

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра электротехники и
электрооборудования судов

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Методические указания
к лабораторным работам

Ленинград
1989

Методические указания составлены в соответствии с программой курса "Электротехника и основы электроники" для студентов всех специальностей дневного, вечернего и заочного факультетов Ленинградского кораблестроительного института. Для стимулирования самостоятельной работы предлагаются расчетные задания, которые необходимо выполнять перед каждой лабораторной работой. Результаты расчета сравниваются с результатами эксперимента.

АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Евгений Николаевич

ВОРШЕВСКИЙ

Александр Алексеевич

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Методические указания
к лабораторным работам

С ИздЛКИ,
1989

Ответственный редактор
канд. техн. наук, доц. А. П. Сеньков
Литературный редактор Т. Б. Симоненко

Зак. Р-42. Тпр. 1000. Уч.-изд. л. 1,5. 29.03.1989.
Тип. ЛКИ, Лопманская, 10.

Бесплатно.

Лабораторная работа I ОДНОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Цель работы

1. Расчет и экспериментальное определение основных характеристик однофазных полупроводниковых выпрямителей.
2. Приобретение практических навыков работы со схемами управляемых и неуправляемых выпрямителей.

Назначение и принцип действия

На судах электрическая энергия вырабатывается и передается потребителям главным образом в виде переменного тока частотой 50 Гц. Однако часть потребителей электрической энергии может работать только на постоянном токе (электродвигатели постоянного тока, радиотехническая аппаратура, обмотки возбуждения электрических машин и т.д.). Для преобразования переменного тока в постоянный применяются выпрямители. В настоящее время для выпрямления переменного тока в основном используются статические выпрямители, выполненные на полупроводниковых диодах и тиристорах.

На рис. I.1 приведены принципиальные электрические схемы

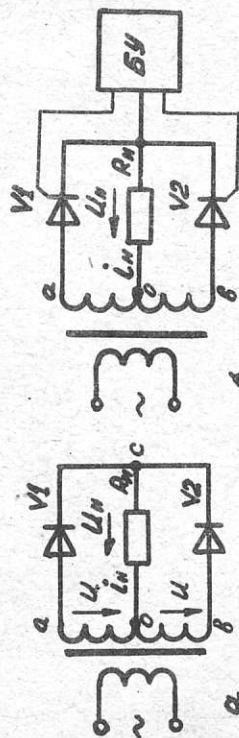


Рис. I.1. Принципиальные электрические схемы однофазных выпрямителей: а - неуправляемого; б - управляемого

однофазных двухполупериодных выпрямителей. Схемы содержат трансформатор, вентили V1 и V2, а также в случае управляемого выпрямителя блок управления вентилями. Нагрузка включается между катодами вентилей (точка С) и средней точкой обмотки 0 и может быть как активной R_H , так и активно-индуктивной R_H, L_H .

Принцип действия выпрямителей основан на свойстве вентилей пропускать электрический ток однонаправленно. Когда напряжение u на обмотке положительно (см. рис. I.1 и I.2, а) к

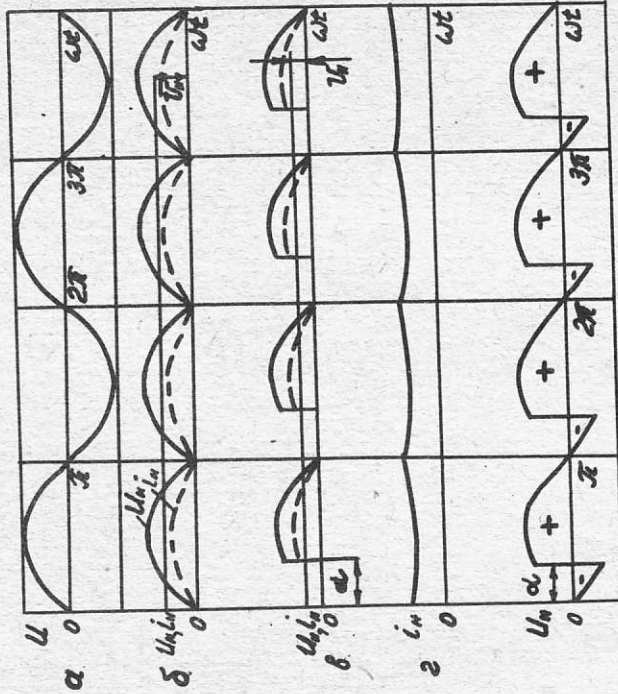


Рис. I.2. Эпюры напряжений и токов, поясняющие принцип действия выпрямителей: а - напряжение на обмотке трансформатора; б - ток и напряжение на нагрузке управляемого выпрямителя (активная нагрузка); в - ток и напряжение на нагрузке управляемого выпрямителя (активная нагрузка); г - то же при активно-индуктивной нагрузке

аноду вентиля V1 приложено положительное напряжение и через него проходит ток нагрузки по цепи $ac0$. Вентиль V2 при этом закрыт, так как к нему приложено запирающее напряжение.

В следующем полупериоде полярность напряжения изменится на противоположную и ток нагрузки пройдет по цепи $bc0$ через вентиль V2, а вентиль V1 закрыт. Таким образом, через нагрузку проходит ток одного направления (см. рис. I.2, б) т.е. схема на рис. I.1 позволяет выпрямить переменное напряжение.

Среднее значение выпрямленного напряжения U_H определяется из выражения

$$U_H = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi}, \quad (I.1)$$

где $U_m = \sqrt{2} U$ - амплитудное значение переменного напряжения U .

Управляемый выпрямитель позволяет наряду с выпрямлением осуществлять также регулирование среднего значения выпрямленного напряжения. Напряжение U_H регулируется путем изменения угла управления (включения) α тиристоров, т.е. путем изменения выраженной в угловой мере величины временной задержки включения тиристоров (см. рис. I.2, в). Блок управления обеспечивает включение тиристоров с заданным углом α путем подачи на управляющие электроды тиристоров управляющих импульсов с заданной временной задержкой. Изменение угла приводит к изменению площади под кривой выпрямленного напряжения, т.е. к изменению его среднего значения U_H (см. рис. I.2 и I.3).

Для случая чисто активной нагрузки R_H величина среднего значения напряжения следующим образом зависит от угла управления

$$U_H = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (I.2)$$

и может меняться от $\frac{2U_m}{\pi}$ до 0 при изменении α в пределах $0 - \pi$.

При активно-индуктивной нагрузке R_H, L_H ток в нагрузке будет нарастать постепенно из-за наличия индуктивности L_H и не совпадает по форме с напряжением U_H (см. рис. I.2, г). При $U < 0$ ток будет продолжаться протекать через тиристор V1 за счет энергии, запасенной в индуктивности, и уменьшится до нуля лишь при включении тиристора V2 (ток в нагрузке при

этом может не равняться нулю). Среднее значение выпрямленного напряжения определяется разностью положительных и отрицательных площадей усеченных синусоид и в случае $\omega L_N \gg R_N$ рассчитывается по формуле

$$U_N = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha. \quad (1.3)$$

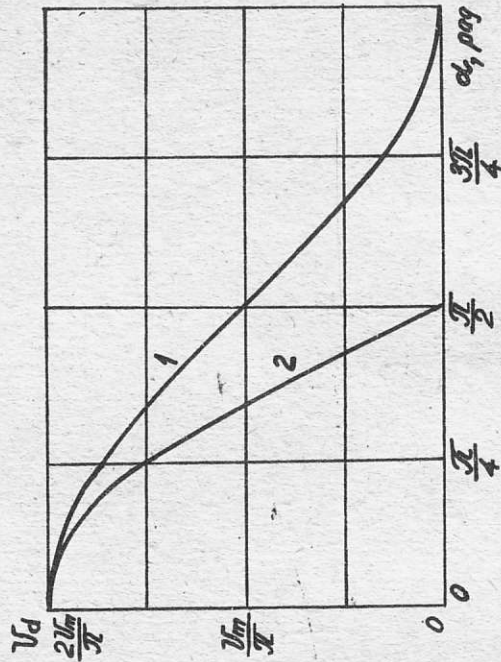


Рис. 1.3. Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла управления: 1 — для активной нагрузки; 2 — для активно-индуктивной нагрузки

Расчетно-графическое задание

1. Построить в масштабе графики изменения во времени мгновенного значения напряжения на активной нагрузке управляемого выпрямителя для углов управления $\alpha = 30^\circ, 150^\circ$ (действующее значение переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора $U = 20$ В).
2. Рассчитать и построить графики зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от угла α в пределах от 0 до 180° для случаев активной и активно-индуктивной нагрузки и действующего значения переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора 20 В, используя формулы (1.2), (1.3).

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка содержит неуправляемый (диодный) и управляемый (тиристорный) выпрямители, выполненные по однофазной двухполупериодной схеме. Все элементы, кроме индуктивности L_N , постоянно подключены к клеммам лабораторной установки и расположены за ее лицевой панелью. Резистор R_N является активной нагрузкой выпрямителей. Резистор $R_0 \ll R_N$ предназначен для получения на экране осциллографа тока нагрузки и не оказывает существенного влияния на работу выпрямителя. Для выполнения работы требуются осциллограф, вольтметр переменного тока, вольтметр постоянного тока и катушка индуктивности, используемая в качестве активно-индуктивной нагрузки.

Порядок выполнения работы

1. Исследование неуправляемого (диодного) выпрямителя.

1.1. Подключить активную нагрузку, соединив гнезда Г4, Г5. Корпус осциллографа соединить с клеммой Г2, вход осциллографа У1 подключить к гнезду Г1 (переменное напряжение U), вход У2 к гнезду Г5 (выпрямленное напряжение U_N).

1.2. Подать питание 36 В на клеммы "Вход". Измерить действующее значение напряжения U на вторичной обмотке трансформатора (гнезда Г1, Г2) вольтметром переменного тока. Изменяя входное напряжение, установить на вторичной обмотке напряжение, равное 20 В. Измерить среднее значение выпрямленного напряжения U_N (гнезда Г3, Г5) вольтметром постоянного тока. Занести результат измерения в табл. 1.1.

1.3. Получить осциллограммы напряжений U и U_N , скопировать полученные кривые на кальку, обозначив горизонтальные и вертикальные масштабы и нанести на кальку оси, соответствующие $U=0, U_N=0$.

Переключить вход осциллографа У1 на гнездо Г3 (ток нагрузки I_N). Получить осциллограммы напряжения U_N и тока I_N , скопировать полученные кривые на кальку, обозначив масштабы и нанести оси, соответствующие $U_N=0, I_N=0$.

1.4. Выключить питание. Отсоединить активную нагрузку, подключить активно-индуктивную нагрузку (катушку индуктивности 3600 витков) к гнездам Г3, Г5. Повторить пп. 1.2 и 1.3.

Таблица I.1
Определение среднего значения выпрямленного напряжения

Режим работы выпрямителя	Эксперимент		Расчет
	$U_H, В$		$\delta U_H, \%$
Активная нагрузка	$\alpha = 0$ неуправл.		
	$\alpha_I =$		
	$\alpha_{II} =$		
	$\alpha_{III} =$		
Активно-индук- тивная нагрузка	$\alpha = 0$ неуправл.		
	$\alpha_I =$		
	$\alpha_{II} =$		
	α_{III}		

2. Исследование управляемого (тиристорного) выпрямителя.
 - 2.1. Подключить активную нагрузку, соединив гнезда Г4, Г5. Корпус осциллографа соединить с клеммой Г2, вход осциллографа У1 подключить к гнезду Г1 (переменное напряжение U_H), вход У2 - к гнезду Г5 (выпрямленное напряжение U_H). Измерить действующее значение напряжения U на вторичной обмотке трансформатора (гнезда Г1, Г2) вольтметром переменного тока. Изменить входное напряжение, установить на вторичной обмотке трансформатора напряжение, равное 20 В.
 - 2.3. Установить переключатель генератора управляющих импульсов в положение I. Измерить среднее значение выпрямленного напряжения U_H (гнезда Г3, Г5) вольтметром постоянного тока. Скопировать на кальку осциллограммы напряжений U и U_H . Повторить измерение среднего значения выпрямленного напряжения и осциллографирование напряжений для положений переключателя II и III. Результаты измерений занести в табл. I.1.
 - 2.4. Выключить питание 36 В. Отсоединить активную нагрузку. Подключить активно-индуктивную нагрузку (катушка

индуктивности 3600 витков) к гнездам Г3, Г5. Включить питание 36 В и повторить п.2.3.

2.5. Переключить вход осциллографа У1 на гнездо Г3 (ток нагрузки i_H). Скопировать на кальку осциллограммы напряжения U_H и тока i_H для II положения переключателя, обозначив масштабы и нанеся оси, соответствующие $U_H = 0, i_H = 0$.

3. Обработка результатов экспериментов.

По полученным осциллограммам найти значения углов управления $\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III}$ для случаев активной и активно-индуктивной нагрузки. По рассчитанным графикам зависимости $U_H(\alpha)$ определить соответствующие углам $\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III}$ значения выпрямленного напряжения. Вычислить величины погрешности по формуле

$$\delta U_H = \frac{U_{H \text{ расч}} - U_{H \text{ эксп}}}{U_{H \text{ расч}}} \cdot 100\%$$

Результаты занести в табл. I.1.

Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки.
2. Расчетные формулы.
3. Результаты расчетов и экспериментов, сведенные в табл. I.1.
4. Графики зависимости $U_H(\alpha)$ для активной и активно-индуктивной нагрузки, рассчитанные теоретически, с нанесенными на них экспериментально полученными точками.
5. Осциллограммы токов и напряжений, полученные на лабораторном стенде и оформленные в виде графиков по образцу рис. I.2.

Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения выпрямителей.
2. Назначение элементов выпрямителей и их работа.
3. Основное преимущество управляемого выпрямителя по сравнению с неуправляемым.
4. Пределы изменения угла регулирования двухполупери-

одного выпрямителя при активной и активно-индуктивной нагрузках.

5. Объяснить зависимость $U_n(\alpha)$, исходя из принципа действия выпрямителя.

6. Особенности работы выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.

7. Нарисовать и объяснить кривую изменения напряжения на вентиле выпрямителя при активной нагрузке.

Лабораторная работа 2

ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Цель работы

Изучение принципа действия, режимов работы и снятие характеристик трехфазной мостовой схемы выпрямителя.

Назначение и принцип действия

Трехфазные мостовые выпрямители широко применяются в промышленности и на судах, так как имеют малые пульсации выпрямленного напряжения и характеризуются хорошим использованием вентилей и трансформатора. Частота пульсаций выходного напряжения в 6 раз превышает частоту переменного тока в сети, т.е. мостовая схема является шестипульсной. На основе этих схем могут быть построены выпрямители и с большим числом фаз выпрямления на мощности до десятков мегаватт.

В лабораторной работе исследуется трехфазная несимметричная (полууправляемая) схема мостового выпрямителя (рис.2.1), которая содержит 3 диода и 3 тиристора, включаемые с помощью блока управления с заданным углом управления α . Нулевой диод V0 улучшает сглаживание выпрямленного тока при активно-индуктивной нагрузке. Данная схема по сравнению с полностоуправляемой схемой (6 тиристор) требует меньших затрат на вентили и систему управления, имеет более высокий коэффициент мощности, однако обладает большими пульсациями выпрямленного напряжения. Для $\alpha = 0$ мгновенное значение вы-

прямого напряжения U_n равно наибольшему по модулю линейному напряжению, так как в любой момент времени проводят ток вентили, к которым приложено наибольшее прямое напряжение (пунктир на рис.2.2).

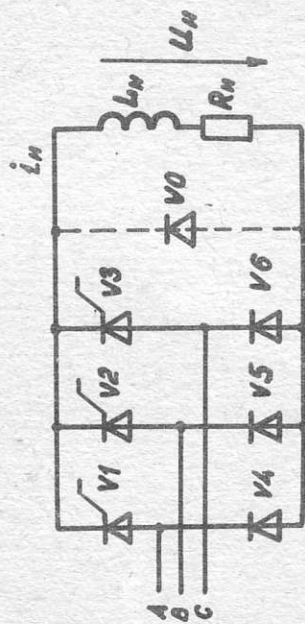


Рис.2.1. Трехфазная мостовая полууправляемая схема выпрямителя

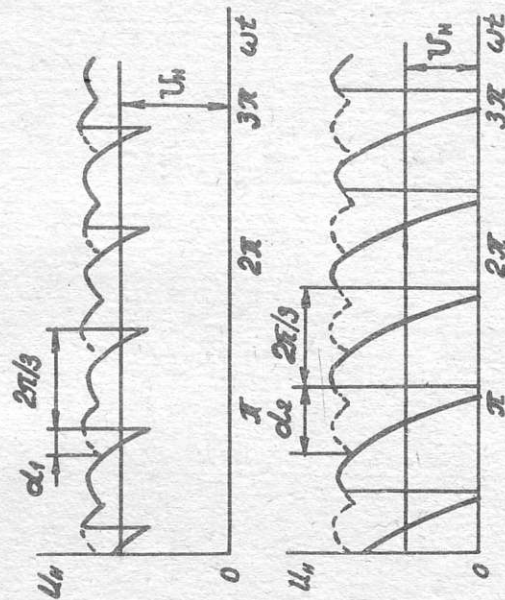


Рис.2.2. Кривые выпрямленного напряжения. Пунктиром показаны кривые для $\alpha = 0$

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется выражением

$$U_{н.ср} = \frac{3}{\pi} U_{н.м} = 1,35 U_{н.м},$$

где $U_{н.м}$ и $U_{н.ср}$ — соответственно амплитудное и действующее значения линейного напряжения в питающей сети. При увеличении угла управления (см. рис. 2.2) уменьшается среднее значение выпрямленного напряжения $U_{н}$ в соответствии с выражением

$$U_{н} = U_{н.0} (1 + \cos \alpha) / 2.$$

При $\alpha < 60^\circ$ выпрямленное напряжение непрерывно, а при $\alpha > 60^\circ$ приобретает прерывистый характер. Регулируя α от 0 до 180° , можно изменять $U_{н}$ от $1,35 U_{н.0}$ до нуля. Среднее значение выпрямленного тока определяется как

$$I_{н} = U_{н} / R_{н}.$$

Среднее и максимальное значение тока через один вентиль равны (при $\alpha = 0$) $I_{н.ср} = I_{н} / 3$, $I_{н.м} = I_{н}$, обратное напряжение на вентиле равно линейному.

Расчетно-графическое задание

1. Рассчитать и построить в масштабе график зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от угла управления α для линейного напряжения питания, равного 36 В. Подготовить таблицы для снятия регулировочной и внешней характеристик.

2. Построить в масштабе график изменения мгновенного значения выпрямленного напряжения во времени для угла управления $\alpha = 90^\circ$ и активно-индуктивной нагрузки.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя трехфазный полупроводниковый мостовой выпрямитель с блоком управления. Все элементы подключены к клеммам лабораторной установки и расположены за ее лицевой панелью. Резистор $R_0 = 10 \text{ Ом}$ включается последовательно с нагрузкой и необходим для осциллогра-

фирования кривой тока. Нагрузка выпрямителя набирается из внешних элементов: катушек индуктивности, переменных резисторов, конденсаторов. Для выполнения работы требуется двухлучевой осциллограф, вольтметр постоянного и переменного тока, амперметр постоянного тока.

Порядок выполнения работы

1. Исследовать работу выпрямителя при регулировании напряжения на активной нагрузке.

1.1. Подключить переменный резистор $R_{н} = 100 \text{ Ом}$ к выходу выпрямителя через амперметр постоянного тока.

1.2. Подключить двухлучевой осциллограф для наблюдения выпрямленного напряжения и тока.

1.3. Подать трехфазное питание с линейным напряжением 36 В на вход выпрямителя. Вольтметром переменного тока уточнить значение линейного напряжения.

1.4. Установить ручкой "Угол управления" минимальный угол. Получить и скопировать осциллограммы выпрямленного напряжения и тока. Определить из осциллограммы угол управления. Измерить среднее значение выпрямленного напряжения и тока с помощью вольтметра и амперметра постоянного тока. Измерить пульсации напряжения.

1.5. Снять зависимость среднего значения выпрямленного напряжения и тока от угла управления. Результаты измерений занести в подготовленную таблицу. Построить график зависимости $U_{н}(\alpha)$. Скопировать осциллограммы тока и напряжения для 2-3 различных значений угла управления.

1.6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя, изменяя сопротивление резистора активной нагрузки. Результаты изменений среднего значения выпрямленного напряжения и тока для фиксированного значения α занести в подготовленную таблицу. Построить график зависимости $U_{н}(I_{н})$.

2. Исследовать работу выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.

2.1. Подключить к выходу выпрямителя катушку индуктивности (3600 витков) через амперметр постоянного тока.

2.2. Повторить пп. 1.4 и 1.5. Убедиться в сглаживании формы тока при работе на нагрузку с индуктивностью.

3. Исследовать работу выпрямителя на активно-емкостную нагрузку.

3.1. Подключить к выходу выпрямителя параллельно соединенные конденсатор и резистор. Снять осциллограммы напряжения и тока для нескольких значений угла управления. Убедиться в сглаживании выходного напряжения конденсатором.

4. Исследовать искажение сетевого напряжения при работе тиристорного выпрямителя.

4.1. Снять осциллограммы линейных и фазных напряжений в сети при работе выпрямителя с различными значениями угла управления. Определить амплитуду, длительность фронта и общую длительность импульсов, наложенных на кривые напряжений. Определить максимальное значение амплитуды импульсов и режим работы выпрямителя, при котором они достигаются.

5. Сравнить данные измерений и расчетов. Рассчитать погрешность. Объяснить полученные результаты.

Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки.
2. Расчетные формулы.
3. Результаты расчетов и экспериментов.
4. Графики зависимости $U_H(\alpha)$, $U_H(I_H)$, рассчитанные и определенные экспериментально. Характерные осциллограммы токов и напряжений для исследованных режимов работы.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Сравнить трехфазные и однофазные выпрямители.
2. Принцип действия мостового трехфазного выпрямителя.
3. Объяснить вид зависимости $U_H(\alpha)$, $U_H(I_H)$.
4. Сравнить режимы работы выпрямителя на активную, активно-индуктивную и активно-емкостную нагрузки.

Лабораторная работа 3 АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

Цель работы

1. Расчет и экспериментальное изучение электромагнитных процессов в силовых схемах инверторов.
2. Приобретение практических навыков работы со схемами инвертора тока и резонансного инвертора.

Назначение и принцип действия

При аварийном обесточивании судовой сети переменного тока ответственные потребители (радионавигационное оборудование, средства связи, рулевой электропривод переменного тока и др.) получают питание от аварийных источников - аккумуляторных батарей, энергия постоянного тока которых преобразуется в энергию переменного тока требуемой частоты с помощью инверторов.

В ряде случаев, например, на глубоководных аппаратах, где аккумуляторная батарея является единственным источником электрической энергии, все основное электрооборудование, как правило, переменного тока получает питание через инверторы.

На рис.3.1 представлена принципиальная электрическая схема параллельного инвертора тока, в которую входят: вентильная группа - тиристоры V_1-V_4 , включенные по однофазной мостовой схеме и осуществляющие непосредственное инвертирование тока i_{Vx} (преобразование обратное выпрямлению), коммутирующий конденсатор C_k , обеспечивающий запаривание соответствующих тиристоров в конце каждого полупериода рабочей частоты f , входной дроссель (индуктивность) L_{Vx} , сглаживающий пульсации тока i_{Vx} (если $L_{Vx} \rightarrow \infty$, i_{Vx} идеально сглажен), препятствующий разряду конденсатора C_k на источник питания и предотвращающий возникновение коротких замыканий источника при одновременно открытых вентильях V_1-V_4 , блок управления тиристорами - генератор управляющих импульсов (ГУИ).

Нагрузка R_H подключена на выходе инвертора параллельно конденсатору C_k .

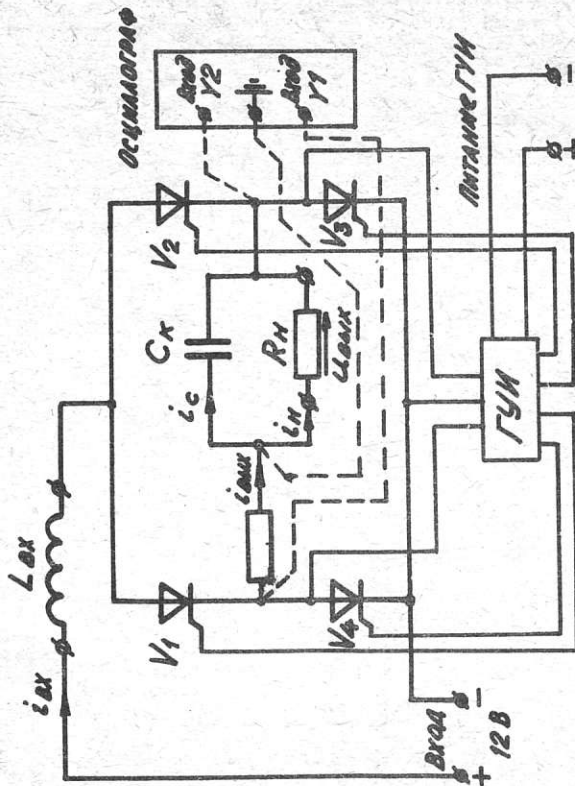


Рис. 3.1. Принципиальная схема параллельного инвертора тока.

При поочередной с частотой f_y подаче управляющих импульсов на управляющие электроды пар тиристоров V_1, V_3 и V_2, V_4 ток на выходе схемы $i_{вых}$ на каждом последующем полупериоде рабочей частоты f изменяет свое направление на противоположное, т.е. становится знакопеременным. Для идеальной схемы инвертора тока ($L_{вх} \rightarrow \infty$) временная диаграмма $i_{вых}(\omega t)$, где $\omega = 2\pi f$, показана на рис. 3.2, б. При включении очередной пары тиристоров, например, V_2, V_4 , все четыре тиристора оказываются включенными и в схеме возникает два контура перезаряда конденсатора C_k :

$$\begin{aligned} & \text{"+" } C_k - V_1 - V_2 - \text{"-" } C_k; \\ & \text{"+" } C_k - V_4 - V_3 - \text{"-" } C_k. \end{aligned}$$

Ток перезаряда i_c направлен встречно прямым токам вентилей V_1 и V_3

$$i_{V1} = i_{V3} = i_{вх}$$

и значительно превосходит их по величине (в контурах перезаряда C_k отсутствуют токоограничивающие элементы — индуктивности). Прямой ток тиристоров V_1 и V_3 уменьшается до нуля, и они выключаются. Конденсатор C_k продолжает перезаряжаться через нагрузку по цепи "—" $C_k - R_n - \text{"+" } C_k$ с постоянной времени $\tau = R_n C_k$ до тех пор, пока $i_c \geq i_{вых}$. В течение этого времени к тиристорам V_1 и V_3 прикладываются отрицательное анодное напряжение и они восстанавливают свои запирающие свойства.

На следующем полупериоде рабочей частоты f включаются тиристоры V_1 и V_3 и возникают контуры перезаряда C_k :

$$\begin{aligned} & \text{"+" } C_k - V_2 - V_1 - \text{"-" } C_k; \\ & \text{"+" } C_k - V_3 - V_4 - \text{"-" } C_k. \end{aligned}$$

В этом случае перезаряд конденсатора C_k приводит к выключению тиристоров V_2 , V_4 . На последующих полупериодах f электромагнитные процессы в схеме инвертора повторяются.

Схема инвертора тока работоспособна лишь при активно-емкостном характере нагрузки (учитывающей и емкость конденсатора C_k). Только при таком условии ток $i_{вых}$ опережает напряжение $U_{вых}$ на некоторый угол β (угол опережения), определяющий время, в течение которого на каждом полупериоде рабочей частоты выключенные тиристоры могут восстанавливать свои запирающие свойства. Если это время окажется недостаточным, тиристоры включаются, как только анодное напряжение на них станет положительным, и

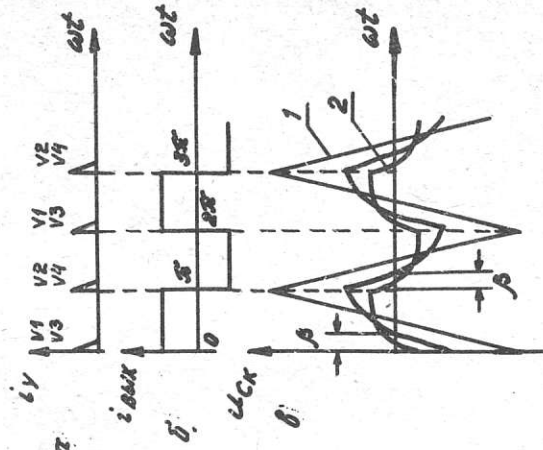


Рис. 3.2. Форма кривых токов и напряжений в схеме параллельного инвертора тока

произойдет так называемый "срыв инвертирования". Схема инвертора тока работоспособна, если выполняется условие

$$t_{\beta} > t_{\alpha},$$

где t_{α} - паспортное время восстановления тиристор (для конкретных типов указывается в справочнике).

В параллельной схеме инвертора тока угол β зависит от рабочей частоты f , емкости коммутирующего конденсатора C_k и величины сопротивления нагрузки R_H . Величина β может быть приближенно определена из соотношения

$$\beta = \arctg \omega R_H C_k.$$

В режимах работы схемы, близких к холостому ходу ($R_H \rightarrow \infty$), длительность перезаряда конденсатора C_k увеличивается ($\tau \rightarrow \infty$) и экспонента U_c на каждом полупериоде вырождается в прямую (кривая 1 на рис.3.2,в). Угол β достигает своего предельного значения $\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}$, и в схеме появляются опасность возникновения перенапряжений на отдельных элементах, так как из-за ЭДС самоиндукции в $L_{\alpha\kappa}$ напряжение на конденсаторе C_k может значительно превысить напряжение питания

$$U_{c, \max} = \frac{\pi U_{\alpha\kappa}}{2 \cos \beta}.$$

При увеличении нагрузки ($R_H \rightarrow 0$) - в режимах, близких к короткому замыканию, перезаряд конденсатора C_k происходит за все более короткие промежутки времени ($\tau \rightarrow 0$), напряжение U_c приближается к прямоугольной форме (кривая 2 на рис.3.2,в). Время, предоставляемое схемой для восстановления запирающих свойств тиристор, $\beta \rightarrow 0$, и происходит "срыв инвертирования".

Расчетно-графическое задание

Для параллельной схемы инвертора (см. рис.3.1) известна частота управляющих импульсов $f_y = 166$ Гц и величина входного тока $I_{\alpha\kappa} = 0,15$ А. Сопротивление нагрузки R_H и емкость коммутирующего конденсатора C_k выбираются из табл.3.1

в соответствии с номером бригады или по указанию преподавателя.

1. Проверить выполнение условия

$$L_{\alpha\kappa} > \frac{U_{\alpha\kappa}^2}{m f R_H} = \frac{U_{\alpha\kappa}}{m f I_{\alpha\kappa}}$$

($m=2$ - число переключений тиристор на одном периоде рабочей частоты f), при котором входной ток $i_{\alpha\kappa}$ практически идеально сглажен. В

Таблица 3.1

Варианты исходных данных		Варианты исходных данных	
Вариант	R_H , Ом	C_k , мкФ	
1	430	10	
2	1800	10	
3	680	2	
4	680	8	
5	750	10	
6	820	4	

$L_{\alpha\kappa}$ используется катушка индуктивности $W_3 = 3600$ витков с индуктивностью 440 мГн.

2. Определить время t_{β} , представляемое схемой инвертора для восстановления запирающих свойств тиристор, полагая, что их выключение (коммутация) происходит мгновенно.

3. Оценить время полного перезаряда t_{π} коммутирующего конденсатора C_k .

4. По полученным и исходным данным построить в масштабе на одном графике временные диаграммы токов $i_{\alpha\kappa}(t)$, $i_H(t)$, $i_c(t)$ и напряжений $u_H(t)$, $u_c(t)$.

5. Проверить выполнение условия

$$f \leq f_0,$$

при котором в схеме инвертора имеет место резонансный режим работы, если в качестве $L_{\alpha\kappa}$ используется катушка индуктивности $W_1 = 1200$ витков с индуктивностью 40 мГн (полагать резонансную частоту $f_0 = \frac{2\pi \sqrt{L_{\alpha\kappa} C_k}}{1}$).

6. Определить длительность пауз t_{π} в кривой выходного тока ($i_{\alpha\kappa} = 0$), когда все тиристоры схемы закрыты.

7. Построить в масштабе временную диаграмму $i_{\alpha\kappa}(t)$, полагая $i_{\alpha\kappa, \max} = 0,3$ А.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (см. рис. 3.1) включает в себя: блок тиристоров V_1-V_4 , входной дроссель $L_{вх}$, коммутирующий конденсатор C_k . Все элементы, кроме индуктивности $L_{вх}$, постоянно подключены к клеммам лабораторной установки и расположены с внутренней стороны ее лицевой панели. Активной нагрузкой инвертора является резистор R_H , который также подключен постоянно. Для изменения величины нагрузки параллельно с резистором R_H подключается дополнительный переменный резистор R с регулируемым в диапазоне 0-100 Ом сопротивлением. Резистор $R_H \ll R_H$ играет вспомогательную роль и предназначен для подключения осциллографа с целью фиксации на экране кривой тока на выходе схемы $i_{вых}$.

Для выполнения работы требуются: двухлучевой осциллограф, вольтметр постоянного тока, вольтметр переменного тока и катушки индуктивности $W_1 = 1200$ витков, $W_2 = 2400$ витков, $W_3 = 3600$ витков, используемые в качестве входного дросселя $L_{вх}$.

Порядок выполнения работы

I. Исследование особенностей электромагнитных процессов при работе схемы в режиме инвертора тока.

I.1. Подключить на вход схемы инвертора в качестве $L_{вх}$ катушку индуктивности $W_3 = 3600$ витков.

I.2. Подать постоянное напряжение 12 В на вход силовой схемы инвертора, а постоянное напряжение 6 В - на вход ГУИ. Измерить действующее значение напряжения на нагрузке (напряжением переменного тока и напряжение источника (напряжение на входе) $U_{вх}$ вольтметром постоянного тока. Результаты измерений внести в табл. 3.2.

Таблица 3.2
Результаты исследования работы инвертора тока

R_H , Ом									
β , рад									
U_H , В									
$U_{вх}$, В									

I.3. Подключить к схеме осциллограф и на его экране получить осциллограммы напряжения $u_H(t)$ и тока $i_{вых}(t)$; скопировать их на кальку, нанеся оси, соответствующие $u_H = 0$, $i_{вых} = 0$, и обозначив масштабы: вертикальные (тока и напряжения) и горизонтальные (времени).

I.4. Выключить питание. Подключить параллельно резистору нагрузки R_H дополнительное переменное сопротивление R (0-100 Ом), предварительно установив его на максимальное значение. Последовательно задавая значения $R = \{100, 75, 50, 25\}$ Ом, повторить пп. I.2 и I.3.

I.5. Уменьшая R , добиться "срыва инвертирования". Определить величину R , при которой произошел "срыв инвертирования", после чего выключить питание и отключить R .

I.6. На вход схемы вместо катушки $W_3 = 3600$ витков подключить катушку индуктивности $W_2 = 2400$ витков. Повторить пп. I.2 и I.3, после чего отключить питание.

2. Исследование особенностей электромагнитных процессов при работе схемы инвертора в резонансном режиме.

2.1. Подключить на вход схемы в качестве $L_{вх}$ катушку индуктивности $W_1 = 1200$ витков.

2.2. Повторить п. I.3.

3. Обработка результатов.

По полученным осциллограммам для схемы с катушкой индуктивности $W_3 = 3600$ витков определить величины углов опережения β при различных значениях сопротивлений эквивалентной нагрузки

$$R'_H = \frac{R_H R}{R_H + R}$$

Результаты расчетов и измерений внести в табл. 3.2, включив значение R'_H , при котором происходит "срыв инвертирования".

По осциллограммам работы схемы инвертора в резонансном режиме определить значения рабочей f и резонансной f_0 частот, а также длительность пауз тока $t_{п}$. Результаты внести в табл. 3.3.

Таблица 3.3
Результаты исследования работы резонансного инвертора

Результат	$f, \Gamma\text{ц}$	$f_0, \Gamma\text{ц}$	$t_{\eta, c}$
Расчет			
Эксперимент			
Погрешность, %			

Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки.
2. Расчетные формулы.
3. Результаты расчетов и экспериментов, сведенные в табл. 3.2 и 3.3.
4. Расчетные графики зависимостей $i_{\text{вых}}(t)$, $i_{\text{н}}(t)$, $i_{\text{с}}(t)$, $u_{\text{н}}(t)$, $u_{\text{с}}(t)$ для схемы идеального инвертора тока. Расчетные графики зависимостей $i_{\text{вых}}(t)$ и $u_{\text{н}}(t)$ для схемы резонансного инвертора.
5. Осциллограммы тока $i_{\text{вых}}(t)$ и напряжения $u_{\text{н}}(t)$, полученные экспериментально для схемы инвертора тока и резонансного инвертора.
6. Выводы по работе. Выводы должны содержать ответ на основной вопрос лабораторной работы: в чем проявляются особенности электромагнитных процессов в схеме инвертора тока, резонансного инвертора; как влияет величина индуктивности $L_{\text{вх}}$, нагрузки $R_{\text{н}}$ на характер электромагнитных процессов в схеме.

Контрольные вопросы

1. Назначение и области применения инверторов в судостроении.
2. Какими способами можно перевести параллельную схему инвертора тока в резонансный режим?
3. В чем заключается преимущество практического использования резонансного режима работы инвертора?
4. Какими технико-экономическими преимуществами обладает

ют статические инверторы по сравнению с электромашинными (вращающимися)?

5. Почему в режимах работы, близких к холостому ходу, в схеме инвертора тока происходит "срыв инвертирования"? Что понимается под "срывом инвертирования"?

6. Почему при малых величинах нагрузки на элементах схемы инвертора тока возможны перенапряжения?

7. Чем объясняется наличие пауз ($i_{\text{вых}} = 0$) в кривой тока на выходе резонансной схемы инвертора?

8. Почему при отсутствии конденсатора $C_{\text{к}}$ схема инвертора тока неработоспособна?

9. Что произойдет, если подать питание на схему инвертора тока с индуктивностью входного фильтра $L_{\text{вх}} = 0$?

10. Как изменится характер электромагнитных процессов в схеме инвертора тока при возникновении в тиристоре V_1 неисправностей типа "обрыв"; "короткое замыкание"?

Лабораторная работа 4 ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Изучение принципа действия импульсного преобразователя постоянного тока со стабилизацией выходного напряжения. Приобретение практических навыков снятия основных характеристик преобразователя.

Назначение и принцип действия

Преобразователи постоянного тока преобразуют электроэнергию первичной сети постоянного тока по величине напряжения. Выходное напряжение преобразователей в зависимости от типа может регулироваться (регуляторы постоянного тока), стабилизироваться (стабилизаторы постоянного тока), быть больше или меньше питающего напряжения.

В импульсных преобразователях основной элемент - регулирующий транзистор - работает в режиме переключений, т.е.

либо на нем близко к нулю напряжение, либо близок к нулю ток, а следовательно, мала рассеиваемая мощность. Поэтому импульсные преобразователи по сравнению со стабилизаторами непрерывного действия имеют более высокий КПД и лучшие массогабаритные показатели. Регулирующий транзистор преобразует (модулирует) входное постоянное напряжение U_n в серию последовательных импульсов определенной длительности и частоты, а сглаживающий фильтр демодулирует импульсы в постоянное напряжение на нагрузке U_n . Регулирование величины U_n может осуществляться путем изменения длительности или частоты следования импульсов. В зависимости от способа управления регулирующим транзистором преобразователи могут выполняться с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) или релейного типа. В ШИМ преобразователях в процессе работы изменяется длительность импульсов, а частота коммутации остается неизменной, в ЧИМ преобразователях изменяется частота коммутации, а длительность импульсов постоянна, в релейных преобразователях изменяется и частота, и длительность. ШИМ имеет следующие преимущества: обеспечивается высокий КПД и оптимальная частота преобразования, неизменная частота пульсаций напряжения, возможна синхронизация нескольких преобразователей. Релейные преобразователи отличаются простотой схемы управления.

По способу построения силовой части импульсные преобразователи разделяются на три типа:

- с последовательно включенными регулирующим элементом, дросселем и нагрузкой, выходное напряжение меньше напряжения питания;
- с дросселем, включенным последовательно с нагрузкой, и регулирующим элементом, параллельным нагрузке, выходное напряжение больше входного;
- с дросселем, подключенным параллельно нагрузке, и регулирующим элементом, последовательным с нагрузкой, возможно получение выходного напряжения большего или меньшего, чем напряжение питания, возможно получение напряжения противоположной полярности.

В данной лабораторной работе рассматривается импульсный преобразователь с последовательным включением регулирующего транзистора V_1 , дросселя L и нагрузки R_n со стабилизацией выходного напряжения (рис.4.1). Схема управления SU обес-

печивает работу транзистора в режиме переключения, при котором он поочередно полностью открыт или закрыт. При открытом

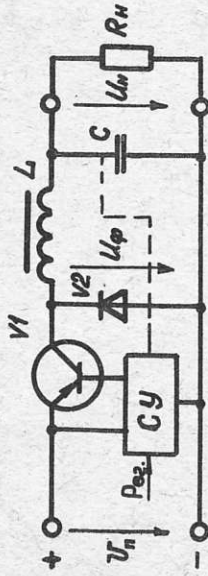


Рис.4.1. Структурная схема импульсного преобразователя

транзисторе в течение времени $t_{и}$ (рис.4.2) энергия от источника питания постоянного тока (или выпрямителя с выходным напряжением U_n) передается нагрузке через дроссель L . При этом в дросселе накапливается энергия. При закрытом транзисторе (интервал времени от $t_{и}$ до T_n) накопленная энергия передается в нагрузку через диод V_2 . Частота коммутации (преобразования) $f_n = 1/T_n$.

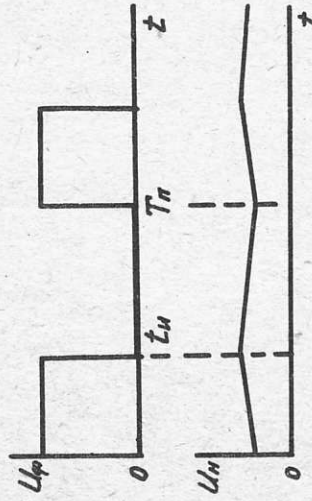


Рис.4.2. Форма напряжения на входе фильтра и на нагрузке импульсного преобразователя

Отношение длительности $t_{и}$ открытого состояния транзистора, при котором генерируется импульс напряжения, к периоду коммутации T_n называется коэффициентом заполнения (4.1)

$$\gamma = t_{и} / T_n.$$

Иногда при расчетах удобно пользоваться обратной величиной - скажностью $Q = 1/\gamma$.

Среднее значение напряжения на входе фильтра определяется произведением напряжения питания и коэффициента заполнения. Напряжение на выходе сглаживающего LC-фильтра (напряжение на нагрузке U_H) равно

$$U_H = U_H \gamma \left(1 - \frac{R_L}{R_H}\right) \approx U_H \gamma. \quad (4.2)$$

Схема управления СУ обеспечивает регулирование напряжения путем регулирования γ и стабилизацию напряжения при изменении обратной связи, в соответствии с которой при изменении входного напряжения или тока нагрузки изменяется γ таким образом, что U_H остается стабильным с определенной степенью точности.

Амплитуда пульсаций выходного напряжения $U_{H\sim}$ определяется величиной LC по формуле

$$U_{H\sim} = \frac{U_H (1 - \gamma)}{16 f_n^2 LC}. \quad (4.3)$$

Расчетно-графическое задание

1. Построить в масштабе графики изменения мгновенного значения напряжения на входе фильтра и на нагрузке преобразователя в соответствии с вариантами, представленными в табл. 4.1. Рассчитать γ , $U_{H\sim}$ по формулам 4.1-4.3.

Таблица 4.1

Исходные данные задания

Вариант	U_H , В	U_H , В	f_n , кГц	L , мГн	C , мкФ	I_H , А
1	20	10	20	10	0,001	1
2	30	10	20	10	100	1
3	20	15	50	10	100	0,3
4	30	15	50	10	100	1
5	40	10	50	10	100	1
6	40	8	20	10	100	1

2. Построить в масштабе графики изменения мгновенных значений напряжения на входе фильтра и на нагрузке преобразователя при уменьшении напряжения U_H в два раза по сравнению со случаем рассмотренного варианта при условии ШИМ (нечетные варианты) или ЧИМ (четные варианты).

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 4.3) содержит импульсный преобразователь, на входе которого установлен мостовой выпрямитель с емкостным фильтром на конденсаторе С1. Нагрузкой преобразователя является внешний переменный резистор R_H и последовательный с ним резистор $R_B = 10 \text{ Ом}$, установленный за лицевой панелью установки.

Для выполнения работы требуется двухлучевой осциллограф, ваттметр, два вольтметра и амперметр постоянного тока, переменный резистор с номинальным сопротивлением 100 Ом.

Порядок выполнения работы

1. Исследовать работу преобразователя при регулировании выходного напряжения.

1.1. Собрать лабораторную установку в соответствии со схемой на рис. 4.3. Корпус двухлучевого осциллографа соединить с гнездом Г3 или Г6, вход У1 - с гнездом Г2 (напряжение U_ϕ), вход У2 - с гнездом Г4 (напряжение U_H).

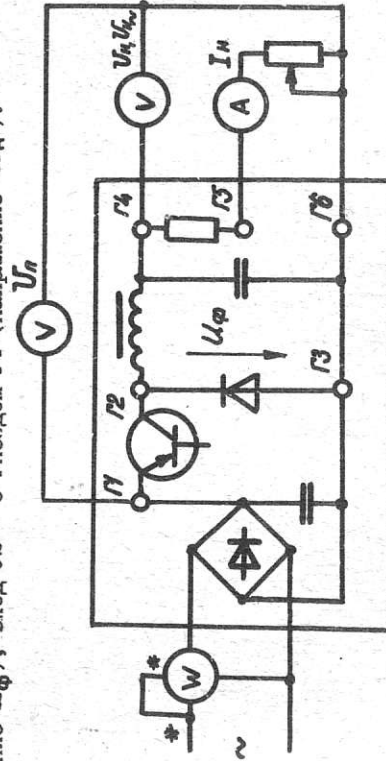


Рис. 4.3. Схема лабораторной установки

1.2. Установить движок переменного резистора R_n в

положение $R_{\max} = 100 \text{ Ом}$.

1.3. Подать на вход установки переменное напряжение та-
кой величины, чтобы напряжение на конденсаторе выпрямителя
(гнездо П) равнялось значению U_n , заданному в варианте.

1.4. Ручкой регулировки выходного напряжения преобразо-
вателя установить 4-5 значений выходного напряжения, в том
числе заданное в варианте. Для каждого получить и скопиро-
вать осциллограммы напряжений U_n, U_n с указанием масштаба.

Определить из осциллограмм t_n, t_n . Измерить потребляе-
мую мощность P_n , постоянный ток и напряжение на нагрузке
 I_n, U_n ; переменное напряжение пульсаций на нагрузке $U_{n\sim}$.
Результаты измерений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты исследования работы
импульсного преобразователя

Режим работы	Измерено										Рассчитано	
	U_n , В	$U_{n\sim}$, мВ	I_n , А	P_n , Вт	t_n , мкс	f_n , кГц	f_n , Гц	P_n , Вт	η , %	K_n , %		
Регулиро- вание вы- ходного напряжения U_n												
Стабильза- ция U_n при изменении напряжения питания												
Стабильза- ция U_n при изменении сопротивле- ния нагруз- ки												

1.5. Рассчитать и занести в табл. 4.2 частоту преобразо-
вания f_n , коэффициент заполнения η , мощность на нагрузке
 $P_n = U_n I_n$, КПД $\eta = P_n / P_n$ и коэффициент пульсаций
напряжения $K_n = U_{n\sim} / U_n$.

1.6. Построить графики зависимостей U_n, η, K_n от γ .
2. Исследовать преобразователь в режиме стабилизации
выходного напряжения питания.

2.1. Установить движок переменного резистора R_n в по-
ложение $R_{\max} = 100 \text{ Ом}$, ручкой регулировки выходного на-
пряжения преобразователя установить напряжение на нагрузке в
соответствии с вариантом.

2.2. Регулируя величину переменного напряжения, уста-
новить на конденсаторе выпрямителя 4-5 значений постоянного
напряжения U_n , в том числе заданное в варианте. Для каждо-
го значения снять осциллограммы напряжений U_n, U_n , изме-
рить $P_n, U_n, U_{n\sim}, I_n, t_n, T_n$. Рассчитать f_n, η, K_n .
 K_n . Результаты занести в табл. 4.2. Рассчитать коэффициент
стабилизации $K_{ст} = \Delta U_n / U_n$.

2.3. Построить графики зависимости U_n, η от U_n .

3. Исследовать работу преобразователя в режиме стабили-
зации напряжения при изменении тока (сопротивления) нагрузки.

3.1. Установить U_n и U_n в соответствии с вариантом.
3.2. Регулируя сопротивление нагрузки R_n , устано-
вить 4-5 значений тока нагрузки I_n . Для каждого значения
снять осциллограммы U_n, U_n , измерить $t_n, T_n, U_n, U_{n\sim}, I_n$,
 P_n и рассчитать f_n, η, K_n . Результаты измерений занес-
ти в табл. 4.2.

3.3. Построить графики зависимости K_n, η, U_n от I_n .

4. Объяснить полученные результаты. Сопоставить резуль-
таты расчетов и экспериментов. Определить тип модуляции, при-
меняемый в преобразователе.

Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки.
2. Расчетные формулы.
3. Результаты расчетов и экспериментов, сведенные в
таблицу.
4. Графики зависимости U_n, K_n, η, U_n от γ, U_n и I_n .
5. Осциллограммы U_n, U_n , снятые для исследованных ре-
жимов работы преобразователя, а также графики $U_n(t)$,
 $U_n(t)$, рассчитанные в соответствии с заданием.

Контрольные вопросы

1. Назначение и область применения преобразователя постоянного тока. Достоинства и недостатки.
2. Назначение элементов преобразователя.
3. Широотно-импульсные, частотно-импульсные и релейные преобразователи. Сравнение схемных решений.
4. Объяснить принцип регулирования и стабилизации выходного напряжения.
5. Объяснить полученные графики.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1. Однофазные выпрямители	3
Лабораторная работа 2. Трехфазный мостовой выпрямитель	10
Лабораторная работа 3. Автономные инверторы	15
Лабораторная работа 4. Импульсный преобразователь постоянного тока	23
Литература	30

ЛИТЕРАТУРА

1. Судовая электротехника и электроника: Учебник/ Под ред. Д. В. Вилесова. Л.: Судостроение, 1985.
2. Энергетическая электроника: Справочное пособие. Пер. с нем./ Под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/ Под ред. Г. С. Найвелта. М.: Радио и связь, 1985.
4. Основы промышленной электроники/ Под ред. В. Г. Герасимова. М.: Высш. школа, 1978.

