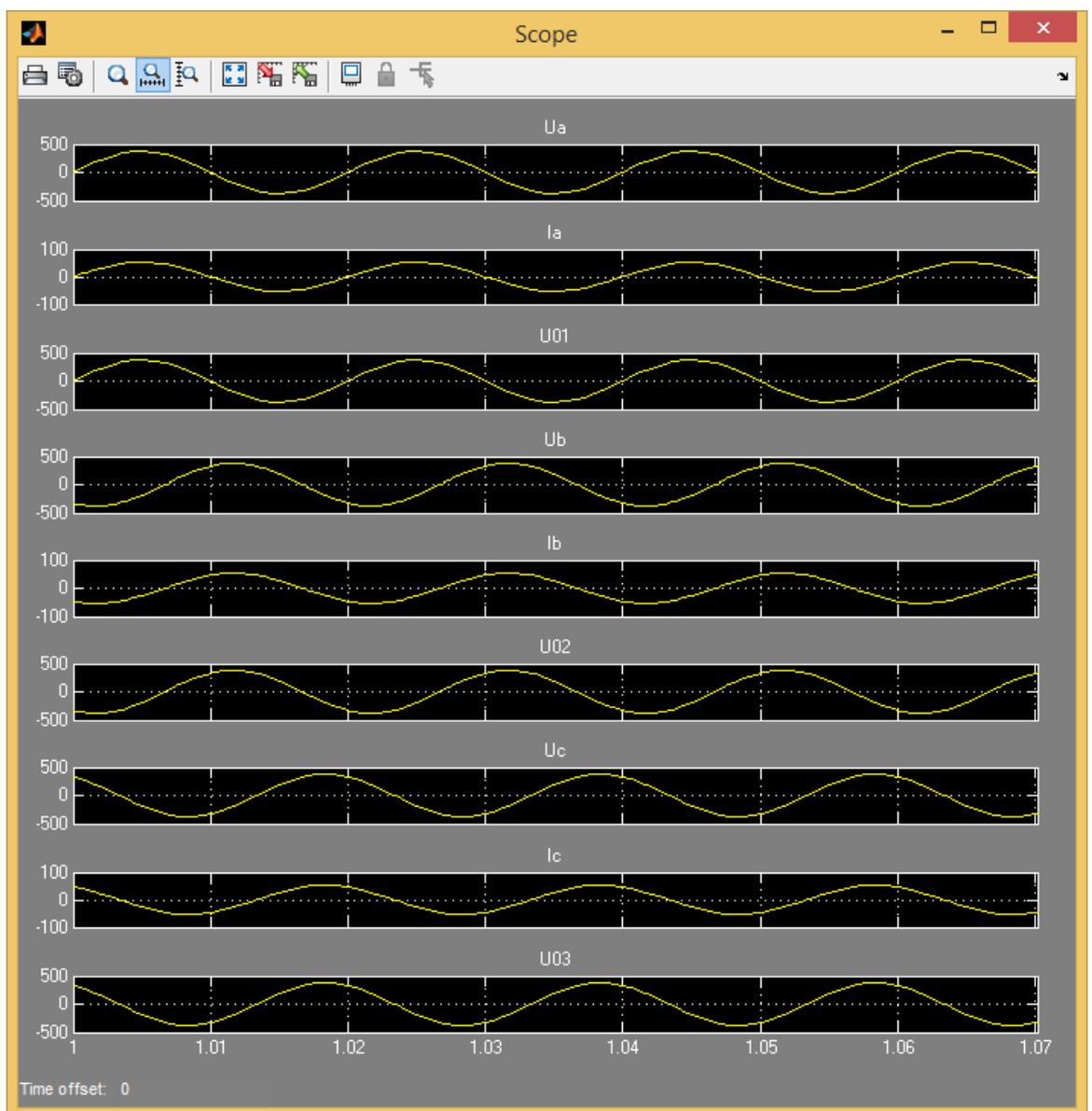


Рисунок 33 - Осциллограммы напряжений и токов:

$U_{a,b,c}$  – напряжения на нагрузках,  $I_{a,b,c}$  – токи на нагрузках,  $U_{01,02,03}$  –  
напряжения на источниках AC Voltage Source

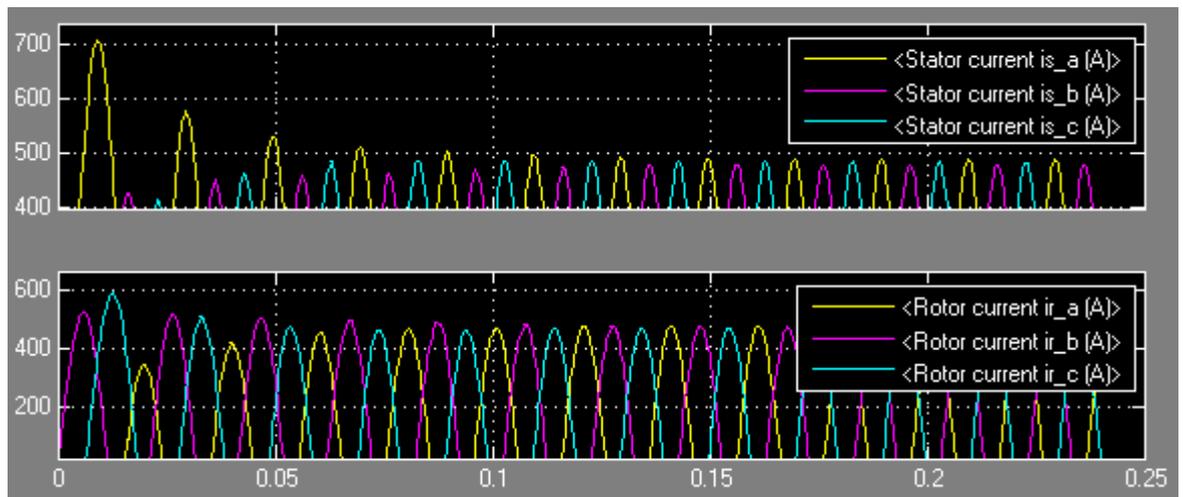


Рисунок 34 - Увеличенные характеристики пусковых токов АД с КЗ

## 1.4.2 Расчет предохранителя

После математического моделирования пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, были получены необходимые при расчете характеристики время пуска и пускового тока.

Т.к. проектируемый симисторный пускатель работает в повторно-кратковременном режиме, а значит пуск двигателя будет довольно частым, то при расчете воспользуемся коэффициентом для пуска двигателей с тяжелым пуском, взяв максимальную величину коэффициента из-за быстрого пуска двигателя.

Выбор номинального тока плавкой вставки для отстройки от пускового тока производится по выражению:

$$I_{\text{вс}} > \frac{I_{\text{н0}}}{K},$$

где  $I_{\text{н0}}$  - пусковой ток двигателя, равный 707 А;

$K$  - коэффициент, определяемый условиями пуска и равный для двигателей с легким пуском 2,5, а для двигателей с тяжелым пуском 1,6...2.

Выбираем  $K = 2$ , тогда ток плавкой вставки будет равен:

$$I_{\text{вс}} > \frac{707}{2} \quad I_{\text{вс}} > 354 \text{ А}$$

Выбирается быстродействующий предохранитель типа ПП57-3738 согласно ТУ 3424-050-05758109-2009 с током плавкой вставки 400 А [18, стр. 56].

Эскиз предохранителя представлен на рис. 35, конструктивные размеры приведены в таблице 19 [19].

ПРЕДОХРАНИТЕЛИ ПП57-3738, ПП57-3768  
Исполнение 1 - симметричное

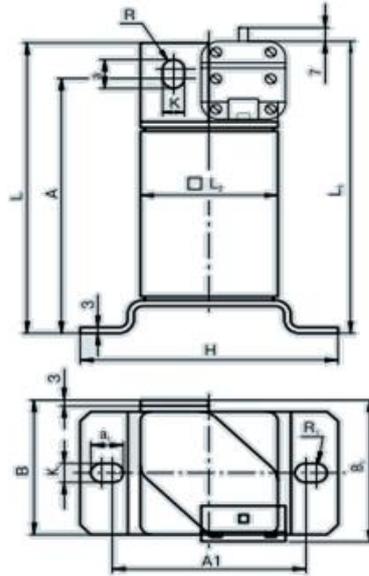


Рисунок 35 - Эскиз предохранителя ПП57-3738

Таблица 19 – Размеры и масса предохранителя ПП57-3738

Размеры											Масса, кг	
A	A1	a	a1	B	K1	L	L1	L2	H	R	R1	
99±3	91±1	14	14	71±4	11	113±3	113±3	66±2,5	120±3	5,5	5	1,0±0,15

**Вывод:** по результатам математического моделирования был проведен расчет и выбор предохранителя. Выбран быстродействующий предохранитель ПП57-3738.

## 1.5 Тепловой расчет

### 1.5.1 Обоснование выбора типа охлаждения

Стремление к миниатюрности в промышленном производстве будет продолжаться бесконечно. Электрические и электронные аппараты и другие компоненты становятся все более компактными. Эта тенденция сохраняется на всех уровнях вплоть до печатных плат, являющихся основой электронной структуры промышленных систем. Под давлением необходимости сокращения расходов, улучшения эксплуатационных характеристик и повышения гибкости применения на месте монтажа проектировщики электронных устройств становятся все более требовательными.

В связи с такой тенденцией, в данной работе появляется необходимость к миниатюризации проектируемого аппарата. К понятию миниатюризации относятся не только габаритные размеры, но и показатель массы аппарата. Для примера возьмем охладитель О-151, который был выбран ранее в разделе расчета силового симистора. Его массогабаритные показатели: 131-80-45 мм, 420 г. Если учесть тот факт, что таких охладителей 5 штук, т.к. он необходим каждому симистору, то все эти размеры принимают вид (при установке охладителей в ряд):

- Высота минимум: 131 мм;
- Длина минимум: 80 мм;
- Ширина минимум, при условии, что между охладителями расстояние 20 мм: 305 мм;
- Масса: 2100 г.

Для уменьшения массогабаритных показателей выбирается тип охлаждения пускателя *принудительный*.

Для воздушного принудительного охлаждения существует несколько видов вентиляторов. Наибольшее распространение получили *осевые и радиальные (центробежные) вентиляторы*.

Рассмотрим основные критерии оценки осевого и центробежного вентиляторов, которые должны учитываться при подборе нужной модели:

- Осевые вентиляторы больше подходят для установки в системе охлаждения с увеличенным расходом воздуха и низким давлением. Работа осевого вентилятора возможна без системы воздуховодов и пониженном аэродинамическом сопротивлении. Центробежные вентиляторы больше подходят для систем, где требуется меньший расход воздуха при более высоком давлении напора, наличие системы воздуховодов обязательна, и вентилятор должен выбираться не только по требуемому расходу воздуха, но и по величине его аэродинамического сопротивления и требуемого полного давления вентиляционной сети, к которой он будет присоединяться.
- Радиальные вентиляторы обладают, большим моментом инерции и для пуска требуется больший ток для запуска вентилятора в сравнении с осевым типом.
- Наличие свободного пространства при монтаже может стать ключевым фактором при выборе вентилятора. Осевые вентиляторы более компактны и менее требовательны к условиям монтажа, могут работать практически в любом положении. При выборе места для установки, необходимо учитывать, что конструкторские особенности центробежных вентиляторов требуют обустройства специальной площадки, на которой будет стоять вентилятор.
- Радиальные вентиляторы, как правило, рассчитаны на большие значения потребляемой мощности.

Исходя из вышеприведенных критериев, выбирается осевой вентилятор.

## 1.5.2 Расчет вентилятора

Основными расчетными показателями выбора вентилятора будут являться: потребляемый ток, напряжение и создаваемый воздушный поток. Из проведенного ранее расчета трансформатора напряжения известно, что максимальный ток вторичной обмотки трансформатора  $I_{2, \text{транс. max}} = 0,147 \text{ A}$ .

Создаваемый вентилятором воздушный поток рассчитаем по формуле [20]:

$$L_{np} = \frac{W}{(t_{yx} - t_{np}) \cdot \rho_{np} \cdot C} \text{ м}^3 / \text{с},$$

где  $W$  – отводимые избытки тепла  $\text{Вт}$ ;

$t_{yx}$  – температура воздуха, уходящего из вентилируемого объема  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{np}$  – температура приточного воздуха  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\rho_{np}$  – удельный вес приточного воздуха в  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;

$C$  – теплоемкость приточного воздуха в  $\text{Дж} / \text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$L_{np}$  - объем приточного воздуха  $\text{м}^3 / \text{с}$ .

Температура приточного воздуха равна температуре окружающей среды, для электрических и электронных аппаратов  $t_{np} = t_{окр} = 40^{\circ}\text{C}$ .

Удельный вес и теплоемкость приточного воздуха найдем из представленных зависимостей  $\rho_{np} = 1,08 \text{ кг} / \text{м}^3$ ;  $C = 1005 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

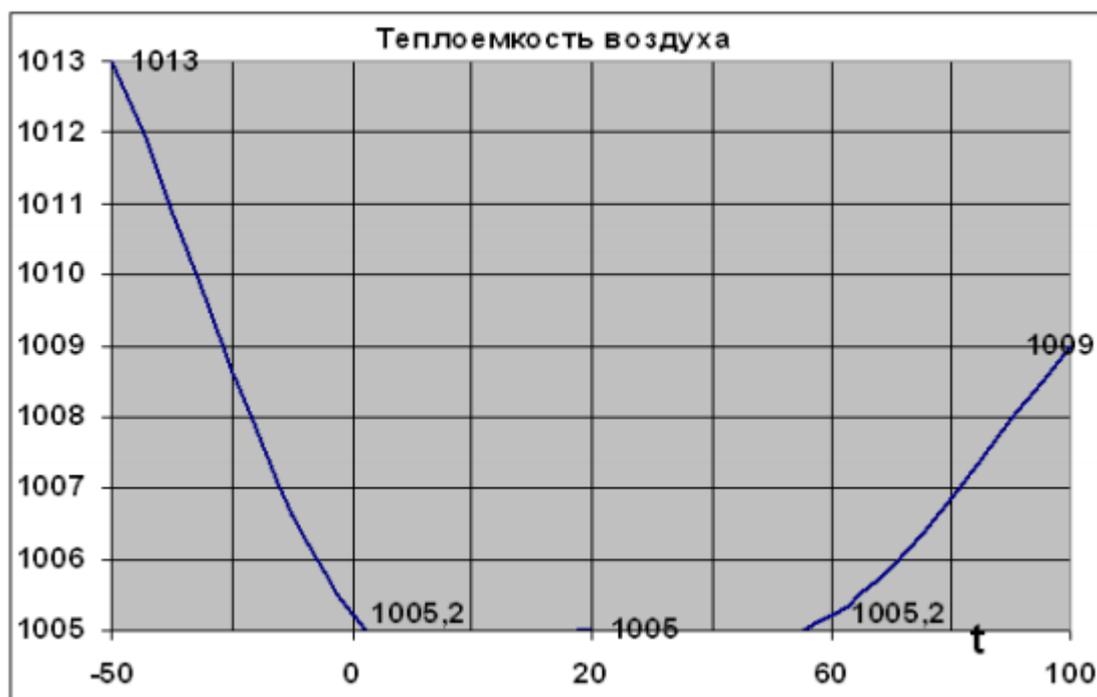


Рисунок 36 - График зависимости теплоемкости воздуха от его температуры

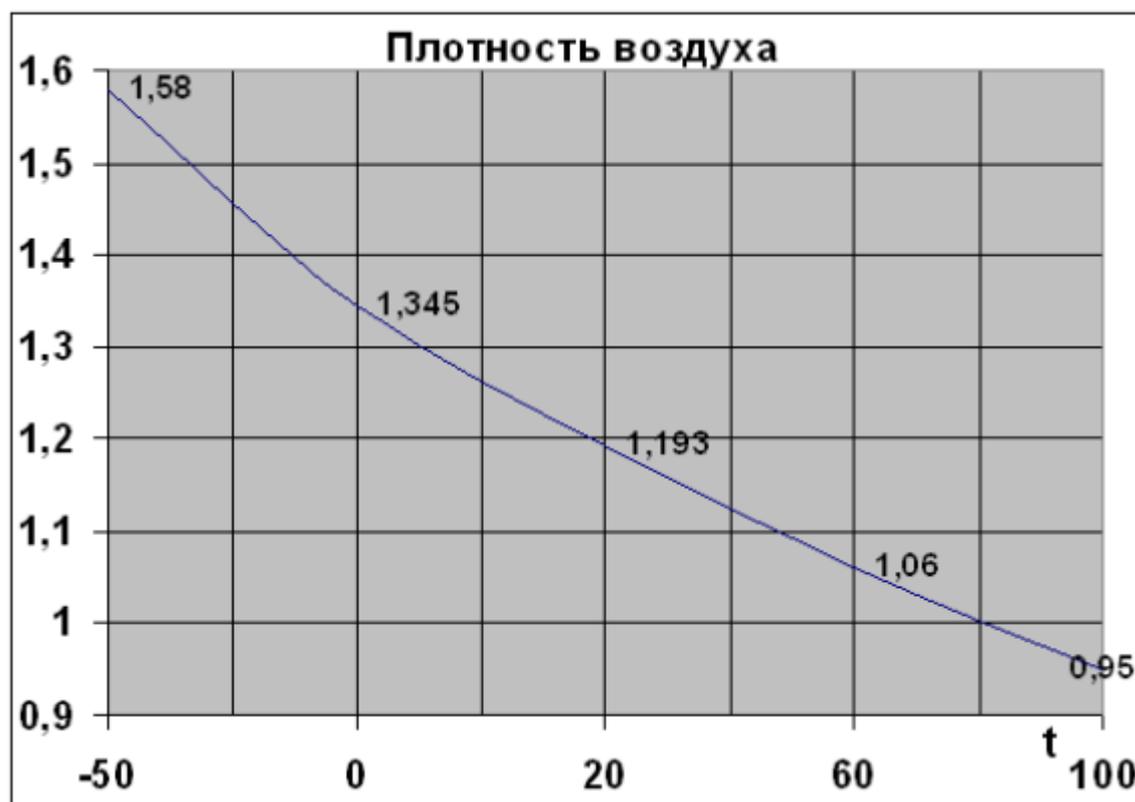


Рисунок 37 - График зависимости плотности воздуха от его температуры

Температуру воздуха, уходящего из вентилируемого объема, выбираем из рабочей температуры сборочных единиц. Принимаем  $t_{yx} = 55^{\circ}\text{C}$ , т.е. будем считать, что детали будут перегреваться на  $15^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 20 – Рабочая температура сборочных единиц

Сборочная единица	Рабочая температура, °C
Силовой симистор ТС151	57,6
Трансформатор ТПП214	55,1
Трансформатор ТА1	55,1

Отводимые избытки тепла рассчитаем, как сумму мощностей, которая уходит на нагревание всех сборочных единиц в пускателе. Рассеиваемую мощность ПП примем, как сумму рассеиваемых мощностей резисторов, т.к. рассеиваемая мощность на п/п элементах пренебрежимо мала.

Рассеиваемая мощность ПП:

$$P_{ПП} = \sum P_R = 0,096 + 2 \cdot 0,007 + 2 \cdot 0,002 + 3 \cdot 0,009 + 0,003 + 2 \cdot 1,68 + 2 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,002 + 2 \cdot 0,12 + 0,076 + 0,35 = 4,2 \text{ Вт}$$

Мощность силовых симисторов:

$$P_{сим} = 5 \cdot \Delta P^* = 5 \cdot 57,35 = 286,8 \text{ Вт}$$

Мощность потерь трансформаторов:

$$P_{транс} = 3 \cdot P_{ТА} + P_{ТПП} = 3 \cdot 0,3 + 0,07 = 0,97 \approx 1 \text{ Вт}$$

Где  $P_{ТА}$  - мощность потерь трансформатора тока;

$P_{ТПП}$  - мощность потерь трансформатора напряжения.

Отводимые избытки тепла равны:

$$W = P_{ПП} + P_{сим} + P_{транс} = 4,2 + 286,8 + 1 = 292 \text{ Вт}$$

Рассчитаем воздушный поток, создаваемый вентилятором:

$$L_{вп} = \frac{W}{(t_{yx} - t_{вп}) \cdot \rho_{вп} \cdot C} = \frac{292}{(55 - 40) \cdot 1,08 \cdot 1005} = 0,018 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Для более удобного выбора вентилятора, переведем рассчитанный воздушный поток:

$$L_{np} = 1,08 \text{ м}^3 / \text{мин}; \quad L_{np} = 64,8 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Выбираем осевой вентилятор KIPPRIBOR серии ВЕНТ-12025-1-220VAC с параметрами [21]:

Таблица 21 – Параметры вентилятора

Параметр	Значение
Размеры (ШхВхГ)	120-120-25
Напряжение питания	220 VAC
Потребляемый ток	0,09 А
Частота питающей сети	50 Гц
Мощность	17 Вт
Скорость вращения	2300 об/мин
Производительность	1,7 м <sup>3</sup> /мин
Тип подшипника	Подшипник качения
Уровень шума	29 дБА
Масса	380 г
Метизы для крепления к радиатору	Болт М4х35 в соответствии с DIN 7985

**Вывод:** в результате проделанного расчета видно, что выбор принудительного типа охлаждения оправдан, т.к. при естественном охлаждении необходимо применять 5 охладителей типа О151 массой 420 г., а при естественном достаточно одного осевого вентилятора ВЕНТ-12025 массой 380 г., что существенно влияет на массогабаритные показатели пускателя.

## 1.6 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  $T = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}$ , которая в свою очередь зависит от интенсивности отказов  $\lambda$  (табл. 22 составлена по [1], [22]).

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

Таблица 22 – Вероятность отказов элементов

Наименование элементов	Количество	Вероятность отказов $\lambda, ч^{-1}$
Динисторы	1	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Диоды	12	$(0,03 - 0,4) \cdot 10^{-5}$
Индуктивности	1	$0,01 \cdot 10^{-6}$
Конденсаторы	8	$(0,0014 - 0,018) \cdot 10^{-3}$
Оптопары	2	$0,051 \cdot 10^{-6}$
Потенциометры	1	$0,183 \cdot 10^{-6}$
Резисторы	26	$(0,003 - 0,013) \cdot 10^{-3}$
Светодиоды	2	$0,034 \cdot 10^{-6}$
Стабилитроны	2	$0,0041 \cdot 10^{-6}$
Тиристоры	4	$5,13 \cdot 10^{-6}$
Транзисторы	3	$(0,7 - 4) \cdot 10^{-5}$
Симисторы	5	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Трансформаторы	4	$(0,4 - 0,6) \cdot 10^{-5}$
Предохранители	3	$0,011 \cdot 10^{-6}$

Минимальная опасность отказов схемы по [1]:

$$\lambda_{\min} = (0,2 + 12 \cdot 0,3 + 0,01 + 8 \cdot 1,4 + 2 \cdot 0,051 + 0,183 + 26 \cdot 3 + 2 \cdot 0,034 + 2 \cdot 0,0041 + 4 \cdot 5,13 + 3 \cdot 7 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 4 + 3 \cdot 0,011) \cdot 10^{-6} = 1,524 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$$

Максимальное время безотказной работы:

$$T_{\max} = \frac{1}{\lambda_{\min}} = \frac{1}{1,524 \cdot 10^{-4}} = 6561,7 \text{ ч}$$

Максимальная опасность отказов схемы:

$$\lambda_{\max} = (0,2 + 12 \cdot 40 + 0,01 + 8 \cdot 18 + 2 \cdot 0,051 + 0,183 + 26 \cdot 13 + 2 \cdot 0,034 + 2 \cdot 0,0041 + 4 \cdot 5,13 + 3 \cdot 40 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 60 + 3 \cdot 0,011) \cdot 10^{-6} = 1,344 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$$

Минимальное время безотказной работы:

$$T_{\min} = \frac{1}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{1,344 \cdot 10^{-3}} = 744 \text{ ч}$$

Среднее время безотказной работы:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \frac{6561,7 + 744}{2} = 3652,9 \text{ ч}$$

**Вывод:** расчеты показали, что время средней безотказной работы платы управления 3653 часа.

## 1.7 Расчет собственной резонансной частоты печатного узла

Функциональный узел на ПП, 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, паянных контактов и проводов.

Частота вибраций, которая определяется условиями эксплуатации прибора, обычно известна, собственная частота определяется его механическими характеристиками и находится из выражения для закрепления [23]:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\alpha}{a \cdot b} \cdot \sqrt{\frac{D}{m^*}},$$

где  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от способа креплений сторон пластины печатной платы к основанию объекта установки;

$a, b$  - длина и ширина печатной платы соответственно, м;

$D$  - цилиндрическая жесткость материала платы, Па·м;

$m^*$  - распределенная по площади платы масса, кг / м<sup>2</sup>.

Коэффициент  $\alpha$  для крепления платы в трех точках рассчитаем по формуле, согласно [24]:

$$\alpha = 22,37 \cdot \sqrt{1 + 0,14 \cdot \frac{a^2}{b^2} + 0,02 \cdot \frac{a^4}{b^4}} = 22,37 \cdot \sqrt{1 + 0,14 \cdot \frac{0,13^2}{0,09^2} + 0,02 \cdot \frac{0,13^4}{0,09^4}} = 26,25$$

Цилиндрическую жесткость материала определим по формуле:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{3,02 \cdot 10^{10} \cdot (2 \cdot 10^{-3})^3}{12 \cdot (1 - 0,279^2)} = 21,8 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Где  $E = 3,02 \cdot 10^{10}$  Па - модуль упругости для стеклотекстолита;

$\nu = 0,279$  - коэффициент Пуассона для стеклотекстолита;

$h$  - толщина печатной платы, м.

Распределенную по площади массу определим по формуле:

$$m^* = \frac{m}{a \cdot b} = \frac{0,1}{0,13 \cdot 0,09} = 8,55 \text{ кг} / \text{м}^2$$

Для расчета массы платы управления воспользуемся таблицей 23:

Таблица 23 – Сводная таблица элементов

<b>Тип элемента</b>	<b>Масса элемента, Г</b>	<b>Количество</b>	<b>Количество выводов</b>	<b>Общая масса элементов, Г</b>	<b>Общее количество выводов, <math>N_n</math></b>
2Н102А	2	1	2	2	2
ГД107Б	0,3	1	2	0,3	2
КД103А	0,1	5	2	0,5	10
КД106А	1	6	2	6	12
782J	1	1	2	1	2
К50-3Б	2,5	1	2	2,5	2
К50-9	0,5	1	2	0,5	2
К50-29	5	1	2	5	2
К73-17	1	5	2	5	10
МОС304 2	0,9	2	6	1,8	12
AD8400	1	1	4	1	4
С2-23	0,25	26	2	6,5	52
КИПД42	1	2	2	2	4
2С143Д- 1	0,01	1	2	0,01	2

Продолжение таблицы 23

2С156Б	0,03	1	2	0,03	2
2У102А	1,2	5	3	6	15
2N300	1	3	4	3	12
Итого:		63		43,14	147

Формула для расчета массы платы управления:

$$m_{ПУ} = m_{ПП} + m_{ПОСК} + m_{ЭРЭ}$$

Где  $m_{ПП}$  - масса печатной платы;

$m_{ПОСК}$  - масса припоя ПОСК 50;

$m_{ЭРЭ}$  - масса электрорадиоэлементов.

Рассчитаем массу печатной платы по формуле [1]:

$$m_{ПП} = a \cdot b \cdot h \cdot \rho_{ПП} = 13 \cdot 9 \cdot 0,2 \cdot 2,05 = 47,97 \approx 50 \text{ г}$$

Где  $a, b, h$  - длина, ширина и толщина печатной платы соответственно,  $см$  ;

$\rho_{ПП} = 2,05 \text{ г/см}^3$  - удельная плотность стеклотекстолита СФ2.

Масса припоя пайки на плате составит:

$$m_{ПОСК} = m_n \cdot N_n = 0,06 \cdot 147 = 8,82 \approx 9 \text{ г}$$

где  $m_n = 0,06 \text{ г}$  - масса припоя одной пайки.

Тогда масса платы управления составит:

$$m_{ПУ} = m_{ПП} + m_{ПОСК} + m_{ЭРЭ} = 50 + 9 + 43 = 102 \text{ г}$$

Тогда собственная частота платы управления будет равна:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\alpha}{a \cdot b} \cdot \sqrt{\frac{D}{m^*}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{26,25}{0,13 \cdot 0,09} \cdot \sqrt{\frac{21,8}{8,55}} = 571,6 \text{ Гц}$$

**Вывод:** в результате расчета получена резонансная частота функционального узла 572 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.

## 1.8 Расчет прочности печатной платы

### 1.8.1 Расчет на изгиб печатной 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 рассчитывается по формуле [1]:

$$Y_S = Y_P - \sum_{i=1}^N d_i = 90 - 9 \cdot 0,5 = 85,5 \text{ мм},$$

где  $Y_S$  - ослабленное сечение по ширине печатной платы;

$Y_P = 90 \text{ мм}$  - ширина печатной платы;

$\sum_{i=1}^N d_i$  - сумма диаметров отверстий, попадающих в сечение;

Эскиз сечения печатной платы показан на рис. 38.

Формула для расчета изгибной прочности:

$$\delta(e) = 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{m_{ПВ} \cdot \eta(v) \cdot Y_P}{Y_S \cdot h^2} = 1,47 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{0,1 \cdot 10 \cdot 9}{8,55 \cdot 2^2 \cdot 10^{-2}} = 0,385 \text{ кг/см}^2$$

Где  $\eta(v) = 10$  - коэффициент вибронагрузки;

$\delta(e)$  - изгибная прочность печатной платы.

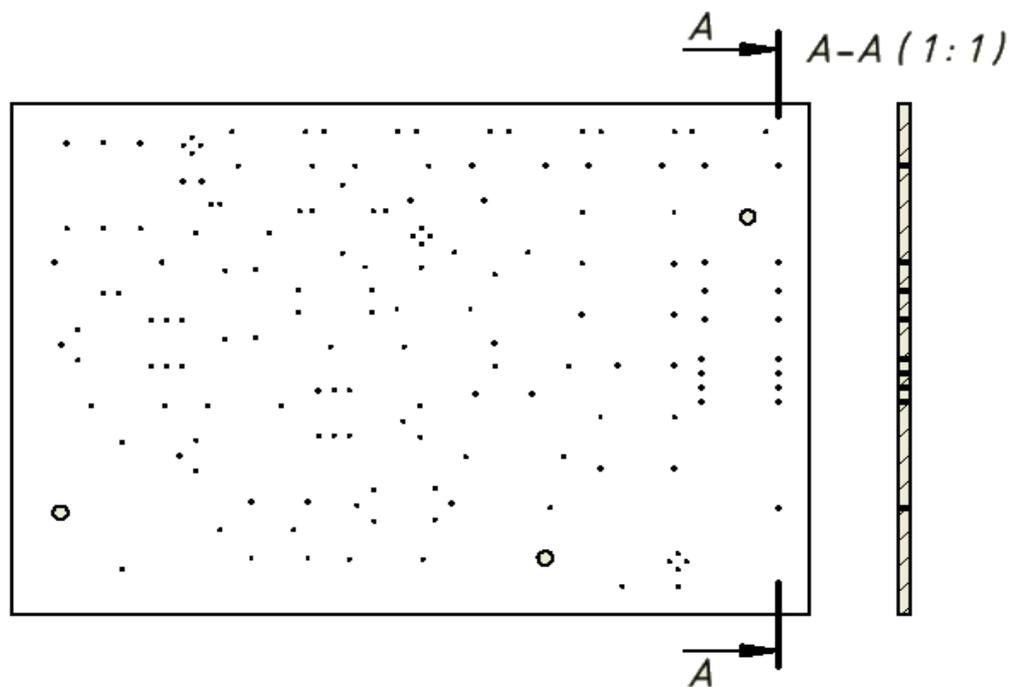


Рисунок 38 - Эскиз сечения печатной платы с отверстиями

**Вывод:** конструкция считается прочной, если изгибная прочность удовлетворяет условию:  $\delta(e)_{\text{дон}} > \delta(e)$ . В нашем расчете допустимая прочность печатной платы из стеклотекстолита  $\delta(e)_{\text{дон}} = 0,4 \text{ кг/см}^2$ . Значит условие  $0,4 > 0,385$  выполняется, следовательно конструкция достаточно прочная. Параметры функционального узла подобраны правильно.

## 1.8.2 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 [1]:

$$\Delta Z = 1,53 \cdot 10^3 \cdot \frac{m_{\text{пг}} \cdot \eta(v) \cdot XP^3}{E \cdot YS \cdot h^3} = 1,53 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,1 \cdot 10 \cdot 130^3 \cdot 10^{-9}}{3,02 \cdot 10^{10} \cdot 85,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2^3 \cdot 10^{-9}} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Где  $XP = 130 \text{ мм}$  - длина печатной платы.

Конструкция считается жесткой, если стрела прогиба удовлетворяет условию:

$$\Delta Z \leq 0,01 \cdot XP$$

В данном случае  $0,01 \cdot XP = 10^{-2} \cdot 130 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Тогда условие примет вид  $1,3 \cdot 10^{-6} \leq 1,3 \cdot 10^{-3}$ .

**Вывод:** плата управления удовлетворяет условию проверки жесткости печатного узла, следовательно, конструкция достаточно жесткая.

## Создание платы управления с помощью программного обеспечения Proteus 8.1 Professional

Для того, чтобы правильно спроектировать печатную плату и расставить на ней электрорадиоэлементы (ЭРЭ) необходимо знать размеры печатной платы и проводящий рисунок (соединительные дорожки ЭРЭ).

Для решения данной задачи при проектировании платы управления симисторного пускателя использовался пакет программ Proteus 8.1 Professional. *Proteus Professional* — пакет программ для автоматизированного проектирования электронных схем. Пакет представляет собой систему схемотехнического моделирования, базирующуюся на основе моделей электронных компонентов, принятых в PSpice. Отличительной чертой пакета Proteus Professional является возможность моделирования работы программируемых устройств: микроконтроллеров, микропроцессоров, DSP и прочее. Дополнительно в пакет Proteus Professional входит система проектирования печатных плат.

Создание модели печатной платы проходит в *3 этапа*.

*На первом этапе* составляется принципиальная электрическая схема (рис.39) из ЭРЭ (зарубежных аналогов), которые находятся в библиотеке компонентов.

*На втором этапе* расставляются ЭРЭ согласно электрическим связям, полученным на первом этапе. Далее проводятся гальванические дорожки по электрическим связям, выбирается тип печатной платы (однослойная, двухслойная и т.д.), расставляется координатная сетка. В результате проделанных операций, Proteus определяет размеры печатной платы (рис. 40).

*На третьем этапе* получаем полностью готовую ПП с установленными ЭРЭ, с проведенными дорожками и с известными размерами (рис. 41).

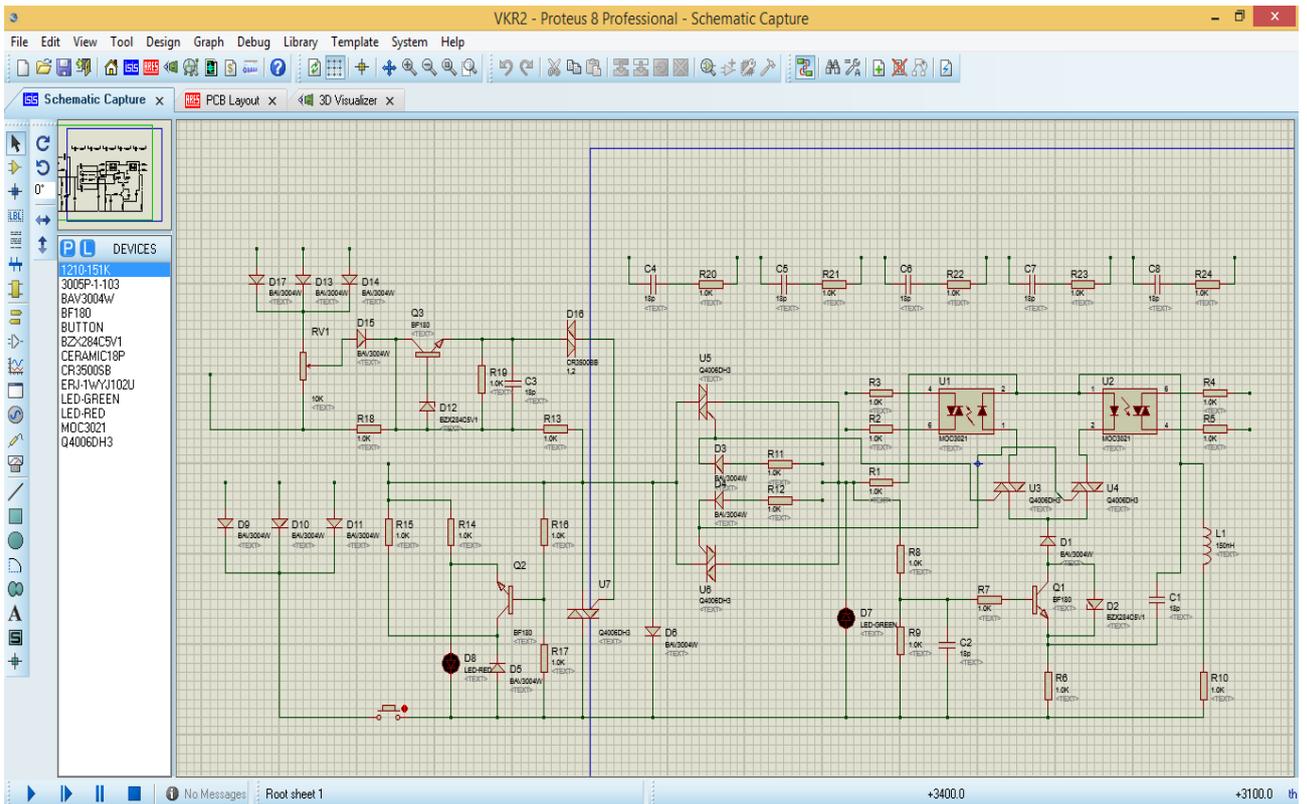


Рисунок 39 - Создание принципиальной электрической схемы в Proteus 8.1

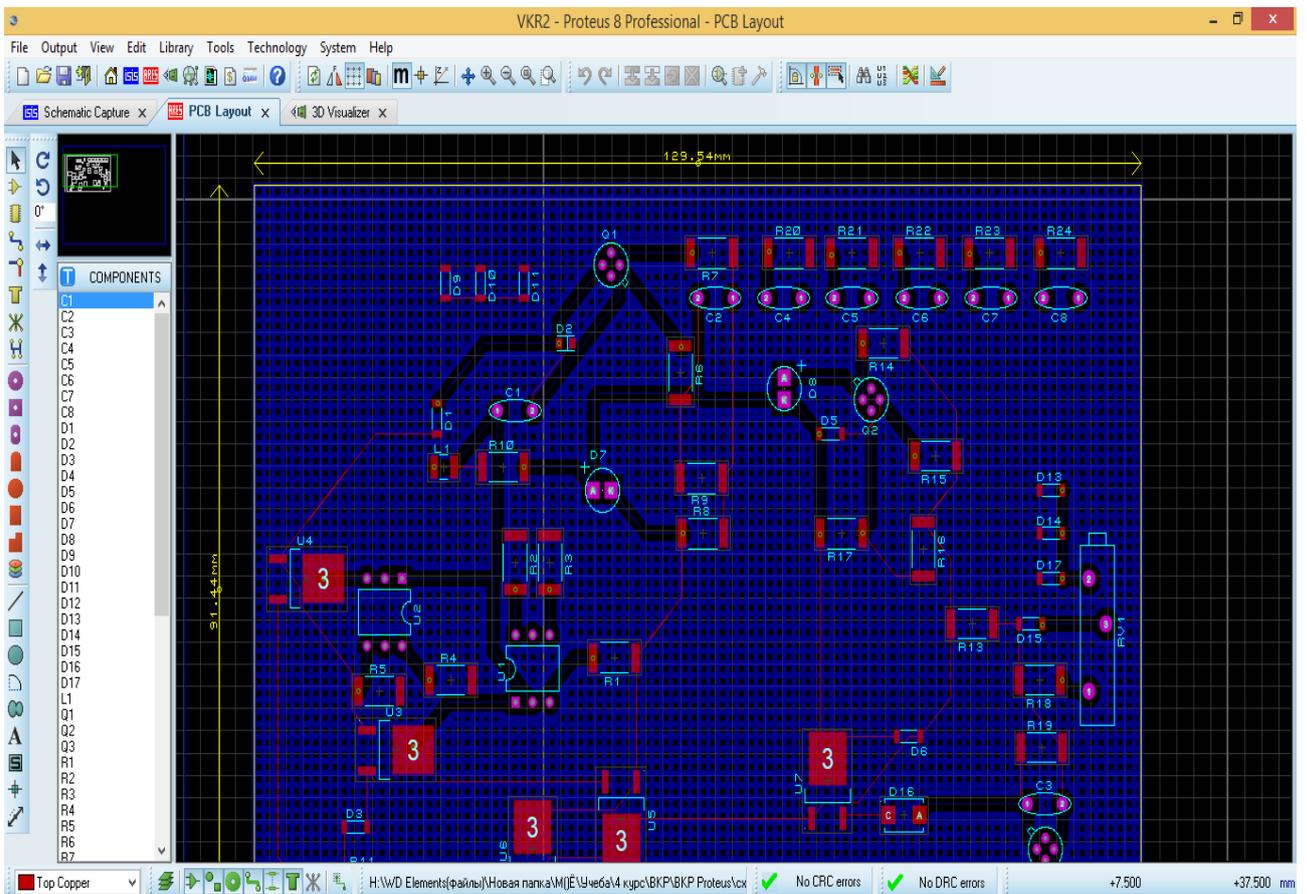


Рисунок 40 - Формирование печатной платы в Proteus 8.1

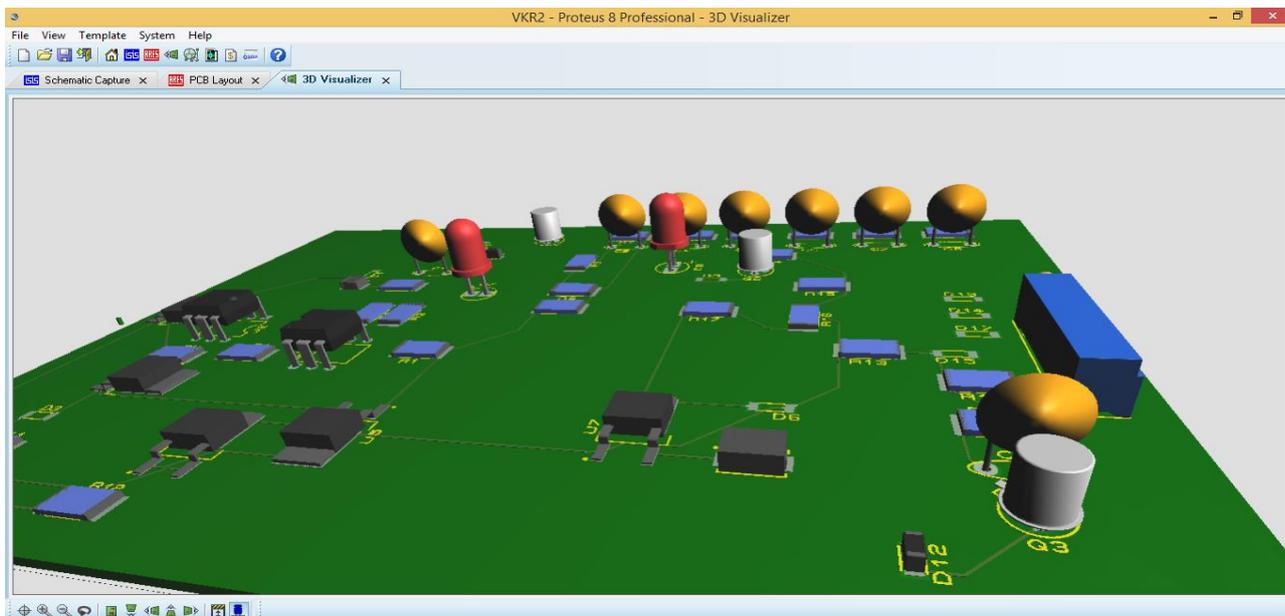


Рисунок 41 - Спроектированная плата управления симисторного пускателя в Proteus

8.1

**Вывод:** полученные значения размеров печатной платы округляем согласно ГОСТ 10317-79. В итоге длина ПП - 130 мм, ширина – 90 мм, толщина 2 мм.

## **Выбор климатического и защитного исполнения симисторного пускателя**

Электрические машины и аппараты эксплуатируются в различных климатических условиях, при различной влажности, температуре окружающего воздуха, различной высоте над уровнем моря, в атмосфере, содержащей те или иные коррозионно-активные элементы и при других ненормальных условиях. Поэтому исполнение электрооборудования должно соответствовать условиям окружающей среды.

В зависимости от места размещения при эксплуатации электротехнического оборудования установлено **пять категорий изделий**. Номер категории размещения следует за буквенным обозначением климатического исполнения, согласно ГОСТ 15150-69.

Степень защиты от проникновения твердых тел и жидкости определяется ГОСТ 14254-80. В соответствии с ГОСТ устанавливается 7 степеней от 0 до 6 от попадания внутрь твердых тел и от 0 до 8 от проникновения жидкости. Для обозначения степени защиты используется аббревиатура «IP».

Так как для охлаждения пускателя используется принужденное охлаждение с осевым вентилятором, то для нормального воздухообмена, в боковых стенках корпуса будут небольшие отверстия (1 мм). Этого будет достаточно для, относительно, небольшого вентилятора 120 мм. Тогда степень защиты от проникновения твердых тел и соприкосновения персонала с токоведущими и вращающимися частями выбираем 4.

Степень защиты от проникновения воды выбираем 4, т.к. брызги воды могут попасть внутрь только через небольшие отверстия (не более 1мм) с боковой стороны, и они не повлияют на нормальную работу пускателя, т.к. отдельные детали и сборочные единицы имеют влагозащитные покрытия.

Получаем степень защиты симисторного пускателя IP44.

Выбор климатического исполнения зависит от рабочей температуры

деталей и сборочных единиц, используемых в симисторном пускателе. Для наглядного представления рабочих температур составим таблицу 24. Выберем критический диапазон температур, т.е. максимально высокую отрицательную и максимально низкую положительную температуру. Критический диапазон  $(-30...+60)^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 24 – Сводная таблица рабочих диапазонов температур элементов и сборочных единиц

Элемент	Рабочий диапазон температур, $^{\circ}\text{C}$
ТС151-100	-60...+85
МОС3042	-60...+85
2N300	-30...+75
ТПП 214	-60...+85
ТА 1	-60...+85
2У102А	-40...+85
2Н102А	-60...+100
ГД107Б	-35...+60
КД103А	-60...+100
КД106А	-60...+85
782J	-60...+85
К50-3Б	-60...+125
К73-17	-40...+85
К50-9	-60...+125
К50-29	-60...+125
AD8400	-40...+125
С2-23	-60...+70
2С143Д-1	-60...+125
2С156Б	-60...+125
ПП57-3738	-60...+60
ВЕНТ-12025	-60...+85

**Вывод:** согласно ГОСТ 15150-69 выбираем климатическое исполнение УХЛ с категорией изделия 3.1. Согласно ГОСТ 14254-96 выбираем защитное исполнение IP44.

## Создание 3-D модели симисторного пускателя

3-D моделирование – это современный подход к проектированию. Сейчас с помощью программного обеспечения создаются модели различных деталей, устройств, будь то электрический или электронный аппарат, автомобиль или дом и т.д.

3-D модель дает наглядное изображение будущего проекта на стадии разработки, с помощью объемных моделей можно рассчитать будущие массогабаритные показатели, а также максимально исключить конструкторские недочеты при разработке.

Результатами данного моделирования станут:

- получение массы проектируемого симисторного пускателя;
- получение необходимых чертежей;
- наглядное представление модели.

Модель создана с помощью программного обеспечения Autodesk Inventor Professional.

**Autodesk Inventor** — система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР) компании Autodesk, предназначенная для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Инструменты Inventor обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации.

Как говорилось в предыдущем разделе, корпус симисторного пускателя должен иметь отверстия не более 1 мм для нормального воздухообмена. Также должны быть отверстия для крепления сборочных единиц. Спроектированный корпус представлен на рис. 42.

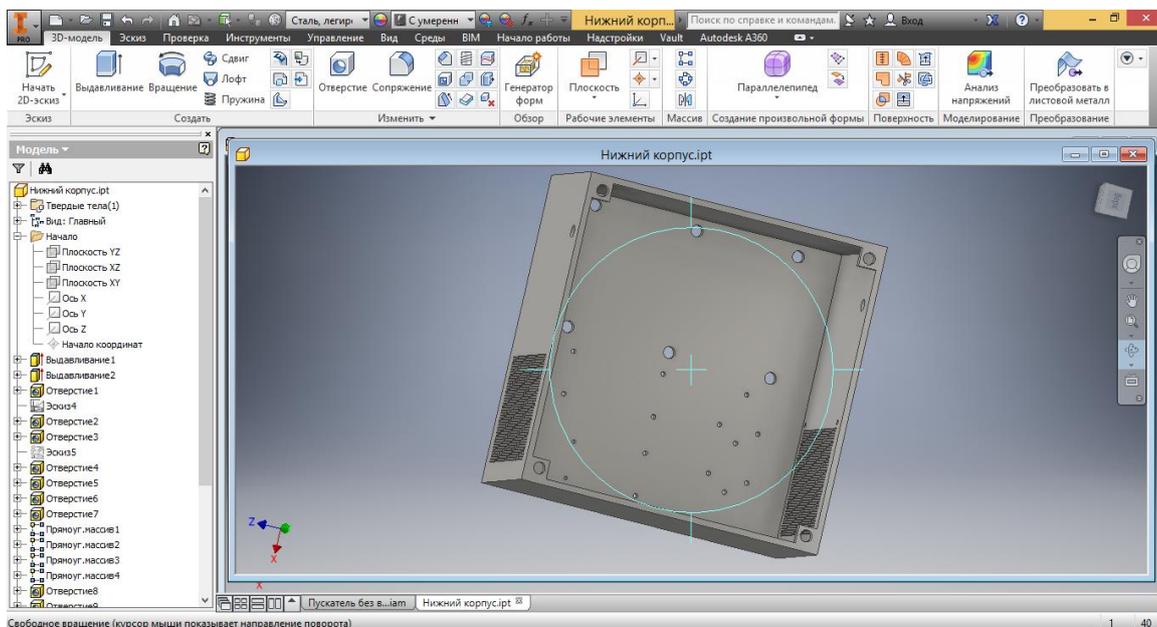


Рисунок 42 - Модель корпуса, спроектированная в Autodesk Inventor

Модель пускателя с установленными на корпус элементами представлена на рис. 43.

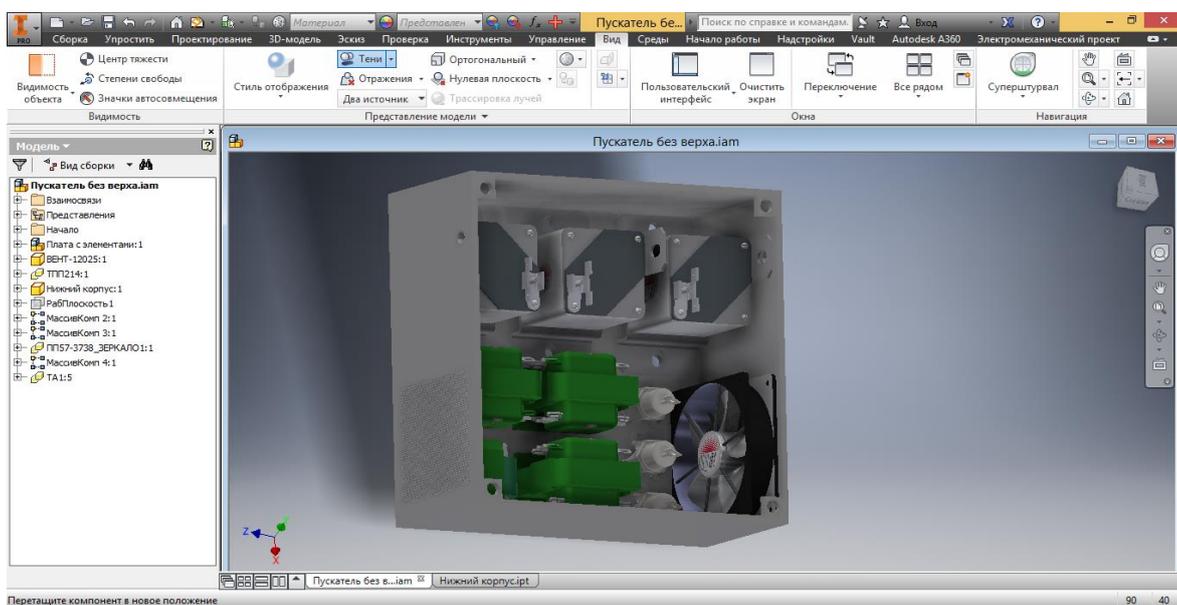


Рисунок 43 - Модель пускателя с установленными элементами, спроектированная в Autodesk Inventor

Вывод: Корпус пускателя был спроектирован из алюминия. Спроектированная модель имеет массу 9,6 кг. Сборочный чертеж представлен в Приложении 2. Спецификация симисторного пускателя представлена в Приложении 3.

## Заключение

В ходе проделанной работы был спроектирован бесконтактный симисторный реверсивный пускатель с опторазвязкой и принудительным воздушным охлаждением для пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, рассчитанный на мощность 30 кВт. В сторону адекватности поведения спроектированного аппарата говорит математическое моделирование, выполненное в программном пакете MatLab/Simulink.

Спроектированный симисторный пускатель рассчитан на номинальный ток двигателя  $I_n = 57,4 \text{ A}$ , с фазным напряжением  $U_n = 220 \text{ В}$ . Пускатель имеет защиту от токов кз в виде предохранителя типа ПП57-3738 с номинальным током плавкой вставки 400 А, защиту от перегрузок и от обрыва фаз в виде блока защиты, который отключает плату управления при аварийной ситуации, после чего на управляющие электроды силовых симисторов сигналы не поступают, и пускатель останавливает свою работу.

Основными критериями, при проектировании, были: надежность, качество, низкие массогабаритные показатели.

Разработанная модель симисторного пускателя имеет климатическое исполнение УХЛЗ.1 по ГОСТ 15150-69 с диапазоном рабочих температур от -10 до +40 градусов. Спроектированная модель имеет степень защиты IP44 согласно ГОСТ 14254-96.

Для оценки массогабаритных показателей сравним модель симисторного пускателя с тиристорным:

Таблица 25 – Сравнительная таблица

Тип пускателя	Номинальный ток, силовой ячейки, А	Габаритные размеры, ДхВхГ, мм	Масса, кг
ПБСО	100	294x361x185	9,6
ПБТ	63	260x345x405	19

Как видно из сравнительной таблицы, спроектированный симисторный пускатель имеет меньшие массогабаритные размеры, причем масса в сравнении с тиристорным пускателем меньше на 51%.

Полученная в результате расчетов и проектирования модель полностью отвечает установленным требованиям и ГОСТам.

## Список использованных источников

1. Богданов Е.П. Тиристорное коммутирующее устройство: методические указания и пример выполнения курсового проекта по дисциплине “Бесконтактные электрические аппараты” для студентов специальности 140602 – “Электрические и электронные аппараты” – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 36 с.
2. Богданов Е.П. Тиристорный пускатель: методические указания и пример выполнения курсового проекта по дисциплине “Бесконтактные электрические аппараты” для студентов специальности 140602 – “Электрические и электронные аппараты” – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 22 с.
3. Электронный ресурс / [http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory\\_simm/index.php](http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory_simm/index.php) - ОАО "Электровыпрямитель" - крупнейшая российская электротехническая компания с богатым опытом в области разработок и производства силовых полупроводниковых приборов и оборудования для нужд многих отраслей промышленности, энергетики и транспорта.
4. Электронный ресурс / <http://www.diagram.com.ua/list/5p19t.shtml> - Бесплатная библиотека по электронике и электротехнике. Техническая документация для любителей и профессионалов.
5. Четвертков И.И. Резисторы: (справочник). – М.: Энергоиздат, 1981. – 352 с., ил.
6. Электронный ресурс / [http://www.weisd.com/test/GenericParts\\_WEISD\\_view.php?editid1=2N300](http://www.weisd.com/test/GenericParts_WEISD_view.php?editid1=2N300) – Wholesale Electronics, Inc.
7. Сидоров И.Н., Скорняков С.В. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. – 2-е изд., доп. – М.: “Радио и связь”, “Горячая линия – Телеком”, 1999. – 336 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып 1233).

8. Мартынов А.А. Трансформатор для вторичных источников питания. Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2001. 50 с.
9. Голомедов А.В. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1988. – 528 с.; ил.
10. Электронный ресурс / <http://bourabai.ru/toe/10/10-2/10-2.htm> - Частное Боровское исследовательское учреждение по внедрения новых технологий.
11. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Пожидаев С.Л. Транзисторы: Справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1144).
12. Кудрявцев И.А., Фалкин В.Д. Электронные ключи: Учебное пособие. Самарский Государственный Аэрокосмический Университет имени академика С.П. Королева, Самара. – 2002.
13. Четвертков И.И. Справочник по электрическим конденсаторам. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.; ил.
14. Электронный ресурс / <http://kazus.ru/guide/inductors/> - кодовая маркировка индуктивностей.
15. Москатов Е.А. Справочник по полупроводниковым приборам. Издание 2. – Таганрог, 219 с., ил.
16. Электронный ресурс / <http://www.chipdip.ru/product/ad8400arz1/> - Чип и Дип: приборы и электронные компоненты.
17. Электронный ресурс <http://sxemdom.ru/calc/caprect.htm> - Справочники по отечественным электронным компонентам.
18. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты: Справочник, Изд. РадиоСофт, - 256 с.
19. Электронный ресурс / <https://keaz.ru/f/1403/catalog-pp57.pdf> - Плавкие предохранители (быстродействующие).
20. Под редакцией electrosad.ru. Расчет расхода воздуха для охлаждения ПК (упрощенный метод).

21. Электронный ресурс / <http://www.kipribor.ru/ventilyatori-ohlajdeniya-VENT> - Вентиляторы охлаждения KIPPRIBOR серии ВЕНТ.
22. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств, Минск, - БГУИР. 2010.- 68 с.
23. Электронный ресурс / <http://studopedia.org/13-77446.html> - Кондаков А.А. Расчет собственной частоты печатного узла РЭС.
24. Учебное пособие по лабораторной работе: Исследование собственных резонансных частот печатных плат. – 50с.
25. Чесалин А.Д., Баранов П.Р. Технология производства электротехнических изделий: учебное пособие / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 60 с.
26. Ахумов А.В., Генкин Б.М., Иванов Н.Ю. и др. Справочник нормировщика / Под общ. ред. А.В. Ахумова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987 – 458 с., ил.
27. Электронный ресурс / Крупнейший в Европе ресурс для IT-специалистов <https://habrahabr.ru/company/madrobots/blog/214153/> . Издателем проекта является компания «ТМ».
28. Электронный ресурс / РадиоЭлектроника <http://elektronika-muk.ru/>
29. Пахомов Д.С., Гребнева Т.Н. Особенности нормирования операций для станков с ЧПУ. – 112 с.
30. Электронный ресурс / Библиотека Технической Литературы <http://delta-grup.ru/bibliot/39/90.htm>
31. Электронный ресурс / Научно-исследовательский институт компьютерных технологий/Инжиниринговая компания. Техническая статья, Гревцов П. <http://ictech.com.ua/publications/technical-articles/107-formirovanie-steka-mpp-part1>
32. Электронный ресурс / <http://платы.рф/?pcb-mounting,15>. Изготовление и монтаж печатных плат.
33. Электронный ресурс / Разработка технологического процесса сборки и монтажа электрических и электронных элементов [http://de.ifmo.ru/bk\\_netra/page.php?dir=3&tutindex=41&index=4&layer=1](http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=3&tutindex=41&index=4&layer=1)
34. Патрушева Т.Н. Методическое пособие для курсового проектирования по дисциплине “Технология производства электронных средств”. Красноярск, СФУ, 2007 – 28 с.

35. Селиванова З.М., Петров А.В. Технология радиоэлектронных средств : Лабораторные работы. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 32 с. – 100 экз.
36. Селиванова З.М. Технология радиоэлектронных средств : учебное пособие . Тамбов : Изд-во Тамб. Гос. Техн. ун-та, 2010. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0900-5.
37. Электронный ресурс / <http://www.ostec-st.ru/> / ООО «Остек-Сервис-Технология» — подразделение **Группы компаний Остек**, специализирующееся на реализации комплексных проектов развития производств печатных плат, гальванических и химических покрытий, внедрения технологических решений очистки сточных вод и водоподготовки.
38. Кризе С.Н. Расчет маломощных силовых трансформаторов и дросселей фильтров. Государственное энергетическое издательство. Москва. – 1950. - 45 с.
39. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., “Энергия”, 1976. 544 с. с ил.
40. Хрулев А.К., Черепанов В.П. Диоды и их зарубежные аналоги. Справочник. В 3 т. Т. 2. – М.; ИП РадиоСофт, 1999. - 640 с., ил. ISBN 5-85554-173-8.
41. Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин: Учеб. пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с., ил.
42. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. – (Основы наук). ISBN 978-5-9916-0904-3.
43. Нефедов А.В., Гордеева В.И. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги: Справочник. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 400 с.: ил. (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1154). ISBN 5-256-00695-9.
44. Ермолин Н.П., Ваганов А.П. Расчет маломощных трансформаторов / под ред. д.т.н., проф. Н.П. Ермолина. – М.: Государственное энергетическое издательство. 1957. – 146 с.

45. Усов В.С., Мартынов Б.А., Новиков Ю.Н. Транзисторные усилители, ключи, импульсные устройства : Учеб. пособие и методические указания к лабораторным работам. Часть II. Транзисторные ключи и устройства на их основе. – СПб. 2005.- 13 с.
46. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. Изд-во “Советское радио”, 1971, стр. 720.
47. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. Государственное союзное издательство судостроительной промышленности. Ленинград. 1961. – 372 с.
48. Пятибрат В.П. Упрощенные способы расчета магнеталей : метод. указания / - 2-е изд., исправ. – Ухта : УГТУ, 2013. – 22 с.
49. Электронный ресурс / [http://www.bitek-e.ru/bistart\\_press-release.htm](http://www.bitek-e.ru/bistart_press-release.htm) - научно-производственная фирма “Битек” – разработка полупроводниковых устройств для реверсивных механизмов.
50. Электронный ресурс / <http://prom31.ru/cat/8/246.html> – ООО “Промснаб” – промышленное оборудование.
51. Электронный ресурс / [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/5/5212/#i102216](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/5/5212/#i102216) – “Шум на рабочих местах, в помещениях жилых общественных зданий и на территории жилой застройки”. Санитарные нормы. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Минздрав России.
52. Электронный ресурс / [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/5/5214/#i97815](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/5/5214/#i97815) - “Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы.” СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Минздрав России.
53. Электронный ресурс / <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php> - “Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПин 2.2.4.1191-03 “Электромагнитные поля в производственных условиях”. Минздрав России.

54.Электронный

ресурс

/

<http://mhts.artinfo.ru/biblio/SNIPS/Sanpiny/2.1.6.575-96/1.htm>

-

“Гигиенические требования к охране атмосферного воздуха населенных мест”. Санитарные нормы и правила. СанПин 2.1.6.575-96.