

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Забайкальский государственный университет»  
(ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

Факультет энергетический

Кафедра технических систем и робототехники

## **УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**для студентов заочной формы обучения**  
**по дисциплине «Промышленная электроника»**

для направления подготовки (специальности) 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

---

Общая трудоемкость дисциплины (модуля)

Виды занятий	Распределение по семестрам в часах			Всего часов
	4 семестр	5 семестр	6 семестр	
1	2	3	4	5
Общая трудоемкость		144		144
Аудиторные занятия, в т.ч.:		18		18
лекционные (ЛК)		8		8
практические (семинарские) (ПЗ, СЗ)				
лабораторные (ЛР)		10		10
Самостоятельная работа студентов (СРС)		90		90
Форма промежуточного контроля в семестре*		36 экзамен		36 экзамен
Курсовая работа (курсовой проект) (КР, КП)				

## **Краткое содержание курса**

Место промышленной электроники в современной технике. Элементная база электрон. устройств промышленной электроники. Выпрямители управляемые и неуправляемые. Основные схемы неуправляемых и управляемых выпрямителей, принцип действия, основные расчетные соотношения для выбора элементов схемы. Основные принципы импульсной модуляции в преобразователях на полностью управляемых электронных ключах. Особенности работы выпрямителей на индуктивную, емкостную нагрузки и на против ЭДС.

Выходные фильтры. Зависимые инверторы, принцип действия. Входные и регулировочные характеристики. Преобразователи частоты с непосредственной связью, принцип действия, регулировочные характеристики. Регуляторы переменного напряжения. Принцип действия, регулировочные характеристики. Автономные инверторы напряжения, тока и резонансные. Принцип действия, способы регулирования выходного напряжения, регулировочные характеристики. Выходные фильтры автономных инверторов напряжения. Преобразователи частоты со звеном постоянного тока. Типы регуляторов постоянного напряжения, принцип действия, регулировочные характеристики.

## **Форма промежуточного контроля**

### **Контрольная работа**

Задание на контрольную работу приведено в приложении 1. Вариант студента определяется по сумме трех последних цифр зачетки.

Для студента с номером зачетки 123456 вариант будет определяться как  $4 + 5 + 6 = 15$ .

Для студента с номером зачетки 123000 вариант будет 30.

В данной контрольной необходимо решить две задачи.

## Экзамен

Промежуточная аттестация предназначена для определения уровня освоения всего объема учебной дисциплины. Для оценивания результатов обучения при проведении промежуточной аттестации используется четырехбалльная шкала «Отлично», «Хорошо», «Удовлетворительно», «Неудовлетворительно».

Шкала оценивания	Критерии	Уровень освоения компетенций
<i>Отлично</i>	наличие глубоких и исчерпывающих знаний в объеме пройденного программного материала, правильные и уверенные действия по применению полученных знаний на практике, грамотное и логически стройное изложение материала при ответе, знание дополнительно рекомендованной литературы	Эталонный
<i>Хорошо</i>	наличие твердых и достаточно полных знаний программного материала, незначительные ошибки при освещении заданных вопросов, правильные действия по применению знаний на практике, четкое изложение материала	Стандартный
<i>Удовлетворительно</i>	наличие твердых знаний пройденного материала, изложение ответов с ошибками, уверенно исправляемыми после дополнительных вопросов, необходимость наводящих вопросов, правильные действия по применению знаний на практике	Пороговый
<i>Неудовлетворительно</i>	наличие грубых ошибок в ответе, непонимание сущности излагаемого вопроса, неумение применять знания на практике, неуверенность и неточность ответов на дополнительные и наводящие вопросы.	Компетенции не сформированы

Экзамен проводится в устной форме по билетам (в очной форме) и в письменной форме по тестам (при удаленном обучении).

Студенту предлагается выбрать билет и подготовиться к устному ответу. Время подготовки заранее оговаривается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается отдельно по четырехбалльной шкале оценок, а далее вычисляется среднее арифметическое оценок, полученных за каждый вопрос. В процессе ответа студента на вопросы и задания билета, преподаватель может задавать дополнительные вопросы. При выставлении оценки учитывается активность студента во время аудиторных занятий, и

результаты собеседований по лекционному материалу и материалу практических занятий.

Экзаменационный билет включает в себя два теоретических вопроса. При выставлении оценки учитывается активность студента во время аудиторных занятий, и результаты собеседований по лекционному материалу и материалу практических занятий. При определении уровня достижений, обучающихся на экзамене обращается особое внимание на следующее:

1. дан полный, развернутый ответ на поставленный вопрос;
2. показана совокупность осознанных знаний об объекте, проявляющаяся в свободном оперировании понятиями, умении выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи;
3. знание об объекте демонстрируется на фоне понимания его в системе данной дисциплины и междисциплинарных связей;
4. ответ формулируется в терминах дисциплины, изложен математическим языком, логичен, доказателен, демонстрирует авторскую позицию обучающегося;
5. теоретические постулаты подтверждаются примерами из практики.

***Теоретические вопросы для подготовки к экзамену:***

1. Полупроводниковые материалы. Плоское изображение кристаллической решётки. Собственная проводимость полупроводников. Энергетические диаграммы.
2. Примесная проводимость полупроводников. Получение полупроводника p типа. Плоское изображение кристаллической решётки. Энергетические диаграммы. Подвижность электрона и дырки.
3. Примесная проводимость полупроводников. Получение полупроводника n типа. Плоское изображение кристаллической решётки. Энергетические диаграммы. Подвижность электрона и дырки.

4. p-n переход. Односторонняя проводимость p-n перехода. Диффузия и дрейф носителей в полупроводнике. Различные виды p-n переходов. Омический контакт. Ёмкость p-n перехода.

5. Полупроводниковый диод, условное обозначение в схемах, прямое и обратное включение (схема). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода. Показать на ВАХ различные режимы работы полупроводникового диода и объяснить их особенности.

6. Кремниевый стабилитрон, принцип действия, условное обозначение в схемах, применение в схемах стабилизации напряжения. Характеристика зависимости выходного напряжения от входного при пробое.

7. Транзистор, принцип действия, условное обозначение в схемах, токи в транзисторах. Режимы работы транзистора. Схемы включения транзистора.

8. Транзистор, принцип действия, условное обозначение в схемах, статические входные и выходные характеристики транзистора, схема включения с ОБ.

9. Транзистор, принцип действия, условное обозначение в схемах, статические входные и выходные характеристики транзистора, схема включения с ОЭ.

10. Полевой транзистор, принцип действия, условное обозначение в схемах. Схема включения. Статические характеристики. На чем основано управление током в полевом транзисторе?

11. Полевой транзистор с изолированным затвором, принцип действия, условное обозначение в схемах. Схема включения. Статические характеристики.

12. Тиристоры. Устройство и принцип действия неуправляемого (динистора) тиристора, симистора. Характеристики и параметры.

13. Тиристоры. Устройство и принцип действия управляемого (тринистора) тиристора. Характеристики и параметры.

14. Выпрямление однофазного переменного тока. Структурная схема выпрямления. Однополупериодная схема выпрямления.

15. Двухполупериодная схема выпрямления с выводом нулевой точки трансформатора. Временные диаграммы.

16. Мостовая схема выпрямления. Временные диаграммы.

17. Коэффициент пульсаций, коэффициент сглаживания. Сглаживающие фильтры. Различные виды, схемы подключения.

18. Трёхфазная схема выпрямления переменного тока с нулевым выводом. Временные диаграммы.

**Оформление письменной работы согласно МИ 4.2-5/47-01-2013**  
[Общие требования к построению и оформлению учебной текстовой документации](#)

## **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

1. Рекус, Григорий Гаврилович. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями : учеб. пособие / Рекус Григорий Гаврилович. - Москва : Высшая школа, 2008. - 343с. : ил. - ISBN 978-5-06-005934-2 : 445-00.
2. Миловзоров, Олег Владимирович. Электроника : учебник / Миловзоров Олег Владимирович, Панков Иван Григорьевич. - 4-е изд., стер. - Москва : Высшая школа, 2008. - 288 с. : ил. - ISBN 978-5-06-004428-7 : 354-14. Беспалов, Виктор Яковлевич. Электрические машины : учеб. Пособие / Беспалов Виктор Яковлевич, Котеленец Николай Федорович. – 2-е изд., испр. – Москва : Академия, 2008. – 320с. – ISBN 978-5-7695-5395-0 : 503-00.

Издания из ЭБС:

1. Зиновьев, Геннадий Степанович. Силовая электроника: Учебное пособие для бакалавров / Зиновьев Геннадий Степанович; Зиновьев Г.С. - 5-е изд. - М. : Издательство Юрайт, 2016. - 667. - (Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-1972-1 : 1000.00.
2. Розанов, Юрий Константинович. Силовая электроника: Учебник и практикум / Розанов Юрий Константинович; Лепанов М.Г., Розанов Ю.К. - под ред. - М. : Издательство Юрайт, 2017. - 206. - (Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-9440-7 : 1000.00.

### **Дополнительная литература**

3. Кузовкин, Владимир Александрович. Электротехника и электроника : учеб. для академического бакалавриата / Кузовкин Владимир Александрович, Филатов Владимир Витальевич. - Москва : Юрайт, 2014. - 431 с. : ил. - (Бакалавр. Академический курс). - ISBN 978-5-9916-3855-5 : 430-87.
4. Лазарева, Светлана Валерьевна. Электротехника и электроника : учеб. пособие : Ч. 1 / Лазарева Светлана Валерьевна, Шойванов Юрий Ринчинович, Дейс Данил Александрович. - Чита : ЧитГУ, 2009. - 148с. - ISBN 978-5-9293-0478-1 : б/ц.

### **Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

5. ЭБС «Университетская библиотека онлайн»; Договор № 204-11/15/223/16-7 от 04.02.2016г. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru)
6. ЭБС «Лань»; Договор № 223/17-28 от 31.03.2017г. [www.e.lanbook.ru](http://www.e.lanbook.ru)
7. ЭБС «Юрайт»; Договор № 223/17-27 от 31.03.2017г. [www.biblio-online.ru](http://www.biblio-online.ru)
8. ЭБС «Консультант студента»; Договор № 223/17-12 от 28.02.2017г. [www.studentlibrary.ru](http://www.studentlibrary.ru)

Ведущий преподаватель

Дейс Д.А.

Заведующий кафедрой

Лапшакова Л.А.

## Задания к контрольным работам

### Задача 1.

Напряжение и частота сети переменного тока заданы в табл. 1. Тип выпрямителя, мощность и номинальное напряжение нагрузки, тип фильтра и допустимый коэффициент пульсации напряжения на нагрузке приведены в табл. 2.

Таблица 1

Группа	1	2	3	4	5	6
$U_c$ , В	127	80	220	110	380	200
$f_c$ , Гц	50	400	50	400	50	400

Таблица 2

Вариант	Тип выпрямителя	Номинальное напряжение нагрузки, В	Номинальная мощность нагрузки, Вт	Тип фильтра	Допустимый коэффициент пульсации, %
1	2	3	4	5	6
1	А	6000	50	V	5,0
2	Б	1500	40	I	5,0
3	В	12	60	III	3,0
4	Г	110	300	III	10,0
5	Д	220	1500	II	2,0
6	А	3000	10	V	10,0
7	Б	600	100	IV	1,0
8	В	24	120	IV	2,0
9	Г	100	500	III	2,0
10	Д	200	1000	II	1,0
11	А	1000	20	V	5,0
12	Б	250	25	I	1,0
13	В	48	100	III	1,0
14	Г	150	1500	II	5,0
15	Д	250	2500	II	1,5
16	А	1000	100	I	10,0
17	Б	200	50	IV	2,0
18	В	60	600	IV	1,0
19	Г	200	600	III	5,0
20	Д	200	2000	II	1,0



1	2	3	4	5	6
21	А	3500	30	I	5,0
22	Б	150	150	III	3,0
23	В	12	100	IV	1,0
24	Г	250	750	III	5,0
25	Д	250	5000	II	1,0
26	А	2500	20	V	1,0
27	Б	150	300	III	5,0
28	В	24	150	IV	0,5
29	Г	80	200	III	5,0
30	Д	80	1600	II	3,0

### Примечания

1. Для трехфазных выпрямителей в табл. 1 приведены фазные напряжения трехфазной сети.

2. Если приведенные в прил. 1 диоды по предельным параметрам не удовлетворяют требованиям схемы, их надо включать параллельно или последовательно.

3. Если параметры элементов фильтра оказываются слишком большими (индуктивность  $> 1$  Гн, емкость  $> 10000$  мкФ), рекомендуется выбрать более сложный или многосвязный фильтр (прил. 2).

4. Для выпрямителей приняты следующие обозначения:

А – однофазный однополупериодный;

Б – однофазный с нулевым выводом;

В – однофазный мостовой;

Г – трехфазный с нулевым выводом;

Д – трехфазный мостовой.

5. Для типа фильтра приняты следующие обозначения:

I – простой емкостный фильтр;

II – простой индуктивный фильтр;

III – Г-образный индуктивно-емкостный фильтр;

IV – П-образный LC-фильтр;

V – Г-образный RC-фильтр.

### Задание

1. Начертить схему выпрямителя с фильтром, на которой обозначить напряжения и токи в обмотках трансформатора, вентилях и нагрузке. Указать полярность выходных клемм.

2. Рассчитать необходимые параметры и выбрать тип вентиля при условии работы выпрямителя на заданную активную нагрузку. Индуктивностью и сопротивлением обмоток трансформатора пренебречь.

3. Определить расчетную мощность, напряжение вторичной обмотки и коэффициент трансформации трансформатора. Вентили считать идеальными.

4. Рассчитать амплитуды тока и напряжения при работе выпрямителя без фильтра и начертить в масштабе временные диаграммы тока и напряжения на нагрузке.

5. Рассчитать параметры сглаживающего фильтра, который обеспечит допустимый коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке.

6. Указать на схеме выпрямителя тип вентиля, параметры элементов фильтра, мощность и коэффициент трансформации трансформатора.

### Задача 2.

Схемы усилительных каскадов приведены на рис. 1–4. Исходные данные для расчета заданы в табл. 3 и 4. Входные и выходные характеристики транзисторов приведены в прил. 3. При расчете каскадов с  $R_3$  его величину принять равной  $0,1R_k$ . Для каскадов с делителем  $R_1$  и  $R_2$  ток делителя принять  $5I_{бп}$ .

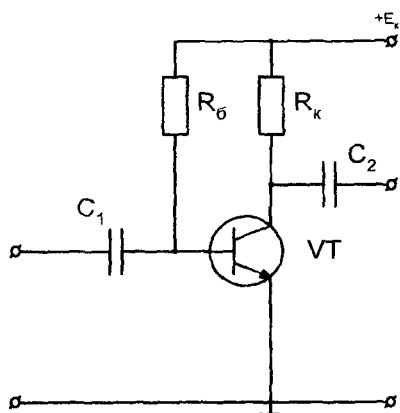


Рис. 1

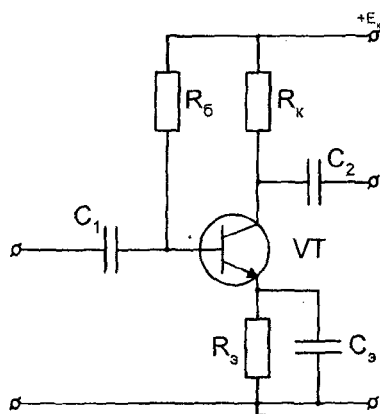


Рис. 2

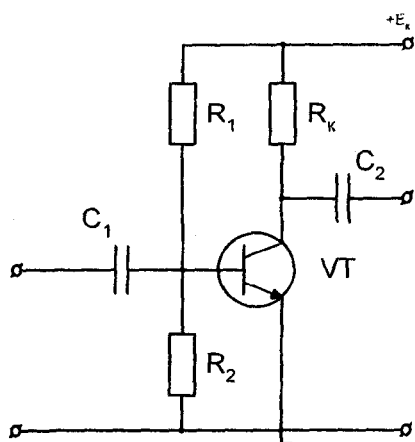


Рис. 3

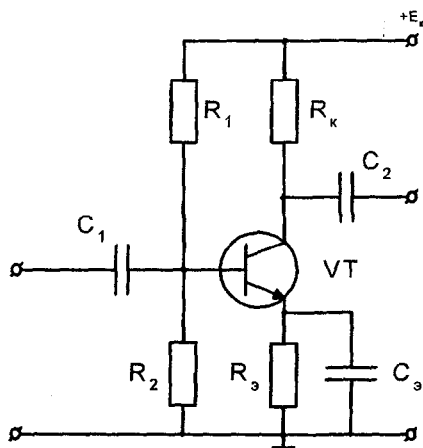


Рис. 4

Таблица 3

Группа	1	2	3	4	5	6
Схема	Рис. 1	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4	Рис. 1	Рис. 3

Таблица 4

Вариант	Тип транзистора	Напряжение источника питания $E_k$ , В	Ток покоя транзистора $I_{кп}$ , мА	Напряжение покоя $U_{кэп}$ , В	Сопротивление нагрузки $R_n$ , кОм
1	2	3	4	5	6
1	МП25	12	5	6	10
2	МП25	20	10	10	2
3	МП25А	12	10	6	10
4	МП25А	20	10	10	1
5	МП25Б	24	15	12	10
6	МП25Б	27	15	14	2
7	ГТ122А	12	10	6	5
8	ГТ122Б	12	5	6	2
9	ГТ122В	12	10	6	10
10	ГТ122Г	12	8	6	1
11	ГТ122А	15	8	8	1
12	ГТ122В	15	10	8	10

1	2	3	4	5	6
13	КТ301А	12	4	6	10
14	КТ301А	24	4	12	3
15	КТ301Б	12	5	6	10
16	КТ301Б	24	5	12	4
17	КТ301В	12	5	6	10
18	КТ301В	24	5	12	2
19	КТ301Ж	12	3	6	10
20	КТ301Ж	24	3	12	4
21	КТ315А	12	20	6	5
22	КТ315А	12	25	6	1
23	КТ315Б	12	25	6	1
24	КТ315Б	15	20	7	0.5
25	КТ315В	24	10	12	10
26	КТ315В	24	15	12	2
27	КТ315Г	12	20	6	5
28	КТ315Г	12	20	6	0.5
29	КТ315Е	12	20	6	2
30	КТ315Е	15	20	7	1

### Задание

1. Начертить схему усилительного каскада с учетом заданного типа транзистора. На схеме указать токи и напряжения транзистора, а также  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$ .

2. По заданным в табл. 4 параметрам на характеристиках транзистора нанести точку покоя и построить статическую линию нагрузки. Рассчитать величину сопротивлений резисторов, обеспечивающих заданный режим покоя. При расчете учесть, что  $I_k \gg I_b$ .

3. В точке покоя по характеристикам транзистора определить его  $h$ -параметры ( $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ). Параметр  $h_{12}$  принять равным 0.

4. Начертить схему замещения усилителя в динамическом режиме, заменив транзистор эквивалентной схемой с  $h$ -параметрами.

5. Рассчитать с учетом нагрузки входное и выходное сопротивления каскада, коэффициенты усиления тока, напряжения и мощности.

6. Построить динамическую линию нагрузки на выходных характеристиках транзистора и определить максимальную амплитуду выходного напряжения, усиливаемого без заметных искажений сигнала, и максимальную выходную мощность.

7.

8.

## ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ К ЗАДАЧАМ

### Пример 1.

Схема выпрямителя с П-образным индуктивно-емкостным фильтром приведена на рис. 5. Номинальное напряжение нагрузки – 100 В, номинальная мощность – 50 Вт, допустимый коэффициент пульсации – 0,5 %, напряжение сети переменного тока 220 В при частоте 50 Гц.

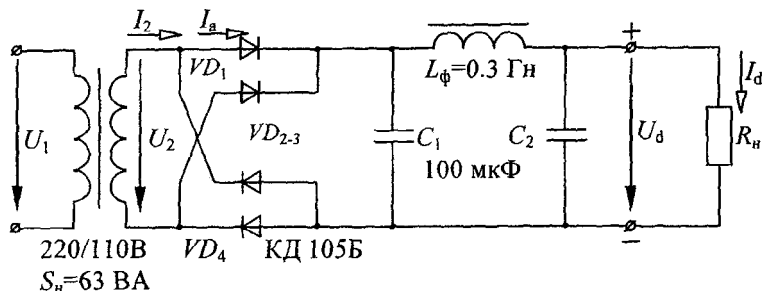


Рис. 5

Выбрать тип вентиляй, определить расчетную мощность и коэффициент трансформации трансформатора, параметры фильтра.

### Решение.

1. Выбор вентиляй.

Ток нагрузки

$$I_d = \frac{P_n}{U_d} = \frac{50}{100} = 0,5 \text{ А.}$$

Для однофазного мостового выпрямителя среднее значение прямого тока через вентиль (прил. 5)

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ А.}$$

Обратное максимальное напряжение на вентиле

$$U_{в \max} = 1,57 \cdot U_d = 1,57 \cdot 100 = 157 \text{ В.}$$

Выбираем вентили КД105Б (см. прил. 3), для которых

$$I_{а \text{ доп}} = 0,3 \text{ А} > I_a = 0,25 \text{ А};$$

$$U_{в \text{ доп}} = 400 \text{ В} > U_{в \max} = 157 \text{ В.}$$

2. Определение параметров трансформатора.

Для однофазного мостового выпрямителя действующее значение вторичного напряжения

$$U_2 = 1,11 \cdot U_d = 1,11 \cdot 100 = 111 \text{ В.}$$

Откуда коэффициент трансформации

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{111} \approx 2.$$

Расчетная мощность

$$S_{\text{расч}} = 1,23 \cdot P_n = 1,23 \cdot 50 = 61,5 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Выбираем трансформатор

$$U_1/U_2 = 220/110 \text{ В};$$

$$S_{\text{ном}} = 63 \text{ В} \cdot \text{А} > S_{\text{расч}} = 61,5 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

3. Определение параметров фильтра (см. прил. 2).

Коэффициент пульсаций на выходе однофазного мостового выпрямителя

$$q_1 = 0,67.$$

Требуемый коэффициент пульсаций

$$q_2 = 0,005.$$

Коэффициент сглаживания фильтра

$$S = \frac{q_1}{q_2} = \frac{0,67}{0,005} = 134.$$

П-образный фильтр состоит из простого  $C$ -фильтра и Г-образного  $LC$ -фильтра. Его коэффициент сглаживания

$$S = S_C \cdot S_{LC}.$$

Принимаем емкость конденсаторов фильтра  $C_1 = C_2 = 100$  мкФ. Тогда

$$S_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot C_1 \cdot R_H = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 200 = 12,6,$$

где  $m$  — число пульсаций выпрямленного напряжения за период (см. прил. 5);

$R_H$  — сопротивление нагрузки:

$$R_H = \frac{U_d}{I_d} = \frac{100}{0,5} = 200 \text{ Ом.}$$

Тогда коэффициент сглаживания  $LC$ -фильтра

$$S_{LC} = \frac{S}{S_C} = \frac{134}{12,6} = 10,6.$$

Для  $LC$ -фильтра

$$L_\Phi C_2 = \frac{S_{LC}}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot m)^2} = \frac{10,6}{(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2)^2} = 26,8 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{Ф.}$$



При  $C_2 = 100$  мкФ

$$L_\phi = \frac{L_\phi C_2}{C_2} = \frac{26,8 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}} \approx 0,3 \text{ Гн.}$$

Параметры фильтра  $C_1 = C_2 = 100$  мкФ,  $L_\phi = 0,3$  Гн удовлетворяют условиям эффективной работы (см. прил. 2):

$$\frac{1}{m\omega C_\phi} \ll R_n \text{ и } m\omega L_\phi \gg R_n.$$

### Пример 2.

Для усилительного каскада на транзисторе ГТ108А, схема которого приведена на рис. 4, заданы: напряжение источника питания 9 В, ток покоя коллектора 10 мА, напряжение покоя эмиттер-коллектор 4 В, сопротивление нагрузки 1 кОм. Рассчитать сопротивления резисторов схемы, определить коэффициент усиления напряжения, тока и мощности, входное и выходное сопротивления каскада, максимальную амплитуду выходного синусоидального сигнала. Принять  $R_3 = 0,1R_k$  и ток делителя  $I_1 = 5I_{БП}$ .

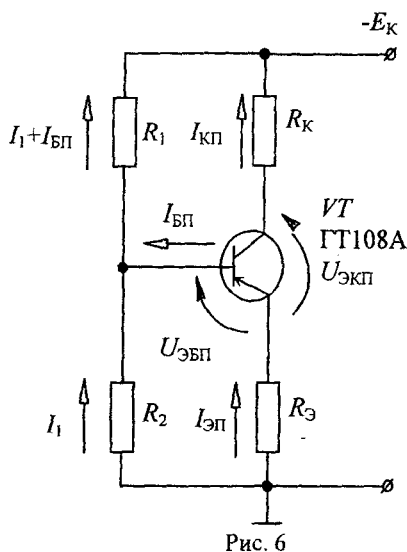


Рис. 6

### Решение.

При использовании транзистора  $p-n-p$  типа необходимо изменить полярность источника питания  $E_k$  на рис. 4. При этом направления токов и напряжений меняются на противоположные.

1. *Статический режим* или режим покоя.

В статическом режиме входное напряжение отсутствует и токи протекают только под действием источника питания  $E_k$ . Сопротивление конденсаторов постоянному току равно бесконечности и поэтому схема каскада в этом режиме имеет следующий вид (рис. 6).

Уравнение статической линии нагрузки:

$$E_k = I_3 \cdot R_3 + U_{эк} + I_k \cdot R_k.$$

Учитывая, что  $I_k \gg I_3$ ,  $I_k \approx I_3$ ,

$$E_k = U_{эк} + I_k \cdot (R_k + R_3).$$

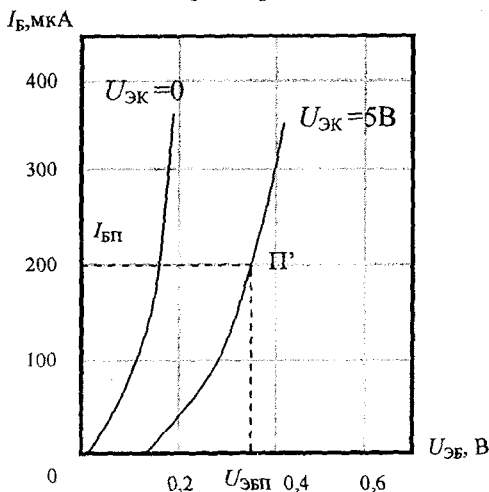
Откуда ток коллектора

$$I_k = \frac{E_k - U_{эк}}{R_k + R_3}.$$

При использовании значений тока в миллиамперах сопротивления получаются в килоомах.

По полученному уравнению на выходных характеристиках транзистора ГТ108А строим статическую линию нагрузки (рис. 7) по двум точкам: точка покоя П с координатами  $I_{кп} = 10$  мА и  $U_{экп} = 4$  В и точка отсечки  $I_k = 0$ ,  $U_{эк} = E_k = 9$  В.

### Входные характеристики



### ГТ108А, ГТ108В

Германиевые сплавные *p-n-p* транзисторы предназначены для работы в схемах усиления и генерирования.

Корпус металлический, масса не более 0,5 г.

$$U_{кэ м} = 10 \text{ В,}$$

$$I_{к м} = 50 \text{ мА,}$$

$$P_{к м} = 75 \text{ мВт,}$$

$$T_{к м} = 55 \text{ }^\circ\text{С.}$$

## Выходные характеристики

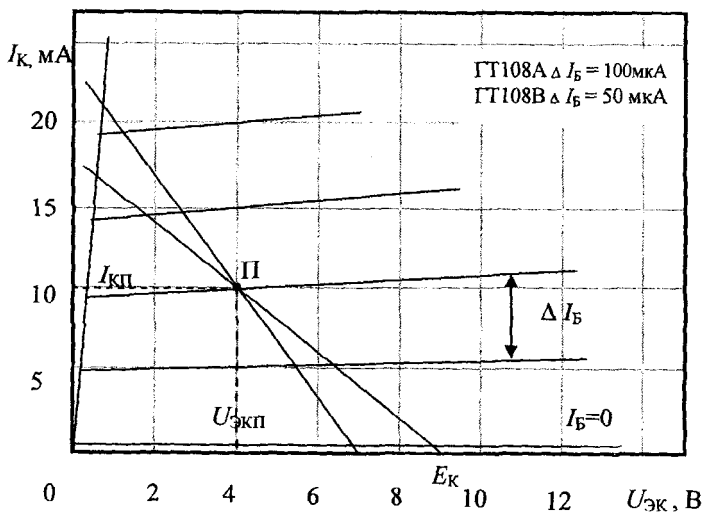


Рис. 7

Подставляя в уравнение линии нагрузки значения  $E_K$ ,  $I_{КП}$  и  $U_{ЭКП}$ , получаем

$$R_3 + R_k = \frac{E_K - U_{ЭКП}}{I_{КП}} = \frac{9 - 4}{10} = 0,5 \text{ кОм.}$$

Так как по условию  $R_3 = 0,1R_k$ , то

$$R_k = \frac{R_3 + R_k}{1,1} = \frac{0,5}{1,1} \approx 0,45 \text{ кОм} = 450 \text{ Ом};$$

$$R_3 \approx 50 \text{ Ом.}$$

Для контура  $R_3$ -эмиттер-база- $R_2$  можно написать уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$I_{эп} \cdot R_3 + U_{эбп} - I_1 \cdot R_2 = 0;$$

$$R_2 = \frac{I_{эп} \cdot R_3 + U_{эбп}}{I_1}.$$

Точка покоя П лежит на выходной характеристике  $I_6 = 200 \text{ мкА} = 0,2 \text{ мА}$ . По входной характеристике  $U_{\text{ЭК}} = 5 \text{ В}$  для этого тока базы получаем  $U_{\text{ЭБП}} = 0,35 \text{ В}$ .

Учитывая, что  $I_{\text{КП}} \approx I_{\text{ЭП}}$  и  $I_1 = 5I_{\text{БП}} = 5 \cdot 0,2 = 1 \text{ мА}$ :

$$R_2 = \frac{10 \cdot 0,05 + 0,35}{1} = 0,85 \text{ кОм.}$$

Аналогично для контура  $R_2-R_1-E_K$ :

$$E_K = R_2 \cdot I_1 + R_1 \cdot (I_1 + I_{\text{БП}});$$

$$R_1 = \frac{E_K - R_2 \cdot I_1}{I_1 + I_{\text{БП}}} = \frac{9 - 0,85}{1 + 0,2} = 6,8 \text{ кОм.}$$

## 2. Динамический режим.

По выходным характеристикам транзистора в точке покоя П определяем

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \right|_{U_{\text{ЭК}}=4\text{В}} = \frac{15 - 5}{0,3 - 0,1} = 50;$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta U_{\text{ЭК}}}{\Delta U_{\text{ЭБП}}} \right|_{I_6=0,2\text{мА}} = \frac{10,5 - 10}{10 - 4} = 83 \cdot 10^{-3} \text{ мСм.}$$

По входной характеристике

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{\text{ЭБ}}}{\Delta I_6} \right|_{U_{\text{ЭК}}=5\text{В}} = \frac{0,41 - 0,3}{0,3 - 0,1} = 0,55 \text{ кОм.}$$

В динамическом режиме источник питания  $E_K$  закорочен, а токи протекают только за счет  $u_{\text{вх}} = U_{\text{вх м}} \sin \omega t$ . Емкость конденсаторов выбирается так, чтобы на минимальной рабочей частоте их сопро-

тивление было значительно меньше активных сопротивлений схемы и конденсаторы можно считать замкнутыми. Тогда, заменив транзистор эквивалентной схемой с  $h$ -параметрами, получим схему замещения усилителя (рис. 8).

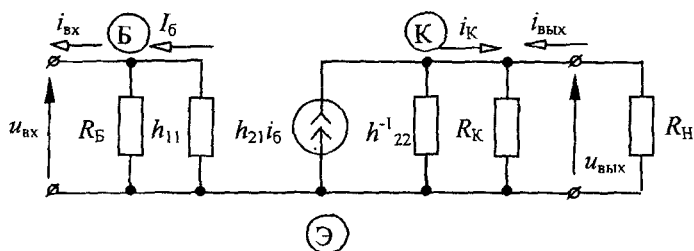


Рис. 8

В этой схеме

$$R_Б = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6,8 \cdot 0,85}{6,8 + 0,85} = 0,75 \text{ кОм};$$

$$h_{22}^{-1} = \frac{1}{83 \cdot 10^{-3}} \approx 12 \text{ кОм}.$$

Так как  $h_{22}^{-1} \gg R_К$ , то им можно пренебречь.

Входное сопротивление каскада

$$R_{вх} = \frac{R_Б \cdot h_{11}}{R_Б + h_{11}} = \frac{0,75 \cdot 0,55}{0,75 + 0,55} = 0,32 \text{ кОм}.$$

Выходное сопротивление каскада

$$R_{вых} = R_К = 450 \text{ Ом}.$$

Коэффициент усиления напряжения находим с помощью уравнений для входной и выходной цепей (см. рис. 8):

$$u_{\text{вх}} = i_6 \cdot h_{11};$$

$$u_{\text{вых}} = -h_{21} \cdot i_6 \cdot \frac{R_k \cdot R_H}{R_k + R_H};$$

$$K_u = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_k \cdot R_H}{R_k + R_H} = -\frac{50}{0,55} \cdot \frac{0,45 \cdot 1}{0,45 + 1} = -28,2.$$

(минус показывает, что  $u_{\text{вых}}$  в противофазе с  $u_{\text{вх}}$ ).

Коэффициент усиления тока

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}};$$

$$i_{\text{вых}} = \frac{u_{\text{вых}}}{R_H};$$

$$K_i = \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_H} = K_u \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_H} = -28,2 \cdot \frac{0,32}{1,0} = -9.$$

Коэффициент усиления мощности

$$K_p = K_u \cdot K_i = 28,2 \cdot 9 = 254.$$

Уравнение динамической линии нагрузки записывается по второму закону Кирхгофа для выходного контура схемы замещения каскада:

$$u_{\text{эк}} = -i_k \cdot \frac{R_k \cdot R_H}{R_k + R_H} = -i_k \cdot \frac{0,45 \cdot 1}{0,45 + 1} = -0,31 \cdot i_k.$$

При  $i_k = 0$  каскад работает в статическом режиме и динамическая линия нагрузки должна проходить через точку покоя П. При

изменении коллекторного тока  $\Delta I_k = 5$  мА напряжение  $U_{эк}$  изменится на  $-1,55$  В, т.е. вторая точка динамической линии нагрузки имеет координаты

$$I_k = I_{кп} + \Delta I_k = 10 + 5 = 15 \text{ мА}$$

и

$$U_{эк} = U_{экп} + \Delta U_{эк} = 4 - 1,55 = 2,45 \text{ В.}$$

Через точки с этими координатами проводим динамическую линию нагрузки. Она пересекает характеристику  $I_G = 0$  в точке, которая соответствует  $U_{эк} = 6,9$  В. Следовательно, максимальная амплитуда выходного напряжения

$$U_{\text{вых м}} = U_{эк} - U_{экп} = 6,9 - 4 = 2,9 \text{ В.}$$

Максимальная выходная мощность

$$P_{\text{вых м}} = \frac{U_{\text{вых м}}^2}{2 \cdot R_{\text{н}}} = \frac{2,9^2}{2 \cdot 1} = 4,2 \text{ мВт.}$$

### Пример 3.

Схема каскада усиления переменного тока приведена на рис. 4. Транзистор *n-p-n*. Напряжение источника питания  $E_k = 36$  В, мощность нагрузки  $P_{\text{н}} = 30$  мВт, максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{вых м}} = 9$  В.

### Задание

Выбрать параметры точки покоя, тип транзистора. Рассчитать сопротивления резисторов, динамические параметры каскада. Определить КПД каскада и построить его амплитудную характеристику.

### Решение.

1. Параметры нагрузки.

Заданы  $P_{\text{н}} = 30$  мВт и  $U_{\text{вых м}} = 9$  В.