

Лабораторная работа №4

Исследование характеристик тиристора и управляемых схем на тиристорах

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Тиристором называется полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три (или более) p - n -перехода. Тиристор может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот. Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют *динистором*. Также для коммутации цепей переменного тока могут использоваться специальные симметричные тиристоры – *симисторы*.

Динистор

Динистор – это двухэлектродный прибор диодного типа, имеющий три p - n -перехода. Крайняя p -область называется анодом, а другая крайняя n -область – катодом. Структура динистора приведена на рисунке 1, а, на котором p - n -переходы обозначены как J_1 , J_2 и J_3 . Условное графическое изображение динистора показано на рисунке 1, б).

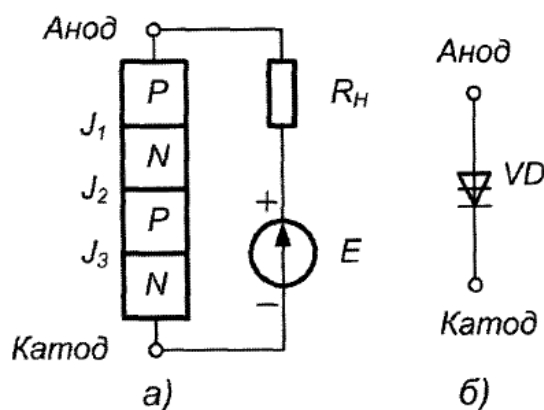


Рисунок 1 – Структура динистора (а) и его условное графическое обозначение (б)

Схему замещения динистора можно представить в виде двух триодных структур, соединенных между собой. Деление динистора на составляющие транзисторы и схема замещения приведены на рисунке 2.

При таком соединении коллекторный ток первого транзистора является током базы второго, а коллекторный ток второго транзистора является током базы первого. Благодаря такому соединению внутри прибора возникает положительная обратная связь.

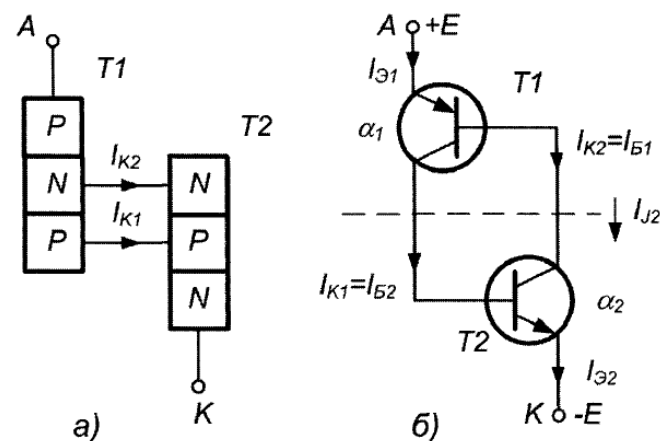


Рисунок 2 – Деление динистора на две структуры (а) и схема замещения (б)

Если на анод подано положительное напряжение по отношению к катоду, то переходы J_1 и J_3 (рисунок 1, а) будут смещены в прямом направлении, а переход J_2 – в обратном. В результате всё напряжение источника E будет приложено к переходу J_2 .

Пусть коэффициенты передачи по току эмиттера транзисторов $T1$ и $T2$ имеют значения α_1 и α_2 . Тогда согласно схеме замещения (рисунок 2, б) ток через тиристор, равен сумме токов коллекторов обоих транзисторов и тока утечки I_{K0} :

$$I = \alpha_1 I_{Э1} + \alpha_2 I_{Э2} + I_{K0}. \quad (1)$$

Ток во внешней цепи равен $I = I_{Э1} = I_{Э2}$. После подстановки I в (1) можно записать $I(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{K0}$. Отсюда получаем величина I :

$$I = \frac{I_{K0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (2)$$

До тех пор, пока выполняется условие $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$, ток в динисторе будет равен I_{K0} . При соотношении $(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$ динистор включается и начинает проводить ток. Это и есть условие включения динистора.

Для увеличения коэффициентов передачи тока α_1 или α_2 в динисторе нужно увеличить напряжение на его аноде. При выполнении условия $U = U_{ВКЛ}$ один из транзисторов перейдет в режим насыщения. Коллекторный ток этого транзистора, протекая в цепи второго транзистора, откроет его, а последний, в свою очередь, увеличит ток базы первого. В результате коллекторные токи транзисторов будут лавинообразно нарастать, пока оба транзистора не перейдут в режим насыщения. После включения транзисторов ток I будет ограничиваться только сопротивлением внешней цепи.

На рисунке 3, а приведена вольтамперная характеристика динистора, а на рисунке 3, б – схема его включения. На рисунках использованы следующие обозначения: $U_{ВКЛ}$ – напряжение включения динистора, $U_{ПР}$ – падение напряжения на открытом динисторе, I_H – ток нагрузки, $I_{ВЫКЛ}$ – ток выключения динистора, VD – полупроводниковый диод, VS – динистор, R_H – сопротивление нагрузки, R – ограничивающее сопротивление, C – разделительный конденсатор, $U_{ПУСК}$ – управляющий импульс. Падение напряжения на открытом динисторе составляет около 2 В.

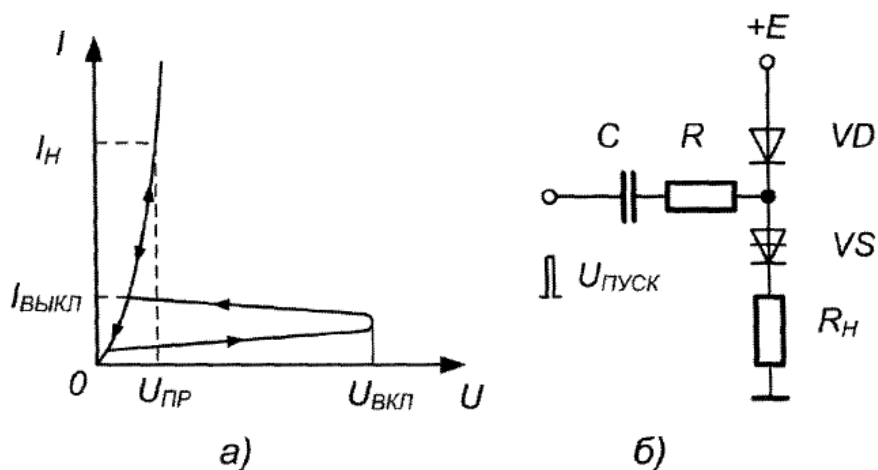


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика динистора (а) и схема его включения (б)

Выключить динистор можно, понизив ток в нем до значения $I_{\text{ВЫКЛ}}$ или поменяв полярность напряжения на аноде. Различные способы выключения динистора показаны на рисунке 4.

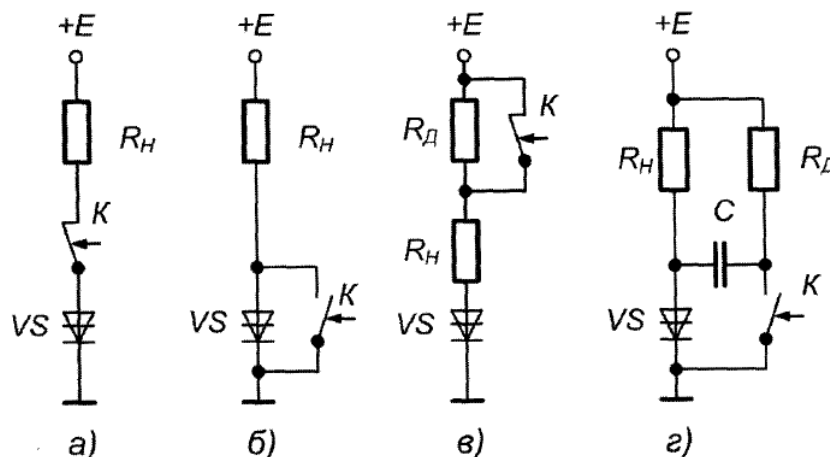


Рисунок 4 – Схемы выключения динистора: размыканием цепи (а), шунтированием прибора (б), снижением тока анода (в), подачей обратного напряжения (г)

В схеме *а* при размыкании ключа *К* прерывается ток в цепи динистора. В схеме *б* при замыкании ключа *К* падение напряжение на динисторе уменьшается до нуля. В схеме *в* при размыкании ключа *К* последовательно с нагрузкой R_H включается добавочный резистор R_D , в результате чего ток динистора понижается до значения $I_{\text{ВЫКЛ}}$. В схеме *г* при замыкании ключа *К* на анод динистора с конденсатора *С* подается напряжение обратной полярности.

Тиристор

Тиристор имеет структуру, аналогичную динистору, при этом одна из внутренних областей используется для управления. Если в базу одного из транзисторов (рисунок 2) подать ток управления, то его коэффициент передачи увеличится и произойдет включение тиристора.

В зависимости от расположения управляющего электрода (УЭ) различают тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. Расположение этих управляющих электродов и условные обозначения соответствующих тиристоров приведены на рисунке 5.

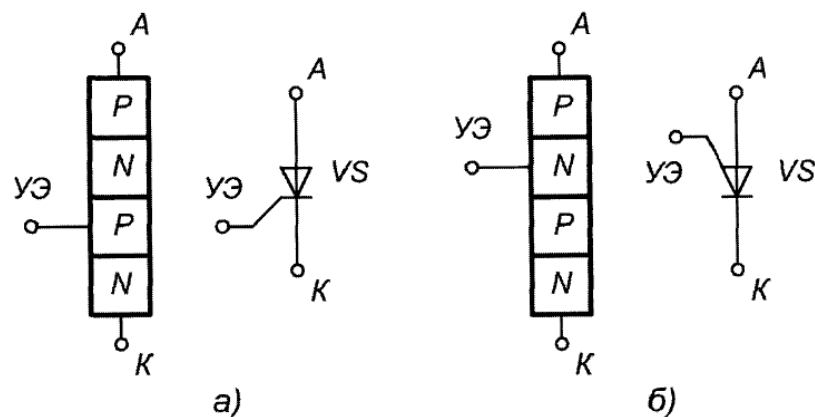


Рисунок 5 – Структура и условное графическое обозначение тиристора с катодным (а) и анодным (б) управлением

Существуют также запираемые тиристоры, особенность которых заключается в том, что при подаче сигнала на управляющий электрод тиристор переходит в закрытое состояние. Применение таких тиристоров ограничено из-за того, что ток управляющего электрода в момент выключения приближается по величине к основному коммутируемому току.

Схема включения и вольтамперная характеристика тиристора приведена на рисунке 6. Напряжение включения тиристора регулируется изменением тока в цепи управляющего электрода – при увеличении тока управления напряжение включения снижается. После включения управляющий электрод теряет управляющие свойства. Основные способы выключения тиристора такие же, как и для динистора.

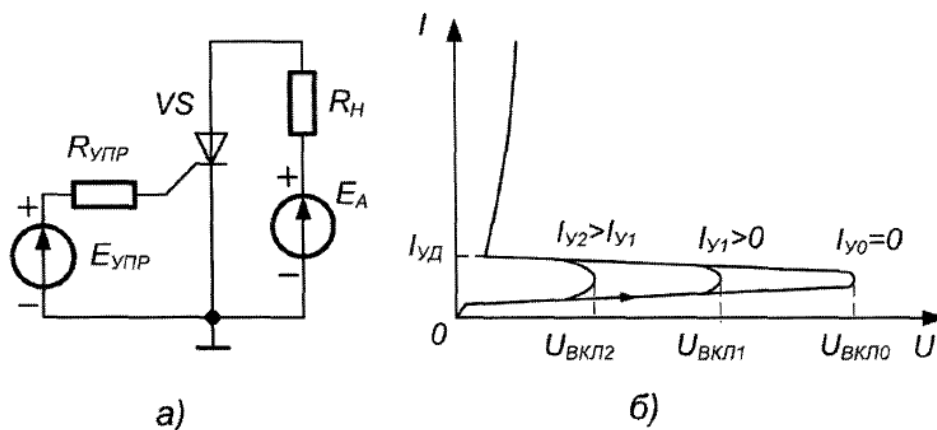


Рисунок 6 – Схема включения (а) и вольтамперные характеристики (б) тиристора

К основным параметрам динисторов и тиристоров относятся:

- допустимое обратное напряжение $U_{ОБР}$;
- падение напряжения в открытом состоянии $U_{ПР}$ при заданном прямом токе;
- допустимый прямой ток $I_{ПР}$;
- время включения $t_{ВКЛ}$ и время выключения $t_{ВЫКЛ}$.

Основной областью применения динисторов и тиристоров, является использование их в качестве электронных ключей в схемах переключения как постоянных, так и переменных электрических сигналов.

Симистор

Симистор – это симметричный тиристор, который предназначен для коммутации в цепях переменного тока. Он может использоваться для создания реверсивных выпрямителей или регуляторов переменного тока. Структура симметричного тиристора приведена на рисунке 7, а, а его условное обозначение – на рисунке 7, б. Полупроводниковая структура симистора содержит пять полупроводниковых слоев с различным типом проводимости и имеет более сложную конфигурацию по сравнению с тиристором. Вольтамперная характеристика симистора показана на рисунке 8.

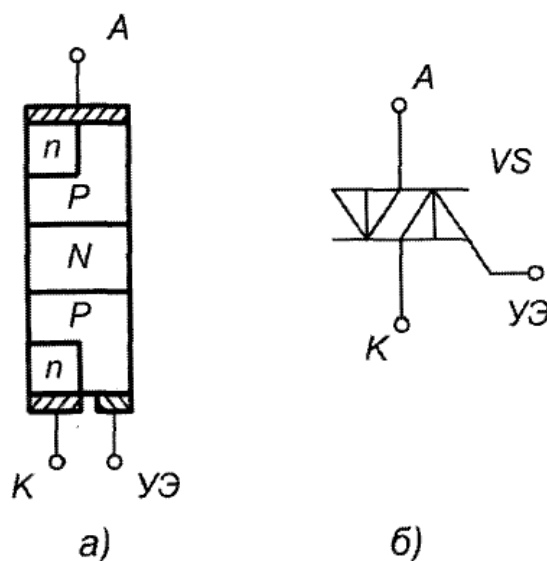


Рисунок 7 – Структура симметричного тиристора (а) и его условное графическое изображение (б)

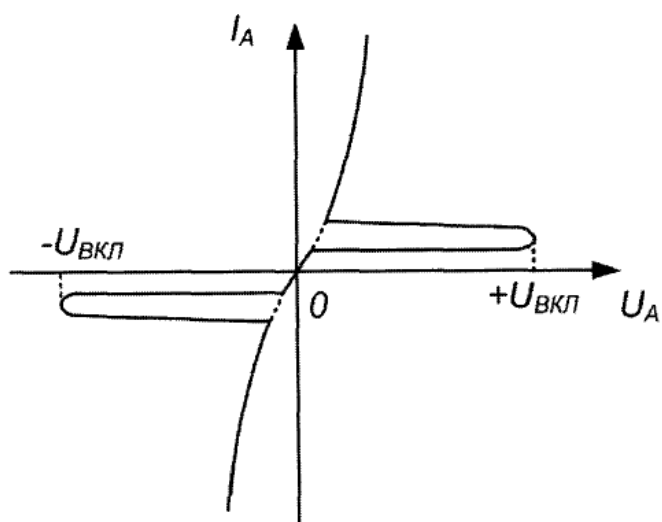


Рисунок 8 – Вольтамперная характеристика симистора

В соответствии с вольтамперной характеристикой симистор включается в любом направлении при подаче на управляющий электрод (УЭ) положительного импульса управления. Требования к импульсу управления такие же, как и для тиристора. Основные характеристики симистора и система его обозначений такие же, как и для тиристора. Симистор можно заменить двумя встречно-параллельно включенными тиристорами с соединенными электродами управления.

Управляемый выпрямитель

Простейшая схема управляемого однополупериодного выпрямителя на одном тиристоре приведена на рисунке 9.

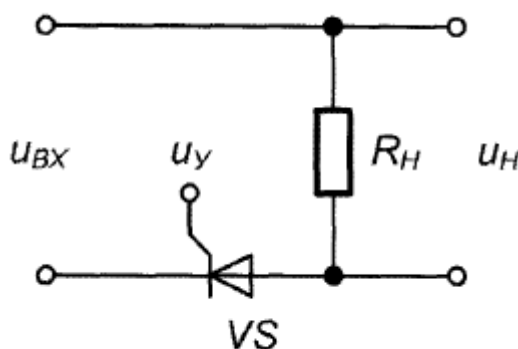


Рисунок 9 – Схема управляемого выпрямителя

Для управления включением тиристора необходимо выполнить два условия: напряжение на аноде тиристора должно быть положительным (но не превышающим напряжение $U_{a.BKЛ}$) и к управляющему электроду должно быть приложено положительное напряжение, соответствующее отпирающему току. Первое условие выполняется для положительных полуволн входного напряжения $u_{BX} = U_m \sin(\omega t)$ (рисунок 10, а), а для выполнения второго условия на управляющий электрод тиристора подают отпирающие импульсы u_y (рисунок 10, б). После включения тиристора управляющий электрод теряет управляющие свойства. Выключение тиристора произойдет при уменьшении напряжения на его аноде до уровня $U_{a.ВЫКЛ}$.

Формы импульсов напряжения u_H на активной нагрузке R_H без фильтра приведена на рисунке 10, в. Момент включения тиристора можно регулировать в пределах положительной полуволны входного напряжения, т. е. $0 < \alpha < \pi$, где $\alpha = \omega t$ – угол сдвига в радианах управляющего импульса относительно момента $u_{BX} = 0$, называемый *углом включения*. Таким образом, длительность включенного состояния тиристор определяется выражением:

$$t_u = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right), \quad (3)$$

где T – период колебания входного напряжения u_{BX} .

Среднее напряжение на нагрузке без учета падения напряжения на открытом тиристора будет равно:

$$U_{H.CP} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_{BX} d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha). \quad (4)$$

Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя приведена на рисунке 11. При угле включения тиристора $\alpha = 0$ среднее выпрямленное напряжение на нагрузке $U_{H.CP}$ будет максимальным, а при $\alpha = \pi$ напряжение на нагрузке равно нулю ($U_{H.CP} = 0$). Такой способ управления тиристором называется *фазоимпульсным*.

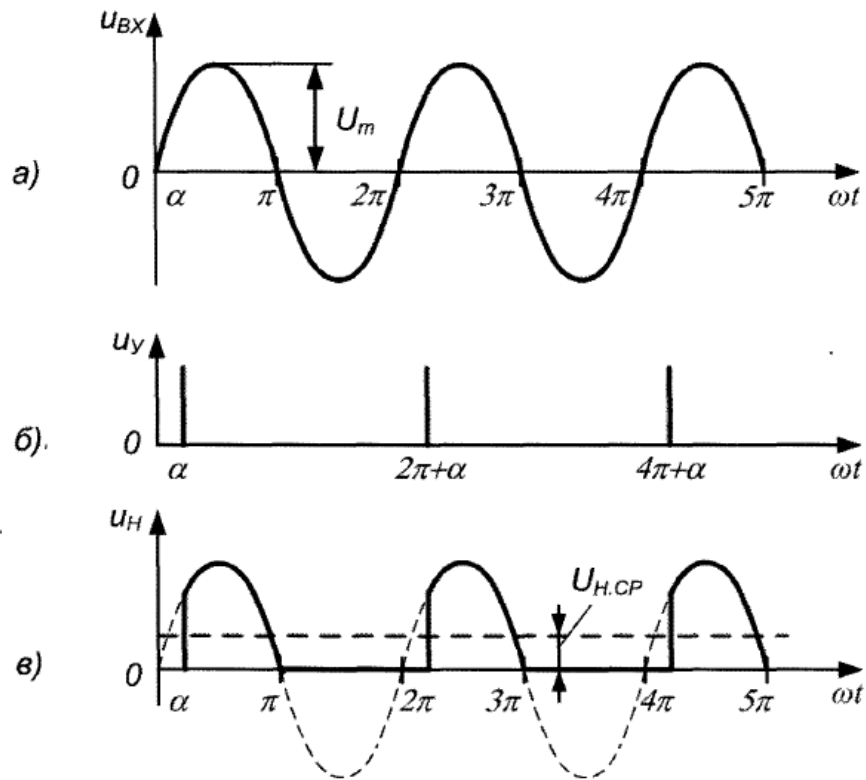


Рисунок 10 – Временные диаграммы напряжений на входе управляемого выпрямителя (а), на управляющем электроде тиристора (б) и нагрузке (в)

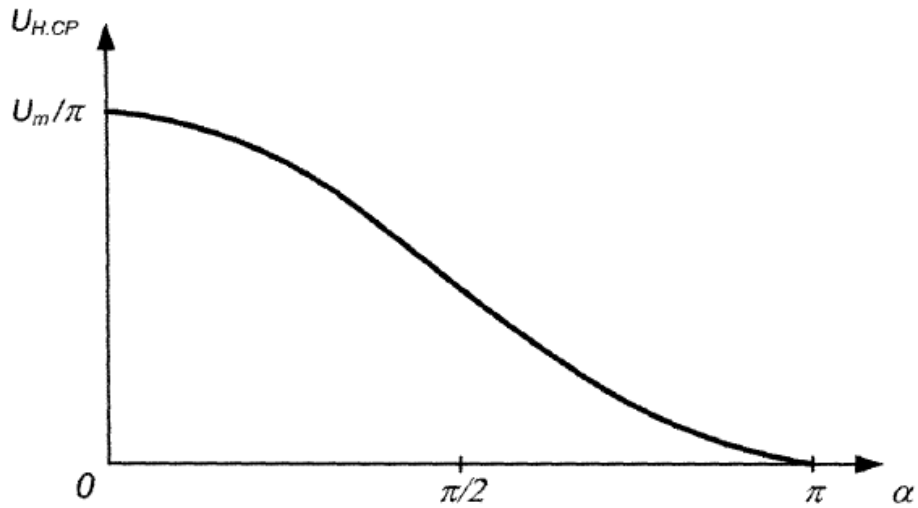


Рисунок 11 – Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя

Тиристорный регулятор мощности

При эксплуатации ряда электроприборов переменного тока возникает необходимость регулирования мощности, подводимой к нагрузке, например, изменение яркости свечения ламп накаливания, управление тепловыделением

электронагревателей, регулирование скорости вращения электродвигателей. Современные регуляторы мощности строятся на основе тиристоров.

Принцип работы тиристорного регулятора рассмотрим на примере однофазного однополупериодного регулятора, работающего на активную нагрузку. Схема такого регулятора приведена на рисунке 12, а временные диаграммы, поясняющие её работу на рисунке 13.

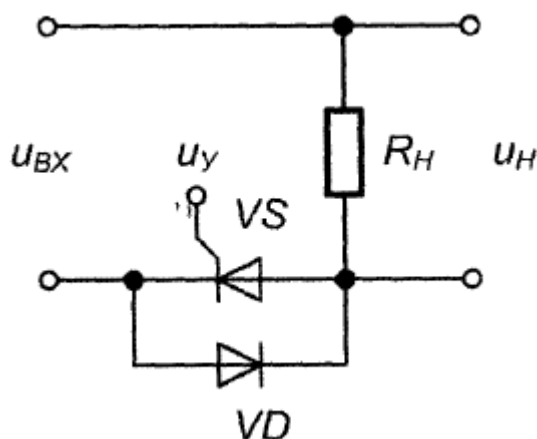


Рисунок 12 – Схема тиристорного регулятора мощности

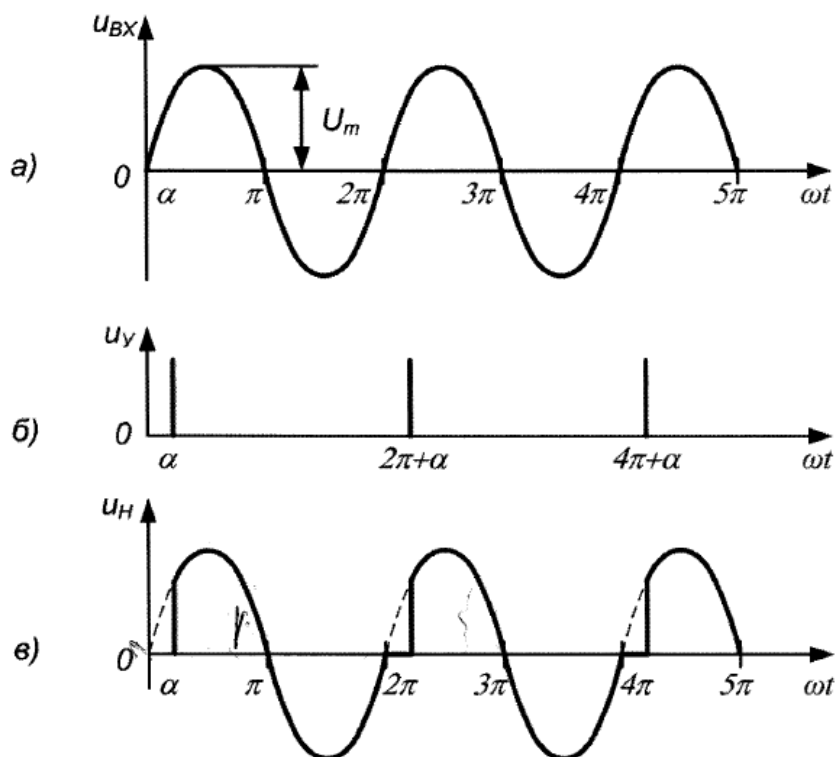


Рисунок 13 – Временные диаграммы напряжений на входе регулятора мощности (а), управляющем электроде тиристора (б) и нагрузке (в)

В этой схеме последовательно с сопротивлением нагрузки включены соединенные встречно-параллельно тиристор VS и выпрямительный диод VD . Регулирование мощности, выделяемой на нагрузке, осуществляется за счет изменения угла включения тиристора с помощью управляющих импульсов, поступающих со схемы управления.

Условия включения тиристора реализуются в течение положительной полуволны входного напряжения. В этот промежуток времени выпрямительный диод смещен в обратном направлении и не оказывает влияние на работу схемы. Регулирование угла включения тиристора приводит к изменению времени протекания тока через сопротивление нагрузки, и, следовательно, к изменению подводимой к нагрузке электрической мощности. Во время действия отрицательной полуволны входного напряжения тиристор закрыт. При этом выпрямительный диод открыт и входное напряжение (с учетом падения напряжения на открытом диоде) приложено к нагрузке.

Особенностью рассмотренной схемы является то, что регулирование производится только в течение положительного полупериода входного напряжения. Поэтому при изменении угла включения тиристора от $\alpha = 0$ до $\alpha = \pi$ мощность в нагрузке будет изменяться от 100% до 50% от максимального значения P_{MAX} .

Действующее напряжение на выходе регулятора (при условии $0 < \alpha < \pi$) определяется соотношением:

$$U_{H,D} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} u_{BX}^2 d(\omega t)} = U_m \sqrt{\frac{1}{8\pi} (4\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)}. \quad (5)$$

Тогда мощность, подводимая к нагрузке равна:

$$P = \frac{U_{H,D}^2}{R_H} = \frac{U_m^2}{8\pi R_H} (4\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha). \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) не учитывается падение напряжения на тиристоре и диоде в открытом состоянии.

Регулировочная характеристика устройства приведена на рисунке 14.

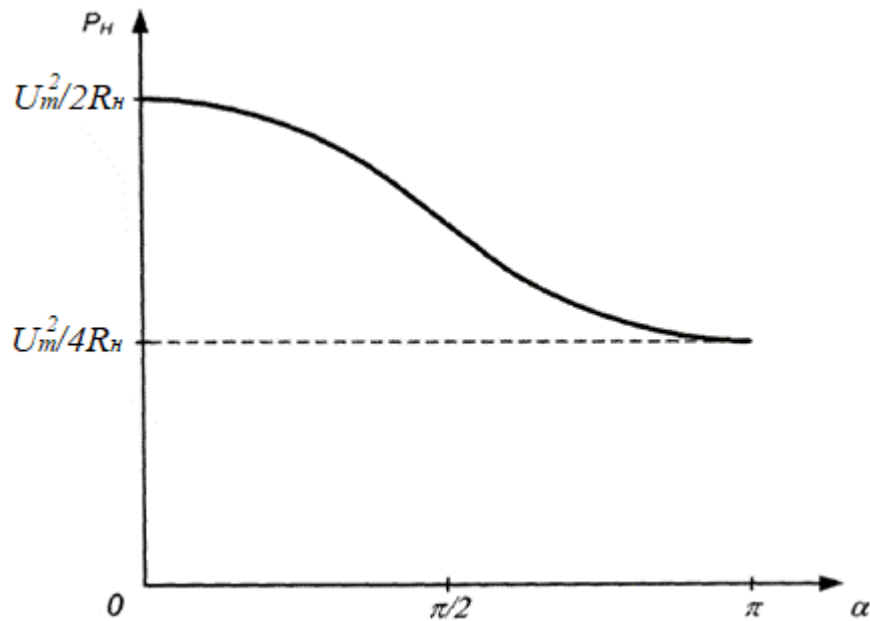


Рисунок 14 – Регулировочная характеристика регулятора мощности

К недостаткам однополупериодного регулирования мощности следует отнести:

- ограниченный диапазон изменения мощности (от 50% до 100%);
- появление постоянной составляющей напряжения на нагрузке при углах включения тиристора $\alpha > 0$.

Оба недостатка могут быть устранены при двухполупериодном регулировании мощности. Для этого в схеме можно использовать два тиристора (рисунок 15, а) или симистор (рисунок 15, б). Схема управления должна вырабатывать управляющие импульсы в каждом полупериоде входного напряжения. При этом мощность на нагрузке можно регулировать в диапазоне от 0 до 100%.

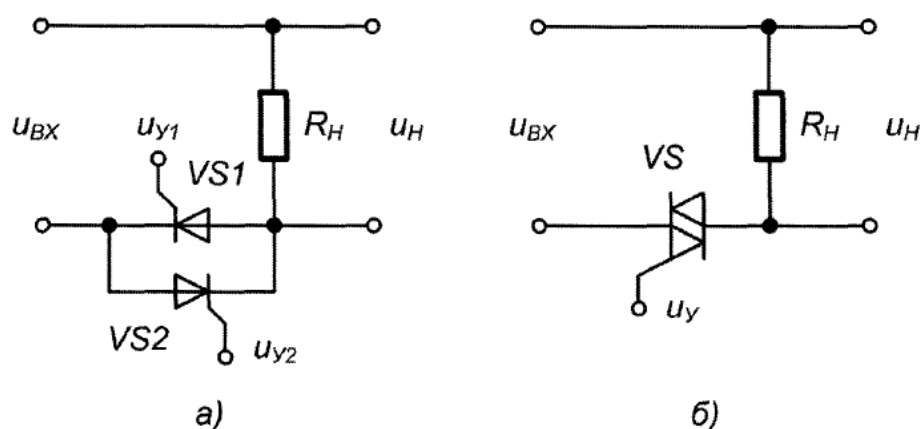


Рисунок 15 – Схемы регуляторов мощности на двух тиристорах (а) и симисторе (б)

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1 Подключение библиотеки тиристоров

Стандартная библиотека LTspice не содержит модель тиристора. Для выполнения лабораторной работы необходимо добавить её вручную.

1.1 Скопируйте файл библиотеки в папку, в которую установлен LTspice (как правило C:\Program Files\LTC\LTspiceXVII\lib\sub). Затем откройте LTspice и создайте новую модель.

1.2 Создайте новую директиву с помощью кнопки SPICE Directive в меню Edit или на панели быстрого доступа. В текстовом поле введите строку “.inc <имя файла библиотеки>” и подтвердите создание директивы нажатием кнопки ОК. Разместите директиву на схеме.

1.3 Теперь с помощью кнопки Component на панели быстрого доступа добавьте в схему изображение тиристора. Он находится в папке [Misc] и называется SCR. Разместите его на схеме.

1.4 Далее необходимо привязать к данному элементу модель тиристора. Для этого щёлкните правой клавишей мыши по надписи SCR рядом с изображением тиристора и замените «SCR» на марку тиристора, соответствующую вашему варианту в таблице 1. Сохраните изменения.

Теперь данный тиристор связан с моделью из внешней библиотеки и может быть использован для выполнения дальнейших заданий лабораторной работы.

2 Исследование работы управляемого выпрямителя

2.1 Соберите в LTspice схему однополупериодного управляемого выпрямителя (рисунок 16). Марка тиристора выбирается в соответствии с вариантом из таблицы 1.

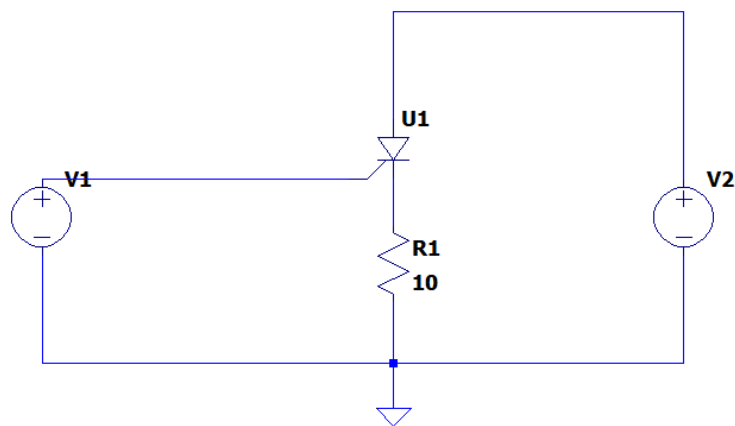


Рисунок 16 – Схема однополупериодного управляемого выпрямителя

2.2 Источник входного напряжения должен генерировать синусоидальный сигнал частотой $f = 50$ Гц. Частоту удобно задавать в виде переменной с помощью директивы `.param`. Создайте её с помощью кнопки SPICE Directive. Пример использования директивы `.param` представлен на рисунке 17. Амплитуду входного сигнала выберите самостоятельно.

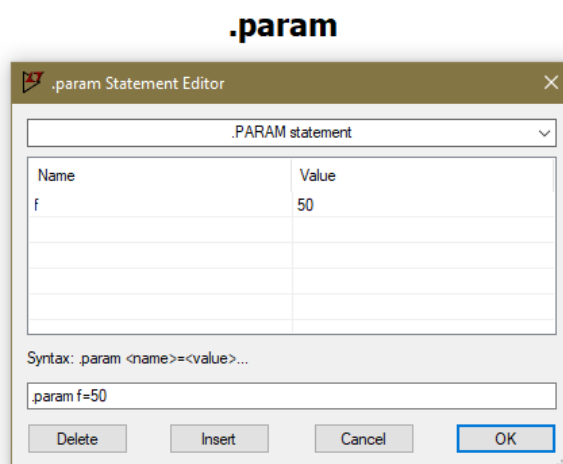


Рисунок 17 – Создание новой переменной с помощью директивы `.param`

Для обращения к переменной при задании параметров в настройках компонентов схемы используют круглые скобки, например {f}.

2.3 Теперь задайте управляющий сигнал. Амплитуду управляющего сигнала достаточно установить порядка нескольких вольт.

С помощью параметра источника сигнала Tdelay[sec] задайте угол включения α . Для этого необходимо преобразовать угол в задержку в секундах. Это можно сделать по формуле:

$$del = \alpha * T / 360,$$

где del – задержка в секундах, T – период исходного сигнала, $T = \frac{1}{f}$.

Установите время задержки, соответствующее углу включения 90° . Время возрастания и убывания для импульса равны 0. Время импульса должно быть малым, порядка микросекунд. Период сигнала импульсного источника установите равным периоду исходного сигнала T .

2.4 Снимите осциллограммы входного, выходного и управляющего сигналов. Для этого запустите симуляцию в режиме Transient. Время симуляции установите так, чтобы сигналы были удобны для наблюдения. Полученные осциллограммы занесите в отчёт.

2.2 Создайте переменную, равную среднему значению напряжения на нагрузке, с помощью директивы .param. Среднее значение напряжения на нагрузке можно рассчитать по формуле (4).

2.3 Отобразите среднее значение напряжения на нагрузке на графике. Для этого можно создать отдельную цепь с источником постоянного напряжения амплитудой равной рассчитанному среднему напряжению и отобразить его на графике.

2.4 Сделайте 10 измерений среднего напряжения на нагрузке, изменяя угол включения от 0° до 180° . Занесите полученные измерения и соответствующие им углы включения в отчёт в виде таблицы.

2.5 Постройте по значениям, полученным в п. 2.4, регулировочную характеристику выпрямителя. Сравните её с характеристикой, представленной на рисунке 11. Полученный график и выводы занесите в отчёт.

3 Исследование работы тиристорного регулятора мощности

3.1 Для реализации схемы тиристорного регулятора мощности дополните схему с рисунка 16 диодом, подключенным встречно-параллельно тиристор. Настройки источников входного и управляющего напряжения, а также переменные использовавшиеся в п. 2 можно оставить без изменений.

3.2 Снимите осциллограммы входного, выходного и управляющего сигналов. Для этого запустите симуляцию в режиме Transient. Время симуляции установите так, чтобы сигналы были удобны для наблюдения. Полученные осциллограммы занесите в отчёт.

3.3 Создайте переменную, равную действующему значению напряжения на нагрузке, с помощью директивы .param. Действующее значение напряжения на нагрузке можно рассчитать по формуле (5).

3.4 Отобразите действующее значение напряжения на нагрузке на графике. Для этого можно создать отдельную цепь с источником постоянного напряжения амплитудой равной рассчитанному действующему напряжению и отобразить его на графике.

3.5 Сделайте 10 измерений действующего напряжения на нагрузке, изменяя угол включения от 0° до 180° . Для каждого значения действующего напряжения рассчитайте мощность, подводимую к нагрузке по формуле (6). Занесите полученные значения действующих напряжений и мощностей, а также соответствующие им углы включения в отчёт в виде таблицы.

3.6 Постройте по значениям, полученным в п. 3.5, регулировочную характеристику регулятора мощности. Сравните её с характеристикой, представленной на рисунке 14. Полученный график и выводы занесите в отчёт.

Таблица 1 – Варианты задания

Вариант	Тиристор
1	EC103D1
2	EC103M1
3	EC103D2
4	EC103M2
5	EC103D
6	EC103M
7	EC103D3
8	EC103M3
9	S4S1
10	S6S1