

## МОДУЛЬ 4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В результате изучения модуля студенты должны:

- **знать** понятия преобразования сигнала (выпрямления и инвертирования), основные параметры составляющих устройств электропитания;
- **характеризовать** принципы действия различных типов выпрямителей, инверторов и стабилизаторов;
- **оценивать** работу различных схем выпрямителей и инверторов.
- **уметь** использовать знания для решения задач различного класса сложности;
- **уметь** производить выбор источников вторичного электропитания;

Изучение модуля должно способствовать формированию у студентов творческих способностей.

### НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

#### Словарь основных понятий

##### *Новые понятия*

**Угол управления** – угол сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора.

**Инвертирование** – процесс преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока.

**Сглаживающий фильтр** – устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

**Стабилизатор напряжения (или тока)** – устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (или тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

##### **Понятия для повторения**

**Тиристор** – полупроводниковый прибор с многослойной структурой типа *p-n-p-n*, обладает свойствами электрического вентиля.

**Термостабилизация** – меры, применяемые для стабильной работы устройства при повышении температуры окружающей среды.

**Выпрямление** – процесс преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

### Лекция 1. Выпрямители переменного тока

#### *План лекции:*

1. Структура, классификация и основные параметры выпрямителей.
2. Однофазные схемы выпрямления.
3. Трехфазные схемы выпрямления.
4. Сглаживающие фильтры.

#### **Структура, классификация и основные параметры выпрямителей**

Для получения электрической энергии нужного вида часто приходится преобразовывать энергию переменного тока в энергию постоянного тока (процесс выпрямления), либо энергию постоянного тока в энергию переменного тока (процесс инвертирования). Устройства, с помощью которых осуществляются такие преобразования, называются соответственно выпрямителями и инверторами. Выпрямители и инверторы являются вторичными источниками электропитания (ИВЭ).

#### *Классификация выпрямителей.*

Выпрямители классифицируются по нескольким признакам:

1) по возможности управления:

- а) неуправляемые;
- б) управляемые;

2) по числу фаз первичного источника питания:

- а) однофазные (выпрямители малой и средней мощности);
- б) многофазные, обычно трехфазные (выпрямители большой мощности);

3) по форме выпрямленного напряжения:

- а) однополупериодные;
- б) двухполупериодные.

#### *Параметры выпрямителей:*

1) средние значения выпрямленного тока и напряжения

$I_{н\text{ср}}$  и  $U_{н\text{ср}}$ ;

2) мощность нагрузочного устройства  $P_{н\text{ср}} = U_{н\text{ср}} I_{н\text{ср}}$ ;

3) амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения  $U_{осн\text{ м.}}$ ;

4) коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения  $p = U_{осн\text{ м.}} / U_{н\text{ср}}$ ;

5) КПД выпрямителя:

$$\eta = P_{н\text{ср}} / (P_{н\text{ср}} + P_{тр} + P_{д}),$$

где  $P_{тр}$  – потери в трансформаторе;  
 $P_d$  – потери в диодах.

Рассмотрим структурную схему однофазного выпрямителя (рисунок 4.1).

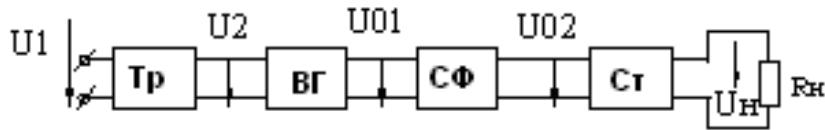


Рисунок 4.1 – Структурная схема однофазного выпрямителя

В структурную схему входят следующие блоки: трансформатор Тр, вентильная группа ВГ, сглаживающий фильтр СФ, стабилизатор Ст, который поддерживает неизменным напряжение на нагрузке  $R_n$ .

Для выпрямления однофазного переменного напряжения применяют 3 основных типа выпрямителей:

- 1) однополупериодный;
- 2) двухполупериодный мостовой;
- 3) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

### Однофазные схемы выпрямления

#### Однополупериодный выпрямитель.

Однополупериодный выпрямитель состоит из трансформатора, к вторичной обмотке которого последовательно подсоединены диод VD и нагрузочный резистор  $R_n$ . (рисунок 4.2). Для упрощения анализа работы выпрямителей транзистор и диод считают идеальными.

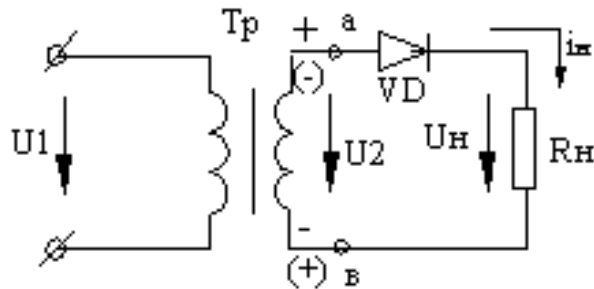


Рисунок 4.2 – Схема однополупериодного выпрямителя

Временные диаграммы выпрямителя показаны на рисунке 4.3. В первый полупериод от 0 до  $T/2$  диод открыт, т. к. потенциал точки «a», выше потенциала точки «в», и через нагрузку протекает ток  $i_n$ . В интервале времени  $T/2 - T$  диод закрыт, т.к. потенциал точки «в» выше потенциала точки «a», т. е. к диоду прикладывается обратное напряжение  $U_2$ . Ток в нагрузке отсутствует и коэффициент пульсаций будет равен  $p=1,57$ .

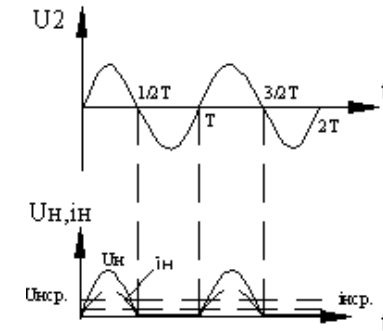


Рисунок 4.3 – Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

#### Двухполупериодный мостовой выпрямитель.

Он состоит из трансформатора (Тр) и четырех диодов (VD1 – VD4), подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме (рисунок 4.4). Каждая пара диодов VD1, VD3 и VD2, VD4 работает поочередно.

Временные диаграммы работы этого выпрямителя показаны на рисунке 4.5.

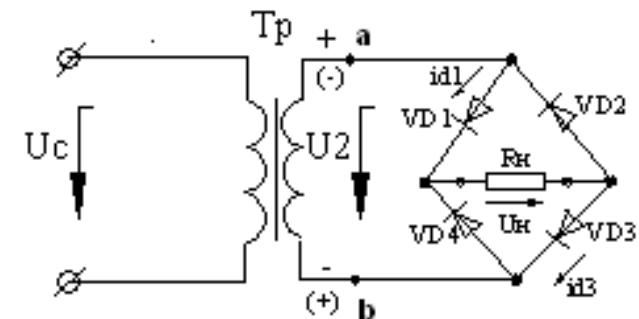


Рисунок 4.4 – Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

В первый полупериод ( $0-T/2$ ) открыты VD1 и VD3, когда потенциал точки «a» выше потенциала точки «b». При этом в нагрузочном резисторе  $R_n$  появляется ток  $I_n$ . В этом интервале диоды VD2 и VD4 закрыты. В следующий полупериод ( $T/2-T$ ) потенциал точки «b» выше потенциала точки «a», тогда диоды VD2, VD4 открыты, а VD1 и VD3 закрыты. В оба полупериода ток через  $R_n$  имеет одно и то же направление. Коэффициент пульсаций  $p=0,67$ .

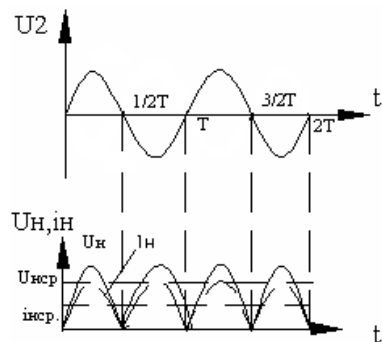


Рисунок 4.5 – Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя

**Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.**

Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включенных на один и тот же нагрузочный резистор (рисунок 4.6). В каждый из полупериодов напряжение на вторичной обмотке трансформатора работает либо верхняя, либо нижняя часть выпрямителя.

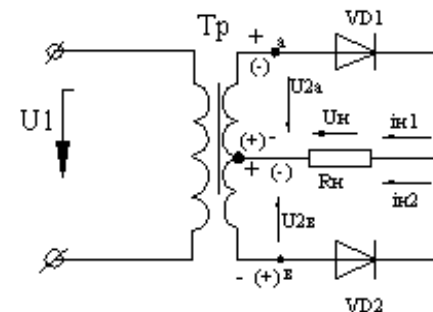


Рисунок 4.6 – Схема двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

Временные диаграммы данного выпрямителя показаны на рисунке 4.7.

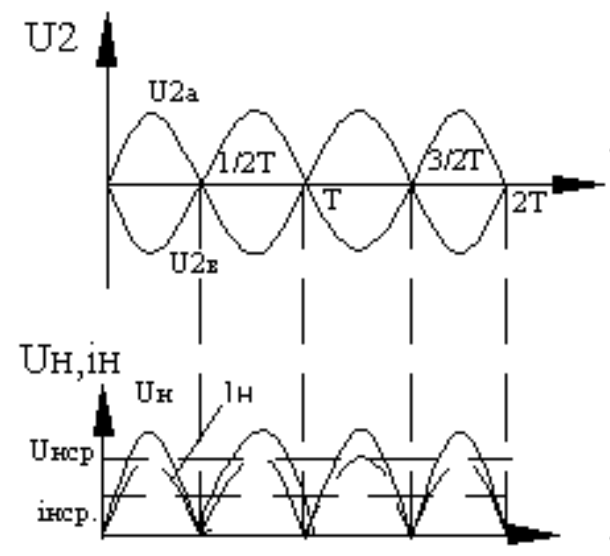


Рисунок 4.7 – Временные диаграммы двухполупериодного выпрямителя

Двухполупериодные выпрямители применяют для питания нагрузочных устройств малой и средней мощностей.

К выпрямителям большой и средней мощностей относятся трехфазные выпрямители с нейтральным выводом и мостовые [1, 2].

## Трехфазные схемы выпрямления

### Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом.

В состав трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом входят: трехфазный трансформатор, обмотки которого соединены звездой; 3 диода, включенные в каждую из фаз трансформатора; сопротивление  $R_n$  (рисунок 4.8).

Диоды работают поочередно, каждый в течение трети периода, когда потенциал начала одной из фазных обмоток (например,  $a$ ) более положителен, чем двух других ( $b$  и  $c$ ). Выпрямленный ток в резисторе  $R_n$  создается токами каждого диода, имеет одинаковое направление и равен сумме выпрямленных токов каждой из фаз:  $i_n = i_a + i_b + i_c$ . Коэффициент пульсаций  $p = 0,25$ .

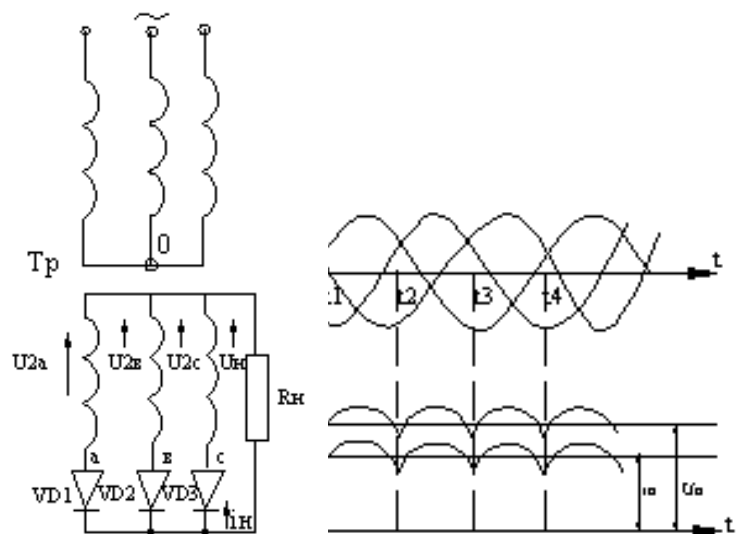


Рисунок 4.8 – Схема и временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом

### Трехфазный мостовой выпрямитель.

Трехфазный мостовой выпрямитель содержит мост из 6 диодов. Диоды VD1, VD3, VD5 – образуют одну группу, а VD2, VD4, VD6 – другую. Общая точка первой группы диодов образует положительный

полюс на нагрузочном резисторе  $R_n$ , а общая точка второй группы – отрицательный полюс (рисунок 4.9).

В каждый момент времени ток в резисторе  $R_n$  и двух диодах появляется тогда, когда к этим диодам приложено наибольшее напряжение. Например, в интервале времени  $t_1-t_2$  ток возникает в цепи VD1– $R_n$ –VD4, т. к. в данный интервал времени к этим диодам приложено напряжение  $U_{ab}$ , которое больше других линейных напряжений. Временные диаграммы показаны на рисунке 4.9. В такой схеме коэффициент пульсаций  $p = 0,057$ .

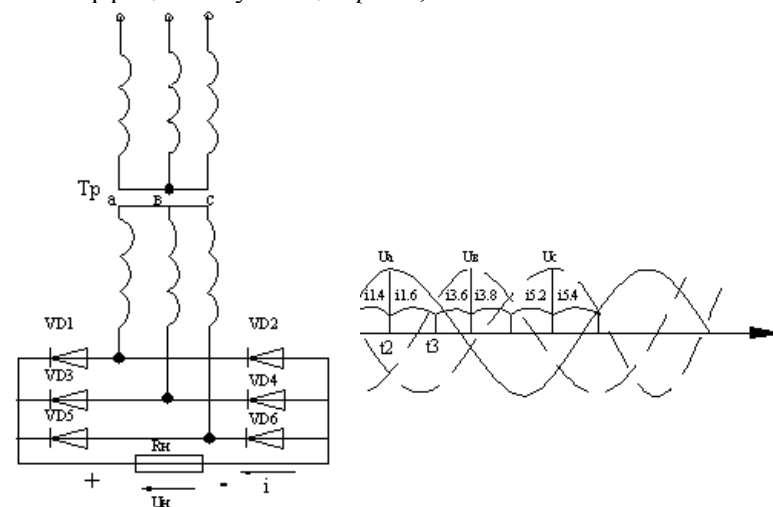


Рисунок 4.9 – Схема и временные диаграммы трехфазного мостового выпрямителя

## Сглаживающие фильтры

Сглаживающим фильтром называют устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

Основным параметром, характеризующим эффективность сглаживающего фильтра (СФ), является коэффициент сглаживания  $q = p_{вх} / p_{вых}$ , где  $p_{вх}$  – коэффициент пульсаций на входе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя без фильтра), а  $p_{вых}$  – коэффициент пульсаций на выходе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя с фильтром).

Сглаживающие фильтры различаются по следующим признакам:

- 1) в зависимости от типа фильтрующего элемента:
  - а) емкостные;
  - б) индуктивные;
  - в) электронные фильтры.

2) по количеству фильтрующих звеньев:

- а) однозвенные;
- б) многозвенные.

**Емкостные фильтры.**

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, который включают параллельно нагрузочному резистору  $R_n$ . Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром показана на рисунке 4.10.

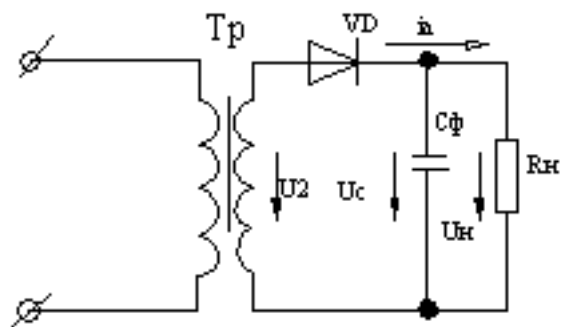


Рисунок 4.10 - Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

На временных диаграммах (рисунок 4.11) видно, что в интервале  $t_1-t_2$ , конденсатор через открытый диод заряжается до амплитудного значения  $U_2$ , так как в этот период  $U_2 > U_c$ . Когда  $U_2 < U_c$ , конденсатор разряжается на нагрузочный резистор  $R_n$ , заполняя разрядным током паузу в нагрузочном токе  $i_n$ , которая имеется в однополупериодном выпрямителе без фильтра.

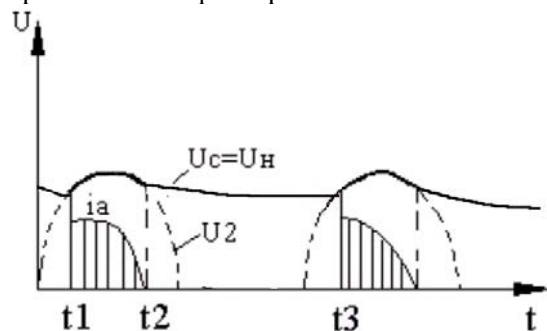


Рисунок 4.11 - Временные диаграммы выпрямителя с емкостным фильтром

После этого диод вновь открывается, СФ заряжается и процессы зарядки и разрядки СФ повторяются. Подобные СФ применяются с высокоомным сопротивлением  $R_n$ .

**Индуктивные фильтры.**

Они состоят из дросселя  $L_\phi$ , который включают последовательно с нагрузкой  $R_n$  (рисунок 4.12). Так как ток в цепи с дросселем во время переходного процесса при положительной полуволне  $U_2$ , зависит от постоянной времени  $\tau = L_\phi / R_n$ , то длительность импульса увеличивается с ростом  $\tau$ , что видно на временных диаграммах (рисунок 4.13).

Емкостные и индуктивные фильтры являются однозвенными фильтрами.

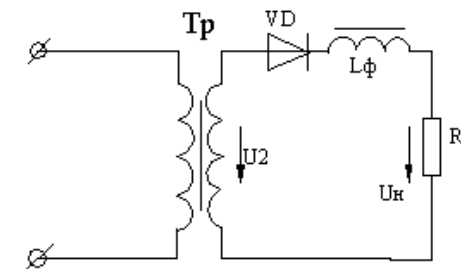


Рисунок 4.12 - Схема включения индуктивного фильтра

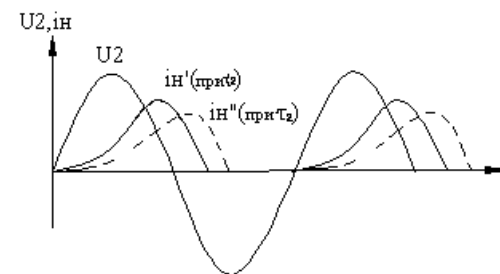


Рисунок 4.13 - Временные диаграммы выпрямителя с индуктивным фильтром

К многозвенным фильтрам относятся LC- или RC-фильтры, которые обеспечивают большее уменьшение  $p$  и включены Г-образно или П-образно (рисунки 4.14 и 4.15).

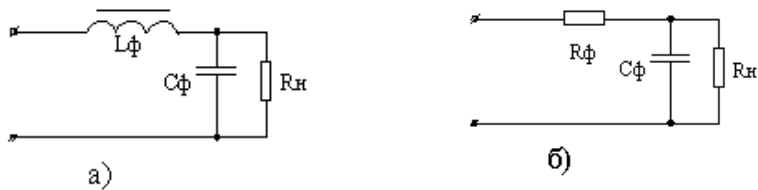


Рисунок 4.14 - Г-образные LC- и RC-фильтры

Коэффициент сглаживания  $LC$ -фильтра:  $q = \omega_{осн}^2 L_{\phi} C_{\phi} - 1$ .

В маломощных усилителях, где сопротивление  $R_{н}$  составляет единицы кОм, вместо катушки включают резистор  $R_{\phi}$ , что уменьшает массу, габариты и стоимость фильтра, однако при этом коэффициент сглаживания, определяемый как  $q = (0,5 \div 0,9) \omega_{осн} R_{\phi} C_{\phi}$ , будет меньше, чем у  $LC$ -фильтра.

В П-образных фильтрах коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов составных звеньев ( $q_n = q_c q_z$ ).

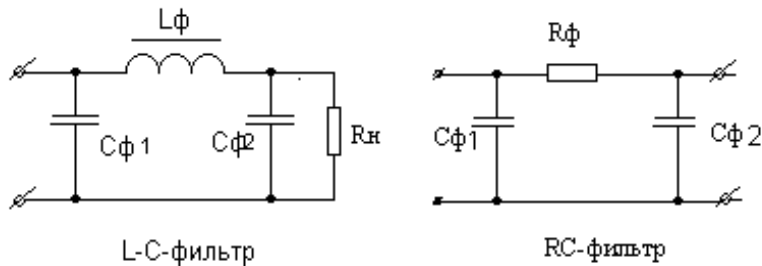


Рисунок 4.15 - П-образные LC-фильтр и RC-фильтр

### Электронные фильтры.

Электронные фильтры (ЭФ) – это фильтры, в которых вместо индуктивных катушек включают транзисторы, что позволяет избавиться от переходных процессов и уменьшить габариты и массу выпрямителей.

Применение транзисторов в фильтрах основано на различии сопротивлений для постоянной и переменной составляющих коллекторного тока [3, 4].

Из выходной характеристики транзистора (рисунок 4.16) видно, что сопротивление  $R_{кэ}$  постоянному току (статическое сопротивление)

$R_{ст} = U_{к0} / I_{к0}$  на 2...3 порядка меньше сопротивления переменному току (динамическое сопротивление)  $R_{дин} = \Delta U_k / \Delta I_k$ . Электронные фильтры снижают пульсации в 3...5 раз.

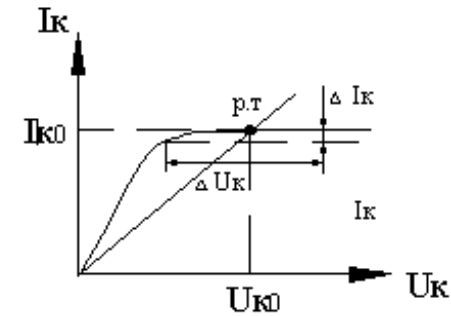


Рисунок 4.16 – Выходная характеристика транзистора

### Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите классификацию выпрямителей.
2. Назовите основные параметры усилителей.
3. Объясните принцип работы однополупериодного выпрямителя.
4. Объясните принцип работы двухполупериодного мостового выпрямителя.
5. Объясните принцип работы двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.
6. Назовите основные элементы схемы трехфазного выпрямителя с нейтральным выводом.
7. Принцип работы трехфазного мостового выпрямителя.
8. Классификация сглаживающих фильтров.

### Лекция 2. Стабилизаторы напряжения и тока. Управляемые выпрямители. Инверторы

#### План лекции:

1. Классификация и основные параметры стабилизаторов.
2. Параметрические стабилизаторы (ПС).
3. Компенсационные стабилизаторы (КС).
4. Однофазные и трехфазные управляемые выпрямители.
5. Инверторы, ведомые сетью, и автономные инверторы.

### Классификация и основные параметры стабилизаторов

Стабилизатор напряжения (или тока) – это устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (или тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

#### Классификация стабилизаторов.

Стабилизаторы классифицируют по следующим признакам:

1) по стабилизируемой величине :

- а) стабилизаторы напряжения;
- б) стабилизаторы тока;

2) по способу стабилизации:

- а) параметрические (ПС);
- б) компенсационные (КС).

#### Основные параметры стабилизаторов:

1. Коэффициент стабилизации по напряжению для стабилизаторов напряжения:

$$K_{ст.U} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вых} / U_{вых}},$$

где  $\Delta U_{вх}$ ,  $\Delta U_{вых}$  – приращения напряжений,  $U_{вх}$ ,  $U_{вых}$  – номинальные значения.

2. Коэффициент стабилизации тока для стабилизаторов тока:

$$K_{ст.I} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta I_n / I_n},$$

где  $I_n$  – номинальный ток, а  $\Delta I_n$  – приращение тока.

3. Внутреннее сопротивление стабилизатора  $R_{ст}$ .

4. Коэффициент полезного действия:

$$\eta_{ст} = P_n / (P_n + P_{п}),$$

где  $P_n$  – полезная мощность в нагрузочном устройстве;  $P_{п}$  – мощность потерь.

#### Параметрические стабилизаторы (ПС)

В данных стабилизаторах используется полупроводниковый стабилитрон VD, который включают параллельно  $R_n$ . Последовательно со стабилитроном включают балластный резистор  $R_b$  для создания требуемого режима работы (рисунок 4.17).

При изменении напряжения  $U_{вх}$  под действием колебания напряжения питающей сети или изменения сопротивления нагрузки  $R_n$ , напряжение  $U_n$  изменяется незначительно, т. к. оно определяется напряжением  $U_{ст}$ .

стабилитрона, которое мало изменяется при изменении протекающего через него тока, что видно на ВАХ стабилитрона (рисунок 4.18).

В параметрическом стабилизаторе тока используется нелинейный элемент (это может быть полевой или биполярный транзистор), который включают последовательно с нагрузочным устройством (рисунок 4.19).

ВАХ нелинейного элемента показывает, что при изменении напряжения от  $U_{вх1}$  до  $U_{вх2}$  напряжение на нагрузочном элементе изменяется от  $U_{нэ1}$  до  $U_{нэ2}$ , а нагрузочный ток  $I_n$  практически не меняется.

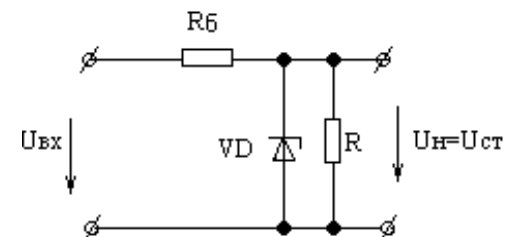


Рисунок 4.17 - Параметрический стабилизатор напряжения

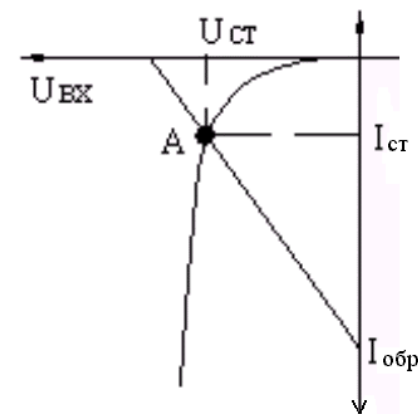


Рисунок 4.18 - Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

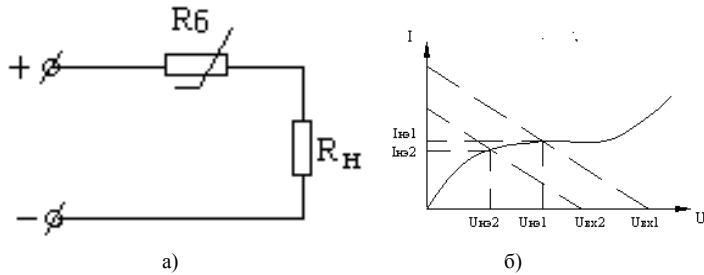


Рисунок 4.19 - Схема параметрического стабилизатора тока (а) и ВАХ нелинейного элемента (б)

### Компенсационные стабилизаторы (КС)

Компенсационные стабилизаторы (КС) постоянных  $U$  и  $I$ , являются системами автоматического регулирования, в которых благодаря наличию отрицательной обратной связи обеспечивается постоянство напряжения  $U$  и тока  $I$  на нагрузочном устройстве с высокой степенью точности.

Компенсационные стабилизаторы подразделяются на стабилизаторы непрерывного действия и импульсные.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия представлена на рисунке 4.20.

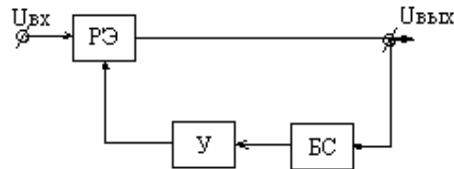


Рисунок 4.20 - Структурная схема КС напряжения непрерывного действия:  
БС – блок сравнения; У – усилитель постоянного тока;  
РЭ – регулирующий элемент

В блок сравнения (БС) входят: источник опорного напряжения (параметрический стабилизатор, образованный элементами  $VD, R_δ$ , рисунок 4.21) и резистивный делитель ( $R_1, R_2, R_3$ ).

Усилитель постоянного тока (У) образован маломощным транзистором  $VT_2$  и  $R_k$ .

Регулирующий элемент (РЭ) - мощный транзистор  $VT_1$ .

В данном КС происходит непрерывное сравнение  $U_n$  с опорным напряжением  $U_{оп}$ .

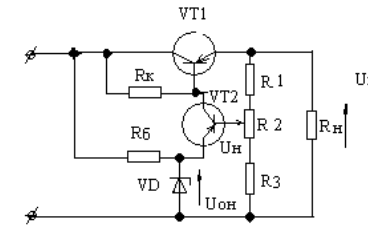


Рисунок 4.21 - Принципиальная электрическая схема КС напряжения непрерывного действия

Схема компенсационного стабилизатора тока  $I$  почти аналогична схеме КС напряжения  $U$ . Отличие заключается в том, что вместо резистивного делителя включают переменный резистор  $R_{рег}$  последовательно с сопротивлением  $R_n$ . Сигнал обратной связи, снимаемый с  $R_{рег}$  и пропорциональный изменениям тока  $I_n$ , сравнивается с напряжением  $U_{оп}$  и подается на вход усилителя.

Импульсные стабилизаторы постоянного напряжения (ИСПН) имеют высокий КПД (0,8...0,85), меньшие габариты и массу. Как и КС непрерывного действия, ИСПН является устройством, в котором применяется отрицательная обратная связь, ослабляющая изменение напряжения  $U_{вых}$  или тока  $I_n$ .

Отличием ИСПН от компенсационного стабилизатора является работа РЭ – транзистора, который работает в режиме ключа, что дает возможность получить с его выхода однополярные импульсы прямоугольной формы  $U_{кп}$  (рисунок 4.22).

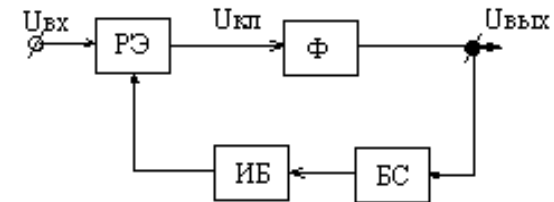


Рисунок 4.22 - Структурная схема ИСПН:  
Ф – сглаживающий фильтр; РЭ – регулирующий элемент; БС – блок сравнения;  
ИБ – импульсный блок

В БС напряжение  $U_{\text{вых}}$  сравнивается с опорным, получающееся при этом разностное напряжение воздействует на ИБ, который вырабатывает управляющие импульсы разной длительности и частоты следования, управляющие работой РЭ.

### Однофазные и трехфазные управляемые выпрямители

Управляемые выпрямители – это устройства, которые позволяют плавно изменять значения выпрямленного напряжения [5, 6, 10].

Схема простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре показана на рисунке 4.23.

Управление напряжением на выходе такой схемы сводится к управлению во времени моментом отпирания тиристора. Этот процесс осуществляется за счет сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора. Такой сдвиг называют углом управления и обозначают  $\alpha$ , а способ управления называют фазовым (рисунок 4.24).

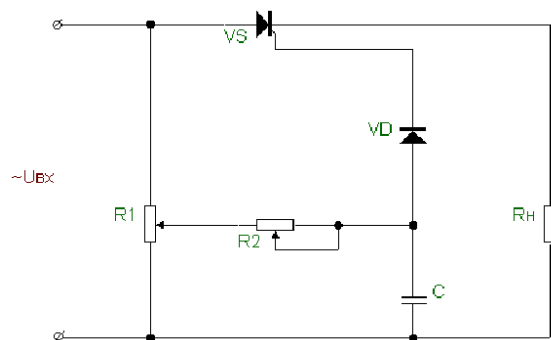


Рисунок 4.23 - Схема однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре

Управление величиной  $\alpha$  осуществляют с помощью фазовращающей  $R2C$ -цепи. Резистором  $R1$  изменяют напряжение, подаваемое на управляющий электрод тиристора. Диод  $VD1$  обеспечивает подачу на управляющий электрод положительных импульсов.

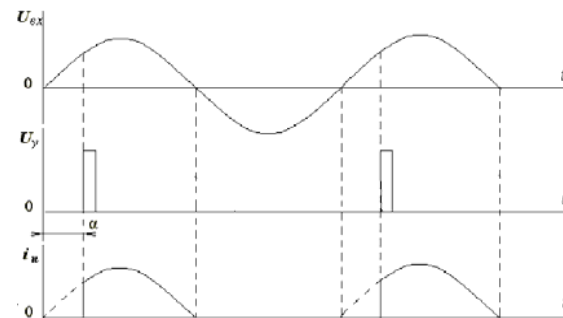


Рисунок 4.24 - Временные диаграммы входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , напряжения управления  $U_{\text{у}}$  и тока на нагрузке  $i_{\text{н}}$

Оптимальной формой управляющих сигналов является короткий импульс с крутым фронтом, который обеспечивает четкое отпирание тиристора. Для формирования таких импульсов и их сдвига во времени используются импульсно-фазовые системы управления.

Основными характеристиками управляемого выпрямителя являются следующие:

- а) характеристика управления, которая выражает зависимость выпрямленного напряжения от угла управления  $U_{\text{н}} = f(\alpha)$  (рисунок 4.25);
- б) внешние характеристики, которые определяют зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока при фиксированных значениях угла  $\alpha$  (рисунок 4.26).

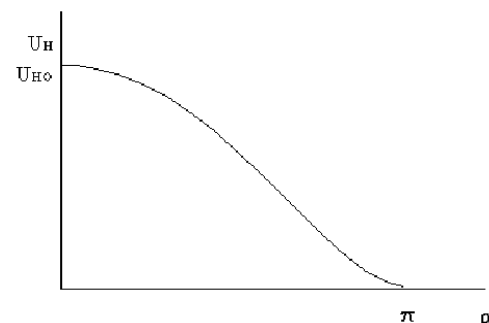


Рисунок 4.25 - Характеристика управления

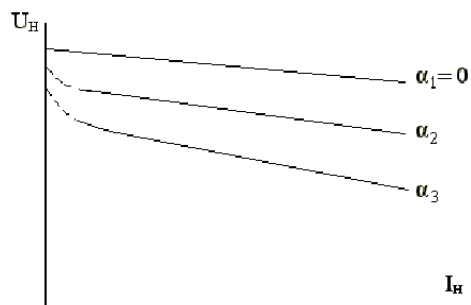


Рисунок 4.26 - Внешние характеристики

**Трехфазные управляемые выпрямители** [1, 12] являются выпрямителями средней и большой мощности. Различают схему трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом и схему трехфазного мостового выпрямителя.

Трехфазный выпрямитель с нулевым (или нейтральным) выводом (рисунок 4.27) обычно работает на активно-индуктивную нагрузку. Длительность работы тиристоров определяется углом управления  $\alpha$ , значение которого задается импульсно-фазовым блоком управления (ИФБУ). Изменение угла  $\alpha$  приводит к изменению средних значений выпрямленного напряжения  $U_{н\text{ср}}$  и  $I_{н\text{ср}}$  тока. Это видно на временных диаграммах при индуктивной нагрузке  $L_n = 0$  (рисунок 4.28).

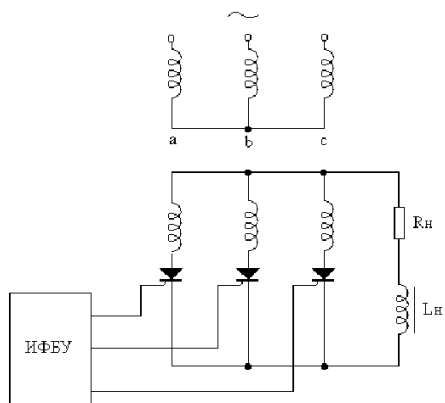


Рисунок 4.27 - Схема трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом

При угле управления  $\alpha < \pi/6$  выпрямленный ток  $i_n$  имеет непрерывный характер и каждый тиристор открыт в течение времени, соответствующего углу  $2/3\pi$ . При угле управления  $\alpha > \pi/6$  в выпрямленном токе  $i_n$  появляются паузы.

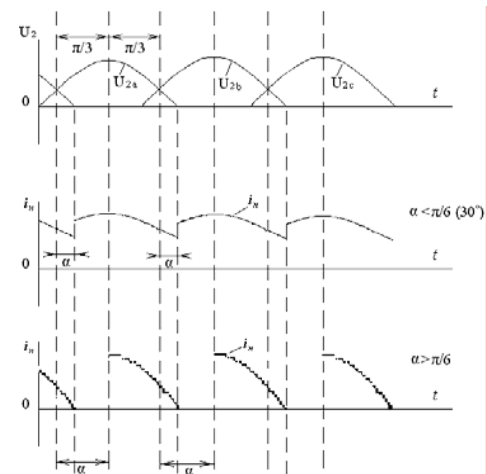


Рисунок 4.28 – Временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

Характеристика управления трехфазного выпрямителя показана на рисунке 4.29, откуда видно, что при  $L_n = 0$  напряжение  $U_{н\text{ср}}$  равно нулю при  $\alpha = 150^\circ$ . При  $L_n = \infty$ , напряжение на нагрузочном устройстве становится равным нулю при угле управления  $\alpha = 90^\circ$ . Характеристики управления при  $L_n \neq 0$  и  $L_n \neq \infty$  располагаются между этими двумя предельными характеристиками. Нагрузочный ток  $i_n$  при  $L_n = \infty$  будет сглаживаться и иметь непрерывный характер при  $\alpha > \pi/6$ .

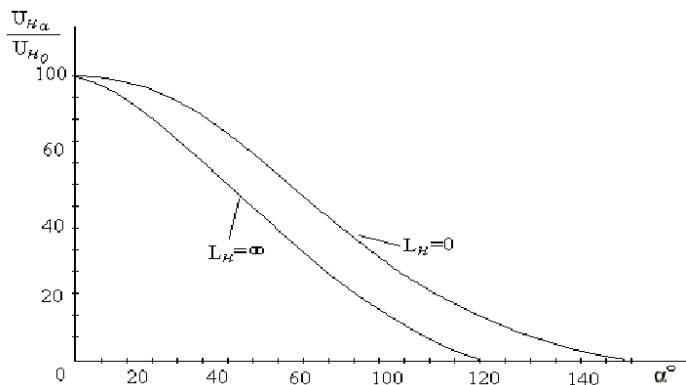


Рисунок 4.29 - Характеристика управления трехфазного выпрямителя

В схему трехфазного мостового управляемого выпрямителя входят шесть тиристоров (рисунок 4.30). Тиристоры VS1, VS2, VS3 объединены в катодную группу, а тиристоры VS4, VS5, VS6 – в анодную группу.

Также как и в неуправляемом выпрямителе здесь одновременно работают два тиристора: один из анодной группы, другой – из катодной. При этом управляющий сигнал, подаваемый на тиристор катодной группы, опережает на  $180^\circ$  сигнал, поступающий на тиристор анодной группы.

Характеристики управления выглядят так же, как для выпрямителя с нулевым выводом. Отличие лишь в том, что предельным углом управления, при котором  $U_{\text{ср}} = 0$ , является угол  $\alpha = 120^\circ$ . Внешние характеристики трехфазных управляемых выпрямителей имеют такой же вид, как внешние характеристики неуправляемых выпрямителей.

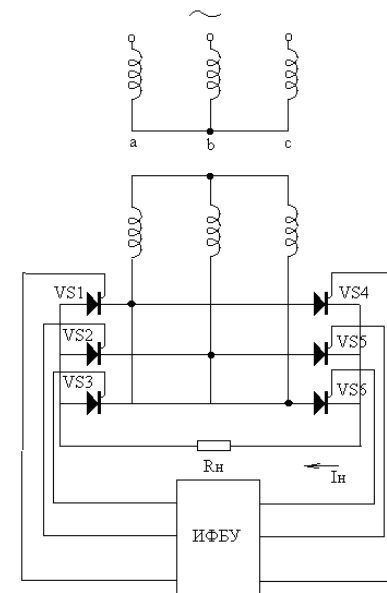


Рисунок 4.30 - Схема трехфазного мостового выпрямителя

### Инверторы, ведомые сетью, и автономные инверторы

Источники вторичного электропитания, которые преобразуют постоянное напряжение в переменное напряжение, называют инверторами [7, 11].

Классификация инверторов проводится по следующим признакам:

- 1) по типу коммутирующих приборов:
  - а) тиристорные;
  - б) транзисторные;
- 2) по принципу коммутации;
  - а) ведомые сетью;
  - б) автономные;
- 3) по роду преобразуемой величины:
  - а) инверторы тока;
  - б) инверторы напряжения;
- 4) по числу фаз:
  - а) однофазные;
  - б) трехфазные.

### Инверторы, ведомые сетью.

Схема тиристорного инвертора представляет собой однофазный двухполупериодный инвертор с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рисунок 4.31).

Запирание и отпирание тиристоров происходит под воздействием напряжения вторичной обмотки трансформатора, которое создается сетью переменного тока. Поэтому такой инвертор называют инвертором, ведомым сетью.

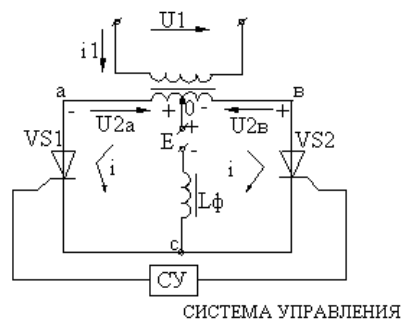


Рисунок 4.31 - Схема тиристорного инвертора: СУ – система управления

Для передачи электроэнергии, вырабатываемой источником  $E$ , в сеть переменного тока необходимо, чтобы ток  $i_1$ , потребляемый от сети, и напряжение  $U_1$  находились в противофазе. Подобный сдвиг возможен в том случае, когда тиристоры будут открываться поочередно при отрицательной полярности напряжений  $U_{2a}$  и  $U_{2b}$  (рисунок 4.32). При этом происходит поочередное подключение вторичных обмоток трансформатора к источнику  $E$ .

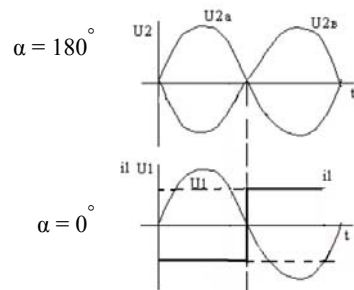


Рисунок 4.32 – Временные диаграммы напряжений и тока инвертора, ведомого сетью

Следует отметить, что если один тиристор будет отпираться точно при угле управления  $\alpha = 180^\circ$ , то другой тиристор не успеет закрыться. В этом случае запирающийся тиристор создаст короткое замыкание по цепи: вторичная обмотка трансформатора – источник  $E$ . Это явление называют **срывом инвертирования** или опрокидыванием инвертора. Чтобы исключить этот процесс, необходимо сделать угол  $\alpha < 180^\circ$  на угол  $\beta$ , который называется углом опережения отпирания (рисунок 4.33).

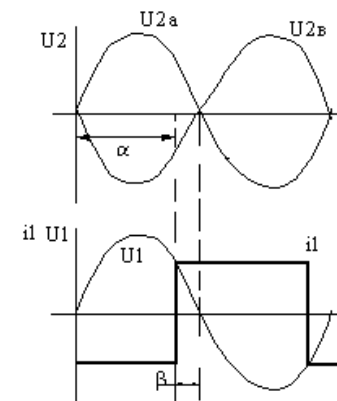


Рисунок 4.33 - Временные диаграммы напряжений и тока инвертора, ведомого сетью, при  $\alpha < 180^\circ$  на угол  $\beta$

### Автономные инверторы (АИ).

Автономные инверторы (АИ) осуществляют преобразование постоянного тока в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работают на автономную нагрузку.

АИ подразделяются на следующие виды:

- автономные инверторы тока (АИТ);
- автономные инверторы напряжения (АИН);
- автономные резонансные инверторы (АРИ).

В АИТ источник питания работает в режиме источника тока, что достигается включением в цепь дросселя  $L_0$  (рисунок 4.34).

Тиристоры VS1 и VS2 открываются поочередно запускающими импульсами, поступающими от блока системы управления (СУ) с входов «Вх1» и «Вх2».

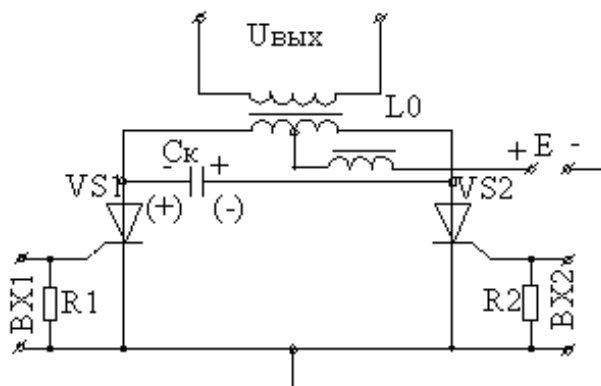


Рисунок 4.34 - Схема автономного инвертора тока

### Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите классификацию стабилизаторов.
2. Назовите основные параметры стабилизаторов.
3. Объясните принцип работы параметрических стабилизаторов тока и напряжения.
4. Объясните принцип работы компенсационного стабилизатора непрерывного действия.
5. Объясните принцип работы импульсного компенсационного стабилизатора.
6. Объясните принцип работы однофазного управляемого выпрямителя.
7. Объясните принцип работы трехфазного управляемого выпрямителя с нулевым выводом.
8. Объясните принцип работы трехфазного мостового управляемого выпрямителя.
9. Классификация инверторов и принцип инвертирования.

### Материалы к лабораторным работам

**Тема** «Изучение работы маломощных источников питания».

#### **Базовые проблемы:**

1. Принцип работы и особенности построения различных схем выпрямителей (однополупериодный, двухполупериодный, двухполупериодный мостовой, удвоитель напряжения).
2. Внешние характеристики выпрямителей в различных режимах фильтрации.

**Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить** протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

**Вариант 1.** Объяснить (письменно) назначение элементов и принцип работы однотактного однополупериодного выпрямителя.

**Вариант 2.** Объяснить (письменно) назначение элементов и принцип работы двухполупериодного выпрямителя со средней точкой.

**Вариант 3.** Объяснить (письменно) назначение элементов и принцип работы двухполупериодного мостового выпрямителя.

**Вариант 4.** Объяснить (письменно) назначение элементов и принцип работы схемы выпрямителя с удвоением напряжения.

**Экспериментальная часть включает** проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе на учебных стендах в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

**Тема** «Исследование управляемого выпрямителя».

#### **Базовые проблемы:**

1. Принцип действия и устройство управляемого однофазного выпрямителя на тиристорах.

2. Основные характеристики управляемого выпрямителя.

**Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить** протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

**Вариант 1.** Объяснить (письменно) принцип работы двухполупериодного управляемого выпрямителя (упрощенная схема).

**Вариант 2.** Объяснить (письменно) назначение элементов в схеме двухполупериодного управляемого выпрямителя с импульсно-фазовым блоком управления.

**Вариант 3.** Объяснить (письменно) назначение элементов в схеме импульсно-фазового блока управления тиристорами.

**Вариант 4.** Объяснить (по формулам) как влияет угол управления на средние значения тока и напряжения.

**Экспериментальная часть включает** проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе

на учебных стендах в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

**Тема** «Исследование стабилизатора напряжения».

**Базовые проблемы:**

1. Принцип действия параметрического стабилизатора напряжения.
2. Основные характеристики и параметры стабилизатора напряжения.

**Перед выполнением лабораторной работы необходимо подготовить** протокол лабораторной работы, который включает название работы, цель работы, предварительное задание к эксперименту, схемы измерения, необходимые таблицы измерений.

Предварительное задание к эксперименту выполняется по следующим вариантам:

**Вариант 1.** Расшифруйте обозначение прибора Д814Е. Приведите еще несколько примеров обозначения стабилитронов.

**Вариант 2.** Начертите схему параметрического стабилизатора напряжения и объясните ее работу.

**Вариант 3.** Приведите теоретическую ВАХ стабилитрона и объясните ее.

**Вариант 4.** Перечислите основные параметры стабилитрона.

**Экспериментальная часть включает** проведение измерений в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе на учебных стендах в лаборатории электроники и микропроцессорной техники.

### Материалы к практическим работам

**Тема** «Мостовые выпрямители».

**Базовые проблемы:**

1. Решение задач.
2. Расчет мостового выпрямителя.

**Варианты задач:**

**Вариант 1.** Выбрать диоды для мостового выпрямителя (рисунок 4.35), если в нагрузочном резисторе  $R_H = 110$  Ом, выпрямленный ток  $I_H = 1$  А. Рассчитать коэффициент трансформации и мощность трансформатора, подключенного к сети  $U = 220$  В.

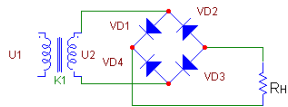


Рисунок 4.35 - Схема мостового выпрямителя

**Вариант 2.** В цепи (рисунок 4.35) определить среднее значение напряжения на нагрузке, обратное напряжение диодов и амплитуду пульсаций напряжения нагрузки, если  $U_2 = 10$  В. Падением напряжения в диодах пренебречь.

**Вариант 3.** Выбрать диоды для однофазного мостового выпрямителя, работающего на нагрузку с сопротивлением  $R_H$  и постоянной составляющей выпрямленного напряжения  $U_0$ . Определить ток и напряжение вторичной обмотки трансформатора, и напряжение пульсаций. Величины  $R_H$  и  $U_0$  приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения величин  $U_0$  и  $R_H$

Предпоследняя цифра шифра студента										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_0$ , В	100	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Последняя цифра шифра студента										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_H$ , Ом	50	75	100	150	200	250	300	400	500	1000

**Тема** «Моделирование выпрямителей на ПЭВМ».

**Базовые проблемы:**

1. Моделирование схемы выпрямителя на ПЭВМ.
2. Уточнение параметров элементов схемы.
3. Получение временных зависимостей.

Моделирование схем выпрямителей осуществляется на ПЭВМ с помощью пакета прикладных программ «MICROCAP» (раздел «Приложение» в методических указаниях по выполнению курсовой работы).

**Форма контроля** – представить расчеты, смоделированную схему мостового выпрямителя на ПЭВМ, временные диаграммы, оформленные в виде второго раздела курсовой работы.

### Задания для управляемой самостоятельной работы студентов

**Задание 1.**

1. Построить экспериментально снятые зависимости.
2. Рассчитать параметры исследованных приборов.

3. Оформить отчет и уметь отвечать на контрольные вопросы к лабораторной работе.

*Рекомендации по выполнению приведены в методических указаниях к лабораторным работам [9].*

#### **Задание 2.**

Рассчитать стабилизатор напряжения на транзисторах в соответствии с вариантом задания, приведенным в методических указаниях по выполнению курсовой работы:

- рассчитать параметры электрической схемы;
- выбрать элементы схемы;
- нарисовать принципиальную электрическую схему стабилизатора напряжения на транзисторах.

#### **Форма контроля:**

1. Представить преподавателю отчет в письменном виде по изученному разделу, ответить на контрольные вопросы к лабораторным работам.

2. Представить преподавателю расчет стабилизатора напряжения. Работа должна быть оформлена в виде второго раздела курсовой работы.

#### **Пример комплексного задания (билета) для контроля результатов обучения по модулю 4**

##### **1-й уровень.**

1. Приведите классификацию выпрямителей.
2. Что такое коэффициент пульсаций?
3. На каком принципе основана работа емкостного фильтра?
4. Какие приборы используются в параметрических стабилизаторах тока?
5. В чем заключается принцип инвертирования?
6. Объясните принцип работы двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

##### **2-й уровень.**

1. Нарисуйте схему и объясните принцип работы трехфазного мостового управляемого выпрямителя.
2. Назовите и объясните режимы работы стабилизатора напряжения.
3. В каких случаях применяется параллельное и последовательное включения диодов в схемах выпрямителей? Привести схемы.

## **ЛИТЕРАТУРА**

### **Основная**

1. Прянишников, В.А. Электроника [Текст]: курс лекций / В.А. Прянишников. – Санкт-Петербург: Крона-Принт, 2000. – 416 с.
2. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи [Текст]: конспект лекций / БГАТУ, кафедра автоматизированных систем управления производством; сост. Дудников И.Л., Матвеев И.П. – Минск, 2004. – 122 с.
3. Игумнов, Д.В. Основы полупроводниковой электроники [Текст] / Д.В. Игумнов, Г.П. Костюнина. - Москва: Горячая линия – Телеком, 2005. – 392 с.
4. Гальперин, М.В. Электронная техника [Текст] / М.В. Гальперин. – Москва: Форум-ИНФРА-М, 2005. – 352 с.
5. Галкин, В.И. Промышленная электроника и микроэлектроника [Текст] / В.И. Галкин. - Минск: Беларусь, 2000. – 350 с.
6. Гусев, В.Г. Электроника [Текст] / В.Г. Гусев, Ю.Н. Гусев. – Москва: Высшая школа, 1991. – 622 с.
7. Миловзоров, О.В. Электроника [Текст]: учебник для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – Москва: Высшая школа, 2005. – 288 с.
8. Бобровников, Л.З. Электроника [Текст]: учебник для вузов / Л.З. Бобровников - СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
9. Источники питания / БГАТУ, кафедра АСУП, сост. И.Л. Дудников. – Минск, 2000. – 40 с.

### **Дополнительная**

10. Ибрагим, К.Ф. Основы электронной техники. Элементы, схемы, системы [Текст]: пер. с англ. / К.Ф. Ибрагим. – Москва: Мир, 2001. – 398 с.
11. Арестов, К.А. Основы электроники и микропроцессорной техники [Текст] / К.А. Арестов. – Москва: Колос, 2001. – 216 с.
12. Лачин, В.И. Электроника [Текст] / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. – 448 с.