

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

**ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

(наименование института полностью)

**Промышленная электроника**

(наименование кафедры)

**11.03.04 Электроника и нанoeлектроника**

(код и наименование направления подготовки, специальности)

**Промышленная электроника**

(направление (профиль)/специальность)

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Силовая электроника

Студент(ка)

С.А. Парыгин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Е.С. Глибин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент А.А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2019

## АННОТАЦИЯ

В работе разработан макет лабораторного стенда для проведения лабораторных работ по изучению выпрямителей и линейных стабилизаторов в рамках темы "Силовая электроника. Сетевые источники питания электронных устройств". Приведены расчеты принципиальных схем линейных стабилизаторов на базе операционного усилителя К140УД6А: без защиты ключевого элемента, с защитой по току, с защитой по мощности; выпрямителей: однофазного однополупериодного, двухполупериодного, одно- и трехфазного мостового, а также согласующего трансформатора для генератора-имитатора трехфазной сети.

Разработаны и исследованы схемы защиты активных элементов.

Спроектированы наборные поля стендов: ФМ 3Ф2 для изучения схем выпрямителей и ФМ СТ2 для изучения линейных стабилизаторов. Разработана печатная плата для модуля ФМ СТ2.

Произведен анализ методов испытания безопасности разработанного лабораторного стенда, проведено организационное обоснование научно-исследовательской деятельности.

Бакалаврская работа состоит из расчетно-пояснительной записки (63 страниц и графического материала на 8 листах)

## Оглавление

Введение.....	4
1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ .....	6
1.1 Состояние вопроса. Обзор конструкций стендов .....	6
1.2 Цель бакалаврской работы. Выбор конструкции и коммутирующих устройств для стенда .....	8
1.3 Выбор типов и параметров измерительной аппаратуры и источников питания .....	9
1.4 Выбор структуры стенда .....	9
2 РАСЧЕТНЫЙ РАЗДЕЛ .....	12
2.1 Разработка минимального перечня изучаемых устройств .....	12
2.1.1 Блок выпрямителей .....	12
2.1.2 Блок стабилизаторов .....	13
2.2 Расчет исследуемых схем выпрямителей .....	17
2.2.1 Расчет схемы выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с емкости.....	17
2.2.2 Расчет схемы выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с индуктивности. .....	24
2.2.3 Выбор типов и номиналов элементов схем выпрямителей .....	30
2.2.4 Расчет схемы непрерывного стабилизатора без защиты ключевого элемента. ....	31
2.3 Разработка и проектирование схем защиты активных элементов .....	33
2.4 Расчет потребляемых мощностей, тепловой расчет .....	38
3.2 Проектирование конструкции наборного поля стенда.....	44
3.3 Проектирование печатной платы модуля ФМ СТ2 .....	47
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	50
4.1 Лабораторная работа по изучению выпрямителей .....	50
4.1.1 Цель работы .....	50
4.1.2 Краткие теоретические сведения .....	50
4.1.3 Программа работы .....	52
4.1.4 Описание лабораторной установки .....	53
4.1.5 Вопросы для самоконтроля .....	55
5.1 Испытания безопасности лабораторного стенда .....	56
5.1.1. Общие требования к безопасности стенда.....	56
5.1.2 Требования к проведению испытаний .....	57
Конструктивные требования по защите от поражения электрическим током:.....	58
5.2 Безопасность объекта при чрезвычайных и аварийных ситуациях .....	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	63

## **Введение**

Развитие производства напрямую зависит от повышения качества продукции, её технологичности, сокращения производственных издержек, что зависит от качества подготовки персонала.

В учебном процессе выполнение лабораторных работ является основным звеном перехода от теоретических знаний к практическим навыкам, позволяет закрепить полученные на лекционных занятиях знания и сформировать навыки практического обращения с элементами схем и измерительными приборами. Необходимость предварительной подготовки к выполнению и защите лабораторных работ формирует навыки работы со справочной, методической, научной литературой, а требования к оформлению отчётов по лабораторным работам позволяют студентам научиться правильному оформлению экспериментальных данных и их последующей обработке.

Такая работа приводит к необходимости изучения и практического использования системы действующих государственных стандартов, регулирующих деятельность специалистов в области применения ими условных буквенных и графических изображений элементов электрических схем, графиков, диаграмм и текстовых материалов. Отработка этих навыков на отдельных работах небольшого объема, таких, как отчеты по лабораторным работам, позволяет в дальнейшем выработать умения правильного оформления больших по объему материалов курсовых.

Для качественной подготовки студентов используемое в учебном процессе лабораторное оборудование должно соответствовать современному состоянию науки и техники, а также отражать потребности предприятия, для которого осуществляется подготовка кадров.

Разрабатываемый стенд для проведения лабораторных работ по изучению выпрямителей и линейных стабилизаторов в рамках темы "Сетевые источники питания электронных устройств" позволяет исследовать схемы однофазных и многофазных выпрямителей, а также линейных стабилизаторов.

Предлагаемое учебное оборудование позволяет будущему специалисту приобрести актуальные практические навыки по теме "Силовая электроника. Сетевые источники питания электронных устройств".

# 1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

## 1.1 Состояние вопроса. Обзор конструкций стендов

В лабораторной практике используется несколько конструкций лабораторных стендов. Как правило, стенды для изучения темы "Электроника" представляют собой объемную конструкцию, на лицевую панель которого нанесены графические обозначения и выведены разъемы.

Учебно-лабораторные комплексы, позволяющие выполнять большое количество лабораторных работ, отличаются большими габаритными размерами и высокой стоимостью.

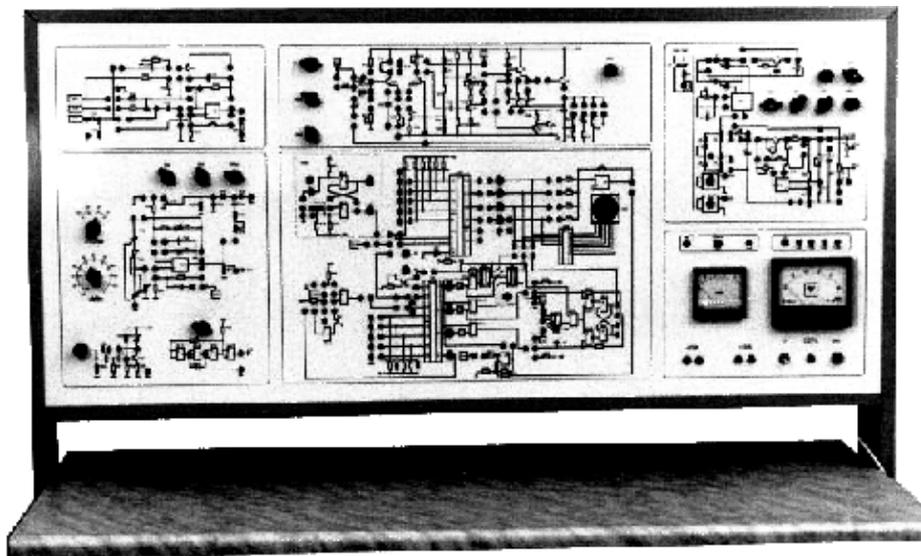


Рисунок 1.1 – Внешний вид лабораторного стенда "Электроника"

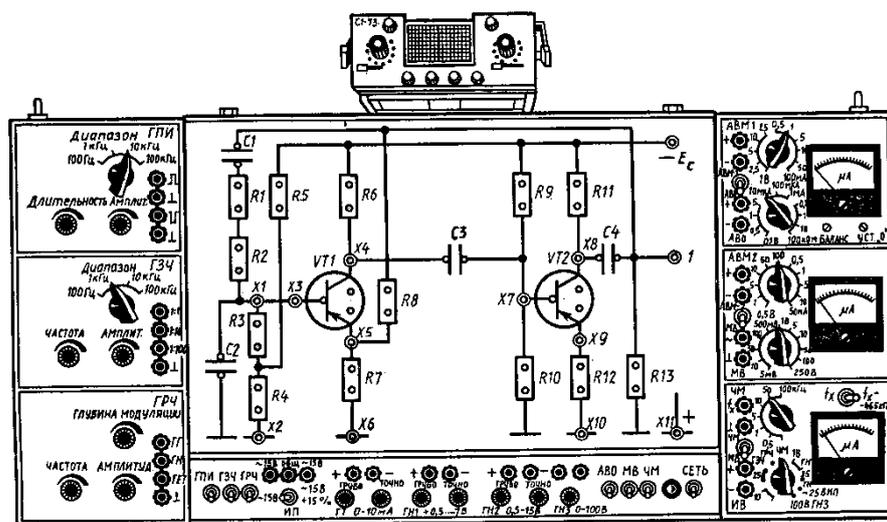


Рисунок 1.2 – Внешний вид лабораторного стенда 87Л-01 «ЛУЧ»

В ТГУ используется стенд 87Л-01 «ЛУЧ». Внешний вид стенда приведен на рисунке 1.2. Габаритные размеры стенда 965x450x190мм. Стенд содержит модули генераторов, измерительных приборов, блок монтажных полей (БМП) со сменными панелями, пенал оперативного набора со съемными элементами и соединительными проводами.

Модуль генераторов содержит:

- генератор прямоугольных импульсов;
- генератор звуковой частоты;
- генератор радиочастоты;
- блок питания и коммутации.

Модуль измерительных приборов содержит:

- ампервольтметр;
- ампервольтметр;
- милливольтметр;
- частотомер;
- измеритель выхода;
- осциллограф.

Блок монтажных полей предназначен для сборки исследуемой схемы. Съемные элементы устанавливаются на монтажное поле через отверстия в сменной панели на условных графических обозначениях элементов.

Большинство лабораторных стендов, используемых в процессе обучения на кафедре "Промышленная электроника", имеют на лицевой панели изображение исследуемой схемы, что упрощает выполнение лабораторной работы, которая сводится к снятию заданных характеристик готовой схемы.

Недостатками универсальных стендов, рассчитанных на выполнение большого числа лабораторных работ, является их сложность и большие размеры; а недостатками стендов для небольшого числа лабораторных работ – узкая специализация и необходимость использования внешних измерительных приборов. При использовании лабораторных стендов в учебном процессе необходимо учитывать возможность одновременного обеспечения стендами

наибольшего числа студентов, что затруднительно при использовании универсальных стенов, так как число выполняемых на одном занятии лабораторных работ ограничено.

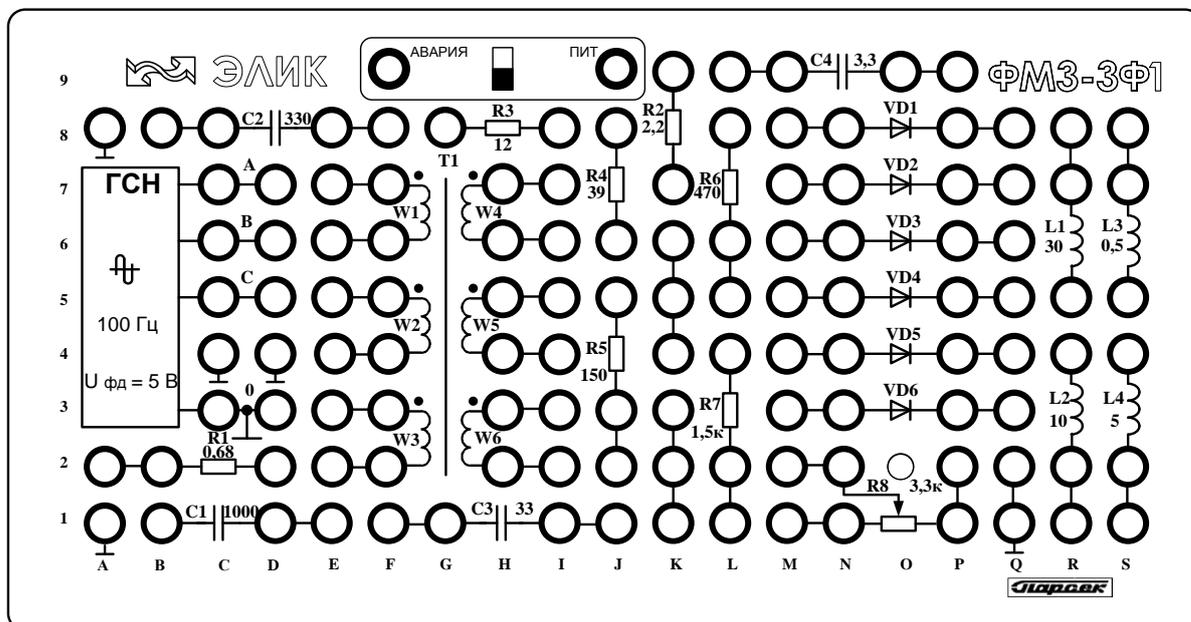


Рисунок 1.3 – Наборное поле модуля ФМ 3Ф1 "Трёхфазная схемотехника"

## 1.2 Цель бакалаврской работы. Выбор конструкции и коммутирующих устройств для стенда

Целью работы является разработка стенда для проведения лабораторных работ по теме "Силовая электроника. Сетевые источники питания", в частности, выпрямителей и линейных стабилизаторов. Габаритные размеры стенда не более 250x150x70 мм; напряжение питания  $\pm 15V$ .

Так как количество выполняемых работ небольшое, а также имеется ограничение по габаритным размерам, рациональнее всего выбрать конструкцию, соответствующую технологии "ЭЛИК".

Питание стенда осуществляется от функционального модуля сетевого питания ФМ3Ф2 – имитатора трёхфазной сети частотой 50Гц с амплитудой выходного напряжения 5В, содержащего также набор диодов для изучения схем выпрямителей. Выбранная конструкция стенда предусматривает, в отличие от

рассмотренных стендов с изображением готовой схемы на лицевой панели, самостоятельную сборку схемы студентом.

Помимо модуля сетевого питания стенд содержит модуль стабилизаторов для проведения лабораторных работ по изучению линейных стабилизаторов и модуль измерительных приборов. Коммутация осуществляется с помощью стандартных коммутационных элементов (провода со штекерами), расстояние между гнездами равно 10мм. Изображение элементов на панели выполнено в соответствии с ГОСТ 2.721-74, что обеспечивает наглядность и простоту сборки. Для регулировки величины сопротивления переменных резисторов на лицевую панель выведены ручки регулирования положения движка. Также на наборном поле стенда расположен выключатель питания, индикаторы питания и аварийного режима.

Такой выбор конструкции позволяет обеспечивать непрерывный учебный процесс, так как модули взаимозаменяемы и каждый из них применяется только для выполнения определенных работ.

### **1.3 Выбор типов и параметров измерительной аппаратуры и источников питания**

Для изучения выпрямителей и линейных стабилизаторов необходимо измерять величину и форму входного и выходного напряжений, для чего требуются вольтметр и осциллограф, а также величину выходного тока с помощью миллиамперметра. В составе оборудования должны быть два ампервольтметра и частотомер. Осциллограф для проведения лабораторных работ может быть любой.

В соответствии с заданием на работы входное напряжение для стабилизаторов составляет 10, 15 и 20В,

### **1.4 Выбор структуры стенда**

Структурная схема системы преобразования переменного напряжения в

стабилизированное постоянное, характерная для маломощных источников питания, приведена на рисунке 1.4. Переменное входное напряжение  $U_1$  понижается или повышается трансформатором до требуемой величины  $U_2$ . После выпрямителя (напряжение  $U_d$ ) и сглаживающего фильтра (напряжение  $U_{df}$ ) постоянное напряжение стабилизируется и подается на нагрузку ( $U_{дн}$ ).

Структурная схема лабораторного стенда (см. рисунок 1.5) разработана по тому же принципу. В целях безопасности трехфазная сеть имитируется генератором частоты 50Гц с выходным напряжением 5В, который вместе с трансформатором, выпрямителями и сглаживающими фильтрами составляют функциональный модуль ФМ 3Ф2, а стабилизатор напряжения – модуль ФМ СТ2. Питание модуля ФМ 3Ф2, в соответствии с заданием, осуществляется от блока питания  $\pm 15В$ , модуля ФМ СТ2 - непосредственно от ФМ 3Ф2.

Функциональный модуль ФМ 3Ф2 разработан на базе существующего модуля ФМ 3Ф1 путем снижения частоты генерируемого имитатором трехфазной сети напряжения с 400 до 50Гц.

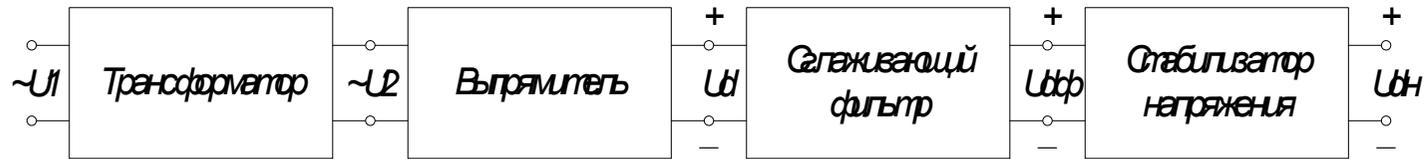


Рисунок 1.4 – Структурная схема преобразования переменного напряжения в стабилизированное постоянное



Рисунок 1.5 – Структурная схема лабораторного стенда

## 2 РАСЧЕТНЫЙ РАЗДЕЛ

### 2.1 Разработка минимального перечня изучаемых устройств

Лабораторный комплекс по изучению темы "Силовая электроника. Сетевые источники питания" в соответствии со структурной схемой, приведенной на рисунке 1.5, позволяет изучать все перечисленные блоки, но в рамках данной работы рассмотрены блоки "Выпрямитель" и "Стабилизатор напряжения", в частности, непрерывные стабилизаторы.

#### 2.1.1 Блок выпрямителей

Блок выпрямителей предполагает выполнение лабораторных работ по изучению четырех распространенных схем выпрямителей: однофазной однополупериодной (см. рисунок 2.1), двухфазной двухполупериодной (см. рисунок 2.2), однофазной мостовой (см. рисунок 2.3) и трехфазной мостовой схемы Ларионова (см. рисунок 2.4).

Нагрузкой выпрямителя, в соответствии с разработанной структурной схемой, является фильтр. Так как с использованием лабораторного стенда предполагается проводить лабораторные работы также и по изучению сглаживающих фильтров, то нагрузкой выпрямителя может быть как фильтр, начинающийся с емкости, так и фильтр, начинающийся с индуктивности.

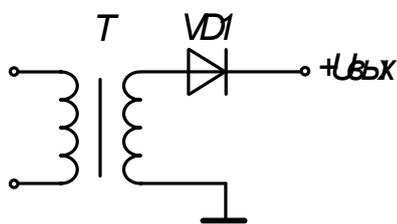


Рисунок 2.1 - Однофазная однополупериодная схема выпрямителя

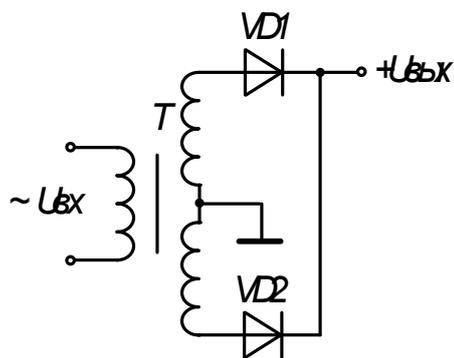


Рисунок 2.2 - Двухфазная двухполупериодная схема выпрямителя

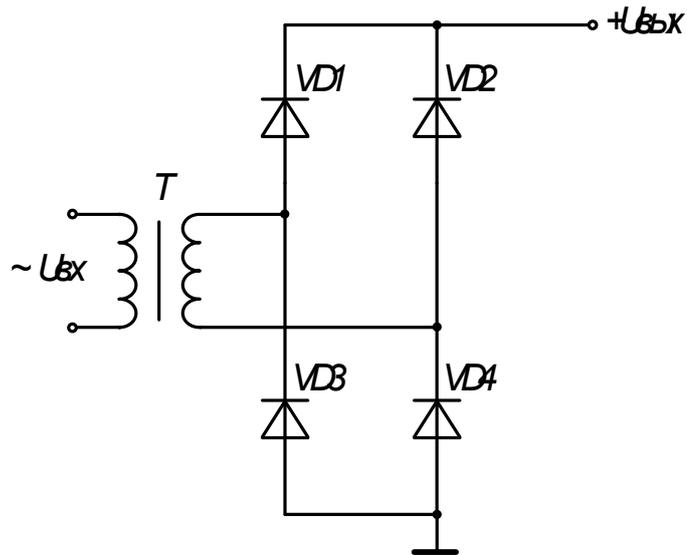


Рисунок 2.3 – Однофазная мостовая схема выпрямителя

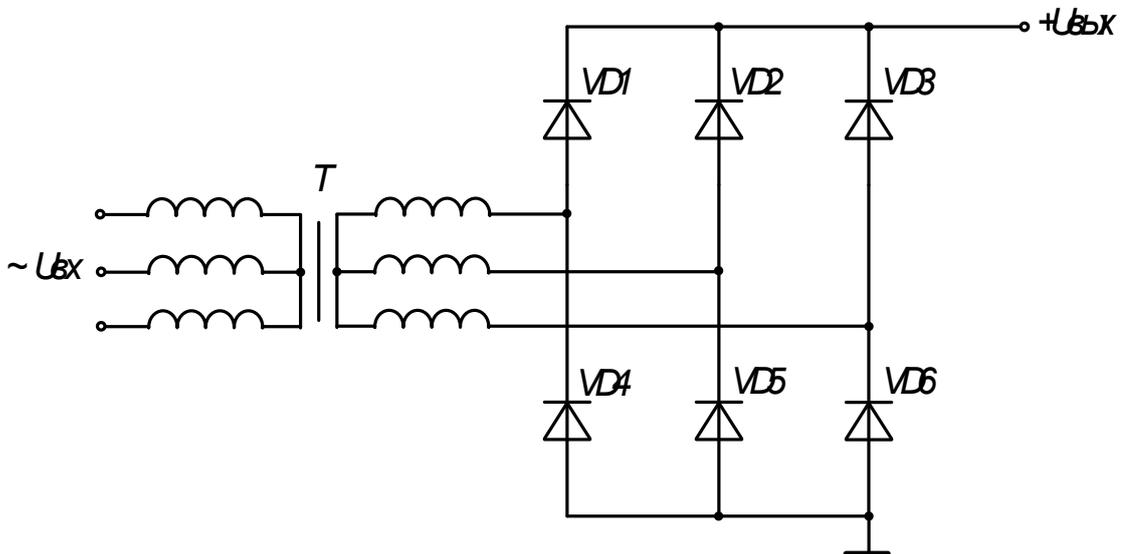


Рисунок 2.4 – Трехфазная мостовая схема выпрямителя

### 2.1.2 Блок стабилизаторов

В соответствии с заданием, разрабатываемый лабораторный стенд предполагает исследование схем линейных (непрерывных) стабилизаторов с регулированием выходного тока от 6 до 27 мА, выходного напряжения от 3,5 до 16 В при напряжении питания 10, 15 и 20 В.

Линейные компенсационные стабилизаторы напряжения относятся к наиболее распространенным устройствам вторичного электропитания и предназначены для поддержания на нагрузке заданного уровня напряжения. По

принципу действия они являются системой автоматического регулирования, работающей в режиме стабилизации [1].

Выполнение лабораторных работ с применением стенда предполагает исследование непрерывных стабилизаторов трёх видов: без защиты ключевого элемента, с защитой по току и с защитой по мощности. Схема стабилизатора без защиты ключевого элемента приведена на рисунке 2.5 [2]. Защита выходного транзистора от теплового пробоя в модуле осуществляется методом ограничения максимального тока источника питания модуля безопасной величиной.

Транзисторы VT1 и VT2 в приведенной схеме включены по схеме Дарлингтона для иллюстрации случая, когда при расчете источника питания коэффициента усиления по току VT1 не достаточно, в этом случае транзистор VT2 обеспечивает усиление тока для VT1. Выход на нагрузку берется с эмиттера VT1.

Так как, в соответствии с заданием, максимальное значения тока нагрузки не превышает 30мА, то пару транзисторов, включенную по схеме Дарлингтона можно заменить одним. Для обеспечения более стабильной работы вместо R2 включен источник постоянного тока на полевом транзисторе [5], а опорное напряжение снимается с подстроечного резистора (см. рисунок 2.6). Регулирование уровня стабилизации выходного напряжения осуществляется изменением величины сопротивления резистора R5 [6].

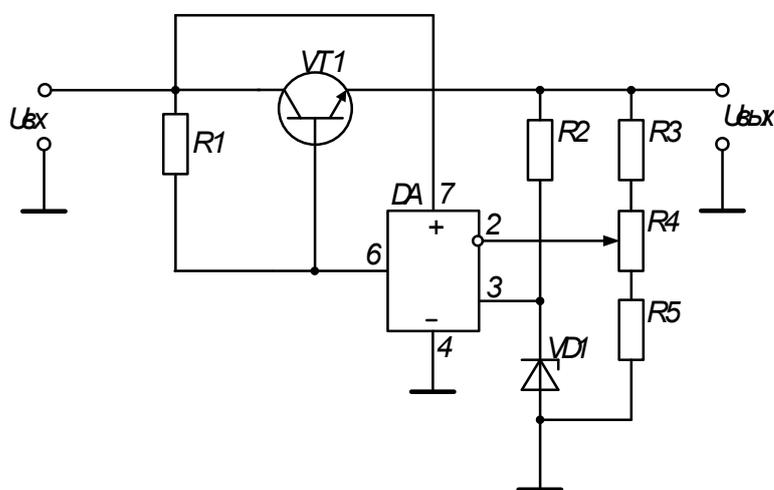


Рисунок 2.5 – Схема непрерывного стабилизатора без защиты

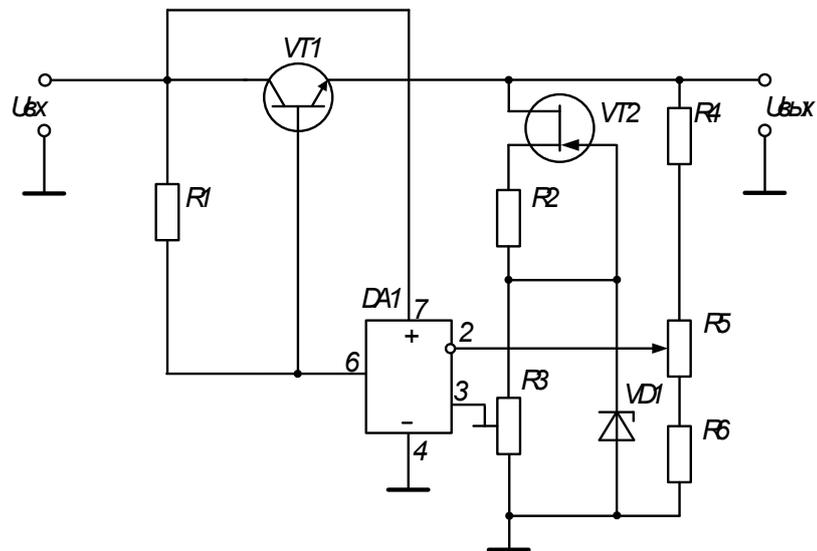


Рисунок 2.6 – Рабочая схема непрерывного стабилизатора без защиты

Схема стабилизатора с защитой ключевого элемента по току приведена на рисунке 2.7. При превышении тока нагрузки заданного значения уровня ограничения падение напряжение на  $R_2$  вызовет увеличения напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$  транзистора  $VT_2$ , он перейдет в активный режим, при этом значительная часть базового тока транзистора  $VT_1$  ответвляется через  $VT_2$  в нагрузку, что приводит к стабилизации величины эмиттерного тока транзистора  $VT_1$  (переход в режим генератора стабильного тока).

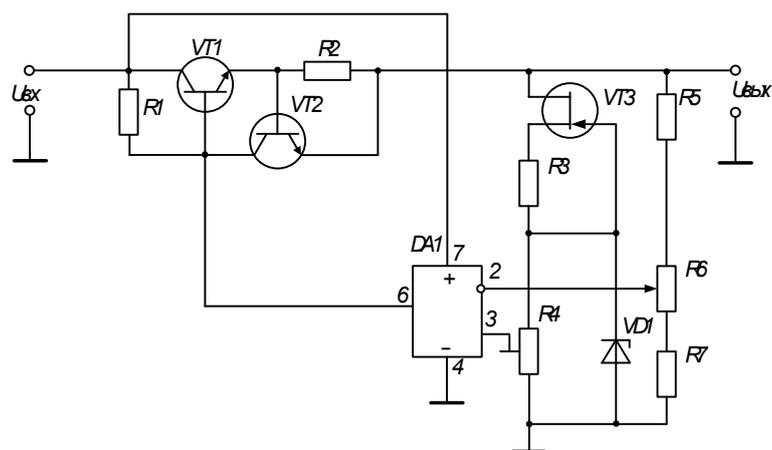


Рисунок 2.7 – Схема стабилизатора с защитой ключевого элемента по току

Короткое замыкание на выходе стабилизатора приводит к переходу транзистора  $VT_1$  в режим насыщения, что, в свою очередь, ограничивает ток

короткого замыкания. Таким образом, регулирование величины стабилизируемого напряжения осуществляется изменением величины сопротивления резистора  $R_6$ , а уровня защиты – изменением величины сопротивления резистора  $R_2$ , определяющего величину максимального тока нагрузки.

Схема стабилизатора с защитой ключевого элемента по мощности приведена на рисунке 2.8.

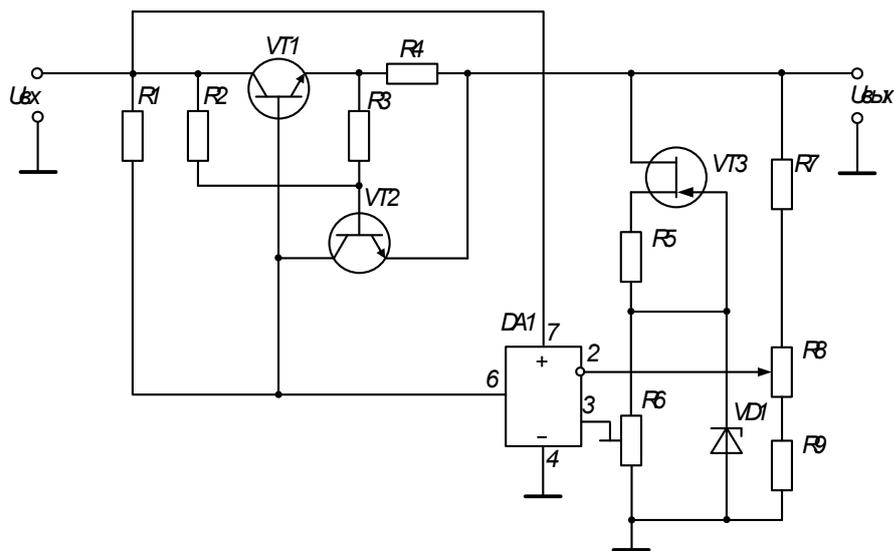


Рисунок 2.8 – Схема стабилизатора с защитой ключевого элемента по мощности

Ток базы транзистора  $VT_2$  определяется суммой токов, втекающих в базу транзистора из входных цепей входного напряжения и эмиттера регулирующего транзистора  $VT_1$ . При нормальной работе схемы суммы токов недостаточно для перевода транзистора  $VT_2$  в активное состояние. Возрастание тока нагрузки выше предельного тока до величины примерно 1,4 максимального тока нагрузки  $I_{н. макс.}$  приводит к его включению из-за возрастания падения напряжения на резисторе  $R_4$ . При этом уменьшается величина тока в нагрузку и, следовательно, падение напряжения на резисторе  $R_4$ . Кроме того, увеличивается значение входного напряжения  $U_{вх}$ . Для того, чтобы избежать повторного включения источника на закороченную нагрузку, в схему введен  $R_2$ , ток через который при повышении входного напряжения  $U_{вх}$  поддерживает транзистор  $VT_2$  во включенном состоянии.

## 2.2 Расчет исследуемых схем выпрямителей

Так как выпрямительная схема является частью источника питания, то её расчёт сводится к выбору схемы, диодов, определению некоторых параметров трансформатора и сглаживающего фильтра.

### 2.2.1 Расчет схемы выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с емкости

Для выбора диодов необходимо знать значения тока через открытый диод  $I_{OD}$ , максимальное обратное напряжение  $U_{OBR}$  и максимальный амплитудный прямой ток  $I_{MAX}$ . Из полученных в результате расчетов значений необходимо выбрать максимальные, и соответственно им выбрать диоды.

В настоящее время в выпрямительных схемах чаще используются кремниевые диоды, основным преимуществом которых является возможность работы при температуре окружающей среды до  $125^{\circ}$ . [1]. Прямое падение напряжения  $\Delta E_D$  на кремниевом диоде составляет 1В, внутреннее сопротивление  $R_i$  можно определить по приближенной формуле:

$$R_i \approx \frac{\Delta E_D}{3I_{OD}}, \quad (2.1)$$

где  $I_{OD}$  - ток через открытый диод.

Для однополупериодной схемы

$$I_{OD} = I_o = 70 \text{ мА}, \quad (2.2)$$

где  $I_o$  - выпрямленный ток. Так как, по заданию, выходной ток стабилизаторов должен регулироваться в пределах от 5 до 30мА, то, учитывая потери в стабилизаторе и фильтре, примем выпрямленный ток 70мА.

Для двухполупериодной и однофазной мостовой схем

$$I_{OD} = \frac{I_o}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ мА}; \quad (2.3)$$

для трехфазной мостовой схемы

$$I_{OD} = \frac{I_o}{3} = \frac{70}{3} = 23,3 \text{ мА}. \quad (2.4)$$

Таким образом, внутреннее сопротивление диода для однополупериодной схемы составляет

$$R_i \approx \frac{\Delta E_D}{3I_{OD}} \approx \frac{1}{3 \cdot 70 \cdot 10^{-3}} = 4,76 \text{ Ом.} \quad (2.5)$$

Результаты вычислений включены в таблицу 2.1.

Для исследования работы выпрямителя на фильтр, начинающийся с емкости, используются все приведенные схемы.

Максимальное обратное напряжение будет приложено к диоду при включении в одно- или двухполупериодной схеме, для которых  $U_{OBR}$  можно рассчитать по приближительной формуле [1]:

$$U_{OBR} \approx 3E_0, \quad (2.6)$$

где  $E_0$  – величина выпрямленного напряжения.

Так как из выбранных диодов при выполнении лабораторных работ будут собираться все перечисленные схемы, то они должны быть рассчитаны на максимально возможное обратное напряжение. Максимальная величина выпрямленного напряжения, поступающего на вход стабилизатора, по заданию составляет 20В. Таким образом, максимальное обратное напряжение на диоде, в соответствии с формулой (2.6), составляет

$$U_{OBR} \approx 3E_0 \approx 3 \cdot 20 = 60 \text{ В.}$$

Сопротивление обмоток трансформатора  $r_{TP}$ , приведенное к фазе вторичной обмотки, определяется по приближенной формуле

$$r_{TP} \approx k_r \frac{E_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt[4]{\frac{s \cdot f \cdot B}{E_0 \cdot I_0}}, \quad (2.7)$$

где  $k_r$  – коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя [6] (см. табл. 2.1);

$f$  – частота питающей сети, 50Гц;

$B$  – приблизительное значение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, принимаем равной 1,3 Т;

$s = 3$ , число стержней трансформатора.

Для однополупериодной схемы сопротивление обмоток трансформатора, в соответствии с формулой (2.7)

$$r_{\text{ТР}} \approx k_r \frac{E_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt[4]{\frac{s \cdot f \cdot B}{E_0 \cdot I_0}} \approx 2.3 \frac{20}{70 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 1.3} \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 50 \cdot 1.3}{20 \cdot 70 \cdot 10^{-3}}} = 34,73 \text{ Ом},$$

активное сопротивление фазы выпрямителя  $r$  определено как сумма сопротивления диода  $R_i$  и обмотки трансформатора  $r_{\text{ТР}}$ , результаты вычислений сведены в таблицу 2.1.

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора  $L_s$ , можно также вычислить приближенно:

$$L_s \approx k_L \cdot s \frac{E_0}{(p-1)^2 I_0 \cdot f \cdot B} \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{s \cdot f \cdot B}{E_0 \cdot I_0}}}, \quad (2.8)$$

где  $k_L$  – коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя [1] (табл. 2.1),  $p = 2$  – число чередующихся обмоток.

Для однополупериодной схемы индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, в соответствии с формулой (2.8):

$$\begin{aligned} L_s &\approx k_L \cdot s \frac{E_0}{(p-1)^2 I_0 \cdot f \cdot B} \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{s \cdot f \cdot B}{E_0 \cdot I_0}}} \approx \\ &\approx 4.1 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \frac{20}{(2-1)^2 70 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 1.3} \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{3 \cdot 50 \cdot 1.3}{20 \cdot 70 \cdot 10^{-3}}}} = 15,74 \text{ мГн}, \end{aligned}$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.1.

Угол  $\varphi$ , характеризующий соотношение между индуктивным и активным сопротивлением фазы выпрямителя, вычисляется по формуле:

$$\varphi = \arctg \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s}{r}, \quad (2.9)$$

Таблица 2.1 – Расчетные параметры схем выпрямителей при работе на фильтр, начинающийся с емкости

Схема выпрямителя	Параметры																				
	m	k <sub>П</sub>	k <sub>r</sub>	k <sub>L</sub> x10 <sup>-3</sup>	I <sub>OD</sub> , мА	R <sub>i</sub> , Ом	r <sub>ТР</sub> , Ом	r, Ом	L <sub>S</sub> , мГн	φ	A <sub>0</sub>	B <sub>0</sub>	D <sub>0</sub>	F <sub>0</sub>	H <sub>0</sub> x10 <sup>3</sup>	U <sub>2x</sub> , В	U <sub>ОБР</sub> , В	I <sub>2</sub> , мА	I <sub>D</sub> , мА	I <sub>МАХ</sub> , мА	C <sub>0</sub> , мкФ
Однополу- периодная	1	157	2,3	4,1	70,0	4,76	34,73	39,49	15,74	7,1 <sup>0</sup>	0,14	1,20	2	5,1	41	24,0	67,88	140,00	140	357,0	13,2
Двухполу- периодная	2	67	4,7	4,3	35,0	9,52	70,97	80,50	16,51	3,7 <sup>0</sup>	0,14	1,20	2	5,1	31	24,0	67,88	70,00	70,00	178,5	11,5
Однофазная мостовая	2	67	3,5	5,0	35,0	9,52	52,85	62,38	19,19	5,5 <sup>0</sup>	0,11	1,12	2,1	5,4	27	22,4	63,36	103,94	73,50	189,00	12,9
Трехфазная мостовая	6	5,7	4,5	1,9	23,3	14,29	67,95	82,24	7,23	1,6 <sup>0</sup>	0,05	0,90	2,1	5,7	2,7	18,0	50,91	49,00	35,65	66,50	11,5

Таким образом, для однополупериодной схемы угол  $\varphi$ , в соответствии с формулой (2.9):

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S}{r} = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 15,74 \cdot 10^{-3}}{39,49} = \operatorname{arctg}(0.125) = 7,1^{\circ},$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.1.

Основной расчетный коэффициент

$$A_0 = \frac{I_0 \cdot r}{m \cdot E_0}, \quad (2.10)$$

где  $m$  – число фаз выпрямителя (табл. 2.1).

В соответствии с (2.10) для однополупериодной схемы основной расчетный коэффициент

$$A_0 = \frac{I_0 \cdot r}{m \cdot E_0} = \frac{70 \cdot 10^{-3} \cdot 51.84}{1 \cdot 20} = 0,14.$$

Вспомогательные коэффициенты  $B_0$ ,  $D_0$ ,  $F_0$  и  $H_0$  в определены графически [1] в зависимости от  $A_0$ , угла  $\varphi$  и числа фаз  $m$ , их величины приведены в табл. 2.1

Э.д.с. фазы вторичной обмотки трансформатора для выбранных схем вычисляется как

$$U_{2X} = B_0 \cdot E_0, \quad (2.11)$$

например, для однополупериодной схемы

$$U_{2X} = B_0 \cdot E_0 = 1.2 \cdot 20 = 24 \text{ В};$$

точное значение обратного напряжения на диоде

$$U_{\text{ОБР}} = 2\sqrt{2} \cdot U_{2X}, \quad (2.12)$$

например, для однополупериодной схемы

$$U_{\text{ОБР}} = 2\sqrt{2} \cdot 24 = 67,88 \text{ В},$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.1.

Действующее значение тока вторичной обмотки  $I_2$ , ток через диод  $I_D$  и амплитуда тока через диод  $I_{\text{МАХ}}$  для однополупериодной схемы

$$I_2 = I_D = D_0 \cdot I_0 = 2 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 140 \text{ мА}, \quad (2.13)$$

$$I_{MAX} = F_0 \cdot I_0 = 5.1 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 357 \text{ мА}; \quad (2.14)$$

для двухполупериодной схемы

$$I_2 = I_D = D_0 \cdot \frac{I_0}{2} = 2 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{2} = 70,00 \text{ мА}, \quad (2.15)$$

$$I_{MAX} = F_0 \cdot \frac{I_0}{2} = 5.1 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{2} = 178,5 \text{ мА}; \quad (2.16)$$

для однофазной мостовой схемы

$$I_2 = D_0 \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 2,1 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 103,94 \text{ мА}, \quad (2.17)$$

$$I_D = D_0 \cdot \frac{I_0}{2} = 2,1 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{2} = 73,5 \text{ мА}, \quad (2.18)$$

$$I_{MAX} = F_0 \cdot \frac{I_0}{2} = 5.4 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{2} = 189 \text{ мА}; \quad (2.19)$$

для трехфазной мостовой схемы

$$I_2 = D_0 \cdot \frac{I_0}{3} = 2.1 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{3} = 49 \text{ мА}, \quad (2.20)$$

$$I_D = D_0 \cdot \sqrt{2} \frac{I_0}{6} = 2.1 \cdot \sqrt{2} \frac{70 \cdot 10^{-3}}{6} = 34,65 \text{ мА}, \quad (2.21)$$

$$I_{MAX} = F_0 \cdot \frac{I_0}{6} = 5,7 \cdot \frac{70 \cdot 10^{-3}}{6} = 66,5 \text{ мА}. \quad (2.22)$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.1.

Максимальная мощность на диоде рассеивается при включении в однополупериодной схеме (табл. 2.1)

$$P_D \approx I_D^2 \cdot R_i \approx \left(40 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot 4.76 = 93,3 \text{ мВт}. \quad (2.23)$$

Минимальная выходная емкость выпрямителя (входная емкость фильтра), мкФ

$$C_0 = \frac{H_0 \cdot 100}{r \cdot f \cdot k_{\Pi}}, \quad (2.24)$$

где  $k_{\Pi}$  – коэффициент пульсации выпрямленного напряжения [6], зависящий от схемы (табл. 2.1).

Для однополупериодного выпрямителя минимальная выходная емкость

$$C_0 = \frac{H_0 \cdot 100}{r \cdot f \cdot k_{\Pi}} = \frac{38000 \cdot 100}{39,49 \cdot 50 \cdot 157} = 13,2 \text{ мкФ.}$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.1.

Паспортное значение рабочего напряжения конденсаторов фильтра должно превышать  $U_{2X} \cdot \sqrt{6}$ , максимальное рассчитанное напряжение  $U_{2X}$  (таблица 2.1) равно 24В; то есть

$$U_C \geq U_{2X} \cdot \sqrt{6} = 24 \cdot \sqrt{6} = 58,79 \text{ В.} \quad (2.25)$$

Нагрузочная характеристика выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с емкости – зависимость выпрямленного напряжения от тока нагрузки рассчитывается по формуле [1]

$$E = U_{2X} \cdot \sqrt{2} \cos \theta, \quad (2.26)$$

где  $\theta$  - угол отсечки – половина времени, в течение которого протекает ток в диоде[4].

Величина  $\sqrt{2} \cos \theta$  определяется графической зависимостью от параметра  $\gamma_0$  [1], который связан с величиной тока нагрузки зависимостью

$$\gamma_0 = I \frac{r}{m \cdot U_{2X}}, \quad (2.27)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.2, по данным которой построена нагрузочная характеристика  $E_0 = f(I_0)$  (см. рисунок 2.9)

Таблица 2.2 – Данные расчета нагрузочной характеристики

Схема выпрямителя	Параметр	Ток нагрузки I, мА							
		1	10	20	30	40	50	60	70
Однополупериодная	$\gamma_0$	0,002	0,016	0,033	0,049	0,066	0,082	0,099	0,115
	$\sqrt{2}\cos\theta$	1,414	1,26	1,16	1,08	1,02	0,95	0,89	0,84
	E, В	33,94	30,24	27,84	25,92	24,48	22,8	21,36	20,16
Двухполупериодная	$\gamma_0$	0,002	0,017	0,034	0,05	0,067	0,084	0,101	0,117
	$\sqrt{2}\cos\theta$	1,414	1,26	1,16	1,08	1,02	0,95	0,89	0,84
	E, В	33,94	30,24	27,84	25,92	24,48	22,8	21,36	20,16
Однофазная мостовая	$\gamma_0$	0,001	0,014	0,028	0,042	0,056	0,07	0,084	0,097
	$\sqrt{2}\cos\theta$	1,414	1,27	1,18	1,12	1,06	1,00	0,95	0,9
	E <sub>0</sub> , В	31,68	28,45	26,43	25,09	23,74	22,4	21,28	20,16
Трехфазная мостовая	$\gamma_0$	0,001	0,008	0,015	0,023	0,03	0,038	0,046	0,053
	$\sqrt{2}\cos\theta$	1,41	1,31	1,26	1,21	1,17	1,13	1,12	1,11
	E, В	25,46	23,58	22,68	21,78	21,06	20,34	20,16	19,98

### 2.2.2 Расчет схемы выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с индуктивности.

Для исследования работы выпрямителя на фильтр, начинающийся с индуктивности, используются двухполупериодная, однофазная мостовая и трехфазная мостовая схемы выпрямителей.

Сопротивление обмоток трансформатора  $r_{\text{тр}}$ , приведенное к вторичной обмотке, определяется по приближенной формуле (2.7), где коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя  $k_r$ , определяется по табл. 2.2. Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора  $L_s$ , приведенную к фазе вторичной обмотки, также вычисляется приближенно по формуле (2.8), коэффициент  $k_L$  определяется по табл. 2.3; результаты вычислений сведены в таблицу 2.3.

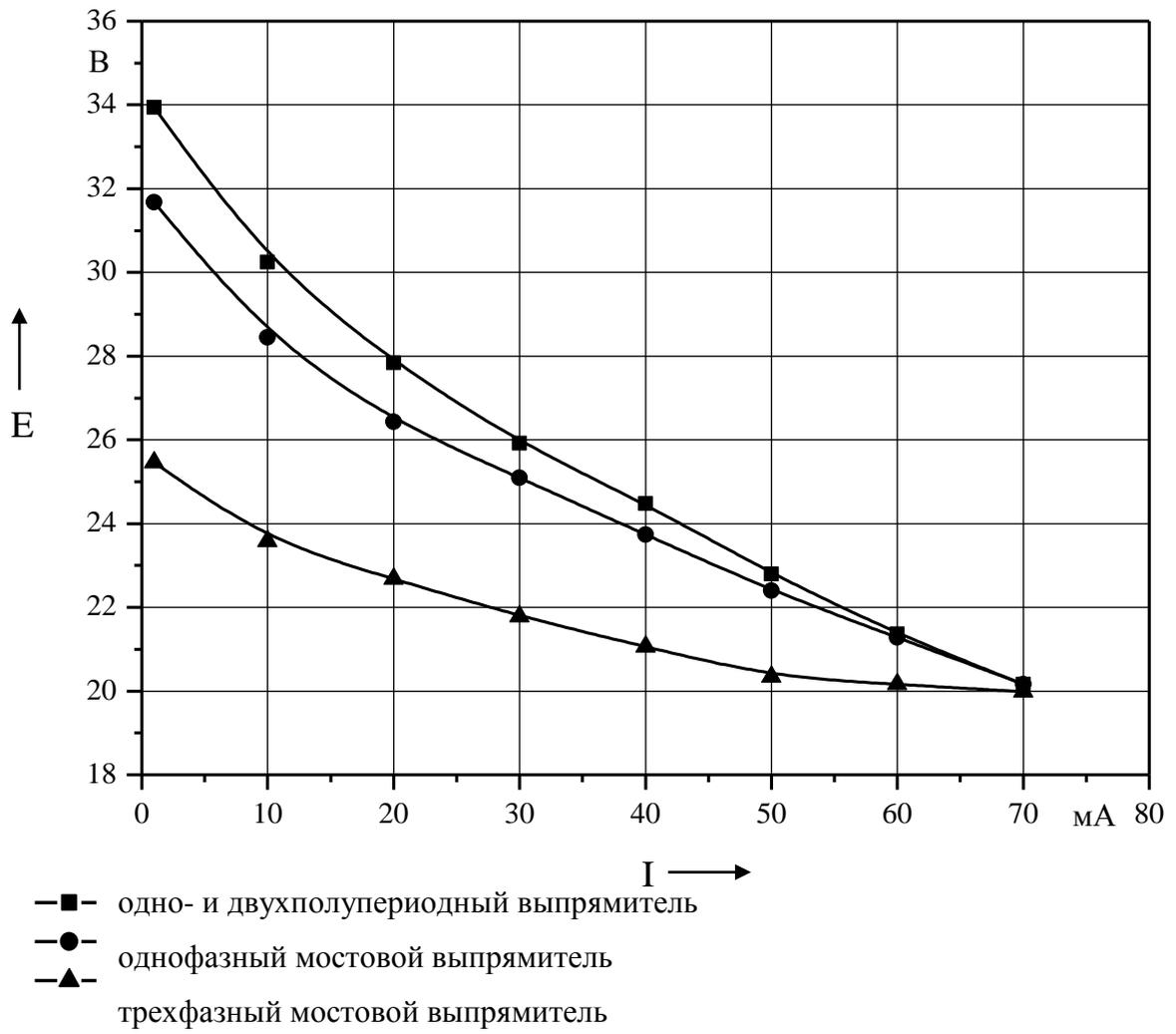


Рисунок 2.9 – Нагрузочная характеристика выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с емкости

Таблица 2.3 – Расчетные параметры схем выпрямителей при работе на фильтр, начинающийся с индуктивности

Схема выпрямителя	Параметры															
	m	$k_{\Pi}$	$I_{OD},$ мА	$R_i,$ Ом	$k_r$	$k_L$ $\times 10^{-3}$	$r_{TP},$ Ом	$L_S,$ мГн	$\Delta E_r,$ В	$\Delta E_x,$ В	$\Delta E_{Dcx},$ В	$E_{0x},$ В	$U_{OBR},$ В	$U_{2X},$ В	$I_2,$ мА	$I_D,$ мА
Двухполу- периодная	2	67	35,0	9,52	7,0	5,5	105,7 1	21,11	7,40	0,15	1	28,55	89,65	31,41	49,7	49,7
Однофазная мостовая	2	67	35,0	9,52	5,2	6,4	78,52	24,57	5,50	0,34	2	27,84	43,71	30,90	70	49,7
Трехфазная мостовая	6	5,7	23,3	14,29	2,5	1,0	99,66	3,84	13,95	0,08	2	36,03	37,83	15,50	54,7	40,6

Падения напряжения на активном  $\Delta E_r$  и реактивном  $\Delta E_x$  сопротивлениях, а также на диодах  $\Delta E_{Dcx}$  [1] для двухполупериодной схемы

$$\Delta E_r = I_0 \cdot r_{TP} = 70 \cdot 10^{-3} \cdot 105,71 = 7,4 \text{ В}, \quad (2.28)$$

$$\Delta E_x = 2I_0 \cdot f \cdot L_S = 2 \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 21,11 \cdot 10^{-3} = 0,15 \text{ В}, \quad (2.29)$$

$$\Delta E_{Dcx} = \Delta E_D = 1 \text{ В}; \quad (2.30)$$

для однофазной мостовой схемы

$$\Delta E_r = I_0 \cdot r_{TP} = 70 \cdot 10^{-3} \cdot 78,52 = 5,5 \text{ В}, \quad (2.31)$$

$$\Delta E_x = 4I_0 \cdot f \cdot L_S = 4 \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 24,57 \cdot 10^{-3} = 0,34 \text{ В}, \quad (2.32)$$

$$\Delta E_{Dcx} = 2 \Delta E_D = 2 \text{ В}; \quad (2.33)$$

для трехфазной мостовой схемы

$$\Delta E_r = 2 \cdot I_0 \cdot r_{TP} = 2 \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 99,66 = 13,95 \text{ В}, \quad (2.34)$$

$$\Delta E_x = 6I_0 \cdot f \cdot L_S = 6 \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 3,84 \cdot 10^{-3} = 0,08 \text{ В}, \quad (2.35)$$

$$\Delta E_{Dcx} = 2 \Delta E_D = 2 \text{ В}. \quad (2.36)$$

Ориентировочное значение падения напряжения на дросселе  $\Delta E_{др}$  принимаем равными  $0,2E_0$  [1], то есть

$$\Delta E_{др} = 0,2 \cdot E_0 = 0,2 \cdot 20 = 4 \text{ В}. \quad (2.37)$$

Выпрямленное напряжение при холостом ходе для каждой схемы определяется как сумма

$$E_{0X} = E_0 + \Delta E_r + \Delta E_x + \Delta E_{Dcx} + \Delta E_{др}. \quad (2.38)$$

Амплитуда обратного напряжения  $U_{OBR}$  и э.д.с. фазы вторичной обмотки  $U_{2X}$  трансформатора на диоде [1] для двухполупериодной схемы

$$U_{OBR} = 3,14 E_{0X} = 3,14 \cdot 28,55 = 89,65 \text{ В}; \quad (2.39)$$

$$U_{2X} = 1,11 E_{0X} = 1,11 \cdot 28,55 = 31,41 \text{ В}; \quad (2.40)$$

для однофазной мостовой схемы

$$U_{OBR} = 1,57 E_{0X} = 1,57 \cdot 27,84 = 43,71 \text{ В}; \quad (2.41)$$

$$U_{2X} = 1,11 E_{0X} = 1,11 \cdot 27,84 = 30,9 \text{ В}; \quad (2.42)$$

для трехфазной мостовой схемы

$$U_{\text{ОБР}} = 1,05 E_{0X} = 1,05 \cdot 36,03 = 37,83 \text{ В}; \quad (2.43)$$

$$U_{2X} = 1,11 E_{0X} = 0,43 \cdot 36,03 = 15,5 \text{ В}; \quad (2.44)$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.2.

Действующее значение тока вторичной обмотки  $I_2$  и ток через диод  $I_D$  для двухполупериодной схемы

$$I_2 = I_D = 0,71 \cdot I_0 = 0,71 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 49,7 \text{ мА}, \quad (2.45)$$

для однофазной мостовой схемы

$$I_2 = I_0 = 70 \text{ мА}, \quad (2.46)$$

$$I_D = 0,71 \cdot I_0 = 0,71 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 49,7 \text{ мА}, \quad (2.47)$$

для трехфазной мостовой схемы

$$I_2 = 0,82 \cdot I_0 = 0,82 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 57,4 \text{ мА}, \quad (2.48)$$

$$I_D = 0,58 \cdot I_0 = 0,58 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 40,6 \text{ мА}, \quad (2.49)$$

результаты вычислений сведены в таблицу 7.2.1.

Амплитуда тока через диод  $I_{\text{МАХ}}$  всех рассмотренных схем

$$I_{\text{МАХ}} = I_0 = 70 \text{ мА}. \quad (2.50)$$

Нагрузочная характеристика выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с индуктивности  $E_0 = f(I_0)$  представляет собой прямую линию и строится по двум точкам:  $I = 0$ ;  $E = E_{0X}$  и  $I = I_0$ ;  $E = E_0$ . Нагрузочная характеристика  $E_0 = f(I_0)$  выпрямителя приведена на рисунке 2.10.

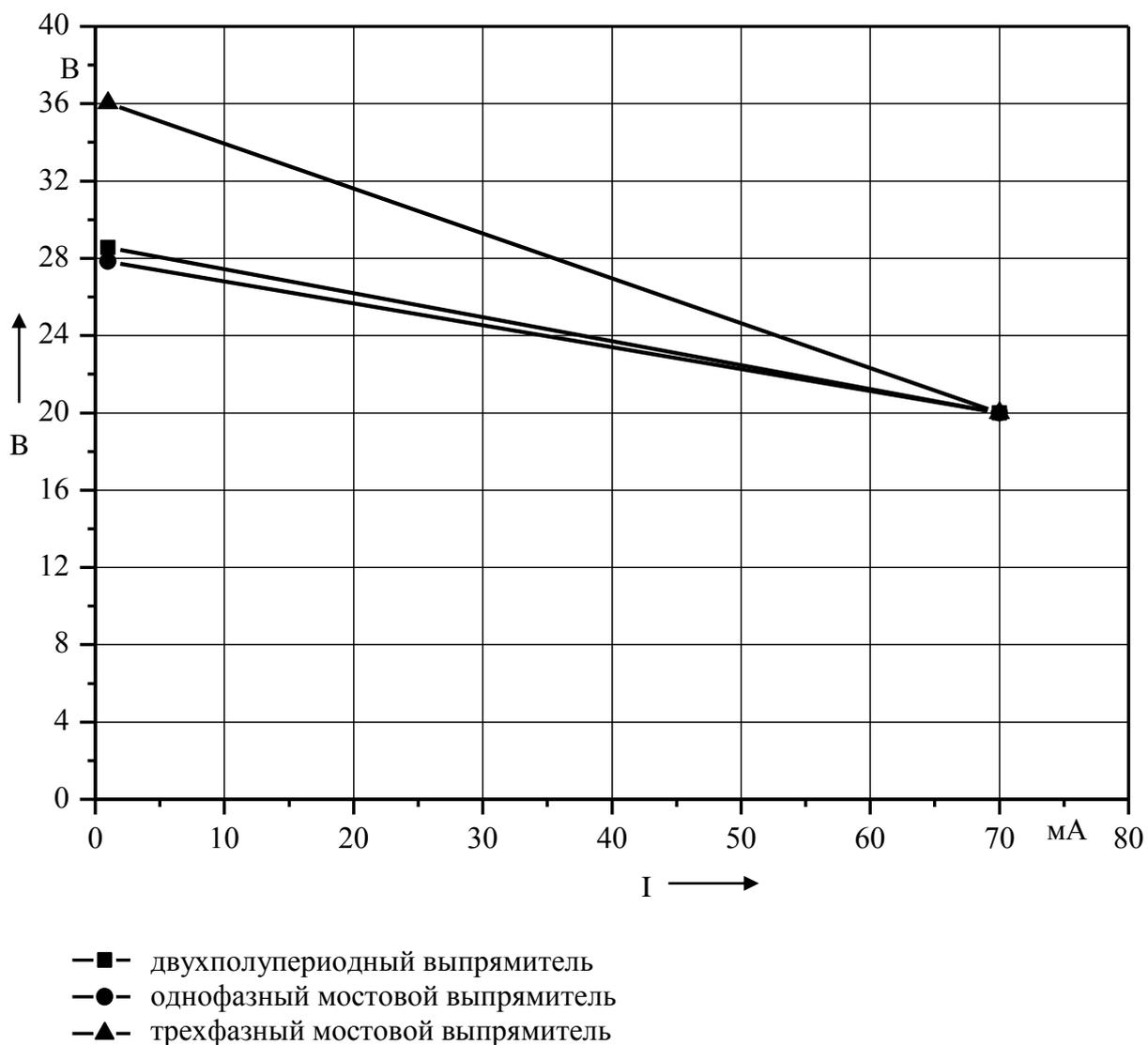


Рисунок 2.10 - Нагрузочная характеристика выпрямителя, работающего на фильтр, начинающийся с индуктивности

### 2.2.3 Выбор типов и номиналов элементов схем выпрямителей

Для выбора диодов результаты расчетов по пунктам 2.2.1 и 2.2.2 сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов для выбора диодов

Схема выпрямителя	Параметры выпрямителей при работе на фильтр, начинающийся					
	с емкости			с индуктивности		
	$U_{\text{ОБР}}$ , В	$I_{\text{D}}$ , мА	$I_{\text{МАХ}}$ , мА	$U_{\text{ОБР}}$ , В	$I_{\text{D}}$ , мА	$I_{\text{МАХ}}$ , мА
Однополупериодная	67,88	140,00	357,0	–	–	–
Двухполупериодная	67,88	70,00	178,5	89,65	49,7	70
Однофазная мостовая	63,36	73,50	189,00	43,71	49,7	70
Трехфазная мостовая	50,91	35,65	66,50	37,83	40,6	70

По табл. 2.4. определены максимальные значения обратного напряжения ( $U_{\text{ОБР}} = 89,65$ ), тока через диод ( $I_{\text{D}} = 140$  мА) и амплитудное значение тока через диод ( $I_{\text{МАХ}} = 358,4$  мА), в соответствии с которыми выбраны шесть кремниевых диодов КД205Д, паспортные данные приведены в таблице 2.5 [7].

Таблица 2.5 – Паспортные данные диода КД205Д

постоянное обратное напряжение	$U_{\text{ОБР}}$ , В	100
средний прямой ток	$I_{\text{пр.ср}}$ , мА	500
максимально допустимый прямой ток	$I_{\text{мах}}$ , А	2,5
постоянный обратный ток	$I_{\text{обр}}$ , мА	0,1
среднее прямое напряжение	$U_{\text{пр}}$ , В	1
максимальная рабочая частота	$f_{\text{мах}}$ , кГц	1
интервал рабочих температур	$t_{\text{окр}}$ , °С	от –60 до +85

В качестве активной нагрузки выбран переменный резистор

$$R_H = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХН}}} = \frac{20}{70 \cdot 10^{-3}} = 285,7 \text{ Ом.} \quad (2.51)$$

номинальное значение сопротивления, приведенное к номинальному ряду Е6, составляет 330 Ом.

#### 2.2.4 Расчет схемы непрерывного стабилизатора без защиты ключевого элемента.

Схема непрерывного стабилизатора без защиты ключевого элемента приведена на рисунке 2.6.

Максимальная мощность при включении транзистора непосредственно к источнику питания составляет

$$P_{\text{МАХ}} = U_{\text{МАХ}} \cdot I_{\text{МАХ}} = 20 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0,6 \text{ Вт,} \quad (2.52)$$

где  $U_{\text{МАХ}}$  и  $I_{\text{МАХ}}$  – максимальные значения напряжения питания и тока нагрузки в соответствии с заданием.

С учетом рассчитанной мощности предварительно выбран [9] транзистор 2Т630А-5, постоянная мощность коллектора 0,8Вт, статический коэффициент передачи тока  $h_{21Э}$  не менее 41, напряжение база-эмиттер  $U_{БЭ} = 1,1 \text{ В}$ .

Ток базы выбранного транзистора

$$I_B = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{h_{21Э}} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{40} = 0,75 \text{ мА.} \quad (2.53)$$

Максимальный выходной ток операционного усилителя К140УД6А составляет не менее 6 мА [10], для расчета примем выходной ток операционного усилителя  $I_{\text{ОУ}}$  равным 4 мА.

Величина сопротивления резистора R1 рассчитывается по формуле [2]

$$R1 = \frac{U_{\text{ВХ.МИН}} - (U_{\text{ВЫХ}} + U_{\text{БЭ}})}{I_B + I_{\text{ОУ}}}, \quad (2.54)$$

где  $U_{\text{ВХ.МИН}}$  – минимальное значение входного напряжения стабилизатора,  $U_{\text{ВЫХ}}$  – выходное напряжение стабилизатора.

Величина R1 с учетом задания ( $U_{\text{ВХ.МИН}} = 10\text{В}$ ,  $U_{\text{ВЫХ.МИН}} = 5\text{В}$ )

$$R1 = \frac{U_{ВХ.мин} - (U_{ВЫХ} + U_{БЭ})}{I_{Б} + I_{ОУ}} = \frac{10 - (5 + 1)}{0,75 + 4} \cdot 10^{-3} = 842,1 \text{ Ом},$$

номинальное значение сопротивления, приведенное к номинальному ряду E12, составляет 820 Ом.

При правильном включении транзистора максимальная рассеиваемая мощность

$$P_{\text{вТ1}} = \frac{U_{\text{ВХmax}}^2}{R1} = \frac{10^2}{820} = 487,80 \text{ мВт}. \quad (2.55)$$

Источник опорного напряжения на основе стабилитрона КС124Д-1 обеспечивает стабильное напряжение  $U_{\text{СТ}}$  величиной 2,4В. Для обеспечения постоянной величины опорного напряжения использован стабилизатор тока на полевом транзисторе [5]. Предварительно выбран полевой транзистор 2П302В [11].

Величина сопротивления резистора R2 вычисляется по формуле

$$R2 = \frac{U_{\text{Н}} + U_{\text{зи}}}{I_{\text{С}}}, \quad (2.56)$$

где  $U_{\text{Н}}$  – напряжение нагрузки источника, в данном случае  $U_{\text{Н}} = U_{\text{СТ}} = 2,4\text{В}$ ;  $U_{\text{зи}}$  – определяется по нагрузочной характеристике транзистора при заданном токе стока, в данном случае при  $I_{\text{С}} = 5\text{мА}$   $U_{\text{зи}} = 5,4\text{В}$  [11];

$I_{\text{С}}$  – ток стока, принимаем равным 5мА.

В этом случае сопротивления резистора R2

$$R2 = \frac{U_{\text{Н}} + U_{\text{зи}}}{I_{\text{С}}} = \frac{2.4 + 5.4}{5 \cdot 10^{-3}} = 1560 \text{ Ом},$$

номинальное значение сопротивления, приведенное к номинальному ряду E24, составляет 1,6 кОм.

Величина сопротивления подстроечного резистора R3 для обеспечения опорного напряжения 2В

$$R3 = \frac{U_{\text{СТ}}}{I_{\text{С}}} = \frac{2.4}{5 \cdot 10^{-3}} = 12 \text{ кОм} \quad (2.57)$$

номинальное значение сопротивления, приведенное к номинальному ряду E12, составляет 12 кОм.

Делитель напряжения R4 – R6 (см. рисунок 2.6) обеспечивает подачу на инвертирующий вход части входного напряжения и регулировку уровня его стабилизации. Ток через резисторы делителя  $I_D$  должен намного превышать ток смещения  $I_{BX}$  операционного усилителя (для КР140УД6А  $I_{BX}=2\text{мкА}$ ) [10], зададимся величиной 0,2мА.

Величина сопротивления резисторов делителя

$$R4 = R6 = \frac{U_{CT}}{I_D} = \frac{2.4}{0.2 \cdot 10^{-3}} = 12 \text{ кОм}, \quad (2.58)$$

номинальное значение сопротивления, приведенное к номинальному ряду E12, составляет 12 кОм.

Величина максимального сопротивления переменного резистора R5 выбирается исходя из требований регулирования в соответствии с заданием: от  $U_{\min} = 3$  до  $U_{\max} = 15\text{В}$ , коэффициент регулирования

$$Kp = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{15}{3} = 5, \quad (2.59)$$

то есть общее сопротивление  $R_D$  плеча делителя должно увеличиваться в пять раз от минимального

$$R_{D\min} = R4 + R5_{\min} = 12000 + 100 = 12100 \text{ Ом},$$

где  $R5_{\min}$  – минимальное сопротивление переменного резистора СП2-6 [12], до максимального

$$R_{D\max} = 5 \cdot R_{D\min} = 5 \cdot 12100 = 60,5 \text{ кОм}.$$

номинальное значение сопротивления переменного резистора R5, приведенное к номинальному ряду E12, составляет 68 кОм.

### 2.3 Разработка и проектирование схем защиты активных элементов

Функциональный модуль ФМ 3Ф2 разработан на базе модуля ФМ 3Ф1, с использованием предусмотренных схем защиты (см. рисунок 2.11).

Активными элементами исследуемых схем модуля ФМ СТ2 являются транзисторы 2Т630А-5, КТ315В и 2П302В, а также операционный усилитель К140УД6А.

Операционный усилитель содержит встроенную защиту входа и выхода от перегрузки, что исключает необходимость установки дополнительной защиты.

Из приведенных в пункте 2.3.4 справочных данных транзисторов следует, что предельно допустимые режимы при ошибочном включении студентами при выполнении лабораторных работ транзистора превышаются только при подключении непосредственно к питанию (максимальное напряжение 20В) базы и эмиттера биполярных транзисторов или стока и затвора полевого транзистора.

Так как полевой транзистор не приведен на наборном поле, неправильная сборка исключена. Для защиты биполярных транзистов между базой и эмиттером дополнительно включен стабилитрон КС156Т-1 [7] (см. рисунок 2.12)

- номинальное напряжение стабилизации 5,6В,  $\Delta U_{СТ}$  от 5,3 до, 5,9В;
- ток стабилизации 3мА,  $\Delta I_{СТ}$  от 1 до 55 мА;
- максимальная рассеиваемая мощность 50мВт.

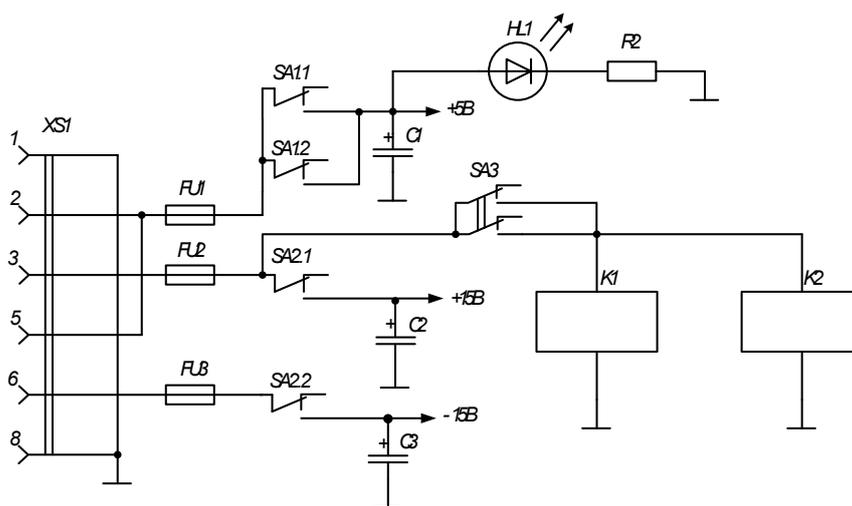


Рисунок 2.11 – Схема защиты

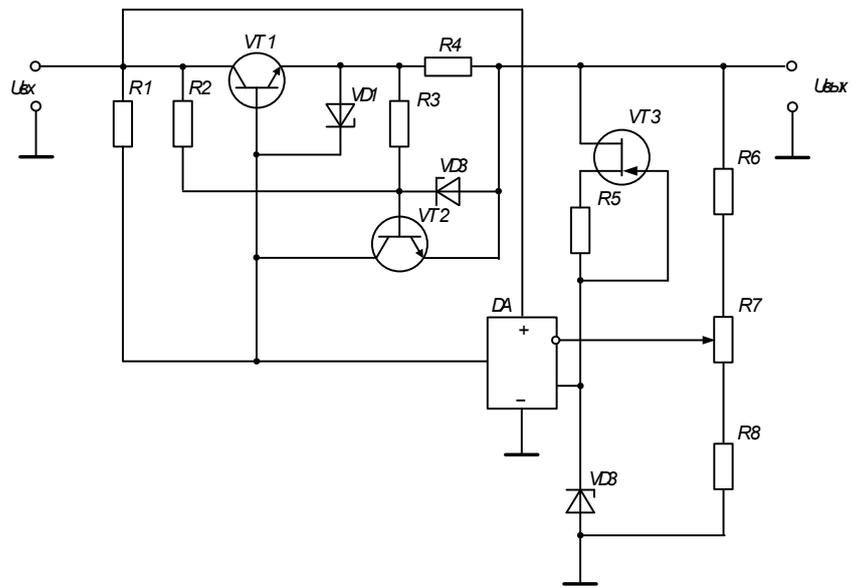


Рисунок 2.12 – Схема защиты активных элементов модуля ФМ СТ2

Схема индикации и защиты выпрямителя от короткого замыкания приведена на рисунке 2.13.

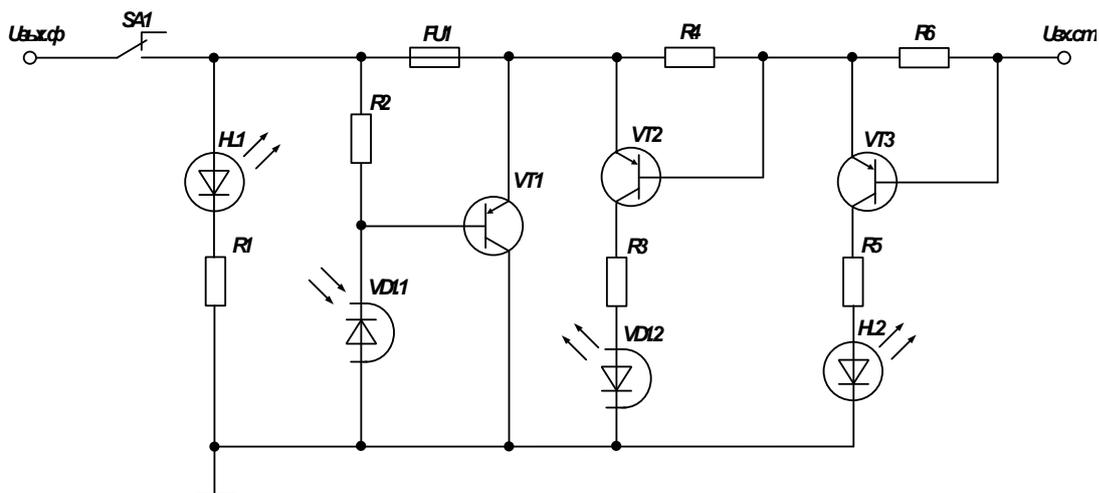


Рисунок 2.13 – Схема защиты от короткого замыкания модуля ФМ СТ2

При замыкании ключа SA1 загорается светодиод индикации HL1.

Величина сопротивления резистора R1

$$R1 = \frac{U_{BX} - U_{HL}}{I_{HL}} = \frac{10 - 1,5}{10 \cdot 10^{-3}} = 850 \text{ Ом}, \quad (2.60)$$

номинальное значение сопротивления резистора R1 из номинального ряда E12 составляет 820 Ом.

Максимальный ток через светодиод

$$I_{HLmax} = \frac{U_{BX,max} - U_{HL}}{R1} = \frac{20 - 1,5}{820} = 20 \text{ мА}. \quad (2.61)$$

При превышении током уровня 50 мА ток через резистор R5 переводит транзистор VT3 в активный режим, загорается светодиод индикации аварийного режима HL2.

При достижении током уровня 100 мА ток через резистор R3 переводит транзистор VT2 в активный режим, загорается светодиод VD1.2, оптически связанный с фотоприемником VD1.1, который при этом переходит в проводящий режим, транзистор VT1 переходит в активный режим, предохранитель FU1

оказывается замкнутым между полюсами питания и обеспечивает размыкание цепи.

Величина сопротивления резистора R4

$$R4 = \frac{U_{БЭ2}}{I_{ВХmax}} = \frac{0,5}{100 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ Ом}, \quad (2.62)$$

где  $U_{БЭ1} = 0,5 \text{ В}$  – напряжение база-эмиттер, при котором транзистор VT2 переходит в активный режим;

$I_{ВХmax} = 100\text{мА}$ , установленное значение предела аварийного тока.

Номинальное значение сопротивления резистора R4, приведенное к номинальному ряду E12, составляет 4,7Ом.

Величина сопротивления резистора R6

$$R6 = \frac{U_{БЭ2}}{I_{ВХавар}} = \frac{0,5}{50 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ Ом}, \quad (2.63)$$

где  $U_{БЭ1} = 0,5 \text{ В}$  – напряжение база-эмиттер, при котором транзистор VT2 переходит в активный режим;

$I_{ВХавар} = 50\text{мА}$ , установленное значение аварийного уровня тока.

Номинальное значение сопротивления резистора R6, приведенное к номинальному ряду E3, составляет 10 Ом.

Величина сопротивления резисторов R2, R3, R5 для минимального значения входного напряжения (10В)

$$R2 = R3 = R5 = \frac{U_{ВХmin} - U_{VT} - U_{VD}}{I_{VD}} = \frac{10 - 1 - 1,5}{10 \cdot 10^{-3}} = 750 \text{ Ом}, \quad (2.64)$$

где  $U_{VT} = 1 \text{ В}$  – падение напряжения на открытом транзисторе;

$U_{VD} = 1,5 \text{ В}$  – падение напряжения на диоде;

$I_{VD} = 10\text{мА}$  – минимальный рабочий ток через диод [14].

Номинальное значение сопротивления резисторов, приведенное к номинальному ряду E24, составляет 750Ом.

Максимальный ток через светодиод при максимальном значении входного напряжения (20В), из формулы:

$$I_{VD} = \frac{U_{BX,max} - U_{VT} - U_{VD}}{R2} = \frac{20 - 1 - 1,5}{750} = 23,3 \text{ мА.} \quad (2.65)$$

Выбраны резисторы постоянные изолированные с металлодиэлектрическим проводящим слоем С2-24-025,  $\pm 5\%$ , из номинального ряда E12 [12].

Транзисторы VT2 и VT3 выбраны по величине рассеиваемой мощности

$$P_{VT2,3} = U_{БЭ} \cdot I_{BX,max} = 0,5 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ мВт,} \quad (2.66)$$

выбран кремниевый транзистор р-п-р структуры КТ345А [11], справочные данные приведены в таблице 2.9.

$$P_{VT1} = U_{BX,max} \cdot I_{BX,max} = 20 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 2 \text{ Вт,} \quad (2.67)$$

выбран кремниевый транзистор р-п-р структуры КТ626А [9].

Для индикации выбраны эпитаксиальные светоизлучающие диоды в металлостеклянном корпусе ИП04А-1К, цвет красный, сила света при токе 10мА не менее 15 мКд., постоянное прямое напряжение 2В, постоянный прямой ток 30 мА, импульсный прямой ток 100 мА [14].

Параметры выбранной диодной оптопары АОД101Б: излучатель – арсенидогаллиевый; металлостеклянный корпус, приемник – кремниевый фотодиод, входное напряжение не более 1,5 В; коэффициент передачи по току не менее 1,5%; время нарастания и спада выходного импульса не более 500нс; сопротивление изоляции не менее  $10^9$  Ом; входной постоянный ток 30мА, импульсный – 100 мА; выходное обратное напряжение 100В.

Рассчитанное по формулам максимальное значение тока через диоды не превышает паспортного значения.

Плавкий предохранитель ВП 1-1 выбран на номинальный ток 0,25А.

## 2.4 Расчет потребляемых мощностей, тепловой расчет

Максимальная мощность, на диодах схемы, рассчитывается приблизительно по формуле

$$P_D \approx n \cdot I_D^2 \cdot R_i, \quad (2.68)$$

где  $n$  – число диодов в схеме;

$I_D$  – ток через диод в соответствии с таблицей 2.4

Например, для однополупериодной схемы при работе на емкость

$$P_D \approx n \cdot I_D^2 \cdot R_i \approx 1 \cdot (38,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4,76 = 91,44 \text{ мВт},$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Значение рассеиваемой мощности схем выпрямителей

Схема выпрямителя	Фильтр, начинающийся					
	с емкости			с индуктивности		
	$P_D$ , мВт	$P_T$ , мВт	$P_B$ , Вт	$P_D$ , мВт	$P_T$ , мВт	$P_B$ , Вт
Однополупериодная	93,30	680,71	1,93	–	–	
Двухполупериодная	93,30	347,75	2,10	47,03	261,11	2,40
Однофазная мостовая	205,72	570,97	2,06	94,06	384,75	2,06
Трехфазная мостовая	108,97	163,15	1,93	141,3	298,19	2,40

Мощность, рассеиваемая на активном сопротивлении обмоток трансформатора можно вычислить приближенно

$$P_T \approx I_2^2 \cdot r_{TP}, \quad (2.69)$$

где  $I_2$  – ток вторичной обмотки трансформатора;

$r_{TP}$  – сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к фазе вторичной обмотки (таблицы 2.1 и 2.3).

Например, для однополупериодной схемы при работе на емкость

$$P_T \approx I_2^2 \cdot r_{TP} = (40 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 34,73 = 680,71 \text{ мВт}.$$

Максимальная мощность, выделяемая на активной нагрузке

$$P_H \approx I_{H\max}^2 \cdot R_H = (0 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 330 = 1,62 \text{ Вт}. \quad (2.70)$$

Общая мощность, выделяющаяся при работе выпрямителя

$$P_B = P_D + P_T + P_H, \quad (2.71)$$

результаты вычислений сведены в таблицу 2.6, в соответствии с которой максимальная мощность, выделяемая при работе схемы, составляет 2,4 Вт.

Площадь, занимаемая элементами схемы, составляет, согласно заданию, приблизительно 20 x 10 см, то есть 200 см<sup>2</sup>. Удельная мощность, рассеиваемая стендом:

$$P_{уд1} = \frac{P_{Вmax}}{S} = \frac{2,4}{200} = 0,012 \text{ Вт/см}^2. \quad (2.72)$$

Тепловую нагрузку считают малой если она менее 0,05 Вт/см<sup>2</sup> и большой если более 0,05 Вт/см<sup>2</sup>[15]. Так как рассчитанная тепловая нагрузка намного меньше 0,05 Вт/см<sup>2</sup>, то она считается небольшой и не требует дополнительного охлаждения.

Максимальная выделяемая на транзисторах стабилизаторов мощность  $P_{VT1}$  и  $P_{VT2}$  составляет 487,8 мВт для VT1 и 121,9 мВт для VT2, что не превышает паспортное значение рассеиваемой мощности – 0,8 Вт и 150 мВт соответственно.

Максимальная мощность, рассеиваемая на элементах стабилизаторов рассчитана для схемы с защитой по мощности (см. рисунок 2.8):

$$P_{R1} = \frac{U_{ВХmax} - (U_{ВЫХmin} + U_{БЭ})}{R1} = \frac{10 - (3 + 1)}{820} = 312,2 \text{ мВт}, \quad (2.73)$$

$$P_{R2} = \frac{U_{ВХmax} - U_{БЭ2}}{R2} = \frac{10 - 1,1}{820} = 435,6 \text{ мВт}, \quad (2.74)$$

$$P_{R3} = \frac{U_{Б2} - U_{R4}}{R3_{мин}} = \frac{1 - 0,06}{43} = 25,2 \text{ мВт}, \quad (2.75)$$

где  $R3_{мин} = 43 \text{ Ом}$  (см. таблицу 2.7)

$$P_{R4} = I_{Hmax} \cdot U_{БЭвыкл} = 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 = 90,0 \text{ мВт}, \quad (2.76)$$

$$P_{R5} = \frac{U_{СТ} + U_{ЗИ}}{R5} = \frac{4 + 5,4}{1600} = 38,0 \text{ мВт}, \quad (2.77)$$

мощность, рассеиваемая на резисторах делителя (R7, R8, R9)

$$P_{Д} = I_{Д} \cdot U_{ВЫХmax} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 15 = 3,0 \text{ мВт}; \quad (2.78)$$

максимальная мощность, рассеиваемая операционным усилителем

$$P_{ОУ} = I_{ПОТ} \cdot U_{ВЫХОУmax} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 11 = 33 \text{ мВт}; \quad (2.79)$$

максимальная мощность, рассеиваемая на нагрузке

$$P_H = I_{\text{ВЫХmax}} \cdot U_{\text{ВЫХmax}} = 30 \cdot 10^{-3} \cdot 15 = 450 \text{ мВт.} \quad (2.80)$$

Максимальная суммарная мощность, рассеиваемая схемой с защитой по мощности

$$\begin{aligned} P_P &= P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} + P_{R4} + P_{R5} + P_D + P_{VT1} + P_{VT2} + P_{OY} + P_H = \\ &= 312,2 + 435,6 + 25,2 + 90,0 + 38,0 + 3,0 + 487,8 + 121,9 + 33 + 450 = \\ &= 1986,7 \text{ мВт} = 1,99 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (2.81)$$

Соответственно, мощность, рассеиваемая схемой без защиты

$$\begin{aligned} P_6 &= P_{R1} + P_{R5} + P_D + P_{VT1} + P_{VT2} + P_{OY} + P_H = \\ &= 312,2 + 38,0 + 3,0 + 487,8 + 121,9 + 33 + 450 = \\ &= 1445 \text{ мВт} = 1,44 \text{ Вт;} \end{aligned} \quad (2.82)$$

мощность, рассеиваемая схемой с защитой по току

$$\begin{aligned} P_6 &= P_{R1} + P_{R4} + P_{R5} + P_D + P_{VT1} + P_{VT2} + P_{OY} + P_H = \\ &= 312,2 + 90,0 + 38,0 + 3,0 + 487,8 + 121,9 + 33 + 450 = \\ &= 1535,6 \text{ мВт} = 1,54 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (2.83)$$

Максимальная мощность, выделяемая при работе лабораторного стенда ФМ СТ2, составляет 1,99Вт. Так как площадь, занимаемая элементами схемы такая же, как и в модуле ФМ 3Ф2, а максимальная выделяемая мощность меньше, тепловая нагрузка считается небольшой и не требует дополнительного охлаждения.

### 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

#### 3.1 Результаты макетирования и исследования схем и устройств защиты активных элементов от аварийных режимов

В результате моделирования рассчитанных схем стабилизаторов была проверена их работоспособность и правильность расчета номиналов элементов с учетом погрешностей.

Полученные данные зависимости выходного напряжения от величины входного при различных уровнях стабилизации выходного напряжения для стабилизатора без защиты ключевого элемент приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Зависимость выходного напряжения стабилизатора от величины входного

Схема стабилизатора	U <sub>стаб</sub> , В	Входное напряжение, В											
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	20	25	29
Без защиты	5	0,2	1,8	3,4	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	10	0,2	1,8	3,6	5,5	7,4	9,5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	15	0,2	1,9	3,7	5,7	7,6	9,6	11,5	13,5	14,5	15,0	15,0	15,0
Защита по току	5	0,3	1,9	3,5	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	10	0,3	1,9	3,5	5,0	6,8	8,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	15	0,3	1,9	3,5	5,0	6,8	8,6	10,4	12,2	14,0	15,0	15,0	15,0
Защита по напряжению	5	0,3	1,9	3,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	10	0,3	1,9	3,5	5,0	6,8	8,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
	15	0,3	1,9	3,5	5,0	6,8	8,6	10,4	12,2	14,1	15,0	15,0	15,0

График усредненной зависимости выходного напряжения от величины входного при различных уровнях стабилизации выходного напряжения для всех схем стабилизатора приведен на рисунке 3.1. Из него видно, что стабилизация выходного напряжения начинается при достижении величины входного напряжения, превышающей уровень стабилизации примерно на 3,5В, что соответствует теоретическим данным [1].

Полученные данные нагрузочной характеристики - зависимости выходного напряжения от величины выходного тока при различных уровнях

стабилизации выходного напряжения для стабилизатора без защиты ключевого элемента приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Зависимость выходного напряжения стабилизатора без защиты ключевого элемента от величины выходного тока

Уровень стабилизации, В	Выходной ток, мА			
	0	5	20	30
5	5,01	5,02	5,00	5,01
10	10,01	9,99	10,00	10,01
15	15,00	15,02	15,01	15,00

График нагрузочной характеристики при различных уровнях стабилизации выходного напряжения для стабилизатора без защиты ключевого элемента приведен на рисунке 3.1.

Графики зависимости выходного напряжения от тока нагрузки (нагрузочная характеристика) для стабилизатора без защиты ключевого элемента приведены на рис. 3.2. Так как выходные напряжение и ток ограничены, соответственно заданию, безопасной величиной, то нагрузочные характеристики представляют собой практически идеальные прямые.

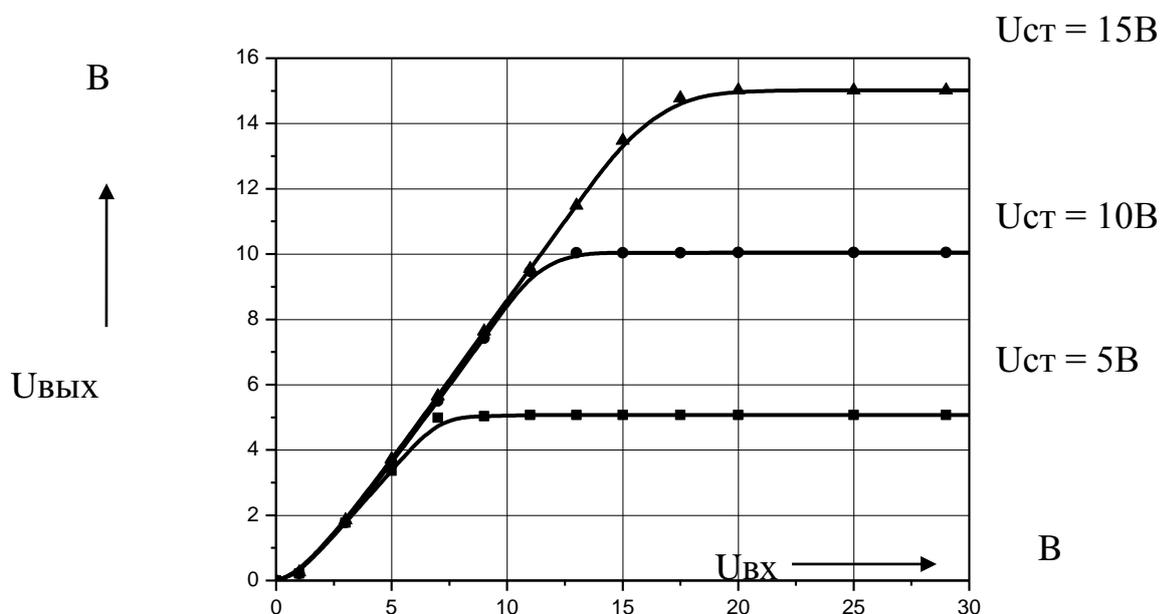


Рисунок 3.1 – Усредненная экспериментальная зависимость выходного напряжения от величины входного

### 3.2 Проектирование конструкции наборного поля стенда

Внешний вид наборного поля функционального модуля ФМ 3Ф2 для изучения выпрямителей и сглаживающий фильтров приведен на рисунке 3.2. Изучение выпрямителей производится с помощью блока диодов VD1 – 6 и трехфазного трансформатора Т1. Для снятия внешней характеристики выпрямителей предусмотрен переменный резистор R4, регулирование величины сопротивления которого осуществляется с помощью выведенной на лицевую панель ручки.

Внешний вид наборного поля функционального модуля ФМ СТ2 для изучения линейных стабилизаторов приведен на рисунке 3.3. На нем, так же как и на наборном поле модуля ФМ 3Ф2 введена координатная система обозначения гнезд, обозначены типы и номиналы всех элементов и выведены ручки регулирования величины сопротивления переменных резисторов. На наборном поле предусмотрен выключатель питания и индикаторы питания и аварийного режима (светодиоды F9 и J9). Подключение питания осуществляется с помощью гнезда "U<sub>ВХ</sub>" (E9), шины "+U<sub>ПИТ</sub>", (L-P9) и общей шины (A-H1).

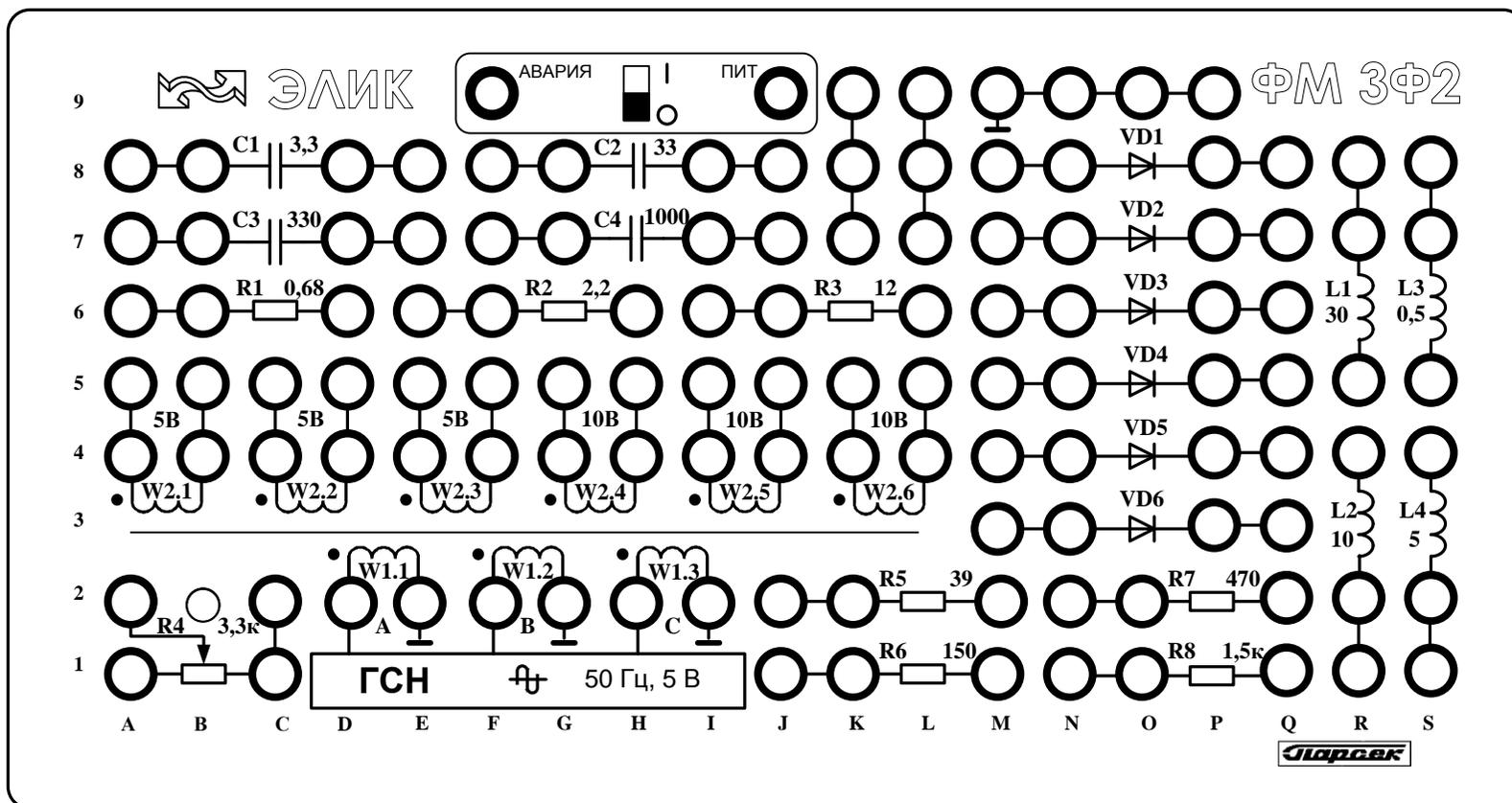


Рисунок 3.2 – Конструкция наборного поля функционального модуля ФМ 3Ф2  
для изучения выпрямителей и сглаживающих фильтров

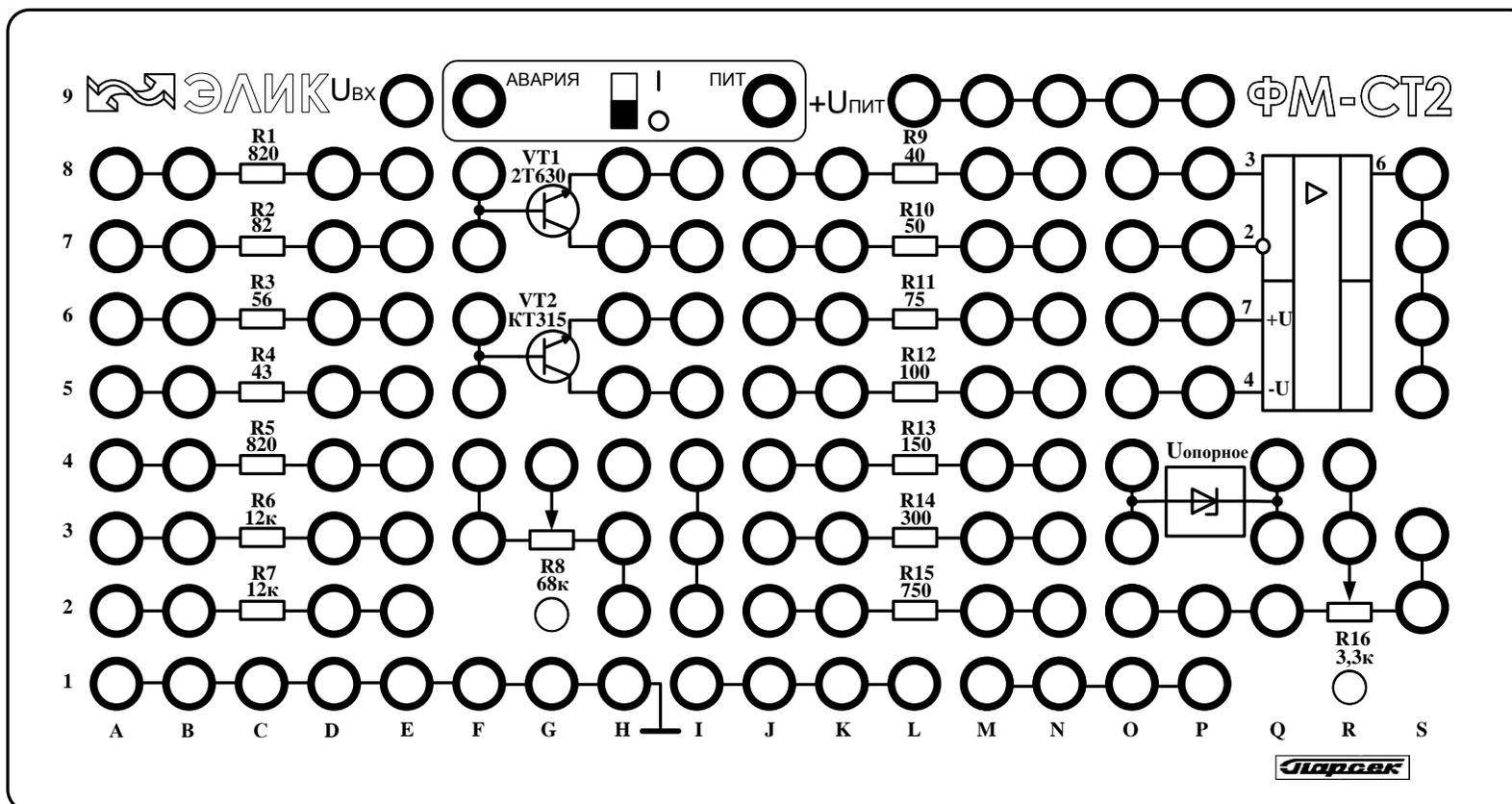


Рисунок 3.3 – Конструкция наборного поля функционального модуля ФМ СТ2  
для изучения линейных стабилизаторов

### 3.3 Проектирование печатной платы модуля ФМ СТ2

Рисунок печатной платы модуля ФМ СТ2 со стороны контактов приведен на рисунке 3.4, со стороны монтажа – на рисунке 3.5.

Для основания печатной платы выбран фольгированный стеклотекстолит СФ – 2, толщина основания 1,5 мм, толщина фольги 50мкм, максимальная плотность тока 4 А/мм<sup>2</sup>[16].

Толщина проводящих дорожек должна превышать отношение максимального потребляемого тока к току, проводимому фольгой данной толщины.

$$D = \frac{I_{\text{MAX}}}{t \cdot \delta} = \frac{70 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 4} = 0,35 \text{ мм}, \quad (3.1)$$

где  $I_{\text{MAX}}$  - максимальный ток, проходящий через сечение фольги, определяется максимальным входным током и составляет 70мА;

$t = 50 \cdot 10^{-6}$  - толщина фольги, м;

$\delta = 4$  – максимальная плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

Толщина дорожек проводящего рисунка принята равной 0,4 мм.

Габаритные размеры платы 200x100 мм, предусмотрены четыре технологических отверстия диаметром 3мм.

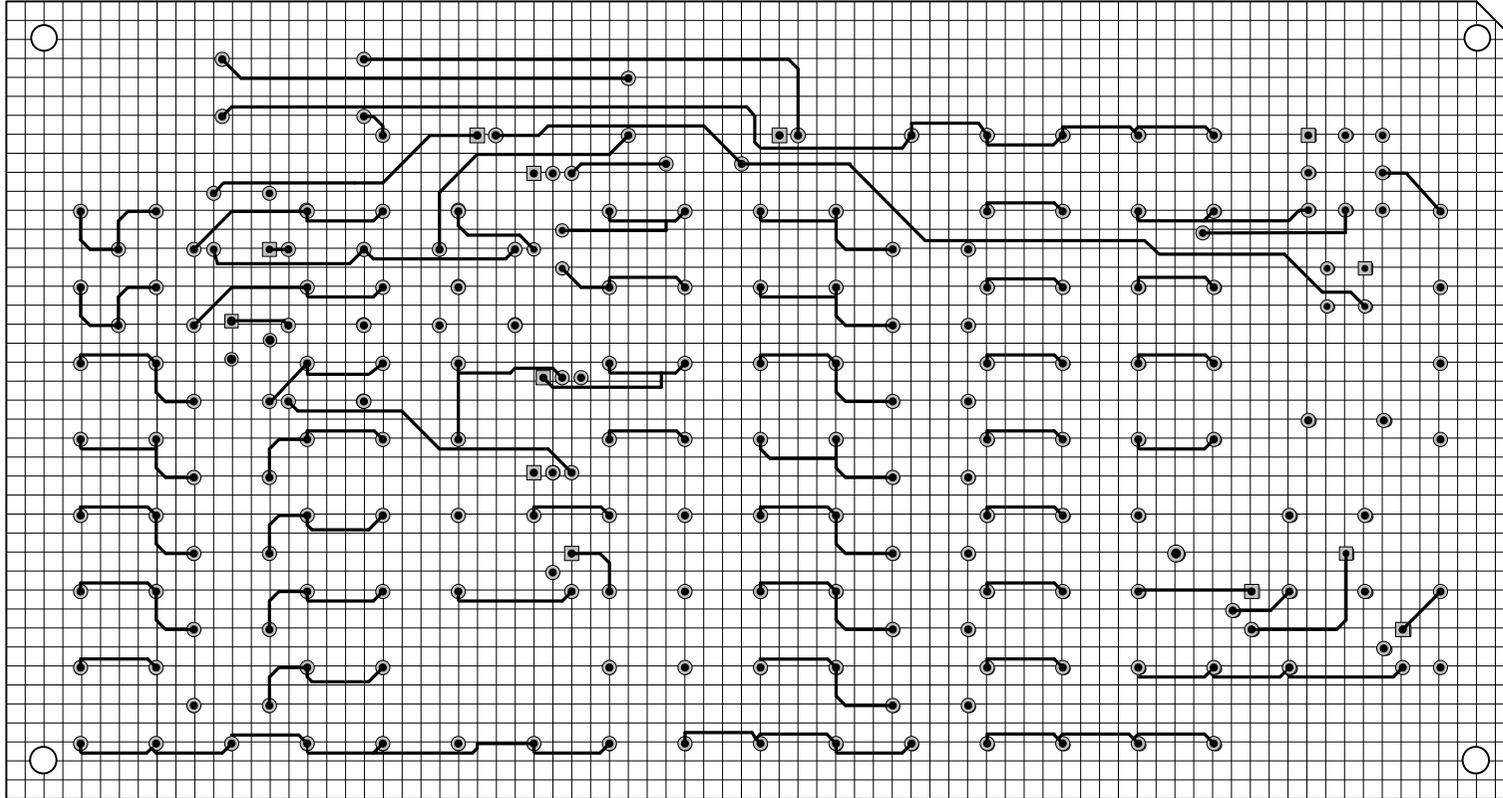


Рисунок 3.4 – Печатная плата модуля ФМ СТ2 со стороны контактов

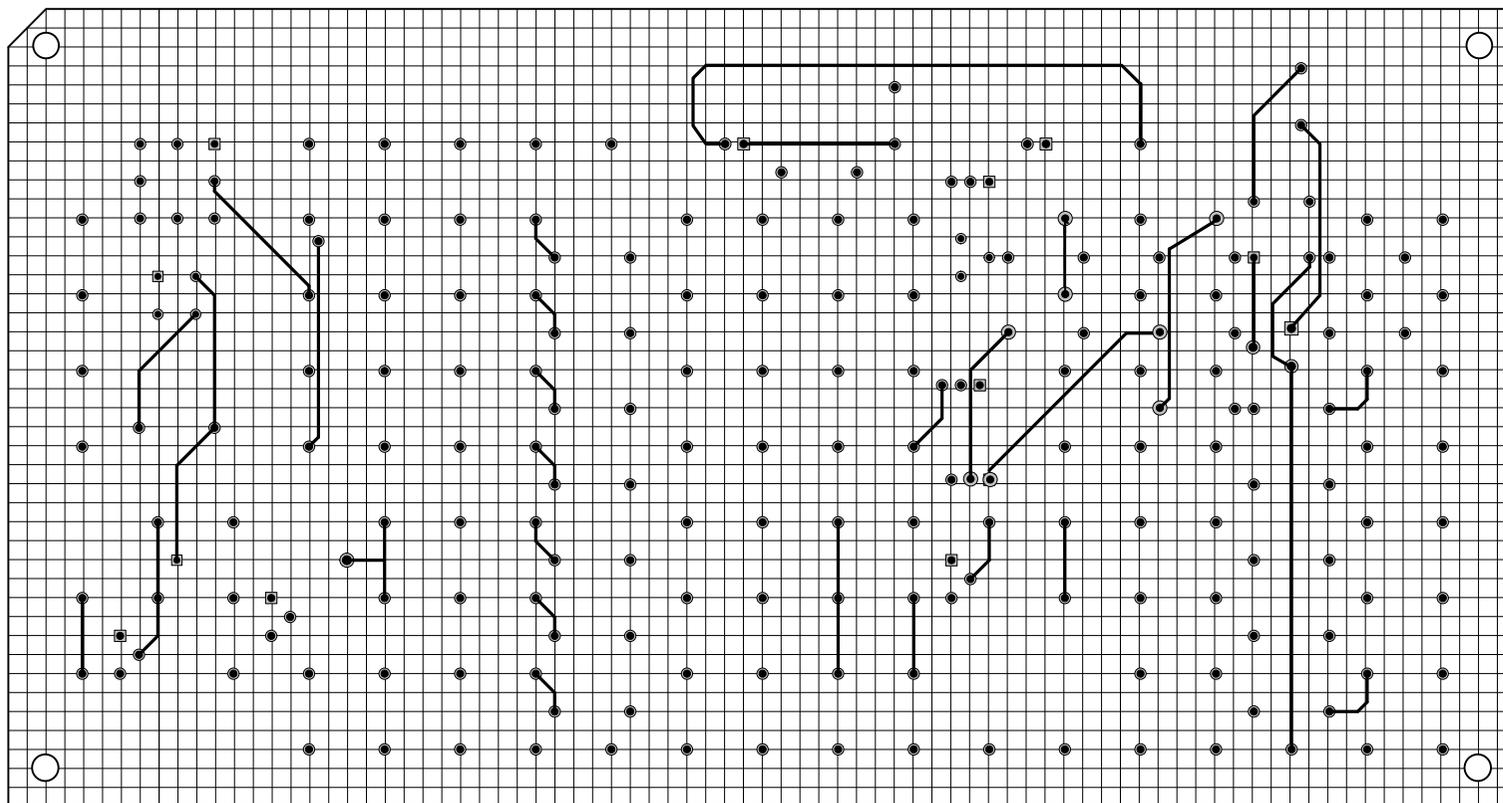


Рисунок 3.5 – Печатная плата модуля ФМ СТ2 со стороны монтажа

## **4 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

### **4.1 Лабораторная работа по изучению выпрямителей**

#### **4.1.1 Цель работы**

Целью работы является изучение принципов работы схем неуправляемых выпрямителей, определение коэффициентов пульсации, КПД и снятие внешних характеристик выпрямителей.

#### **4.1.2 Краткие теоретические сведения**

Выпрямитель – это устройство, предназначенное для преобразования переменных напряжения и тока в постоянные.

Выпрямители делятся на однокатные, в которых ток во вторичных обмотках трансформатора проходит за период в одном направлении, и двухтактные, в которых в каждой фазе вторичной обмотки ток проходит дважды в противоположных направлениях. В зависимости от числа фаз напряжения питания различают однофазные и трехфазные выпрямители.

Управляемые выпрямители, построенные на управляемых вентилях (тиристорах), позволяют регулировать величину и форму выходного напряжения путем регулирования длительности открытого состояния вентиля.

Однофазная однополупериодная схема (см. рисунок 2.1) пропускает на вход нагрузки одну полуволну питающего напряжения, то есть частота пульсаций выпрямленного напряжения равна частоте питающей сети, применяется при небольших выпрямленных мощностях и низких требованиях к степени сглаживания напряжения.

Ток за период протекает через вторичную обмотку в одном направлении, вызывая вынужденное намагничивание сердечника трансформатора постоянной составляющей тока вторичной обмотки, в результате чего намагничивающий ток трансформатора возрастает в несколько раз по сравнению с нормальным

режимом. Возрастание намагничивающего тока обуславливает увеличение сечения провода первичной обмотки и размеров трансформатора в целом.

Двухфазная двухполупериодная схема (со средней точкой) (см. рисунок 2.2) представляет собой два параллельно соединенных однополупериодных выпрямителя, частота пульсаций выпрямленного напряжения в два раза больше частоты питающей сети. Ток во вторичной обмотке трансформатора за период протекает дважды а противоположных направлениях, что исключает вынужденное намагничивание сердечника и обеспечивает лучшее использование трансформатора.

Однофазная мостовая схема (см. рисунок 2.3) обеспечивает частоту пульсаций выпрямленного напряжения в два раза больше частоты питающей сети, а обратное напряжение на вентилях – в два раза ниже, чем при использовании одно- и двухполупериодных схем. Из-за удвоенного, по сравнению с двухполупериодной схемой, количества диодов применение схемы при низких напряжениях ограничено.

Трехфазная мостовая схема (Ларионова) приведена на рисунке 2.4. Она обеспечивает наилучшее использование трансформатора, наименьшее обратное напряжение на вентилях и частоту пульсаций выходного напряжения, в шесть раз превышающую частоту питающей сети.

Основными характеристиками, определяющими эксплуатационные свойства неуправляемых выпрямителей, являются:

1. Среднее значение выпрямленного напряжения  $U_d$  и тока  $I_d$ .
2. Коэффициент полезного действия  $\eta$  – отношение активной мощности, выделяемой в нагрузку, к суммарной активной мощности, поступающей в выпрямительное устройство из питающей сети.
3. Внешняя характеристика - зависимость напряжения на выходе от тока нагрузки:  $U_d = f(I_d)$ . Общий вид внешней характеристики приведен на рисунке 4.1

4. Коэффициент пульсаций – отношение амплитуды данной гармоники  $q$  выпрямленного напряжения (тока) к среднему значению выпрямленного напряжения (тока):  $K_{п(q)} = \frac{U(q)m}{U_d}$ .

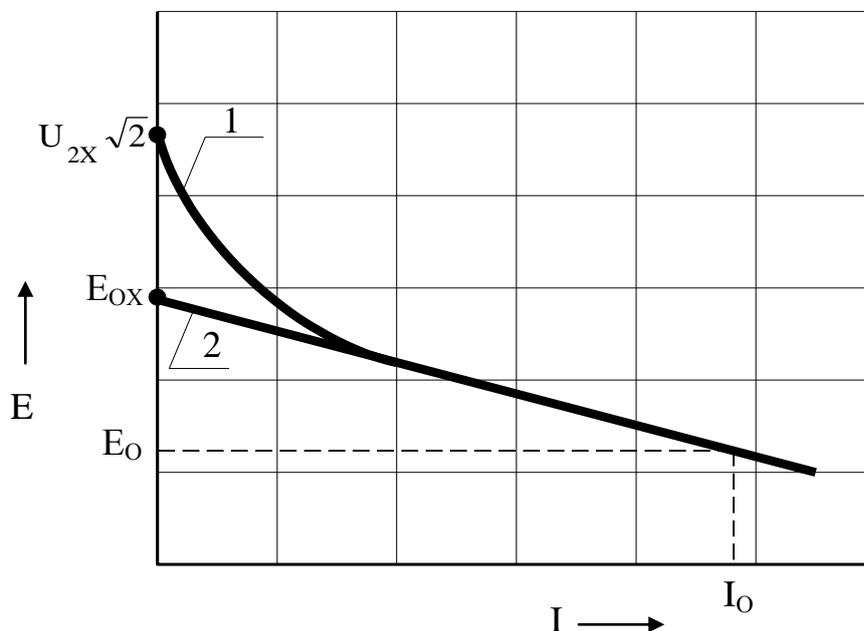


Рисунок 4.1 – Общий вид внешней характеристики выпрямителя  
 1 – при работе на фильтр, начинающийся с емкости;  
 2 – при работе на фильтр, начинающийся с индуктивности.

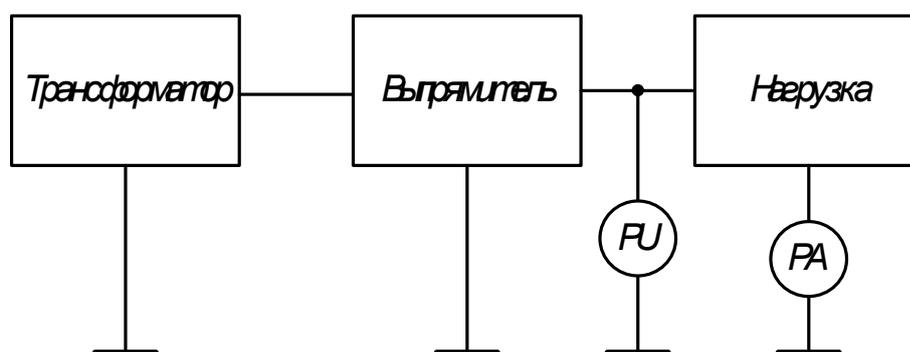


Рисунок 4.2 – Структурная схема лабораторной установки

### 4.1.3 Программа работы

- а) собрать схему выпрямителя;
- б) снять внешнюю характеристику выпрямителя при работе на активную нагрузку;

- в) зарисовать осциллограммы напряжения на входе и выходе выпрямителя при работе на активную, емкостную и индуктивную нагрузку;
- г) определить коэффициент пульсации;
- д) определить КПД схемы.

#### **4.1.4 Описание лабораторной установки**

Структурная схема лабораторной установки с указанием измерительных приборов приведена на рисунке 4.2. Объектом исследования является блок диодов, питание исследуемой схемы осуществляется от генератора-имитатора трехфазной сети промышленной частоты с помощью трехфазного трансформатора. Пример сборки схемы выпрямителя приведен на рисунке 4.3.

#### **Указания по выполнению лабораторной работы**

Все переключения в схеме производить только при отключенном питании стенда. Перед включением питания правильность сборки схемы должна быть проверена преподавателем. Ручки регулирования переменных резисторов должны быть установлены в крайнее левое положение (против часовой стрелки).

К пункту 3а – схема выпрямителя, заданная преподавателем, собирается с учетом заданного напряжения питания. Соединение трансформатора и диодов осуществляется в соответствии с заданной схемой (рисунки 2.1 – 2.4).

К пункту 3б – внешняя характеристика снимается с помощью изменения сопротивления переменного резистора R4. Результаты измерений заносятся в таблицу 4.1, по данным которой строится графическая зависимость.

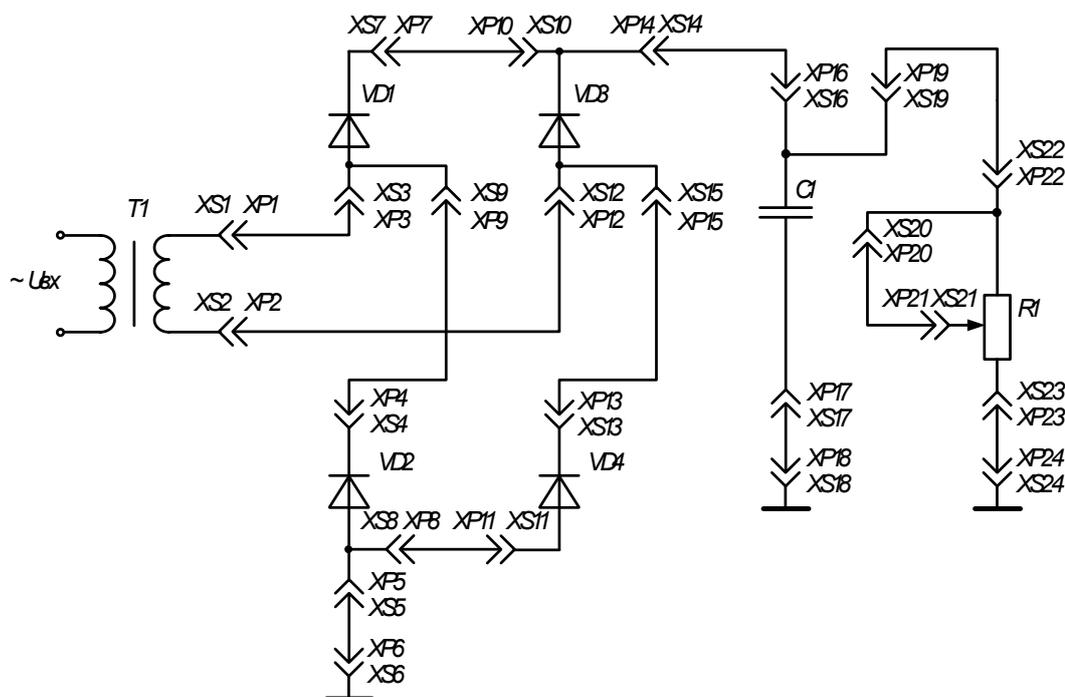


Рисунок 4.3 – Пример сборки схемы выпрямителя

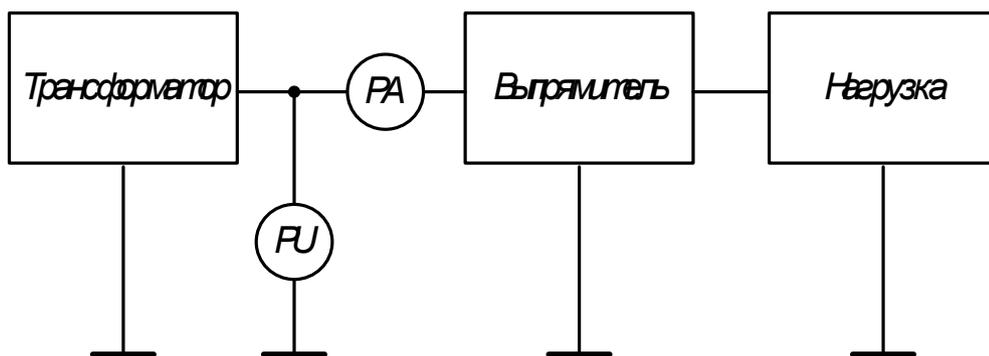


Рисунок 4.4 – Структурная схема измерения величины входной мощности

Таблица 4.1 – Результаты измерений

	Ток нагрузки $I_n$ , мА								
	1	5	10	20	30	40	50	60	70
Напряжение на нагрузке $U_n$ , В									

К пункту 3в – осциллограммы напряжения на выходе выпрямителя снимаются при среднем значении переменной нагрузки (ток 30 мА) (приложение Ж). При сборке схемы учесть, что индуктивная нагрузка включается последовательно, а емкостная – параллельно активной.

К пункту 3д – с помощью амперметра измерить входные ток  $I_{вх}$  и напряжение  $U_{вх}$  выпрямителя (схема включения измерительных приборов приведена на рисунке 4.4).

Входная мощность вычисляется по формуле (4.1)

$$P_{вх} = I_{вх} \cdot U_{вх}, \quad (4.1)$$

Выходная мощность определяется как произведение тока на напряжение при среднем значении сопротивления нагрузки.

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе содержит:

- цель и программу работы;
- схему лабораторной установки и принципиальные схемы исследуемых выпрямителей;
- результаты измерений, оформленные в виде графиков, осциллограммы;
- анализ результатов, оформленный в виде кратких выводов.

#### **4.1.5 Вопросы для самоконтроля**

1. В чем цель работы?
2. Какова программа исследований, какие характеристики необходимо снять?
3. Нарисовать принципиальные схемы исследуемых выпрямителей.
4. Какими основными параметрами характеризуется выпрямитель?
5. Внешняя характеристика и способы ее построения.
6. Принцип работы и временные диаграммы однофазных выпрямителей.
7. Принцип работы и временные диаграммы трехфазного мостового выпрямителя.
8. Объяснить форму осциллограмм выходного напряжения.
9. Объяснить форму внешней характеристики, зависимость от вида нагрузки.

## **5 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ РАБОТЫ**

### **5.1 Испытания безопасности лабораторного стенда**

#### **5.1.1. Общие требования к безопасности стенда**

Требования к безопасности лабораторного стенда для изучения темы "Силовая электроника. Сетевые источники питания" определяются требованиями ГОСТ Р 51350-99 (МЭК 61010-1-90) "Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования". С 1 июля 2006г. вводится в действие одноименный ГОСТ Р 52319-2005.

Действующий стандарт устанавливает общие требования безопасности, предъявляемые к электрическим контрольно-измерительным приборам и лабораторному оборудованию, включая вычислительную технику.

Стандарт устанавливает требования к устройству и конструкции оборудования с целью обеспечить защиту оператора и окружающей среды от следующих, возможных при использовании разработанного стенда, опасностей:

- поражения электрическим током, включая ожоги;
- ожогов, вызванных контактом с нагретыми поверхностями;
- распространения огня;
- превышения температуры;
- влияния излучений.

Стандарт устанавливает методы проверки оборудования на соответствие указанным в стандарте требованиям в ГОСТ 16504-81 "Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения".

Согласно ГОСТ Р 51350-99, оборудование используется в помещении при максимальной относительной влажности воздуха 80%. Переходные напряжения соответствуют категории монтажа (категории перенапряжения) II, так как питание стенда осуществляется от сети через блок питания. Степень загрязнения, в соответствии с МЭК 60664, присвоена 2 - обычно имеется только непроводящее загрязнение, однако временно, вследствие выпадения на поверхность конденсата, загрязнение может стать проводящим.

## 5.1.2 Требования к проведению испытаний

Испытания проводят:

1) в нормальных условиях:

- температура от 15 до 35 °С;
- относительная влажность воздуха не более 75 %;
- атмосферное давление от 75 до 106 кПа (от 562 до 795 мм рт.ст.);
- отсутствие инея, росы, проникающей влаги, солнечного излучения и т.п.

Основная изоляция должна быть замкнута накоротко, а устройство, ограничивающее ток или напряжение, следует закоротить или разомкнуть.

Вторичные обмотки сетевого трансформатора, должны быть закорочены.

Обычно каждое испытание ограничивают одним часом, так как любая вторичная неисправность, появляющаяся в условиях одной неисправности, как правило, уже проявляется в течение этого времени.

Температура внешней поверхности кожуха не должна превышать 105 °С при температуре окружающей среды 40 °С.

Так как на наборном поле лабораторного стенда предусмотрен выключатель питания, то он имеет соответствующую ГОСТ 26104-89 "Средства измерений электронные.

В случае повреждения изоляции лабораторный стенд считается, согласно ГОСТ Р 51350-99 безопасным, так как максимальное значение напряжения переменного тока составляет 15В (допустимое значение не выше 30В), постоянного тока – 30 (допустимое значение не выше 60В).

Проверка электрической прочности изоляции осуществляется в соответствии с таблицей 5.1,

где:

- 1 - цепи питания, включая измерительные и управляющие цепи;
- 2 - цепи с внешними зажимами;
- 3 - цепи, подсоединенные к доступным частям, но не имеющие внешних зажимов;
- 4 - цепи, не подсоединенные к доступным частям и не имеющие внешних

зажимов (внутренние цепи);

5 - цепи с внешними зажимами, на которых электрические величины, вырабатываемые оборудованием, или при подсоединении к внешним цепям, при нормальных условиях применения не превышают 50В;

6 - зажимы защитного заземления и подсоединенные к ним доступные токопроводящие части.

Таблица 5.1 - Цепи, между которыми должна быть испытана изоляция

	1	2	3	4	5
2	+	+	–	–	–
3	+	+	+	–	–
4	+	+	+	+	–
5	+	+	+	+	+
6	+	+	+	+	+

Защита от поражения электрическим током осуществляется путем использования основной защиты, предохраняющей от поражения электрическим током в нормальных условиях применения; и дополнительной защиты, которая обеспечивает защиту от поражения электрическим током при выходе из строя

Разработанный лабораторный стенд относится к оборудованию класса III - оборудование для подключения только к цепям изолированного сверхнизкого напряжения, с питанием только от внутренних источников, допустимые значения: для напряжения переменного тока - не выше 30 В среднеквадратического значения и 42 В пикового значения, для напряжения постоянного тока - не более 60 В.

Конструктивные требования по защите от поражения электрическим током:

- надежность соединений проводов, которые подвергают механической нагрузке, не должна зависеть только от пайки;

Сетевые шнуры питания должны быть рассчитаны на максимальный ток, потребляемый оборудованием.

Выключатели или автоматы защиты, установленные в оборудовании и предназначенные для использования в качестве отключающих устройств, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 50030.1 и ГОСТ Р 50030.2.

Соответствующие разделы ГОСТ Р 50030.2 включают в себя требования, относящиеся к разделению контактов и обеспечению уверенности в том, что всегда известно, находятся ли контакты в разомкнутом или замкнутом состояниях, когда индикатор указывает положение «Включено».

Теплостойкость изоляционных материалов - изолирующие детали, являющиеся элементами конструкции частей, соединяемых с источником сетевого питания, должны быть изготовлены из таких изоляционных материалов, которые не будут являться причиной возникновения опасности в случае короткого замыкания внутри оборудования.

Изоляционные материалы для крепления зажимов должны быть теплостойкими, если в нормальных условиях испытаний через эти зажимы течет ток, превышающий 0,5 А, и из-за плохого контакта в них может происходить значительное выделение теплоты. Эти материалы не должны размягчаться до такой степени, чтобы стать причиной опасности.

## **5.2 Безопасность объекта при чрезвычайных и аварийных ситуациях**

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 "Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий" чрезвычайная ситуация - это обстановка на определенной территории или акватории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Разработанный лабораторный стенд при аварийных ситуациях, как электронный прибор, может являться источником возгорания вследствие короткого замыкания и воспламенения электропроводки.

Так как электротехнический корпус ТГУ, в котором располагается учебная лаборатория, относится к общественным зданиям, то пожаробезопасность в ней должна быть обеспечена согласно СНиП 2.08.02-89\* (1999), который предполагает, в том числе, оборудование учебных аудиторий автоматической противопожарной сигнализацией.

План эвакуации пятого этажа электротехнического корпуса ТГУ, где расположена лаборатория, приведен на рисунке 5.1.

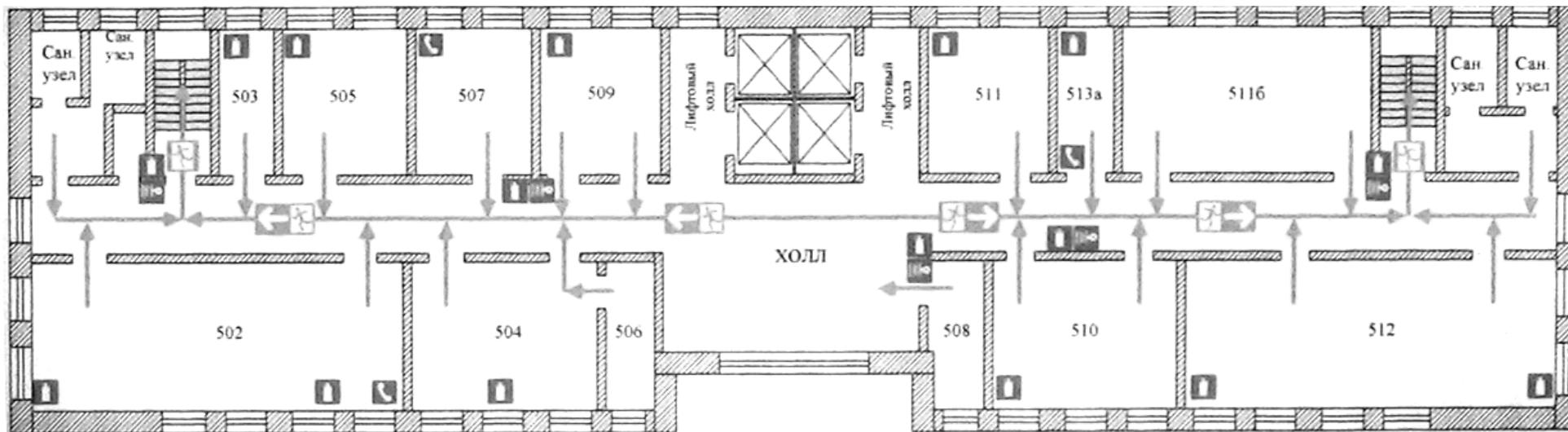


Рисунок 5.1 – План эвакуации пятого этажа электротехнического корпуса ТГУ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате был разработан макет лабораторного стенда для проведения лабораторных работ по изучению выпрямителей и линейных стабилизаторов в рамках темы "Силовая электроника. Сетевые источники питания электронных устройств", предназначенный для практического использования в учебных заведениях при изучении указанных тем.

Лабораторный стенд состоит из двух функциональных модулей: ФМ 3Ф2 для изучения схем выпрямителей и ФМ СТ2 для изучения схем линейных стабилизаторов, габаритные размеры модулей 250x150x70 мм. Напряжение питания модуля ФМ 3Ф2 составляет  $\pm 15\text{В}$ , питание модуля ФМ СТ2 осуществляется непосредственно от выхода схем выпрямления и фильтрации, собираемых на базе модуля ФМ 3Ф2. Выходное напряжение линейных стабилизаторов регулируется от 5 до 15В при напряжении питания 20В, до 13В при напряжении питания 15В и до 8В при напряжении питания 10В.

В работе приведена методика расчета рассмотренных схем выпрямителей и линейных стабилизаторов.

Разработаны методические указания по проведению лабораторных работ с использованием стенда с указанием вопросов для самоконтроля и рекомендуемой литературы.

Активные элементы и вход модуля ФМ СТ2 имеют защиту от неправильной сборки исследуемых схем при выполнении лабораторных работ, перегрузок и короткого замыкания.

Исследуемые схемы были смонтированы и исследованы, также была испытана встроенная защита используемого операционного усилителя КР140УД6А.

В разделе "Безопасность и экологичность работы" приведена методика испытаний безопасности лабораторного оборудования применительно к разработанному стенду.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. / Ю.С. Забродин. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с., ил.
2. Гусев, В.Г. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.: ил.
3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк : пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008.
4. Семенов, Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. // Семенов, Б.Ю. – Москва.: СОЛОН-Р, 2001. – 417 с.
5. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника. // Мелешин, В.И. – Москва : Техносфера, 2005. – 632 с.
6. Водовозов А. М. Основы электроники [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. М. Водовозов. - Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. – 130 с. : ил. - ISBN 978-5-9729-0137-1.
7. Александров А.А. Электротехнические чертежи и схемы / Александров К.К., Кузьмина Е.Г.- М.:Энергоатомиздат, 1990. - 288с.
8. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
9. Миленина С. А. Электротехника, электроника и схемотехника : учеб. и практикум для акад. бакалавриата / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. - Гриф УМО. - Москва : Юрайт, 2016. - 398, [1] с. : ил. - (Бакалавр. Академический курс). - Библиогр.: с. 3398-399. - ISBN 978-5-9916-7353-2 (ч. 1). - ISBN 978-5-9916-7354-9 : 952-15.5.
10. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9,10. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с., ил.
11. Воробьев, Н.И. Проектирование электронных устройств : учеб. Пособие / Н.И. Воробьев. - М. : Высш. шк., 1989. - 223 с.

12. Нефедов, А.В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Том 7. / А. В. Нефедов. - М.: ИП РадиоСофт, 1999г. - 640с.: ил.
13. Григораш, О.В. Стабилизаторы напряжения постоянного тока / О.В. Григораш, М.А. Попучиева // Научный журнал КубГАУ – 2017. - №129(05). - С.1 – 14.
14. Park, J. An Output Capacitor-Less Low-Dropout Regulator with 0–100 mA Wide Load Current Range [Text] / J. Park, W.-J. Ko, D.-S. Kang, Y. Lee, J.-H. Chun // Energies. Vol. 12. – 2019. – No. 2. – PP. 1-13. ISSN: 1996-1073
15. Shiau, J.K. Using a Current Controlled Light-Dependent Resistor to Bridge the Control of DC/DC Power Converter [Text] / J.K. Shiau, H.Y. Chiu, J.W. Sun // Electronics. Vol. 7. – 2018. – No. 12. – PP. 1-13. ISSN: 2079-9292
16. Wang, S.F. A 5 V-to-3.3 V CMOS Linear Regulator with Three-Output Temperature-Independent Reference Voltages [Text] / S.F. Wang, M. Chi // Journal of Sensors. Vol. 2016. – 2016. – PP. 1-7. ISSN: 1687-7268.
17. Kadick, L. A Low-Dropout Voltage Regulator with a Fractional-Order Control [Text] / L. Kadick, P. Horsky // Radioengineering. Vol. 25. – 2016. – No. 2. – PP. 312-320. ISSN: 1805-9600
18. Lee, J.Y. Fully Integrated Low-Ripple Switched-Capacitor DC–DC Converter with Parallel Low-Dropout Regulator [Text] / J.Y. Lee, G.S. Kim, K.I. Oh, D. Baek // Electronics. Vol. 8. – 2019. – No. 1. – PP. 1-16. ISSN: 2079-9292
19. Abd. Razak, I.S. A Design of Single Phase Bridge Full-wave Rectifier [Conference Paper] / I.S. Abd. Razak, R.I.Z.R.Z. Hashim, S.N.M. Soid // Conference on Language, Education, Engineering and Technology. - Aseania Resort, Langkawi. – 2016. - Volume: 2. – PP. 1-7.
20. Интернет магазин электронных компонентов «Импульс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.impulsi.ru>