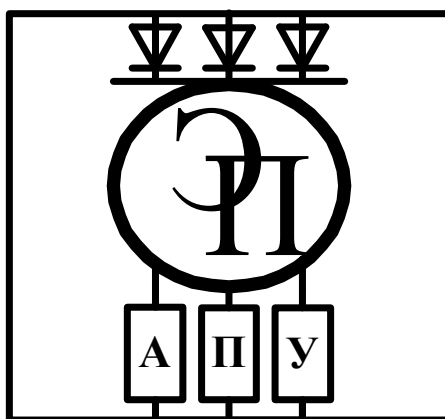


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»  
дневной формы обучения*



Могилев 2024

УДК 621.38  
ББК 32.85  
С36

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «2» октября 2023 г.,  
протокол № 2

Составитель ст. преподаватель В. Н. Шарков

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

Представлены сведения о применяемом оборудовании и даны рекоменда-  
ции по выполнению лабораторных работ.

Учебное издание

**СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ГИБКИХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ**

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2024

## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование тепловых режимов работы элементов силовой электроники.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и определение параметров управляемого выпрямителя.....	7
3 Лабораторная работа № 3. Исследование параметрического стабилизатора напряжения.....	10
4 Лабораторная работа № 4. Исследование компенсационных стабилизаторов напряжения.....	12
5 Лабораторная работа № 5. Исследование импульсного двухтактного источника питания.....	17
6 Лабораторная работа № 6. Исследование режимов работы и определение параметров широтно-импульсного преобразователя (ШИП).....	21
Список литературы.....	24

# 1 Лабораторная работа № 1. Исследование тепловых режимов работы элементов силовой электроники

**Цель работы:** исследование тепловых режимов работы элементов силовой электроники.

## 1.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в свой состав лабораторный стенд НТЦ-04 ExtLab «Силовая и преобразовательная техника» с источниками питания и макетом, электронный двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр. На макете смонтированы элементы силовой электроники, прилагается комплект резисторов и конденсаторов.

### Рабочее задание

Установить сменную панель НТЦ-04/8 «Линейный стабилизатор».

Линейный стабилизатор представляет собой делитель напряжения, на вход которого подаётся входное (нестабильное) напряжение, а выходное (стабилизированное) напряжение снимается с нижнего плеча делителя. Стабилизация осуществляется путём изменения сопротивления одного из плеч делителя: сопротивление постоянно поддерживается таким, чтобы напряжение на выходе стабилизатора находилось в установленных пределах.

При исследовании регулятора напряжения необходимо:

- 1) снять зависимость температуры транзистора от напряжения на транзисторе  $T_{mp} = f(U_{mp})$ ;
- 2) снять зависимость температуры транзистора от тока нагрузки  $T_{mp} = f(I_{нагр})$ ;
- 3) снять зависимость температуры транзистора от рассеиваемой на нем мощности  $T_{mp} = f(P_{рас})$ .

При выполнении п. 1 входное напряжение изменять от 9 до 24 В с шагом 2 В. Нагрузочный резистор выбирается из расчета обеспечения тока нагрузки 0,2 А во всем диапазоне изменения входного напряжения. Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $T_{mp} = f(U_{mp})$ .

При выполнении п. 2 установить входное напряжение 18 В. Подключить на выход транзистора переменный нагрузочный резистор с сопротивлением 510 Ом. Изменяя сопротивление нагрузки от 510 до 50 Ом с шагом 50 Ом, измерять ток нагрузки и напряжение на нагрузке. Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $T_{mp} = f(I_{нагр})$ .

*Примечание* – Пп. 2 и 3 могут выполняться одновременно при одновременном измерении токов и напряжений.

Для трех-пяти экспериментальных точек в каждой таблице рассчитать потребляемую мощность от входного источника и рассеиваемую мощность на нагрузке и силовом транзисторе и построить зависимость  $T_{mp} = f(P_{рас})$ .

В качестве силовых транзисторов используются транзисторы КТ815

и КТ837 поочередно (для проведения сравнительного анализа влияния параметров транзистора на рассеиваемую мощность).

Выполнить исследование схемы согласно пп. 1–3 для одного из силовых транзисторов (указывает преподаватель).

**Отчет** оформляется на листах формата А4 или в тетради.

Содержание отчета:

- титульный лист (при оформлении в тетради – один на тетрадь);
- название работы;
- цель работы;
- схемы электрические принципиальные регуляторов напряжения с учетом подключения измерительных приборов;
- таблицы результатов эксперимента и расчетов;
- графики результатов эксперимента  $T_{mp} = f(U_{mp})$ ,  $T_{mp} = f(I_{нагр})$ ,  $T_{mp} = f(P_{рас})$ ;
- выводы по работе.

## **1.2 Общие теоретические сведения**

### **Охлаждение силовых полупроводниковых преобразователей.**

Тепло в силовых полупроводниковых преобразователях возникает как вторичный продукт преобразования электрической энергии. Источниками тепла являются все элементы, через которые протекает электрический ток. Причем не только рабочий ток, но и нежелательные токи, индуцированные переменными магнитными полями в элементах конструкции, токи смещения в диэлектриках и обратные токи в полупроводниковых приборах. Если при конструировании преобразователя не учитывают побочные эффекты различных магнитных полей, часто возникают неожиданные явления, когда источником тепла становится, например, стенка шкафа вблизи воздушного дросселя или проходной изолятор с высокочастотной составляющей тока.

**Главными источниками тепла** в преобразователях являются силовые полупроводниковые приборы, дроссели, трансформаторы и резисторы. По сравнению с ними можно практически всегда пренебречь такими источниками тепла, как конденсаторы, коммутационные устройства, измерительные устройства и провода. Не всегда можно не учитывать предохранители, особенно быстродействующие силовые, которые часто существенно влияют на тепловые процессы в преобразователе.

В силовых полупроводниковых приборах тепло возникает по нескольким причинам. Главной причиной является прохождение рабочего тока через полупроводниковый переход, на котором неизбежно имеется некоторое напряжение. Произведение мгновенных значений тока и этого напряжения дает в каждый момент времени мощность потерь в полупроводниковом приборе.

На практике для определения потерь в полупроводниковых приборах чаще всего используются диаграммы, приводимые в каталогах изготовителей. Мощность потерь в них указывается в зависимости от прямого тока.

Потери в полупроводниковом приборе от других причин, например, при включении, отключении, от обратного тока, от тока в закрытом состоянии и в управляющем электроде, обычно пренебрежимо малы. Они заметно проявляются лишь при высоких частотах и относительно малых нагрузках приборов.

Отвод тепла (охлаждение) является обязательным условием того, чтобы температура тела, в котором возникает тепло, достигла **установившегося** значения, чтобы она не **повышалась** непрерывно. В установившемся состоянии отводится все тепло, которое возникает. При этом температура элементов преобразователя не должна превышать допустимых значений.

В общем случае тепло отводится тремя путями: излучением, конвекцией и теплопередачей.

При тепловых расчетах используются тепловые сопротивления так же, как электрические сопротивления при электрических расчетах. Они входят в расчетную формулу как последовательно или параллельно соединенные, образуя тепловую сеть. При расчете установившихся состояний в расчетные формулы теплопроводности входят только тепловые сопротивления. При расчетах переходных процессов приходится учитывать также теплоемкость и использовать дифференциальные уравнения первого порядка.

Для конструкции преобразователей решающее значение имеют установившиеся тепловые явления, которые определяют максимальные значения температуры во всех точках преобразователя. Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только установившиеся, неизменные во времени состояния.

От места своего возникновения тепло должно дойти до охлаждаемой поверхности. В полупроводниковых приборах тепло возникает прежде всего непосредственно в полупроводниковом переходе. Изготовители полупроводниковых приборов указывают в каталогах внутреннее тепловое сопротивление прибора  $p-n$ -переход – корпус  $R_{Т.П.К}$ . Если прибор установлен на охладителе, между источником тепла и окружающей средой действуют *три тепловых сопротивления*:

- 1) внутреннее тепловое сопротивление прибора  $R_{Т.П.К}$ ;
- 2) тепловое сопротивление контакта между корпусом прибора и охладителем  $R_{Т.К.О}$ ;
- 3) тепловое сопротивление охладителя или, точнее, между охладителем и окружающей средой  $R_{Т.О.С}$ .

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Как зависит температура транзистора от напряжения на коллекторно-эмиттерном переходе при постоянном токе коллектора?
- 2 Как зависит температура транзистора от тока коллектора?
- 3 Как определить рассеиваемую мощность на силовом транзисторе?
- 4 Как влияют параметры транзистора на рассеиваемую мощность?
- 5 Какие параметры транзистора влияют на рассеиваемую мощность?
- 6 Привести условия выбора силового транзистора.
- 7 Как параметры радиатора влияют на температуру транзистора?

8 Для каких целей используется радиатор на транзисторе?

9 Как изменяется температура радиатора от скорости охлаждающего воздуха?

10 Для чего используется термопроводящая паста?

11 Как определить температурное сопротивление силового полупроводникового элемента?

12 Как определить полное температурное сопротивление силового полупроводникового элемента с учетом системы охлаждения?

## 2 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и определение параметров управляемого выпрямителя

**Цель работы:** исследование однофазного выпрямителя при работе на активную, активно-индуктивную нагрузку и нагрузку с противоЭДС.

### 2.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в свой состав лабораторный стенд НТЦ-04ExtLab «Силовая и преобразовательная техника» с источниками питания и макетом, электронный двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр. На макете смонтированы элементы силовой электроники, прилагается комплект резисторов и конденсаторов.

#### Рабочее задание

Установить сменную панель «Управляемые выпрямители», представленную на рисунке 2.1.

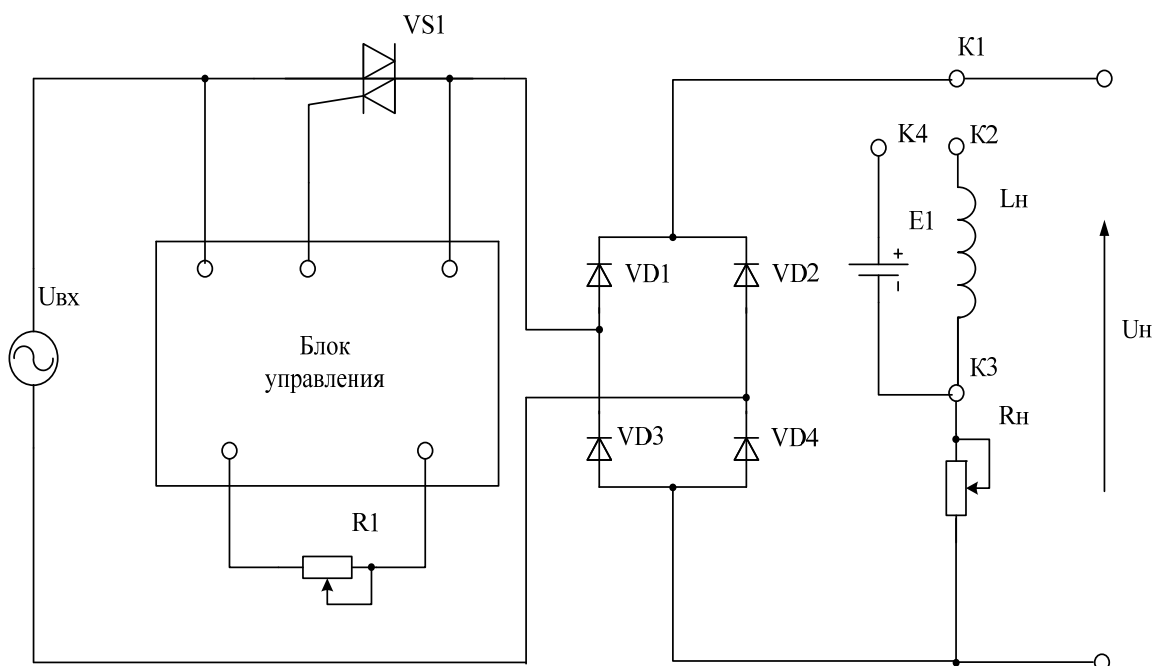


Рисунок 2.1 – Схема электрическая панели «Управляемые выпрямители»

Назначение элементов на сменной панели «Управляемые выпрямители»:

R1 – резистор задания угла управления;

VS1 – силовой регулирующий элемент (симистор);

VD1...VD4 – неуправляемый выпрямитель;

$L_n$ ,  $R_n$ ,  $E1$  – индуктивность и сопротивление нагрузки и величина противоЭДС соответственно;

K1...K4 – коммутационные точки;

$U_{ex}$ ,  $U_n$  – входное переменное напряжение и постоянное напряжение на нагрузке соответственно.

При исследовании выпрямителя необходимо:

- 1) снять зависимости напряжения и тока во времени на активной нагрузке;
- 2) снять зависимости напряжения и тока во времени на активно-индуктивной нагрузке;
- 3) снять зависимости напряжения и тока во времени на активной нагрузке с противоЭДС;
- 4) снять регулировочную характеристику управляемого выпрямителя (зависимость напряжения на выходе выпрямителя от угла управления);
- 5) снять внешнюю характеристику управляемого выпрямителя (зависимость напряжения на выходе выпрямителя от тока нагрузки).

Вид нагрузки задается путем соединения коммутационных точек:

– активная нагрузка – соединить точки K1, K3;

– активно-индуктивная нагрузка – соединить точки K1, K2;

– активная нагрузка с противоЭДС – соединить точки K1, K4.

При выполнении работы получить осциллограммы координат напряжения и тока на нагрузке.

Определить среднее значение тока и напряжения на входе выпрямителя и на нагрузке.

Значение угла управления задается резистором R1.

Значение тока нагрузки задается резистором  $R_n$  при постоянном угле управления.

**Отчет** оформляется на листах формата А4 или в тетради.

Содержание отчета:

- титульный лист (при оформлении в тетради – один на тетрадь);
- название работы;
- цель работы;
- схема электрическая принципиальная управляемого выпрямителя с учетом подключения измерительных приборов;
- таблицы результатов эксперимента и расчетов;
- графики результатов эксперимента;
- график регулировочной характеристики  $U_d = f(\alpha)$ ;
- график внешней характеристики  $U_d = f(I_{нагр})$ ;
- выводы по работе.



## 2.2 Общие теоретические сведения

Часто на практике возникает необходимость не только выпрямлять переменное напряжение, но и регулировать или стабилизировать выпрямленное напряжение.

В настоящее время наибольшее распространение получили управляемые выпрямители с фазовым методом регулирования выходного напряжения.

К основным характеристикам УВ относятся: регулировочная характеристика; внешняя характеристика.

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость напряжения на выходе преобразователя от угла управления  $U = f(\alpha)$ .

В режиме непрерывного тока данная зависимость имеет вид

$$U = U_{d0} \cos(\alpha),$$

где  $U_{d0}$  – напряжение на выходе выпрямителя при угле управления  $\alpha = 0$ .

Внешней характеристикой называют зависимость среднего значения напряжения на нагрузке от среднего значения тока нагрузки  $U_{cp} = f(I_{cp})$ . При анализе схем предполагается, что трансформатор, диоды и подводящие провода идеальны, т. е. без потерь. На самом деле, на форму и значение выходного напряжения выпрямителей оказывает влияние индуктивность рассеяния трансформатора  $x_a$ , активное сопротивление обмоток трансформатора  $R_m$ , вентилялей и подводящих проводов  $R_{np}$ .

Анализ показывает, что индуктивность рассеяния трансформатора оказывает ощутимое влияние на работу схемы при больших токах нагрузки, тогда как однофазные схемы, как правило, используются при малых токах нагрузки. Поэтому на значение выходного напряжения маломощных выпрямителей оказывают влияние в основном активные потери.

### Контрольные вопросы

- 1 Из каких основных функциональных блоков состоит источник питания?
- 2 По каким схемам строятся однофазные выпрямители?
- 3 По каким предельным параметрам выбираются диоды?
- 4 Почему расчетная мощность трансформатора больше мощности нагрузки?
- 5 Пояснить формы напряжения на активной, активно-индуктивной нагрузке и активной нагрузке с противоЭДС.
- 6 Что такое угол регулирования  $\alpha$ ? От какой точки он отсчитывается на временных диаграммах: при  $m = 2$ ;  $m = 3$ ;  $m = 6$ ?
- 7 Что такое регулировочная характеристика?
- 8 Что такое режим прерывистого и непрерывного токов?
- 9 Когда возникает режим прерывистого тока при активной нагрузке: при  $m = 2$ ;  $m = 3$ ;  $m = 6$ ?
- 10 Может ли возникнуть режим прерывистого тока при активно-индуктивной нагрузке?

11 Что такое анодная индуктивность и как она влияет на значение выходного напряжения выпрямителя?

12 Что такое угол коммутации  $\gamma$  и от чего он зависит?

### 3 Лабораторная работа № 3. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

**Цель работы:** исследование параметрического стабилизатора напряжения.

#### 3.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в свой состав лабораторный стенд НТЦ-04ExtLab «Силовая и преобразовательная техника» с источниками питания и макетом, электронный двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр. На макете смонтированы элементы силовой электроники, прилагается комплект резисторов и конденсаторов.

#### Рабочее задание

Собрать схему согласно рисунку 3.1.

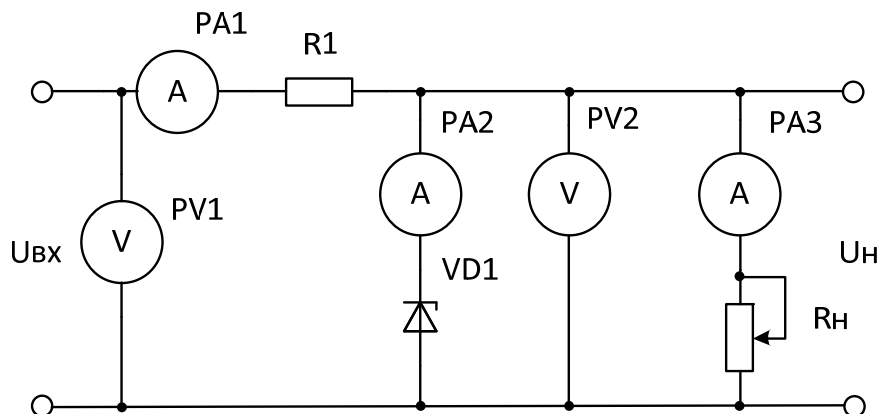


Рисунок 3.1 – Параметрический стабилизатор напряжения

Стабилитрон VD1 имеет следующие параметры:

- напряжение стабилизации номинальное  $U_{ст.ном} = 9,1$  В;
- минимальный ток стабилизации  $I_{ст.мин} = 1$  мА;
- максимальный ток стабилизации  $I_{ст.мах} = 14$  мА;
- номинальный ток стабилизации  $I_{ст.ном} = 5$  мА;
- рассеиваемая мощность  $P_{рас} = 0,125$  Вт.

Необходимо рассчитать значение сопротивления ограничивающего резистора R1 при следующих параметрах:

- входное напряжение  $U_{вх}$  изменяется в диапазоне от 12 до 24 В;

– ток, протекающий через стабилитрон, должен находиться в пределах от  $I_{cm.min}$  до  $I_{cm.max}$ ;

– рассеиваемая мощность не должна превышать  $P_{рас}$ .

При исследовании параметрического стабилизатора напряжения необходимо:

1) снять зависимость напряжения на стабилитроне от тока, протекающего через стабилитрон,  $U_{cm} = f(I_{cm})$ ;

2) снять зависимость напряжения на стабилитроне от входного напряжения  $U_{cm} = f(U_{вх})$ ;

3) снять зависимость напряжения на нагрузочном резисторе от тока нагрузки  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ .

При выполнении п. 1 входное напряжение изменять от 9 до 24 В с шагом 1 В. Нагрузочный резистор к стабилизатору не подключается (стабилизатор работает на холостом ходу, входной ток протекает через стабилитрон). Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $U_{cm} = f(I_{cm})$  с учетом работы полупроводникового прибора (график располагается в третьем квадранте).

При выполнении п. 2 входное напряжение изменять от 9 до 24 В с шагом 1 В. Нагрузочный резистор к стабилизатору не подключается. Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $U_{cm} = f(U_{вх})$ .

*Примечание* – Пп. 1 и 2 могут выполняться одновременно при измерении напряжения на входе и на стабилитроне.

При выполнении п. 3 установить входное напряжение 18 В. Подключить к стабилитрону переменный нагрузочный резистор с сопротивлением 10 кОм. Изменяя сопротивление нагрузки от 10 до 0,5 кОм с шагом 0,5 кОм, измерять ток нагрузки и напряжение на нагрузке. Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ .

Для трех-пяти экспериментальных точек в каждой таблице рассчитать потребляемую мощность от входного источника и рассеиваемую мощность на всех элементах схемы (на резисторах и стабилитронах).

**Отчет** оформляется на листах формата А4 или в тетради.

Содержание отчета:

- титульный лист (при оформлении в тетради – один на тетрадь);
- название работы;
- цель работы;
- схема электрическая принципиальная параметрического стабилизатора напряжения с учетом подключения измерительных приборов;
- таблицы результатов эксперимента и расчетов;
- графики результатов эксперимента  $U_{cm} = f(I_{cm})$ ,  $U_{cm} = f(U_{вх})$ ,  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ ;
- выводы по работе.

Исследование параметрического стабилизатора напряжения может выполняться как на стенде, так и на компьютере.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Почему стабилизатор напряжения называется параметрическим?
- 2 Как определить точность поддержания напряжения на нагрузке для минимального и максимального значений токов нагрузки при постоянном входном напряжении?
- 3 Как определить рассеиваемую мощность на стабилитроне?
- 4 В чем заключается смысл минимального тока стабилитрона?
- 5 В чем заключается смысл максимального тока стабилитрона?
- 6 В чем заключается смысл номинального тока стабилитрона?
- 7 От чего зависит максимальный ток стабилитрона?
- 8 Как определить дифференциальное сопротивление стабилитрона?
- 9 Условия выбора стабилитрона.
- 10 В чем заключается недостаток параметрического стабилизатора напряжения?
- 11 Как выполняется расчет параметрического стабилизатора напряжения?
- 12 Чем опасен режим холостого хода для параметрического стабилизатора напряжения?
- 13 Чем опасен режим короткого замыкания для параметрического стабилизатора напряжения?
- 14 Какая характеристика для стабилизатора напряжения является внешней?
- 15 Показать вольт-амперную характеристику (ВАХ) стабилитрона.
- 16 Как определить точность поддержания напряжения на нагрузке при переменном входном напряжении?
- 17 Привести составляющие погрешностей стабилизации напряжения при изменении внешних факторов.
- 18 Почему изменяется напряжение на нагрузке при изменении внешних факторов?
- 19 От чего зависит точность поддержания напряжения на нагрузке при постоянном входном напряжении?
- 20 Почему при изменении входного напряжения изменяется напряжение стабилизации параметрического стабилизатора напряжения?

## **4 Лабораторная работа № 4. Исследование компенсационных стабилизаторов напряжения**

***Цель работы:*** исследование компенсационных стабилизаторов напряжения.

### ***4.1 Описание экспериментальной установки***

Экспериментальная установка включает в свой состав лабораторный стенд НТЦ-04ExtLab «Силовая и преобразовательная техника» с источниками

питания и макетом, электронный двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр. На макете смонтированы элементы силовой электроники, прилагается комплект резисторов и конденсаторов.

### **Рабочее задание**

Установить сменную панель НТЦ-04/8 «Линейный стабилизатор».

Линейный стабилизатор представляет собой делитель напряжения, на вход которого подается входное (нестабильное) напряжение, а выходное (стабилизированное) напряжение снимается с нижнего плеча делителя. Стабилизация осуществляется путем изменения сопротивления одного из плеч делителя: сопротивление постоянно поддерживается таким, чтобы напряжение на выходе стабилизатора находилось в установленных пределах.

При исследовании компенсационного стабилизатора напряжения необходимо:

1) снять зависимость напряжения на нагрузочном резисторе от входного напряжения  $U_{нагр} = f(U_{вх})$ ;

2) снять зависимость напряжения на нагрузочном резисторе от тока нагрузки  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ ;

3) снять зависимость тока нагрузки от тока, протекающего через базо-эмиттерный переход транзистора,  $I_{нагр} = f(I_{б-э})$ .

При выполнении п. 1 входное напряжение изменять от 9 до 24 В с шагом 1 В. Нагрузочный резистор выбирается из расчета обеспечения тока нагрузки 0,2 А. Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

При выполнении п. 2 установить входное напряжение 18 В. Подключить к стабилитрону переменный нагрузочный резистор с сопротивлением 510 Ом. Изменяя сопротивление нагрузки от 510 до 50 Ом с шагом 50 Ом, измерять ток нагрузки и напряжение на нагрузке. Результаты эксперимента представить в таблице, построить зависимость  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ .

*Примечание* – Пп. 2 и 3 могут выполняться одновременно при одновременном измерении токов и напряжений.

Для трех-пяти экспериментальных точек в каждой таблице рассчитать потребляемую мощность от входного источника и рассеиваемую мощность на нагрузке и силовом транзисторе.

В качестве силовых транзисторов используются транзисторы КТ815 и КТ837 поочередно (для проведения сравнительного анализа влияния параметров транзистора на точность стабилизации напряжения).

**Отчет** оформляется на листах формата А4 или в тетради.

Содержание отчета:

- титульный лист (при оформлении в тетради – один на тетрадь);
- название работы;
- цель работы;

- схемы электрические принципиальные компенсационных стабилизаторов напряжения с учетом подключения измерительных приборов;
- таблицы результатов эксперимента и расчетов;
- графики результатов эксперимента  $U_{нагр} = f(U_{вх})$ ,  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ ,  $I_{нагр} = f(I_{б-э})$ ;
- расчет точности стабилизации выходного напряжения в зависимости от типа силового транзистора;
- выводы по работе.

Исследование компенсационных стабилизаторов напряжения может выполняться как на стенде, так и на компьютере.

#### 4.2 Общие теоретические сведения

Схема стабилизации напряжения при помощи транзистора приведена на рисунке 4.1.

Выходное напряжение схемы определяется выражением

$$V_{out} = V_z - V_{be} \approx V_z - 0,7,$$

где 0,7 – падение напряжения на базно-эмиттерном переходе транзистора, В.

На основе транзистора VT2 реализован источник тока, ток которого  $I_s = 0,7/R_1$ . Схема источника тока выбрана для того, чтобы при номинальной нагрузке на базу транзистора VT1 поступал требуемый ток, а через стабилитрон протекал небольшой ток. При этом выходное напряжение удерживается на уровне  $V_{out} = V_z - 0,7$  для любой величины нагрузки (от ненагруженного состояния до номинального). В случае перегрузки открывается транзистор VT3, что приводит к уменьшению тока базы транзистора VT1. Таким образом, значение максимального выходного тока ограничивается величиной  $I_{outmax} = 0,7/R_m$ .

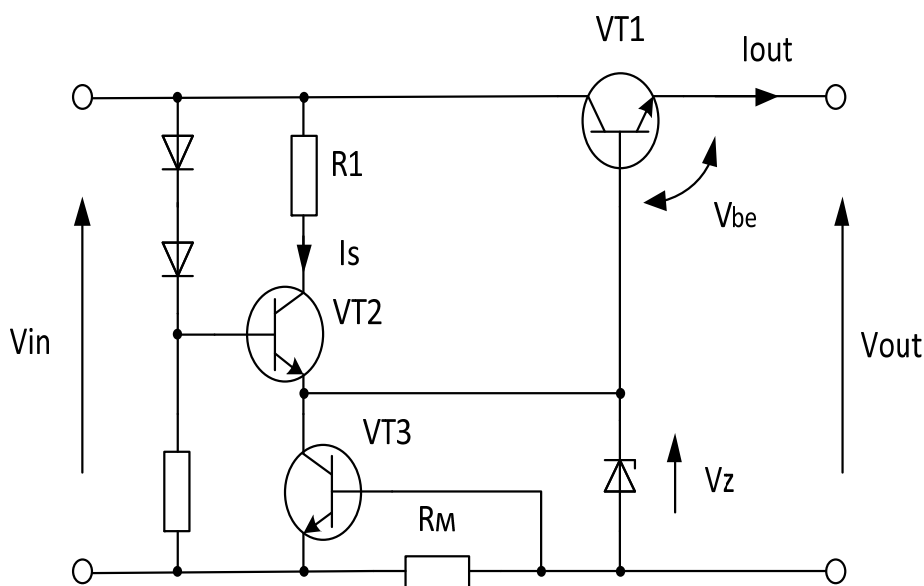


Рисунок 4.1 – Компенсационный стабилизатор напряжения

## Регулируемые регуляторы напряжения.

Схема регулируемого стабилизатора напряжения приведена на рисунке 4.2.

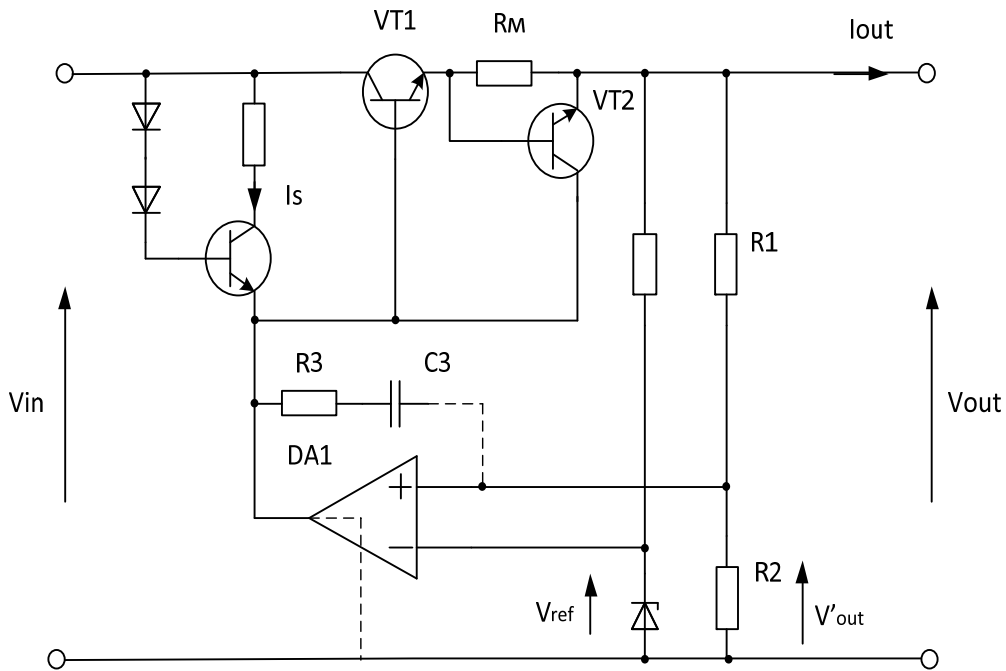


Рисунок 4.2 – Регулируемый стабилизатор напряжения

ОУ усиливает разность напряжений ( $V_{ref} - V'_{out}$ ), представляющую собой разность между требуемым и действительными значениями выходного напряжения. Открытый коллекторный выход ОУ управляет током базы транзистора VT1, регулируя долю тока  $I_s$ , текущего через него. Например, при очень высоком выходном напряжении ОУ DA1 уменьшает ток базы, тем самым приоткрывая транзистор VT1, что приводит к снижению выходного напряжения. При перегрузке, т. е. когда  $I_{out} > V_{BE} / R_m = 0,7 / R_m$ , ток  $I_s$  забирает на себя транзистор VT2. При очень высоком коэффициенте усиления замкнутой цепи схема входит в колебательный режим. Для предотвращения этого на основе ОУ реализуется ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор), для чего в схему, показанную на рисунке 4.2, вводится RC-цепочка (R3, C3).

Для получения **регулируемого выходного напряжения** на инвертирующий вход ОУ подается опорное напряжение, создаваемое при помощи потенциометра. Всегда лучше менять величину опорного напряжения, чем настраивать делитель R1/R2, поскольку это не оказывает влияния на управляющий контур и, следовательно, не сказывается на стабильности системы. Подстройка делителя R1/R2 производится только с целью точной регулировки уровня выходного напряжения.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Почему стабилизатор напряжения называется компенсационным?
- 2 Как определить точность поддержания напряжения на нагрузке для минимального и максимального значений токов нагрузки при постоянном входном напряжении?
- 3 Как определить рассеиваемую мощность на силовом транзисторе?
- 4 Как влияют параметры транзистора на точность поддержания напряжения?
- 5 Какой параметр транзистора влияет на точность поддержания напряжения?
- 6 Какая схема включения транзистора используется в стабилизаторе напряжения?
- 7 Почему напряжение на выходе стабилизатора напряжения меньше напряжения стабилизации стабилитрона?
- 8 Как обеспечить напряжение на выходе стабилизатора, равное напряжению на стабилитроне?
- 9 В чем заключается недостаток компенсационного стабилизатора напряжения со стабилитроном в базовой цепи силового транзистора?
- 10 Как выполняется расчет компенсационного стабилизатора напряжения?
- 11 Опасен ли режим холостого хода для компенсационного стабилизатора напряжения?
- 12 Чем опасен режим короткого замыкания для компенсационного стабилизатора напряжения?
- 13 Какая характеристика для стабилизатора напряжения является внешней?
- 14 В чем особенность регулируемого стабилизатора напряжения?
- 15 Как определить точность поддержания напряжения на нагрузке при переменном входном напряжении?
- 16 Привести составляющие погрешностей стабилизации напряжения при изменении внешних факторов.
- 17 Почему изменяется напряжение на нагрузке при изменении внешних факторов?
- 18 От чего зависит точность поддержания напряжения на нагрузке при постоянном входном напряжении?
- 19 Почему при изменении входного напряжения изменяется напряжение стабилизации компенсационного стабилизатора напряжения?
- 20 Пояснить последовательность работы стабилизатора напряжения при скачкообразном увеличении напряжения на входе.
- 21 Пояснить последовательность работы стабилизатора напряжения при скачкообразном уменьшении напряжения на входе.
- 22 Пояснить последовательность работы стабилизатора напряжения при скачкообразном уменьшении тока нагрузки.
- 23 Пояснить последовательность работы стабилизатора напряжения при скачкообразном увеличении тока нагрузки.
- 24 Почему точность стабилизации напряжения у компенсационного стабилизатора выше, чем у параметрического?
- 25 Условия выбора силового транзистора.



## 5 Лабораторная работа № 5. Исследование импульсного двухтактного источника питания

**Цель работы:** исследование импульсного двухтактного источника питания.

### 5.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в свой состав лабораторный стенд с источниками питания и макетом, электронный двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр. На макете смонтированы элементы импульсного двухтактного источника питания, прилагается комплект резисторов и конденсаторов.

#### Рабочее задание

Собрать схему согласно рисунку 5.1.

Импульсный двухтактный источник питания включает в себя следующие функциональные узлы:

- генератор тактовых импульсов;
- делитель частоты на 2;
- два ключевых каскада;
- высокочастотный трансформатор;
- выпрямитель;
- нагрузочное устройство.

Генератор тактовых импульсов реализован на микросхеме DD1 (К561ТЛ1 – четыре логических элемента 2И-НЕ с триггером Шмидта на входе), резисторе R1 и конденсаторе C1.

Делитель частоты на два реализован на микросхеме DD2 (К561ТМ2 – два D-триггера).

Ключевой каскад выполнен на транзисторе VT1(VT2), диоде VD2(VD3), резисторе R2(R3).

Высокочастотный трансформатор TV1 выполнен на ферритовой чашке с сильной электромагнитной связью.

Выпрямитель выполнен на диоде VD1 и конденсаторе C1.

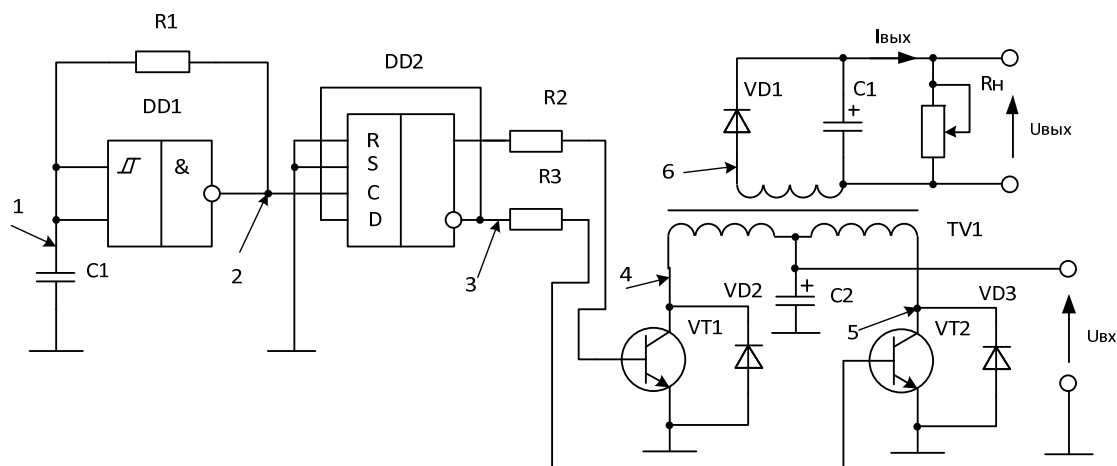


Рисунок 5.1 – Импульсный двухтактный источник питания

Нагрузочное устройство выполнено на переменном резисторе R4.

При исследовании импульсного двухтактного источника питания необходимо:

- 1) определить тактовую частоту генератора;
- 2) снять осциллограммы в контрольных точках 1...6;
- 3) определить индуктивность вторичной обмотки трансформатора;
- 4) снять внешнюю характеристику источника питания;
- 5) рассчитать зависимость КПД импульсного источника питания от выходного тока (тока нагрузки);
- 6) рассчитать потери мощности на силовом транзисторе.

При исследовании входное напряжение на импульсном источнике питания должно находиться в диапазоне от 9 до 15 В (для каждой подгруппы конкретное значение указывает преподаватель).

При выполнении п. 1 необходимо воспользоваться осциллограммой в контрольной точке 2 или осциллограммой в контрольной точке 1 и параметрами элементов R1 и C1 (для определения параметров RC-цепи).

При выполнении п. 2 осциллограммы в контрольных точках 1...5 снимаются относительно общего провода источника питания, а в контрольной точке 6 – относительно другого вывода вторичной обмотки трансформатора.

При выполнении пункта п. 3 воспользоваться законом Ома с учетом того, что это цепь переменного тока (исключить из работы выпрямитель и составить расчетную схему с сосредоточенными параметрами активных и реактивных сопротивлений и ЭДС источника).

При выполнении п. 4 снять показания напряжения и тока, потребляемого от источника, а также показания напряжения и тока на нагрузке (выполнить с учетом выпрямителя и без него (по указанию преподавателя). Регулирование тока в нагрузке осуществлять путем изменения сопротивления нагрузки от 500 до 50 Ом с шагом 50 Ом.

На основании п. 4 выполнить п. 5.

При выполнении п. 6 воспользоваться осциллограммой в контрольной точке 4(5).

**Отчет** оформляется на листах формата А4 или в тетради.

Содержание отчета:

- титульный лист (при оформлении в тетради – один на тетрадь);
- название работы;
- цель работы;
- схема электрическая принципиальная импульсного двухтактного источника питания с учетом подключения измерительных приборов;
- таблицы результатов эксперимента и расчетов;
- графики результатов эксперимента (осциллограммы);
- расчет точности поддержания выходного напряжения в зависимости от тока нагрузки;
- выводы по работе.

Исследование двухтактного источника питания может выполняться как на стенде, так и на компьютере.

## 5.2 Общие теоретические сведения

**Импульсные источники питания (ИИП)** используются во многих электронных системах: практически во всех телевизорах и компьютерах, а также в большинстве современных промышленных приборов. В устройствах с аккумуляторным питанием ИИП обеспечивают постоянный уровень внутреннего напряжения питания, не зависящий от уровня заряда батареи. ИИП также используются для получения больших значений напряжений, чем напряжение, выдаваемое аккумулятором, что необходимо для питания CD-плееров, ноутбуков, мобильных телефонов и камер. ИИП обладают следующими преимуществами по сравнению с линейными регулируемыми источниками питания:

- теоретически ИИП работают без потерь мощности. Однако на практике их КПД обычно составляет 70 %...95 %. Это приводит к низкой рабочей температуре, а следовательно, к высокой надежности;

- ИИП работают на высоких частотах, что позволяет снижать габариты и вес применяемых компонентов.

Итак, ИИП являются более эффективными, более легкими, меньшими по размерам и более дешевыми устройствами по сравнению с линейными регулируемыми источниками питания.

Практически все ИИП имеют одинаковый принцип действия. Основными элементами ИИП являются электронные переключатели (обычно транзисторы), работающие на очень высоких частотах (как правило, 20...300 кГц). Отношение времени включения ключа ко времени его отключения определяет средний поток энергии, снимаемый со входа схемы. Стоящий на выходе ИИП фильтр низкой частоты (ФНЧ) превращает импульсный сигнал на выходе переключателя в сглаженное (постоянное, ровное) выходное напряжение. Поскольку электронные ключи и ФНЧ теоретически свободны от потерь, ИИП обладают высокими КПД.

Различаются вторичные и первичные ИИП. Во вторичных ИИП нет электрических развязок между входными и выходными цепями. Они используются там, где развязка от сети уже существует, или там, где эта развязка не требуется, например, в устройствах с аккумуляторным питанием. В первичных ИИП входные и выходные цепи электрически изолированы друг от друга. Их переключающие транзисторы установлены в цепях первичных обмоток трансформаторов. Высокочастотные трансформаторы обеспечивают передачу энергии во вторичную обмотку. Поскольку такие схемы работают на высоких частотах, применяемые трансформаторы имеют сравнительно небольшие размеры.

Существуют три основные схемы ИИП: обратного хода, прямого хода и резонансные. ИИП обратного хода передают энергию в интервалы времени, когда транзисторы находятся в закрытом состоянии, а преобразователи прямого хода – когда транзисторы открыты. Резонансные ИИП используют резонансные схемы, переключающие транзисторы в моменты времени, когда их напряжения или токи пересекают нулевые уровни, что позволяет снизить нагрузку на них.

Регулятор коэффициента мощности также является ИИП, используемым для обеспечения синусоидальности тока в сети.

**Управление импульсными источниками питания.** Выходное напряжение ИИП поддерживается постоянным при помощи замкнутого контура управления. Выходное напряжение (действительное значение) постоянно сравнивается с эталонным напряжением (номинальным значением). Разность действительного и номинального значений определяет рабочий цикл управления работой транзистора. Контур управления компенсирует изменения напряжения сети и выходного тока, т. е. выполняет функции *стабилизатора напряжения сети и стабилизатора тока в нагрузке*.

Существуют два метода регулирования ИИП: *по напряжению и по току*. Первый из них считается традиционным методом регулирования, тогда как на основе второго метода построено большинство современных интегральных схем импульсных контроллеров.

В таблице 5.1 представлены результаты измерений и расчетов.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

$U_{вх}$ , В	$I_{вх}$ , мА	$U_{вых}$ , В	$I_{вых}$ , мА	КПД $\eta$	$U_{вх}$ , В	$I_{вх}$ , мА	$U_{вых}$ , В	$I_{вых}$ , мА	КПД $\eta$
9,2	60,8	22	0	0	9,2	350	6,6	83,5	0,171
9,2	161,5	10,7	23	0,165	9,2	400	9,1	89,6	0,221
9,2	200	10	33,2	0,180	9,2	450	7,9	110	0,209
9,2	250	8,9	48	0,185	9,2	500	6,6	131,11	0,188
9,2	300	7,9	64	0,183					

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Почему выбрана данная частота генератора тактовых импульсов?
- 2 Как определить точность поддержания напряжения на нагрузке для минимального и максимального значений токов нагрузки при постоянном входном напряжении?
- 3 Как определить рассеиваемую мощность на силовом транзисторе?
- 4 Как влияют параметры транзистора на величину рассеиваемой на нем мощности?
- 5 Пояснить назначение делителя частоты на 2.
- 6 Пояснить принцип работы генератора тактовых импульсов.
- 7 Пояснить работу выпрямителя.
- 8 Пояснить назначения диодов VD2(VD3).
- 9 Условия выбора силового транзистора.
- 10 В чем заключается недостаток исследованного генератора тактовых импульсов?
- 11 Как повысить КПД исследованного источника?
- 12 Опасен ли режим холостого хода для исследованного источника и почему?
- 13 Опасен ли режим перегрузки для исследованного источника и почему?

14 Какая характеристика для исследованного источника является внешней?

15 В чем особенность двухтактного источника питания?

16 Как определить точность поддержания напряжения на нагрузке при переменном входном напряжении?

17 Привести составляющие погрешностей стабилизации напряжения при изменении внешних факторов.

18 Почему изменяется напряжение на нагрузке при изменении внешних факторов?

19 От чего зависит точность поддержания напряжения на нагрузке при постоянном входном напряжении?

20 Почему при изменении входного напряжения изменяется напряжение на выходе исследуемого источника питания?

21 Пояснить принцип действия двухтактного источника питания.

22 Пояснить колебательный характер напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

## **6 Лабораторная работа № 6. Исследование режимов работы и определение параметров широтно-импульсного преобразователя (ШИП)**

*Цель работы:* исследование режимов работы и определение параметров ШИП.

### **6.1 Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка включает в свой состав лабораторный стенд НТЦ-04 ExtLab «Силовая и преобразовательная техника» с источниками питания и макетом, электронный двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр. На макете смонтированы элементы силовой электроники, прилагается комплект резисторов и конденсаторов.

### **Рабочее задание**

Установить сменную панель «Широтно-импульсный преобразователь», представленную на рисунке 6.1.

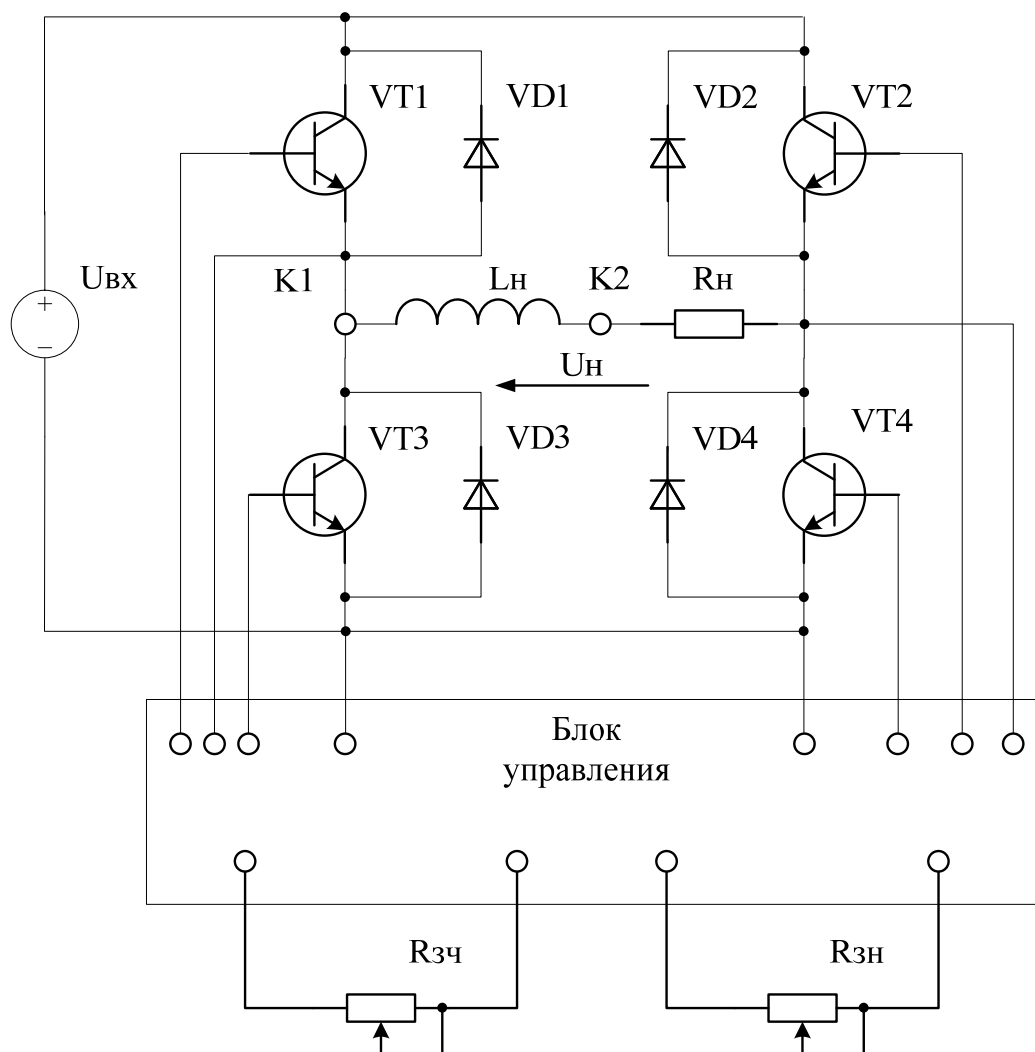


Рисунок 6.1 – Схема электрическая панели «Широтно-импульсный преобразователь»

Назначение элементов на сменной панели «Широтно-импульсный преобразователь»:

$R_{зч}$  – резистор задания частоты коммутации;

$R_{зн}$  – резистор задания напряжения на нагрузке;

VT1...VT4 – силовые ключи (транзисторы);

VD1...VD4 – обратный неуправляемый выпрямитель;

$L_n, R_n$  – индуктивность и сопротивление нагрузки соответственно;

K1, K2 – коммутационные точки;

$U_{вх}, U_n$  – входное постоянное напряжение и постоянное напряжение на нагрузке соответственно.

На блоке управления установить режим «ШИП».

При исследовании широтно-импульсного преобразователя (ШИП) необходимо:

- 1) снять зависимости напряжения и тока во времени на активной нагрузке;
- 2) снять зависимости напряжения и тока во времени на активно-индуктивной нагрузке;

3) снять регулировочную характеристику ШИП (зависимость напряжения на выходе ШИП от напряжения управления);

4) снять внешнюю характеристику ШИП (зависимость напряжения на выходе ШИП от тока нагрузки).

Вид нагрузки задается путем соединения коммутационных точек:

– активная нагрузка – соединить точки К1, К2;

– активно-индуктивная нагрузка – без соединения контрольных точек.

Частота модуляции устанавливается резистором  $R_{зч}$ .

При выполнении работы получить осциллограммы координат напряжения и тока на нагрузке.

Определить среднее значение тока и напряжения на входе выпрямителя и на нагрузке.

Выполнить п. 2 при различных значениях нагрузки.

Пп. 1–3 выполняются для всех типов нагрузки.

Значение угла управления задается резистором  $R_{зн}$ .

Значение тока нагрузки задается резистором  $R_n$  при постоянной частоте модуляции.

**Отчет** оформляется на листах формата А4 или в тетради.

Содержание отчета:

- титульный лист (при оформлении в тетради – один на тетрадь);
- название работы;
- цель работы;
- схема электрическая принципиальная ШИП с учетом подключения измерительных приборов;
- таблицы результатов эксперимента и расчетов;
- графики результатов эксперимента;
- графики внешних характеристик  $U_{нагр} = f(I_{нагр})$ ;
- график регулировочной характеристики  $U_{нагр} = f(U_{упр})$ ;
- выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какими характеристиками описывается работа ШИП?
- 2 Пояснить назначение регулировочной характеристики.
- 3 В каких целях используется внешняя характеристика?
- 4 Какие способы модуляции применяются в ШИП?
- 5 Пояснить формы напряжения на различных типах нагрузки.
- 6 Как зависит напряжение на выходе ШИП от сигнала управления?

## Список литературы

- 1 **Семенов, Б. Ю.** Силовая электроника: профессиональные решения / Б. Ю. Семенов. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2020. – 416 с.: ил.
- 2 **Онищенко, Г. Б.** Силовая электроника. Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения: учебное пособие / Г. Б. Онищенко, О. М. Соснин. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 122 с.
- 3 **Иванов, Л. В.** Силовая электроника. Выпрямители: учебное пособие / Л. В. Иванов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 156 с.: ил.
- 4 **Корис, Р.** Справочник инженера-схемотехника / Р. Корис, Х. Шмидт-Вальтер. – Москва: Техносфера, 2008. – 608 с.