

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой
«ТЯГОВЫЙ ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ»

Протокол № ____ от _____ 201__ г.

Автор: _____

**ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ С МЕТОДИЧЕСКИМИ
УКАЗАНИЯМИ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Уровень ВО: *Специалитет*

Форма обучения: *Заочная*

Курс: *5*

Специальность/Направление: *23.05.03 Подвижной состав железных
дорог (ПСс)*

Специализация/Профиль/Магистерская программа: *Все специализации*

Москва

Составитель: к.т.н., доц. С.И.Баташов, СТ. ПРЕП. Стрекалов Н.Н.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	4
ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА	4
ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	4
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	4
1. Исследование характеристик транзистора.	4
2. Исследование транзисторного усилителя с общим эмиттером.....	6
3. Исследование транзисторного усилителя с общей базой.	7
4. Исследование транзисторного усилителя с общим коллектором.	9
СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	10
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	14
ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА	14
ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	14
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	15
СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	18
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	21
ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ	21
ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	21
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.	21
1. Мостовой несимметричный (полууправляемый) выпрямитель.	21
2. Мостовой выпрямитель	23
3. Управляемый выпрямитель со средней точкой трансформатора	23
4. Тиристорный регулятор переменного напряжения.....	24
5. Регулятор переменного напряжения на симисторе	25
СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	25
1. Мостовой несимметричный (полууправляемый) выпрямитель.	25
2. Мостовой выпрямитель.....	26
3. Управляемый выпрямитель со средней точкой трансформатора	27
4. Тиристорный регулятор переменного напряжения	28
5. Регулятор переменного напряжения на симисторе	28
6. Схема регулятора.....	28
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	29
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ (ТИРИСТОРНОГО КЛЮЧА)	29
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ПОРЯДОК СОСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА	35
$\Delta U = U_{RMAX} - U_{RMIN}$	37
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	37
ЛИТЕРАТУРА	37
ПРИЛОЖЕНИЕ	38

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучения принципа действия, устройства, основных параметров и способов их определения, схем включения биполярного транзистора. Снятие входных и выходных характеристик транзистора по схеме с общим эмиттером.

ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучение и опробование схемы.
2. Снятие входных статических характеристик транзистора.
3. Снятие выходных статических характеристик транзистора.
4. Построение графиков статических характеристик:
 - входных;
 - выходных;
 - передачи;
 - обратной связи.
5. Расчет коэффициентов усиления:
 - по току;
 - по мощности,
 - по напряжению.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Исследование характеристик транзистора.

1. Органы управления стенда установить в исходное положение: выключатели "220В", "Е1", "Е2/ГИ" - выключено; переключатель "Е2-ГИ" - в положение "Е2", переключатели **R1, R2** - в положение "1", регуляторы Е1, Е2 - "0".
2. Собрать схему рис. 2.1, установить **R1=600 Ом**, включить питание 220 В, источники Е1, Е2. Сначала проверяется возможность снятия входных характеристик. Для этого постепенно увеличивая подводимое напряжение и наблюдая за показаниями приборов необходимо убедиться в работоспособности схемы. При увеличении напряжения $U_{эб}$ величина тока базы I_b должна изменяться в пределах, достаточных для снятия входных характеристик транзистора.

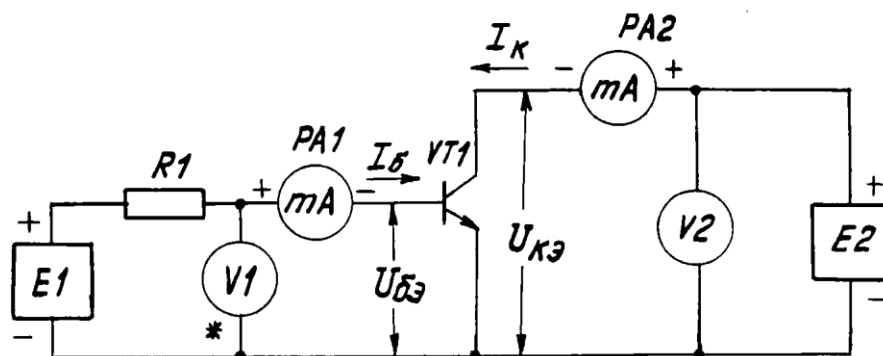


Рис. 2.1.

Затем проверяют возможность снятия выходных характеристик. Для этого изменяя напряжение $U_{кэ}$, следят за величиной тока коллектора $I_{к}$, который должен плавно изменяться в пределах, позволяющих снять выходные статические характеристики транзистора.

3. Снятие входных статических характеристик транзистора.

Для снятия зависимости $I_{б} = f (U_{бэ})$ необходимо изменять напряжение, подводимое к эмиттерному **p-n**-переходу. При снятии этой зависимости необходимо следить за тем, чтобы напряжение между эмиттером и коллектором оставалось постоянным. Следует обратить внимание на то, что входные статические характеристики, снятые при различных $U_{кэ} \neq 0$ практически не отличаются друг от друга, дать объяснение этому явлению.

Установить $U_{кэ}=10$ В, измерить значения $U_{бэ}$, $I_{к}$ при $I_{б} = 0,5; 1; 2; 3$ мА. Данные наблюдений записываются в заранее заготовленную таблицу.

4. Установить $U_{кэ}=20$ В и повторить операции п. 3.

5. Построение статических характеристик транзистора.

На основании результатов наблюдений в прямоугольной системе координат строят семейства входных $I_{б} = f (U_{бэ})$ характеристик и характеристик прямой передачи $I_{к} = f (I_{б})$ транзистора. Характеристики, полученные при $U_{кэ}=10$ В и 20 В, строятся на одном рисунке.

6. По результатам измерений п.3. рассчитать и построить зависимость коэффициента усиления β от $I_{к}$.

$$\beta = I_{к} / I_{б}$$

7. Снятие выходных статических характеристик транзистора.

Для снятия зависимости $I_K = f(U_{KЭ})$ необходимо следить за тем чтобы ток базы оставался постоянным.

Установить $I_6 = 3 \text{ mA}$ и получить точки выходной характеристики $I_K(U_{KЭ})$ измеряя значения I_K при $U_{KЭ} = 1; 3; 5; 10; 15; 20; 25 \text{ В}$.

8. Установить $I_6 = 2 \text{ mA}$ и повторить операции п. 7.
9. Установить $I_6 = 1 \text{ mA}$ и повторить операции п. 7.
10. Построение выходных статических характеристик транзистора.

На основании результатов наблюдений в прямоугольной системе координат строят семейство выходных $I_K = f(U_{KЭ})$ характеристик транзистора. Путем переноса соответствующих точек со входных и выходных характеристик строят характеристики обратной связи. Выходные характеристики, полученные в п.п. 7- 9, построить на одном рисунке.

11. Органы управления стенда установить в исходное положение в соответствии с п. 1.

2. Исследование транзисторного усилителя с общим эмиттером

12. Собрать схему рис. 2.2. Установить $R1 = 600 \text{ Ом}$, $R2 = 120 \text{ Ом}$.

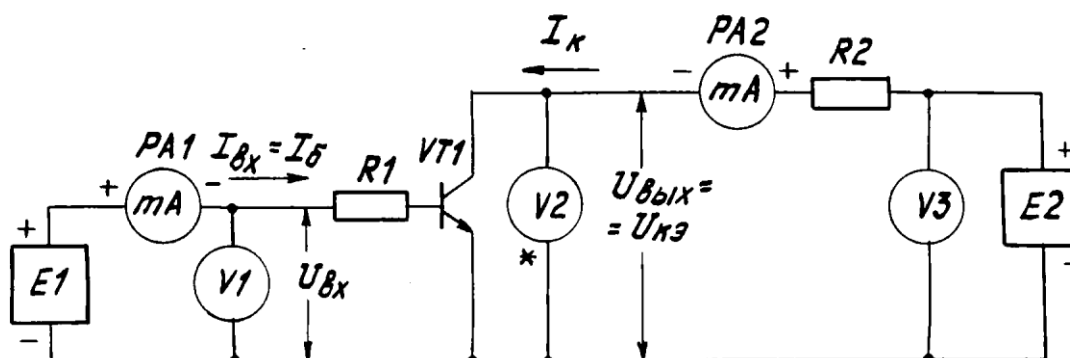


Рис. 2.2.

13. Сначала проверяется работоспособность собранной схемы. Для этого постепенно увеличивают подводимое напряжение и наблюдают за показаниями приборов. При увеличении напряжения $U_{об}$ ток базы I_6 должен изменяться. При увеличении напряжения $U_{ЭК}$ ток коллектора I_K также должен изменяться, сначала резко, а затем - незначительно.
14. Снятие статических характеристик транзисторного усилителя с ОЭ.

Включить $E1$, $E2$, установить напряжение $E2 = 10 \text{ В}$ и получить точки статических характеристик усилителя $U_{вых} = f(U_{вх})$, $U_{вых} = f(I_{вых})$, $I_{вых} = f(I_{вх})$. При снятии точек характеристик сначала определить значение $U_{вх}$, при достижении которого начинается уменьшение $U_{вых}$. Затем определить значение $U_{вх}$, при достижении которого $U_{вых}$ становится близким к 0 и в

дальнейшем практически не меняется. Полученный диапазон $\Delta U_{\text{вх}}$ разделить на четыре равных интервалов. На границе каждого интервала измерять $U_{\text{вых}}$, $I_{\text{вых}}$, $I_{\text{вх}}$. Данные наблюдений записываются в заранее заготовленную таблицу.

Для середины диапазона определить:

- коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}},$$

- коэффициент усиления по току

$$K_I = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}},$$

- коэффициент усиления усилителя по мощности

$$K_p = \frac{|\Delta U_{\text{вых}}| * \Delta I_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}} * \Delta I_{\text{вх}}}.$$

15. Установить **E2=20В, R1=600 Ом, R2=120Ом** и повторить операции п. 14.
16. Установить **R2=600 Ом, R1=600 Ом, E2=20В** и повторить операции п. 14.
17. Построение статических характеристик усилителя.

Одноименные характеристики, точки которых получены в п. 14 - 16 , построить на одном рисунке с указанием для каждого параметра **E2, R**, при которых они получены.

18. Для одного из результатов измерений проверить выполнение соотношения

$$U_{\text{вых}} = E2 - I_{\text{к}} * R2.$$

19. Органы управления стенда установить в исходное состояние в соответствии с п.1.

3. Исследование транзисторного усилителя с общей базой.

20. Собрать схему рис. 2.3. Установить **R1=600 Ом, R2=120 Ом**.

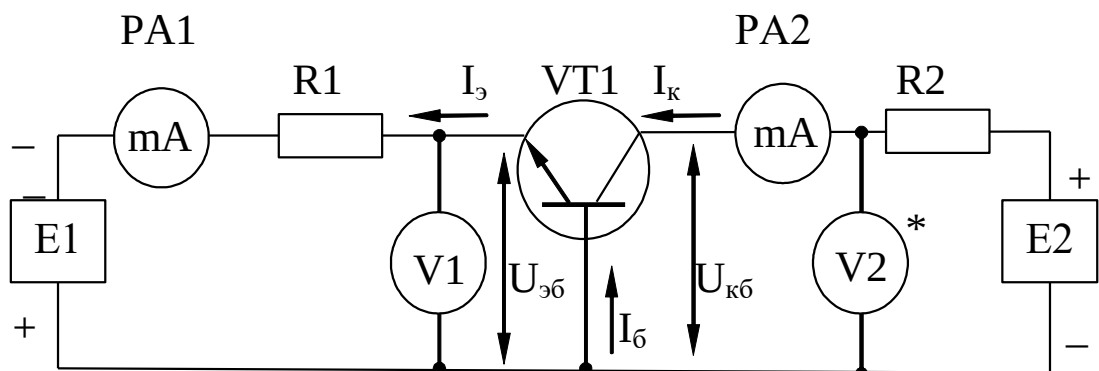


Рис. 2.3.

21. Проверка работоспособности схемы.

Сначала проверяется возможность снятия входных характеристик. Для этого устанавливается напряжение $U_{кб}$ порядка 50 - 60 % от наибольшего значения этого напряжения для исследуемого транзистора. Поддерживая это напряжение постоянным, изменяют напряжение $U_{эб}$ и следят за показаниями миллиамперметра, измеряющего ток эмиттера I_e , величина которого должна меняться в пределах, достаточных для снятия входных характеристик транзистора.

Затем проверяют возможность снятия выходных характеристик. Для этого изменяя напряжение $U_{кб}$ и поддерживая величину тока эмиттера I_e постоянной, следят за изменением тока коллектора. Последний должен плавно изменяться в пределах, позволяющих снять выходные статические характеристики транзистора.

22. Снятие входных статических характеристик транзисторного усилителя с ОБ.

Включить **E1**, **E2**, установить напряжение **E2=10В** и получить точки входной характеристики.

Для снятия зависимости $I_e = f(U_{эб})$ необходимо изменять напряжение, подводимое к эмиттерному $p - n$ - переходу. При снятии этой зависимости необходимо следить за тем, чтобы напряжение между базой и коллектором оставалось постоянным. Перед снятием характеристик заготавливают таблицу наблюдений.

23. Установить **E2=20В** и повторить операции п. 22.

24. Снятие выходных статических характеристик транзисторного усилителя с ОБ.

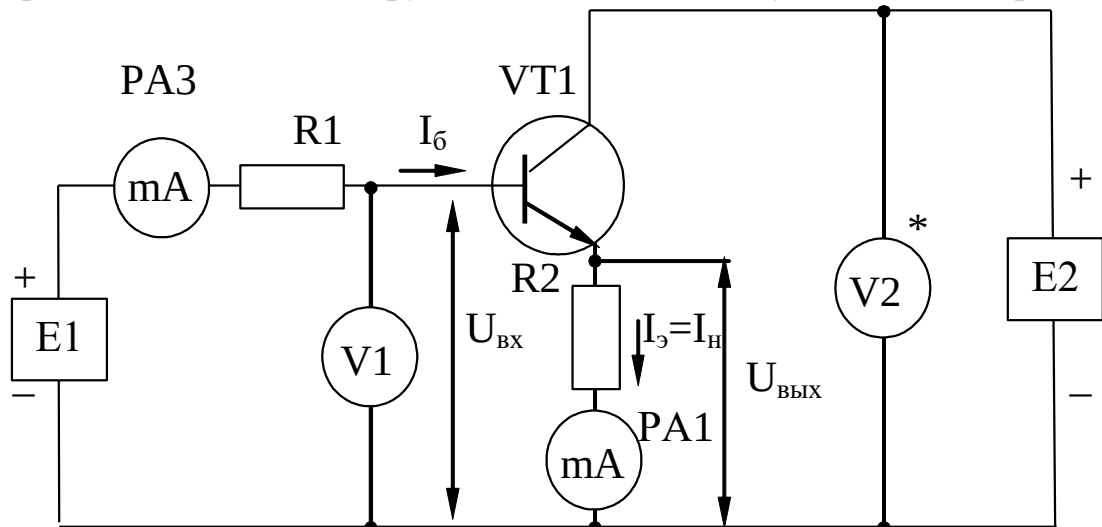
Выходные статические характеристики снимают для двух значений тока эмиттера I_e , которые поддерживают в процессе наблюдений неизменными. Величины токов эмиттера зависят от типа исследуемого транзистора. Напряжение $U_{кб}$ изменяют от 0 до 10 - 15 В через 2-3 В. Данные наблюдений записываются в заранее заготовленную таблицу.

25. Построение графиков статических характеристик.

На основании результатов наблюдений в прямоугольной системе координат строят семейство входных и выходных характеристик транзисторного усилителя с ОБ. Путем переноса соответствующих точек со входных и выходных характеристик строят характеристики передачи и обратной связи.

4. Исследование транзисторного усилителя с общим коллектором.

26.Собрать схему рис.2.3. Установить $R1=20\text{ Ом}$. Включить $E1$, $E2$, установить напряжение $E2=10\text{ В}$ и измерить значения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$, тока нагрузки $I_{\text{Н}}$, входного тока усилителя $I_{\text{ВХ}}$ при $U_{\text{ВХ}}=1$,



2, 3, 4, 5, 6В.

Рис. 2.3.

27.По результатам измерений построить:

- статическую характеристику усилителя $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$,
- зависимость статического коэффициента усиления по напряжению

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} \text{ от } U_{\text{ВХ}}$$

28.По результатам измерений при $U_{\text{ВХ}}=6\text{В}$ рассчитать входное сопротивление усилителя

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$$

Проверить выполнение соотношений $R_{\text{ВХ}} = (\beta + 1) \cdot R2$ и $I_{\text{Н}} = (\beta + 1) \cdot I_{\text{ВХ}}$. Значение β берется из опытов по п.6 для $I_{\text{К}} = I_3 - I_6 = I_{\text{Н}} - I_{\text{ВХ}}$.

Для этих же данных рассчитать статический коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{U_{\text{ВЫХ}} * I_{\text{Н}}}{U_{\text{ВХ}} * I_{\text{ВХ}}}$$

и статический коэффициент усиления по току

$$K_1 = \frac{I_H}{I_{BX}}$$

29. Органы управления стенда установить в исходное положение в соответствии с п.1.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально и должен содержать :

1. Наименование и цель работы:
2. Схема для исследования характеристик биполярного транзистора.
3. Таблица результатов

$U_{кэ}=10\text{ В}$			β	$U_{кэ}=20\text{ В}$		
$U_{бэ},\text{ В}$	$I_{к},\text{ mA}$	$I_{б},\text{ mA}$		$U_{бэ},\text{ В}$	$I_{к},\text{ mA}$	$I_{б},\text{ mA}$

4. График входных характеристик $I_{б} = f(U_{бэ})$
5. График характеристик прямой передачи.
6. График зависимости коэффициента усиления β от $I_{к}$
7. Таблица результатов выходных характеристик транзистора.

$I_{б} = 3\text{ mA}$		$I_{б} = 2\text{ mA}$		$I_{б} = 1\text{ mA}$	
$U_{кэ},\text{ В}$	$I_{к},\text{ mA}$	$U_{кэ},\text{ В}$	$I_{к},\text{ mA}$	$U_{кэ},\text{ В}$	$I_{к},\text{ mA}$

8. График выходных характеристик биполярного транзистора.
9. Схема для исследования транзисторного усилителя с ОЭ.

10. Таблица результатов исследования

R1=600 Ом, R2=120 Ом, E2=10В			R1=600 Ом, R2=120 Ом, E2=20В			R1=600 Ом, R2=600 Ом, E2=20В		
U _{ВЫХ} , В	I _{ВЫХ} , mA	I _{БХ} , mA	U _{ВЫХ} , В	I _{ВЫХ} , mA	I _{БХ} , mA	U _{ВЫХ} , В	I _{ВЫХ} , mA	I _{БХ} , mA

11. Расчет коэффициентов усиления:

$K_u =$, $K_I =$, $K_P =$.

12. Графики статических характеристик усилителя с ОЭ.

13. Проверка выполнения соотношения

$$U_{ВЫХ} = E2 - I_K * R2 =$$

14. Схема для исследования транзисторного усилителя с общей базой.

15. Таблица результатов исследования входных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ.

U _{кб} = В		U _{кб} = В	
U _{кб} , В	I _б , mA	U _{кб} , В	I _б , mA

16. Графики входных статических характеристик усилителя с ОБ.

17. Таблица результатов выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ.

I _э = mA		I _э = mA	
U _{кб} , В	I _к , mA	U _{кб} , В	I _к , mA

- 18.Графики выходных статических характеристик усилителя с ОБ.
 19.Графики статических характеристик передачи и обратной связи усилителя с ОБ.
 20.Схема для исследования транзисторного усилителя с общим коллектором.
 21.Таблица результатов исследования статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОК.

$U_{BX}, В$	$U_{ВЫХ}, В$	I_{BX}, mA	I_H, mA	K_U

- 22.График статической характеристики усилителя $U_{ВЫХ} = f(U_{BX})$.
 23.График зависимости статического коэффициента усиления по напряжению $K_U = f(U_{BX})$.
 24.Расчет входного сопротивления усилителя:

$$R_{BX} =$$

- 25.Проверка выполнения соотношения:

$$R_{BX} = (\beta + 1) * R_2 =$$

$$I_H = (\beta + 1) * I_{BX} =$$

- 26.Расчет статического коэффициента усиления по мощности

$$K_P =$$

- 27.Расчет статического коэффициента усиления по току

$$K_I =$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое транзистор?
2. Назовите области (внутренние) транзистора, из которых он состоит?
3. На какие виды подразделяются транзисторы по технологии их изготовления?
4. Как классифицируются транзисторы?
5. Как маркируются транзисторы?
6. Назовите режимы работы транзисторов и области их применения?
7. Назовите материалы, используемые при изготовлении транзисторов?
8. Объясните принцип работы биполярного транзистора?
9. Для чего ширину базы транзистора делают как можно уже?
10. Назовите основные параметры, характеризующие качество и усилительные свойства транзистора?
11. Перечислите возможные схемы включения транзисторов и области их применения?
12. Почему при изучении схем включения транзисторов используют характеристики статического режима?
13. Какие характеристики используются при сравнении различных схем включения транзисторов?
14. Назовите особенности схемы с общим эмиттером?
15. Область применения схем с общим эмиттером?
16. Что такое модуляция ширины базы и как она влияет на характеристики транзистора?
17. Почему выходные характеристики усилителя с ОЭ в начальной части имеют большую крутизну, чем при больших значениях $U_{эк}$?
18. Дайте определение входной статической характеристики усилителя, собранного по схеме с ОЭ, ОБ, ОК?
19. Дайте определения выходной статической характеристики усилителя, собранного по схеме с ОЭ, ОБ, ОК?
20. Что такое характеристики передачи усилителя, собранного по схеме с ОЭ, ОБ, ОК? Объяснить характер этих зависимостей?
21. Что такое характеристика обратной связи усилителя, собранного по схеме с ОЭ, ОБ, ОК? Что она характеризует?
22. Как влияет температура на статические характеристики транзистора?
23. Покажите полярность подключения питания в схеме с общим эмиттером при использовании транзисторов с различными типами проводимости?
24. Почему величина напряжения $U_{кб}$ оказывает малое влияние на входные характеристики усилителя, собранного по схеме с ОБ?
25. Объясните механизм протекания тока через эмиттерный переход для случая, когда $U_{эб} = 0$, а $U_{бк} \neq 0$ для усилителя, собранного по схеме с ОБ?
26. Покажите полярность подключения питания в схеме усилителя, собранного по схеме с ОБ с различными типами транзисторов?
27. В чем отличие входных характеристик в схемах с общей базой и с общим эмиттером и почему?
28. Назовите особенности и основные параметры схемы с общей базой?

29. Назовите область применения схем с общей базой?

Литература

1. С.Н. Засорин и др. Электронная и преобразовательная техника. М., Транспорт. 1981, стр. 60-85.
2. А.Т.Бурков. Электронная техника и преобразователи. - М., Транспорт, 1999, стр. 61-85.
3. А.Е.Зорохович, С.С.Крылов. Основы электроники для локомотивных бригад. – М.: Транспорт, 1992, стр. 48- 57.
4. Г.Н.Акимова. Электронная техника. – М.: Маршрут, 2003, стр. 43-54.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучение принципа действия и свойств тиристора, особенностей его работы и характеристик. Определение основных параметров тиристорных устройств применения для разработки устройств преобразовательской техники.

ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучение и опробование схемы.
2. Снятие вольт-амперной характеристики неуправляемого переключающего тиристора (динистора) $I=f(U)$ при $I_{упр} = 0$.
3. Снятие вольт-амперной характеристики управляемого переключающего тиристора (тринистора) $I=f(U)$ для разных значений тока управляющего электрода $I_{упр}$.
4. Построение вольт-амперных характеристик тиристора.
5. Используя семейство полученных характеристик $I=f(U)$, построить характеристику управления $U_{вкл} = f(I_{упр})$.
6. Определение основных параметров тиристорных устройств по вольт-амперным характеристикам.
7. Используя семейство вольт-амперных характеристик рассчитать входное сопротивление $R_{вх}$ тиристора для различных значений регулируемых параметров.
8. Построить зависимости входного сопротивления тиристора от регулируемых параметров.
9. Определения влияния скорости нарастания прямого напряжения на величину напряжения включения.
10. Определение коэффициента запирающего тиристора.
11. Сопоставление полученных результатов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По предлагаемым источникам изучить принцип действия полупроводникового тиристора (диодного и триодного). На структурной модели тиристора пояснить принцип проводимости и усиления электрических сигналов.
2. Органы управления стенда установить в исходное положение:
 - выключатели "220В", "Е1", "Е2/ГИ" - "Выключено";
 - переключатель "Е2-ГИ" - в положение "Е2",
 - переключатель "Открытие -Заккрытие" - в положение "Открытие",
 - переключатели R1, R2 - в положение "1", регуляторы Е1, Е2 -"0".
3. Изучение и опробование схемы.

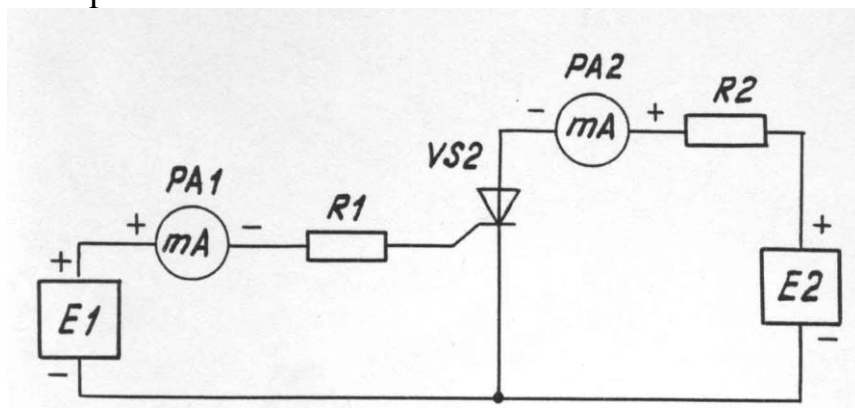


Рис. 4.5.

Собрать схему рис. 4.5. Установить $R1=600 \text{ Ом}$, $R2=120 \text{ Ом}$. Плавно изменяя напряжение $E2$ на тиристоре убеждаются в зависимости прямого тока тиристора от прямого напряжения. Повышать напряжение следует до тех пор, пока ток миллиамперметра $PA1$ не изменится скачком.

4. Снятие вольт-амперных характеристик тиристора при $I_{упр} = 0$

4.1. Процесс снятия характеристики состоит из двух этапов; вначале снимают ветвь характеристики $I_{обр} = f(U_{обр})$ при обратном включении диода, а затем $I_{пр} = f(U_{пр})$ при прямом включении. В обоих случаях источник $E1$ должен быть отключен, поддерживая тем самым $I_{упр} = 0$.

4.2. При снятии ветви характеристики, соответствующей обратному включению диода, полярность источника $E2$ меняют на обратную, показанную на рис. 4.5., а его напряжение изменяют через интервал 5-10 В (в зависимости от типа исследуемого диода). Величину обратного тока фиксируют микроамперметром $PA1$, а напряжение на диоде вольтметром V^* . Результаты измерений записываются в заранее подготовленную таблицу.

4.3. Для снятия ветви характеристики, соответствующей прямому включению диода, полярность источника $E2$ устанавливают как

показано на рис. 4.5. и далее изменяя напряжение источника E2 с интервалом 3 – 5 В, фиксируют значения тока микроамперметром PA1, а напряжение на диоде – вольтметром V*.

- 4.4. Приблизившись к точке включения (о чем свидетельствуют увеличение скорости возрастания тока), изменяя напряжение источника E2 через 1 - 2 В, снимают прямую ветвь характеристики в области перегиба падающего участка. Повышать напряжение до тех пор, пока ток миллиамперметра PA1 не изменится скачком, что свидетельствует об открытии тиристора. Показания приборов записывают в заранее подготовленную таблицу.
- 4.5. Определить напряжение $V_{\text{п}}$ переключения тиристора.
- 4.6. Для определения тока выключения тиристора плавно снижают напряжение источника E2 до тех пор, пока ток миллиамперметра PA1 не изменится скачком, что свидетельствует о закрытии тиристора.
- 4.7. На основании результатов измерений в прямоугольной системе координат строят ВАХ динистора $I = f (U)$ при $I_{\text{упр}} = 0$. Масштабы прямого и обратного токов по осям ординат должны быть различны. Примерный вид этой характеристики показан на рис. 4.3.
5. Снятие вольт-амперных характеристик управляемого переключающего тиристора (тринистора).
 - 5.1. Устанавливают ток управления электрода в соответствии с допустимыми значениями для исследуемого типа диода и плавным изменением напряжения E1 убеждаются в зависимости тока управляющего электрода $I_{\text{упр}}$ от напряжения включения $U_{\text{вкл}}$ (по сравнению с предыдущим экспериментом, когда $I_{\text{упр}} = 0$, при $I_{\text{упр}} > 0$ напряжение включения должно уменьшаться).
 - 5.2. Далее устанавливают одно из трех значений токов управляющего электрода $I_{\text{упр}}$ и изменяя напряжение E2, фиксируют момент включения тиристора.
 - 5.3. Снизить напряжение E2 до нуля. Включить источник E1 и установить ток $I_{\text{упр}} = 2$ мА. Повышая напряжение E2, определить напряжение переключения тиристора при $I_{\text{упр}} = 2$ мА. Результаты измерений записывают в заранее подготовленную таблицу.
 - 5.4. Повторить операции при $I_{\text{у}} = 3$ мА и при $I_{\text{у}} = 4$ мА. После окончания измерений установить регуляторы источников E1 и E2 на ноль и выключить источники. Используя данные опытов в прямоугольной системе координат строят зависимость $U_{\text{вкл}} = f (I_{\text{упр}})$ - пусковую характеристику или характеристику управления. Примерный вид этой характеристики показан на рис. 4.4.
6. Расчет входного сопротивления тиристора.

- 6.1. Пользуясь вольт-амперными характеристиками тиристора можно определить входное сопротивление. Для этого можно воспользоваться методом характеристического треугольника. Суть этого метода рассматривалась в предыдущих работах, поэтому в данных методических указаниях этот метод не описывается. Данные расчета записывают в заранее подготовленную таблицу. Параметр, характеризующий режим работы тиристора, определяется студентом самостоятельно и записывается в табл.
- 6.2. По результатам расчетов в прямоугольной системе координат строят характеристику входного сопротивления.
7. Изучение влияния скорости нарастания напряжения на тиристоре на величину напряжения переключения (включения).
- 7.1. Перевести переключатель "Е2-ГИ" в положение "ГИ" (генератор прямоугольных импульсов), включить Е2 и, постепенно повышая его напряжение, определить величину $V_{\text{вкл}}$ при скачкообразном приложении напряжения к тиристору. Определите относительное уменьшение напряжения переключения по сравнению с результатом измерения по п.5.
- 7.2. Снизить напряжение Е2 до 0, подключить параллельно тиристору РС цепь, определить $V_{\text{вкл}}$ и сравнить его с результатом измерения по п. 5 и объяснить результат сравнения. Снизить напряжение Е2 до 0, выключить Е2, переключатель "Е2-ГИ" установить в положение "Е2".
8. Определение коэффициента запираения тиристора.
- 8.1. Собрать схему рис. 4.6, установить $R1=100 \text{ Ом}$, $R2=120 \text{ Ом}$, включить Е1, Е2.

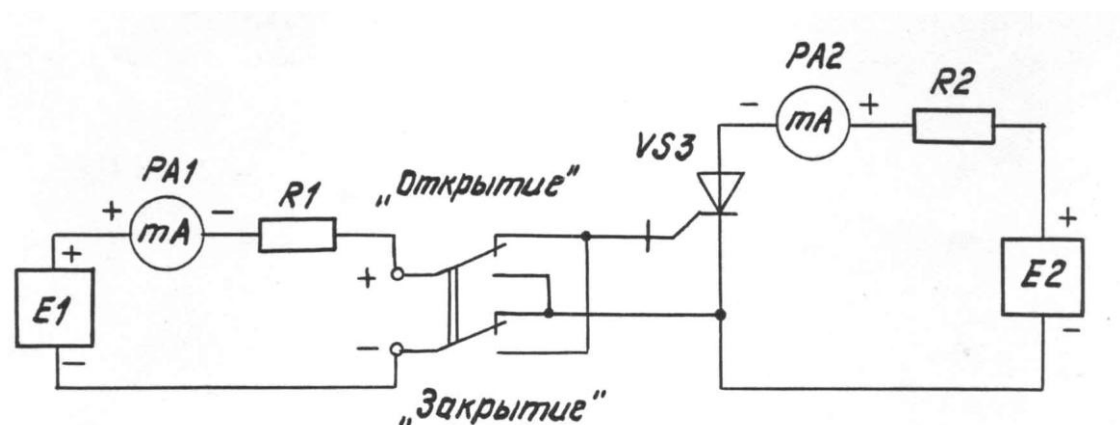


Рис. 4.6.

- 8.2. Установить напряжение $E2=25 \text{ В}$ и, повышая напряжение $E1$, определить ток управляющего электрода $I_{y \text{ вкл}}$, при котором запираемый тиристор VS3 включается. Измерить по миллиамперметру PA1 анодный ток тиристора I_A . Снизить напряжение $E1$ до нуля, установить переключатель в положение "Закрытие" и повышая напряжение $E1$, определить ток управляющего электрода $I_{y \text{ выкл}}$, при

котором тиристор отключается. Значение $I_{у\text{ выкл}}$ фиксировать в момент скачкообразного уменьшения показаний РА2.

8.3. Рассчитать коэффициент запираения $k_3 = I_A / I_{у\text{ выкл}}$.

9. Повторить операции п. 8, устанавливая напряжение $E_2 = 20$ и 15 В.

10. Исследование работы симистора.

10.1. Собрать схему рис. 4.7. Установить $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 120 \text{ Ом}$, напряжение $E_2 = 25$ В. Поднимая напряжение E_1 , определить ток I_{y1} управляющего электрода, при котором включается симистор.

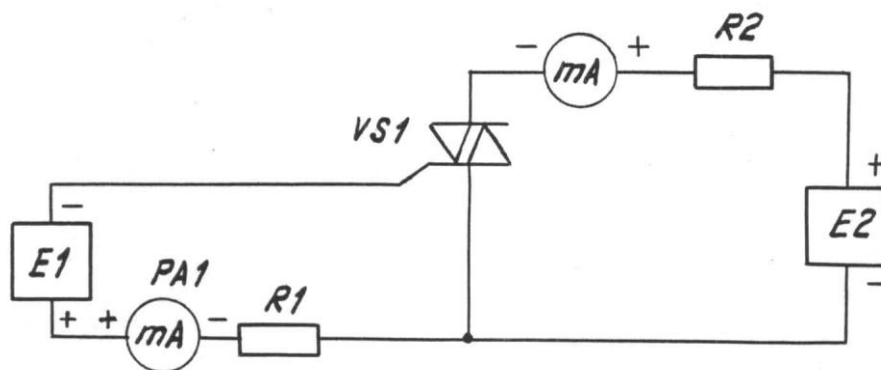


Рис. 4.7.

10.2. Уменьшить напряжение E_2 , E_1 до 0. Поменяв местами провода, подходящие к аноду и катоду симистора от источника E_2 . *Обратить внимание на то, что питание цепей управления должно остаться без изменения.* Определить ток управления I_{y2} в момент включения симистора при обратной полярности анодного напряжения.

11. Органы управления стенда установить в исходное положение в соответствии с п.1.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально и должен содержать :

1. Наименование и цель работы:
2. Схема для получения точек вольт-амперной характеристики тиристора.
3. Таблица результатов (для обратной ветви ВАХ неуправляемого тиристора)

U_{VD} , В	5	10						
I_{VD} , mA								

4. Таблица результатов (для прямой ветви ВАХ неуправляемого тиристора)

U_{VD} , В	3	6						
I_{VD} , mA								

5. Графики ВАХ закрытого, открытого и обратного непроводящего состояний неуправляемого тиристора

6. Таблица результатов характеристики управления тиристора

$I_{\text{упр}} , \text{ мА}$	0	2	3	4
$U_{\text{вкл}} , \text{ В}$				

7. График характеристики управления тиристора

8. Таблица результатов расчета входного сопротивления тиристора

$R_{\text{вх}}$	Ом	

9. График характеристики входного сопротивления тиристора.

10. По графикам ВАХ определить основные параметры тиристора:

$U_{\text{вкл}} =$, $I_{\text{вкл}} =$, $I_{\text{выкл}} =$.

11. Изучение влияния скорости нарастания напряжения на тиристоре на величину напряжения переключения (включения). Результаты наблюдений:

$U_{\text{вкл(ГПН)}} =$, $U_{\text{вкл(ГПН-RC)}} =$.

12. Объяснение полученных результатов:

13. Схема для определения коэффициента запираания тиристора.

14. Таблица результатов

E2	B	25	20	15
IA	mA			
$I_{\text{у выкл}}$	mA			
$K_3 = IA / I_{\text{у выкл}}$				

15. График зависимости $K_3 = f(E2)$.

16. Схема для исследования работы симистора.

17. Результаты наблюдений:

$I_{y1} =$, $I_{y1} =$.

18. Выводы по работе:

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие переходы в четырехслойной структуре тиристора являются эмиттерными, а какие коллекторными?
2. Объясните принцип работы тиристора (диодного и триодного).
3. Чем отличается вольт-амперная характеристика диода от вольт-амперной характеристики тиристора и почему?
4. Объясните форму вольт-амперной характеристики тиристора и влияние на нее тока управляющего электрода?
5. В чем состоит принципиальное отличие характеристик тиристора и транзистора? Почему тиристор нельзя использовать для усиления электрических сигналов?
6. Почему для изготовления тириستоров используется кремний, а не германий?
7. Назовите основные параметры тириستоров.
8. Поясните физический смысл параметров тиристора: напряжение включения, ток выключения, ток спрямления. Чем определяется разброс, случайный характер этих параметров?
9. Чем ограничены значения тока и напряжения на управляющем электроде тиристора?
10. Какие параметры в большей мере влияют на отпирающий ток и отпирающее напряжение управляющего электрода тиристора?
11. Почему тиристор может оставаться во включенном состоянии при отключении управляющей цепи?
12. В чем причина неустойчивости и разброса параметров тиристора?
13. Укажите способы перевода тиристора из открытого состояния в закрытое.
14. Укажите области применения тиристоров. В каких электронных устройствах применяется тиристор?
15. Что такое время включения и выключения тиристора и от чего оно зависит?
16. Объясните влияние скорости нарастания на напряжение переключения тиристора?

Литература

1. С.Н. Засорин и др. Электронная и преобразовательная техника. М., Транспорт. 1981, стр. 97-115.
2. А.Т.Бурков. Электронная техника и преобразователи. - М., Транспорт, 1999, стр. 86-110.
3. А.Е.Зорохович, С.С.Крылов. Основы электроники для локомотивных бригад. – М.: Транспорт, 1992, стр. 61- 77.
4. Г.Н.Акимова. Электронная техника. – М.: Маршрут, 2003, стр. 69-75.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучение схем управляемых выпрямителей переменного тока.

ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.

1. Изучение и опробование схем выпрямления.
2. Снятие данных и осциллограмм.
3. Построение характеристик выпрямителей:
 - внешних,
 - регулировочных,
 - угла коммутации от различных параметров.
4. Определение основных параметров выпрямителей по осциллограммам:
5. Проверка основных расчетных соотношений для исследуемых выпрямителей.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Мостовой несимметричный (полууправляемый) выпрямитель.

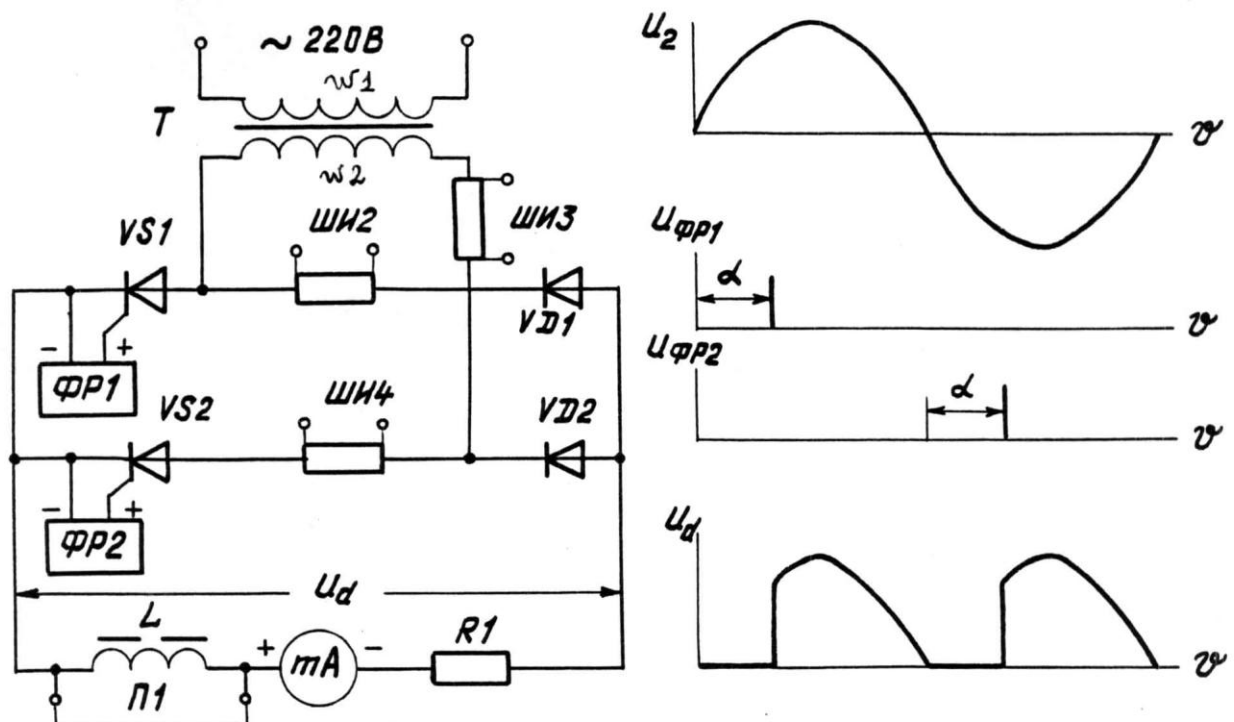


Рис. 6.1. Принципиальная схема и временные диаграммы работы полууправляемого выпрямителя

1.1. Органы управления стенда установить в исходное состояние:

переключатели $L_{тр}$, L , $R1$, $R2$, C - в положение 1, выключатель фазорегулятора - выключено, переключатель фазорегулятора - "1", регулятор угла управления тиристорами - 0.

1.2.Собрать схему рис. 6.1.

Шунты измерительные ШИ2, ШИ3, ШИ4 служат для снятия осциллограмм токов диода **VD1**, тиристора **VS2** и вторичной обмотки трансформатора ω_2 . Выходы 1, 2 фазорегулятора обозначены на схеме соответственно ФР1 и ФР2. Перемычка П1 обеспечивает активный характер нагрузки выпрямителя. При положении "1" переключателя фазорегулятора импульсы на выходах ФР1 и ФР2 появляются в смежные полупериоды питающего напряжения со сдвигом на угол управления α относительно начала полупериода (см. рис. 6.1). Регулирование одноименным регулятором изменяет величину среднего значения выпрямленного напряжения U_d . Установить **R2=500м**. Включить питание стенда и фазорегулятора.

1.3. Подключить осциллограф и вольтметр на выход выпрямителя и получить точки зависимости среднего значения выпрямленного напряжения U_d от угла управления α . Расчет α по осциллограмме производится с учетом того, что период выпрямленного напряжения равен половине периода питающего напряжения, т.е. составляет 180° . При горизонтальной развертке 2мс/см период U_d будет равен на экране осциллографа 50 мм, т.к. при частоте 50 Гц длительность полупериода равна 10 мс. Измерения производить при пяти значениях $\alpha \dots \alpha_{max}$ (максимальное значение α , которое можно задать одноименным регулятором), 120° , 90° , 60° , α_{min} (минимальное значение α , которое можно задать одноименным регулятором).

1.4. При $\alpha=90^\circ$. Измерить действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 и проверить выполнение соотношения

$$U_d = 0,9 U_2(1 + \cos \alpha) / 2$$

Объяснить, за счет каких потерь имеется отклонение от этого соотношения и вычислить эти потери.

1.5. При $\alpha=90^\circ$ снять осциллограммы выпрямленного напряжения U_d , напряжения U_{vd1} на диоде **VD1**, напряжения U_{vs2} на тиристоре **VS2**, тока i_{vd1} диода **VD1**, тока i_{vs2} тиристора **VS2**, тока i_2 вторичной обмотки трансформатора. Осциллограммы показать на одном рисунке.

1.6. Изменяя сопротивление **R2**, получить точки внешней характеристики выпрямителя, представляющей из себя зависимость выпрямленного напряжения U_d от тока нагрузки I_d . Измерение производить при $\alpha = \alpha_{min}$.

1.7. Выключить питание стенда.

2. Мостовой выпрямитель

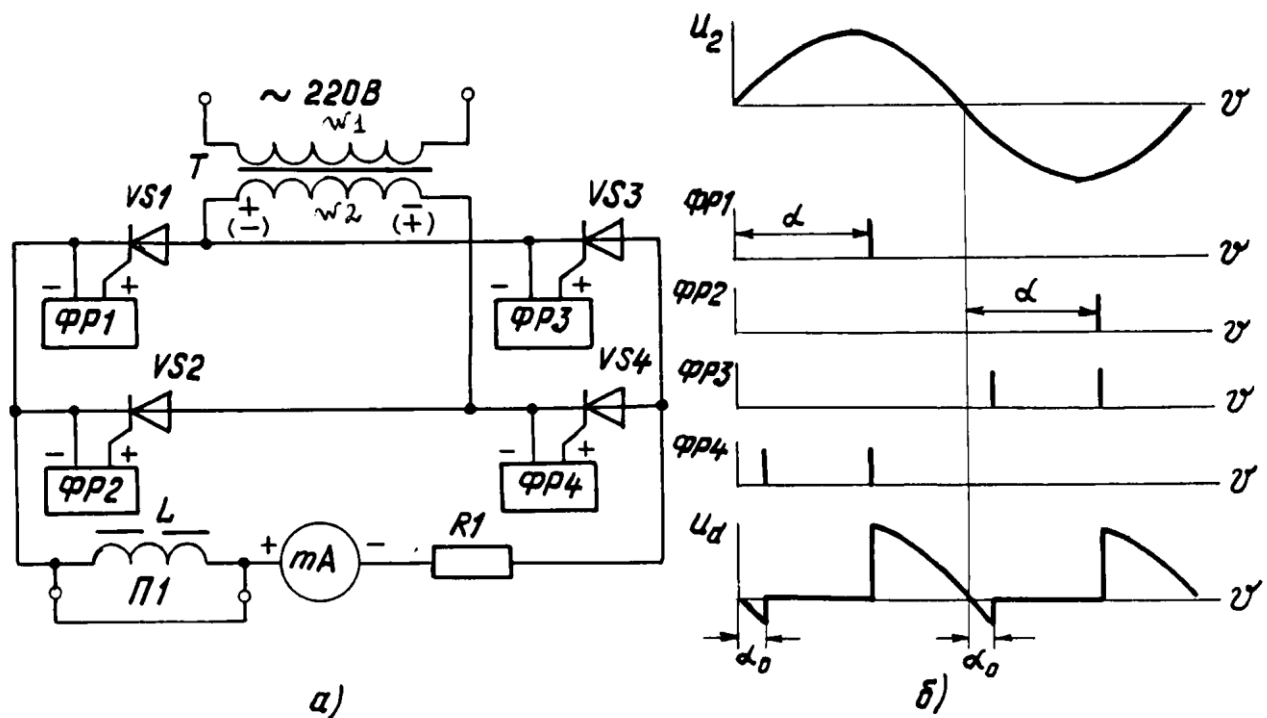


Рис. 6.2. Управляемый мостовой выпрямитель

- 2.1. Собрать схему рис. 6.2, установить $R_2=30 \text{ Ом}$, включить питание стенда.
- 2.2. Снять осциллограмму выпрямляемого напряжения U_d при $\alpha=90^\circ$.
- 2.3. Получить точки зависимости выпрямленного напряжения U_d от угла управления α . Измерения производить при значениях α , указанных в п. 1.4.
- 2.4. Установить $L_1=250 \text{ мГн}$ и удалить перемычку с L .
- 2.5. Снять осциллограмму выпрямленного напряжения при $\alpha=90^\circ$. Измерить и показать на осциллограмме угол α_0 . Измерить и показать на осциллограмме обратное напряжение u_{VS0} , которое прикладывается к тиристорам в момент его запертия при угле α_0 .
- 2.6. Получить точки зависимости выпрямленного напряжения U_d от угла управления α . Измерения производить при углах управления $120^\circ, 90^\circ, 60^\circ, \alpha_{\min}$.
- 2.7. Снять осциллограмму напряжения u_{VS} на одном из тиристоров. При изображении осциллограммы прямое напряжение показывать положительным, обратное - отрицательным.

3. Управляемый выпрямитель со средней точкой трансформатора

- 3.1. Собрать схему рис. 6.3,а. Установить $R_2=30 \text{ Ом}$, $L=250 \text{ мГн}$.
- 3.2. Включить питание стенда, установить $\alpha=50^\circ$ и снять осциллограмму выпрямленного напряжения.

- 3.3. Удалить перемычку с **L** и убедиться, что осциллограмма практически не меняется. Измерить среднее значение выпрямленного напряжения U_d при $\alpha=50^\circ$.
- 3.4. Получить точки зависимости $U_d(\alpha)$ при значениях α , перечисленных в п. 1.4.
- 3.5. Разорвать цепь обратного диода **VD1**, установить $\alpha=50^\circ$ и снять осциллограмму выпрямленного напряжения.
- 3.6. Получить четыре точки зависимости $U_d(\alpha)$ при изменении α в диапазоне от $\alpha_{\min}$ до 80° .
- 3.7. Выключить питание стенда.

4. Тиристорный регулятор переменного напряжения

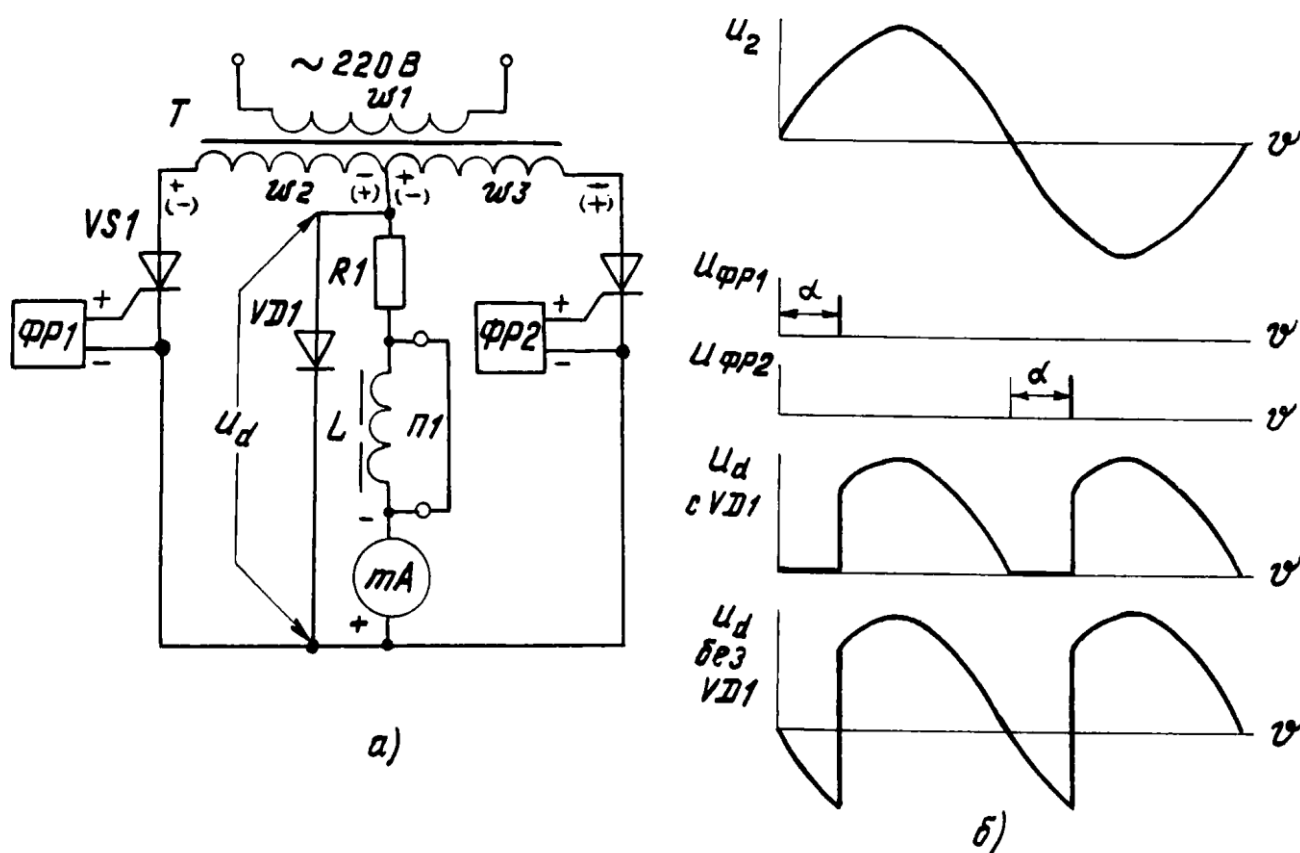


Рис.6.3.

4.1. Собрать схему рис. 6.7, а.

Установить **R2=30 Ом**, переключатель миллиамперметра установить в положение "~". Включить питание стенда и получить точки зависимости действующего значения тока нагрузки I_n от угла управления α при значениях α , перечисленных в п. 1.4.

4.1. По измеренным значениям тока нагрузки вычислить величины напряжения на нагрузке $U_H = I_H R_2$. В отчете привести график $U_H(\alpha)$.

5. Регулятор переменного напряжения на симисторе

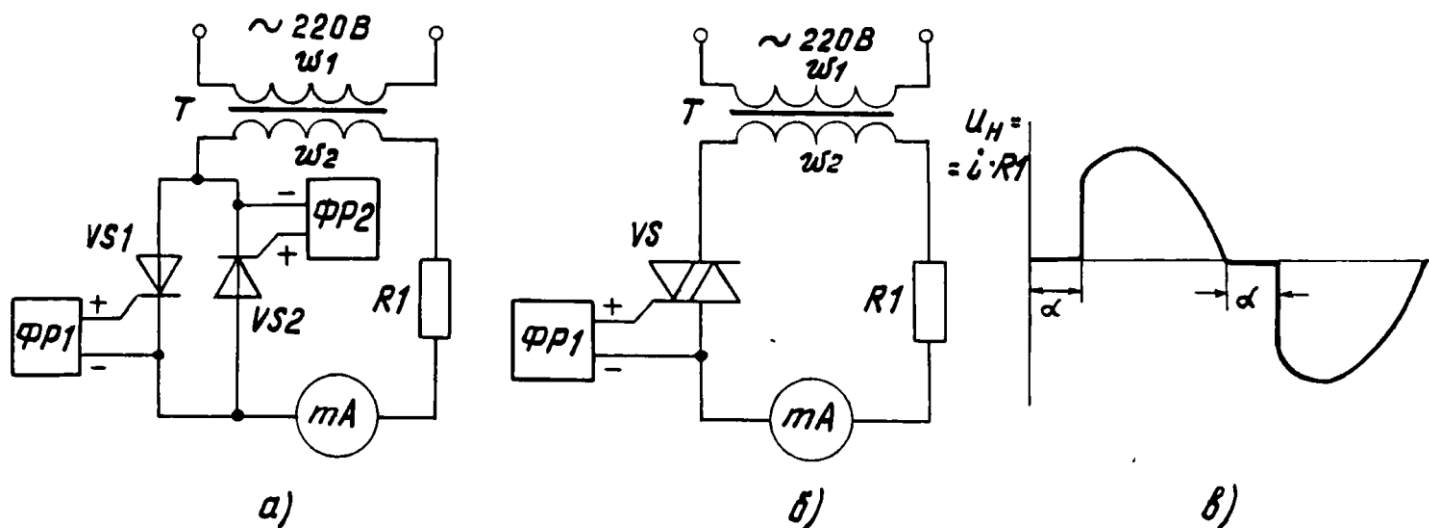


Рис. 6.4.

5.1. Собрать схему рис. 6.4.

Переключатель фазорегулятора установить во второе положение. В этом положении управляющие сигналы подаются на симистор с выхода 1 фазорегулятора в каждый полупериод со сдвигом на угол α относительно начала полупериода.

5.1. Повторить операции п.п. 4.2, 4.3.

5.2. Выключить питание стенда. Органы управления стенда установить в исходное положение в соответствии с п. 1.1.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально и должен содержать :

1. Наименование и цель работы:

1. Мостовой несимметричный (полууправляемый) выпрямитель.

2. Схема несимметричного мостового выпрямителя, работающего на активную нагрузку.

3. Таблица результатов регулировочной характеристики. В отчет вклеивается одна из осциллограмм с указанием всех измеряемых величин.

$U_n, В$					
$\alpha, см$					
$\alpha, град$					

4. График регулировочной характеристики $U_n = f(\alpha)$.
 5. Результаты измерений действующего значения напряжения на вторичной обмотке U_2

$$U_2 = \quad .$$

6. Проверка выполнения соотношений

$$U_d = 0,9 U_2 (1 + \cos \alpha) / 2 =$$

7. Объяснить, за счет каких потерь напряжения имеются отклонения от последнего соотношения.
 8. Вычислить эти потери.
 9. Осциллограммы токов и напряжений (при $\alpha=90^\circ$), согласованные между собой по фазе (изображаются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет): $u_n, u_{VD1}, u_{VS2}, u_{VS2}, i_{VD1}, i_{VS2}, i_2$.
 10. Таблица результатов внешней характеристики (при $\alpha = \alpha_{min}$).

$R, Ом$				
$U, В$				
I, mA				

11. График внешней характеристики несимметричного мостового выпрямителя.

2. Мостовой выпрямитель

12. Схема управляемого мостового выпрямителя.
 13. Таблица результатов регулировочных характеристик. В отчет вклеивается одна из осциллограмм с указанием всех измеряемых величин.

активная нагрузка			активно – индуктивная нагрузка.		
α , см	α , град	U_H , В	α , см	α , град	U_H , В

14. Графики регулировочных характеристик $U_H = f(\alpha)$.

15. Осциллограммы токов и напряжений (при $\alpha=90^\circ$), согласованные между собой по фазе (изображаются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет): u_H , u_{VS} .

3. Управляемый выпрямитель со средней точкой трансформатора

16. Схема выпрямителя.

17. Осциллограммы напряжений (при $\alpha=60^\circ$) на активной и активно-индуктивной нагрузке при отсутствии и наличии обратного диода (изображаются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в отчет): u_H .

18. Таблица результатов регулировочных характеристик. В отчет вклеивается одна из осциллограмм с указанием всех измеряемых величин.

при отсутствии обратного диода			при отсутствии обратного диода		
α , см	α , град	U_H , В	α , см	α , град	U_H , В

19. Графики регулировочных характеристик $U_H = f(\alpha)$.

4.Тиристорный регулятор переменного напряжения

20.Схема выпрямителя.

21.Таблица результатов регулировочной характеристики.

α , см				
α , град				
I_H , mA				
U_H , В				

22.Пример расчета напряжения на нагрузке

$$U_H = I_H R_2 =$$

23.График регулировочной характеристики.

5. Регулятор переменного напряжения на симисторе

6. Схема регулятора

24.Таблица результатов регулировочной характеристики.

α , см				
α , град				
I_H , mA				
U_H , В				

25.Пример расчета напряжения на нагрузке

$$U_H = I_H R_2 =$$

26.График регулировочной характеристики.

27.Выводы по работе:

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы отличия управляемого выпрямителя от неуправляемого?
2. Как осуществляется регулирование выпрямленного напряжения?
3. Назовите элементы схемы одного из выпрямителей?

4. Как влияет индуктивность в цепи нагрузки на форму выпрямленного тока?
5. Что понимают под коэффициентом мощности?
6. Какие параметры влияют на коэффициент мощности?
7. Как выбрать вентили для рассматриваемой схемы, исходя из заданной мощности нагрузки и выпрямленного напряжения?
8. Каковы достоинства и недостатки рассматриваемой схемы выпрямления?

Литература

1. В.С.Руденко и др. Основы преобразовательной техники. М., Высшая школа, 1980.
2. А.Т.Бурков. Электронная техника и преобразователи: Учеб, для вузов ж.-д. трансп. - М.: Транспорт, 1999.- 464с.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ (ТИРИСТОРНОГО КЛЮЧА)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение принципа действия системы регулирования напряжения ЭПС постоянного тока.

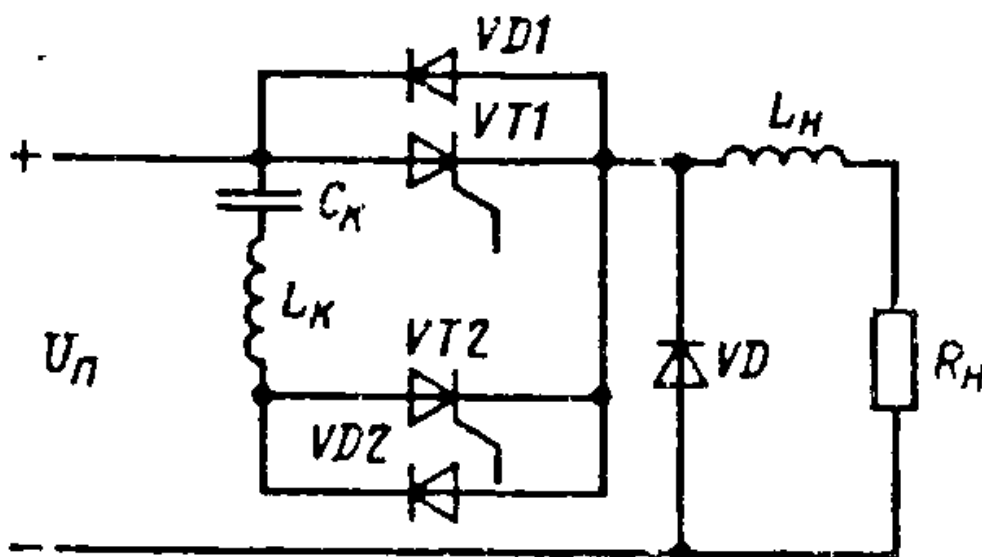


Рис.
7.1.

Упрощенная схема, иллюстрирующая принцип работы системы импульсного регулирования напряжения на тяговом двигателе, приведена на рис.7.1. На этой схеме тиристорный преобразователь условно показан в виде контакта К. Цепь нагрузки преобразователя содержит сглаживающий реактор

(дроссель) и тяговый двигатель, параллельно которым включен диод VD. Для уменьшения пульсаций магнитного потока обмотка возбуждения двигателя зашунтирована резистором $R_{ш}$.

При замыкании ключа на нагрузку подается напряжение источника питания U и ток нагрузки i_H начинает увеличиваться. Ток i_H изменяется постепенно, так как при его возрастании в цепи нагрузки появляется ЭДС самоиндукции e_L , направленная встречно напряжению источника питания

$$e_L = -L_H \frac{di_H}{dt}, \quad (1)$$

где L_H - суммарная индуктивность дросселя и тягового двигателя. При замкнутом ключе к диоду VD приложено в обратном направлении напряжение источника питания и он закрыт. При размыкании ключа ток i_H начинает уменьшаться, полярность ЭДС самоиндукции меняет знак и становится прямой для диода VD. Диод открывается и через него начинает протекать ток нагрузки под действием разности ЭДС самоиндукции и ЭДС E , возникающей в якоре двигателя при его вращении. Напряжение на нагрузке при разомкнутом ключе равно напряжению на открытом диоде, т.е. практически равно нулю. При очередном замыкании ключа к диоду VD прикладывается обратное напряжение, он закрывается и двигатель опять получает питание от источника.

Среднее значение напряжения на нагрузке равно

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) dt = U \frac{t_H}{T} = U\lambda, \quad (2)$$

где t_H – длительность включенного состояния ключа (длительность импульса);

T - период следования импульсов;

λ – коэффициент заполнения импульсов

$$\lambda = \frac{t_H}{T}, \quad (3)$$

Регулировать среднее значение напряжения на нагрузке U_H в процессе управления работой двигателя можно либо за счет изменения длительности импульса (широкое регулирование), либо за счет частоты следования импульсов $f=1/T$ (частотное регулирование).

Приняв активное сопротивление цепи нагрузки равным нулю, для интервала t_H на основании второго закона Кирхгофа можно записать $U + e_{LH} - E = 0$. Отсюда с учетом (1) – (3) и условия $E \approx U_H$ получаем, что ток нагрузки меняется с постоянной скоростью

$$\frac{di_H}{dt} = \frac{U - E}{L_H}$$

и за время импульса возрастает на величину

$$\Delta I_H = \frac{U(1 - \lambda)\lambda}{fL_H}$$

На такую же величину ток снижается за время паузы между импульсами. Отношение $\Delta I_H/2$ к среднему значению тока нагрузки I_H называется коэффициентом пульсаций k_H .

$$k_H = \frac{\Delta I_H}{2I_H}$$

Ток i , потребляемый от источника питания, имеет импульсный характер. При питании от контактной сети это недопустимо из-за большого уровня помех, наводимых на линии связи в моменты скачкообразного нарастания и спадания тока. Для уменьшения мешающего влияния работы импульсных преобразователей на линии связи используются входные фильтры. Простейший фильтр (рис. 1,в) содержит дроссель с индуктивностью L_ϕ и конденсатор с емкостью C_ϕ . Благодаря последовательно включенной индуктивности ток сети при замыкании ключа К нарастает постепенно, а быстрое изменение тока ключа обеспечивается за счет разряда конденсатора. При размыкании ключа ток сети уменьшается также постепенно за счет протекания тока заряда C_ϕ . При достаточно больших значениях L_ϕ и C_ϕ ток сети будет непрерывным и пульсирующим относительно среднего значения I_C (см. диаграмму i_C на рис. 1,б). пульсирующим будет и напряжение U_ϕ на выходе фильтра.

Для снижения габаритов и стоимости входного фильтра и сглаживающего дросселя нужно стремиться к увеличению частоты f . Ограничение максимальной частоты во многом определяется схемой используемого в преобразователе тиристорного ключа, выполняющего функции контакта К.

Тиристор открывается положительным сигналом, подаваемым кратковременно на управляющий электрод относительно катода. Закрыть тиристор по цепи управляющего электрода невозможно. Для запираания тиристора нужно снизить ток в цепи анод-катод до величины, близкой к нулю. При этом пропадает внутренняя положительная обратная связь переходов тиристора, поддерживающая его в открытом состоянии после прекращения управляющего сигнала.

В преобразователях ЭПС запираание тиристора производится путем приложения к нему обратного напряжения. На ЭПС переменного тока в качестве источника обратного напряжения используются рабочие обмотки тягового трансформатора полярность напряжения на которых меняется в смежные полупериоды питающего напряжения. Такая коммутация не требует дополнительного оборудования и называется естественной. В системах управления ЭПС постоянного тока для запираания тиристора приходится использовать специальные схемы искусственной коммутации.

В большинстве схем, позволяющих реализовать широтное регулирование, для выключения главного тиристора, соединяющего цепь нагрузки с источником питания, используется коммутирующий конденсатор, который подключается параллельно главному тиристорному с помощью вспомогательного тиристора. Для получения полярности напряжения на

конденсаторе, требуемой для запираания главного тиристора, конденсатор сначала заряжается от источника питания, а затем перезаряжается с помощью колебательного LC контура.

В схеме преобразователя главным является тиристор VS2, вспомогательным – тиристор VS1. Временные диаграммы токов и напряжений элементов схемы приведены на рис. 3. На диаграммах прямые напряжения на тиристорах показаны положительными, обратные напряжения на тиристорах и диодах – отрицательными. При построении диаграмм и при выводе расчетных соотношений приняты следующие допущения:

- напряжение на открытом диоде и тиристоре равно нулю;
- пульсации тока нагрузки равны нулю;
- ток удержания тириستоров равен нулю.

Работа преобразователя начинается с включения тиристора VS1. При этом конденсатор C заряжается от источника U через открытый VS1, сглаживающий дроссель L_H и двигатель. Полярность напряжения на конденсаторе показана на рис.2,а без скобок. При $u_c=U$ ток заряда i_c снижается до нуля и тиристор VS1 закрывается.

При включении тиристора VS2 напряжение источника U подается на нагрузку и одновременно собирается колебательный контур, содержащий заряженный конденсатор C , открытый VS2, дроссель L и диод VD1. Конденсатор C начинает разряжаться, т.е. напряжение u начинает уменьшаться. Появление тока разряда конденсатора i_c приводит к появлению в дросселе L ЭДС самоиндукции e_L .

$$e_L = -L \frac{di_c}{dt} \quad (5)$$

Законы изменения u_C и i_C находятся путем решения системы уравнений

$$u_C + e_L = 0 \quad (6)$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (7)$$

С учетом того, что при $t=0$ $u_C=0$, получаем

$$i_C = I_m \sin \omega_0 t; \quad (8)$$

$$u_C = U \cos \omega_0 t \quad (9)$$

где ω_0 – собственная частота колебательного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

I_m – амплитудное значение тока контура

$$I_m = U \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (11)$$

До тех пор пока ток контура возрастает, полярность напряжения на конденсаторе соответствует начальной. После того как ток i_C достигает I_m , он начинает уменьшаться, т.е. меняет знак производной тока и, соответственно, полярность ЭДС самоиндукции e_L , под действием которой и происходит перезаряд конденсатора C . Для продолжения колебательного процесса после

заряда конденсатора до $u_C = U$ ток в контуре должен поменять направление. Так как этому препятствует диод VD1, колебательный процесс прекращается и конденсатор остается перезаряженным. Как следует из рис.2,б длительность t_n процесса перезаряда конденсатора равна длительности полупериода собственных колебаний контура. С учетом (10) из условия $\omega_0 t_n = \pi$ получаем

$$t_n = \pi \sqrt{LC} \quad (12)$$

При рассмотрении процесса перезаряда конденсатора активное сопротивление контура r было принято равным нулю. Наличие потерь на этом сопротивлении приводит к тому, что колебания будут затухающими и напряжение на конденсаторе в момент окончания его перезаряда будет меньше начального значения U . Коэффициент k_3 , учитывающий это снижение, называется коэффициентом затухания. Значение k_3 зависит от соотношения r , C и L . У существующих импульсных преобразователей $k_3 = 0,7 - 0,8$. Время перезаряда при учете r меняется в меньшей степени и может рассчитываться по формуле (12).

Перезаряженный конденсатор используется для выключения тиристора VS2. Для этого включается тиристор VS1 и напряжение конденсатора C оказывается приложенным к тиристорам VS2 в обратном направлении. Тиристор VS2 закрывается, а напряжение на выходе преобразователя скачком увеличивается до значения $U + k_3 U$, так как последовательно с источником U в цепь нагрузки оказывается включенным заряженный до напряжения $k_3 U$ конденсатор C . Одновременно начинается процесс заряда конденсатора C от источника U через открытый VS1 и цепь нагрузки. Так как по условию ток нагрузки неизменен, конденсатор заряжается постоянным током I_H

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = I_H$$

Отсюда следует, что напряжение u_C меняется по линейному закону со скоростью

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{I_H}{C} \quad (13)$$

В процессе заряда конденсатора напряжение на закрытом тиристоре VS2 равно напряжению на конденсаторе, так как напряжение на открытом VS1 практически равно нулю. Поэтому до тех пор, пока напряжение на u_C не снизится от величины $k_3 U$ до нуля, к тиристору VS2 будет прикладываться обратное напряжение. Время t_C , в течение которого к главному тиристору после его запираания прикладывается обратное напряжение, называется схемным временем. С учетом (13)

$$t_C = \frac{k_3 UC}{I_H} \quad (14)$$

Величина t_C должна быть не менее нормируемого для тиристора VS2 параметра, который называется временем выключения t_B . После окончания

интервала t_c полярность напряжения на тиристоре сменится с обратной на прямую и при условии $t_c < t_B$ он опять откроется, так как не успеют восстановиться запирающие свойства его p - n переходов. С учетом этого определяется минимальная емкость коммутирующего конденсатора

$$C \geq \frac{I_{H \max} t_B}{k_3 U} \quad (15)$$

Здесь $I_{H \max}$ – минимально возможный в рабочем режиме ток нагрузки преобразователя.

У тиристорov нормируется также максимально допустимая (критическая) скорость нарастания прямого напряжения $(du_{np}/dt)_{кр}$. При превышении этой скорости закрывшийся тиристор VS2 может открыться после окончания интервала t_c несмотря на выполнение условия $t_c > t_B$. Это накладывает второе ограничение на минимальную емкость коммутирующего конденсатора. С учетом (13) получаем

$$C \geq \frac{I_{H \max}}{(du_{np}/dt)_{кр}} \quad (16)$$

Условия (15), (16), заставляют использовать в импульсных преобразователях специальные быстродействующие тиристоры с малыми временами выключения и большими критическими скоростями нарастания прямого напряжения.

В момент окончания заряда конденсатора напряжение на нагрузке снижается до нуля, открывается диод VD2 и через него начинает протекать ток нагрузки под действием ЭДС самоиндукции.

Время t_K , в течение которого напряжение на конденсаторе меняется от $k_3 U$ до U , т.е. на величину $\Delta U_c = k_3 U + U$, принято называть коммутационным интервалом

$$t_K = \frac{\Delta U_c}{du_c/dt} = \frac{k_3 U + U}{I_H / C} = \frac{(k_3 + 1)UC}{I_H} \quad (17)$$

При очередном включении VS2 к диоду VD2 прикладывается обратное напряжение, ток нагрузки перекоммутируется в цепь VS2 и цикл работы преобразователя повторяется.

Среднее значение напряжения на нагрузке

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) dt = \frac{1}{T} (U t_{cy} + \frac{1+k_3}{2} U t_K) = U \frac{t_{cy} + 0,5(1+k_3)t_K}{T} \quad (18)$$

где t_{cy} – временной интервал между управляющими сигналами с системы управления на включение VS2 и VS1 (время “сдвига” управляющих импульсов.)

Для обеспечения надежной работы преобразователя тиристор VS1 должен включаться не раньше, чем закончится колебательный процесс перезаряда конденсатора, т.е. $t_{cy} \geq t_{\Pi}$. Очередное включение главного тиристора VS2 должно производиться после окончания коммутационного

интервала t_K , длительность которого будет максимальной при минимальном токе нагрузки I_{Hmin}

$$t_{Kmax} = \frac{(k_3 + 1)U}{I_{Hmin}}$$

Эти два условия ограничивают максимальную частоту управляющих импульсов, при которой сохраняется работоспособность преобразователя

$$f_{max} = \frac{1}{T_{min}} = \frac{1}{t_{II} + t_{Kmax}} = \frac{1}{\pi\sqrt{LC} + \frac{(k_3 + 1)U_c}{I_{Hmin}}}$$

Взаимосвязь t_{Kmax} с током нагрузки является существенным недостатком преобразователей, выполненных по схеме рис.2, а и по аналогичным схемам, в которых коммутирующий конденсатор перезаряжается током нагрузки. При таких схемах для обеспечения надежного функционирования преобразователя при малых токах нужно либо снижать рабочую частоту, либо завышать минимальное напряжение на нагрузке. Последнее может оказаться неприемлемым для электроподвижного состава по условиям трогания с места. В этом случае используются схемы преобразователей, у которых длительность коммутационного интервала либо не зависит от тока нагрузки, либо зависит в значительно меньшей степени, чем у схемы рис.2,а. Примеры таких схем рассмотрены в [1,с.217-224]. Для работы при малых токах двигателя в зоне высоких скоростей используется также закорачивание преобразователя контактором после достижения λ_{max} .

Исследование системы импульсного регулирования напряжения производится на стенде, схема которого показана на его лицевой панели. В узлах схемы имеются гнезда для подключения осциллографа и вольтметра. Управляющие импульсы на тиристоры ключа подаются от системы управления СУ. Частота следования импульсов постоянна, сдвиг между моментами открытия главного и коммутирующего тиристора изменяется регулятором « λ ». Цепи подачи управляющих импульсов замыкаются при включении тумблеров «Вкл.VS1» и «Вкл.VS2». Нагрузкой преобразователя является резистор R с последовательно включенным сглаживающим дросселем $L2$, индуктивность которого можно менять переключателем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ПОРЯДОК СОСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Органы управления стенда установить в исходное положение:
выключатель питания схемы управления S1 – «Выкл.», выключатели Вкл VS1 и Вкл VS2 – «Выкл.», переключатель L2 – «Выкл.», регулятор λ – «0»
2. Подключить универсальный цифровой вольтметр на выход преобразователя, установив его переключатель в положение «V=». В этом

положении вольтметр показывает величину среднего значения напряжения.

3. Включить выключатели S1 и S2.
4. Включить выключатели «ВклVS1» и затем «ВклVS2». Объяснить, почему сначала нужно включить коммутирующий тиристор и только потом можно подавать управляющие импульсы на главный тиристор.
5. Регулятором λ установить напряжение на нагрузке $U_H = 35$ В.
6. Снять осциллограммы напряжения на конденсаторе $u_C(t)$. Осциллограммы показать на одном рисунке, согласовав их между собой. На этом же рисунке показать моменты подачи коротких управляющих сигналов на главный и коммутирующий тиристор.
7. Измерить и проставить на осциллограммах:
 - длительность периода T
 - сдвиг между моментами подачи управляющих импульсов на главный и коммутирующий тиристор t_{CV}
 - длительность колебательного процесса перезаряда конденсатора t_{Π}
 - длительность коммутационного интервала t_K
 - время приложения к главному тиристорному обратного напряжения t_C
 - напряжение питания ключа U (падение напряжения на открытом тиристоре принять равным нулю)
 - скачок напряжения на нагрузке $k_3 U$ в момент включения коммутирующего тиристора.
8. По результатам измерений в п.7 рассчитать частоту f следования управляющих импульсов и величину коэффициента затухания k_3 . Используя формулу (18), рассчитать среднее значение напряжения на нагрузке и сравнить рассчитанное значение с показаниями вольтметра, включенного на выходе преобразователя.
9. Изменяя регулятором λ величину коэффициента заполнения импульсов от λ_{min} до λ_{max} , получить четыре точки зависимости напряжения на нагрузке U_H от λ . Необходимую для расчета λ по формуле (3) длительность импульса t_u измерять по осциллограмме $u_H(t)$ от момента включения главного тиристора до момента окончания коммутационного интервала t_K . Результаты измерений U_H , t_u и расчета λ свести в таблицу, график зависимости $U_H(\lambda)$ привести в отчете.
10. Повторяя операции п.9, проследить по осциллограмме $u_H(t)$ как изменяется время t_C приложения к главному тиристорному обратного напряжения U_H . Характер изменения t_C (увеличение или уменьшение) объяснить из формулы (14) с учетом того, что увеличение U_H сопровождается пропорциональным увеличением I_H .
11. Регулятором λ установить $U_H = 35$ В и снять осциллограмму $u_R(t)$ напряжения на резисторе R , которое пропорционально току нагрузки I_H . Из-за пульсаций тока нагрузки это напряжение изменяется каждый период от минимального значения U_{Rmin} до максимального U_{Rmax} на величину ΔU

$$\Delta U = U_{Rmax} - U_{Rmin}$$

Среднее значение U_R , пропорциональное среднему значению тока нагрузки I_H , равно

$$U_R = \frac{U_{Rmax} + U_{Rmin}}{2}$$

Значения U_{Rmax} и U_{Rmin} измерить по осциллограмме и рассчитать по формуле (4) коэффициент пульсаций K_{Π} .

12. Выключить выключатели S1 и S2 и Вкл.VS1, Вкл.VS2, переключатель L2 установить в положение 1, включить выключатели и повторить операции п.11.

13. Повторить операции п.12, переключатель L2 устанавливать в положение 3.

По результатам расчета K_{Π} в п.11-13 построить график зависимости K_{Π} от индуктивности нагрузки L_H . Величины L_H при положениях переключателя 1,2,3 соответственно равны 10,15,20 мГн.

14. Органы управления стенда установить в исходное положение в соответствии с п.1

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом осуществляется плавное регулирования подводимого к нагрузке напряжения?
2. Какие способы управления применяются в тиристорных ключах?
3. Как будет работать схема в случае неотпирания коммутирующего тиристора?
4. Как влияет индуктивность нагрузки и индуктивность коммутации на пульсацию напряжения?
5. Каким способом осуществляется запираение главного тиристора?

Литература

1. Тихмеев Б.Н., Трахман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. – М., Транспорт, 1980.
2. А.Т.Бурков. Электронная техника и преобразователи: Учеб, для вузов ж.-д. трансп. - М.: Транспорт, 1999.- 464с.

Приложение

Паспортные данные полевых транзисторов

Тип транзистора	Максимальный ток стока, мА	Крутизна прямой проходной характеристики, мА/В	Напряжение отсечки, В	Ток затвора, мА	Дифференциальное выходное сопротивление, кОм	Коэффициент усиления по напряжению	Максимальное напряжение $U_{сз}$, В	Максимальное отрицательное напряжение на затворе, В
КП101-КП101Е	2,5	0,15-0,3	5-10	10-50	-	-	10	не доп.
КП102Е-КП102Л	0,55-0,6	0,25-1,3	2,8-10	15	10-100	25-100	20	не доп.
КП103Е-КП103МЕ	0,3-12	0,4-4,4	1,5-7	20	-	-	15-17	0,5

Основные параметры тиристоров

Типы прибора	2У101А-2У101И	2У201А-2У201Л	КУ202А-КУ202Н	2У203А-2У203И
Напряжение включения, В	0,25 - 8	6	5	10
Ток включения, мА	0,1 - 5	0,1 - 100	100	1000
Ток выключения, мА	0,5 - 25	100	300	-
Ток управления, мА	15	200	300	350
Ток утечки, мА	0,15	5	10	20
Остаточное напряжение, В	2,25	2	2	2,5
Максимальное допустимое напряжение, В	50-100	25-300	25-400	50-200
Максимальное допустимое обратное напряжение, В	10-150	25-300	25-400	50-200