

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Электротехнический факультет

Кафедра электротехники и электроники

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ
И РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
НА ТИРИСТОРАХ**

Методические указания к лабораторной работе № 2

Дисциплины “Информационно-измерительная техника и электроника. Часть II”,
“Физические основы электроники”

Специальности 1001, 1002, 1004, 1813

Киров 2004

Печатается по решению редакционно-издательского совета Вятского государственного университета

УДК 621.314.6(07)
И889

Рецензент: кандидат технических наук, доцент А.Г. Корепанов

Составители: кандидат технических наук, доцент И.Л. Кривошеин,
старший преподаватель Ю.В. Кротов,
преподаватель А.С. Морозов,
преподаватель В.А. Хлебников

Редактор Е.Г. Козвонина

Подписано в печать
Бумага офсетная
Заказ № 298

Бесплатно

Усл.печ.л. 1,1
Печать копир Aficio 1022
Тираж 52

Текст напечатан с оригинала-макета, представленного составителями

610000, г. Киров, ул. Московская, 36
Оформление обложки, изготовление – ПРИП ВятГУ

© Вятский государственный университет, 2004

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с устройством и электрическими свойствами тиристора. Исследовать характеристики однофазного тиристорного регулятора переменного напряжения и управляемого выпрямителя.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Тиристор

Первые промышленные образцы тиристорov начали появляться в конце 50-х, начале 60-х годов XX века и сразу же, благодаря малым удельным габаритам (на единицу мощности), высоким допустимым напряжениям и токам стали широко использоваться во вновь разрабатываемых устройствах. До сегодняшних дней эти полупроводниковые приборы находят широкое применение в самых разнообразных (чаще всего силовых) электротехнических и электронных устройствах, например, в силовых преобразователях тока (регулируемых выпрямителях, инверторах, преобразователях частоты, генераторах мощных импульсов и др.), коммутационных устройствах (выключателей, бесконтактных реле). В промышленности тиристорные преобразователи используются для согласования мощных нагрузок постоянного тока с однофазной или трёхфазной питающей сетью переменного тока, в случаях, когда необходимо обеспечить регулирование мощности с высоким КПД (электроприводы постоянного тока для станков, гальванические ванны и т. п.).

Отличительной особенностью тиристора от других полупроводниковых приборов является работа в ключевом режиме. Тиристор может находиться только в двух устойчивых состояниях – закрытом и открытом и быстро переходить из закрытого в открытое при появлении импульса управления. Запирание тиристора осуществляется при выполнении определённых условий либо (в некоторых типах тиристорov) по сигналу управления.

На сегодняшний день существует несколько типов полупроводниковых приборов, относящихся к семейству тиристорov, например: полностью управляемый или запираемый тиристор (закрываемый импульсом управления), фототиристор (управляемый при помощи светового потока), симметричный двунаправленный тиристор – симмистор. Наиболее простыми, дешёвыми и распространёнными являются обычные однонаправленные триодные тиристоры.

Однонаправленный триодный тиристор (тринистор) – четырехслойный полупроводниковый прибор, в котором чередуются слои с электронной (n) и дырочной (p) электропроводностью, образуя три p-n перехода П1, П2, П3. Он имеет три вывода: А – анод, К – катод, УЭ – управляющий электрод (рис. 1).

Многослойные структуры тиристорov могут быть изготовлены различными методами в зависимости от назначения, желаемых электрических характеристик и мощности приборов. Чаще всего используются сплавная, диффузионно-сплавная, диффузионная и планарная технологии. На рис. 2 представлена p-n-p-n структура, полученная диффузионно-сплавным методом. Внешний вид силовых тиристорov представлен на рис. 3.

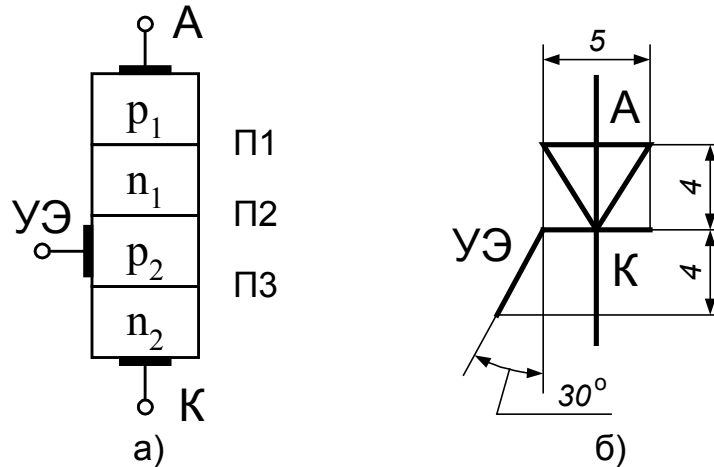


Рис. 1. Четырёхслойная p-n-p-n структура тиристора (а) и его условно-графическое изображение на электрических принципиальных схемах (б)

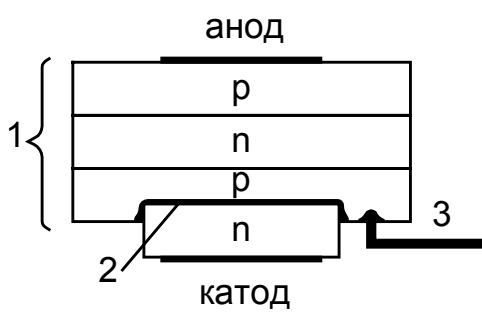


Рис. 2. p-n-p-n - структура, полученная диффузионно-сплавным методом. 1 - p-n-p - таблетка, полученная двусторонней диффузией; 2 - катодный слой, полученный вплавлением в p-n-p - таблетку металла, дающего примесь n-типа; 3 - припаянный вывод управляющего электрода

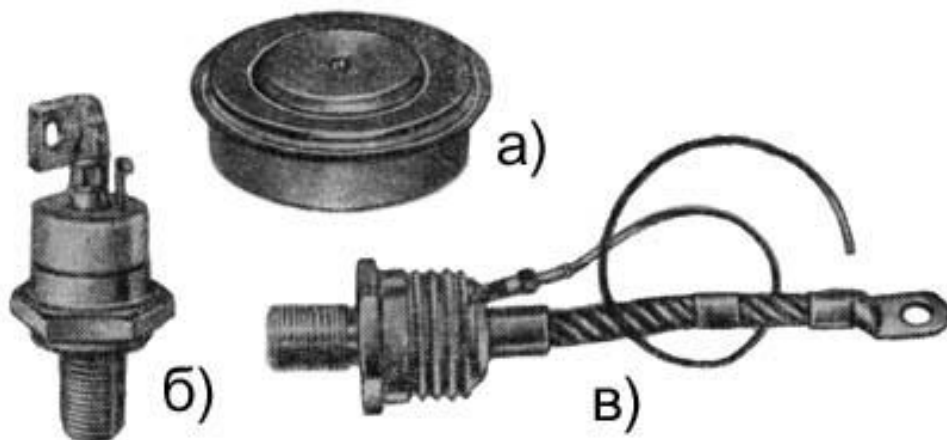


Рис. 3. Корпуса и способы крепления тиристорov: а) корпус типа «Пресс-Пак» (тиристор затягивается стяжками между двумя радиаторами); б, в) корпус с резьбовым хвостовиком (тиристор вворачивается в радиатор (в – тиристор с гибким выводом)

2.2. Работа тиристора

Рассмотрим свойства тиристора при отсутствии тока управления ($U_y=0, I_y=0$). Такой режим соответствует режиму работы динистора - порогового полупроводникового прибора, имеющего два вывода, и переходящего из закрытого в открытое состояние при превышении приложенным прямым напряжением определённого порогового значения. При прямом включении тиристора (на аноде – плюс, на катоде – минус рис. 4) переходы П₁ и П₃ открыты, а П₂ закрыт (рис. 5а). При этом все приложенное к прибору напряжение будет распределяться между тремя переходами в зависимости от соотношения их вольт-амперных характеристик. Сопротивление закрытого перехода велико, поэтому ток в тиристоре мал (участок $\theta - a$ на вольт-амперной характеристике (ВАХ) тиристора (рис. 6), и тиристор остается в закрытом состоянии. Участок $\theta - a$ ВАХ практически представляет собой обратную ветвь ВАХ закрытого р-п перехода П₂.

При напряжении $U_{np}=U_{nep}$ происходит переключение тиристора, то есть переход его из закрытого состояния в открытое. При дальнейшем увеличении напряжения

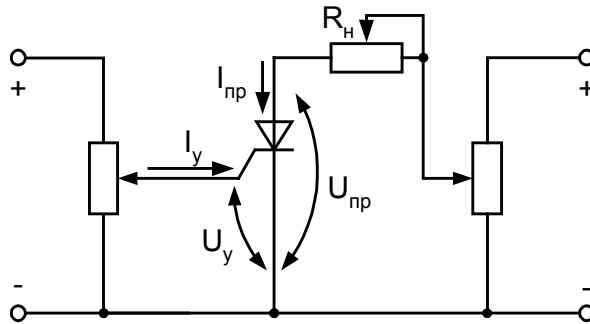


Рис. 4. Схема прямого включения тиристора для снятия ВАХ при различных токах управления

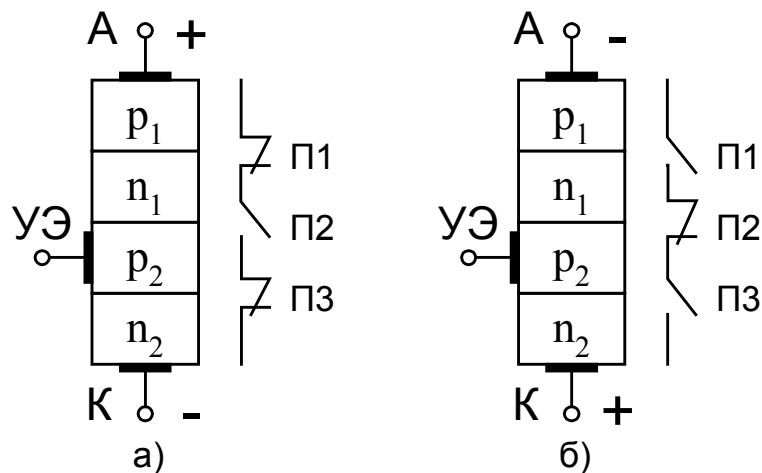


Рис. 5. Состояние р-п переходов четырёхслойной структуры тиристора при прямом приложенном напряжении (а) и при обратном (б)

U источника или уменьшении сопротивления R_n ток в тиристоре возрастает в соответствии с участком $\theta - \varepsilon$ ВАХ, который соответствует открытому состоянию тиристора. При уменьшении тока до значения ниже тока удержания $I_{уд}$ тиристор выключается. При этом восстанавливается высокое сопротивление перехода Π_2 .

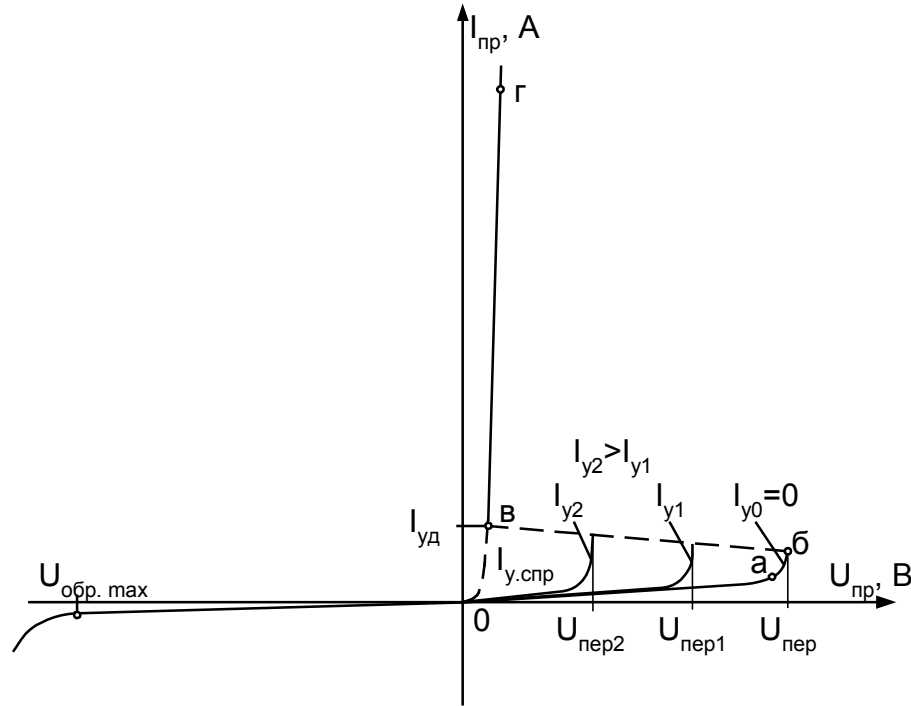


Рис. 6. ВАХ тиристора при различных токах управления

Наличие тока управления приводит к уменьшению напряжения переключения тиристора (семейство характеристик на рис. 6). При управляющем токе, получившем название *ток спрямления* ($I_y = I_{y.c}$), ВАХ спрямляется, то есть по виду практически соответствует ВАХ диода (кривая $\theta - \varepsilon$ на рис. 6). При таком токе управления тиристор сразу переходит в открытое состояние подобно диоду. В зависимости от типа тиристора ток спрямления $I_{y.c}$ может составлять от нескольких микроампер до нескольких сотен миллиампер (для мощных тиристорov).

При обратной полярности внешнего напряжения переходы Π_1 и Π_3 закрыты и тиристор закрыт (рис. 5б). Обычно в тиристоре практически все обратное напряжение приложено к переходу Π_1 .

Процессы включения и выключения тиристора можно рассмотреть с помощью двухтранзисторной аналогии. Проводя мысленно разрез, показанный пунктиром на рис. 7а, представим четырехслойную структуру в виде схемы, приведенной на рис. 7б.

Управляющий ток $I_{упр}$ является базовым током транзистора VT2. Этот базовый ток усиливает инжекцию носителей со стороны эмиттера Э2, так что коллекторный ток $I_{к2}$ равен $\alpha_2 I_{э2}$ или $\beta_2 I_{б2}$, где $\beta_2 = \alpha_2 / (1 - \alpha_2)$ (здесь и далее: $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_s$ – коэффициент передачи тока из эмиттера в коллектор; $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$ – коэффициент усиления тока базы для соответствующего транзистора – VT1 и VT2). Однако ток $I_{к2}$ является также базовым током $I_{б1}$ для транзистора VT1. Этот базовый ток обуславливает инжекцию носителей эмиттера Э1, в результате чего ток $I_{к1}$ равен $\alpha_1 I_{э1}$ или $\beta_1 I_{б1}$ где $\beta_1 = \alpha_1 / (1 - \alpha_1)$. Ток $I_{к1}$ в сумме с током $I_{упр}$ образует ток $I_{б2}$. Очевидно, что обратная связь в подобной схеме положительна. Если коэффициенты α_1 и α_2 достаточны для того, чтобы усиление в контуре обратной связи достигло единицы, базовые токи быстро возрастут и оба транзистора окажутся насыщенными **даже после того, как управляющий ток будет уменьшен до нуля**. Таким образом, даже короткий импульс управления может вызвать лавинообразный процесс увеличения тока, обусловленный действием положительной обратной связи. При этом коллекторный переход П2 будет смещён в прямом направлении. У каждого из двух транзисторов напряжение в насыщенном состоянии является суммой напряжений на обоих переходах: у одного $U_{П1} + U_{П2}$, у другого $U_{П2} + U_{П3}$.

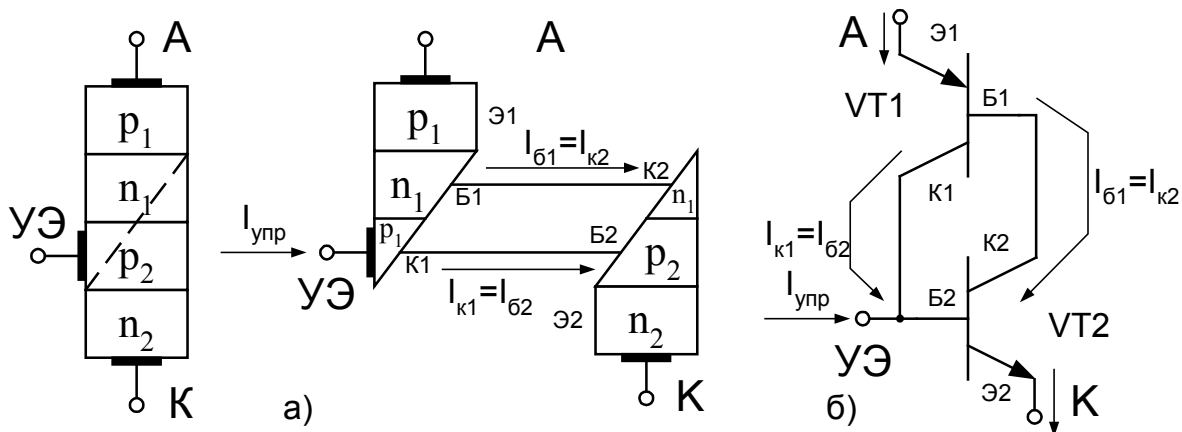


Рис. 7. Представление четырёхслойной p-n-p-n - структуры тиристора в виде двухтранзисторной аналогии

Так как напряжение $U_{П2}$ противоположно по знаку $U_{П1}$ и $U_{П3}$, напряжение насыщения четырехслойной структуры может быть мало, поскольку при суммировании всех трех напряжений полное прямое падение напряжения оказывается примерно равным падению напряжения на одном переходе, смещенном в прямом направлении. Таким образом, все три перехода будут иметь прямое смещение, и от анода к катоду через тиристор может протекать значительный ток при весьма низком падении напряжения.

Примечание. В приведенном выше обсуждении работы четырехслойной структуры предполагалось, что управляющий электрод соединен с областью p_2 . Очевидно, что такое же действие может быть получено при соединении управляющего электрода с областью n_1 (тиристор с управлением по аноду), но направление управляющего тока при этом должно быть изменено.

Процесс отпирания тиристора.

Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое с помощью тока управления называют включением тиристора. При этом в цепь управления подается кратковременный импульс тока необходимой амплитуды и длительности

Используя обозначения рис. 7б, можно написать следующие соотношения:

$$I_A = I_{K1} + I_{K2}; \quad (1)$$

$$I_{КАТ} = I_{K1} + I_{K2} + I_{упр} = I_A + I_{упр}; \quad (2)$$

$$I_{K1} = \alpha_1 \cdot M \cdot I_A + 0,5 \cdot I_0; \quad (3)$$

$$I_{K2} = \alpha_2 \cdot M \cdot I_{КАТ} + 0,5 \cdot I_0, \quad (4)$$

где I_A , $I_{кат}$, $I_{упр}$ – ток анода, катода и управляющего электрода тиристора соответственно;

I_{K1} , I_{K2} – катодные токи транзисторов VT1, VT2 двухтранзисторной схемы земещения;

M – коэффициент лавинного размножения носителей заряда,

I_0 – ток утечки.

Центральный переход П2 разделен пополам, и поэтому ток утечки через него I_0 входит с коэффициентом 0,5 в выражения для обоих коллекторных токов I_{K1} и I_{K2} . Подставив соотношения (3) и (4) в уравнение (2), получим уравнение:

$$I_A = \frac{I_0 + I_{упр} \cdot (\alpha_2 \cdot M - 1)}{1 - M \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (5)$$

Это уравнение показывает, что при

$$M \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) = 1 \quad (6)$$

ток анода I_A бесконечно растет, что соответствует переходу структуры в описанное ранее состояние проводимости, когда на переходе П2 оказывается прямое напряжение смещения.

Примем для простоты, что $M=1$. Если оба коэффициента α_1 и α_2 неизменны и $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$, то оба составляющих транзистора не могут быть доведены до насыщения. При этом переход структуры в состояние проводимости может быть обусловлен лишь лавинным размножением носителей или пробоем перехода П2 при высоких напряжениях. Если же α_1 и α_2 неизменны, но $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$, то структура находится все время в состоянии проводимости и не может запирать напряжение. Специфика процесса включения реальной структуры заключается в том, что коэффициенты α не постоянны и являются функциями тока и температуры.

При низких плотностях тока эмиттера основная потеря носителей зарядов в любом из транзисторов происходит в центрах рекомбинации в области пространственного заряда эмиттера. Так как при этом только небольшая доля тока эмиттера доходит до коллектора, коэффициенты α малы. По мере увеличения плотности тока эмиттера ток рекомбинации составляет все меньшую долю от полного тока, и коэффициенты α растут, пока величина α_1 и α_2 не становится больше единицы, что вызывает скачкообразное включение прибора. Коэффициенты α зависят также от приложенного напряжения, но эта зависимость менее заметна.

Влияние управляющего тока сводится к увеличению тока эмиттера, вызывающему рост α , пока не будет достигнуто равенство (6). С увеличением управляющего тока прямое напряжение, при котором происходит отпирание, снижается (рис. 6).

Когда управляющий ток достигает достаточно большого значения $I_{y. \text{спр}}$, область запертого состояния в прямом направлении исчезает и вольт-амперная характеристика прибора приближается, по существу, к прямой характеристике простого р-п-перехода.

Процесс запираания тиристора.

Когда прибор находится в состоянии проводимости, электроны и дырки интенсивно инжектируются в два внутренних слоя структуры. Фактически, как упоминалось выше, начальная концентрация примесей в этих слоях относительно мала, и поэтому для поддержания зарядной нейтральности и устранения чрезмерно сильного прямого падения напряжении необходимо, чтобы концентрации инжектируемых электронов и дырок были примерно равными.

Возврат прибора в запертое состояние требует устранения введенных носителей. Естественно, что, если анодный ток снижается до уровня, меньшего, чем ток удержания $I_{уд}$, то количество носителей зарядов уменьшается в результате рекомбинации, положительная обратная связь прекращается и прибор возвращается в закрытое состояние.

При работе тиристорov в области промышленных частот такой относительно медленный процесс не вызывает особых проблем. При работе на переменном напряжении обратный полупериод оказывает полезное влияние на процесс запираания, так как приложенное к прибору обратное напряжение способствует исчезновению остаточных носителей, что необходимо для запираания тиристора к началу следующего иолупериода.

Когда тиристор используется как выключатель в цепях, отличных от цепей переменного тока, например в инверторах и других устройствах, для затираания прибора необходимо предусмотреть особые меры. В цепи постоянного тока тиристор можно выключить путем уменьшения его прямого тока до значения меньшего тока удержания или подачей на анод А импульса обратной полярности (например, с помощью разрядки конденсатора).

При реверсировании напряжения электроны и дырки, накопившиеся во внутренних областях, будут уходить в направлении переходов П1 и П3. Это приводит к прохождению обратного тока через внешнюю цепь. Напряжение на зажимах тиристора сохраняется на уровне порядка 0,7 – 1,0 В до момента прекращения обратного тока, когда переходы П1 и П3 оказываются запертыми. Однако этого недостаточно для полного восстановления, так как вблизи центрального перехода П2 еще сохраняются остаточные носители. Исчезновение этих носителей происходит за счет рекомбинации, которая по существу не зависит от внешнего смещения. Когда рекомбинация этих носителей практически полностью заканчивается, переход П2 возвращается в запертое состояние. Если рекомбинация остаточных носителей не будет в достаточной мере завершена, то они могут вызвать инжектирование новых носителей со стороны переходов П1 и П3, когда последние вновь получают прямое смещение в начале следующего цикла работы.

Тиристор также можно выключить снижением до нуля прямого тока обычным размыканием силовой анодно-катодной цепи либо кратковременным замыканием накоротко анода и катода.

В цепи переменного тока тиристор можно включить в любой момент положительной полуволны (прямого напряжения) подачей импульса на управляющий элект-

трод. Такой способ управления называется импульсно-фазовым способом включения тиристора. Выключение происходит при прохождении тока (в цепи анод-катод) через нуль вместе с синусоидой напряжения.

2.3. Основные параметры тиристорov

Тиристор, как и любой полупроводниковый прибор, обладает целым рядом параметров, которые принято разделять на граничные (предельно допустимые), определяющие установленный для прибора предельный режим работы (с ограничением сверху или снизу), в рамках которого прибор функционирует в соответствии со своими конструктивными возможностями, и характеризующие параметры, измеряемые параметры прибора, сообщаемые для описания его свойств.

Основными граничными параметрами, определяющими выбор тиристора для выпрямителей – допустимый прямой ток (среднее значение) и допустимое обратное напряжение (амплитудное значение). Они должны быть в 1,5 – 2 раза меньше предельно допустимых значений, которые указываются в справочниках, так как, во-первых, эти параметры приводятся для определённых условий (например, условия охлаждения), а во-вторых, в цепях с ключевыми элементами могут возникать переходные процессы, максимальные значения напряжения в которых может значительно превышать ожидаемое значение.

Среди параметров тиристора можно также отметить максимально допустимое прямое напряжение (напряжение, при котором тиристор будет переходить в проводящее состояние при отсутствии импульса управления). Превышение этого параметра может приводить к неправильному функционированию устройства либо к выходу тиристора из строя. Самопроизвольное отпирание тиристора возможно и при превышении допустимой скорости нарастания прямого анодного напряжения du/dt , что может иметь место в схемах со значительными пульсациями и всплесками напряжения на аноде.

В иных тиристорных устройствах, например генераторах мощных коротких импульсов, тиристор выбирается не по среднему току, а по максимально допустимому амплитудному значению тока и по максимальной скорости нарастания тока (di/dt). Значительные скорости нарастания тока силовой цепи увеличивают потери тиристора при включении. Кроме того, при медленном отпирании тиристора (например, вследствие конструктивных особенностей тиристора или недостаточной скорости нарастания тока управления) быстро нарастающий силовой ток неравномерно распределяется по площади кристалла, вызывает локальный перегрев участков полупроводника и выход тиристора из строя.

К характеризующим параметрам относятся прямое падение напряжения на открытом тиристоре, ток удержания, токи утечки, время отпирания (включения), время восстановления управляемости (запирания), тепловое сопротивление и др.

2.4. Потери мощности в тиристоре

Тиристоры могут использоваться в силовых цепях с коммутируемой мощностью до 10 – 100 кВт. При таких мощностях даже незначительные в процентном соотношении потери в силовых ключах в абсолютном выражении достаточно велики, при этом вся мощность выделяется в весьма малом объёме полупроводниковой

структуры, что приводит к значительному увеличению её температуры и вероятность выхода прибора из строя увеличивается.

Нагрев p-n-p-структуры обусловлен электрическими потерями в ней, которые можно разделить на пять видов:

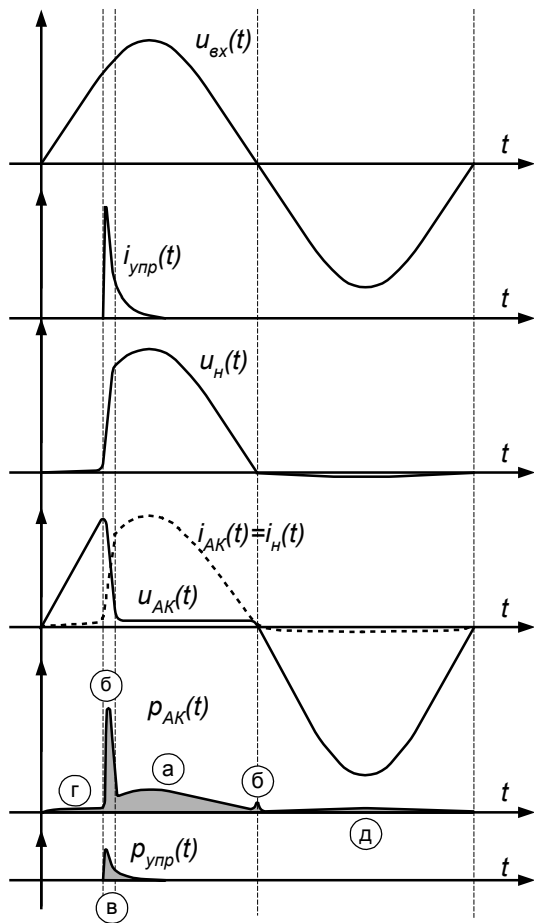


Рис. 8. Схематическое изображение переходных процессов в цепи с тиристором и графики мгновенных значений мощности, выделяемой на тиристоре

происходит переход тиристора из закрытого в открытое состояние. Переключение тиристора занимает определённое время, в течение которого ток через тиристор может быть уже достаточно большим, а прямое напряжение ещё значительно превышать напряжение на полностью открытом тиристоре. Вследствие чего наблюдается всплеск мощности потерь (потери вида 2). В этот же промежуток времени в виде тепла выделяются потери управления (вида 3). На открытом тиристоре наблюдается прямое падение напряжения величиной до 1-1,5 В, ток силовой цепи при этом может, в зависимости от типа тиристора, достигать сотен ампер (потери вида 1). При запираии тиристора также имеют место коммутационные потери, но, так как ток и напряжение в этот момент переходят через ноль, значение мощности потерь меньше, чем при отпирании. При обратном напряжении имеет место незначительный обратный ток, и, как следствие, возникают потери вида 5.

1) потери за счёт прямого падения напряжения при протекании прямого тока (основные в устройствах промышленной частоты);

2) потери за время переключения тиристора (коммутационные или динамические потери), преобладают в устройствах повышенной частоты (преобразователях частоты), устройствах с большим значением di/dt ;

3) потери в цепи управляющего электрода (потери управления);

4) потери от тока утечки в прямом направлении (при закрытом тиристоре);

5) потери от тока утечки в обратном направлении (при обратном напряжении).

Распределение потерь всех видов во времени можно проиллюстрировать на примере управляемого однополупериодного выпрямителя (резистивная нагрузка) при помощи графиков рис. 8. Пока тиристор закрыт, всё входное напряжение приложено к тиристору. При этом через него протекает незначительный ток утечки. Произведение мгновенных значений тока и напряжения на этом промежутке времени даёт мгновенные значения мощности потерь (потери вида 4). При появлении импульса управления

Для эффективного отвода энергии потерь от полупроводниковой структуры мощных тиристоров используют радиаторы из материала с хорошей теплопроводностью (алюминиевые сплавы) со значительной площадью поверхности охлаждения. Часто совместно с радиаторами используются системы принудительного обдува (вентиляторы).

2.5. Управляемые выпрямители

Управляемые выпрямители преобразуют переменное (двухполярное) напряжение в постоянное (однополярное) и, кроме того, позволяют плавно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения.

Принцип регулирования напряжения рассмотрен на примере управляемого однополупериодного выпрямителя (рис. 9). Пусть напряжение на входе схемы изменяется по закону $u_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t$. В интервале $0 - \omega t_1$, пока не подан управляющий сигнал на УЭ, тиристор закрыт, ток в нагрузочном резисторе R_n отсутствует и напряжение $u_n(t) = 0$. В момент времени t_1 , определяемый углом управления α , от блока управления БУ поступает импульс тока управления; тиристор включается, и появляется ток в резисторе R_n ; кривая напряжения $u_n(t)$ в интервале $\omega t_1 - \pi$ повторяет кривую напряжения источника питания. При переходе напряжения источника питания через нуль ($\omega t = \pi$) тиристор выключается. В интервале $\pi - 2\pi$ к нему приложено обратное напряжение и он остается закрытым. В момент времени, соответствующий углу $2\pi + \alpha$, вновь подается управляющий импульс, тиристор включается. Далее процессы повторяются.

Изменяя значения угла α от 0 до 180° , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения от максимального, равного U_m/π , до нуля. Среднее за период значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{н.ср.}} = \frac{U_m(1 + \cos \alpha)}{2\pi} = \frac{\sqrt{2}U(1 + \cos \alpha)}{2\pi}. \quad (7)$$

Зависимость выпрямленного напряжения от угла α называется регулировочной характеристикой выпрямителя.

Одна из схем управляемого двухполупериодного выпрямителя представлена на рис. 10а. Выпрямление напряжения в этой схеме осуществляет мостовой выпрямитель, а регулирование напряжения – тиристор VS , включенный последовательно с нагрузочным резистором R_n . Поскольку здесь используются оба полупериода напряжения (рис. 10б), при одном и том же угле α среднее значение выпрямленного напряжения в 2 раза больше, чем в однополупериодной схеме:

$$U_{\text{н.ср.}} = \frac{U_m(1 + \cos \alpha)}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U(1 + \cos \alpha)}{\pi}. \quad (8)$$

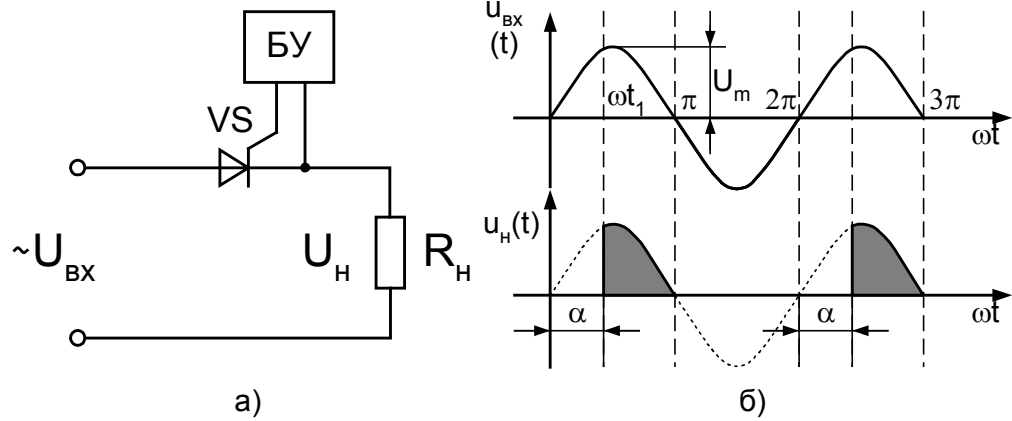


Рис. 9. Схема (а) и временные диаграммы напряжений (б) однополупериодного выпрямителя

2.6. Тиристорный регулятор напряжения (ТРН)

Широко распространенный ТРН содержит два встречно-параллельно включенных тиристора (рис. 11а). В положительный полупериод напряжения источника подается управляющий импульс на УЭ тиристора $VS2$ в момент времени, определяемый углом α (рис. 11б), и тиристор открывается. В отрицательный полупериод аналогично работает тиристор $VS1$. Выключение каждого из тиристоров происходит при уменьшении тока в нем до нуля. Равные углы включения обоих тиристоров обеспечивают симметричные кривые напряжения на приемнике. При изменении угла α , то есть длительности закрытого состояния тиристора, изменяется действующее значение напряжения U_H на приемнике:

$$U_{H.действ} = U_m \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} = U \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}. \quad (9)$$

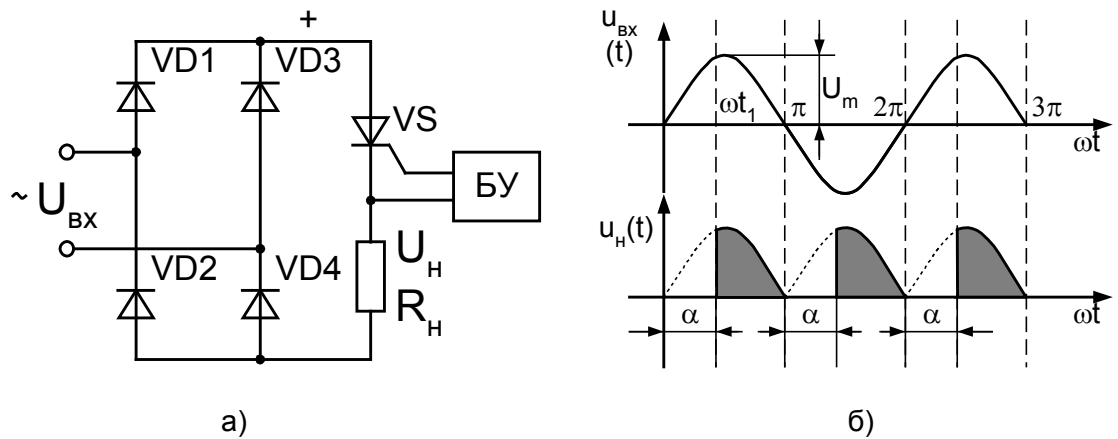


Рис. 10. Схема (а) и временные диаграммы напряжений (б) двухполупериодного выпрямителя

Зависимость действующего значения напряжения U_H на приемнике от угла управления α называется регулировочной характеристикой ТРН.

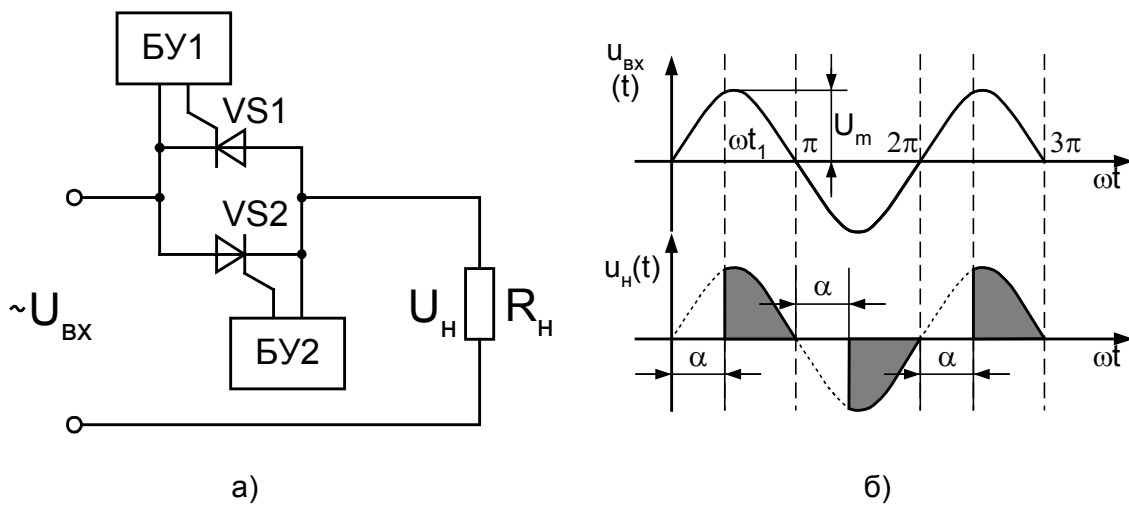


Рис. 11. Схема (а) и временные диаграммы напряжений (б) ТРН

3. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Описание лабораторного стенда

Работа выполняется на универсальном стенде, состоящем из трёх панелей (рис. 12).

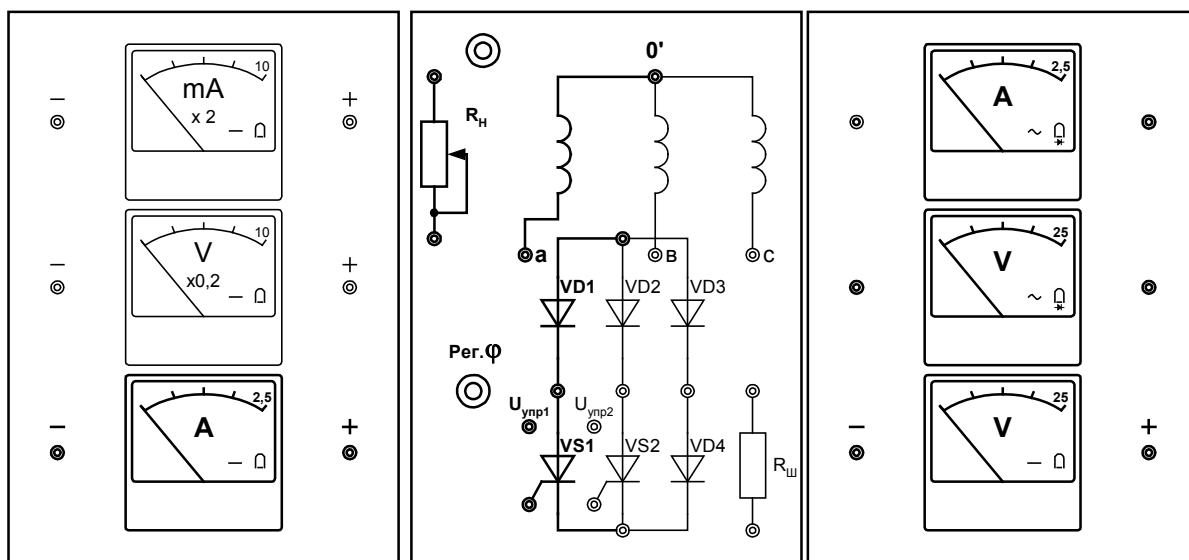


Рис. 12. Универсальный лабораторный стенд

На одной из панелей (рис.12) расположен трёхфазный трансформатор (клеммы вторичных обмоток а, в, с, 0') служащий источником питания силовых цепей; рези-

стивная нагрузка с изменяемым сопротивлением $R_{нж}$; сборка из четырёх диодов (VD1-VD4) и двух тиристоров (VS1, VS2); два блока управления тиристорами. На двух остальных панелях расположены измерительные приборы. В работе используются: амперметр и вольтметр МЭ системы (измеряют постоянную тока и напряжения), амперметр и вольтметр МЭ системы с выпрямителем (средневыпрямленное значение тока и напряжения). Элементы, используемые в работе, на рис. 12 выделены жирными линиями.

3.2. Исследование управляемого однополупериодного выпрямителя

а) Собрать цепь для исследования однополупериодного выпрямителя, работающего на резистивную нагрузку (рис. 13).

б) При помощи осциллографа определить параметры управляющего импульса (амплитуду напряжения и длительность импульса), зарисовать форму импульса диапазон регулирования угла управления (см. методические указания) управления. При проведении опыта осциллограф включается, как показано на рис. 13а.

в) Подключить осциллограф к нагрузке выпрямителя (рис. 13 б). Вращая ручку «Рег. φ », определить диапазон регулирования угла управления (см. методические указания).

г) Зарисовать форму напряжения на нагрузке при $\varphi=90^\circ$ и измерить при помощи осциллографа U_m , $U_{н.ср}$, f .

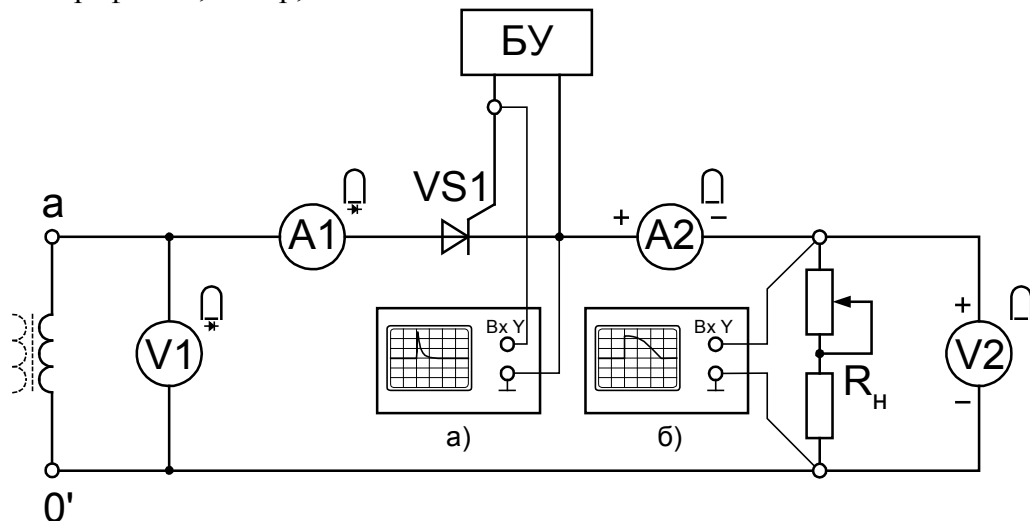


Рис. 13. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя.

Включение осциллографа: а) для исследования управляющего импульса, б) для исследования напряжения на нагрузке

д) Установить по заданию преподавателя величину тока нагрузки и снять регулировочную характеристику однополупериодного выпрямителя $U_{н.ср}=f(\varphi)$, $R_{н}=\text{const}$. Угол управления изменять вращением ручки «Рег. φ » (см. методические указания). Результаты опытов занести в табл. 1.

е) Установить по заданию преподавателя угол управления φ и снять нагрузочную характеристику $U_{н.ср}=f(I_{н.ср})$, $\varphi=\text{const}$. Результаты занести в табл. 2.

ж) Рассчитать регулировочную характеристику по формуле (7) и результаты занести в табл. 1.

з) В одной системе координат построить опытную и расчетную регулировочные характеристики.

Таблица 1

φ , эл. град.								
$I_{н.ср}$, А								
$U_{н.ср}$, В (опыт)								
$U_{н.ср}$, В (расчёт)								

Таблица 2

$I_{н.ср}$, А								
$U_{н.ср}$, В								

3.3. Исследование ТРН

а) Собрать цепь для исследования ТРН (рис. 14). Обратить внимание на полярность включения приборов МЭ системы.

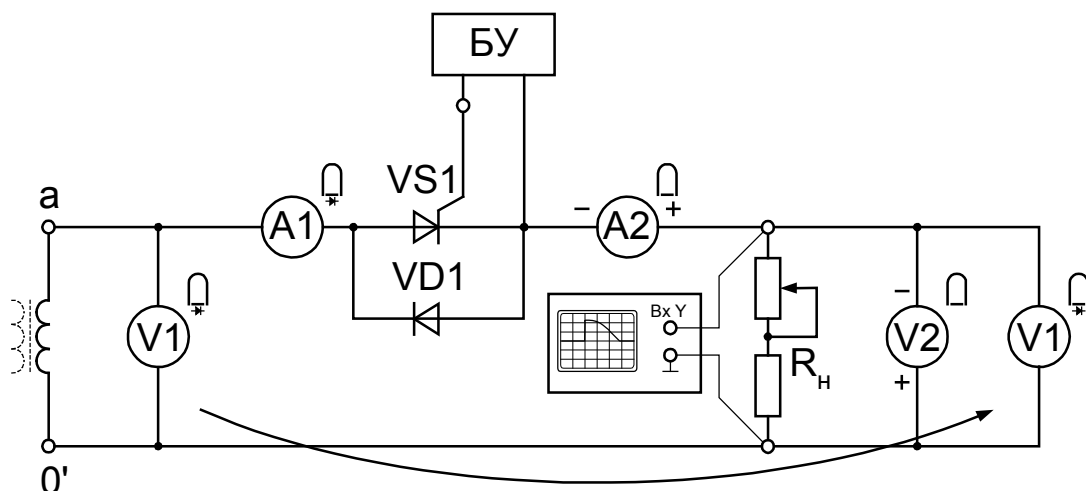


Рис. 14. Схема исследования тиристорного регулятора напряжения (ТРН)

б) Вольтметром V1 измерить напряжение на вторичной обмотке трансформатора, а затем переключить его на напряжение нагрузки, как показано на рис. 14.

в) Снять регулировочную характеристику ТРН ($R_n = \text{const}$). Вместо действующих значений тока и напряжения снять показания выпрямительных приборов. Результаты опытов занести в табл. 3.

г) Для угла управления $\varphi = 90^\circ$ зарисовать кривую напряжения на приемнике, измерить при помощи осциллографа U_m , $U_{н.ср}$, f .

д) Установить по заданию преподавателя угол управления φ и снять нагрузочную характеристику $U_n = f(I_n)$, $\varphi = \text{const}$. Результаты занести в табл. 4.

е) Рассчитать регулировочную характеристику по формуле (9) и результаты занести в табл. 3.

ж) В одной системе координат построить опытную и расчетную регулировочные характеристики ТРН.

Таблица 3

φ , эл. град.								
$I_{н.ср}$, А								
$\sim I_{н}$, А								
$U_{н.ср}$, В								
$\sim U_{н}$, В (опыт)								
$U_{н.действ}$, В (расчёт)								

Таблица 4

$\sim I_{н}$, А								
$\sim U_{н}$, В								

Методические указания

При измерении или установке угла управления необходимо пользоваться координатной сеткой на экране осциллографа следующим образом. Выбрать переключателем «время развёртки» такой масштаб, чтобы на экране было видно 1 – 1,5 периода исследуемого сигнала. Затем измерить длину периода в делениях сетки (с десятичными долями). Учитывая, что полный период составляет 360 эл. град., определить, сколько градусов приходится на одну десятую часть клетки. Например, если период сигнала составляет 4 деления., то цена одной десятой деления будет равна 9 эл. град., и угол управления удобно менять по сетке с шагом 9, 18 и т. д. эл. град. Кроме того при установке угла управления более наглядно измерять угол проводимости (часть полупериода, в течение которой тиристор открыт и на нагрузке присутствует напряжение), а угол управления определять вычитанием из 180 эл. град. угла проводимости.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 4.1. В чем заключается отличие тиристора от диода?
- 4.2. Объясните ВАХ тиристора.
- 4.3. Объясните сущность импульсно-фазового управления тиристором.
- 4.4. По каким параметрам выбирают тиристор для конкретной электрической цепи?
- 4.5. Объясните принцип работы одно- и двухполупериодного управляемого выпрямителя.
- 4.6. Объясните принцип работы ТРН переменного тока.
- 4.7. Поясните вид регулировочных характеристик управляемых выпрямителей и ТРН.
- 4.8. Назовите основные достоинства и недостатки ТРН по сравнению с автотрансформаторным регулятором напряжения.
- 4.9. Объясните, почему в цепи переменного тока нагрузка, включенная через тиристор, после отсоединения от УЭ тиристора системы управления оказывается отключенной от источника питания, а в цепи постоянного тока нет.

4.10. Можно ли регулировать напряжение на нагрузке в цепи постоянного тока с помощью тиристора?

5. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

6.1. Каждый студент должен понимать, что, проводя опыты, он пользуется напряжением, опасным для жизни. Опасным для жизни считается напряжение переменного тока величиной 42 В и выше, ток – 0,01 А (10 мА) и более.

6.2. Категорически запрещается:

а) подключать цепь к источнику питания до проверки ее преподавателем или лаборантом;

б) прикасаться к незащищенным токоведущим частям коммутационных и других электрических аппаратов, подводимым кабелям, проводам, клеммам и металлическим частям электрооборудования, находящимся под напряжением;

в) вскрывать и разбирать электрооборудование, снимать крышки и защитные ограждения;

г) оставлять цепь под напряжением, если она находится без наблюдения;

д) производить замену неисправных проводов и приборов, если цепь находится под напряжением.

6.3. Сборку электрических цепей для проведения опытов, поджатие ослабевших контактов и разборку цепей следует производить только при отключенном общем рубильнике (выключателе стенда).

6.4. При наладке цепи и производстве опытов на следует допускать резких перемещений ползунков реостатов, ручек ЛАТРов и других регулировочных устройств.

6.5. При поражении электрическим током каждый студент должен быстро освободить пострадавшего от воздействия тока, отключив общий рубильник на стенде (в лаборатории), оказать ему первую помощь и немедленно сообщить о случившемся преподавателю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тиристоры: справ. / Под ред. В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова. – М.: Энергия, 1971.

2. Розанов Ю. К. Основы силовой преобразовательной техники / Ю. К. Розанов. – М.: Энергия, 1979.

3. Справочник по преобразовательной технике / Под ред. И. М. Чиженко. – Киев: Техніка, 1978.