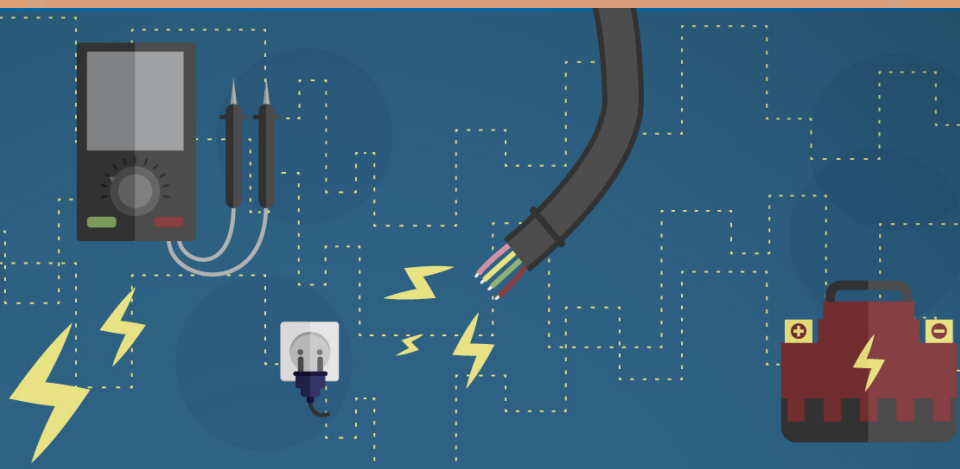


С.В. Шлыков

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Лабораторный практикум



Тольятти
Издательство ТГУ
2025

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

С.В. Шлыков

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Лабораторный практикум

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 621.314.632(075.8)

ББК 31.264.54я73

Ш 698

Рецензенты:

д-р техн. наук, начальник бюро ИЭМС ОИЭ ДПЭиСА

АО «АВТОВАЗ» *П.А. Николаев*;

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой

«Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского

государственного университета *В.В. Вахнина*.

Ш 698 Шлыков, С.В. Преобразовательные установки систем электроснабжения : лабораторный практикум / С.В. Шлыков. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. — 67 с. — ISBN 978-5-8259-1657-6.

В практикуме представлены методические указания по выполнению лабораторных работ по учебному курсу «Преобразовательные установки систем электроснабжения», цель, программа выполнения лабораторных работ, краткие теоретические сведения, требования к оформлению отчета, а также описание блоков учебного комплекта лабораторного оборудования «Электрические и магнитные цепи».

Предназначен для студентов направления подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.314.632(075.8)

ББК 31.264.54я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Шлыков С.В., 2025

ISBN 978-5-8259-1657-6

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский

государственный университет», 2025

Введение

Учебный план дисциплины «Преобразовательные установки систем электроснабжения» для студентов очной и заочной форм обучения предусматривает выполнение лабораторных работ.

Цель лабораторных работ – закрепление теоретических знаний, развитие практических навыков, ознакомление с принципами функционирования и схмотехническими методами построения полупроводниковых преобразовательных установок, измерительными приборами и оборудованием, изучение методов измерений в системах электроснабжения.

Освоение студентами учебного курса «Преобразовательные установки систем электроснабжения» способствует решению следующих задач:

1. Изучение общих вопросов преобразовательной техники, элементной базы, схмотехники, особенностей режимов функционирования, характеристик, показателей качества, основных разновидностей и областей применения полупроводниковых преобразователей и параметров электрической энергии.

2. Знакомство с методами решения задач анализа и расчета основных характеристик и электрических показателей проектирования и методами исследования полупроводниковых преобразователей электроэнергии.

3. Знакомство с методиками расчета оборудования преобразовательных установок различного назначения.

Правила внутреннего распорядка и техники безопасности при выполнении лабораторных работ

При работе в лаборатории «Преобразовательные установки систем электроснабжения» во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования студент при выполнении лабораторных работ должен строго выполнять следующие правила внутреннего распорядка и техники безопасности:

1. Приступая в лаборатории к работе, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. После ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписаться в соответствующем журнале.

3. Во время работы на лабораторных стендах не должно быть никаких лишних предметов, не используемых в схемах проводов и приборов.

4. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому.

5. Приступая к работе в лаборатории, студенческая группа делится на бригады по 3 человека, которые затем распределяются по лабораторным стендам.

6. Монтаж схем необходимо вести при отключенном питании лабораторного стенда в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме.

7. При сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались петлями. Приборы и электрооборудование расставляются так, чтобы было удобно ими пользоваться.

8. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю или учебному мастеру.

9. Включение электрической цепи под напряжение (после проверки) производится только с разрешения и в присутствии преподавателя или учебного мастера.

10. Перед включением напряжения следует предупредить об этом всех участников работы. Необходимо убедиться, что никому из них не угрожает опасность попасть под напряжение.

11. Переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания.

12. Запрещается прикасаться пальцами, карандашами и другими предметами к оголенным токоведущим частям электрической цепи, находящимся под напряжением.

13. Во время работы на лабораторных стендах запрещается отходить от приборов и оборудования, находящихся под напряжением.

14. Запрещается без разрешения преподавателя или учебного мастера переносить приборы с одного места на другое и трогать оборудование, не используемое в данной работе.

15. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, могущий быть причиной поражения электрическим током.

16. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

17. При обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю или учебному мастеру.

18. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания. При потере сознания и остановке дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача [1].

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ

Подготовка к лабораторным работам

Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий и в объеме 14 академических часов. Для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

1. Предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ.

2. Внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задачи этой работы.

3. По лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе.

4. До проведения лабораторной работы подготовить соответствующие схемы, таблицы наблюдений, расчетные формулы, материалы для построения графиков и др.

5. Не подготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются [1].

Подготовка к лабораторной работе и оформление отчета выполняются самостоятельно во внеаудиторное время. Образец оформления протокола имеется на стенде в лаборатории.

Выполнение лабораторных работ

При выполнении лабораторной работы необходимо соблюдение следующих требований:

1. Перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его параметрами, а также с измерительными приборами, необходимыми для проведения соответствующей лабораторной работы.

2. Сборку электрической схемы необходимо производить в точном соответствии с заданием. После окончания сборки электрическая схема должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжение можно только с разрешения преподавателя или учебного мастера.

3. Показания приборов и результаты измерений заносятся студентом в свою заготовку отчета.

4. Разбирать электрическую схему, а также приступать к сборке новой можно только по разрешению преподавателя.

5. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок.

6. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя [1].

Оформление отчета о лабораторной работе

Отчет по каждой лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист с наименованием работы (см. прил.);
- цель и программу работы;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- состав оборудования, перечень аппаратуры с указанием основных пределов измерений и системы измерительных приборов;
- полученные расчетные значения, таблицы с экспериментальными данными, временные характеристики параметров;
- анализ полученных результатов, оформленных в виде выводов по работе.

Описание лабораторного стенда

Общие сведения

«Лабораторный стенд представляет собой комплект типового лабораторного оборудования «Электронные приборы и устройства» ЭПУ.002 РБЭ, который предназначен для проведения лабораторно-практических занятий по учебным дисциплинам электроэнергетического профиля в высших образовательных учреждениях.

Указанный лабораторный стенд позволяет выполнить базовые эксперименты с использованием комплекта типового лабораторного оборудования. В ходе их выполнения собираются и опробуются наиболее часто применяемые на практике схемы» [3].

Компоновка оборудования

Общая компоновка типового комплекта оборудования в стендовом исполнении показана на рис. 1.

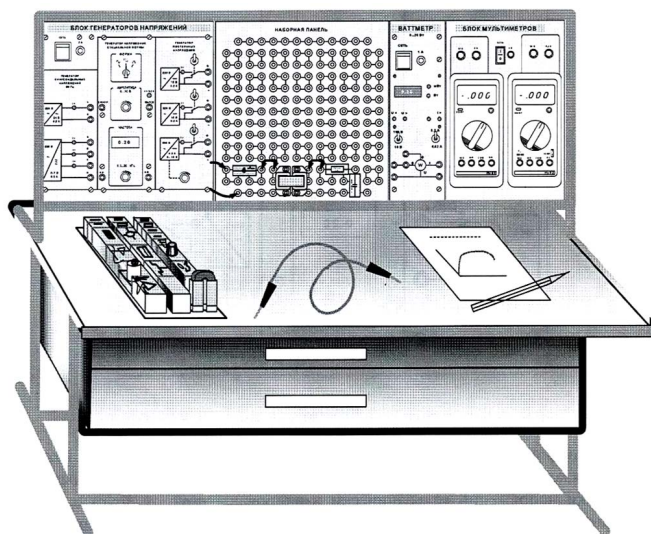


Рис. 1. Вид типового стенда

На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков жестко не фикси-

ровано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из мини-блоков, может устанавливаться и непосредственно на столе.

В выдвижных ящиках хранятся наборы мини-блоков и устройств, соединительные провода, перемычки и кабели, методические материалы. Один из наборов мини-блоков показан на рис. 1.

Блок генераторов напряжений

Лицевая панель блока генераторов напряжений показана на рис. 2. Блок состоит из генератора синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 2 А [11].

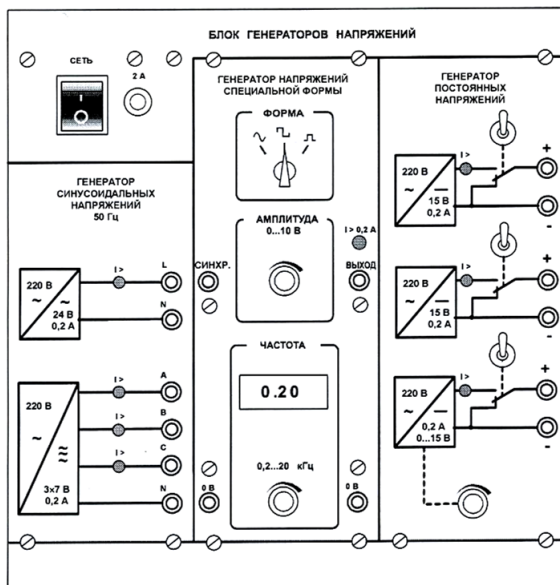


Рис. 2. Блок генераторов напряжения [11]

«На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений гальванически изолированы друг от друга и от корпуса блока и защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Генератор синусоидальных напряжений содержит однофазный источник напряжения 24 В (вторичная обмотка питающего трансформатора 220/24 В) и трехфазный стабилизированный по амплитуде выходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трехфазное. Выходное сопротивление трехфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю» [3].

«Генератор напряжений специальной формы вырабатывает на выходе синусоидальный, прямоугольный двухполярный или прямоугольный однополярный сигнал в зависимости от положения переключателя «ФОРМА». Выходное сопротивление генератора в рабочем диапазоне токов также близко к нулю. Между гнездами «СИНХР» и «О В» генератора при любом положении переключателя «ФОРМА» вырабатываются однополярные прямоугольные импульсы амплитудой 5 В, которые можно использовать для внешней синхронизации осциллографа. Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА» и не зависит ни от формы и амплитуды сигнала, ни от тока нагрузки» [3].

«Генератор постоянных напряжений содержит три источника стабилизированного напряжения 15 В, гальванически изолированных друг от друга. Выходное напряжение одного из этих источников регулируется от 0 до 15 В десятиоборотным потенциометром. Выходные сопротивления этих источников также близки к нулю, и все они допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений больше 15 В они могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры)» [3].

Наборная панель

Наборная панель (рис. 3) служит для расположения на ней мини-блоков в соответствии со схемой данного опыта.

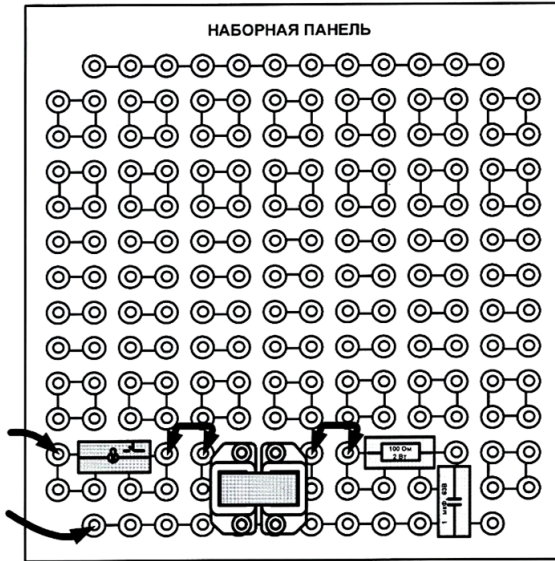


Рис. 3. Наборная панель [11]

Гнезда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнезда панели. Остальные соединения выполняются соединительными проводами и перемычками. Так, на фрагменте цепи, показанной на рис. 3, напряжение подается проводами через выключатель к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединенные последовательно.

Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек, и вместо нее в образовавшийся разрыв включается амперметр. Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр [4].

Набор мини-блоков

«Мини-блоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, полупроводниковые диоды, транзисторы и т. п.), помещенные в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые мини-блоки содержат несколько элементов, соединенных между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные обозначения элементов или упрощенные электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Мини-блоки хранятся в специальном контейнере» [4].

Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 4. В нем установлены 2 серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или другие с аналогичными параметрами. Подробная техническая информация о них и правила применения приводятся в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров [4].

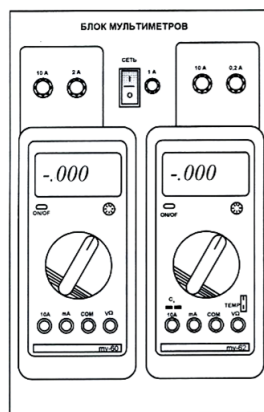


Рис. 4. Блок мультиметров [11]

Для обеспечения надежной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

1. «Не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы.
2. Когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину.

3. Перед тем как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи.
4. Не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение.
5. Не измеряйте емкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены.
6. Будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель на 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения, имеющихся на данном стенде. Мультиметр МУ60 защищен предохранителем на 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда» [4].

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: $-U$, $\sim U$, $-A$, $\sim A$ или Ω ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи. Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 5 [4].

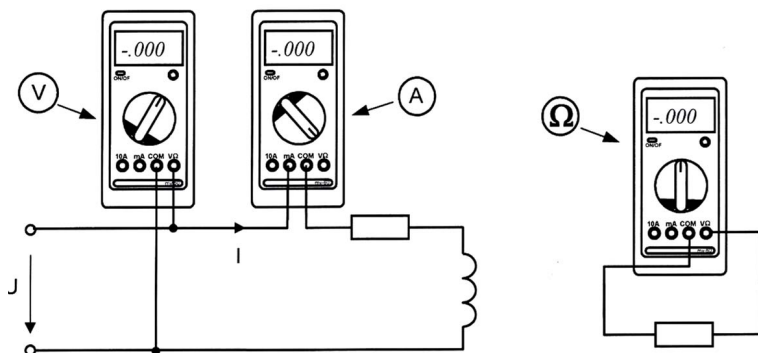


Рис. 5. Правильное подключение мультиметра для измерения напряжения (V), тока (A) и сопротивления (Ω)

Лабораторная работа 1

Исследование однофазных неуправляемых полупроводниковых выпрямителей и сглаживающих фильтров

Цель работы – изучение схем и принципа работы однофазных полупроводниковых выпрямителей.

Программа работы

1. Исследование процессов в схемах однофазных полупроводниковых выпрямителей.
2. Исследование влияния сглаживающего фильтра на основные характеристики и параметры выпрямителей.
3. Исследование основных характеристик сглаживающих фильтров.
4. Приобретение навыков экспериментального исследования выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Краткие теоретические сведения

Выпрямительное устройство, или выпрямитель, предназначено для преобразования переменного напряжения источника электроэнергии (сети) в постоянное. Выпрямленное постоянное напряжение в основном используется для питания всевозможных электронных устройств.

Выпрямитель состоит из согласующего трансформатора T_1 , вентильной группы ВГ и сглаживающего фильтра СФ (рис. 6) [10].

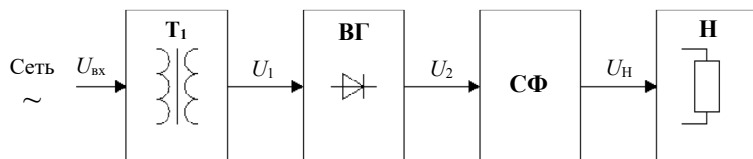


Рис. 6. Структурная схема выпрямителя

Трансформатор выполняет несколько функций: изменяет напряжение сети $U_{вх}$ до значения U_1 , необходимого для выпрямления, гальванически разделяет нагрузку Н от сети.

Вентильная группа ВГ состоит из набора вентилях — нелинейных двухполюсников, пропускающих ток преимущественно в одном (прямом) направлении. Вентиль, обладающий нулевым сопротивлением для прямого тока и имеющий бесконечно большое сопротивление для обратного тока, называют идеальным. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) реальных вентилях приближаются к ВАХ идеального вентиля. В качестве вентилях используют обычно полупроводниковые диоды.

Сглаживающий фильтр СФ уменьшает пульсации выпрямленного напряжения (тока) до значения, допустимого для работы нагрузки Н. Трансформатор T_1 и сглаживающий фильтр СФ не являются обязательными элементами схемы выпрямителя.

Основными параметрами, характеризующими качество работы выпрямителя, являются [7]:

1. Средние значения выпрямленного (выходного) напряжения U_0 и тока I_0 , которые определяются по формуле

$$U_0 = U_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{н}} dt, \quad I_0 = I_{\text{вых}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\text{н}} dt, \quad (1)$$

где T — период изменения выходного напряжения (тока); $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение; $I_{\text{вых}}$ — выходной ток.

2. Частота пульсаций $f_{\text{п}}$ выходного напряжения (тока), которая определяется по формуле

$$f_{\text{п}} = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

3. Коэффициент пульсаций $K_{\text{п}}$, равный отношению амплитуды первой гармоники выходного напряжения $U_{\text{нм1}}$ к его среднему значению. Определяется по формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{нм1}}}{U_0} \approx \frac{U_{\sim}}{U_{=}}, \quad (3)$$

где U_{\sim} — напряжение, отображаемое вольтметром в режиме АС; $U_{=}$ — напряжение, отображаемое вольтметром в режиме DC.

4. Внешняя характеристика — зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения выпрямленного тока:

$$U_0 = f(I_0). \quad (4)$$

По этой характеристике для любого выпрямителя может быть определено его выходное сопротивление при номинальных значениях выпрямленного тока $I_{0н}$ и напряжения $U_{0н}$ по выражению

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{0н}}{\Delta I_{0н}}.$$

Схемы выпрямителей с активной нагрузкой

Однополупериодная схема

При подаче переменного синусоидального напряжения $u_{\text{вх}}$ на первичную обмотку согласующего трансформатора T_1 (рис. 7) на зажимах его вторичной обмотки будет переменное синусоидальное напряжение, которое рассчитывается по формуле

$$u_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega t). \quad (5)$$

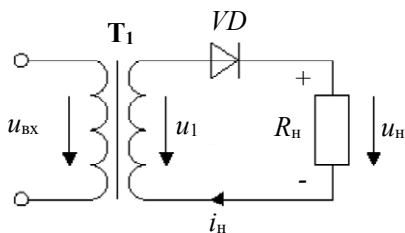


Рис. 7. Принципиальная схема однополупериодного выпрямителя

«Полупроводниковый диод проводит электрический ток только в течение одной половины периода переменного напряжения. В положительный полупериод, когда на аноде диода VD положительный потенциал, он открывается, все напряжение прикладывается к нагрузке $R_{\text{н}}$. В отрицательный полупериод диод закрыт, ток через него равен нулю, а все напряжение вторичной обмотки трансформатора прикладывается к диоду (рис. 8)» [10].

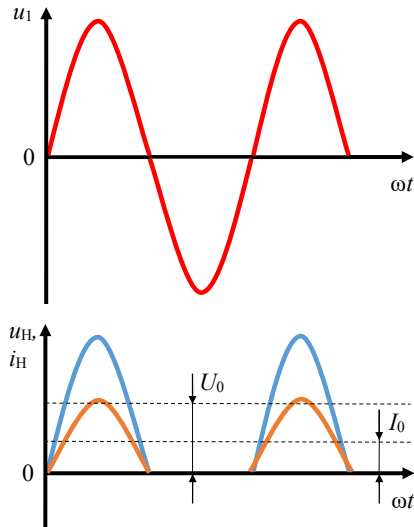


Рис. 8. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

Ток в цепи нагрузки является пульсирующим (неизменным по направлению, но изменяющимся по значению). При этом амплитудное значение тока определяется по формуле

$$I_{Hm} = \frac{U_{Hm}}{R_H}. \quad (6)$$

Кривая получаемого в процессе однополупериодного выпрямления пульсирующего тока может быть разложена в гармонический ряд Фурье по формуле

$$i_H = I_{Hm} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right). \quad (7)$$

Таким образом, пульсирующий ток при однополупериодном выпрямлении, кроме переменных составляющих различных амплитуд и частот, содержит также и постоянную составляющую (среднее значение), которая определяется по формуле

$$I_0 = \frac{I_{Hm}}{\pi}. \quad (8)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения с учетом выражения для тока определяют из соотношения

$$U_0 = R_H I_0 = \frac{U_{Hm}}{\pi}. \quad (9)$$

Коэффициент пульсаций тока (напряжения) определяется по формуле

$$K_{\pi} = \frac{\frac{I_{Hm}}{2}}{\frac{I_{Hm}}{\pi}} = \frac{\frac{U_{Hm}}{2}}{\frac{U_{Hm}}{\pi}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57. \quad (10)$$

Напряжение, воспринимаемое диодом в непроводящий полупериод, — обратное напряжение — при этом определяется значением напряжения на вторичной обмотке трансформатора. То есть максимальное значение обратного напряжения, приложенное к диоду в данной схеме, равно амплитудному значению напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_{1m} , что необходимо учитывать при выборе диода для схемы однополупериодного однофазного выпрямителя [3].

На промышленных частотах ($f = 50/60$ Гц) однополупериодный выпрямитель не имеет широкого применения, так как для питания аппаратуры требуются сглаживающие фильтры с большими величинами емкости и индуктивности, что приводит к увеличению габаритно-весовых характеристик выпрямительных установок.

Однако схема однополупериодного выпрямления нашла очень широкое распространение в импульсных блоках питания с частотой переменного напряжения свыше 10 кГц, широко применяющихся в современной бытовой и промышленной аппаратуре.

Двухполупериодная схема

Схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 9) представляет собой сочетание двух однополупериодных выпрямителей с общей нагрузкой. При этом напряжение на каждой половине вторичной обмотки трансформатора (1–2 и 1–3) можно рассматривать как два независимых синусоидальных напряжения, сдвинутых относительно друг друга по фазе на угол 180° . При таком включении диоды будут находиться в проводящем состоянии в различные полупериоды напряжения на обмотках трансформатора. В результате диаграммы

выпрямленного тока и напряжения на выходе выпрямительного устройства будут иметь вид, представленный на рис. 10 [3].

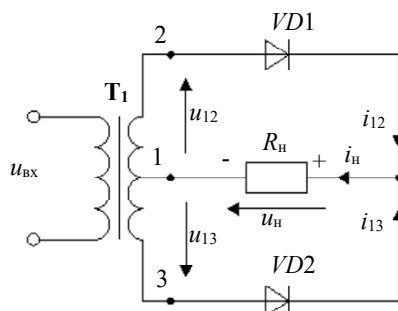


Рис. 9. Принципиальная схема двухполупериодного выпрямителя

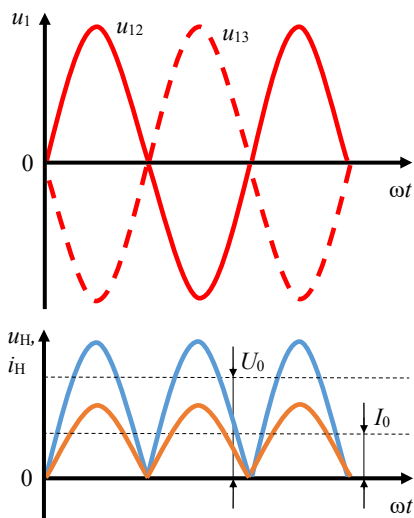


Рис. 10. Временные диаграммы двухполупериодного выпрямителя

Кривую выпрямленного тока при двухполупериодном выпрямлении можно разложить в гармонический ряд Фурье [3]:

$$i_H = I_{Hm} \left(\frac{2}{\pi} + \frac{4}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4}{15\pi} \cos 4\omega t + \frac{4}{35\pi} \cos 6\omega t - \dots \right). \quad (11)$$

При этом наряду с переменными составляющими гармонический ряд содержит и постоянную составляющую тока:

$$I_0 = \frac{2I_{Hm}}{\pi}. \quad (12)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения рассчитывается по формуле

$$U_0 = R_H I_0 = \frac{2U_{Hm}}{\pi}. \quad (13)$$

Коэффициент пульсаций тока (напряжения) определяется по формуле

$$K_{\pi} = \frac{\frac{4I_{Hm}}{3\pi}}{\frac{2I_{Hm}}{\pi}} = \frac{\frac{4U_{Hm}}{3\pi}}{\frac{2U_{Hm}}{\pi}} = \frac{2}{3} \approx 0,667. \quad (14)$$

Как следует из формулы (14) и рис. 10, пульсации тока в двухполупериодной схеме значительно уменьшаются по сравнению со схемой однополупериодного выпрямления [3].

Мостовая схема

Выпрямитель, выполненный по мостовой схеме (рис. 11), позволяет получить двухполупериодное выпрямление переменного тока при использовании трансформатора, не имеющего среднего вывода от вторичной обмотки. В этой схеме в течение одного полупериода ток пропускают диоды $VD1$ и $VD3$, при этом диоды $VD2$ и $VD4$ закрыты. В следующий полупериод будут проводить ток соответственно диоды $VD2$ и $VD4$, а диоды $VD1$ и $VD3$ будут находиться в непроводящем состоянии. Причем направление тока в цепи нагрузки в течение обоих полупериодов переменного напряжения при этом не меняется [3].

Значения среднего выпрямленного напряжения и тока на нагрузке и коэффициента пульсации для выпрямителя с мостовой схемой определяются так же, как и для двухполупериодного выпрямителя, — формулы (12)—(14).

«Данная схема выпрямления позволяет получить заданное выпрямленное напряжение при числе витков вторичной обмотки трансформатора вдвое меньшем, чем в двухполупериодной схеме выпрямления, при прочих равных условиях. Так как во вторичной

обмотке трансформатора протекает не пульсирующий, а синусоидальный переменный ток, это позволяет уменьшить габариты трансформатора по сравнению с трансформатором, необходимым для питания двухполупериодного выпрямителя, рассчитанного на ту же мощность, приблизительно в 1,5 раза» [3].

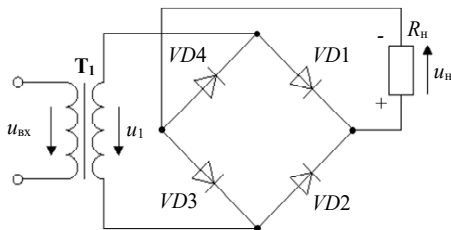


Рис. 11. Принципиальная схема мостового выпрямителя

Особенности работы выпрямителей на резистивно-емкостную нагрузку

«Режим работы на резистивно-емкостную нагрузку является наиболее распространенным в маломощных выпрямителях. В этом режиме параллельно сопротивлению нагрузки подключается конденсатор (рис. 12), что приводит к существенным изменениям форм тока диода и выпрямленного напряжения, а также энергетических соотношений.

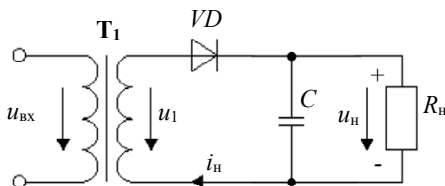


Рис. 12. Принципиальная схема однополупериодного выпрямителя

Временные диаграммы токов и напряжений в однофазной однотактной схеме выпрямления с резистивно-емкостной нагрузкой (без учета индуктивностей рассеяния трансформатора) в установившемся режиме приведены на рис. 13. В этом случае момент возникновения тока диода i_{VD} будет сдвинут по отношению к началу положительной полуволны напряжения u_2 на угол $\varphi_0 < \pi/2$.

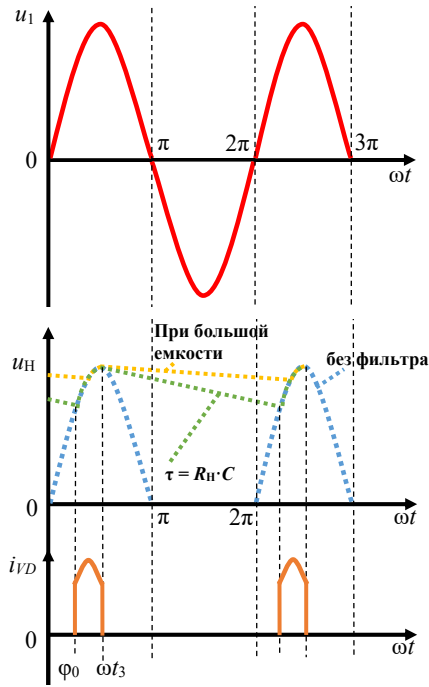


Рис. 13. Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

Ток диода i_{VD} при $\varphi_0 < \omega t < \omega t_3$ определится суммой токов конденсатора и нагрузки:

$$i_{VD} = i_C + i_H \approx \frac{E_{2m} \cdot (\omega\tau_H \cdot \cos \omega t + \sin \omega t)}{R_H}, \quad (15)$$

где $\tau_H = R_H C$ – постоянная времени цепи.

Для обеспечения малого коэффициента пульсаций должно выполняться условие:

$$\omega\tau_H \gg 1. \quad (16)$$

Увеличение емкости фильтра C (или постоянной времени $\tau_H = R_H C$) приводит не только к уменьшению коэффициента пульсаций, но и к увеличению постоянной составляющей выпрямленного напряжения. Уменьшение сопротивления нагрузки R_H приводит к уменьшению постоянной времени цепи разряда τ_H , поэтому внешняя характеристика выпрямителя с емкостной нагрузкой круто-

падающая, что определяет высокое выходное сопротивление и ограничения при использовании переменной нагрузки.

При использовании П-образного фильтра, представляющего собой каскадное соединение емкостного и Г-образного фильтров, формы тока диода и напряжения на первой емкости фильтра близки к рассмотренным ранее. Внешние характеристики выпрямителя при использовании различных сглаживающих фильтров представлены на рис. 14» [9].

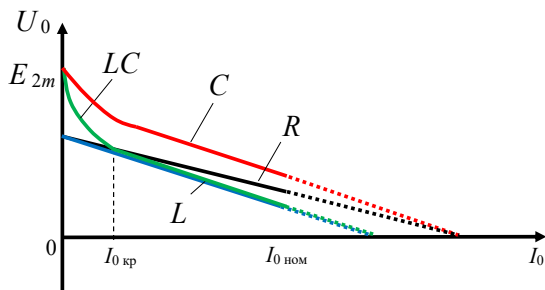


Рис. 14. Семейство внешних характеристик выпрямителя при различных видах сглаживающего фильтра

Выполнение работы

Задание 1. Исследовать однофазный однополупериодный выпрямитель и влияние на его параметры сглаживающего фильтра.

Порядок проведения эксперимента

Соберите цепь согласно электрической схеме (рис. 15) сначала без сглаживающего фильтра. Включите мультиметры: *PV1* — для измерения выпрямленного (постоянного) напряжения, *PV2* — для измерения пульсации переменной составляющей полупроводникового выпрямителя. Установите величины сопротивления резистора и индуктивности на выходе полупроводникового выпрямителя, заданные преподавателем.

Включите и настройте осциллограф *PS*. Установите развертку на отметку 5 мс/дел.

Перенесите на график (рис. 16) осциллограммы входного и выходного напряжений однополупериодного выпрямителя.

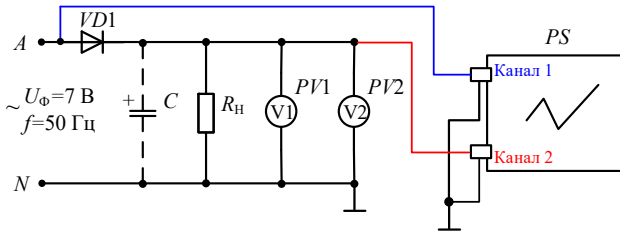
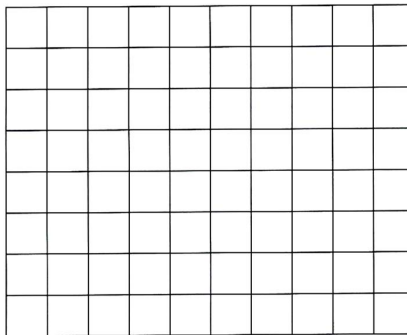


Рис. 15. Электрическая схема экспериментальной установки



Масштабы

По каналу I:
 $m_U = \dots\dots\dots$ В/дел.

По каналу II:
 $m_U = \dots\dots\dots$ В/дел.

По времени:
 $m_t = \dots\dots\dots$ мс/дел.

Рис. 16. Заготовка для временных диаграмм

Сделайте измерения и запишите в табл. 1 показания соответствующих вольтметров. Рассчитайте коэффициент пульсаций $K_{\text{П}}$ при работе однополупериодного выпрямителя.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные данные однофазного однополупериодного выпрямителя

№ эксперимента	Измерено			Вычислено
	$C, \text{ мкФ}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$K_{\text{П}}$
1	0			
2	1			
3	10			
4	100			
5	470			

$R_{\text{H}} = \dots\dots\dots$ кОм, $L_{\text{H}} = \dots\dots\dots$ мГн.

Теоретическое значение коэффициента пульсаций однополупериодного выпрямителя:

$$K_{\Pi} =$$

Параллельно нагрузочному резистору $R_{\text{н}}$ подключите сглаживающие электролитические конденсаторы со значениями емкостей, указанными в табл. 1 (**не ошибитесь с полярностью при их подключении!**), повторите измерения и зарисуйте графики выпрямленного напряжения на рис. 16.

Задание 2. Исследовать однофазный мостовой выпрямитель и влияние на его параметры сглаживающего фильтра.

Порядок проведения эксперимента

Соберите цепь согласно электрической схеме (рис. 17) сначала без сглаживающего фильтра. Включите мультиметры: $PV1$ – для измерения выпрямленного (постоянного) напряжения, $PV2$ – для измерения пульсации переменной составляющей полупроводникового выпрямителя. Установите величины сопротивления резистора и индуктивности на выходе полупроводникового выпрямителя, заданные преподавателем.

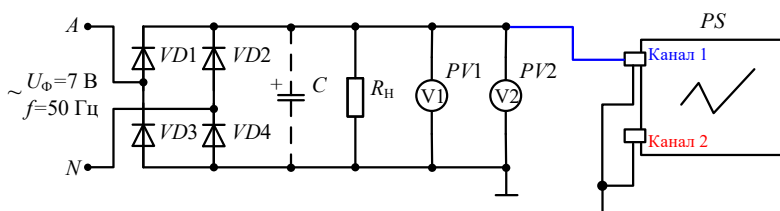
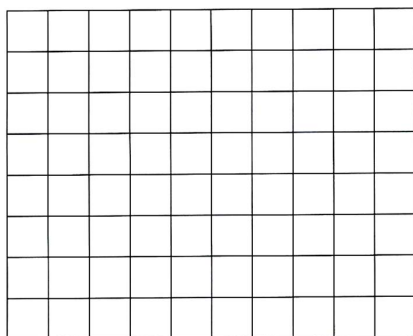


Рис. 17. Электрическая схема экспериментальной установки

Включите и настройте осциллограф PS . Установите развертку на отметку 5 мс/дел.

Перенесите на график (рис. 18) осциллограммы входного и выходного напряжений однополупериодного выпрямителя.



Масштабы

По каналу I:
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По каналу II:
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По времени:
 $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$

Рис. 18. Заготовка для временных диаграмм

Сделайте измерения и запишите в табл. 2 показания соответствующих вольтметров. Рассчитайте коэффициент пульсаций K_{Π} при работе однополупериодного выпрямителя.

Параллельно нагрузочному резистору R_{Π} подключите сглаживающие электролитические конденсаторы со значениями емкостей, указанными в табл. 2 (**не ошибитесь с полярностью при их подключении!**), повторите измерения и зарисуйте графики выпрямленного напряжения на рис. 18.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные однофазного мостового выпрямителя

Измерено				Вычислено
№ эксперимента	C, мкФ	U_1 , В	U_2 , В	K_{Π}
1	0			
2	1			
3	10			
4	100			
5	470			

$R_{\Pi} = \dots\dots\dots \text{кОм}, L_{\Pi} = \dots\dots\dots \text{мГн.}$

Теоретическое значение коэффициента пульсаций однополупериодного выпрямителя:

$K_{\Pi} =$

Содержание отчета

1. Титульный лист с наименованием работы.
2. Цель и программа работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Принципиальная схема лабораторной установки.
5. Описание хода работы.
6. Таблицы с экспериментальными данными, результаты обработки полученных данных.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы однофазных полупроводниковых выпрямителей. Назовите их достоинства и недостатки.
2. Укажите область применения однофазных полупроводниковых выпрямителей.
3. Какими показателями характеризуется работа полупроводникового выпрямителя?
4. Как изменяется величина обратного напряжения на диоде в разных схемах однофазных выпрямителей?
5. Нарисуйте и объясните работу исследуемых схем однофазных выпрямителей.
6. Изобразите временные диаграммы токов и напряжений в основных цепях при различных нагрузках: а) резистивной R_n ; б) резистивно-индуктивной $R_n - L_\phi$; в) резистивно-емкостной $R_n - C$.
7. Как изменяются амплитуда и время протекания тока диода: а) при подключении конденсатора к резистивной нагрузке; б) при подключении индуктивной к нагрузке?
8. Почему максимальное значение выпрямленного напряжения U_0 не совпадает со входным напряжением?
9. Объясните ход внешних характеристик выпрямителя при различных сглаживающих фильтрах.
10. Как изменится форма импульса тока диода: а) при изменении значений индуктивности L_ϕ в цепи нагрузки; б) при изменении емкости C фильтра для исследуемых схем выпрямителей?

11. Дайте сравнительную оценку зависимости коэффициента сглаживания фильтров от тока нагрузки I_0 .
12. Что такое габаритная мощность трансформатора в выпрямителе и коэффициент мощности выпрямителя, как они зависят от схемы и от характера нагрузки выпрямителя?
13. Что называют вынужденным намагничиванием сердечника трансформатора и как оно влияет на характеристики выпрямителя? Каковы способы устранения вынужденного намагничивания?

Лабораторная работа 2

Исследование трехфазных неуправляемых полупроводниковых выпрямителей и сглаживающих фильтров

Цель работы – изучение схем и принципа работы трехфазных полупроводниковых выпрямителей.

Программа работы

1. Исследование процессов в схемах трехфазных полупроводниковых выпрямителей.
2. Исследование влияния сглаживающего фильтра на основные характеристики и параметры выпрямителей.
3. Исследование основных характеристик сглаживающих фильтров.
4. Приобретение навыков экспериментального исследования выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Краткие теоретические сведения

Трехфазные выпрямители находят применение в преобразовательных установках средней и большой мощности. На рис. 19 показана схема трехфазного выпрямителя со средней точкой и временные диаграммы напряжений на выходных обмотках трансформатора [2].

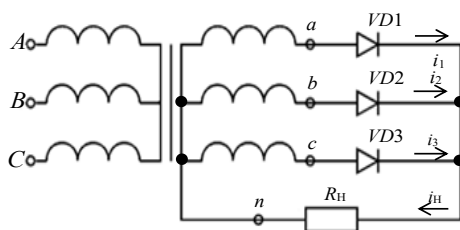


Рис. 19. Схема трехфазного выпрямителя со средней точкой

Если предположить, что диоды идеальные, то напряжение на нагрузке R_n будет равно напряжению фазы с открытым диодом, следовательно, ток в нагрузке изменяется по тому же закону и ток не падает до нуля, как это было в однофазных одно- и двухполупериодных выпрямителях, что можно увидеть на рис. 20.

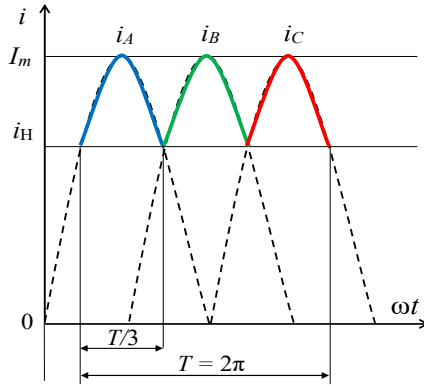


Рис. 20. Временная диаграмма выпрямленного трехфазного тока

Частота и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения определяется по формуле

$$\left\| \begin{aligned} f_{\text{п}} &= 3 \cdot f_{\text{с}}, \\ q_{\text{п}} &= \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3^2 - 1} \approx 0,25. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Среднее выпрямленное напряжение и ток при нагрузке – по формуле

$$\left\| \begin{aligned} U_{\text{н.ср}} &= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot U_{2m} \approx 0,827 \cdot U_{2m} = 1,17 \cdot U_{2\phi} \\ U_2 &= \frac{\pi \cdot U_{\text{н.ср}}}{2\sqrt{2}} \approx 1,11 \cdot U_{\text{н.ср}}, U_{\text{обр.макс}} = \sqrt{2} \cdot U_2, \\ I_{\text{н.ср}} &\approx 0,827 \cdot I_{2m}. \end{aligned} \right. \quad (18)$$

Максимальное обратное напряжение на каждом диоде определяется амплитудой линейного напряжения и находится по формуле

$$U_{\text{обр.макс}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = \frac{2\pi}{3} \cdot U_{\text{н.ср}} \approx 2,09 \cdot U_{\text{н.ср}}. \quad (19)$$

Сводные данные по трехфазному выпрямителю со средней точкой представлены в табл. 3.

Параметры схем трехфазного выпрямления

Параметры	Схема выпрямителя	
	Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом	Трехфазный мостовой выпрямитель
Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{н.ср}$	$\approx 1,17 \cdot U_{2ф}$ $\approx 0,827 \cdot U_{2м}$	$\approx 2,34 \cdot U_{2л}$ $\approx 0,956 \cdot U_{2м}$
Обратное максимальное напряжение $U_{обр.мах}$	$\approx 2,09 \cdot U_{н.ср}$	$\approx 1,045 \cdot U_{н.ср}$
Частота пульсаций $f_{п}$	$3 \cdot f_c$	$6 \cdot f_c$
Коэффициент пульсации $K_{п}$	0,25	0,057
Среднее значение тока нагрузки $I_{н.ср}$	$\approx 0,827 \cdot I_{2м}$	$\approx 0,956 \cdot I_{2м}$

Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом используется для питания потребителей, в которых среднее значение выпрямленного тока может достигать до сотен ампер, а напряжение — до десятков киловольт.

Основными *преимуществами* трехфазного выпрямителя со средней точкой являются:

- достаточно высокая надежность и минимальное количество диодов;
- снижение падения напряжения на выпрямителе.

Основными *недостатками* трехфазного выпрямителя со средней точкой являются:

- подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током;
- более низкий коэффициент полезного действия выпрямителя.

Рассмотрим схему двухполупериодного выпрямителя трехфазного тока (схему Ларионова), представленную на рис. 21 [2].

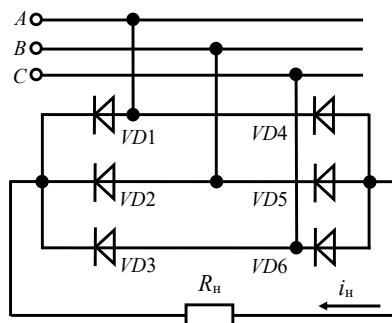


Рис. 21. Схема двухполупериодного выпрямителя трехфазного тока

Из временной диаграммы (рис. 22) видно, что пульсации выпрямленного тока значительно меньше, чем в трехфазном выпрямителе с нейтральным выводом.

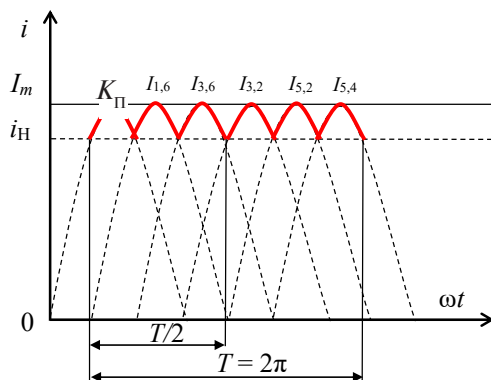


Рис. 22. Временная диаграмма выпрямленного трехфазного тока

На временной диаграмме условно показаны токи, протекающие через пары полупроводниковых диодов: $I_{1,4}$ — диоды $VD1$ и $VD4$; $I_{1,6}$ — диоды $VD1$ и $VD6$ и так далее.

Частота и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения определяются по формуле

$$\left\| \begin{aligned} f_{\pi} &= 6 \cdot f_c, \\ q_{\pi} &= \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} \approx 0,057, \end{aligned} \right. \quad (20)$$

где $m = 6$ – кратность частоты изменения сигнала к частоте тока в сети для трехфазного мостового выпрямителя.

Среднее выпрямленное напряжение в рассматриваемом выпрямителе в 2 раза больше, чем в выпрямителе с нейтральным выводом и определяется по формуле

$$U_{н.ср} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2л} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2,34 \cdot U_2, \quad (21)$$

где $U_{2л}$ – линейное напряжение на вторичной обмотке трансформатора.

Среднее выпрямленное значение тока и максимальное обратное напряжение определяются по формуле

$$\left\{ \begin{aligned} I_{н.ср} &= \frac{3 \cdot I_m}{\pi} \approx 0,956 \cdot I_{2m}, \\ U_{обр.макс} &\approx 1,045 \cdot U_{н.ср}. \end{aligned} \right. \quad (22)$$

Выполнение работы

Задание 1. Исследовать трехфазный выпрямитель со средней точкой и влияние на его параметры сглаживающего фильтра.

Порядок проведения эксперимента

Соберите цепь согласно электрической схеме (рис. 23) сначала без сглаживающего фильтра. Включите мультиметры: *PV1* – для измерения выпрямленного (постоянного) напряжения, *PV2* – для измерения пульсации переменной составляющей полупроводникового выпрямителя. Установите величины сопротивления резистора и индуктивности на выходе полупроводникового выпрямителя, заданные преподавателем.

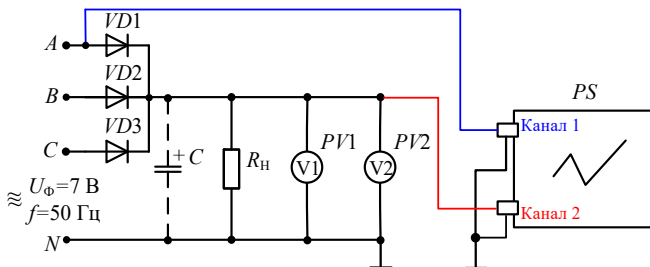
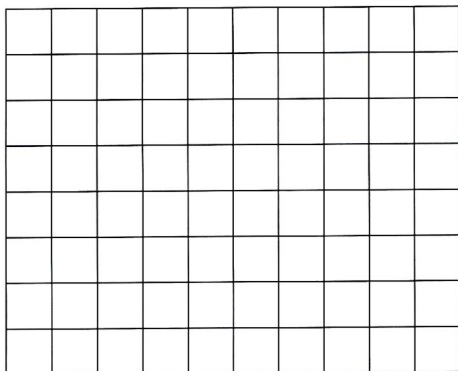


Рис. 23. Электрическая схема экспериментальной установки

Включите и настройте осциллограф *PS*. Установите развертку на отметку 5 мс/дел.

Перенесите на график (рис. 24) осциллограммы входного и выходного напряжений однополупериодного выпрямителя.



Масштабы

По каналу I:
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По каналу II:
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По времени:
 $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$

Рис. 24. Заготовка для временных диаграмм

Сделайте измерения и запишите в табл. 4 показания соответствующих вольтметров. Рассчитайте коэффициент пульсаций K_{Π} при работе однополупериодного выпрямителя.

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные данные трехфазного выпрямителя со средней точкой

№ экспери- мента	Измерено			Вычислено
	$C, \text{ мкФ}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	K_{Π}
1	0			
2	1			
3	10			
4	100			
5	470			

$R_H = \dots\dots\dots \text{кОм}, L_H = \dots\dots\dots \text{мГн.}$

Теоретическое значение коэффициента пульсаций однополупериодного выпрямителя:

$K_{\Pi} =$

Параллельно нагрузочному резистору R_H подключите сглаживающие электролитические конденсаторы со значениями емкостей, указанными в табл. 4 (**не ошибитесь с полярностью при их подключении!**), повторите измерения и зарисуйте графики выпрямленного напряжения на рис. 24.

Задание 2. Исследовать трехфазный мостовой выпрямитель и влияние на его параметры сглаживающего фильтра.

Порядок проведения эксперимента

Соберите цепь согласно электрической схеме (рис. 25) сначала без сглаживающего фильтра. Включите мультиметры: $PV1$ — для измерения выпрямленного (постоянного) напряжения, $PV2$ — для измерения пульсации переменной составляющей полупроводникового выпрямителя. Установите величины сопротивления резистора и индуктивности на выходе полупроводникового выпрямителя, заданные преподавателем.

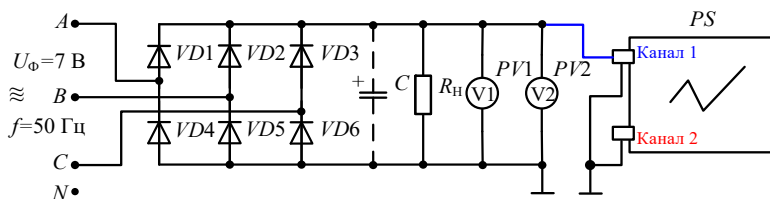


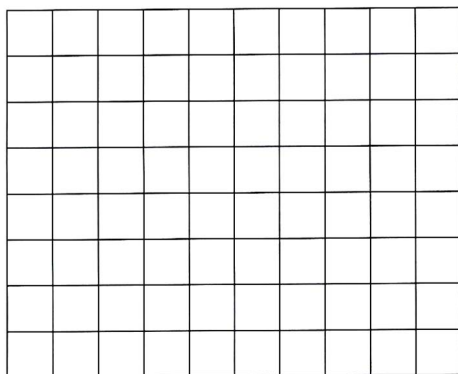
Рис. 25. Электрическая схема экспериментальной установки

Включите и настройте осциллограф PS . Установите развертку на отметку 5 мс/дел.

Перенесите на график (рис. 26) осциллограммы входного и выходного напряжений однополупериодного выпрямителя.

Сделайте измерения и запишите в табл. 5 показания соответствующих вольтметров. Рассчитайте коэффициент пульсаций K_H при работе однополупериодного выпрямителя.

Параллельно нагрузочному резистору R_H подключите сглаживающие электролитические конденсаторы со значениями емкостей, указанными в табл. 5 (**не ошибитесь с полярностью при их подключении!**), повторите измерения и зарисуйте графики выпрямленного напряжения на рис. 26.



Масштабы

По каналу I:
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел}$

По каналу II:
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел}$

По времени:
 $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел}$

Рис. 26. Заготовка для временных диаграмм

Таблица 5

Экспериментальные и расчетные данные трехфазного мостового выпрямителя

Измерено				Вычислено
№ экспери-мента	C, мкФ	U_1 , В	U_2 , В	K_{Π}
1	0			
2	1			
3	10			
4	100			
5	470			

$R_H = \dots\dots\dots$ кОм, $L_H = \dots\dots\dots$ мГн.

Теоретическое значение коэффициента пульсации однополупериодного выпрямителя:

$K_{\Pi} =$

Содержание отчета

1. Титульный лист с наименованием работы.
2. Цель и программа работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Принципиальная схема лабораторной установки.
5. Описание хода работы.
6. Таблицы с экспериментальными данными, результаты обработки полученных данных.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы трехфазных неуправляемых полупроводниковых выпрямителей. Назовите их достоинства и недостатки.
2. Укажите область применения трехфазных неуправляемых полупроводниковых выпрямителей.
3. Как изменяется величина обратного напряжения на диоде в разных схемах трехфазных выпрямителей?
4. В какие схемы могут соединяться обмотки трехфазного трансформатора?
5. Поясните причины возникновения потока вынужденного намагничивания в трехфазном выпрямителе со средней точкой.
6. Нарисуйте и объясните работу исследуемых схем трехфазных выпрямителей.
7. Изобразите временные диаграммы токов и напряжений в основных цепях трехфазного выпрямителя со средней точкой.
8. Изобразите временные диаграммы токов и напряжений в основных цепях трехфазного мостового выпрямителя.
9. Что называют внешней характеристикой выпрямителя и для чего она строится?
10. Назовите условия, необходимые для включения и выключения полупроводниковых диодов.
11. Как повлияет на работу трехфазного выпрямителя выход из строя одного из полупроводниковых диодов?

Лабораторная работа 3

Исследование трансформаторного стабилизированного источника питания

Цель работы – изучение схем и принципа работы стабилизированных источников питания.

Программа работы

1. Исследование процессов в схемах линейного стабилизатора напряжения.
2. Исследование основных характеристик стабилизаторов напряжения.
3. Приобретение навыков экспериментального исследования стабилизаторов напряжения.

Краткие теоретические сведения

«Стабилизированным источником питания называется такой источник, напряжение или ток которого остается неизменным независимо от подключаемой к нему нагрузки. Стабилизатор предназначен для устранения изменений электрического тока и перепадов напряжения. Он не позволяет напряжению превысить максимальное допустимое значение за счет применения в нем полупроводниковых приборов – стабилитронов. Таким образом, стабилизированный источник питания является надежным источником электрической энергии и служит для защиты чувствительной аппаратуры от изменений и колебаний напряжения, и, следовательно, обеспечивается широкая сфера применения этих устройств» [5]. В настоящее время стабилизированные источники питания «применяются для питания бытовой техники и электроприборов, что значительно повышает надежность и длительность эксплуатации этого вида устройств. Также стабилизированные источники питания получили широкое применение в корабельной аппаратуре, они применяются для подключения радиостанций, датчиков, двигателей постоянного тока, что позволяет контролировать обороты двигателя и другой важной и чувствительной аппаратуры. Современные стабилизаторы изготавливаются на базе полупроводников, что позволило уменьшить

их габариты, потребление электроэнергии, повысив мощность и точность» [5]. Особенной сложностью отличаются стабилизированные источники питания, «используемые для питания современной цифровой вычислительной техники. Таким образом, использование стабилизаторов позволяет уменьшить расход электричества и увеличить надежность и долговечность эксплуатации аппаратуры, в которой они применяются» [5]. Основными частями стабилизированного источника питания являются:

- силовой трансформатор;
- выпрямитель;
- сглаживающий фильтр;
- стабилизатор;
- нагрузка [5].

Блок-схема источника питания представлена на рис. 27.

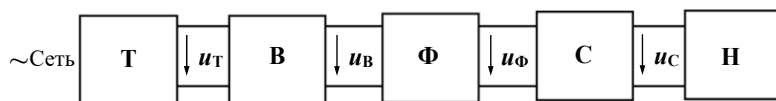


Рис. 27. Структурная схема стабилизированного источника питания:
 Т – трансформатор; В – выпрямитель; Ф – сглаживающий фильтр;
 С – стабилизирующее устройство; Н – нагрузка

Трансформатор предназначен для повышения или понижения напряжения сети до необходимой величины и гальванической развязки системы. Выпрямитель служит для преобразования энергии переменного напряжения в энергию постоянного напряжения. Сглаживающий фильтр необходим для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения. Стабилизатор выполняет функцию стабилизации напряжения на необходимом уровне. На рис. 28 приведены временные диаграммы, поясняющие работу стабилизированного источника питания. Переменное напряжение питающей сети $U_c = 220 \text{ В} \pm 10 \%$ подается на первичную обмотку трансформатора Т. Со вторичной обмотки трансформатора подается переменное напряжение $U_T = U_2 \pm 10 \%$ на выпрямительный диодный мост [5].

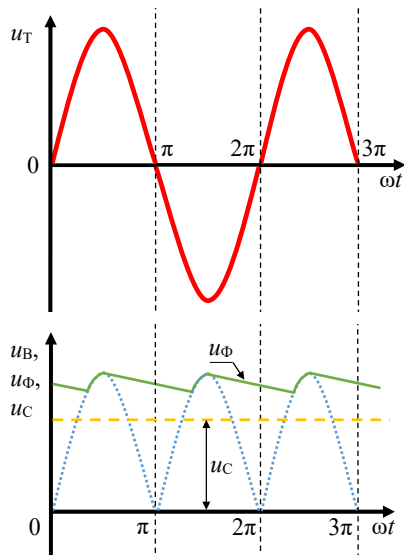


Рис. 28. Временные диаграммы напряжений стабилизированного источника питания

Напряжение после выпрямления u_T обладает высоким коэффициентом пульсации ($K_{\Pi} \approx 0,67$), что недопустимо велико. Для того чтобы уменьшить коэффициент пульсации, используют различные схемы стабилизаторов.

«Стабилизатором напряжения (тока) называют устройство, поддерживающее с определенной точностью неизменным напряжение (ток) на нагрузке. Изменение напряжения на нагрузке может быть вызвано рядом причин:

- колебаниями напряжения первичного источника питания (сети переменного напряжения, аккумулятора, гальванического элемента);
- изменением нагрузки;
- изменением температуры окружающей среды;
- другими факторами» [2].

«По принципу работы стабилизаторы делят на *параметрические* и *компенсационные*. В свою очередь параметрические стабилизаторы бывают однокаскадными, многокаскадными и мостовыми. Компенсационные стабилизаторы могут быть с непрерывным или им-

пульсным регулированием; и те и другие могут быть последовательного или параллельного типа.

Параметрические стабилизаторы осуществляют стабилизацию напряжения за счет изменения параметров полупроводниковых приборов: стабилитронов, стабилиторов, транзисторов и других. Изменяемым параметром полупроводниковых стабилизаторов напряжения является их сопротивление или проводимость» [2].

Компенсационные стабилизаторы — это замкнутые системы автоматического регулирования напряжения на нагрузке, выполненные на полупроводниковых приборах. Выходное напряжение в этих стабилизаторах поддерживается равным или пропорциональным стабильному опорному напряжению, которое обычно создается одним из типов параметрических стабилизаторов. Компенсационные стабилизаторы имеют регулирующий элемент (обычно транзистор), который включается последовательно или параллельно нагрузке (рис. 29), измерительный элемент и преобразующее устройство [2]. В измерительном элементе происходит сравнение выходного напряжения с опорным и вырабатывается сигнал ошибки. В преобразующем устройстве сигнал ошибки усиливается и преобразуется в управляющий сигнал для регулирующего элемента. Под действием этого управляющего сигнала изменяется внутреннее состояние регулирующего элемента так, чтобы поддерживать выходное напряжение стабильным [8].

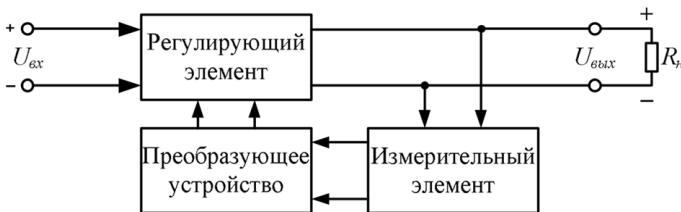


Рис. 29. Структурная схема компенсационного стабилизатора

«Регулирующий элемент может работать в непрерывном или ключевом режиме. В импульсных стабилизаторах используется ключевой режим работы регулирующего элемента. В стабилизаторах с непрерывным регулированием регулирующий элемент работает в непрерывном режиме.

По выходной мощности стабилизаторы можно разделить на три группы:

- маломощные (до 1 Вт);
- средней мощности (до 250 Вт);
- большой мощности (свыше 250 Вт).

Маломощные стабилизаторы используются в измерительной технике, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях. Стабилизаторы средней мощности используются для питания малых ЭВМ и маломощных электронных устройств. Мощные стабилизаторы применяют для питания лазерных установок, электронных микроскопов и других устройств» [2].

«По точности поддержания выходного напряжения на нагрузке выделяют стабилизаторы:

- прецизионные (изменение напряжения не более 0,005 %);
- точные (изменение напряжения от 0,01 до 0,005 %);
- средней точности (изменение напряжения от 0,1 до 0,01 %);
- низкой точности (изменение напряжения от 1 до 0,1 %).

В прецизионных стабилизаторах для получения наивысшей точности поддержания выходного напряжения используются специальные устройства, исключаящие влияние изменения температуры окружающей среды (термостаты или криостаты)» [2].

Основные параметры стабилизаторов напряжения

«Параметры стабилизаторов напряжения позволяют сравнивать их по качеству работы и выбирать те, которые удовлетворяют требованиям эксплуатации электронных устройств. К таким параметрам относят:

- номинальное выходное напряжение — $U_{\text{вых}}$;
- диапазон изменения входного напряжения — $U_{\text{вх. min}}$ и $U_{\text{вх. max}}$;
- диапазон изменения тока нагрузки — $I_{\text{вх. min}}$ и $I_{\text{вх. max}}$;
- коэффициент полезного действия — η ;
- коэффициент стабилизации напряжения — $K_{\text{ст}}$;
- коэффициент сглаживания пульсаций — $K_{\text{ср}}$;
- коэффициент неустойчивости по напряжению — $K_{\text{нU}}$;
- коэффициент неустойчивости по току — $K_{\text{нI}}$;
- быстродействие» [2].

Номинальное напряжение стабилизации $U_{\text{вых}}$ — это выходное напряжение стабилизатора при нормальных условиях его эксплуатации (определенное входное напряжение, заданный ток нагрузки, установленная температура окружающей среды). Если стабилизатор позволяет регулировать выходное напряжение, то задается диапазон его изменения: $U_{\text{вых.min}}$ и $U_{\text{вых.max}}$.

Диапазон изменения входного напряжения позволяет установить пределы изменения напряжения на входе стабилизатора, при которых сохраняются точностные свойства стабилизатора.

Диапазон изменения тока нагрузки позволяет установить пределы изменения тока нагрузки, при котором сохраняются точностные свойства стабилизатора.

Коэффициент полезного действия стабилизатора $\eta_{\text{ст}}$ — это отношение мощности, отдаваемой в нагрузку $P_{\text{н}}$, к мощности $P_{\text{пот}}$, потребляемой от первичного источника питания [2]:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{пот}}}. \quad (23)$$

Коэффициент стабилизации напряжения $K_{\text{ст}}$ — это отношение относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}} \cdot \Delta U_{\text{вых}}}. \quad (24)$$

Различают *интегральный* и *дифференциальный коэффициенты стабилизации*. Интегральный коэффициент определяет стабилизацию в заданном диапазоне изменения дестабилизирующего фактора (входного напряжения), дифференциальный — в бесконечно малом диапазоне изменения этой величины [8].

Коэффициент сглаживания (подавления) пульсаций $K_{\text{ст}}$ — это отношение амплитудного значения пульсаций входного напряжения к амплитудному значению пульсаций выходного напряжения:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}}. \quad (25)$$

Для некоторых стабилизаторов коэффициент сглаживания пульсаций примерно равен коэффициенту стабилизации напряжения.

Коэффициент неустойчивости по напряжению $K_{нU}$ — это отношение относительного изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению входного напряжения:

$$K_{нU} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \cdot \frac{1}{\Delta U_{\text{ВХ}}}, \left[\frac{\%}{\text{В}} \right]. \quad (26)$$

Коэффициент неустойчивости по току $K_{нI}$ — это отношение относительного изменения выходного напряжения к вызвавшему его относительному изменению тока нагрузки:

$$K_{нI} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \cdot \frac{I_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{н}}}. \quad (27)$$

«Быстродействие стабилизатора характеризует его способность быстро обрабатывать скачкообразные изменения входного напряжения или тока нагрузки. Обычно быстродействие стабилизатора определяют временем установления выходного напряжения при заданном скачкообразном изменении напряжения на входе или тока нагрузки» [2].

Параметрические стабилизаторы напряжения

«Параметрические стабилизаторы напряжения выполняют на специальных полупроводниковых диодах: стабилитронах и стабилиторах. Для стабилизации напряжения при помощи стабилитрона используют обратную ветвь вольт-амперной характеристики полупроводникового диода, а при помощи стабилитора — его прямую ветвь. В стабилитронах используется явление электрического лавинного пробоя. Для ограничения тока через стабилитрон последовательно с ним включают ограничительное (гасящее) сопротивление R_r . Схема однокаскадного параметрического стабилизатора напряжения приведена на рис. 30. Основными параметрами стабилитрона являются: номинальное напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$, его дифференциальное сопротивление $r_{\text{ст}}$ и температурный коэффициент напряжения (ТКН)» [2].

Работа стабилизатора происходит следующим образом. «Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ через сопротивление R_r подводится к параллельно включенным стабилитрону VD и сопротивлению нагрузки $R_{\text{н}}$. Поскольку напряжение на стабилитроне меняется незначительно, то же относится и к напряжению на нагрузке. Если входное

напряжение увеличивается, то практически все приращение $\Delta U_{\text{вх}}$ передается на сопротивление R_r , что приводит к увеличению тока в нем. Это увеличение тока происходит за счет увеличения тока стабилитрона при почти неизменном токе нагрузки» [2].

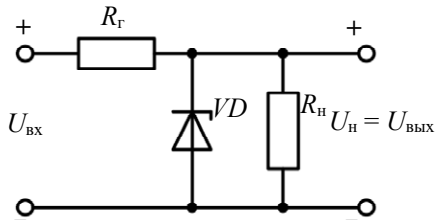


Рис. 30. Схема параметрического стабилизатора на стабилитроне

В случае снижения сопротивления нагрузки максимальный выходной ток не может превышать максимальный ток стабилизации стабилитрона. «Увеличить выходной ток, то есть повысить нагрузочную способность стабилизатора, можно с помощью транзистора, включенного по схеме с общим коллектором (рис. 31).

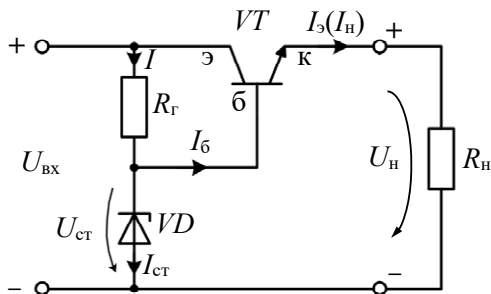


Рис. 31. Схема параметрического стабилизатора на стабилитроне

Элементы R_r и VD образуют обычный параметрический стабилизатор, нагрузкой которого является база транзистора VT . Транзистор в рассматриваемой схеме является усилителем тока нагрузки $I_с \approx \beta \cdot I_б$, где β – коэффициент передачи тока транзистора» [8].

«Учитывая, что падение напряжения на переходе база – эмиттер транзистора VT величина практически постоянная и относительно небольшая (до 0,5 В для германиевых и до 1 В для кремниевых тран-

зисторов), можно считать, что напряжение на нагрузке примерно равно напряжению стабилизации опорного диода VD » [8]:

$$U_H = U_{ст} - U_{б-э} \approx U_{ст}. \quad (28)$$

Стабилизатор (рис. 31) можно рассматривать и как *простейший компенсационный стабилизатор*, так как в нем реализуется отрицательная обратная связь по напряжению. Нетрудно заметить, что в качестве регулирующего элемента выступает транзистор, для управления которым необходимы малые напряжения (0,2...0,6 В), что позволяет обойтись без измерительного элемента и преобразующего устройства [8]. Введение в схему потенциометра, подключенного параллельно стабилитрону, позволяет плавно регулировать выходное напряжение.

К *недостаткам* трансформаторных источников питания относятся: низкий коэффициент полезного действия (от 25 до 60 %); большой вес и габариты, особенно при большой мощности; металлоемкость [2].

Импульсные источники питания появились благодаря достижениям в полупроводниковой технике. В импульсных блоках питания переменное входное напряжение сначала выпрямляется. Полученное постоянное напряжение преобразуется силовым ключом в прямоугольные импульсы повышенной частоты более 15 кГц, которые подаются на импульсный трансформатор (рис. 32).

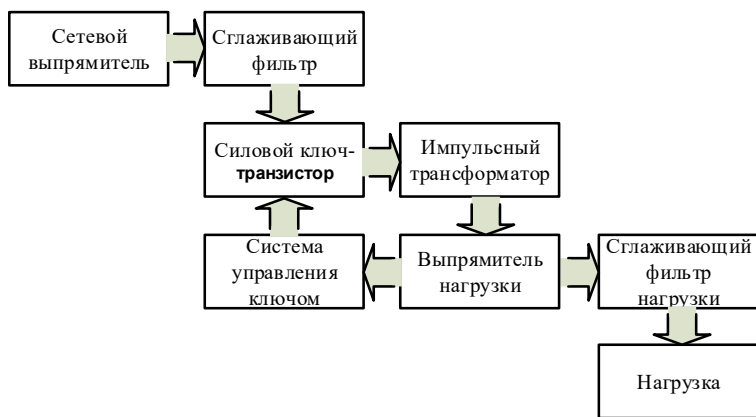


Рис. 32. Структурная схема импульсного источника питания

В импульсных источниках питания применяются малогабаритные трансформаторы. Это объясняется тем, что с ростом частоты повышается эффективность работы трансформатора и уменьшаются требования к габаритам (сечению) сердечника, необходимым для передачи эквивалентной мощности. В большинстве случаев такой сердечник может быть выполнен из ферритов. В отличие от сердечников низкочастотных трансформаторов, для которых используется электротехническая сталь.

Трансформаторные источники питания постепенно заменяются на импульсные благодаря большому числу их достоинств, к которым относятся:

- меньший вес;
- очень высокий КПД (вплоть до 98 %);
- меньшая стоимость за счет массовости выпуска продукции;
- надежность, сравнимая с надежностью трансформаторных источников питания;
- широкий диапазон входного питающего напряжения и частоты (110–240 В, 50/60 Гц);
- возможность коррекции коэффициента мощности;
- наличие встроенных цепей защиты от аварийных ситуаций внутренних цепей источника и нагрузки.

Источники питания вычислительной техники, оргтехники, бытовой электроники почти исключительно импульсные. Трансформаторные источники питания сохранились только для питания слаботочных плат управления бытовой электроники и техники: переносных магнитол, стиральных машин, микроволновых печей и отопительных котлов и колонок.

Выполнение работы

Задание. Исследовать линейный параметрический стабилизатор.

Порядок проведения эксперимента

Соберите исследуемую цепь согласно электрической схеме (рис. 33), используя необходимые мини-блоки из табл. 6. **(не ошибитесь с полярностью при подключении электролитического конденсатора)**

ра С!). Включите мультиметры: $PV1$ — для измерения входного напряжения (режим переменного напряжения), $PV2$ — для измерения напряжения на выходе выпрямителя (режим постоянного напряжения), $PV3$ — для измерения напряжения на выходе линейного стабилизатора (режим постоянного напряжения). Установите ползунок переменного резистора R_1 в такое положение, чтобы величина входного напряжения U_1 стабилизатора равнялась нулю. Изменяйте положение ползунка переменного резистора R_1 таким образом, чтобы напряжение U_1 менялось от 0 до 24 В с шагом 2 В. При этом измеряйте показания вольтметров $PV2$ и $PV3$ и записывайте их в табл. 6.

Рассчитайте соответствующие коэффициенты линейного стабилизатора в табл. 6.

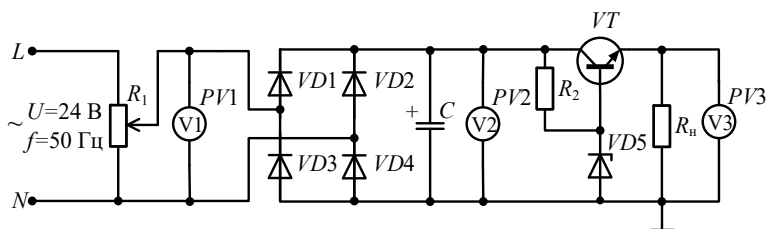


Рис. 33. Электрическая схема экспериментальной установки

Таблица 6

Экспериментальные и расчетные данные
параметрического стабилизатора

№ эксперимента	Измерено			Вычислено		
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$K_{\text{СТ}}$	$K_{\text{нУ}}$	η
1	0			—	—	—
2	2			—	—	—
3	4			—	—	—
4	6			—	—	—
5	8			—	—	—
6	10			—	—	—
7	12			—	—	—
8	14					

№ эксперимента	Измерено			Вычислено		
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$K_{\text{СТ}}$	$K_{\text{нУ}}$	η
9	16					
10	18					
11	20					
12	22					
13	24					

Мини-блоки: биполярный транзистор $VT - KT503Г$; стабилитрон $VD5 - 10 \text{ В}, 5 \text{ мА}$; резисторы: $R_1 - 1 \text{ кОм}, R_2 - 4,7 \text{ кОм}, R_H - 2,2 \text{ кОм}$; конденсатор $C - 470 \text{ мкФ}$.

Постройте графики зависимости напряжения на выходе выпрямителя от входного напряжения $U_2 = f(U_1)$ и напряжения на выходе линейного стабилизатора от входного напряжения $U_3 = f(U_1)$ в одном квадранте (рис. 34).

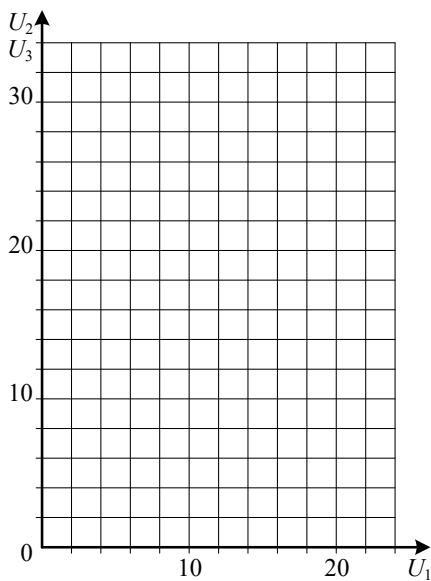


Рис. 34. Заготовка для графиков зависимостей $U_2 = f(U_1)$ и $U_3 = f(U_1)$

Содержание отчета

1. Титульный лист с наименованием работы.
2. Цель и программа работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Принципиальная схема лабораторной установки.
5. Описание хода работы.
6. Таблицы с экспериментальными данными, результаты обработки полученных данных.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называют стабилизаторами напряжения и тока? Где они находят применение в технике?
2. Свойства каких полупроводниковых приборов используют при построении стабилизированных источников питания? Какие параметры они имеют и как включаются в схему?
3. Какими причинами вызвано применение стабилизированных источников питания?
4. Как классифицируются стабилизаторы?
5. Назовите основные блоки в структурной схеме трансформаторного (классического) источника питания. Какие функции они выполняют?
6. Перечислите основные технические параметры стабилизаторов и их назначение.
7. Как найти коэффициент полезного действия стабилизаторов напряжения? Какое значение он принимает?
8. Как расшифровывается ТКН и в чем его физический смысл?
9. Из каких функциональных блоков строится стабилизатор тока?
10. В чем заключаются достоинства и недостатки трансформаторных источников питания?
11. Из каких функциональных блоков состоит импульсный источник питания? Какие функции они выполняют?
12. Где применяются импульсные блоки питания? В чем заключаются их достоинства?
13. Как классифицируются импульсные источники питания?

Лабораторная работа 4

Исследование управляемого однофазного выпрямителя

Цель работы — исследование принципа работы однофазного двухполупериодного тиристорного выпрямителя с системой импульсно-фазового управления и приобретение практических навыков измерения и вычисления основных его параметров и характеристик.

Программа работы

1. Исследование процессов в схемах управляемых однофазных выпрямителей с системой импульсно-фазового управления.
2. Исследование основных характеристик управляемых однофазных выпрямителей.
3. Приобретение навыков экспериментального исследования управляемых однофазных выпрямителей.

Краткие теоретические сведения

Управляемые выпрямители — это электронные устройства, которые кроме выпрямления переменного напряжения (тока) осуществляют управление этим напряжением в определенных пределах.

В промышленности часто требуется не только преобразовать переменное напряжение в постоянное, но и плавно изменять значение выпрямленного напряжения. Управлять (регулировать) выпрямленным напряжением можно как по цепи переменного напряжения, так и по цепи выпрямленного напряжения (тока).

Более экономичным и удобным способом управления, который получил широкое распространение, является управление выпрямленным напряжением (током) в процессе выпрямления.

Управляемые выпрямители выполняются по тем же схемам, что и неуправляемые выпрямители, и классифицируются по тем же признакам. Наиболее простым по конструкции и алгоритму управления является однофазный управляемый выпрямитель с системой импульсно-фазового управления.

«Системой импульсно-фазового управления (СИФУ) называется совокупность устройств и элементов, обеспечивающих заданную

последовательность выходных импульсов, начальную фазу которых можно регулировать. В преобразовательных устройствах находят широкое применение полууправляемые силовые полупроводниковые приборы (СПП) – тиристоры, симисторы, полностью управляемые СПП – запираемые тиристоры GTO, IGCT, а также транзисторы IGBT. Основной задачей СИФУ является преобразование аналогового сигнала в импульсные сигналы управления СПП по углу, регулирование среднего выпрямленного напряжения $U_{\text{тп}}$ тиристорного преобразователя (ТП) в зависимости от уровня, полярности напряжения управления U_{γ} [9].

По принципу действия и элементной базе СИФУ подразделяют на две группы:

1. *Электронные (полупроводниковые)*, построенные на серийных интегральных микросхемах аналогового (дискретного) и цифрового типа с малой степенью интеграции.

В зависимости от того, как вырабатываются управляющие импульсы для каждого тиристора ТП – одним электронным блоком или отдельными блоками, – такие системы управления подразделяются на *одно- и многоканальные*, а по способу изменения (смещения) фазы управляющего импульса СИФУ подразделяются на *горизонтальные и вертикальные*.

2. *Электромагнитные СИФУ* с использованием электромагнитных устройств, формирующих импульсы управления в момент перехода ферромагнитных материалов в насыщенное состояние. К таким системам можно отнести системы с пик-трансформаторами, пик-дресселями, импульсными насыщающимися трансформаторами, выполненными на базе сердечников из магнитного материала с резко выраженной нелинейностью – прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), однополупериодными магнитными усилителями. Такие СИФУ выпускались в 90-е годы XX столетия и используются до настоящего времени в структурах ТП технологического оборудования ряда промышленных объектов.

Требования, предъявляемые к СИФУ вентильного преобразователя, определяются типом вентиля, режимом работы (выпрямительный, инверторный, реверсивный, нереверсивный) и видом нагрузки [9].

Основные требования к СИФУ:

1. Управляющий импульс должен иметь достаточную для надежного отпирания вентиля амплитуду напряжения и тока (для тиристорov напряжение 10–20 В, ток 20–2000 мА).
2. Высокая крутизна фронта управляющих импульсов (до 10 В/мкс).
3. Широкий диапазон регулирования угла управления (от 15 до 165 эл. град).
4. Симметрия управляющих импульсов по фазам.

«В результате несимметрии управляющих импульсов тиристоры многофазного выпрямителя проводят ток в разное время, что обуславливает искажение формы кривых анодных токов и неравенство средних значений токов тиристорov. В кривых выпрямленного напряжения появляется переменная составляющая низкой частоты, что отрицательно влияет на работу потребителя. Кроме того, неравенство средних значений токов тиристорov приводит к тому, что в магнитной системе силового трансформатора появляются некомпенсированные магнитодвижущие силы» [6]. По этим причинам несимметрия управляющих импульсов не должна превышать 1,5–2,5 эл. град.

«Требование к длительности управляющих тиристорами импульсов зависит от схемы выпрямителя и характера нагрузки. С целью уменьшения мощности, выделяющейся в управляющем *p-n*-переходе тиристора, а также мощности системы управления целесообразно иметь более узкий управляющий импульс. Длительность этого импульса должна быть такой, чтобы за время его действия анодный ток тиристора достиг значения тока удержания. Очевидно, что скорость нарастания анодного тока будет зависеть от постоянной времени цепи нагрузки и от мгновенного напряжения на включаемых тиристорах. Наиболее неблагоприятные условия для запуска имеют место при работе выпрямителя на обмотку возбуждения электрических машин, представляющих активно-индуктивную нагрузку с большой постоянной времени» [6].

Временные диаграммы управляющих тиристорами импульсов в однофазной мостовой схеме показаны на рис. 35.

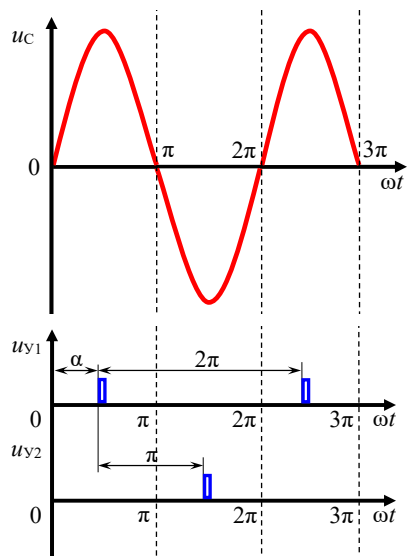


Рис. 35. Временные диаграммы управляющих импульсов на тиристорах в однофазной мостовой схеме

«Системы импульсно-фазового управления по способу синхронизации делятся на два основных класса — *синхронные* СИФУ и *асинхронные* СИФУ. При синхронном импульсно-фазовом управлении угол подачи управляемого импульса отсчитывают от определенной фазы напряжения сети, питающей выпрямитель. Синхронное управление в настоящее время является общепринятым и наиболее распространенным.

При *асинхронном* импульсно-фазовом управлении угол подачи управляющего импульса отсчитывают от момента подачи предыдущего импульса» [6].

В зависимости от способа получения сдвига управляющих импульсов различают системы, построенные по *горизонтальным* и *вертикальным* принципам управления.

«При *горизонтальном* принципе сдвиг управляющих импульсов осуществляется путем изменения фазы входного синхронизирующего сигнала, обычно синусоиды напряжения входной сети, а затем из него формируются прямоугольные импульсы. Горизонтальный принцип, вследствие присущих ему недостатков (зависимость

от формы и частоты питающего напряжения), не нашел широкого применения.

При *вертикальном* принципе управления напряжение управления сравнивается с опорным переменным напряжением (синусоидальным, пилообразным и так далее). В момент времени, когда эти напряжения становятся равными и их разность изменяет полярность, происходит формирование импульса. Фазу импульса можно регулировать, изменяя величину постоянного напряжения управления» [6].

Формирователи импульсов на управляющие электроды тиристоров могут быть сформированы различным образом:

- аналоговыми электронными элементами (аналоговые СИФУ);
- цифровыми электронными элементами (цифровые СИФУ).

Фазосдвигающее устройство и формирователь импульсов могут быть организованы на *однопереходном транзисторе*. Его применение значительно упрощает схемотехнические методы построения управляемых выпрямителей. Однопереходный транзистор широко применяли при проектировании электрических схем различных электронных устройств автоматики, особенно в 80–90-е годы прошлого столетия. Но и в наше время схемы, построенные на его основе, привлекают своей простотой, относительно низкой стоимостью и универсальностью.

Однопереходный транзистор изготавливают на основе монокристаллической пластины кремния *n*-типа с высоким значением удельного сопротивления, на боковой стороне которой находится один эмиттерный *p-n*-переход (рис. 36). На концах пластины *n*-типа и *p-n*-перехода расположены омические контакты Б1 (база 1), Б2 (база 2) и Э (эмиттер). Участки баз Б1 и Б2 имеют различную длину, где обычно длина $l_1 < l_2$. Из-за того что кристалл однопереходного транзистора разделен на две области базы, однопереходный транзистор имеет и другое широко распространенное название – двухбазовый диод.

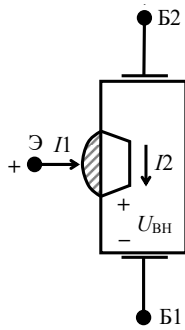


Рис. 36. Структура однопереходного транзистора

«Принцип действия транзистора основан на изменении объемного сопротивления полупроводника базы при инжекции.

В отличие от биполярных и полевых транзисторов однопереходный транзистор представляет собой прибор с отрицательным сопротивлением. Это означает, что в определенных условиях входное напряжение или сигнал могут уменьшаться даже при возрастании выходного тока через нагрузку. Когда однопереходный транзистор находится во включенном состоянии, выключить его можно, только разомкнув цепь либо сняв входное напряжение» [9].

«Участок между базами Б1 и Б2 образован кремниевой пластиной n -типа, имеет омическое сопротивление в несколько кОм и линейную вольт-амперную характеристику. При отсутствии напряжения на эмиттере (относительно Б1) за счет проходящего I_2 в базе 1 внутри кристалла создается падение напряжения $U_{вн}$, запирающее p - n -переход. При подаче на вход небольшого напряжения $U_{вх} \leq U_{вн}$ величина тока, проходящего через переход, почти не изменяется. При $U_{вх} > U_{вн}$ переход смещается в прямом направлении и начинается инжекция носителей заряда (дырок) в базы, приводящая к снижению их сопротивления. При этом уменьшается падение напряжения $U_{вн}$, что приводит к лавинообразному отпираанию перехода — участок II на вольт-амперной характеристике (рис. 37)» [9].

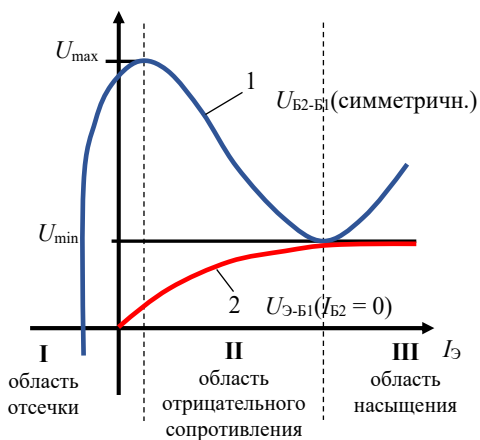


Рис. 37. Вид ВАХ однопереходного транзистора

«Участок III, справа от минимума, где эмиттерный ток ограничивается только сопротивлением насыщения, называется областью насыщения. При уменьшении эмиттерного напряжения до $U_{\text{вх}} < U_{\text{вн}}$ переход закрывается. При нулевом токе базы 2 (т. е. вывод Б2 не используется) характеристика (кривая 2) представляет собой по существу характеристику обычного кремниевого диода» [9].

Наибольшее применение однопереходные транзисторы нашли в различных регуляторах мощности. Коэффициент полезного действия таких регуляторов не менее 98 %. Рассмотрим подробно работу подобного регулятора (рис. 38).

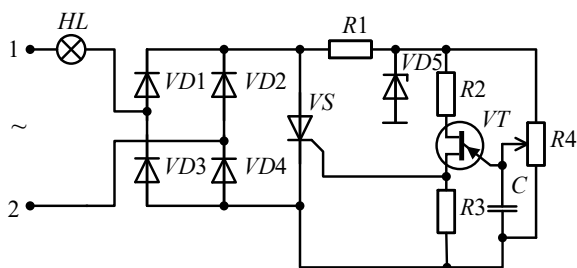


Рис. 38. Схема регулятора мощности на тиристоре

Регулирующий элемент устройства – тиристор VS включен последовательно с нагрузкой HL через диодный мост, образованный на выпрямительных диодах $VD1 - VD4$. Изменение мощности, потребляемой нагрузкой, достигается изменением угла открывания тиристора VS .

Узел, обеспечивающий изменение угла открывания тиристора, выполнен на однопереходном транзисторе VT . Конденсатор C , соединенный с эмиттером транзистора, заряжается через резистор $R4$. Как только напряжение на обкладках конденсатора достигает определенного значения, однопереходный транзистор открывается и через резистор $R2$ проходит короткий импульс тока, который подается на управляющий электрод тиристора VS . Импульс тока открывает тиристор VS , и тем самым образуется путь для прохождения тока в силовой части цепи: точка питающего напряжения 1 – лампа HL – выпрямительный диод $VD1$ – анод и катод тиристора VS – выпрямительный диод $VD4$ – точка питающего напряжения 2.

Показан путь прохождения тока, когда потенциал точки 1 выше потенциала точки 2, т. е. при положительной полуволне переменного напряжения U_{12} . Когда переменное напряжение U_{12} проходит через ноль, тиристор VS выключается и процесс повторяется, но уже при отрицательной полуволне этого напряжения. Так, при отрицательной полуволне переменного напряжения U_{12} в цепи тока участвуют выпрямительные диоды $VD2$ и $VD3$.

Изменяя сопротивление резистора $R4$, можно регулировать скорость зарядки конденсатора C и, следовательно, угол открывания α тиристора VS (рис. 38) и среднюю мощность в нагрузке HL .

Узел регулирования угла открывания тиристора питается от двухполупериодного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме ($VD1 - VD4$). Напряжение на однопереходном транзисторе ограничено стабилитроном $VD5$. Конденсатор фильтра здесь отсутствует – в нем нет необходимости [9].

«Рассмотренный регулятор мощности можно использовать также совместно с маломощными электропечами, лампами накаливания и другими активными нагрузками. Описанному тиристорному регулятору мощности присущи следующие недостатки:

- при изменении температуры в корпусе регулятора (а она будет в процессе работы увеличиваться из-за нагрева тиристорov) будет изменяться емкость конденсатора C . Это приведет к изменению угла открывания тиристора, а также к изменению мощности в нагрузке. Чтобы в какой-то степени устранить этот недостаток, необходимо применять конденсатор C с небольшими значениями температурного коэффициента емкости (ТКЕ)» [9];

- «тиристорный регулятор СИФУ наводит высокий уровень помех в питающей сети. Эти помехи возникают в моменты скачкообразного включения тиристора. Коммутационные помехи не только распространяются через сеть, вызывая неустойчивую работу различных приборов (электронных часов, вычислительных машин и пр.), но и мешают нормальной работе некоторых устройств, гальванически не связанных с сетью (так, в радиоприемнике, находящемся недалеко от тиристорных регуляторов, слышен треск помех)» [9].

Выполнение работы

Задание. Исследовать тиристорный регулятор мощности с импульсно-фазовым управлением.

Порядок проведения эксперимента

Соберите исследуемую схему тиристорного регулятора мощности согласно рис. 38, используя необходимые мини-блоки из табл. 7. Подключите собранную схему к междуфазному напряжению трехфазного источника $U_{\Phi} = 7 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$, например, используя линейное напряжение U_{AB} . Для контроля потребляемой мощности нагрузкой подключите блок «ваттметр» (рис. 39).

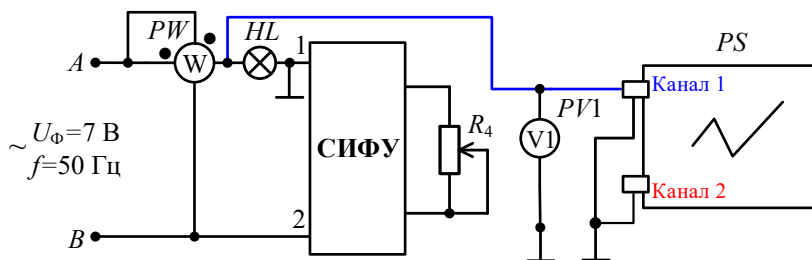


Рис. 39. Схема регулятора мощности на тиристоре

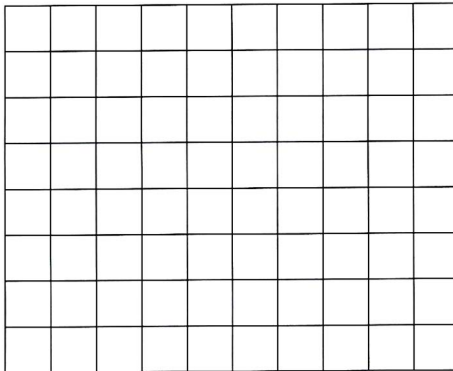
Включите мультиметр $PV1$ для измерения напряжения на нагрузке (режим переменного напряжения). Установите ползунок переменного резистора $R4$ в такое положение, чтобы величина напряжения на нагрузке была близка к максимальному значению. Включите осциллограф PS и получите форму кривой напряжения на нагрузке. Изменяйте положение ползунка переменного резистора $R4$ таким образом, чтобы угол открывания тиристора равнялся значению, указанному в табл. 7. В каждом случае измеряйте показания вольтметра $PV1$ и активной мощности PW , а также зарисовывайте получившуюся осциллограмму напряжения (рис. 40).

Экспериментальные данные тиристорного регулятора мощности

Измерено			
№ эксперимента	$\alpha, ^\circ$	$U_1, \text{В}$	$P, \text{Вт}$
1	22		
2	45		
3	90		
4	135		
5	170		

Мини-блоки: тиристор $VS - KY101E$; однопереходный транзистор $VT - KT117Г$; стабилитрон $VD5 - 10 \text{ В}, 5 \text{ мА}$; резисторы: $R1 - 2,2 \text{ кОм}$, $R2 - 1 \text{ кОм}$, $R3 - 470 \text{ Ом}$, $R4 - 10 \text{ кОм}$; конденсатор $C - 0,47 \text{ мкФ}$

Постройте график зависимости напряжения на нагрузке от угла открывания тиристора $U_1 = f(\alpha)$.

**Масштабы**

По каналу I:
 $m_U = \dots \text{В/дел.}$

По каналу II:
 $m_U = \dots \text{В/дел.}$

По времени:
 $m_t = \dots \text{мс/дел.}$

Рис. 40. Заготовка для временных диаграмм

Содержание отчета

1. Титульный лист с наименованием работы.
2. Цель и программа работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Принципиальная схема лабораторной установки.
5. Описание хода работы.

6. Таблицы с экспериментальными данными, результаты обработки полученных данных.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего применяют управляемые выпрямители? Какие функции они выполняют?
2. Какие силовые полупроводниковые приборы находят применение в преобразовательных устройствах? Назовите особенности их структуры и параметры.
3. Приведите классификацию систем импульсно-фазового управления. Кратко охарактеризуйте каждую систему.
4. Какие особенности имеет система импульсно-фазового управления на тиристорах?
5. Назовите назначение системы импульсно-фазового управления.
6. Назовите основные элементы аналоговой СИФУ. Поясните назначение этих элементов.
7. В чем отличие многоканальных СИФУ от одноканальных? Сравните эти типы СИФУ, анализируя их достоинства и недостатки.
8. В чем отличие между синхронной СИФУ и асинхронной?
9. Какие требования предъявляются к управляющим импульсам тиристоров? Как определить минимальную длительность импульса управления?
10. В чем отличие СИФУ вертикального действия от СИФУ интегрирующего действия?
11. При заданном напряжении питания изобразите на временной диаграмме сигналы на выходах устройства синхронизации и генератора пилообразного напряжения.
12. При заданном напряжении питания изобразите на временной диаграмме сигналы на выходах устройства синхронизации и фазосдвигающего устройства при заданном угле управления.
13. Поясните принцип работы фазосдвигающего устройства СИФУ вертикального действия.
14. Поясните принцип работы фазосдвигающего устройства СИФУ интегрирующего действия.

Рекомендуемая литература

1. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника : от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – 2-е изд. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2019. – 416 с. – (Библиотека инженера). – ISBN 978-5-91359-148-7.
2. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника : профессиональные решения / Б. Ю. Семенов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2019. – 414 с. – (Компоненты и технологии). – ISBN 978-5-91359-224-8.
3. Ладенко, Н. В. Выпрямительные устройства в силовой электронике : учеб. пособие / Н. В. Ладенко. – Москва [и др.] : Инфра-Инженерия, 2019. – 165 с. – URL: znanium.com/catalog/product/1167701 (дата обращения: 28.09.2022). – ISBN 978-5-9729-0382-5.
4. Онищенко, Г. Б. Силовая электроника : Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения : учеб. пособие / Г. Б. Онищенко, О. М. Соснин. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 120, [1] с. – (Высшее образование – Бакалавриат). – URL: znanium.com/catalog/product/1044516 (дата обращения: 28.09.2022). – ISBN 978-5-16-103201-5.
5. Розанов, Ю. К. Силовая электроника : учебник / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. – 631, [1] с. – ISBN 978-5-383-01023-5.

Библиографический список

1. Лабораторный практикум по курсу «Электротехника и электроника» : учеб. пособие для студентов вузов / А. Б. Воронов, М. А. Сухова, Е. М. Мигунова, Д. В. Поплавская ; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». — Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. — 238 с. — URL: e.lanbook.com/book/75749 (дата обращения: 20.11.2020). — ISBN 978-5-7262-1596-9.
2. Параскевов, А. В. Микроэлектроника и схемотехника : учеб. пособие / А. В. Параскевов, А. В. Чемарина ; под общ. ред. В. И. Лойко. — Краснодар : Экоинвест, 2018. — 125, [1] с. — ISBN 978-5-94215-431-8.
3. Рекус, Г. Г. Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие / Г. Г. Рекус, В. Н. Чесноков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Директ-Медиа, 2014. — 256 с. — URL: www.directmedia.ru/book-236120-laboratornyiy-praktikum-po-elektrotehnike-i-osnovam/ (дата обращения: 28.09.2022). — ISBN 978-5-4458-9343-1.
4. Теория электрических цепей : учеб.-метод. пособие / Е. И. Алгазин, О. Б. Давыденко, Е. Г. Касаткина [и др.]. — 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 244, [1] с. — URL: e.lanbook.com/book/152136 (дата обращения: 20.11.2020). — ISBN 978-5-7782-4099-5.
5. Колесник, А. Г. Исследование стабилизированного источника питания / А. Г. Колесник, Н. А. Воронина // Энергетика, электро-механика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : III российская молодежная научная школа-конференция / Национальный исследовательский Томский политехнический университет ; редкол.: Е. П. Богданов, Т. В. Усачева. — Томск, 2015. — С. 164–168.
6. Зайцев, А. И. Силовая промышленная электроника. Учебное пособие. Часть 2 / А. И. Зайцев, А. С. Плехов. — Воронеж : Научная книга, 2007. — 124 с. — (Открытое образование).
7. Ермуратский, П. В. Электротехника и электроника : учебник / П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин. — Москва : ДМК Пресс, 2011. — 416 с. — ISBN 978-5-94074-688-1.

8. Аникин, А. С. Электропитание космических аппаратов : учеб. пособие / А. С. Аникин. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 177 с. — URL: e.lanbook.com/book/110343 (дата обращения: 28.09.2022).
9. Электропреобразовательные устройства : лабораторный практикум / А. В. Матвеев, И. С. Минченко, А. В. Митрофанов [и др.] ; под ред. А. В. Митрофанова ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ». — Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. — 96 с. — ISBN 5-7629-0478-4.
10. Краткие методические указания по курсу «Основы электроники и схемотехники» : Исследование однофазных выпрямителей / Новосибирский государственный технический университет // Опытные приборы : [сайт]. — URL: www.opprrib.ru/main/labor/pdf/metodika/oe/060101.pdf (дата обращения: 25.10.2022).
11. Информационно-измерительная техника и электроника. Полупроводниковые приборы и устройства : практикум по выполнению лабораторных работ для студентов направления 14020 «Электроэнергетика» специальности 140211 «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / Тольяттинский государственный университет // МегаЛекции : сайт. URL: megalektsii.ru/s5545t7.html (дата обращения: 25.10.2022).

Пример оформления титульного листа

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование кафедры/департамента/центра полностью)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

Отчет по лабораторной работе 1

Исследование однофазных неуправляемых полупроводниковых
выпрямителей и сглаживающих фильтров
по учебному курсу «Преобразовательные установки систем
электроснабжения»

Обучающегося: Иванова А.В.

Группа: ЭЭТб-2001а

Преподаватель: Петров Д.А.

Тольятти, 2022

Содержание

Введение	3
Описание лабораторного стенда	8
Лабораторная работа 1. Исследование однофазных неуправляемых полупроводниковых выпрямителей и сглаживающих фильтров	14
Лабораторная работа 2. Исследование трехфазных неуправляемых полупроводниковых выпрямителей и сглаживающих фильтров	29
Лабораторная работа 3. Исследование трансформаторного стабилизированного источника питания	38
Лабораторная работа 4. Исследование управляемого однофазного выпрямителя	51
Библиографический список	63
Приложение	65

Учебное издание

Шлыков Сергей Викторович

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Лабораторный практикум

Редактор *Е.В. Пилясова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

*При оформлении пособия использована иллюстрация от Freepik
на сайте ru.freepik.com*

Подписано в печать 2+.0+.2021 . Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 3,89.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-36-21.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru