

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра защиты информации

***ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ №11, 12***

Практикум для студентов специальностей
1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»,
1-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации»,
1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях»
всех форм обучения

УДК [621.314.6+621.316.722.1]:621.39(075.8)

ББК 32.88-4я73+31.264.5я73+32.88я73

Ф94

С о с т а в и т е л и:

В. В. Климович, Г. Г. Машара, Н. И. Шатило, Я. В. Рощупкин

Функциональные устройства и электропитание систем телекомму-
Ф94 никаций. Лабораторные работы №11, 12 : практ. для студ. спец. 1-45 01 03
«Сети телекоммуникаций», 1-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации», 1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях» всех форм обуч. / сост. В. В. Климович [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – 40 с.: ил.

ISBN 978-985-488-536-0.

В издании приведены две лабораторные работы по исследованию однофазных управляемых выпрямителей и стабилизаторов постоянного тока и напряжения, каждая из которых включает краткие теоретические сведения, описание лабораторной установки, задание на исследование, порядок выполнения работы, содержание отчета и контрольные вопросы.

УДК [621.314.6+621.316.722.1]:621.39(075.8)

ББК 32.88-4я73+31.264.5я73+32.88я73

ISBN 978-985-488-536-0

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

Содержание

Лабораторная работа №11 Однофазный управляемый выпрямитель	4
11.1 Цель работы.....	4
11.2 Краткие теоретические сведения	4
11.3 Описание лабораторной установки	10
11.4 Задание на исследование	13
11.5 Порядок выполнения работы	13
11.6 Содержание отчета	17
11.7 Контрольные вопросы	17
Лабораторная работа №12 Стабилизаторы постоянного напряжения и тока с непрерывным регулированием	18
12.1 Цель работы	18
12.2 Краткие теоретические сведения	18
12.3 Описание лабораторной установки	28
12.4 Задание на исследование	31
12.5 Порядок выполнения работы	32
12.6 Содержание отчета	39
12.7 Контрольные вопросы	39
Литература	39

Лабораторная работа №11

ОДНОФАЗНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

11.1 Цель работы

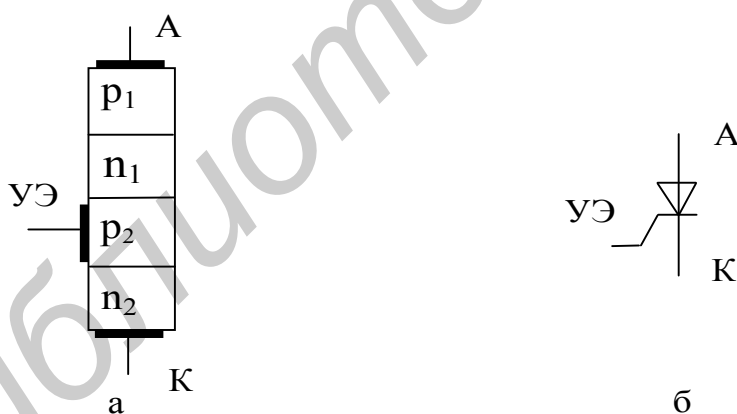
Исследовать принципы работы и характеристики тиристорного управляемого выпрямителя.

11.2 Краткие теоретические сведения

Управляемым называется такой выпрямитель, в котором выходное напряжение U_0 может регулироваться при неизменном напряжении U_2 на вторичной обмотке силового трансформатора.

Основным элементом управляемого выпрямителя является управляемый вентиль, который может представлять собой ионный или электронный прибор. В настоящее время в качестве управляемых вентиляей наиболее часто применяются тиристоры.

Тиристор – это четырехслойный полупроводниковый прибор (рисунок 11.1). Особенность его работы заключается в том, что при положительном напряжении на аноде (А) по отношению к катоду (К) тиристор начинает проводить ток при подаче на управляющий электрод (УЭ) положительного потенциала или импульса относительно катода.

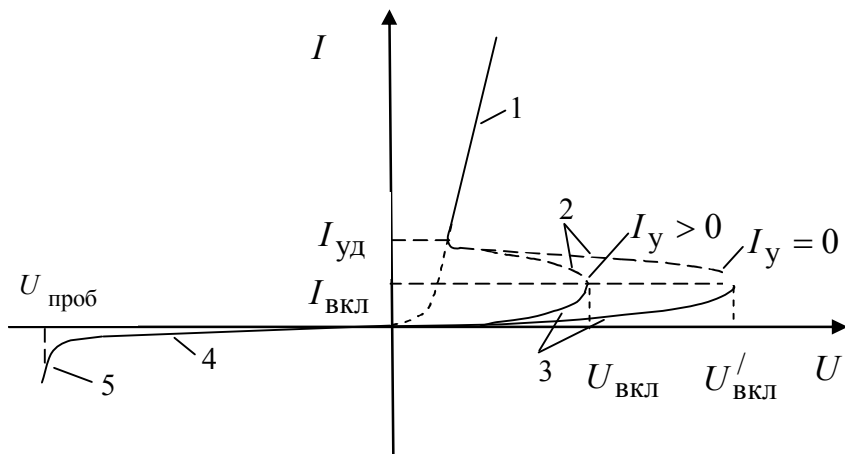


а – структура; б – условное графическое изображение

Рисунок 11.1 – Тиристор

Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) тиристора приведены на рисунке 11.2.

При открытом состоянии тиристора прямой ток через него ограничивается сопротивлением нагрузки. Закрывается тиристор при уменьшении тока до значения, меньшего так называемого *тока удержания* $I_{уд}$.



1 – открытое состояние; 2 – участок отрицательного дифференциального сопротивления; 3 – закрытое состояние; 4 – непроводящее состояние в обратном направлении; 5 – область пробоя в обратном направлении

Рисунок 11.2 – Статические вольт-амперные характеристики тиристора

Напряжение включения тиристора $U_{\text{вкл}}$ зависит от тока управления I_y в управляющем электроде: чем больше ток управления, тем меньше напряжение включения. При номинальном токе управления напряжение включения составляет единицы вольт.

Тиристор можно привести в открытое состояние, не воздействуя на управляющий электрод (при $I_y = 0$). Для этого нужно увеличить приложенное к нему прямое напряжение до критического значения $U'_{\text{вкл}}$.

Тиристор может также перейти в открытое состояние и при меньшем значении напряжения, чем $U'_{\text{вкл}}$, если скорость нарастания коммутируемого напряжения достаточно высока. Однако такое включение тиристора нежелательно. Тиристоры нормально работают при входном синусоидальном напряжении, скорость нарастания которого составляет несколько сотен вольт в миллисекунду.

К основным статическим параметрам тиристоров относятся:

$U_{\text{вкл}}$ – напряжение включения, соответствующее точке перегиба ВАХ;

$I_{\text{вкл}}$ – ток включения, т. е. минимальная величина анодного тока, необходимого для перехода тиристора в открытое состояние и сохранения этого состояния после снятия управляющего сигнала;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, т. е. максимальное напряжение, при котором тиристор может длительно работать в закрытом состоянии. Обычно $U_{\text{ном}} = (0,6 \dots 0,7 U_{\text{вкл}})$;

$I_{\text{уд}}$ – ток удержания, т. е. минимальный анодный ток, который необходим для поддержания тиристора в открытом состоянии (при меньшем значении тока тиристор переходит в запертое состояние);

$U_{\text{обр.ном}}$ – номинальное обратное напряжение, т. е. максимальное обратное напряжение, при котором тиристор может длительное время работать без разрушения;

$U_{\text{вкл}}^{\prime}$ – прямое напряжение включения, являющееся критическим напряжением, при котором тиристор, имеющий предельную температуру корпуса, переходит в открытое состояние при отсутствии тока управляющего электрода.

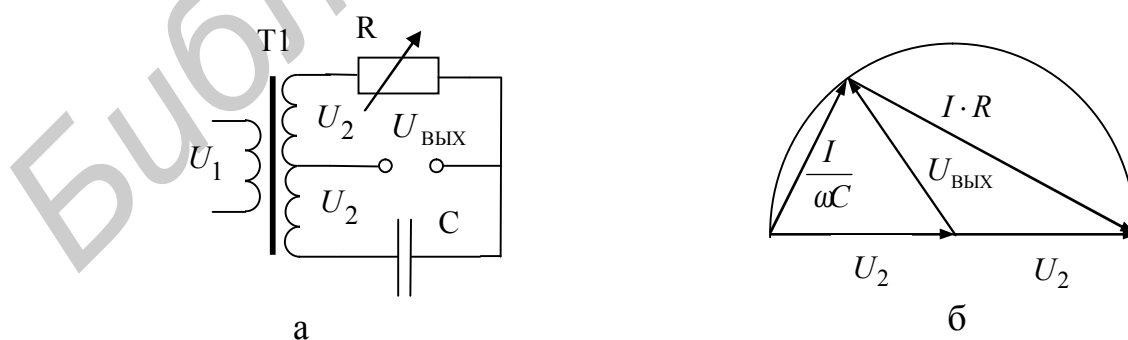
К временным параметрам тиристора относятся время включения (0,1...5 мкс) и время восстановления закрытого состояния тиристора (1...20 мкс).

Простейшая схема управляемого выпрямителя на тиристорах включает в себя силовой трансформатор, который обеспечивает необходимое напряжение U_2 , управляемый вентиль, источник управляющего напряжения и сглаживающий фильтр.

Изменять выходное напряжение в тиристорных управляемых выпрямителях можно следующими способами.

1 В зависимости от величины сигнала постоянного тока изменяется угол включения вентиля и соответственно меняется среднее значение выпрямленного тока и напряжения на нагрузке. Такой способ управления называется *амплитудным*.

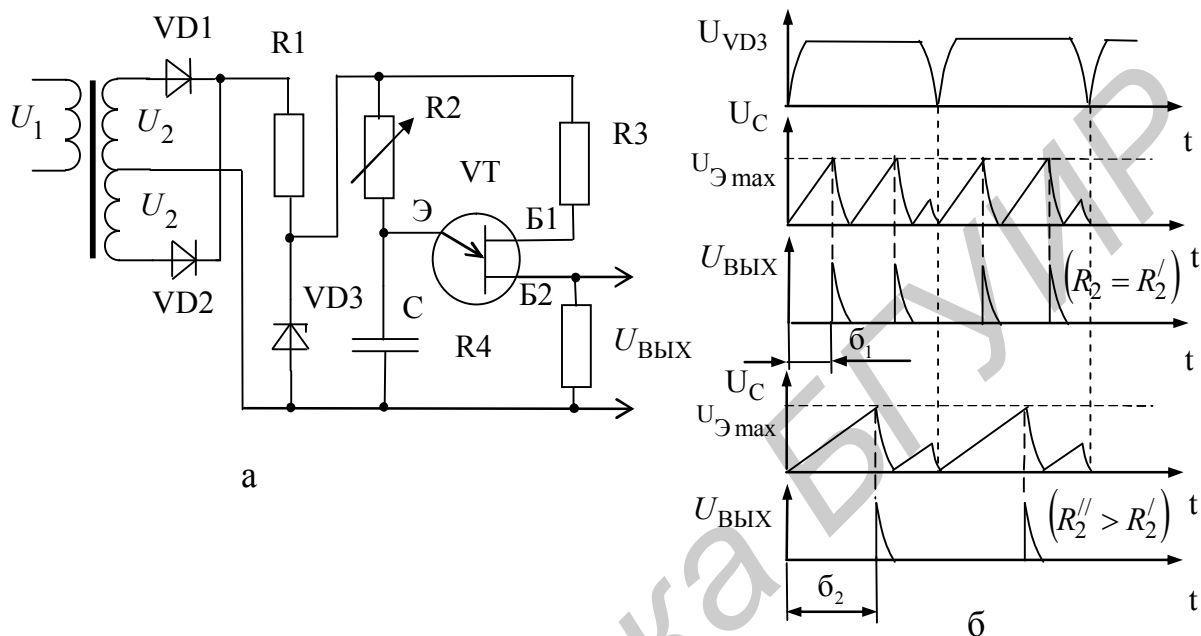
2 На управляющий электрод подается переменное напряжение с некоторым углом запаздывания α по отношению к напряжению на аноде тиристора. В маломощных выпрямителях для этой цели применяются емкостные и индуктивные фазовращатели. Пример принципиальной схемы емкостного фазовращателя и векторная диаграмма, поясняющая его работу, представлены на рисунке 11.3. Сдвиг фазы выходного напряжения относительно напряжения на вторичной обмотке трансформатора Т1 достигается изменением сопротивления R .



а – принципиальная схема; б – векторная диаграмма

Рисунок 11.3 – Емкостный фазовращатель

3 При импульсном управлении на управляющий электрод подаются импульсы с крутым передним фронтом, сдвинутые по времени относительно напряжения на аноде тиристора. В этом случае исключается неоднозначность установки угла регулирования, которая может иметь место при синусоидальных управляющих сигналах. Пример схемы формирователя импульсов управления и временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рисунке 11.4.



а – принципиальная схема; б – временные диаграммы

Рисунок 11.4 – Формирователь импульсов управления

Схема формирователя импульсов управления представляет собой релаксационный генератор, исполненный на однопереходном транзисторе, который имеет три вывода: эмиттер (Э), базу 1 (Б1) и базу 2 (Б2). Участок между базами имеет характер линейного омического сопротивления. При напряжении на эмиттере, меньшем некоторой максимальной величины $U_{Эmax}$, переход эмиттер – база 1 смещен в обратном направлении и транзистор VT закрыт.

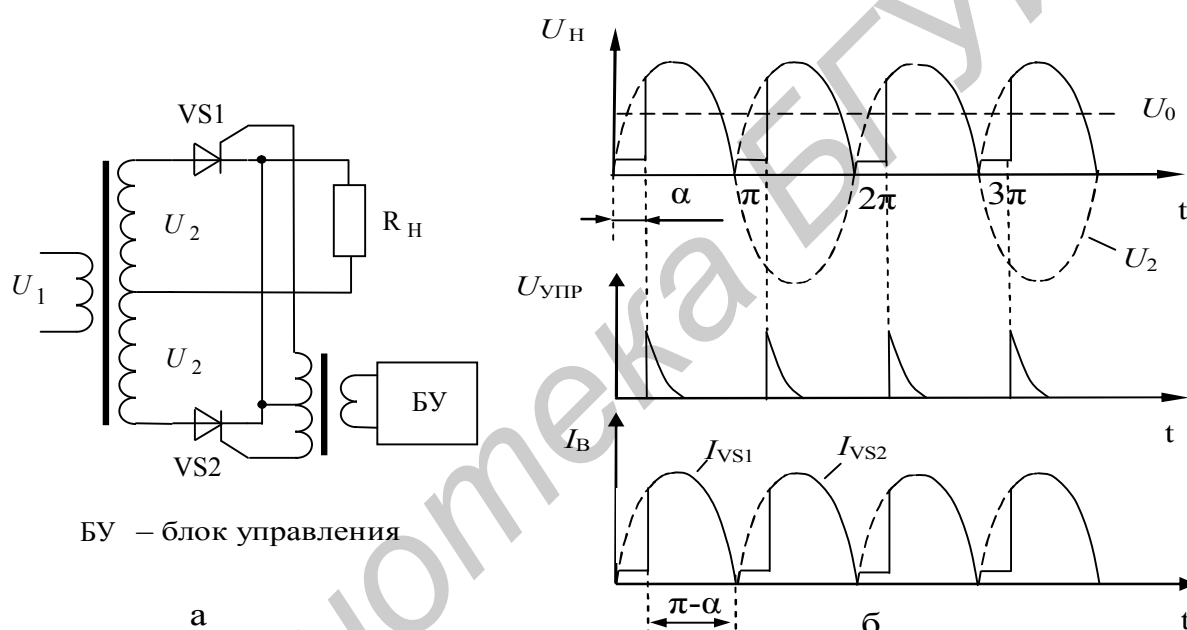
При появлении напряжения на стабилитроне $VD3$, которое одновременно играет роль питающего и синхронизирующего напряжения, конденсатор C начинает заряжаться через резистор $R2$. Как только напряжение на эмиттере достигнет $U_{Эmax}$, транзистор VT открывается и конденсатор C разряжается на сопротивление $R4$, с которого снимаются импульсы управления. Когда ток эмиттера $I_э$ уменьшится до значения выключения $I_{э.выкл}$, переход транзистора закрывается. Далее цикл повторяется.

Резистор $R3$ защищает однопереходный транзистор от перенапряжения и стабилизирует его работу при колебаниях температуры окружающей среды.

Постоянная времени заряда конденсатора C зависит от значения сопротивления резистора R_2 , а значит, изменяя это значение, можно регулировать угол сдвига α импульсов управления по отношению к напряжению на аноде тиристоров (см. рисунок 11.3, б).

Недостаток импульсного управления заключается в том, что за время действия управляющего сигнала ток анода тиристора должен превысить значение тока удержания $I_{уд}$, иначе после окончания импульса управления тиристор закроется. При индуктивной нагрузке выполнить это условие достаточно проблематично.

На практике управляемые выпрямители, как правило, строятся по многофазной схеме. В качестве примера рассмотрим работу двухтактного управляемого выпрямителя для однофазной сети, схема и временные диаграммы работы которого представлены на рисунке 11.5.



а – принципиальная схема; б – временные диаграммы

Рисунок 11.5 – Двухтактный управляемый выпрямитель для однофазной сети

Если между напряжениями управляющего электрода и анода каждого тиристора нет сдвига фаз, то схема действует как неуправляемая: ток протекает через каждый тиристор и нагрузку в течение половины периода выпрямляемого напряжения. При сдвиге фаз между управляющим и анодным напряжениями, т. е. при угле регулирования $\alpha > 0$, ток протекает через каждый тиристор в течение условного времени $\pi - \alpha$. Форма кривых тока и напряжения для этого режима работы показана на рисунке 11.5, б.

Очевидно, что угол регулирования может меняться лишь в пределах $0 - \pi$. Постоянные составляющие тока $I_{0\alpha}$ и напряжения $U_{0\alpha}$ на нагрузке управляемого выпрямителя определяются соотношениями

$$I_{0\alpha} = I_0 (1 + \cos \alpha) / 2, \quad (11.1)$$

$$U_{0\alpha} = U_0 (1 + \cos \alpha) / 2,$$

где I_0 и U_0 – постоянные составляющие напряжения и тока эквивалентного неуправляемого выпрямителя.

Зависимость нормированного напряжения $U_{0\alpha}/U_0$ от угла α регулирования называется *регулирующей характеристикой выпрямителя* (рисунок 11.6).

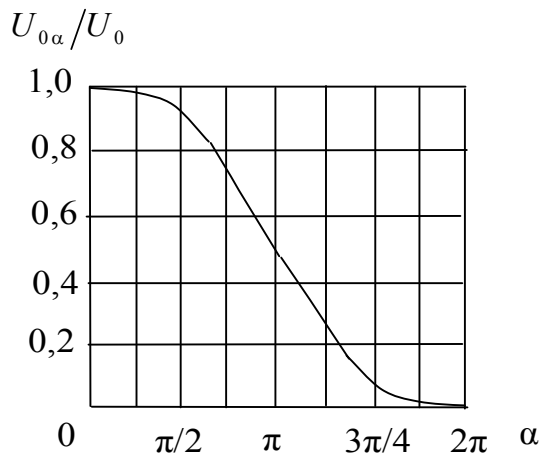


Рисунок 11.6 – Нормированная регулирующая характеристика

При работе управляемого выпрямителя на нагрузку с индуктивной реакцией, что наиболее часто встречается в источниках питания, возможны два режима работы: режим непрерывного тока и режим прерывистого тока, когда ток в нагрузке имеет импульсный характер.

В режиме непрерывного тока энергии, накопленной в индуктивности цепи нагрузки, достаточно для поддержания тока до момента

включения второго вентиля выпрямителя, и ток протекает в некоторой части периода даже при отрицательном напряжении на аноде. Режим прерывистого тока возникает при выполнении условия

$$\alpha \geq \arctg(X_H/R_H), \quad (11.2)$$

где X_H и R_H – индуктивная и активная составляющие сопротивления нагрузки соответственно.

Так как импульсы анодного тока смещены относительно анодного напряжения тиристора на угол регулирования, тиристорный выпрямитель потребляет из сети помимо активного также реактивный ток, что является его недостатком.

Таким образом, перечислим основные особенности работы тиристорного регулируемого выпрямителя:

1 Уменьшение выходного напряжения в тиристорном выпрямителе достигается уменьшением отбора мощности от сети переменного тока и не приводит к увеличению ее потерь в выпрямителе.

2 При регулировании выпрямитель потребляет от сети переменного тока не только активную, но и реактивную мощность.

3 Выходное напряжение меняется от максимума до нуля при изменении

угла регулирования от 0 до π при работе на активную нагрузку и от 0 до $\pi/2$ при индуктивной реакции нагрузки.

4 Пульсация выпрямленного напряжения заметно возрастает с ростом угла регулирования.

5 Режим непрерывного тока в дросселе нарушается, если выполняется условие (11.2).

11.3 Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 11.7.

Напряжение сети 230 В, 50 Гц через тумблер SA1 СЕТЬ и плавкий предохранитель FU1 поступает на первичную обмотку W1 сетевого понижающего трансформатора T1. Наличие напряжения на лабораторной установке контролируется индикатором HL1.

Сетевой трансформатор T1 имеет несколько вторичных обмоток, предназначенных для питания основной и вспомогательных схем управляемого выпрямителя. Основной схемой является схема двухполупериодного выпрямителя на тиристорах. К вспомогательным схемам относятся схема фазовращателя и схема формирователя управляющих импульсов с усилителем мощности.

Фазовращатель построен по схеме индуктивно-емкостного моста, два плеча которого образованы последовательно соединенными полуобмотками W2, W3 сетевого трансформатора T1, а два других плеча – последовательно соединенными конденсатором C1 и резистором R4. Фаза выходного напряжения фазовращателя на диагонали моста $a-b$ между средними точками соединения полуобмоток W2, W3, конденсатора C1 и резистора R4 отличается от фазы напряжения на полуобмотках и зависит от соотношения сопротивлений резистивно-емкостного плеча. Включением в плечо моста различных резисторов R4...R10 переключателем SA2 УПРАВЛЕНИЕ фазу выходного напряжения фазовращателя можно ступенчато изменять в диапазоне $10^\circ \dots 170^\circ$. В диагональ моста $a-b$ фазовращателя включен входной делитель формирователя управляющих импульсов.

Формирователь управляющих импульсов выполнен на транзисторах VT1, VT2 и резисторах R1...R3, R11. Стабилитроны VD1, VD2 предназначены для защиты переходов база – эмиттер транзисторов VT1, VT2 от перегрузок выходным напряжением фазовращателя. Питание формирователя управляющих импульсов и усилителя мощности на транзисторе VT3 осуществляется от низковольтного выпрямителя на элементах VD3...VD6, C2, подсоединенного к низковольтной обмотке W4 сетевого трансформатора T1.

При положительном полупериоде выходного напряжения фазовращателя транзистор VT1, включенный по схеме с общим эмиттером, открыт и насыщен – напряжение на его коллекторе близко к эмиттерному. Транзистор VT2 в этот полупериод закрыт. При отрицательном полупериоде выходного напряжения фазовращателя открыт и насыщен транзистор VT2, включенный по схеме с общей базой. Напряжение на его коллекторе в этот полупериод близко к эмиттерному. Транзистор VT1 в этот полупериод закрыт.

Лишь в моменты времени, когда выходное напряжение фазовращателя по абсолютному значению близко к нулю и составляет единицы вольт, оба транзистора VT1 и VT2 закрыты и напряжение на их коллекторах близко к напряжению низковольтного источника питания.

В результате формирователь импульсов генерирует короткие положительные импульсы частотой 100 Гц в моменты перехода выходного синусоидального напряжения фазовращателя через нуль.

Положительные управляющие импульсы частотой 100 Гц усиливаются усилителем мощности на транзисторе VT3, работающем в режиме эмиттерного повторителя. Эмиттерный повторитель нагружен на первичную обмотку импульсного трансформатора T2. Диод VD7 предназначен для защиты транзистора VT3 и ограничения импульсов отрицательной полярности.

Управляемый выпрямитель построен по схеме двухполупериодного выпрямления со средней точкой и содержит два управляемых тиристора VS1, VS2, соединенных последовательно с полуобмотками W5, W6 сетевого трансформатора T1. Импульсы управления поступают на управляющие электроды тиристоров со вторичных обмоток импульсного трансформатора T2. Тиристоры VS1 и VS2 поочередно включаются в полупериоды положительного синусоидального напряжения на их анодах.

К выходу управляемого выпрямителя подключены входы сглаживающих фильтров L + VD, L. Особенностью фильтра L + VD является наличие обратного диода VD8, подключенного к выходу управляемого выпрямителя. Диод VD8 позволяет устранить влияние ЭДС самоиндукции дросселя D1 на работу управляемого выпрямителя. В режиме «Lin» управляемый выпрямитель работает без сглаживающих фильтров.

Выходы фильтров переключателем SA3 ФИЛЬТР подсоединяются к нагрузке, состоящей из постоянного R13 и переменного R14 резисторов. Переменным резистором R14 НАГРУЗКА осуществляется установка тока нагрузки.

Для контроля тока, протекающего через тиристоры, последовательно с тиристором VS2 включен балластный резистор R12.

Значение постоянного напряжения на нагрузке измеряется вольтметром PV1. Значение тока нагрузки измеряется миллиамперметром постоянного тока PA1.

Контрольные гнезда XS1...XS8 предназначены для визуального контроля и измерения напряжений на различных участках управляемого выпрямителя

посредством осциллографа. При этом на контрольные гнезда выведены следующие контрольные напряжения схемы:

XS1–XS3 – входное синусоидальное напряжение;

XS2–XS3 – управляющие импульсы включения тиристоров;

XS4–XS6 – выходное напряжение управляемого выпрямителя;

XS5–XS6 – ток тиристора VS2;

XS7–XS8 – выходное напряжение нагрузки.

11.4 Задание на исследование

1 Исследовать регулировочную характеристику управляемого выпрямителя при различных фильтрах. Определить коэффициенты пульсаций напряжения на нагрузке и построить графические зависимости

$$U_H = f(\alpha), \quad K_H = f(\alpha).$$

2 Исследовать нагрузочную характеристику управляемого выпрямителя при различных фильтрах и углах управления. Определить выходное сопротивление и построить графические зависимости

$$U_H = f(I_H), \quad R_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha).$$

3 Зарисовать осциллограммы напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя с отображением фазовых соотношений между сигналами при различных фильтрах и углах управления.

11.5 Порядок выполнения работы

11.5.1 Подготовка к работе

Изучить описание лабораторной установки, ознакомиться на макете с органами управления и регулирования и с используемыми контрольно-измерительными приборами.

Доложить преподавателю о готовности к выполнению работы.

С разрешения преподавателя включить лабораторную установку тумблером «СЕТЬ» на лицевой панели.

Включить осциллограф.

11.5.2 Исследование регулировочной характеристики управляемого выпрямителя

Переключатель ФИЛЬТР поставить в положение «Lin», переключатель УПРАВЛЕНИЕ – в положение «10°». Резистором НАГРУЗКА установить максимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру РА1. К контрольным гнездам XS7 – XS8 подсоединить входные щупы осциллографа.

Переключателем УПРАВЛЕНИЕ ступенчато изменять значение угла управления от 10° до 170° . При каждом фиксированном значении угла управления измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром PV1 и определить значение напряжения пульсаций с помощью осциллографа.

Значение напряжения пульсаций определяется как полуразмах изображения сигнала на экране осциллографа по формуле

$$U_{\text{пр}} = k \frac{m}{2}, \text{ В}, \quad (11.3)$$

где m – количество клеток по вертикали, занимаемых изображением сигнала на экране осциллографа;

k – чувствительность осциллографа по оси «Y», В/дел.

Результаты измерений занести в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Регулировочные характеристики управляемого выпрямителя

Фильтр	Показатель	А						
		10°	45°	60°	90°	120°	135°	170°
Lin	$U_{\text{н}}, \text{ В}$							
	$U_{\text{пр}}, \text{ В}$							
	$K_{\text{п}}$							
L+VD	$U_{\text{н}}, \text{ В}$							
	$U_{\text{пр}}, \text{ В}$							
	$K_{\text{п}}$							
L	$U_{\text{н}}, \text{ В}$							
	$U_{\text{пр}}, \text{ В}$							
	$K_{\text{п}}$							

Повторить операции и измерения по пункту 11.5.2 при положениях переключателя ФИЛЬТР, L + VD и L.

Результаты измерений занести в таблицу 11.1.

По данным таблицы 11.1 рассчитать коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке для различных фильтров и углов управления по формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{н}}}. \quad (11.4)$$

Расчетные значения коэффициента пульсаций занести в таблицу 11.1.

По данным таблицы 11.1 построить графические зависимости $U_{\text{н}} = f(\alpha)$, $K_{\text{п}} = f(\alpha)$.

11.5.3 Исследование нагрузочной характеристики управляемого выпрямителя

Переключатель ФИЛЬТР поставить в положение «Lin», переключатель УПРАВЛЕНИЕ – в положение «45°». Резистором НАГРУЗКА установить минимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру РА1.

Резистором НАГРУЗКА изменять величину тока нагрузки от минимального до максимального значения, контролируя его миллиамперметром РА1, с шагом 10...50 мА при углах управления $\alpha < 90^\circ$ и с шагом 10...20 мА при углах управления $\alpha > 90^\circ$. При каждом фиксированном значении тока нагрузки измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром PV1.

Результаты измерений занести в таблицу 11.2.

Таблица 11.2 – Нагрузочная характеристика управляемого выпрямителя

Фильтр	α , град	Показатель	Результаты измерений				$R_{\text{ВЫХ}}$, Ом
Lin	45°	I_{H} , мА					
		U_{H} , В					
	135°	I_{H} , мА					
		U_{H} , В					
L+VD	45°	I_{H} , мА					
		U_{H} , В					
	135°	I_{H} , мА					
		U_{H} , В					
L	45°	I_{H} , мА					
		U_{H} , В					
	60°	I_{H} , мА					
		U_{H} , В					

Повторить операции и измерения при положении переключателя УПРАВЛЕНИЕ «135°».

Провести операции и измерения при положениях переключателя ФИЛЬТР, L + VD и L.

Для фильтра L измерения провести при углах управления 45° и 60°.

Результаты измерений занести в таблицу 11.2.

По данным таблицы 11.2 определить выходное сопротивление управляемого выпрямителя по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{H}}}{\Delta I_{\text{H}}}, \quad (11.5)$$

где ΔU_H , ΔI_H – разность между соседними измеренными значениями напряжения на нагрузке и тока нагрузки соответственно.

Расчетные значения выходного сопротивления занести в соответствующие графы таблицы 11.2. Построить графические зависимости $U_H = f(I_H)$, $R_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$.

11.5.4 Снятие осциллограмм

На максимальном токе нагрузки зарисовать осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы управляемого выпрямителя с отображением фазовых соотношений между сигналами на углах управления 45° и 135° для фильтров L_{in} , $L + VD$ и 45° , 60° – для фильтра L . Для этого входные щупы двухлучевого осциллографа попарно подсоединять к контрольным гнездам XS1–XS3/XS2–XS6; XS1–XS3/XS4–XS6; XS4–XS3/XS5–XS6.

Форма графического оформления осциллограмм напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя приведена на рисунке 11.8.

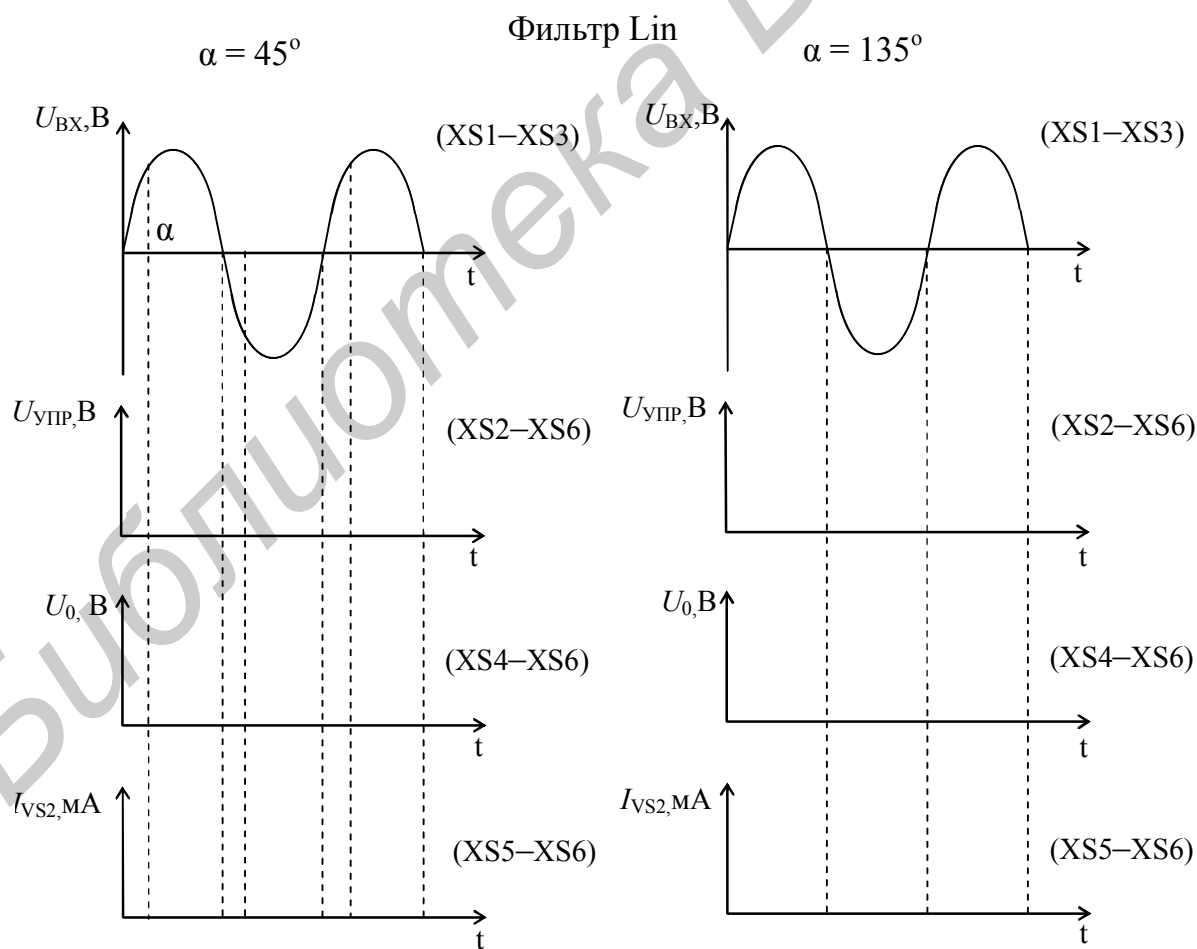


Рисунок 11.8 – Осциллограммы напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя

11.5.5 *Завершение работы*

Резистором НАГРУЗКА установить минимальное значение тока нагрузки.

Доложить преподавателю о завершении работы и показать результаты измерений.

С разрешения преподавателя отключить лабораторную установку тумблером СЕТЬ на лицевой панели.

Отсоединить от лабораторной установки входные щупы осциллографа и отключить осциллограф.

11.6 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Принципиальная схема лабораторной установки.
- 3 Таблицы с результатами измерений и расчетов.
- 4 Графики зависимостей, указанные в подразделе 11.5.
- 5 Осциллограммы пульсаций выходного напряжения управляемого выпрямителя.
- 6 Краткая характеристика результатов работы и выводы по ней.

11.7 Контрольные вопросы

- 1 На каких элементах строятся управляемые выпрямители?
- 2 Поясните устройство и принцип действия тиристора.
- 3 Назовите основные параметры тиристоры.
- 4 Как работает простейший управляемый выпрямитель?
- 5 Какие методы управления управляемыми выпрямителями вы знаете?
- 6 Как работает емкостный фазовращатель?
- 7 Что такое регулировочная характеристика выпрямителя?
- 8 Какие вы знаете режимы работы управляемого выпрямителя при работе на нагрузку? С индуктивной реакцией?
- 9 При каких условиях режим непрерывного тока в дросселе нарушается?
- 10 Какой характер нагрузки представляет собой управляемый выпрямитель для сети переменного тока?
- 11 Почему КПД управляемого выпрямителя выше, чем КПД неуправляемого выпрямителя при регулировке выходного напряжения?
- 12 Как влияет величина угла регулирования на коэффициент пульсации выходного напряжения?

Лабораторная работа №12
СТАБИЛИЗАТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА
С НЕПРЕРЫВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

12.1 Цель работы

Изучить устройство и принцип действия параметрических и компенсационных стабилизаторов напряжения и тока с непрерывным регулированием. Усвоить методы измерения их основных характеристик.

Исследовать экспериментально характеристики и режимы работы стабилизаторов напряжения и тока.

12.2 Краткие теоретические сведения

Качество работы электронных устройств во многом определяется постоянством питающих их напряжения и тока. Основными причинами изменения напряжения (тока) питания являются непостоянство напряжения первичного источника питания, сопротивления нагрузки, температуры окружающей среды.

Напряжение промышленных сетей переменного тока в соответствии с ГОСТ 13109 – 97 может отклоняться от номинального значения в пределах (–15 %; +5 %). Для нормального функционирования устройств связи изменения напряжения (тока) электропитания не должны превышать $(5 \pm 0,1) \%$ номинального значения. Требования к постоянству питающего напряжения (тока) зависят от конкретного назначения устройств связи.

Поддержание напряжения (или тока) на выходе электропитающих установок с заданной степенью точности при действии различных дестабилизирующих факторов осуществляется с помощью специальных устройств – *стабилизаторов напряжения (или тока)*.

Стабилизаторы автоматически подавляют как медленные, так и быстрые изменения питающего напряжения (тока), осуществляя при этом наряду со стабилизацией сглаживание пульсаций напряжения (тока).

Основными дестабилизирующими факторами, вызывающими отклонение напряжения на выходе стабилизаторов напряжения от номинального значения при постоянстве температуры окружающей среды $T_{\text{ср}}$ являются изменения величины входного напряжения $U_{\text{вх}}$ или тока $I_{\text{н}}$ нагрузки. Поэтому напряжение $U_{\text{вых}}$ на выходе стабилизатора можно трактовать как функцию входного напряжения $U_{\text{вх}}$ и тока нагрузки $I_{\text{н}}$:

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}, I_{\text{н}}). \quad (12.1)$$

Полный дифференциал этой функции, предполагая независимость переменных $U_{\text{ВХ}}$ и $I_{\text{Н}}$, записывается в виде

$$dU_{\text{ВЫХ}} = \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial U_{\text{ВХ}}} \right) dU_{\text{ВХ}} + \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial I_{\text{Н}}} \right) dI_{\text{Н}} . \quad (12.2)$$

Разделив обе части равенства (12.2) на $U_{\text{ВЫХ}}$, а также умножив первое слагаемое правой части на $U_{\text{ВХ}}/U_{\text{ВХ}}$, а второе слагаемое – на $I_{\text{Н}}/I_{\text{Н}}$, получим

$$\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial U_{\text{ВХ}}} \right) \cdot \frac{dU_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} + \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial I_{\text{Н}}} \right) \cdot \frac{dI_{\text{Н}}}{I_{\text{Н}}} \cdot \frac{I_{\text{Н}}}{U_{\text{ВЫХ}}} . \quad (12.3)$$

Если положить $I_{\text{Н}} = \text{const}$, т. е. $dI_{\text{Н}} = 0$, то, пользуясь последним соотношением, можно относительное приращение $dU_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВЫХ}}$ напряжения на выходе стабилизатора выразить через относительное приращение $dU_{\text{ВХ}}/U_{\text{ВХ}}$ напряжения на входе в виде

$$\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \left(\frac{1}{K_{\text{СТ}U}} \right) \cdot \frac{dU_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} , \quad (12.4)$$

где $K_{\text{СТ}U}$ – коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения по входному напряжению, равный

$$K_{\text{СТ}U} = \left(\frac{\partial U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \right) \Big/ \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right) . \quad (12.5)$$

Коэффициент стабилизации $K_{\text{СТ}U}$ здесь показывает, во сколько раз при неизменном токе нагрузки $I_{\text{Н}} = \text{const}$ изменения напряжения на выходе стабилизатора изменяется меньше, чем на входе. Чем больше значение $K_{\text{СТ}U}$, тем качество стабилизатора напряжения выше.

Если в соотношении (12.3) считать постоянным входное напряжение $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$ ($dU_{\text{ВХ}} = 0$), то получим

$$\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \xi \cdot \frac{dI_{\text{Н}}}{I_{\text{Н}}} , \quad (12.6)$$

где

$$\xi = \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial I_{\text{Н}}} \right) / \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{Н}}} = \frac{R_{iU}}{R_{\text{Н}}}. \quad (12.7)$$

Здесь $R_{iU} = \partial U_{\text{ВЫХ}} / \partial I_{\text{Н}}$ – внутреннее (выходное) сопротивление стабилизатора напряжения;

$R_{\text{Н}} = U_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{Н}}$ – сопротивление нагрузки.

Отношение внутреннего сопротивления стабилизатора напряжения к сопротивлению его нагрузки $\xi = R_{iU} / R_{\text{Н}}$ определяет, во сколько раз относительное изменение выходного напряжения $dU_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ}}$ меньше вызвавшего его относительного изменения тока нагрузки $dI_{\text{Н}} / I_{\text{Н}}$ при постоянном входном напряжении $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$. Чем меньше это отношение, тем меньше влияет изменение тока нагрузки на величину выходного напряжения.

Таким образом, коэффициент стабилизации $K_{\text{СТ}U}$ и внутреннее (выходное) сопротивление R_{iU} являются основными показателями качества работы стабилизатора напряжения.

В рассмотренных соотношениях, определяющих $K_{\text{СТ}U}$ и R_{iU} , фигурируют бесконечно малые приращения напряжения и тока. Пользуясь линейным приближением зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}}, I_{\text{Н}})$, значения $K_{\text{СТ}U}$ и R_{iU} на практике можно определять через конечные приращения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$, $\Delta U_{\text{ВХ}}$ и $\Delta I_{\text{Н}}$ по формулам

$$K_{\text{СТ}U} = \left(\frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \right) / \left(\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right) \quad (\text{при } I_{\text{Н}} = \text{const}), \quad (12.8)$$

и

$$R_{iU} = |\Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{Н}}| \quad (\text{при } U_{\text{ВХ}} = \text{const}). \quad (12.9)$$

В последнем соотношении применен знак модуля, поскольку приращения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ и $\Delta I_{\text{Н}}$ имеют противоположные знаки.

Качество работы стабилизатора напряжения иногда характеризуют величиной δ относительной нестабильности его выходного напряжения (статической ошибкой), равной отношению максимально возможного приращения выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ max}}$ к номинальному значению напряжения $U_{\text{ВЫХ. ном}}$. Величина δ определяется в процентах:

$$\delta = |\Delta U_{\text{ВЫХ max}} / \Delta U_{\text{ВЫХ. ном}}| \cdot 100 \%, \quad (12.10)$$

Для стабилизаторов тока ток нагрузки I_H можно рассматривать как функцию входного напряжения $U_{ВХ}$ и сопротивления нагрузки R_H :

$$I_H = f(U_{ВХ}, R_H). \quad (12.11)$$

Записав полный дифференциал этой функции и выполнив действия, аналогичные описанным выше, для стабилизатора тока можно определить следующие основные параметры:

– коэффициент стабилизации тока по входному напряжению $K_{СТИ}$ при постоянном сопротивлении нагрузки

$$K_{СТИ} = \left(\frac{\Delta U_{ВХ}}{U_{ВХ}} \right) / \left(\frac{\Delta I_H}{I_H} \right) \quad (\text{при } R_H = \text{const}); \quad (12.12)$$

– внутреннее (выходное) сопротивление R_{iI} стабилизатора тока

$$R_{iI} = \left| \Delta U_{ВЫХ} / \Delta I_H \right| \quad (\text{при } U_{ВХ} = \text{const}). \quad (12.13)$$

При этом оказывается, что

$$\frac{\Delta I_H}{I_H} = \left(\frac{R_H}{R_{iI}} \right) / \left(\frac{\Delta R_H}{R_H} \right) \quad (\text{при } U_{ВХ} = \text{const}). \quad (12.14)$$

Последнее выражение показывает, что относительное изменение тока нагрузки $\Delta I_H / I_H$ при неизменном напряжении питания $U_{ВХ} = \text{const}$ во столько раз меньше относительного изменения сопротивления нагрузки $\Delta R_H / R_H$, во сколько сопротивление нагрузки меньше внутреннего сопротивления R_{iI} стабилизатора тока.

Таким образом, чем больше R_{iI} при заданном сопротивлении R_H нагрузки, тем выше качество стабилизации тока (сравните со случаем стабилизации напряжения!).

Важной характеристикой стабилизаторов напряжения и тока является их коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ВХ}} = \frac{P_H}{P_{П} + P_H}, \quad (12.15)$$

где $P_H = U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_H$ – мощность, отдаваемая в нагрузку;

P_{Π} – мощность, рассеиваемая в элементах стабилизатора, т. е. мощность потерь электрической энергии, являющаяся «платой» за достигаемое улучшение его качества.

Помимо рассмотренных характеристик, для оценки работы стабилизаторов напряжения и тока могут использоваться и некоторые другие показатели качества.

К таким показателям относятся:

– коэффициент сглаживания K_{Ci} пульсаций с частотами в пределах от f_{\min} и f_{\max} , который для стабилизатора постоянного напряжения определяется по формуле

$$K_{Ci} = \left(\frac{U_{\text{ВХ}i}}{U_{\text{ВХ}}} \right) / \left(\frac{U_{\text{ВЫХ}i}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right), \quad (12.16)$$

где $U_{\text{ВХ}i}$ и $U_{\text{ВЫХ}i}$ – среднеквадратические или амплитудные значения i -й гармонической составляющей пульсаций напряжения на входе и выходе стабилизатора;

$U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ – постоянные составляющие напряжения на входе и выходе;

– температурный коэффициент γ стабилизатора, который для стабилизатора напряжения равен

$$\gamma = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta T} \text{ (при } U_{\text{ВХ}} = \text{const}, I_H = \text{const}), \quad (12.17)$$

где ΔT – изменение температуры окружающей среды, вызвавшее изменение $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ выходного напряжения.

Как и для любого другого электротехнического устройства, важными качествами для стабилизаторов тока (напряжения) являются их масса, габариты, стоимость, надежность, простота изготовления, настройки и эксплуатации, электромагнитная совместимость с питаемыми устройствами.

Каждый стабилизатор характеризуется также параметрами режима эксплуатации. Так, например, для стабилизатора напряжения такими параметрами могут служить:

– диапазон возможного регулирования выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ} \min} \dots U_{\text{ВЫХ} \max}$;

– максимально допустимый ток нагрузки $I_{H \max}$;

– диапазон допустимых изменений входного напряжения
 $U_{\text{вх min}} \dots U_{\text{вх max}}$.

Существуют два основных способа стабилизации напряжения или тока электропитания: параметрический и компенсационный.

Работа параметрических стабилизаторов напряжения (тока) основана на использовании элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой (рисунок 12.1). Элемент с вольт-амперной характеристикой (ВАХ), показанной на рисунке 12.1, а, обеспечивает малое изменение напряжения ΔU на своих зажимах при значительном изменении ΔI протекающего по нему тока. Такой элемент может быть использован для стабилизации напряжения на параллельно включенном с ним сопротивлении нагрузки (рисунок 12.3). Для элемента с ВАХ, приведенной на рисунке 12.1, б, характерно незначительное изменение величины тока, протекающего через элемент, при изменении напряжения на элементе в широких пределах ΔU . Такой элемент, например, так называемый бареттер, можно использовать для стабилизации тока в последовательно соединенном с ним сопротивлении нагрузки.

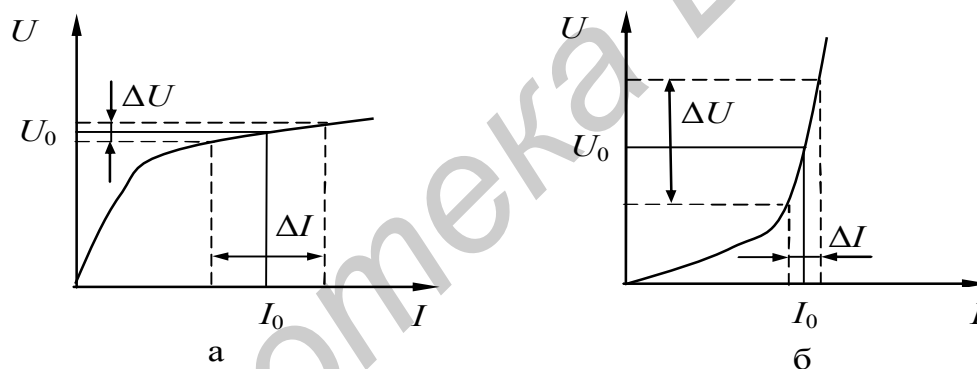
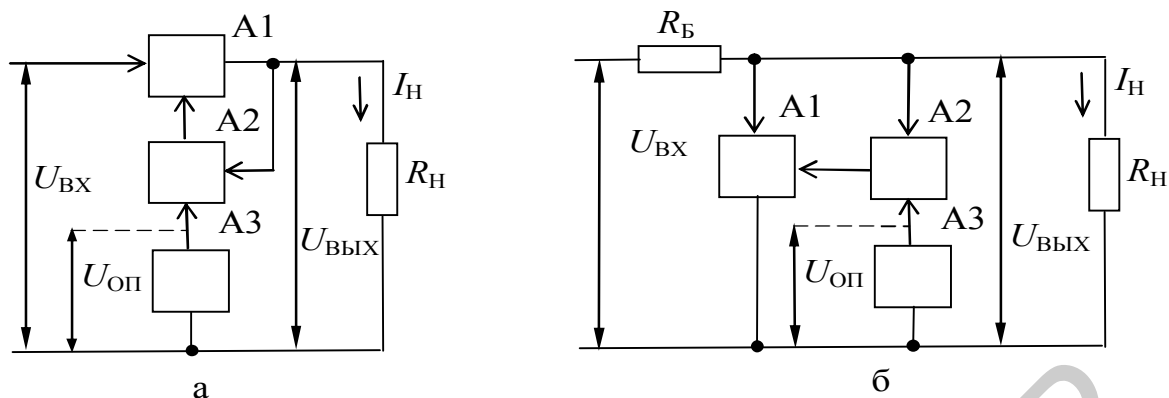


Рисунок 12.1 – Вольт-амперные характеристики стабилизаторов

Компенсационные стабилизаторы напряжения и тока по принципу работы подразделяются на два основных типа: непрерывного и ключевого действия.

Стабилизаторы напряжения непрерывного действия (рисунок 12.2), исследуемые в данной лабораторной работе, представляют собой линейные системы непрерывного автоматического регулирования с отрицательной обратной связью. Основными их функциональными узлами являются регулирующий элемент (РЭ), с помощью которого уровень выходного напряжения поддерживается неизменным, блок сравнения и усиления постоянного тока (БСиУПТ); источник опорного (эталонного) напряжения (ИОН).



A1 – регулирующий элемент (РЭ), A2 – блок сравнения и усиления постоянного тока (БСиУПТ), A3 – источник опорного напряжения (ИОН)

Рисунок 12.2 – Структурные схемы компенсационных стабилизаторов напряжения непрерывного действия

В рабочем режиме выходное напряжение стабилизатора или часть его сравнивается с напряжением опорного источника. Сигнал рассогласования, полученный в результате сравнения, усиливается и подается на РЭ. В зависимости от уровня усиливаемого сигнала рассогласования внутреннее сопротивление РЭ меняется таким образом, что напряжение на выходе стабилизатора остается постоянным с определенной степенью точности.

По способу включения РЭ по отношению к сопротивлению нагрузки и источнику входного напряжения стабилизаторы подразделяются на последовательные (рисунок 12.2, а) и параллельные (рисунок 12.2, б). В параллельных стабилизаторах к упомянутым функциональным узлам добавляется балластное сопротивление R_B .

На практике наиболее широкое распространение получили стабилизаторы с последовательным включением РЭ как обладающие высокими стабилизирующими свойствами и сравнительно высоким КПД (до 70 %). В таких стабилизаторах регулирующий элемент включен последовательно с нагрузкой и к нему приложено напряжение, равное разности входного и выходного напряжений (рисунок 12.2, а). При коротком замыкании нагрузки все напряжение источника прикладывается к регулируемому элементу и на нем выделяется максимальная мощность. При холостом ходе регулирующий элемент работает при малых токах, что без принятия специальных мер приводит к повышению выходного напряжения. Поэтому в стабилизаторах с последовательным включением РЭ необходима защита по току и напряжению.

Однокаскадная схема параметрического стабилизатора напряжения параллельного типа. Простейшая схема стабилизатора напряжения без использования усилительных приборов представлена на рисунке 12.3, а.

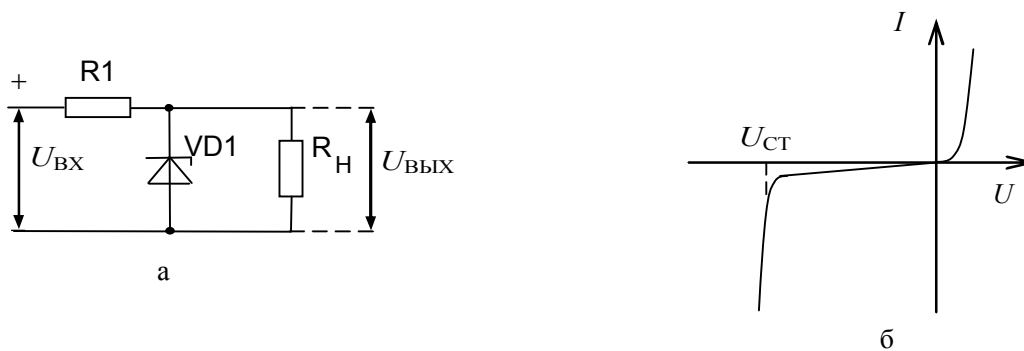


Рисунок 12.3 – Принципиальная схема простейшего параметрического стабилизатора напряжения и вольт-амперная характеристика стабилитрона

Эта схема соответствует структуре параллельных стабилизаторов, хотя регулирующий и усилительные элементы отсутствуют, а стабилитрон VD совмещает функции опорного и регулирующего элементов. Стабилитрон подбирают по величине выходного напряжения ($U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СТ}}$), а его ток задается резистором R1. Для маломощных стабилитронов ток выбирается в пределах 5 – 30 мА.

Принцип работы стабилизатора заключается в том, что при включении стабилитрона в обратном направлении (рисунок 12.3, а) при определенных напряжениях начинается электрический пробой, характеризуемый тем, что в области пробы при данной температуре изменение тока в определенных пределах практически не меняет напряжения пробы $U_{\text{СТ}}$ (рисунок 12.3, б).

Если в этом режиме ограничить при помощи резистора ток пробы таким образом, чтобы мощность, выделяемая в диоде, не превосходила заданный предел, дальше которого начинается тепловой пробой и необратимое разрушение р-п-перехода, то состояние пробы может продолжаться бесконечно долго (десятки тысяч часов). Указанный процесс является обратимым и может повторяться множество раз при выключении и включении диода.

Двухкаскадный параметрический термокомпенсированный стабилизатор напряжения. Диодным однокаскадным стабилизаторам свойственны сравнительно большие относительные нестабильности как следствие сравнительно больших выходных сопротивлений, определяемых дифференциальным сопротивлением стабилитрона r_d ($R_{\text{ВЫХ}} \approx r_d$) и малых коэффициентов стабилизации. Простой способ повысить коэффициент стабилизации при прочих равных условиях состоит в использовании каскадных схем (рисунок 12.5). Идея таких схем очевидна, поскольку входное напряжение второго каскада стабилизировано первым каскадом.

Второй термокомпенсированный каскад стабилизатора собран на резисторе R2 и стабилитронах VD2 – VD5.

Для стабилитрона, как и для всякого полупроводникового прибора, характерна зависимость параметров от температуры окружающей среды. С изменением температуры сдвигается вольт-амперная характеристика стабилитрона, что приводит к изменению величины падения напряжения на диоде. Эти изменения напряжения оцениваются температурным коэффициентом напряжения (ТКН).

Известно, что при обратном включении стабилитрона и напряжении стабилизации менее 7 В ТКН имеет отрицательное значение, а при напряжении стабилизации более 7 В – положительное. При прямом включении все стабилитроны имеют отрицательное значение ТКН [1].

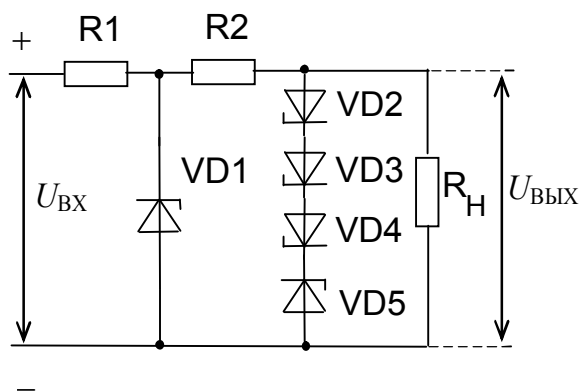


Рисунок 12.4 – Двухкаскадный компенсационный стабилизатор напряжения

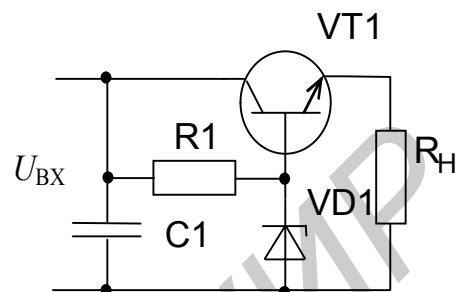


Рисунок 12.5 – Простейший параметрический стабилизатор напряжения

Известно, что при обратном включении и напряжении стабилизации менее 7 В ТКН имеет отрицательное значение, а при напряжении стабилизации более 7 В – положительное. При прямом включении все стабилитроны имеют отрицательное значение ТКН [1].

При включении стабилитронов типа КС175 – КС213 в обратном направлении (режим стабилизации) ТКН положителен и составляет $(0,007 - 0,095) \%/^{\circ}\text{C}$, при включении их в прямом направлении ТКН отрицателен и составляет $(0,025 - 0,03) \%/^{\circ}\text{C}$.

Поэтому для компенсации падения напряжения на стабилитроне КС182А (VD5) от изменения температуры окружающей среды включено три таких же прибора в прямом направлении (VD2 – VD4). Диодные стабилизаторы напряжения используются главным образом в качестве источников опорного напряжения для более мощных – транзисторных стабилизаторов напряжения и тока или в качестве источника питания для слаботочных схем, например цепей смещения.

Простейший компенсационный стабилизатор напряжения последовательного типа. Однокаскадный компенсационный стабилизатор напряжения на транзисторе (рисунок 12.5) не имеет преимуществ перед диодным стабилизатором (за исключением выходной мощности). Эта схема является практически эмиттерным повторителем, у которого потенциал базы стабилизирован опорным диодом VD1 и равен U_{CT} , а напряжение коллекторного питания (U_{BX}) меняется в определенных пределах.

Типовая схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа. Типовая схема компенсационного стабилизатора напряжения, реализуемого в интегральном исполнении, представлена на рисунке 12.6.

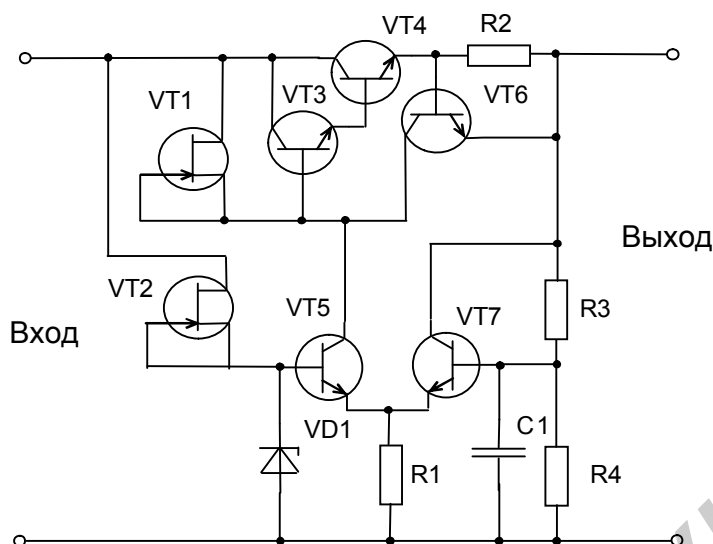


Рисунок 12.6 – Типовая схема компенсационного стабилизатора напряжения

Регулирующий элемент выполнен на транзисторах VT3 и VT4, включенных по схеме Дарлингтона. Опорный источник напряжения образован транзистором VT2 и стабилитроном VD1. Использование в качестве балластного сопротивления полевого транзистора VT2 повышает стабильность тока, протекающего через стабилитрон VD1, и тем самым – стабильность напряжения опорного источника $U_{ст}$.

Блок сравнения и усиления выполнен в виде дифференциального каскада на транзисторах VT5 и VT7. Полевой транзистор VT1 повышает сопротивление нагрузки в цепи коллектора VT5. Это увеличивает коэффициент передачи в цепи обратной связи и стабильность выходного напряжения стабилизатора. Выходное напряжение поступает на вход блока сравнения и усиления через делитель напряжения на резисторах R3 и R4. Выходное напряжение зависит от соотношения сопротивлений указанных резисторов

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} \left(1 + \frac{R3}{R4} \right).$$

Схема защиты от короткого замыкания по выходу содержит резистор R2 и транзистор VT6. Когда ток нагрузки, равный току в резисторе R2, станет равным значению, при котором напряжение на резисторе достигнет порога открывания транзистора VT6 (для кремниевого транзистора это приблизительно 0,5 В), последний откроется и часть тока коллектора транзистора VT5 потечет в этот транзистор, уменьшая ток регулируемого элемента. Таким образом, ток нагрузки ограничивается значением

$$I_{\text{н max}} \approx 0,5/R2.$$

12.3 Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 12.7.

Напряжение сети 230 В, 50 Гц через переключатель SA1 «Сеть» и плавкий предохранитель FU1 поступает на вход лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) T1, выход которого подключен к сетевому понижающему трансформатору T2. Наличие напряжения на лабораторной установке контролируется индикатором HL1.

Вторичная обмотка сетевого понижающего трансформатора T2 подсоединена к двухполупериодному мостовому выпрямителю на элементах VD1...VD4, C1. Значение постоянного напряжения на выходе выпрямителя измеряется вольтметром постоянного тока PV1. Значение тока, потребляемого стабилизаторами, измеряется миллиамперметром постоянного тока PA1.

Подключение стабилизаторов к выпрямителю и нагрузке осуществляется переключателем SA2 «Стабилизатор», положения которого соответствуют следующим схемам включения:

- «ПСН1» – однокаскадный параметрический стабилизатор напряжения;
- «ПСН2» – двухкаскадный параметрический стабилизатор напряжения;
- «КСН» – компенсационный стабилизатор напряжения;
- «КСТ» – компенсационный стабилизатор тока.

Однокаскадный параметрический стабилизатор напряжения ПСН1 состоит из балластного резистора R1 и последовательно соединенных полупроводниковых стабилитронов VD7...VD10. Нагрузкой стабилизатора ПСН1 являются последовательно соединенные резисторы R12...R15, R18, R19.

Двухкаскадный параметрический стабилизатор напряжения ПСН2 построен на основе стабилизатора тока, состоящего из балластного резистора R2, токостабилизирующего транзистора VT1 и последовательно соединенных стабилитронов VD11, VD12. Стабилизатор напряжения ПСН1 используется при этом в качестве источника опорного напряжения для токостабилизирующего транзистора VT1. Питание стабилизатора ПСН1 в этом случае осуществляется через диод VD5. Нагрузкой стабилизатора ПСН2 являются последовательно соединенные резисторы R13...R15, R18, R19.

Компенсационный стабилизатор напряжения КСН построен на транзисторах VT2...VT7 по схеме с последовательным включением регулирующего элемента. В качестве регулирующего элемента используется составной транзистор, образованный транзисторами одного типа проводимости VT3, VT4.

Сравнение и усиление сигнала рассогласования осуществляется дифференциальным каскадом на транзисторах VT6, VT7. Напряжение на базе транзистора VT6 стабилизировано стабилитроном VD13, питание которого осуществляется выходным напряжением стабилизатора через резистор R7.

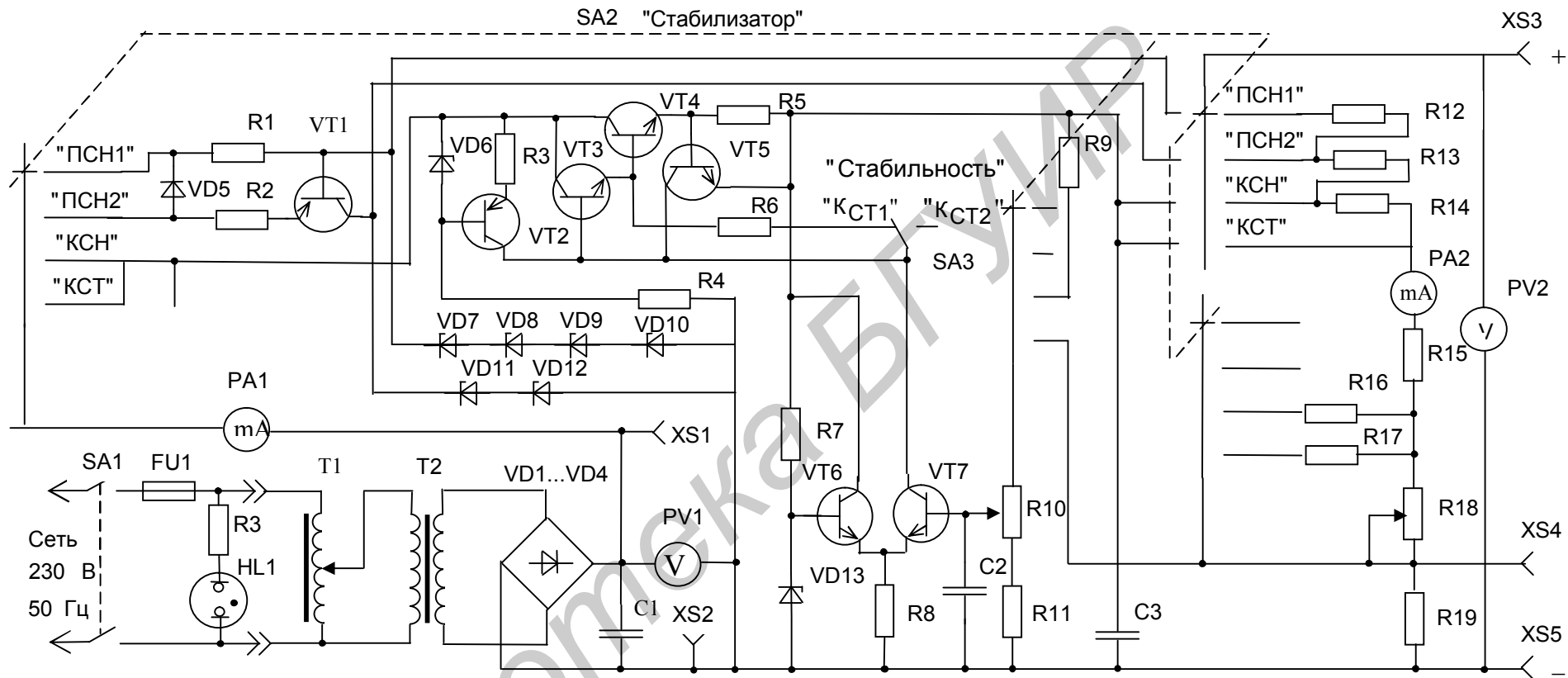


Рисунок 12.7 – Стабилизаторы напряжения и тока с непрерывным регулированием.
Схема электрическая принципиальная

На базу транзистора VT7 поступает выходное напряжение стабилизатора через делитель на резисторах R9...R11. Полученный в результате сравнения сигнал рассогласования усиливается транзистором VT7 и поступает на базу транзистора VT3.

Сигнал рассогласования изменяет сопротивление регулирующих транзисторов VT3, VT4, в результате чего изменяется падение напряжения на них, а выходное напряжение стабилизатора устанавливается на определенном уровне и поддерживается практически постоянным при изменениях входного напряжения и сопротивления нагрузки.

Выходное напряжение стабилизатора напряжения можно регулировать в определенных пределах переменным резистором R10 «Регулировка».

Точность поддержания выходного напряжения стабилизатора зависит от величины коэффициента передачи цепи обратной связи, определяемой усиительными свойствами транзисторов VT6, VT7 дифференциального каскада и регулирующих транзисторов VT3, VT4. Для повышения коэффициента передачи цепи обратной связи и стабильности выходного напряжения питание усиительного транзистора VT7 осуществляется через стабилизатор тока, построенный на элементах VD6, VT2, R3, R4. Стабилизатор тока, обладая большим выходным динамическим сопротивлением, значительно повышает коэффициент усиления по напряжению усиительного транзистора VT7.

Стабильность выходного напряжения компенсационного стабилизатора можно ступенчато изменять, изменяя коэффициент передачи цепи обратной связи переключателем SA3 «Стабильность». В режиме «КСТ1» переход база – эмиттер транзистора VT3 зашунтирован низкоомным резистором R6 и стабильность выходного напряжения определяется в основном усиительными свойствами транзистора VT4. Режим «КСТ2» характеризуется повышенной стабильностью выходного напряжения, определяемой усиительными свойствами обоих транзисторов VT3, VT4.

Элементы VT5, R5 образуют быстродействующую электронную схему ограничения тока и защиты транзисторов VT3, VT4 от перегрузок.

Конденсатор C3 уменьшает пульсации выходного напряжения. Конденсатор C2 устраняет самовозбуждения стабилизатора напряжения и паразитную генерацию на высоких частотах.

Нагрузкой компенсационного стабилизатора напряжения являются последовательно соединенные резисторы R14, R15, R18, R19. При этом параллельно переменному резистору R18 подключается постоянный резистор R16.

Компенсационный стабилизатор тока КСТ построен на основе компенсационного стабилизатора напряжения. Перевод компенсационного стабилизатора из режима стабилизации напряжения на нагрузке в режим стабилизации тока нагрузки достигается подключением делителя смещения на резисторах R10, R11 к измерительному резистору R19, соединенному последовательно с нагрузкой. В результате компенсационный стабилизатор переходит в режим стабилизации напряжения на измерительном резисторе R19. Так как сопротивление измерительного резистора R19 постоянно, ток, протекающий через резистор R19

и последовательно соединенную с ним нагрузку, также постоянен. Величину тока стабилизации можно регулировать в определенных пределах переменным резистором R10 «Регулировка».

Нагрузкой исследуемых стабилизаторов является резистивный делитель, состоящий из постоянных резисторов R12...R17, R19 и переменного резистора R18. Переменным резистором R18 «Нагрузка» устанавливается ток нагрузки стабилизаторов напряжения ПСН1, ПСН2, КСН и напряжение нагрузки стабилизатора тока КСТ.

Значение тока нагрузки стабилизаторов измеряется миллиамперметром постоянного тока РА2. Значение напряжения на нагрузке измеряется вольтметром постоянного тока РВ2.

Контрольные гнезда XS1–XS2, XS3–XS4, XS4–XS5 предназначены для визуального контроля и измерения сигналов на входе и выходе стабилизаторов посредством осциллографа.

12.4 Задание на исследование

1 Исследовать нестабильность выходного напряжения параметрических стабилизаторов напряжения. Построить графические зависимости $U_H = f(U_{ВХ})$ и определить коэффициенты стабилизации по напряжению.

2 Исследовать нагрузочную характеристику параметрических стабилизаторов напряжения. Построить графические зависимости $U_H = f(I_H)$ и определить внутреннее (выходное) сопротивление.

3 Определить КПД и коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке параметрических стабилизаторов напряжения.

4 Исследовать нестабильность выходного напряжения компенсационного стабилизатора напряжения в двух режимах стабилизации. Построить графические зависимости $U_H = f(U_{ВХ})$ и определить коэффициенты стабилизации по напряжению.

5 Исследовать нагрузочную характеристику компенсационного стабилизатора напряжения в двух режимах стабилизации. Построить графические зависимости $U_H = f(I_H)$ и определить внутреннее (выходное) сопротивление.

6 Определить КПД и коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке компенсационного стабилизатора напряжения в двух режимах стабилизации.

7 Исследовать нестабильность тока нагрузки компенсационного стабилизатора тока в двух режимах стабилизации. Построить графические зависимости $I_H = f(U_{ВХ})$ и определить коэффициенты стабилизации по току.

8 Исследовать нагрузочную характеристику компенсационного стабилизатора тока в двух режимах стабилизации. Построить графические зависимости $I_H = f(R_H)$ и определить внутреннее (выходное) сопротивление.

9 Определить КПД и коэффициент пульсаций тока нагрузки компенсационного стабилизатора тока в двух режимах стабилизации.

12.5 Порядок выполнения работы

12.5.1 Подготовка к работе

Изучить описание лабораторной установки, ознакомиться на макете с органами управления и регулирования и с используемыми контрольно-измерительными приборами.

Доложить преподавателю о готовности к выполнению работы.

С разрешения преподавателя установить минимальное выходное напряжения ЛАТРа, повернув регулятор против часовой стрелки до упора, и включить лабораторную установку тумблером СЕТЬ на лицевой панели.

Включить осциллограф и электронный вольтметр.

12.5.2 Исследование неустойчивости выходного напряжения параметрических стабилизаторов напряжения

Переключатель СТАБИЛИЗАТОР поставить в положение ПСН1. Резистор НАГРУЗКА установить на максимальное значение сопротивления нагрузки. К контрольным гнездам XS3–XS5 подсоединить электронный вольтметр.

Регулятором ЛАТРа изменять входное напряжение в диапазоне 10...50 В с шагом 5...10 В, контролируя его вольтметром PV1. При каждом фиксированном значении входного напряжения измерить напряжение на нагрузке вольтметром PV2 или электронным вольтметром. Результаты измерений занести в таблицу 12.1.

Таблица 12.1 – Неустойчивость выходного напряжения параметрических стабилизаторов напряжения

Стабилизатор	Показатель	$U_{\text{вх}}, \text{В}$					
		10	20	30	40	45	50
ПСН 1	$U_{\text{н}}, \text{В}$						
	$\Delta U_{\text{н}}, \text{В}$						
	$K_{\text{СТ}U}$						
ПСН 2	$U_{\text{н}}, \text{В}$						
	$\Delta U_{\text{н}}, \text{В}$						
	$K_{\text{СТ}U}$						

Установить переключатель СТАБИЛИЗАТОР в положение ПСН2 и повторить указанные выше операции и измерения.

Результаты измерений занести в таблицу 12.1.

По данным таблицы 12.1 построить графические зависимости $U_{\text{н}} = f(U_{\text{вх}})$. Определить диапазон стабилизации и на участке стабилизации рассчитать коэффициенты стабилизации напряжения по формуле

$$K_{стU} \equiv \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} : \frac{\Delta U_{н}}{U_{н}}, \quad (12.18)$$

где $\Delta U_{вх}, \Delta U_{н}$ – разность между соседними измеренными значениями входного напряжения и напряжения на нагрузке соответственно.

12.5.3 Исследование нагрузочной характеристики параметрических стабилизаторов напряжения

Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру PV1. Положения остальных переключателей и ручек управления – по пункту 12.5.2.

Резистором НАГРУЗКА изменять величину сопротивления нагрузки от максимального до минимального, контролируя при этом изменения тока нагрузки по миллиамперметру РА2. При каждом фиксированном значении тока нагрузки с шагом 4 мА измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром PV2 или электронным вольтметром.

Результаты измерений занести в таблицу 12.2.

Таблица 12.2 – Нагрузочная характеристика параметрических стабилизаторов напряжения

Стабилизатор	Показатель	Результаты измерений					R _{ВЫХ} , Ом
ПСН 1	I _н , мА	8	12	16	20	24	
	U _н , В						
ПСН 2	I _н , мА	8	12	16	20	24	
	U _н , В						

Установить переключатель СТАБИЛИЗАТОР в положение ПСН2 и повторить указанные выше операции и измерения.

Результаты измерений занести в таблицу 12.2.

По данным таблицы 12.2 построить графические зависимости $U_{н} = f(I_{н})$ и на линейном участке характеристики определить внутреннее (выходное) сопротивление стабилизаторов напряжения по формуле

$$R_{ввых} = \Delta U_{н} / \Delta I_{н}, \quad (12.19)$$

где $\Delta U_{н}, \Delta I_{н}$ – разность между соседними измеренными значениями напряжения и тока нагрузки соответственно.

Расчетные значения выходного сопротивления стабилизаторов напряжения занести в соответствующие графы таблицы 12.2.

12.5.4 *Определение КПД и коэффициента пульсаций параметрических стабилизаторов напряжения*

Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру PV1. Переключатель СТАБИЛИЗАТОР поставить в положение «ПСН1».

Резистором НАГРУЗКА установить ток нагрузки 16 мА и определить КПД стабилизатора напряжения по формуле

$$\eta_{\text{ПСН1}} = \frac{P_{\text{H}}}{P_{\text{BX}}} = \frac{U_{\text{H}} \cdot I_{\text{H}}}{U_{\text{BX}} \cdot I_{\text{BX}}}. \quad (12.20)$$

Входная мощность и мощность нагрузки определяются по показаниям приборов PV1, PA1 и PV2, PA2 соответственно.

К контрольным гнездам XS3–XS5 подсоединить входные щупы осциллографа и на токе нагрузки 16 мА определить значение напряжения пульсаций как полуразмах изображения сигнала на экране по формуле

$$U_{\text{НПР}} = k \frac{m}{2}, \text{ В}, \quad (12.21)$$

где m – количество клеток по вертикали, занимаемых изображением сигнала на экране осциллографа;

k – чувствительность осциллографа по оси Y , В/дел.

Рассчитать коэффициент пульсаций напряжения по формуле

$$K_{\text{ПН ПСН1}} = \frac{U_{\text{НПР}}}{U_{\text{H}}}. \quad (12.22)$$

Установить переключатель СТАБИЛИЗАТОР в положение «ПСН2» и повторить указанные выше операции и измерения.

12.5.5 *Исследование неустойчивости выходного напряжения компенсационного стабилизатора напряжения*

Переключатель СТАБИЛИЗАТОР поставить в положение «КСН». Резистор НАГРУЗКА установить на минимальное значение сопротивления нагрузки. Переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ поставить в положение «КСТ1». Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру PV1. К контрольным гнездам XS3–XS5 подсоединить электронный вольтметр. Ручкой потенциометра РЕГУЛИРОВКА установить выходное напряжение стабилизатора в пределах 18...36 В по вольтметру PV2.

Регулятором ЛАТРа изменять входное напряжение и провести измерения по методике, изложенной в пункте 12.5.2.

Результаты измерений занести в таблицу 12.3.

Таблица 12.3 – Нестабильность выходного напряжения компенсационного стабилизатора напряжения

Стабильность	Показатель	$U_{ВХ}, В$					
		10	20	30	40	45	50
КСТ1	$U_H, В$						
	$\Delta U_H, В$						
	$K_{СТ1}U$						
КСТ2	$U_H, В$						
	$\Delta U_H, В$						
	$K_{СТ2}U$						

Установить переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ в положение «КСТ2» и повторить указанные выше операции и вычисления.

Результаты измерений занести в таблицу 12.3.

По данным таблицы 12.3 построить графические зависимости $U_H = f(U_{ВХ})$. Определить диапазон стабилизации и на участке стабилизации рассчитать коэффициенты стабилизации по напряжению по формуле (12.18).

12.5.6 Исследование нагрузочной характеристики компенсационного стабилизатора напряжения

Резистор НАГРУЗКА установить на максимальное значение сопротивления нагрузки. Положение остальных переключателей и ручек управления – по пункту 12.5.5.

Резистором НАГРУЗКА изменять величину сопротивления нагрузки от максимального значения до минимального, контролируя при этом изменения тока нагрузки по миллиамперметру РА2. При каждом фиксированном значении тока нагрузки с шагом 20...40 мА измерить величину постоянного напряжения на нагрузке вольтметром РВ2 или электронным вольтметром.

Результаты измерений занести в таблицу 12.4.

Установить переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ в положение «КСТ2» и повторить указанные выше операции и вычисления.

Результаты измерений занести в таблицу 12.4.

По данным таблицы 12.4 построить графические зависимости $U_H = f(U_{ВХ})$ и рассчитать внутреннее (выходное) сопротивление стабилизатора напряжения по формуле (12.19).

Расчетные значение выходного сопротивления занести в соответствующие графы таблицы 12.4.

Таблица 12.4 – Нагрузочная характеристика компенсационного стабилизатора напряжения

Стабильность	Показатель	Результаты измерений				$R_{ВЫХ}$, Ом
КСТ1	I_H , мА					
	U_H , В					
КСТ2	I_H , мА					
	U_H , В					

12.5.7 *Определение КПД и коэффициента пульсаций напряжения компенсационного стабилизатора напряжения*

Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру PV1.

Резистор НАГРУЗКА установить на минимальное значение сопротивления нагрузки. Переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ поставить в положение «КСТ1». Потенциометром РЕГУЛИРОВКА поочередно установить минимальное и максимальное напряжение на нагрузке по вольтметру PV2. Определить в этих режимах КПД компенсационного стабилизатора напряжения и коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке по методике, изложенной в пункте 12.5.4 и формулам (12.20)...(12.22).

Установить переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ в положение «КСТ2» и повторить указанные выше операции и вычисления.

12.5.8 *Исследование неустойчивости тока нагрузки компенсационного стабилизатора тока*

Переключатель СТАБИЛИЗАТОР поставить в положение «КСТ». Резистор НАГРУЗКА установить на максимальное значение сопротивления нагрузки. Переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ поставить в положение «КСТ1». Регулятором ЛАТРа установить максимальное значение входного напряжения по вольтметру PV1. Потенциометром РЕГУЛИРОВКА установить ток нагрузки в пределах 80–150 мА по миллиамперметру РА2. К контрольным гнездам XS4–XS5 подсоединить электронный вольтметр.

Регулятором ЛАТРа изменять входное напряжение в диапазоне 10...50 В с шагом 5...10 В, контролируя его вольтметром PV1. При каждом фиксированном значении входного напряжения измерить электронным вольтметром напряжение $U_{ИЗМ}$ на измерительном резисторе R19.

Результаты измерений занести в таблицу 12.5.

Установить переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ в положение «КСТ2» и повторить указанные выше операции и вычисления.

Результаты измерений занести в соответствующие графы таблицы 12.5.

По данным таблицы 12.5 определить ток нагрузки компенсационного стабилизатора тока в миллиамперах по формуле

$$I_H = \frac{U_{\text{ИЗМ}}}{R19} = \frac{U_{\text{ИЗМ}}}{0,027}, \quad (12.23)$$

где $U_{\text{ИЗМ}}$ – напряжение на измерительном резисторе R19, В;

$R19 = 0,027$ кОм – значение сопротивления измерительного резистора.

Результаты вычислений занести в таблицу 12.5.

Таблица 12.5 – Нестабильность тока нагрузки компенсационного стабилизатора тока

Стабильность	Показатель	$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$					
		10	20	30	40	45	50
КСТ1	$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$						
	$\Delta U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$						
	$I_H, \text{мА}$						
	$\Delta I_H, \text{мА}$						
	$K_{\text{СТ1}I}$						
КСТ2	$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$						
	$\Delta U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$						
	$I_H, \text{мА}$						
	$\Delta I_H, \text{мА}$						
	$K_{\text{СТ2}I}$						

По данным таблицы 12.5 построить графические зависимости $I_H = f(U_{\text{ВХ}})$. Определить диапазон стабилизации на участке стабилизации и рассчитать коэффициенты стабилизации по току по формуле

$$K_{\text{СТ}I} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} / \frac{\Delta I_H}{I_H}, \quad (12.24)$$

где $\Delta U_{\text{ВХ}}$, ΔI_H – разность между соседними измеренными значениями входного напряжения и тока нагрузки соответственно.

12.5.9 Исследование нагрузочной характеристики компенсационного стабилизатора тока

Положения переключателей и ручек управления установить по пункту 12.5.8.

Резистором НАГРУЗКА изменять величину сопротивления нагрузки от максимального до минимального значений. При каждом фиксированном положении резистора НАГРУЗКА измерить напряжение на измерительном резисторе R19 электронным вольтметром и напряжение на нагрузке вольтметром PV2.

Результаты измерений занести в таблицу 12.6.

Таблица 12.6 – Нагрузочная характеристика компенсационного стабилизатора тока

Стабильность	Результаты измерений				$R_{\text{ВЫХ}}, \text{кОм}$
КСТ1	$U_{\text{Н}}, \text{В}$				
	$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$				
	$I_{\text{Н}}, \text{мА}$				
	$R_{\text{Н}}, \text{Ом}$				
КСТ2	$U_{\text{Н}}, \text{В}$				
	$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$				
	$I_{\text{Н}}, \text{мА}$				
	$R_{\text{Н}}, \text{Ом}$				

Установить переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ в положение «КСТ2» и повторить указанные выше операции и вычисления.

Результаты измерений занести в таблицу 12.6.

По данным таблицы 12.6 определить ток нагрузки по формуле (12.23) и сопротивление нагрузки по формуле

$$R_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{Н}}}{I_{\text{Н}}} = 27 \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{ИЗМ}}}. \quad (12.25)$$

Результаты расчетов занести в таблицу 12.6.

По результатам расчетов построить графические зависимости $I_{\text{Н}} = f(R_{\text{Н}})$ и рассчитать внутреннее (выходное) сопротивление компенсационного стабилизатора тока по формуле (12.19).

Расчетные значения выходного сопротивления занести в соответствующие графы таблицы 12.6.

12.5.10 Определение КПД и коэффициента пульсаций тока нагрузки компенсационного стабилизатора тока

Положения переключателей и ручек управления – по пункту 12.5.8. К контрольным гнездам XS3–XS5 подсоединить входные щупы осциллографа. Потенциометром РЕГУЛИРОВКА поочередно установить минимальное и максимальное значение тока нагрузки по миллиамперметру РА2. Определить в этих режимах КПД компенсационного стабилизатора тока и коэффициент пульсаций тока (напряжения) в нагрузке по методике, изложенной в пункте 12.5.4 и формулам (12.20)...(12.23).

Установить переключатель СТАБИЛЬНОСТЬ в положение «КСТ2» и повторить указанные выше операции и вычисления.

12.5.11 Завершение работы

Резистор НАГРУЗКА установить на максимальное значение сопротивле-

ния. Докладить преподавателю о завершении работы и показать результаты измерений.

С разрешения преподавателя отключить лабораторную установку тумблером СЕТЬ на лицевой панели.

Отсоединить от лабораторной установки входные щупы осциллографа и электронного вольтметра и отключить их.

12.6 Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Принципиальная схема лабораторной установки.
- 3 Таблицы с результатами измерений и расчетов.
- 4 Графики зависимостей, указанные в подразделе 12.5.
- 5 Осциллограммы пульсаций выходного напряжения стабилизаторов.
- 6 Краткая характеристика результатов работы и выводы по ней.

12.7 Контрольные вопросы

- 1 Что такое стабилизатор напряжения и чем он отличается от стабилизатора тока?
- 2 Каковы основные критерии качества стабилизатора?
- 3 В чем заключается разница между стабилизацией и сглаживанием напряжения (тока)?
- 4 На какие виды подразделяются стабилизаторы по принципу действия?
- 5 В чем заключается принцип работы однокаскадной схемы параметрического стабилизатора напряжения и каковы его недостатки?
- 6 Что такое термокомпенсация стабилизатора?
- 7 В чем заключается принцип работы компенсационных стабилизаторов напряжения и тока?
- 8 Для чего в качестве регулирующего элемента стабилизатора применяют составной транзистор?
- 9 В чем заключается влияние изменения сопротивления нагрузки на эффект стабилизации напряжения (тока)?

Литература

- 1 Иванов-Цыганов, А. И. Электропреобразовательные устройства РЭС / А. И. Иванов-Цыганов. – М. : Высш. шк., 1999.
- 2 Березин, О. К. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / О. К. Березин, В. Г. Костиков, В. А. Шахнов. – М. : Три Л., 2000.
- 3 Китаев, В. Е. Расчет источников электропитания устройств связи / В. Е. Китаев, А. А. Бокуняев, М. Ф. Калканов. – М. : Радио и связь, 1983.

Учебное издание

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ №11,12**

Практикум для студентов специальностей
1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»,
1-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации»,
1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях»
всех форм обучения

Составители:

Климович Владимир Викторович
Машара Георгий Георгиевич
Шатило Николай Иванович
Рощупкин Яков Викторович

Редактор Г. С. Корбут
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 2,3.

Формат 60x84 1/16.
Отпечатано на ризографе.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 7.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6