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 вентилей наиболее часто применяются тиристоры.

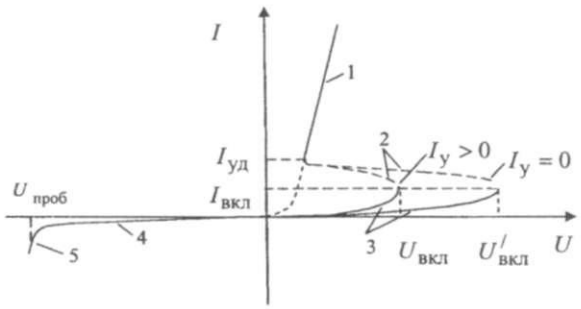
Тиристор – это четырехслойный полупроводниковый прибор (рисунок 11.1). Особенность его работы заключается в том, что при положительном напряжении на аноде (А) по отношению к катоду (К) тиристор начинает проводить ток при подаче на управляющий электрод (УЭ) положительного потенциала или импульса относительно 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 $U_{вкл}$ зависит от тока управления $I_у$ 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 $I_у = 0$). Для этого нужно увеличить приложенное к нему прямое напряжение до критического значения $U'_{вкл}$.

Тиристор может также перейти в открытое состояние и при меньшем значении напряжения, чем $U'_{вкл}$, 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:

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

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

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

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

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

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

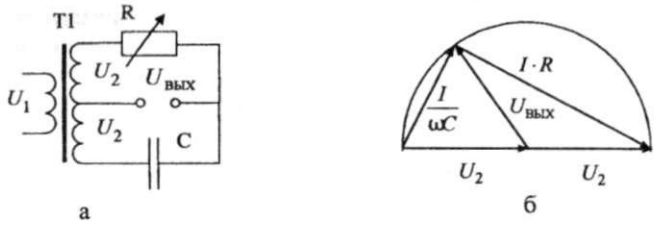
К временным параметрам тиристора относятся время включения (0,1...5 мкс) и время восстановления закрытого состояния тиристора (1...20 мкс).

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.*

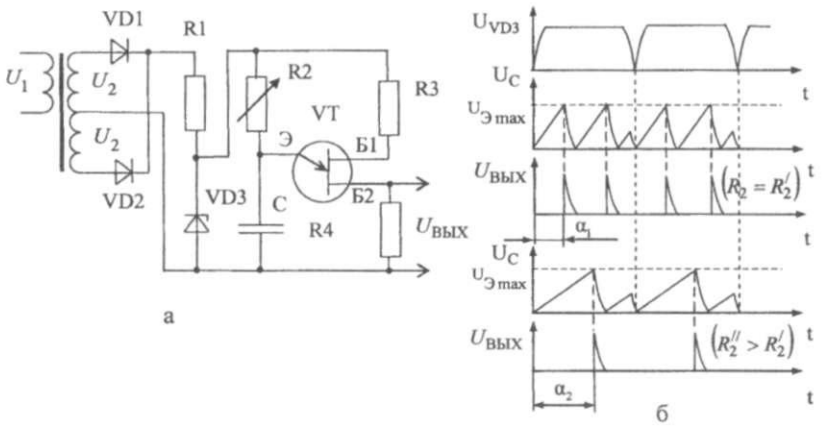
2 На управляющий электрод подается переменное напряжение с некоторым углом запаздывания α по отношению к напряжению на аноде тиристора. В маломощных выпрямителях для этой цели применяются емкостные и индуктивные фазовращатели. Пример принципиальной схемы емкостного фазовращателя и векторная диаграмма, 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 $U_{э\,max}$, переход эмиттер – база 1 смещен в обратном направлении и транзистор VT закрыт.

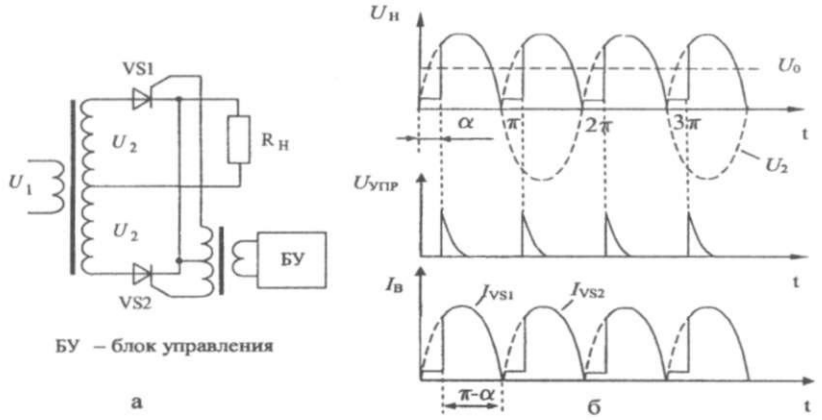
При появлении напряжения на стабилитроне VD3, которое одновременно играет роль питающего и синхронизирующего напряжения, конденсатор C начинает заряжаться через резистор R2. Как только напряжение на эмиттере достигнет $U_{э\,max}$, транзистор VT открывается и конденсатор C разряжается на сопротивление 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 С зависит от значения сопротивления резистора R2, а значит, изменяя это значение, можно регулировать угол сдвига α импульсов управления по отношении 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

$$I_{0\alpha} = I_0\left(1+\cos\alpha\right)/2, \qquad (11.1)$$
$$U_{0\alpha} = U_0\left(1+\cos\alpha\right)/2,$$

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 *регулировочной характеристикой выпрямителя* (рисунок 11.6).

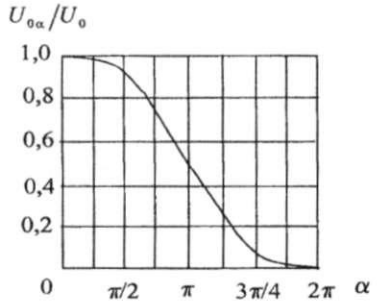


Рисунок 11.6 – Нормированная регулировочная характеристика

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

$$\alpha \geq \mathrm{arctg}(X_н/R_н), \qquad (11.2)$$

где $X_н$ и $R_н$ – 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

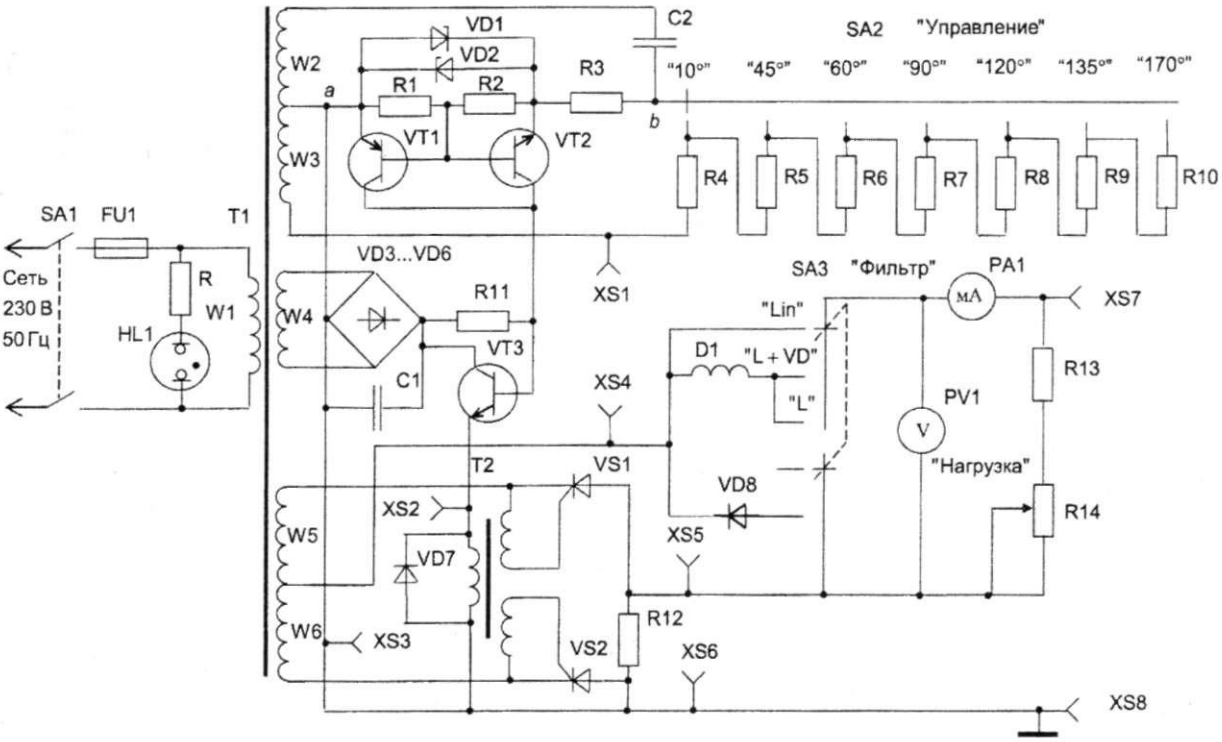


Рисунок 11.7 – Однофазный управляемый тиристорный выпрямитель. Схема электрическая принципиальная

угла регулирования от 0 до тгпри работе на активную нагрузку и от 0 до *ж/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 *а-Ь* 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 ...170. В диагональ моста *а-Ь* 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

$$U_{\text{н}} = f(\alpha), \quad K_{\text{н}} = f(\alpha).$$

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

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

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 PA1. 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

$$U_{\text{ПР}} = k\frac{m}{2}, \text{ В}, \tag{11.3}$$

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	A						
		10°	45°	60°	90°	120°	135°	170°
Lin	$U_{\text{Н}}$, В							
	$U_{\text{ПР}}$, В							
	$K_{\text{П}}$							
L+VD	$U_{\text{Н}}$, В							
	$U_{\text{ПР}}$, В							
	$K_{\text{П}}$							
L	$U_{\text{Н}}$, В							
	$U_{\text{ПР}}$, 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

$$K_{\text{П}} = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{н}}}. \tag{11.4}$$

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 PA1.

Резистором НАГРУЗКА изменять величину тока нагрузки от минимального до максимального значения, контролируя его миллиамперметром PA1, 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				$R_{вых}$, Ом
Lin	45°	$I_н$, мА					
		$U_н$, В					
	135°	$I_н$, мА					
		$U_н$, В					
L+VD	45°	$I_н$, мА					
		$U_н$, В					
	135°	$I_н$, мА					
		$U_н$, В					
L	45°	$I_н$, мА					
		$U_н$, В					
	60°	$I_н$, мА					
		$U_н$, 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

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_н}{\Delta I_н}, \qquad (11.5)$$

где $\Delta U_{\text{н}}$, $\Delta I_{\text{н}}$ – 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 $U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$, $R_{\text{вых}} = f(\alpha)$.

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 Lin, 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.

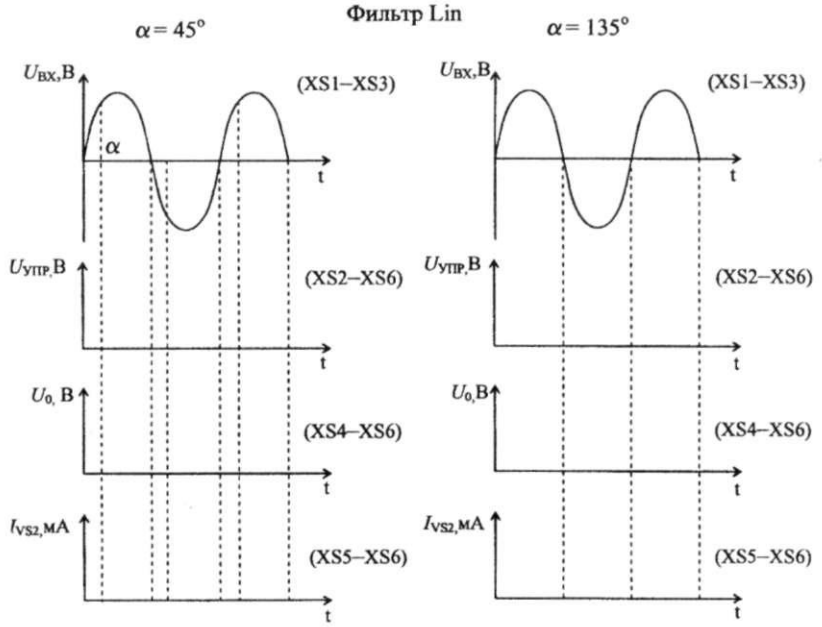


Рисунок 11.8 – Осциллограммы напряжений в контрольных точках управляемого выпрямителя

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 тиристоров.

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?