



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**Ю.П. Сафоненков, Г.Н. Прохладин,
В.Н. Дивеев**

АНАЛОГО-ДИСКРЕТНАЯ СХЕМОТЕХНИКА

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ**

*для студентов III курса
специальности 25.05.03
всех форм обучения*

**Москва
2017**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**Кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного
оборудования воздушного транспорта**

Ю.П. Сафоненков, Г.Н. Прохладин, В.Н. Дивеев

АНАЛОГО-ДИСКРЕТНАЯ СХЕМОТЕХНИКА

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ**

*для студентов III курса
специальности 25.05.03
всех форм обучения*

Москва-2017

ББК 6Ф2.12
С21

Рецензент канд. техн. наук, проф. Д.Н.Яманов.

Сафоненков Ю.П., Прохладин Г.Н., Дивеев В.Н.

С21 Аналого-дискретная схемотехника: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ - М.: МГТУ ГА, 2017. - 48 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Аналого-дискретная схемотехника» по учебному плану для студентов III курса специальности 25.05.03 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 16.06.2016 г. и методического совета 18.06.2016 г.

	Подписано в печать 03.02.2017 г.	
Печать офсетная	Формат 60x84/16	1,90 уч.-изд. л.
2,79 усл. печ. л	Заказ №1725/141	Тираж 60 экз.

*Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
ООО «ИПП «ИНСОФТ»
107140, г. Москва, 3-й Красносельский переулок д.21, стр. 1*

© Московский государственный
технический университет ГА, 2017

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие содержит сведения, необходимые для прохождения лабораторного практикума по курсу "Аналого-дискретная схемотехника".

Каждое лабораторное занятие предусматривает домашнюю предварительную подготовку, проведение экспериментов в лаборатории, обработку результатов, составление отчета и сдачу зачета.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1. Подготовка к выполнению лабораторных работ

В ходе домашней подготовки надо проработать описание лабораторной работы и соответствующие теоретические разделы курса, продумать методику измерений, ознакомиться с правилами эксплуатации используемых измерительных приборов, выполнить требуемые расчеты, заготовить форму для отчета, оставив в ней место для размещения графиков, таблиц, выводов.

2.2. Проведение экспериментов в лаборатории и обработка результатов

Готовность к занятиям проверяется по ответам на вопросы о цели эксперимента, методиках исследований, ожидаемых зависимостях и числовых данных. Студенты, не подготовившиеся к выполнению лабораторной работы, к занятиям не допускаются.

При проведении исследований в лаборатории студенты обязаны строго выполнять правила техники безопасности. Не допускается во время занятий заниматься посторонними делами и разговорами.

Обработка полученных данных производится в лаборатории.

После окончания работы бригада предъявляет преподавателю результаты, полученные после проведения измерений. Работа считается законченной после проверки и утверждения представленных материалов преподавателем. Затем студенты должны выключить все источники питания и приборы, навести порядок в лаборатории, и сдать рабочее место дежурному лаборанту.

2.3. Составление отчета и получение зачета

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом на стандартных листах писчей бумаги. Отчет по каждой лабораторной работе должен содержать: расчеты в соответствии с заданием, принципиальную схему исследуемого устройства, экспериментальные данные, полученные в лаборатории, выводы.

Работа должна быть оформлена и защищена в течение времени, отводимого на ее выполнение. Зачет по лабораторной работе выставляется при наличии отчета по результатам ответов каждого студента на контрольные вопросы, касающиеся основных теоретических сведений об исследуемых схемах, их принципов работы, методик расчетов, особенностей экспериментов.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ЦЕПИ СМЕЩЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ, РАБОТА КАСКАДА

Целью работы является изучение процессов, происходящих в усилительном каскаде, на примере схемы с общим эмиттером.

3.1. Краткие сведения по содержанию работы

Исследования проводятся с помощью программы Multisim на лабораторной установке, схема которой показана на рис.1 (файл ce1.ms9).

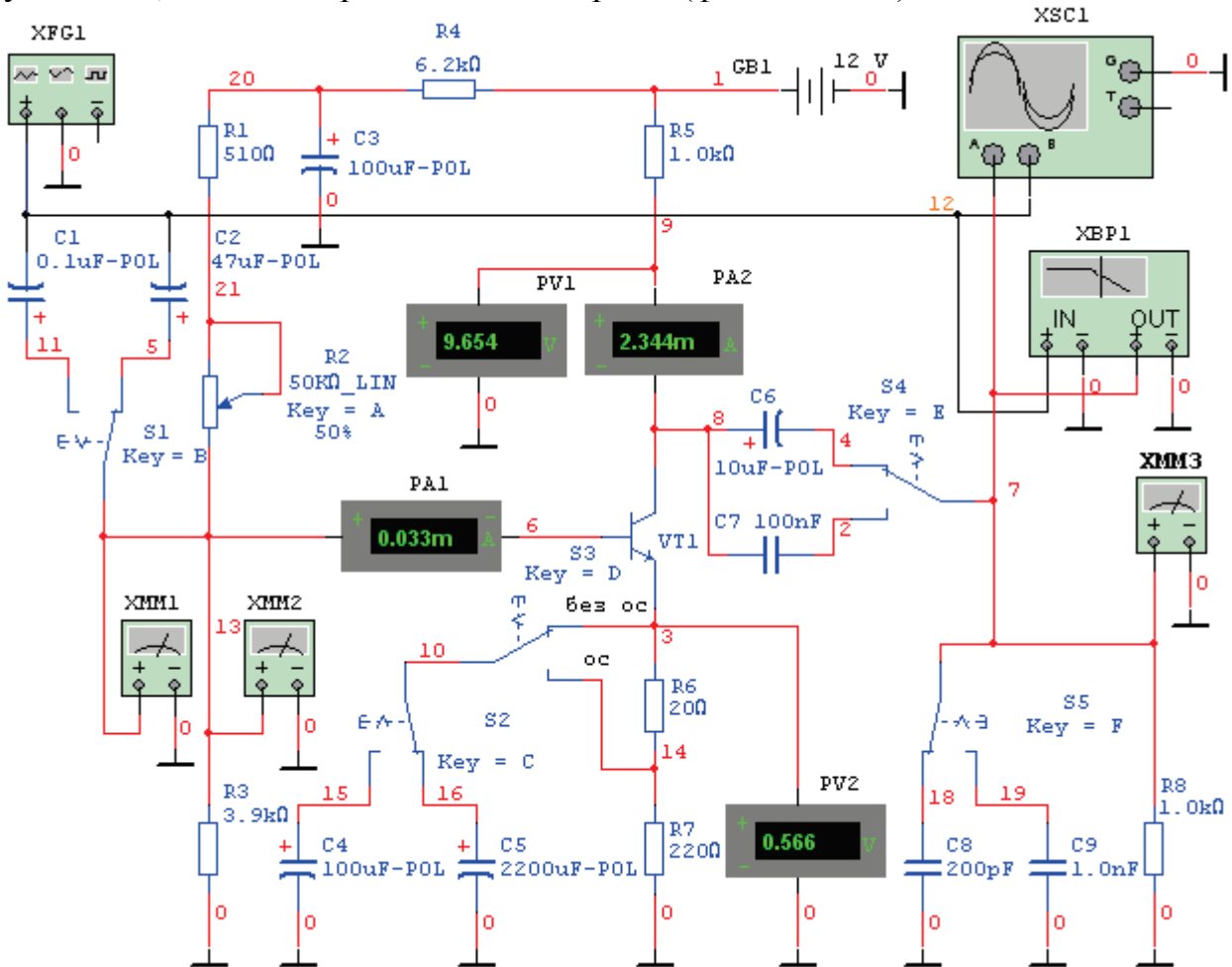


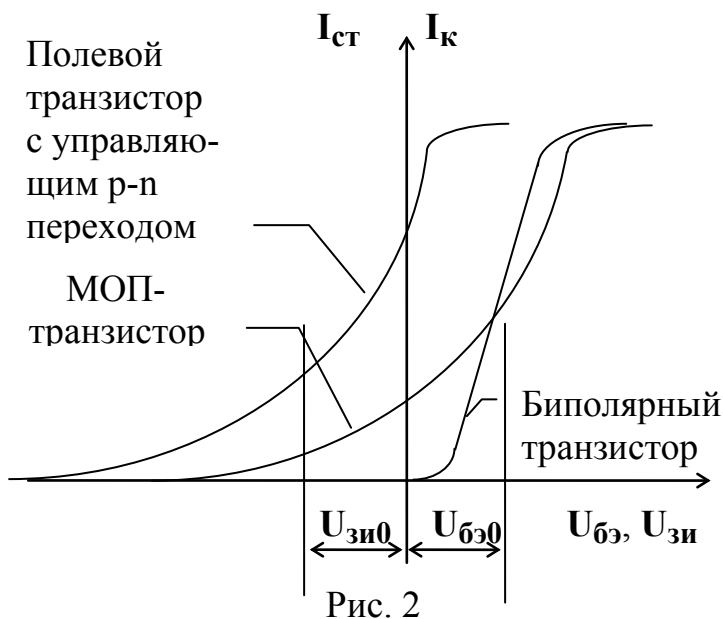
Рис. 1

Усилитель, в котором транзистор VT1 включен по схеме с общим эмиттером, имеет цепь подачи смещения на сопротивлениях R1, R2, R3. Величина напряжения смещения, выводящего транзистор в рабочую точку, регулируется потенциометром R2. Для температурной стабилизации режима служат резисторы R6, R7. Первый из них в нижнем положении переключателя S3 может не шунтироваться конденсаторами для создания отрицательной обратной связи. Коллекторное сопротивление R4 служит для преобразования протекающего в транзисторе коллекторного тока в соответствующее выходное напряжение, поступающее в нагрузку R8. Цепочка R4, C3 служит для

фильтрации питающего напряжения от источника GB1. Ко входу усилителя подключен генератор гармонических сигналов XFG1. Для оценки степени влияния реактивных элементов C1, C2, C4, C5, C6, C7, C8, C9 на амплитудно-частотную характеристику используются переключатели S1, S2, S4, S5. Измерительные приборы PA1, PA2, PV1, PV2, а также мультиметр ХММ2 в режиме измерения постоянного напряжения позволяют оценить потенциалы и токи в различных частях схемы. Мультиметры ХММ1 и ХММ3 в режиме измерения переменных напряжений дают возможность определить действующие значения входного и выходного напряжений усилителя. Осциллографом XSC1 можно наблюдать форму входных и выходных сигналов. Измеритель частотных характеристик ХВР1 дает возможность наблюдать форму амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики.

Усилительный прибор (лампа или транзистор) является трехполюсником. В схеме усилительного каскада один из полюсов трехполюсника оказывается общим для входной и выходной цепи. Поэтому различают включение с общим эмиттером (исток, катодом), общим коллектором (сток, анодом) и общей базой (затвором, сеткой).

Используя эти основные схемы, не всегда удастся реализовать требуемые параметры усилителя. Ряд новых свойств может быть получен от схем с



составными транзисторами. Наибольшее распространение из них получили каскодная схема и схема Дарлингтона.

Цепи смещения и температурной стабилизации практически одинаковы для всех трех схем включения транзистора (лампы). У разных электронных приборов организация цепей смещения осуществляется с учетом знака прикладываемого к управляющему электроду напряжения. На рис. 2 показаны проходные характеристики биполярного

транзистора, полевого транзистора с управляющим р-п переходом и полевого транзистора с изолированным затвором (МОП - транзистора). Из рисунка видно, что для вывода на линейную часть проходной характеристики у биполярного транзистора между базой и эмиттером нужно создать постоянное напряжение (напряжение смещения), совпадающее по знаку с приложенным к коллектору напряжением. Оно примерно равно (0.1 ... 0.3) В у германиевых и (0.6 ... 0.8) В у кремниевых транзисторов.

Для полевого транзистора с управляющим р-п переходом это же напряжение, как правило, имеет обратный знак, а его величина сильно зависит от типа транзистора, иногда достигая нескольких вольт. У полевого транзистора с изолированным затвором (МОП - транзистора) проходная характеристика занимает промежуточное положение, что предопределяет соответствующую конфигурацию цепей смещения.

Учитывая вышесказанное, изучить работу цепей смещения и температурной стабилизации можно на одном, наиболее распространенном резистивном каскаде, где транзистор включен с общим эмиттером. Организация этих же цепей в схемах других каскадов показана на рис.8 ... рис.13, приведенных в описании следующей лабораторной работы, где эти схемы более подробно исследуются.

Рассмотрим каскад с общим эмиттером (рис.3).

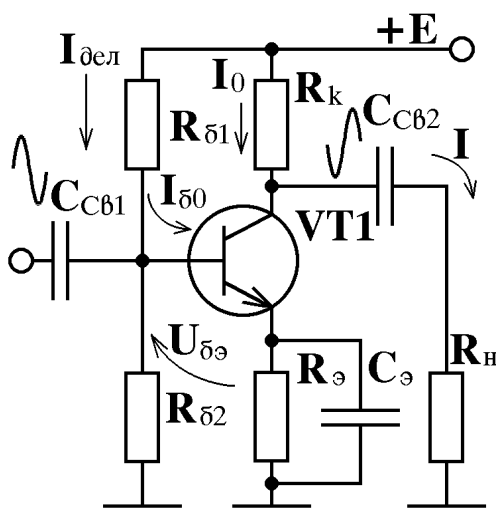


Рис.3

Ток покоя транзистора I_0 рассчитывают по требуемому току и напряжению сигнала в нагрузке окончного каскада или на входе следующего предварительного каскада (I_H и U_H) с учетом его полосы пропускания. Так как общее сопротивление нагрузки

$$R_0 = R_k \cdot R_H / (R_k + R_H)$$

входит в постоянную времени каскада на высоких частотах, то в импульсных и широкополосных усилителях величина R_0 может быть меньше, чем в усилителях звуковых частот. Если полоса пропускания каскада невелика (до сотен кГц) и

используется транзистор с удовлетворительными частотными свойствами, то максимальное значение переменной составляющей коллекторного тока можно найти из следующего соотношения

$$I_{\text{км}} = I_H + U_H / R_k = (1.4 \dots 1.7) \cdot I_H.$$

Ток покоя транзистора: $I_0 = (1.05 \dots 1.2) \cdot I_{\text{км}}$.

При $I_0 < 1$ мА надо брать $I_0 = 1$ мА, так как при меньших токах снижается крутизна и температурная стабильность транзистора.

Коллекторное и эмиттерное сопротивления при максимально возможном размахе двухполярного выходного сигнала находят из соотношений:

$$R_k = (0.4 \dots 0.45) \cdot E / I_0; \quad R_{\epsilon} = (0.2 \dots 0.1) \cdot E / I_0.$$

Напряжение между коллектором и эмиттером в рабочей точке

$$U_0 = E - I_0 \cdot R_k - I_0 \cdot R_{\epsilon}.$$

Ток, протекающий через делитель напряжения $R_{\delta 1}$, $R_{\delta 2}$ в базовой цепи

$$I_{\text{дел}} = (3 \dots 10) \cdot I_{\text{б0}}.$$

Сопротивления базового делителя

$$R_{\text{б2}} = [R_9 (I_0 + I_{\text{б0}}) + U_{\text{бэ}}] / I_{\text{дел}};$$

$$R_{\text{б1}} = [E - R_9 (I_0 + I_{\text{б0}}) - U_{\text{бэ}}] / (I_{\text{дел}} + I_{\text{б0}}).$$

3.2. Задание для расчета (выполняется при подготовке)

Рассчитать величины резисторов в схеме с кремниевым транзистором, показанной на рис. 3, по следующим исходным данным:

$$E = 12 \text{ В}, h_{21э} = 40, I_{\text{н}} = 10 \text{ мА}.$$

Порядок выполнения работы.

Собрать схему из элементов, находящихся в библиотеках. Подключить соответствующие радиоизмерительные приборы.

3.3. Построить проходную динамическую характеристику каскада.

Для этого тумблеры S1, S2, S4 и S5 установить в положения C2, C5, C6, C8 соответственно. Тумблер S3 поставить в положение “без о.с.”. Одновременным нажатием клавиш [Shift+a] установить значение R2 равным 0%. Кнопкой $\#$ включить режим моделирования. Изменяя клавишей [a] величину сопротивления R2 с шагом 5%, по показаниям вольтметра ХММ1 в режиме измерения постоянного тока, приборов PV1, PV2, PA1, PA2 снять проходную динамическую характеристику $I_{\text{к}} = f(U_{\text{бэ}})$ и характеристику прямой передачи $U_{\text{кэ}} = f(U_{\text{бэ}})$. Результаты эксперимента занести в табл. 1 и отобразить на графиках.

Таблица 1

Параметр	R2 (кОм)											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
$I_{\text{б}}$												
$I_{\text{э}}$												
$I_{\text{к}}$												
$U_{\text{бэ}}$												
$U_{\text{кэ}}$												

3.4. По проходной характеристике выбрать положение рабочей точки для работы каскада в классе А. Проверить правильность экспериментальных результатов, определенных в п. 3.3.

Для этого в рабочей точке найти падение напряжения на эмиттерном и коллекторном сопротивлениях, а также транзисторе. Следует иметь в виду, что при правильном выборе рабочей точки последние два напряжения должны быть примерно равны. Осуществить аналогичную проверку в режиме переменного тока. Для этого установить курсор ЭВМ на изображение осциллографа (XSC1) и быстрым двойным нажатием левой клавиши “мыши” развернуть изображение

передней панели осциллографа на экран. На генераторе сигналов (XFG1) после развертывания изображения передней панели установить параметры сигнала: частоту 1000 Гц, напряжение 20 мВ. Кнопкой ⏏ включить режим моделирования. На осциллографе наблюдать форму выходного сигнала. Сопровожением R2 установить режим транзистора таким, который обеспечивает неискаженное воспроизведение выходного сигнала.

Изменяя выходное напряжение генератора сигналов XFG1 получить максимальную неискаженную форму выходного напряжения, которое должно быть синусоидальным. При увеличении амплитуды входного сигнала должно наблюдаться двухстороннее симметричное ограничение выходного напряжения усилителя. В противном случае следует проверить правильность выбора рабочей точки.

3.5. Оценить влияние реактивных элементов в схеме на форму амплитудно-частотной характеристики усилителя.

Для этого, не изменяя положение рабочей точки и органов коммутации, установить на частоте 1000 Гц выходное напряжение, соответствующее примерно 0.8 от максимальной неискаженной амплитуды. Записать значение входного напряжения, которое во время экспериментов должно быть постоянным. Снять амплитудно-частотные характеристики каскада при различных положениях тумблеров S1, S2, S3, S4, S5. Результаты измерения коэффициента усиления занести в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Положение тумблеров S1 S2 S3 S4 S5	f, Гц					f, кГц					f, МГц							
		20	50	100	200	500	1	2	5	10	20	50	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
1	C2 C5 Без ос C6 C8																		
2	C1 C5 Без ос C6 C8																		
3	C2 C4 Без ос C6 C8																		
4	C2 C4 Ос C6 C8																		
5	C2 C5 Без ос C7 C8																		
6	C2 C5 Без ос C6 C9																		

Отобразить результаты измерений на едином графике, построенном в логарифмическом масштабе, где числа, пропорциональные 1, 2 и 5, следуют примерно на одинаковом расстоянии. Сделать соответствующие выводы о причинах неравномерности амплитудно-частотных характеристик.

3.6. Определить коэффициенты частотных искажений усилителя по первой из снятых кривых на частотах 20 Гц и 1 МГц.

3.7. Оценить влияние тока покоя транзистора на крутизну и коэффициент усиления каскада.

Для этого органы управления поставить в положения, предусмотренные п. 3.3.

От генератора сигналов XFG1 на вход каскада подать напряжение 5 мВ. Изменяя величину R2 замерить токи I_k и I_b . Определить коэффициент усиления и крутизну каскада. Результаты измерений при нескольких значениях R2 занести в табл. 3 и отобразить на едином графике в координатах $K = f(I_k)$, $S = f(I_k)$.

Таблица 3

Параметр	R2 (кОм)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
I_k , мА										
$U_{\text{ВЫХ}}$, В										
K										
S, мА/В										

3.8. Контрольные вопросы

- 1) Нарисуйте электрическую схему резисторного каскада на полевом транзисторе с управляющим p-n переходом, включенном с общим затвором. Поясните назначение элементов.
- 2) Нарисуйте электрическую схему резисторного каскада на полевом транзисторе с изолированным затвором, включенном с общим истоком. Поясните назначение элементов.
- 3) Как обеспечивается подача напряжения смещения в схемах на биполярных, полевых транзисторах и лампах?
- 4) Каково напряжение смещения у биполярного транзистора, работающего в линейном режиме?
- 5) Какие схемы температурной стабилизации Вы знаете? Чем они отличаются?
- 6) Поясните принцип работы эмиттерной температурной стабилизации на примере схемы с общей базой.
- 7) Поясните принцип работы коллекторной температурной стабилизации на примере схемы с общим эмиттером.
- 8) Что следует делать для повышения термостабильности схем и что препятствует этому?
- 9) Для чего служат элементы межкаскадной связи? Какими свойствами они должны обладать?
- 10) Дать сравнительные характеристики различных схем межкаскадной связи.
- 11) Когда возможна непосредственная связь каскадов?
- 12) Рассчитать элементы смещения и температурной стабилизации в схеме с общим коллектором.
- 13) Что называют коэффициентом частотных искажений? Как его измерить?
- 14) Какие элементы схемы влияют на ход амплитудно-частотной характеристики в области высоких частот и почему?
- 15) Какие элементы схемы влияют на ход амплитудно-частотной характеристики в области низких частот и почему?
- 16) Как выбрать положение рабочей точки у каскада, работающего в классе А?
- 17) Чем динамические характеристики отличаются от статических?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Целью работы является изучение сравнительных характеристик схем с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК), общей базой (ОБ), общим истоком (ОИ), схемы Дарлингтона (СД), каскодной схемы (КС).

4.1. Краткие сведения по содержанию работы

Способ включения усилительного прибора и его тип в значительной степени определяют свойства каскада. Так, схема с общей базой не дает усиления по току, а схема с общим коллектором – по напряжению. Входное сопротивление схемы с общей базой и выходное сопротивление схемы с общим коллектором малы, а входное сопротивление схемы с общим коллектором, схемы Дарлингтона и выходное сопротивление самого транзистора в схеме с общей базой велики. Однако надо иметь в виду, что шунтирование этих сопротивлений внешними элементами схемы может существенно повлиять на результирующие сопротивления каскада в целом. Переходные и частотные характеристики схемы с общим коллектором близки к идеальным, так как площади усиления при включении транзистора с общим эмиттером и общим коллектором практически одинаковы, но при усилении каскада с ОК меньше единицы это ведет к соответствующему расширению полосы пропускания.

Переходные и частотные характеристики схемы с общей базой лучше, чем в схеме с общим эмиттером.

Аналогично ведут себя в различных схемах включения полевой транзистор и электронная лампа, но имеют гораздо более высокое входное сопротивление, большее внутреннее сопротивление и меньшую крутизну.

Расчет параметров каскада с различными видами усилительных элементов в различных включениях по отношению к входному сигналу и нагрузке предполагает использование схем замещения в виде четырехполюсника.

На средних частотах основными параметрами схемы являются: коэффициент усиления по напряжению K , сквозной коэффициент усиления K_E , входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления. Для каскадов на биполярных транзисторах вычисляют еще и коэффициент усиления по току K_T .

Можно показать, что их величины зависят от внешних сопротивлений схемы на входе $R_{вн\ вх}$ ($R_{дел}$, R_3 в схемах с ОЭ, ОК, ОИ и ОС, R_3 , $R_{и}$ в схемах с ОБ, ОЗ) и выходе $R_{вн\ вых}$ (R_K , $R_{ст}$ в схемах с ОЭ, ОБ, ОИ, ОЗ, R_3 , $R_{и}$ в схемах с ОИ), а также от параметров самого усилительного элемента. Для биполярного транзистора это – коэффициент усиления по току h_{21} и входное сопротивление h_{11} в соответствующем включении, а для полевого транзистора его проводимость со входа на выход - Y_{21} .

Входной проводимостью полевого транзистора Y_{11} на средних частотах обычно пренебрегают, а выходные проводимости биполярного транзистора h_{22} и полевого транзистора Y_{22} учитывают лишь во включении с общим коллектором (стоком).

Таким образом, можно в общем виде написать

$$K = S \cdot R_0 = (h_{21}/h_{11}) \cdot R_0 = Y_{21} \cdot R_0, \quad K_T = h_{21} \cdot K_{ПВХ} \cdot K_{ПВЫХ}, \quad K_E = K \cdot \alpha,$$

$$R_{ВХ} = R_{ВНВХ} \cdot h_{11} / (R_{ВНВХ} + h_{11}),$$

$$R_{ВЫХ} = R_{ВНВЫХ} / (R_{ВНВЫХ} \cdot h_{22} + 1), \quad \text{а } \alpha = R_{ВХ} / (R_{ВХ} + R_c).$$

где S - крутизна усилительного прибора,

R_0 - сопротивление нагрузки по переменному току,

α - коэффициент передачи входной цепи,

R_c - внутреннее сопротивление источника сигналов,

$K_{ПВХ}$, $K_{ПВЫХ}$ - коэффициенты потерь тока во входной и выходной цепях.

На входе и выходе любой схемы есть элементы ($R_{ВНВХ}$, $R_{ВНВЫХ}$), через

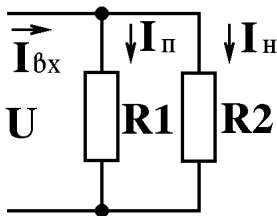


Рис. 4

которые протекают части входных или выходных токов, не участвующие в создании полезного результата. Коэффициент потерь тока в любой цепи, содержащей два сопротивления (рис. 4), через одно из которых (R_2) протекает полезный ток I_H , а через другое (R_1) – ток потерь I_P можно найти, если выразить эти токи через общее напряжение и соответствующие сопротивления:

$$I_{ВХ} = I_P + I_H; \quad I_P = U / R_1; \quad I_H = U / R_2.$$

Отсюда коэффициент потерь $K_P = I_H / I_{ВХ} = R_1 / (R_1 + R_2)$.

Зная h -параметры биполярного транзистора во включении с общим эмиттером, нетрудно пересчитать их в параметры для включения с общей базой и общим коллектором.

Для этого рассмотрим действующие токи и напряжения у транзистора, включенного в схеме с общей базой (рис. 5).

Сравним токи во входной и выходной цепи и затем разделим числитель и знаменатель на $I_б$. Тогда

$$h_{21б} = I_k / (I_k + I_б) = h_{21э} / (h_{21э} + 1).$$

Входное сопротивление транзистора найдем как отношение действующих в схеме напряжений и токов. Разделим числитель и знаменатель на $I_б$.

$$h_{11б} = (I_б \cdot R_{дел} + U_{бэ}) / (I_k + I_б) = (R_{дел} + h_{11э}) / (h_{21э} + 1).$$

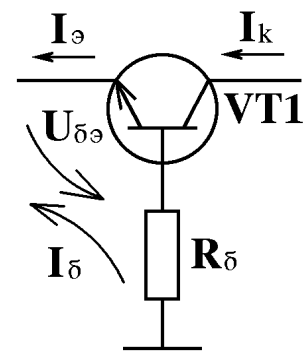


Рис. 5

Для схемы с общим коллектором (рис. 6) аналогичный расчет дает следующие результаты

$$h_{21к} = (I_k + I_6) / I_6 = h_{21э} + 1;$$

$$h_{11к} = [(I_k + I_6) \cdot R_0 + U_{6э}] / I_6 = R_0 \cdot (h_{21э} + 1) + h_{11э}.$$

В данной схеме сопротивление, нагружающее каскад по переменному току, будет равно

$$R_0 = R_H \cdot R_э / (R_H + R_э).$$

Подставив полученные значения h-параметров в приведенные выше обобщенные формулы можно найти качественные показатели каскада на средних частотах.

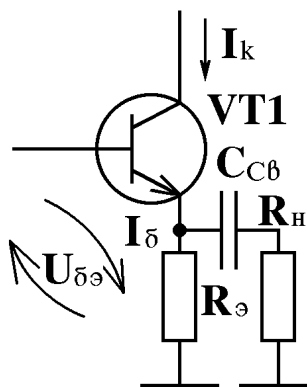


Рис. 6

Схемы каскадов приведены на рис.7 ... рис. 13. Назначение элементов то же, что и в предыдущей работе.

Порядок выполнения работы.

4.2. Определить коэффициент усиления по напряжению каскада, где транзистор включен с общим эмиттером (рис.7, файл ce1&2.ms7).

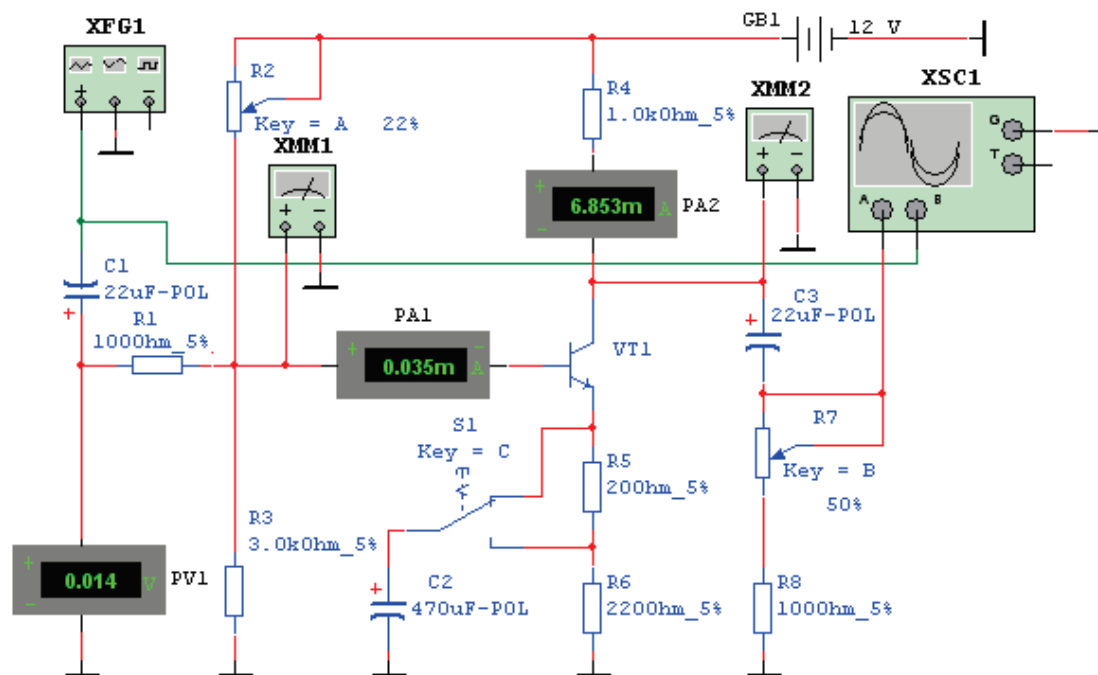


Рис. 7

Для этого подключить к входу каскада генератор сигналов XFG1 и милливольтметр переменного тока XMM1, а к выходу и общему проводу осциллограф и милливольтметр XMM2. Органы регулировки генератора сигналов установить в положения 20 мВ и 1000 Гц. С помощью манипулятора “мышь” нажать кнопку ⚡.

Изменением величины сопротивления R2 получить на экране осциллографа максимальную неискаженную амплитуду выходного напряжения синусоидальной формы. При наличии двухстороннего симметричного ограни-

4.4. Повторить измерения, указанные в п. 4.2 и п. 4.3 для транзистора, включенного с общей базой - ОБ (рис. 8, файл sb2.ms7), коллектором - ОК (рис. 9, файл cc2.ms7), истоком – ОИ (рис. 10, файл cs2.ms7), каскодной схемы – КС (рис. 11, файл cas2.ms7) и схемы Дарлингтона в двух включениях – СД (рис. 12 и рис. 13, файлы cd2a.ms7, cd2b.ms7).

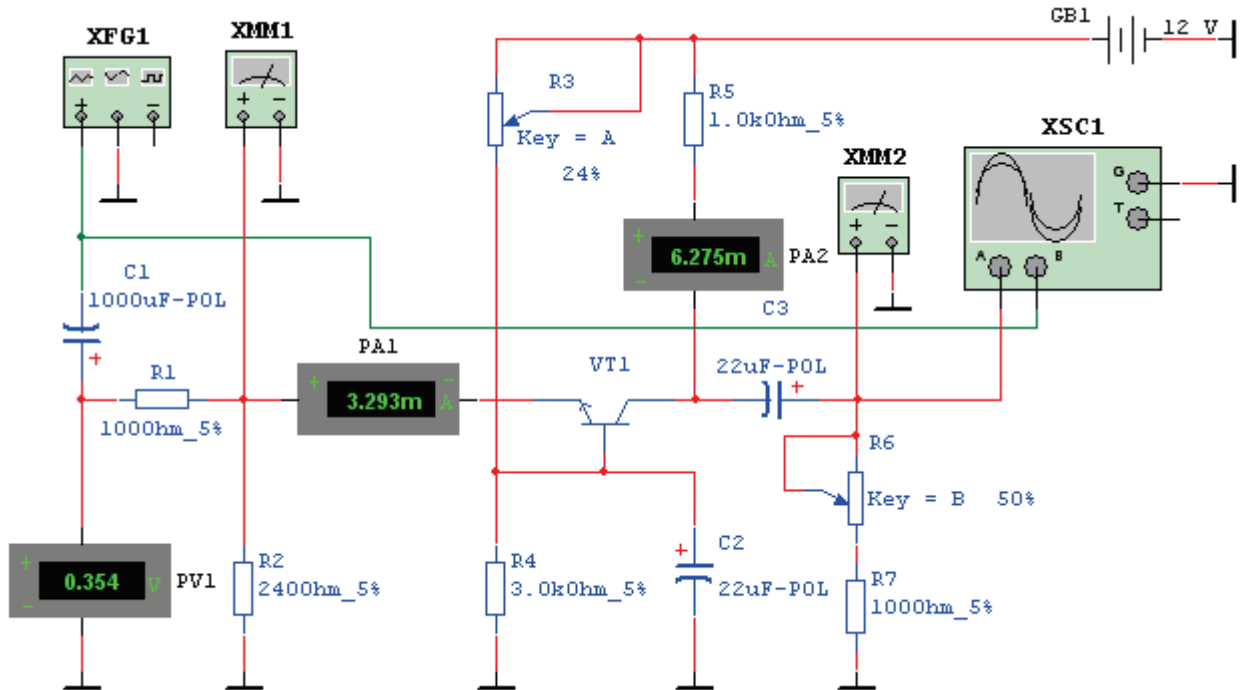


Рис. 8

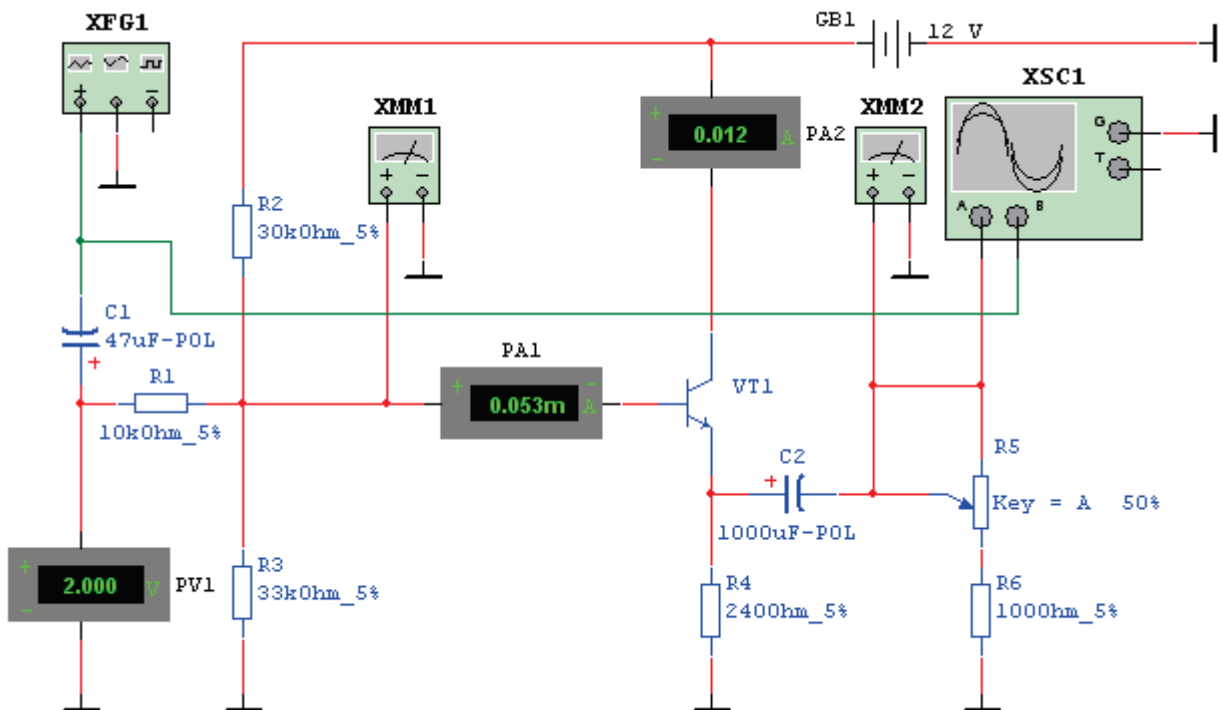


Рис. 9

С целью сопоставимости результатов желательно устанавливать одинаковые значения коллекторных (стоковых) токов и сопротивлений нагрузки. При больших ожидаемых входных сопротивлениях увеличивать значение R1.

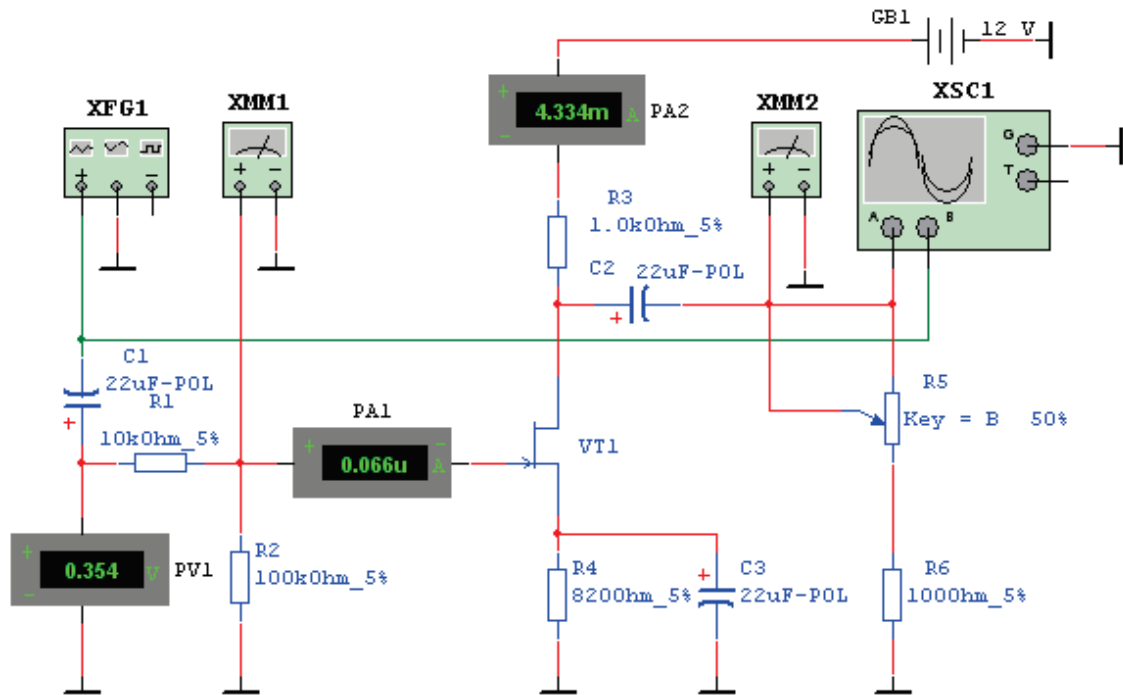


Рис. 10

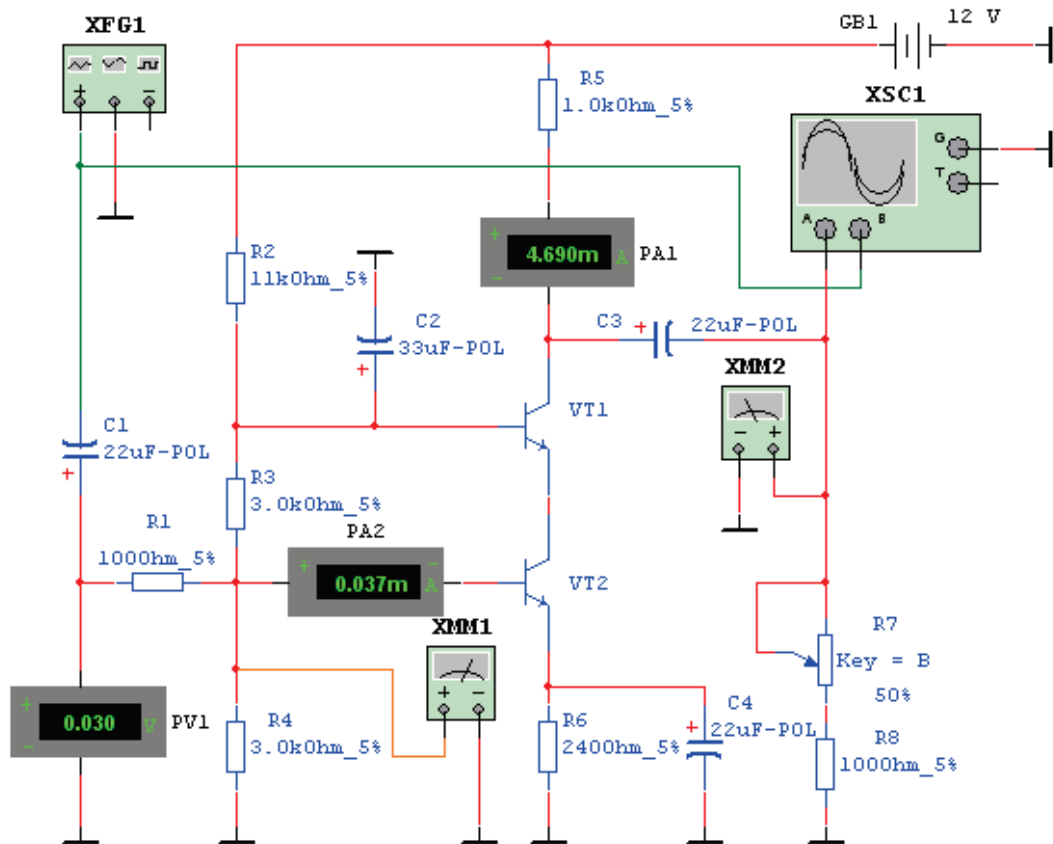


Рис. 11

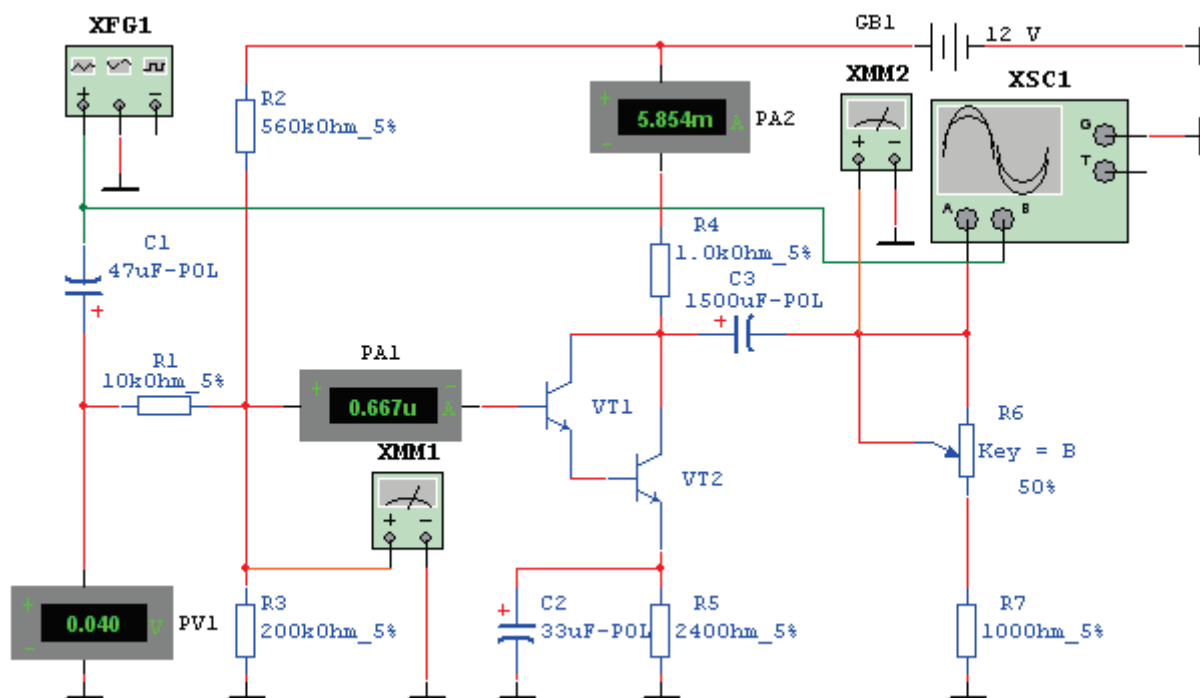


Рис. 12

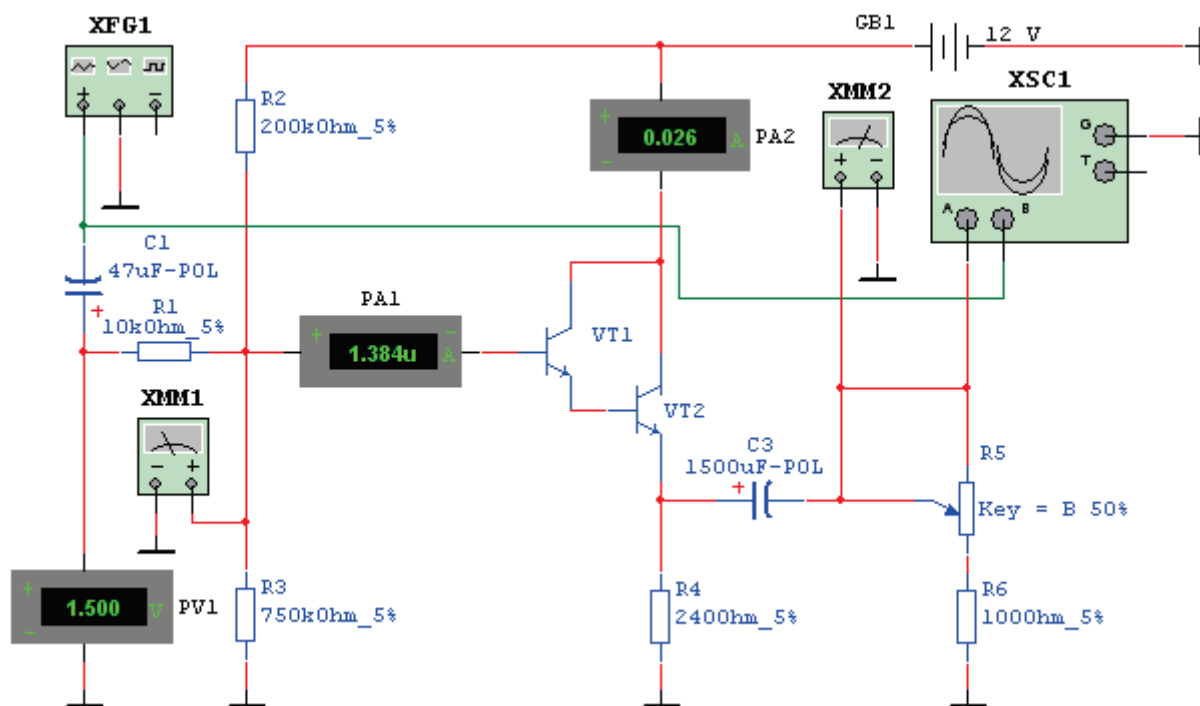


Рис. 13

4.5. Оценить влияние сопротивления нагрузки на коэффициент усиления по напряжению для схем с общим эмиттером ($K_{оэ}$), общей базой ($K_{об}$), общим коллектором ($K_{ок}$).

Для этого провести измерения по п. 4.2 при различных положениях регулятора R_H и указанных способах включения транзистора. Полученные данные занести в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициент усиления	$R_{н, КОМ}$					
	0.1	2	4	6	8	10
$K_{оэ}$						
$K_{об}$						
$K_{ок}$						

Результаты отобразить на графике и сделать выводы о способности работы схем на изменяющиеся нагрузки.

4.6. Контрольные вопросы

- 1) Что понимают под выражением "транзистор как четырехполюсник"? Какие системы параметров четырехполюсника Вы знаете?
- 2) Нарисуйте схему замещения четырехполюсника с h-параметрами. Поясните физический смысл этих параметров.
- 3) Нарисуйте схему замещения четырехполюсника с Y-параметрами. Поясните физический смысл этих параметров.
- 4) Какими параметрами оцениваются качественные характеристики усилителя на средних частотах?
- 5) Как вычисляются основные параметры схемы с общим эмиттером на средних частотах по данным элементов?
- 6) Нарисуйте амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики резисторного каскада с общим эмиттером. Как они связаны между собой? Каковы аналитические выражения для этих характеристик?
- 7) Нарисуйте схему резисторного каскада на биполярном транзисторе, включенном с общей базой. Поясните назначение элементов.
- 8) Каковы основные параметры схемы с общей базой? Как они вычисляются?
- 9) Нарисуйте электрическую схему резисторного каскада на биполярном транзисторе, включенном с общим коллектором. Поясните назначение элементов.
- 10) Каковы основные параметры схемы с общим коллектором? Как они вычисляются?
- 11) В чем заключаются достоинства и недостатки различных схем включения транзисторов?
- 12) Каковы основные отличительные особенности схем с полевыми транзисторами?
- 13) Каковы основные особенности схемы Дарлингтона во включении с общим эмиттером?
- 14) Каковы основные особенности схемы Дарлингтона во включении с общим коллектором?
- 15) Каковы основные особенности каскодной схемы?
- 16) Как определить входное сопротивление каскада аналитически и экспериментально?
- 17) Как определить выходное сопротивление каскада аналитически и экспериментально?

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Целью работы является экспериментальное исследование характеристик и свойств двухтактного усилителя и приобретение навыков по расчету устройства.

5.1. Краткие сведения по содержанию работы

Работа проводится на установке, схема которой показана на рис. 14 (файл push-pull3.ms7).

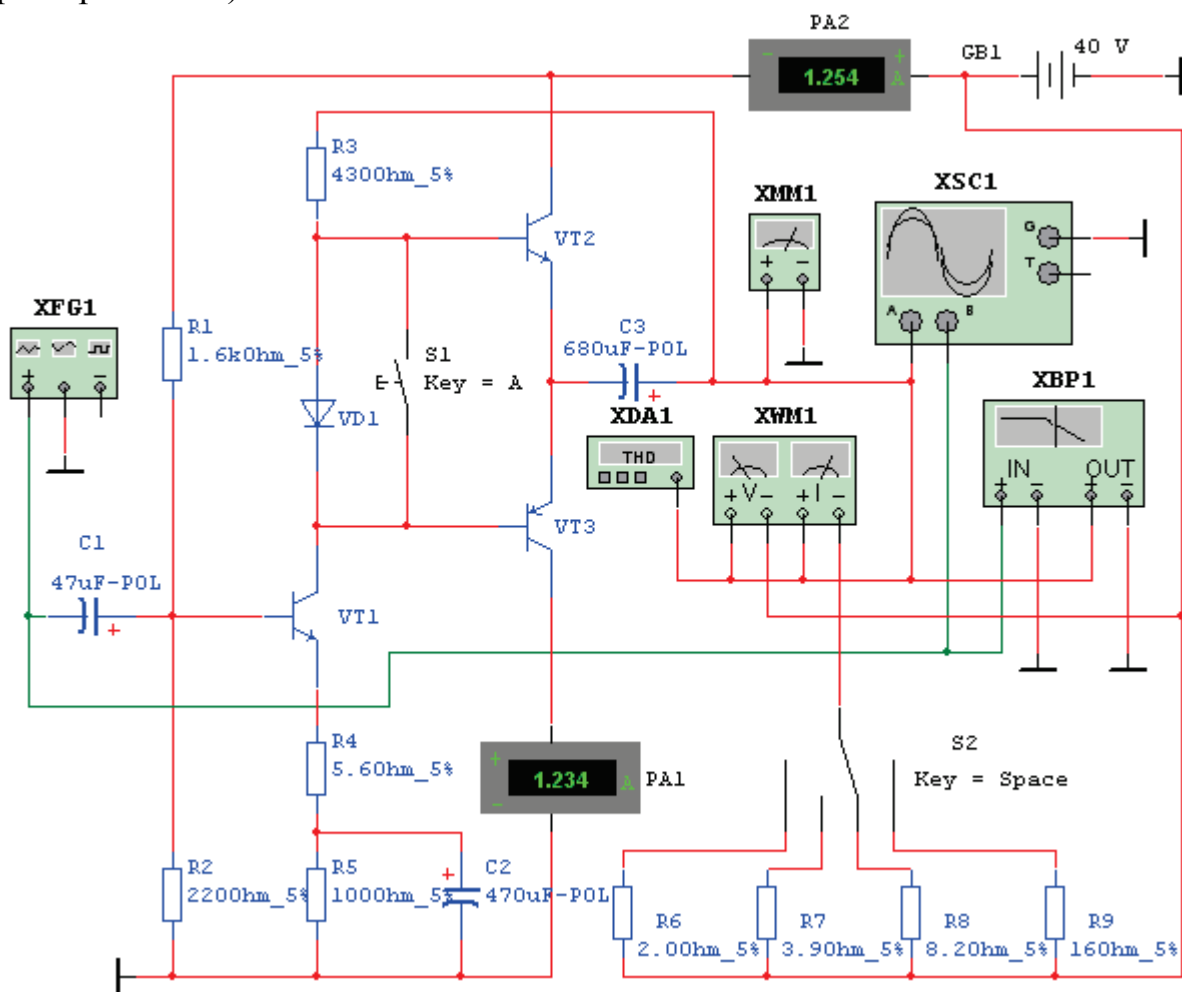


Рис. 14

Широкое применение в усилительных устройствах двухтактных каскадов объясняется их достоинствами. Основные из них:

- компенсация четных гармоник, вносимых транзисторами, работающими с отсечкой коллекторного тока;
- компенсация фона и помех, попадающих от источника питания и других источников помех;
- компенсация токов сигнала в питающих проводах;
- высокий КПД за счет возможности применения экономичных классов усиления.

В схеме двухтактного бестрансформаторного каскада (рис. 14) поочередная работа транзисторов VT2, VT3 обеспечивается обычно путем использования транзисторов различной проводимости. Диод VD1 в ней служит для создания напряжения смещения и температурной стабилизации транзисторов VT2 и VT3. Амплитуда сигнала на выходе предоконечного каскада увеличена за счет повышения напряжения его питания. Эта проблема решена за счет подключения выходной цепи транзистора VT1 не к источнику питания, а к заряженному до $U_{\text{вых макс}}$ конденсатору C3 связи с нагрузкой. При максимальном сигнале это напряжение достигает примерно значения $0.5 \cdot E$; следовательно, напряжение питания предоконечного каскада может составить величину $1.5 \cdot E$.

Напряжение смещения первого каскада, как обычно, создается делителем напряжения R1, R2. Температурную стабилизацию схемы обеспечивают резисторы R4, R5, причем первый из них также используется для создания отрицательной обратной связи, снижающей нелинейные искажения. Изменение величины сопротивлений нагрузки R6 ... R9 осуществляется переключателем S2. Тумблер S1 замыкает диод VD1 для перевода усилителя из класса усиления АВ в класс В. Через конденсаторы C1 и C3 осуществляется связь усилителя с источником сигнала и нагрузкой. Конденсатор C2 уменьшает глубину обратной связи на элементе термостабилизации R5.

Амперметры PA1 и PA2 измеряют ток выходного каскада и общий ток, потребляемый усилителем. Ваттметр XWM1 и милливольтметр переменного тока XMM1 служат для определения выходной мощности и выходного напряжения усилителя. С помощью осциллографа XSC1 можно наблюдать форму выходных колебаний. Измеритель частотных характеристик ХВР1 помогает оценить форму амплитудно-частотной характеристики, а измеритель нелинейных искажений ХДА1 – замерить уровень продуктов нелинейного преобразования.

Через транзисторы VT2 и VT3, за счет разной проводимости, токи протекают со сдвигом на полпериода. При гармонических входных сигналах $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх м}} \cdot \cos(\omega t)$ за счет нелинейности проходных характеристик VT2 и VT3 в выходном токе появятся гармонические составляющие высших порядков и выходные токи оконечных транзисторов могут быть представлены в виде:

$$i_{k1} = I_0 + I_{1Г} \cdot \cos(\omega t) + I_{2Г} \cdot \cos(2\omega t) + I_{3Г} \cdot \cos(3\omega t) + I_{4Г} \cdot \cos(4\omega t) + \dots ,$$

$$i_{k2} = I_0 + I_{1Г} \cdot \cos(\omega t + \pi) + I_{2Г} \cdot \cos(2\omega t + 2\pi) + I_{3Г} \cdot \cos(3\omega t + 3\pi) + I_{4Г} \cdot \cos(4\omega t + 4\pi) + \dots ,$$

где $I_0, I_{1Г}, I_{2Г}, I_{3Г}, I_{4Г} \dots$ - амплитуды токов гармоник.

Так как выходные токи транзисторов двухтактного каскада противофазны, имеем

$$i_{\text{вых}} = i_{k1} - i_{k2} = 2 \cdot I_{1Г} \cdot \cos(\omega t) + 2 \cdot I_{3Г} \cdot \cos(3\omega t) + \dots$$

Следовательно, четные гармоники и постоянная составляющая выходного сигнала компенсируются во встречно протекающих выходных токах i_{k1} и i_{k2} .

Аналогично можно показать, что в проводе питания, где протекает сумма токов i_{k1} и i_{k2} , будет отсутствовать составляющая с основной частотой усиленного сигнала, что препятствует возникновению обратной связи через источник питания.

Отличительной особенностью двухтактного каскада, работающего в классе В,

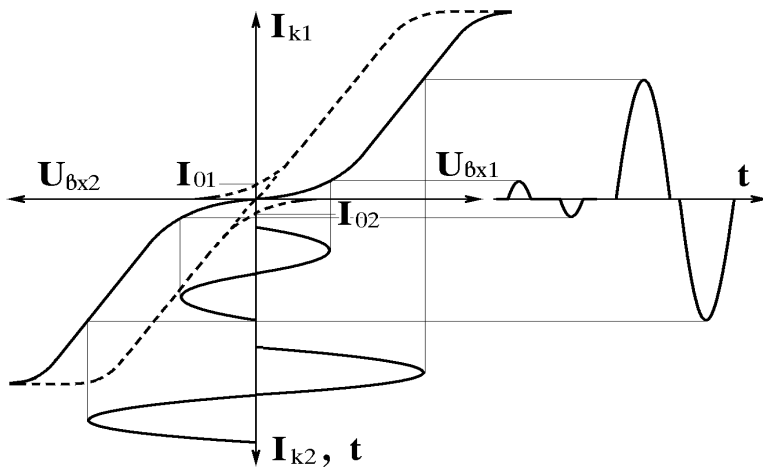


Рис. 15

является нелинейный характер проходной (рис.15), а также и сквозной динамической характеристики при малых уровнях сигнала, приводящий к появлению искажений типа "ступенька". Введение дополнительного напряжения смещения (класс АВ) позволяет устранить этот недостаток.

Порядок выполнения работы

5.2. Определить оптимальное сопротивление нагрузки.

Для этого на вход усилителя, работающего в классе АВ, подать сигнал с генератора сигналов XFG1 на частоте 1000 Гц при нагрузке 8.2 Ома и амплитуде такого уровня, чтобы выходное колебание начало слегка ограничиваться. Уменьшить входной сигнал до напряжения, при котором видимые искажения будут несущественны, что контролируется по осциллограмме. Сопротивление нагрузки изменять скачкообразно переключателем S2. Выходное напряжение определять милливольтметром ХММ1, а мощность – ваттметром ХWM1. Коэффициент нелинейных искажений фиксировать с помощью прибора ХДА1. Данные измерений занести в табл. 6.

Таблица 6

$R_n, \text{ Ом}$	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$P_{\text{вых}}, \text{ Вт}$	$K_\Gamma, \%$
2			
4			
8			
16			

Мощность выходного сигнала проверять по формуле

$$P_{\text{вых}} = U_M^2 / (2 \cdot R_n) = U_{\text{вых}}^2 / R_n.$$

Оптимальное сопротивление нагрузки, при котором надо снимать последующие зависимости найти, анализируя ход кривых $K_\Gamma = f(R_n)$ и $P_{\text{вых}} = f(R_n)$. Для него вычислить коэффициент усиления схемы $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$.

Повторить измерения для усилителя, работающего в классе В. Сделать выводы.

5.5. Исследовать форму выходного сигнала в классе В.

Для этого тумблером S1 перевести усилитель в режим, соответствующий классу В. Наблюдать и зарисовать осциллограммы выходного сигнала при номинальном выходном напряжении и напряжении, соответствующем 0.1 от номинального.

5.6. Контрольные вопросы

- 1) С какой целью транзисторы выходного каскада рекомендуют подбирать в пары по своим параметрам?
- 2) Нарисуйте схему двухтактного трансформаторного каскада и опишите его работу.
- 3) Как в трансформаторном двухтактном каскаде реализуется перевод его из класса В в класс АВ?
- 4) Нарисуйте схему двухтактного бестрансформаторного каскада на комплементарных транзисторах и опишите его работу.
- 5) Какую роль в схеме двухтактного бестрансформаторного усилителя на комплементарных транзисторах выполняет диод?
- 6) В чем заключается роль конденсатора, соединяющего выход бестрансформаторного усилителя с нагрузкой?
- 7) Каковы основные особенности двухтактных каскадов?
- 8) В чем отличие формы выходных сигналов при работе усилителя в классах АВ и В?
- 9) Каким образом происходит компенсация четных гармоник в двухтактных усилителях?
- 10) Сравнить энергетические показатели усилителей, работающих в классах А, АВ и В.
- 11) За счет чего КПД двухтактной схемы обычно выше, чем однотактной?
- 12) Что называют коэффициентом нелинейных искажений?
- 13) Почему коэффициент нелинейных искажений в двухтактном усилителе, работающем в классе В, увеличивается при малых уровнях входного сигнала?
- 14) Как выбирать транзистор, чтобы получить минимум нелинейных искажений?
- 15) Какие фазоинверсные схемы Вы знаете? В чем их отличия?
- 16) Пояснить принцип работы измерителя нелинейных искажений.
- 17) Как обратные связи влияют на параметры усилителя?
- 18) Как вычислить коэффициент нелинейных искажений каскада методом Кли-на (по сквозной динамической характеристике).
- 19) Как построить нагрузочную прямую переменного тока?
- 20) Построение сквозной динамической характеристики переменного тока.

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

6.1. Краткие сведения по содержанию работы

К схеме, показанной на рис. 10 добавлены элементы коррекции частотных и переходных характеристик. Она содержит полевой транзистор, включенный с общим истоком, с элементами коррекции переходных и частотных характеристик R_5 , C_7 , L_1 , R_3 , C_3 . Коммутация этих элементов осуществляется тумблерами S_1 , S_2 и S_3 .

Нормированная переходная характеристика каскада в области малых времен $h_M(t)_{\text{норм}}$ позволяет оценить время установления импульса некорректированного каскада t_y (на уровнях 0.1 и 0.9 от установившегося значения) и описывается выражениями:

$$h_M(t)_{\text{норм}} = 1 - \exp(-t/\tau_B), \quad t_y = 2.2 \tau_B,$$

где $\tau_B = R_{\text{экв в}} \cdot C_0$ – постоянная времени;

$C_0 = C_{\text{зи}} + C_{\text{зс}}(1 + K_0)$ – эквивалентная емкость;

$R_{\text{экв в}} = R_c \cdot R_3 / (R_c + R_3)$ – эквивалентное сопротивление каскада на высоких частотах при сопротивлении источника сигналов R_c .

Нормированная переходная характеристика в области больших времен $h_6(t)_{\text{норм}}$ каскада с постоянной времени цепи межкаскадной связи τ_H определяет спад плоской вершины Δ :

$$h_6(t)_{\text{норм}} = \exp(-t / \tau_H); \quad \Delta = T / \tau_H; \quad \tau_H = R_{\text{экв н}} \cdot C_{\text{св}},$$

где $R_{\text{экв н}} = R_c + R_3$ – эквивалентное входное сопротивление каскада в области низких частот (больших времен),

$C_{\text{св}}$ – емкость связи на выходе каскада.

Схемы коррекции частотных и переходных характеристик позволяют улучшить эти характеристики за счет введения реактивных цепей, изменяющих свое сопротивление с частотой. Они делятся на два класса: с частотнозависимой нагрузкой и частотнозависимой обратной связью.

Схемы с частотнозависимой нагрузкой, например L_1 , позволяют скомпенсировать падение усиления на верхних частотах за счет увеличения сопротивления нагрузки под влиянием реактивных элементов.

В данном случае на низких и средних частотах реактивное сопротивление индуктивности $x_L = j \cdot \omega \cdot L$ мало и она практически не влияет общее сопротивление нагрузки, а, следовательно, и на усиление каскада $K = S \cdot R_0$. Но на высоких частотах начинается рост x_L и R_0 . Следом растет K , компенсируя первоначальный спад амплитудно-частотной характеристики или улучшая фронт импульса.

Аналогично действует схема коррекции низкочастотных характеристик R5, C7.

Здесь реактивное сопротивление ёмкости (C7) $x_C = 1 / (j \cdot \omega \cdot C)$ на средних и верхних частотах мало и сопротивлением нагрузки будет практически резистор R2 так как точка соединения R2, R5 через C7 будет связана с общим проводом. Но с понижением частоты входного сигнала x_C растет и к R2 подключается R3. Нагрузка увеличивается, а следом и растет K.

Действие корректирующих схем с обратными связями основано на ослаблении глубины отрицательной обратной связи на тех частотах, усиление которых надо увеличить. Примером этому является схема высокочастотной эмиттерной коррекции (R3, C3), ослабляющая отрицательную обратную связь на высоких частотах.

Работа проводится на схеме, показанной на рис. 16 (файл correct4.ms7).

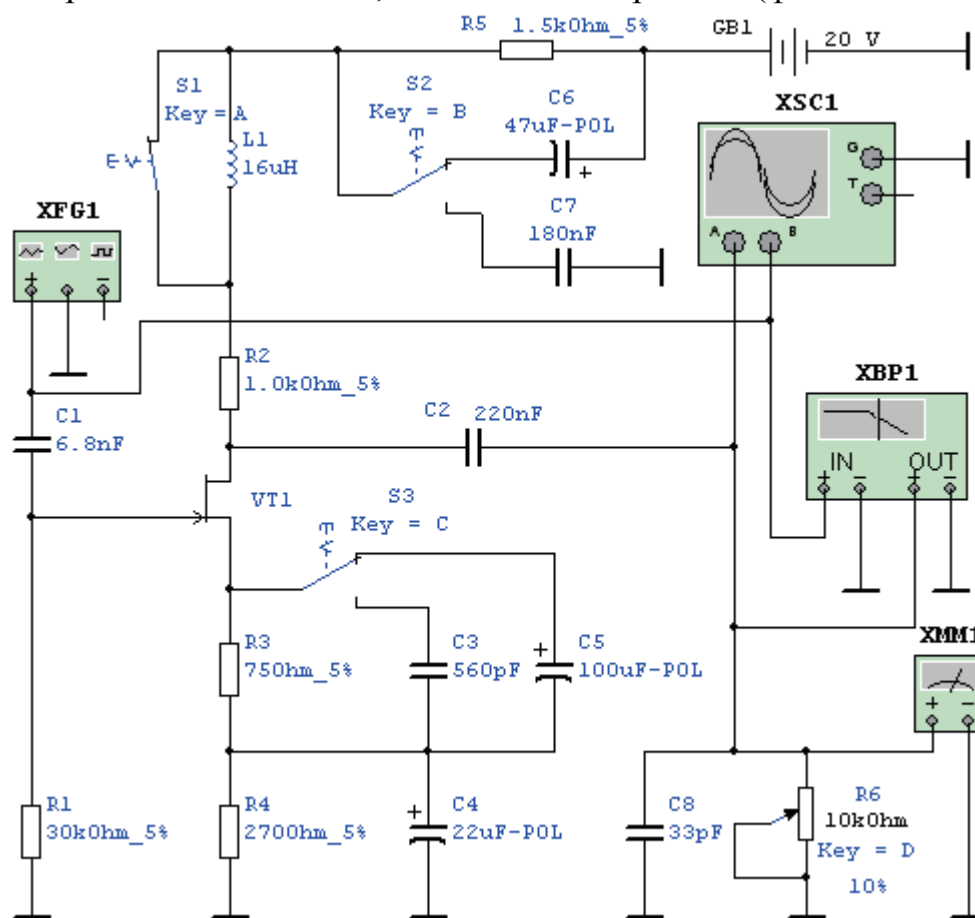


Рис. 16

Порядок выполнения работы.

6.2. Построить амплитудную характеристику и определить номинальный коэффициент усиления каскада по напряжению.

Для этого тумблер S1 установить в положения “Вкл”, переключатели S2 и S3 в положения C6 и C5 соответственно. Генератор сигналов XFG1 установить в

режим формирования импульсов с частотой 1 кГц, амплитудой 300 мВ и длительностью импульса 5%. Сопротивление нагрузки ($R_6 = 10$ кОм) установить в положение 20%.

Кнопкой $\#$ включить режим моделирования. Изменяя величину входного напряжения усилителя от 10 мВ до 1.5 В, снять, пользуясь осциллографом, зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, которая и будет амплитудной характеристикой. Результаты записать в табл. 9 и отобразить на графике.

Таблица 9

$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$	10	20	50	100	200	500	1000	1500
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$								

Объяснить ход амплитудной характеристики и определить номинальный коэффициент усиления по напряжению.

6.3. Оценить влияние элементов коррекции частотных характеристик на форму амплитудно-частотной характеристики усилителя.

Для этого ко входу исследуемой схемы подвести напряжение от генератора XFG1 в режиме формирования гармонических сигналов. Частоту генератора установить в положение 1000 Гц. Выходное напряжение генератора не должно превышать 0.3 В. Сопротивление нагрузки (R_6) оставить в прежнем положении. Получить максимальный неискаженный выходной сигнал усилителя, который должен быть синусоидальной формы. При увеличении амплитуды входного сигнала должно наблюдаться двухстороннее симметричное ограничение выходного напряжения усилителя. Уменьшить вдвое амплитуду входного сигнала.

Поддерживая постоянным уровень сигнала на выходе генератора, снять с помощью милливольтметра амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада в частотном диапазоне от 20 Гц до 200 МГц.

Повторить измерения при включении схем коррекции частотных характеристик. Результаты занести в табл. 10 и отобразить на едином для всех измерений графике.

Таблица 10

Схема	Параметр	f, Гц					f, кГц						f, МГц							
		20	50	100	200	500	1	2	5	10	20	50	100	0.2	0.5	1	2	5	10	
б/к	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$																			
НЧ																				
КВЧ																				
ЭВЧ																				

В таблице обозначено: б/к - схема без коррекции, НЧ - включена низкочастотная коррекция, КВЧ - включена коллекторная высокочастотная коррекция, ЭВЧ - включена эмиттерная высокочастотная коррекция.

6.4. Оценить расширение полосы пропускания для исследуемых схем.

Для этого по величинам входных и выходных сигналов на частоте 100 кГц определить номинальные коэффициенты усиления по напряжению для исследуемых схем коррекции амплитудно-частотных характеристик.

По уменьшению уровня выходного сигнала усилителя до величины 0.7 от номинального определить верхнюю f_v и нижнюю f_n граничные частоты исследуемых схем.

Найти площади усиления каскада с различными схемами коррекции амплитудно-частотных характеристик.

6.5. Оценить влияние схем коррекции на вид переходной характеристики усилителя.

Для этого, пользуясь методикой и результатами измерений по п. 6.3, подвести ко входу усилителя сигнал от внешнего импульсного генератора такой амплитуды, при которой не наблюдается явление насыщения транзистора. Установить в осциллографе такую развертку, чтобы на его экране хорошо просматривался весь импульс. Для усилителя без элементов коррекции и при наличии корректирующих элементов зарисовать формы выходных импульсов. По снятым осциллограммам определить времена установления, выбросы и спады плоской вершины импульсов.

За время установления t_y принято считать время, в течение которого переходная характеристика нарастает от 0.1 до 0.9 от величины установившегося значения.

Выброс фронта оценивают относительной величиной разности максимального $U_{\text{выбр}}$ и установившегося $U_{\text{уст}}$ значения переходной характеристики

$$\delta = (U_{\text{выбр}} - U_{\text{уст}}) / U_{\text{уст}}.$$

Спад плоской вершины – это относительное изменение амплитуды импульса за время его действия от установившегося значения $U_{\text{уст}}$ до окончания U_T . При спаде без перегиба

$$\Delta = |U_{\text{уст}} - U_T| / U_{\text{уст}}.$$

6.6. Оценить влияние постоянной времени выходной цепи каскада на величину спада плоской вершины импульса.

Для этого, не изменяя положения органов регулировок, для схемы без элементов коррекции снять зависимость спада плоской вершины импульса от величины $R_n = R_6$. Результаты эксперимента занести в табл. 11 и отобразить на графике.

Таблица 11

R_n , кОм	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
$U_{\text{уст}}$, В							
U_T , В							
Δ , %							

По результатам экспериментов сделать выводы.

6.7. Контрольные вопросы

- 1) Каковы области применения импульсных усилителей? Чем их схемы и методы расчета отличаются в сравнении с усилителями гармонических сигналов?
- 2) Что называют амплитудной характеристикой усилителя?
- 3) Какова связь амплитудно-частотной и переходной характеристик усилителя?
- 4) Какие элементы схемы усилителя влияют на искажения фронта импульса? Каков механизм этого явления?
- 5) Какие элементы схемы влияют на искажения плоской вершины импульса? Каков механизм этого явления?
- 6) Какие элементы схемы влияют на "завал" амплитудно-частотной характеристики в области высоких частот? Каков механизм этого явления?
- 7) Какие элементы схемы влияют на "завал" амплитудно-частотной характеристики в области низких частот? Каков механизм этого явления?
- 8) Объясните принцип действия простой параллельной высокочастотной коррекции.
- 9) Объясните принцип действия простой низкочастотной коррекции с коллекторным RC-фильтром.
- 10) Поясните принцип действия схемы эмиттерной коррекции.
- 11) Сравните параметры схем коллекторной и эмиттерной коррекции.
- 12) Как экспериментально и теоретически определить длительность фронта импульса?
- 13) Как связаны между собой длительности фронта импульса всего усилителя и длительности фронтов импульсов его отдельных каскадов?
- 14) Как экспериментально и теоретически определить величину спада плоской вершины импульса?
- 15) Как связаны между собой спады плоской вершины импульса всего усилителя и спады импульсов его отдельных каскадов?
- 16) Как определить величину выброса импульса?
- 17) Как найти площадь усиления каскада?
- 18) Что такое коэффициент высокочастотной коррекции? Пояснить его влияние на вид амплитудно-частотной характеристики усилителя и форму импульса на его выходе.
- 19) Как влияет соотношение постоянных времени цепи низкочастотной коррекции и нагрузки на вид амплитудно-частотной характеристики усилителя и форму импульса на его выходе.
- 20) Как уменьшить спад плоской вершины импульса, не прибегая к помощи схемы коррекции?
- 21) Почему спад плоской вершины импульса увеличивается при уменьшении сопротивления нагрузки?

7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.1. Краткие сведения по содержанию работы

Дифференциальный каскад является основой усилителей постоянного тока и многих микроэлектронных схем, так как обладает многофункциональностью использования, позволяющей за счет некоторой структурной избыточности строить устройства различного назначения при минимуме внешних элементов и соответствующей коммутации выводов. Так как транзисторы в схеме дифференциального каскада не могут находиться в режиме насыщения, то обеспечивается возможность создания высокоскоростных аналоговых и цифровых схем. На его основе выполняются операционные усилители и аналоговые перемножители сигналов.

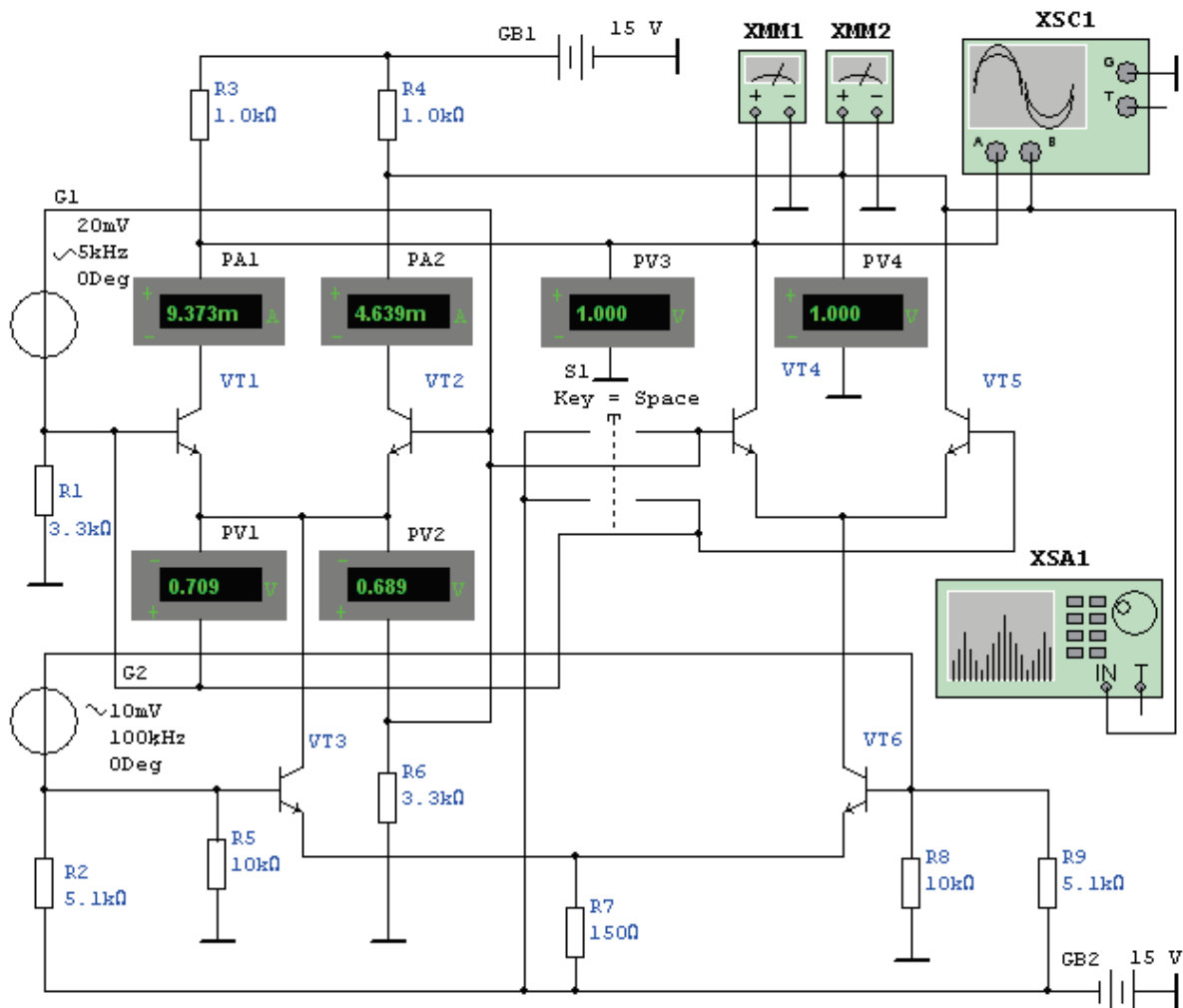


Рис. 17

Работа проводится на схеме, показанной на рис. 17 (файл mult5.ms7).

На транзисторах VT1 ... VT3 и VT4 ... VT6 собраны два дифференциальных каскада. С помощью переключателя S1, установленного в нижнее положе-

7.3. Определить зависимость крутизны усиления каскада от разностного входного напряжения

На генераторе G1 установить величину переменной составляющей $U_{вх} = 1$ мВ. По показаниям милливольтметров ХММ1, ХММ2 при изменении разностного входного (дифференциального) напряжения в пределах, указанных в п. 7.2 снять зависимости $U_{вых1} = f(U_{диф})$ и $U_{вых2} = f(U_{диф})$. По полученным данным вычислить соответствующие значения крутизны коллекторных токов. Результаты занести в табл. 13. Построить один из графиков, например $S_1 = f(U_{диф})$. По полученным данным сделать выводы.

Таблица 13

$U_{диф}, мВ$	-100	-50	-20	-10	-5	0	5	10	20	50	100
$U_{вых1}, В$											
$U_{вых2}, В$											
$S_1, мА/В$											
$S_2, мА/В$											

7.4. Снять регулировочную характеристику.

Дифференциальный каскад часто используется для обеспечения глубокой регулировки усиления (60 дБ и более). Определим форму регулировочной характеристики. Для этого на генераторе G1 установить нулевой величину постоянной составляющей и величину переменной составляющей $U_{вх} = 1$ мВ. Изменяя значение постоянной составляющей U_{VT3} генератора G2 от -100 мВ до +150 мВ по показаниям приборов РА1, РА2, РВ1, РВ2 зафиксировать изменение коллекторных токов $I_{к1}$, $I_{к2}$ и напряжений смещения $U_{бэ1}$, $U_{бэ2}$ транзисторов VT1, VT2. По показаниям милливольтметров ХММ1, ХММ2 определить амплитудные значения сигналов $U_{вых1}$, $U_{вых2}$ на выходе дифференциального каскада. По ним рассчитать коэффициенты усиления K_1 , K_2 . Результаты занести в табл. 14. Отобразить на графике зависимость $K_1 = f(U_{VT3})$. По остальным величинам сделать выводы.

Таблица 14

$U_{VT3}, мВ$	-100	-50	-20	-10	-5	0	5	10	20	50	100	150
$U_{вых1}, В$												
$U_{вых2}, В$												
$U_{бэ1}, В$												
$U_{бэ2}, В$												
$I_{к1}, мА$												
$I_{к2}, мА$												
K_1												
K_2												

7.5. Исследовать работу аналогового перемножителя.

Для работы в режиме балансного модулятора установить переключатель S1 в верхнее положение и подать на схему с генераторов G1 и G2 напряжения по 10

мВ. Кнопкой $\#$ включить режим моделирования. На осциллографе XSC1 наблюдать и зарисовать форму балансно-модулированного колебания. На спектроанализаторе XSA1 получить и зарисовать спектральные составляющие сформированного сигнала. Сделать выводы.

Для создания амплитудно-модулированного колебания вдобавок к установленным напряжениям на генераторе G1 задать постоянную составляющую 20 мВ. Кнопкой $\#$ включить режим моделирования. На осциллографе XSC1 наблюдать и зарисовать форму амплитудно-модулированного колебания. На спектроанализаторе XSA1 получить и зарисовать спектральные составляющие сформированного сигнала. По осциллограмме определить значение коэффициента модуляции. Сделать выводы.

7.6. Контрольные вопросы

- 1) Каковы области применения усилителей постоянного тока? Чем отличаются их схемы?
- 2) Опишите принцип работы дифференциального каскада.
- 3) Каков принцип действия стабилизатора тока в дифференциальном каскаде?
- 4) В чем заключаются трудности проектирования усилителей постоянного тока? Как удается преодолеть эти трудности?
- 5) Почему в усилителях постоянного тока широко используются дифференциальные каскады?
- 6) Опишите основные свойства дифференциального каскада.
- 7) Нарисуйте проходную характеристику дифференциального каскада.
- 8) Какие включения дифференциального каскада Вы знаете? Чем отличаются эти включения?
- 9) Коэффициент усиления напряжения и выходное сопротивление дифференциального каскада в симметричном и несимметричном включениях.
- 10) Входное сопротивление дифференциального каскада в симметричном и несимметричном включениях.
- 11) Коэффициент усиления напряжения, входное и выходное сопротивление дифференциального каскада в каскодном включении.
- 12) Принцип работы аналогового перемножителя.
- 13) Использование аналогового перемножителя в схеме балансного модулятора.
- 14) Использование аналогового перемножителя в схеме амплитудного модулятора.
- 15) Использование аналогового перемножителя в схеме однополосного модулятора.
- 16) Использование аналогового перемножителя в схеме удвоителя частоты.
- 17) Использование аналогового перемножителя в схеме фазового детектора.
- 18) Использование аналогового перемножителя в схеме квадратичного детектора.

8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ С ОПЕРАЦИОННЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Цель работы заключается в исследовании свойств операционного усилителя (ОУ) при различных схемах его включения, ознакомлении с возможностью и особенностями реализации устройств различного назначения на базе использования ОУ, приобретении навыков по расчету этих устройств.

8.1. Краткие сведения по содержанию работы

На основе операционных усилителей могут быть реализованы схемы самого различного назначения. Расчет их может быть упрощен, если принять во внимание, что в силу большого входного сопротивления и большого коэффициента усиления входной ток операционного усилителя $I_{вх}$ ОУ и его дифференциальное входное напряжение $U_{дифф}$ малы и ими можно пренебречь.

Рассмотрим базовые включения ОУ.

Для усиления сигналов с заданным коэффициентом усиления по напряжению K и инверсией выходного напряжения относительно входного используется схема инвертирующего усилителя, показанная на рис. 18.

Учитывая малую величину $I_{вх}$ ОУ, можно считать, что $I_{вх} = I_{ос}$.

При $U_{дифф}$, близком к нулю, потенциал инвертирующего входа также близок к нулю и все входное напряжение падает на сопротивлении $R1$, а выходное – на $R2$. Тогда $I_{вх} = U_{вх} / R1$; $I_{ос} = -U_{вых} / R2$.

При равенстве этих токов, можно написать

$$K = U_{вых} / U_{вх} = -R2 / R1,$$

т.е. коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя зависит только от соотношения сопротивлений $R1$ и $R2$.

Так как вход ОУ находится под нулевым потенциалом, то

$$R_{вх} = U_{вх} / I_{вх} = R1.$$

Выходное сопротивление схемы мало и определяется параметрами самого операционного усилителя.

Схема, осуществляющая усиление сигнала в той же полярности, в которой он поступает на ее вход, показана на рис. 19.

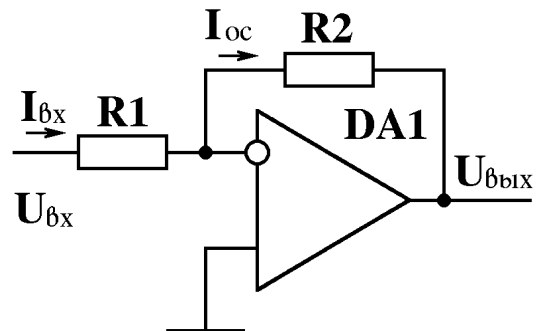


Рис. 18

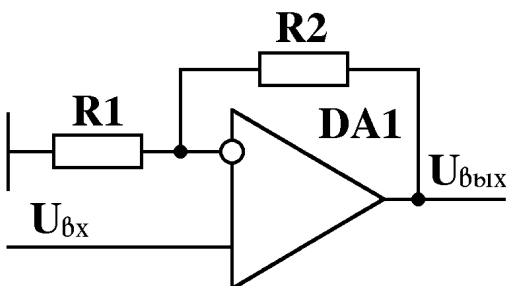


Рис. 19

Так как напряжение между входами близко к нулю, то можно считать, что к R1 приложено напряжение, равное $U_{ВХ}$, а к сумме сопротивлений R1 и R2 напряжение $U_{ВЫХ}$, т.е.

$$U_{ВХ} = U_{ВЫХ} \cdot R1 / (R1 + R2).$$

Отсюда $K = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = 1 + R2 / R1$.

Входное и выходное сопротивления схемы определяются свойствами ОУ.

На основе базовых схем путем подключения к ним внешних элементов могут быть построены различные по своему назначению устройства.

На основе базовых схем могут быть построены различные по назначению устройства, например, инвертирующий сумматор (рис. 20). Для него, учитывая принятые допущения, можно записать

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_{oc};$$

$$I_1 = U_1 / R1; \quad I_2 = U_2 / R2; \quad \dots \quad I_n = U_n / R_n;$$

$$I_{oc} = -U_{ВЫХ} / R_{oc}.$$

Отсюда

$$U_{ВЫХ} = - \left(U_1 \frac{R_{oc}}{R1} + U_2 \frac{R_{oc}}{R2} + \dots + U_n \frac{R_{oc}}{R_n} \right).$$

Если $R_{oc} = R1 = R2 = \dots = R_n$, то

$$U_{ВЫХ} = - (U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Если в схеме инвертирующего усилителя элементом обратной связи служит конденсатор C (рис. 21), то можно записать

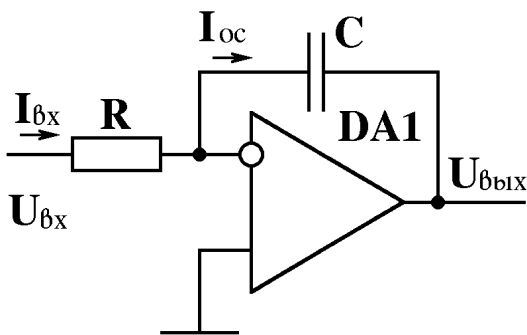


Рис. 21

$$I_{ВХ} = I_{oc} \text{ и } I_{ВХ} = U_{ВХ} / R, \quad I_{oc} = -U_{ВЫХ} \cdot j \cdot \omega \cdot C,$$

$$\text{тогда } U_{ВЫХ} = -U_{ВХ} / (j \cdot \omega \cdot R \cdot C).$$

То же выражение представим в операторной форме

$$U_{ВЫХ}(p) = -U_{ВХ}(p) / (p \cdot R \cdot C).$$

Делению изображения на оператор p во временной области соответствует интегрирование оригинала. Переходя от изображений к оригиналам, получаем

$$U_{ВЫХ}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt.$$

Поменяв местами в предыдущей схеме сопротивление и конденсатор, получим дифференцирующий усилитель (рис. 22). Рассуждая аналогично, можно написать $U_{ВХ} \cdot j \cdot \omega \cdot C = -U_{ВЫХ} / R$.

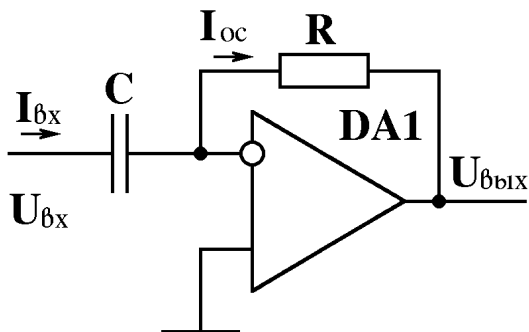


Рис. 22

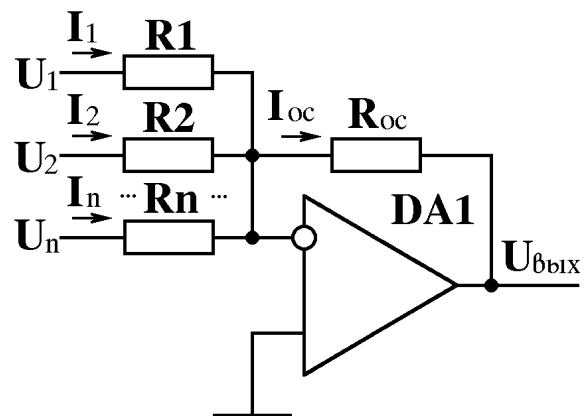


Рис. 20

Или в операторной форме

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = -p \cdot R \cdot C \cdot U_{\text{ВХ}}(p).$$

Перейдем к временной записи и получим $U_{\text{ВЫХ}}(t) = -R \cdot C \cdot dU_{\text{ВХ}}(t) / dt$.

Рассмотрим работу операционного усилителя, охваченного нелинейной обратной связью (рис. 23).

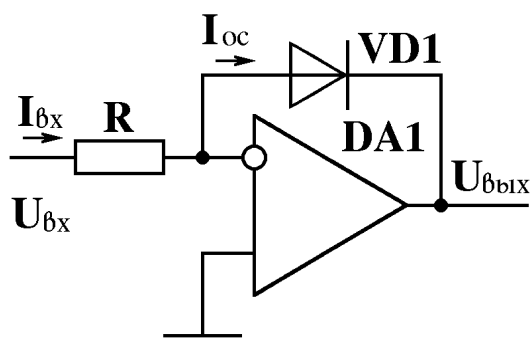


Рис. 23

В качестве нелинейного элемента использован р - n переход диода. Его вольтамперная характеристика имеет вид

$$i = I \cdot \{ \exp[U / (m \cdot \varphi_T)] - 1 \},$$

где $\varphi_T = K \cdot T / q$ – температурный потенциал;

$K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К – постоянная Больцмана;

$T = 273 + t^{\circ}\text{C}$ – абсолютная температура;

$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

I – начальный ток диода;

$m = 1 \dots 1.3$ – коэффициент, связанный с поверхностной рекомбинацией (дан для кремниевого диода).

С учетом нивертирования сигнала операционным усилителем можно написать

$$U_{\text{ВХ}} / R = I \cdot \{ \exp[-U_{\text{ВЫХ}} / (m \cdot \varphi_T)] - 1 \}.$$

Если $\exp[-U_{\text{ВЫХ}} / (m \cdot \varphi_T)] > 1$, то $-U_{\text{ВЫХ}} / (m \cdot \varphi_T) = \ln[U_{\text{ВХ}} / (I \cdot R)]$.

Отсюда $U_{\text{ВЫХ}} = -2.3 \cdot m \cdot \varphi_T \cdot \lg[U_{\text{ВХ}} / (I \cdot R)]$.

Операцию антилогарифмирования можно осуществить в схеме, аналогичной рис. 23, если диод и сопротивление поменять местами.

Работа проводится на схемах, показанных на рис. 24, 26, 29 и 30 (файлы oram6.ms9, shmitt6.ms9, multiv6.ms9, integr6.ms9).

Схема лабораторной установки в режиме исследования инвертирующего, неинвертирующего усилителей и компаратора показана на рис. 24.

Порядок выполнения работы.

8.2. Определить коэффициент усиления, входное сопротивление операционного усилителя в инвертирующем и неинвертирующем включении, а также повторителя напряжения.

Для этого запустить файл oram6.ms9 (рис. 24) и установить переключатель S1 в положение 2 (инвертирующий усилитель). Установить S2 в положение 4 (режим усиления в 100 раз).

На выходе источника сигналов XFG1 установить напряжение постоянной составляющей (Offset) равным 0.1 В. Напряжение переменной составляющей должно быть пренебрежимо малым, например, 1 pV. С помощью вольтметра ХММ1 в режиме измерения постоянного напряжения контролировать величину

выходного напряжения " $U_{\text{ВЫХ}}$ ". Измерить его и записать. Сравнить полученное значение усиления с величиной, определенной расчетным путем.

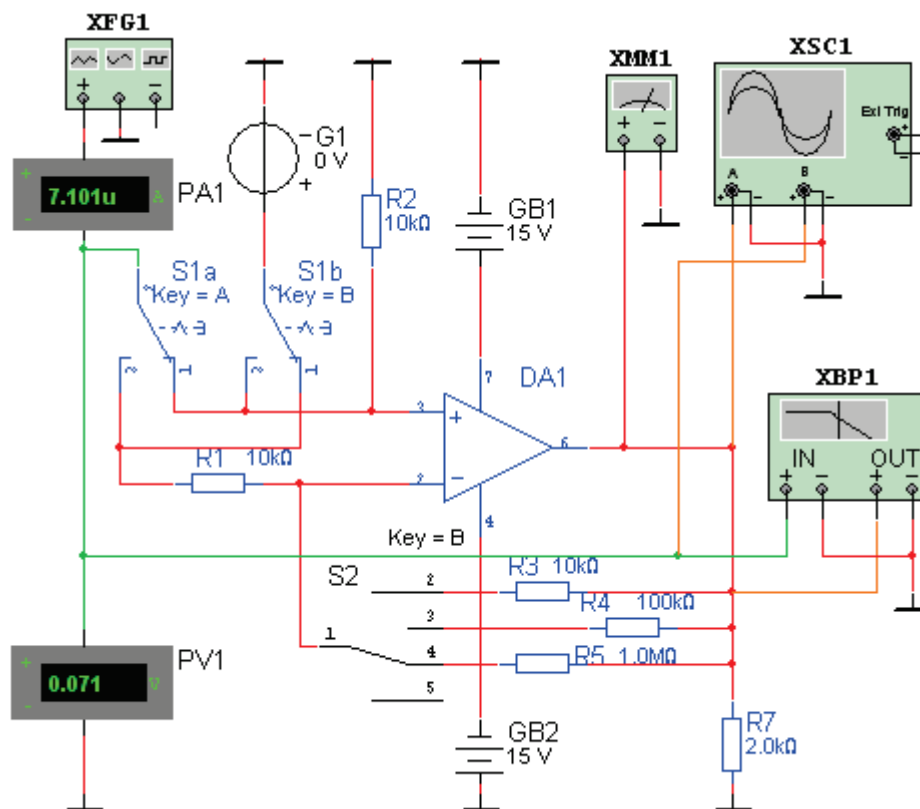


Рис.24

На выходе источника сигналов XFG1 установить напряжение постоянной составляющей (Offset) равным 0 В. Напряжение переменной составляющей с частотой 1 кГц должно быть равно 100 мВ. С помощью осциллографа наблюдать переменное напряжение на выходе усилителя. Милливольтметром измерить входное и выходное напряжения. Рассчитать коэффициент усиления напряжения на переменном токе. Сравнить его с усилением на постоянном токе.

По показаниям вольтметра PV1 и миллиамперметра PA1 определить входное сопротивление ОУ.

Повторить измерения в режиме усиления в 10 раз (S2 в положении 3), повторителя (S2 в положении 2) и неинвертирующего усилителя (переключатель S1 в положении 1, а переключатель S2 последовательно в положениях 4, 3, 2).

Результаты измерений занести в табл. 15.

Таблица 15

Параметр	Тип схемы					
	ИУ x 100	ИУ x 10	ИУ x 1	НУ x 100	НУ x 100	НУ x 1
К						
$R_{\text{ВХ}}$						

8.3. Снять амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики инвертирующего ОУ при слабой и глубокой обратной связи.

Для этого в режиме ИУ $\times 100$, подавая на вход ОУ напряжение 100 мВ от генератора сигналов XFG1, получить на его выходе неискаженный сигнал. Не изменяя величину входного напряжения, снять с помощью мультиметра ХММ1 зависимость выходного напряжения от частоты.

Подать на вход А осциллографа напряжение с выхода ОУ, а на вход В – напряжение, подводимое ко входу ОУ. Переключить осциллограф в режим работы горизонтальной развертки от В входа А/В. Органами управления осциллографа получить на его экране удобное для наблюдения изображение фигуры Лиссажу на частоте 1000 Гц. Изменяя частоту генератора и поддерживая на его выходе постоянную величину напряжения, снять зависимость фазы выходных колебаний по отношению к фазе входного напряжения от частоты.

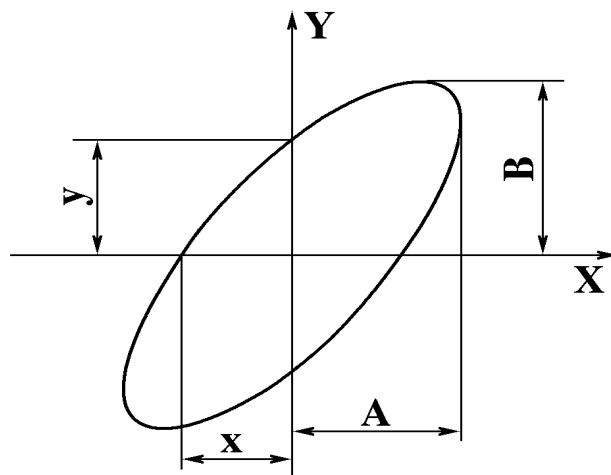


Рис. 25

Известно (рис. 25), что точки пересечения получаемого при этом эллипса с осями абсцисс и ординат определяются соотношениями:

$$y = \pm B \cdot \sin(\varphi); \quad x = \pm A \cdot \sin(\varphi).$$

Отсюда $\sin(\varphi) = \pm x / A = y / B;$

Повторить измерения для режима ИУ $\times 1$ (S2 в положении 2).

Результаты измерений занести в табл. 16 и отобразить на графике в нормированной форме.

Таблица 16

Тип схемы	Пара- метр	Частота, кГц													
		0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50	100	200	500
ИУ $\times 100$	К φ														
ИУ $\times 1$	К φ														

8.4. Исследовать работу компаратора.

Компаратор (рис. 24), построенный на ОУ, осуществляет сравнение напряжения U_1 с опорным сигналом U_0 :

$$U_{\text{вых}} < 0 \text{ при } U_1 > U_0; \quad U_{\text{вых}} > 0 \text{ при } U_1 < U_0.$$

Для исследования работы компаратора установить переключатель S2 в положение 5 и подать от источника G1 на инвертирующий вход ОУ напряжение

0 В, а на неинвертирующий вход напряжение треугольной формы с частотой 20 Гц амплитудой 2 В и скважностью 2 (Duty cycle 50%) от генератора XFG1.

По осциллографу снять зависимость выходного напряжения от входного (относительная развертка осциллографа должна быть установлена в положение A/B). Повторить измерение при напряжении $G1 = 1$ В.

Зафиксировать точки, в которых осуществляется изменение знака выходного напряжения, и отобразить это на графике.

Генератор XFG1 перевести в режим выдачи синусоидальных колебаний, а развертку осциллографа перевести в режим Y/T. Изменяя напряжение источника $G1$ от -2 до +2 В, наблюдать и зарисовать характерные осциллограммы на выходе ОУ. Объяснить наблюдаемые осциллограммы.

8.5. Исследовать работу автогенерирующего мультивибратора.

Компаратор может быть использован для формирования импульсных генераторов. Таким устройством является мультивибратор. Принцип работы мультивибратора, как и вообще всех генераторов, основан на использовании цепи положительной обратной связи.

Схема автогенерирующего мультивибратора приведена на рис. 26.

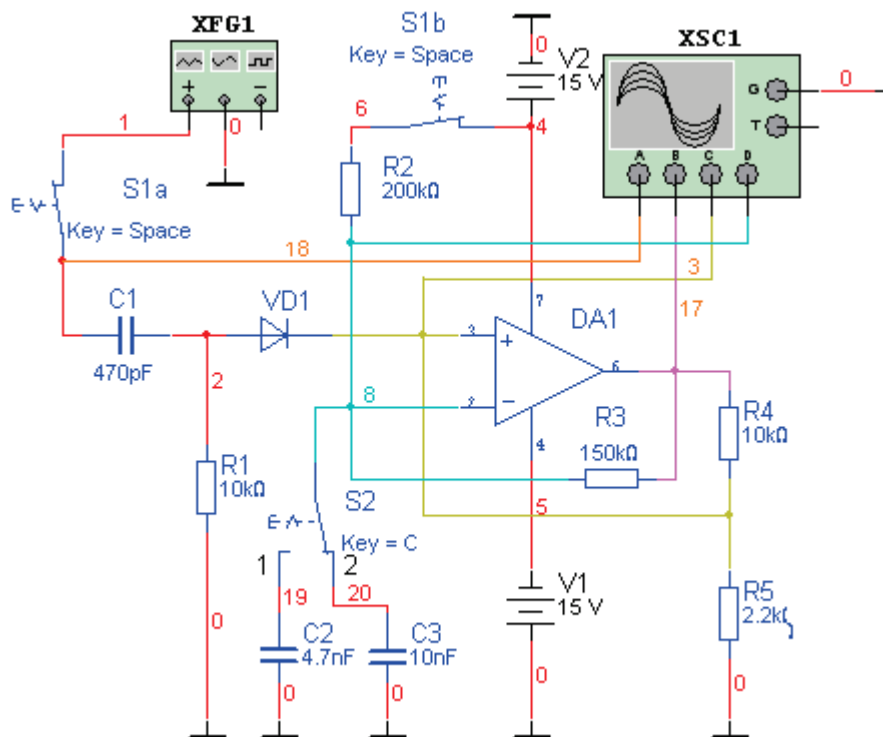


Рис. 26

В режиме автогенерирующего мультивибратора тумблеры $S1a$ и $S1b$ должны быть установлены в разомкнутое состояние, а переключатель $S2$ в положение 1.

Напряжение на неинвертирующем входе ОУ $U_{вх н}$ соответствует по форме выходному напряжению, но уменьшено по амплитуде в $b = R5 / (R4 + R5)$ раз.

Так как потенциалы входов очень близки, то усилитель меняет свое состояние только в тот момент, когда напряжение на конденсаторе достигает величин $b \cdot U_{\text{ВЫХ}}^+$ или $b \cdot U_{\text{ВЫХ}}^-$. При этом конденсатор $C2$ перезаряжается током, поступающим с выхода через резистор $R3$.

Заряд на конденсаторе должен бы расти до напряжений $U_{\text{ВЫХ}}^+$ или $U_{\text{ВЫХ}}^-$, но при напряжениях $b \cdot U_{\text{ВЫХ}}^+$ или $b \cdot U_{\text{ВЫХ}}^-$ происходит изменение полярности выходного сигнала и происходит процесс перезаряда конденсатора $C2$.

Для исследования автоколебательного мультивибратора запустить файл `multiv6.ms9` (рис. 26).

Переводя переключатель $S2$ из положения 1 в положение 2, можно выбрать постоянную времени времязадающей цепи мультивибратора. На осциллографе $XSC1$ наблюдать и зарисовать эпюры напряжений.

8.6. Исследовать работу ждущего мультивибратора.

На операционном усилителе может быть собран и ждущий мультивибратор.

Схема ждущего мультивибратора, формирующего импульсное напряжение, реализована на том же рис. 26.

Длительность выходного импульса определяет RC -цепочка $R3, C2$. Ждущий режим организуется за счет подачи на вход схемы напряжения смещения через сопротивление $R2$ от источника питания. На входе схемы включена дифференцирующая цепочка $R1, C1$. Появлению импульса обратной полярности на входе ОУ препятствует диод $VD1$.

Для исследования ждущего мультивибратора замыканием тумблеров $S1a$ и $S1b$ устройство переводится в режим ждущего мультивибратора. С помощью переключателя $S2$ можно изменять длительность сформированных импульсов. Зарисовать осциллограммы напряжений в характерных точках схемы.

8.7. Исследовать работу триггера Шмитта.

Для защиты цифровых схем от помех часто бывает необходимо иметь передаточную характеристику устройства обработки сигналов с гистерезисом. Величина гистерезиса должна быть больше, чем максимальная помеха, наблюдаемая на фоне сигнала (рис. 27).

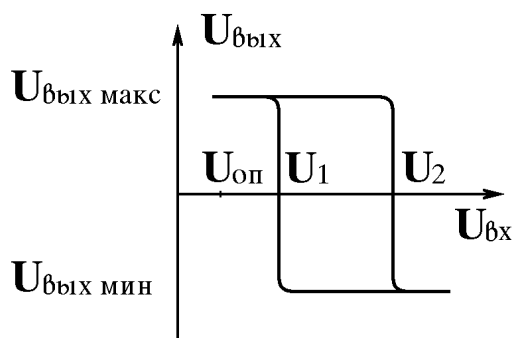


Рис. 27

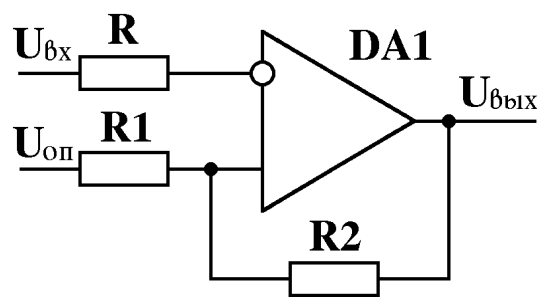


Рис. 28

Устройство, решающее данную задачу (рис. 28), имеет цепь положительной обратной связи и называется триггером Шмитта.

В данной схеме можно задавать верхнюю и нижнюю точки переброса U_2 и U_1 в зависимости от $U_{оп}$ и напряжений на выходе $U_{вых макс}$ и $U_{вых мин}$.

Изменяя $U_{оп}$, R1 и R2, можно регулировать положение верхней и нижней точек переброса U_1 и U_2 в широком диапазоне как отрицательных, так и положительных значений.

Для изучения свойств триггера Шмитта запустить файл shmitt6.ms9 (рис. 29).

Поставить переключатель S1 в положение 2, а переключатель S2 в положение 1. От генератора XFG1 подать на схему треугольное напряжение с амплитудой 5 В, скважностью 2 и частотой 20 Гц.

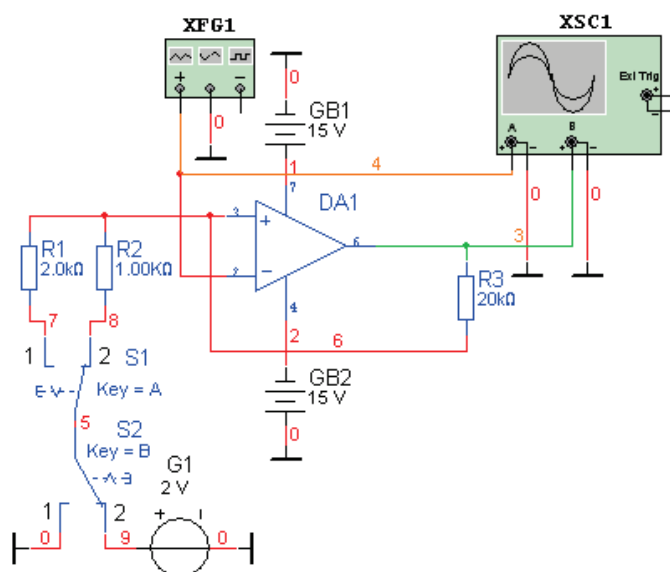


Рис. 29

Снять зависимость выходного напряжения от входного по методике п. 8.4. Повторить измерения с резистором R1 в цепи обратной связи. Перевести переключатель S2 в положение 2. Повторить измерения. Результаты отобразить на графиках. Объяснить наблюдаемые осциллограммы.

8.8. Исследовать работу интегратора.

Для этого запустить файл integr6.ms9 (рис. 30).

Схема в левой части представляет собой интегратор со сбросом. На инвертирующий вход ОУ DA1 подано небольшое постоянное напряжение от источника G1, которое приводит к постепенному заряду конденсатора C1. Напряжение на выходе DA1 начинает уменьшаться. При совпадении этого напряжения с напряжением от G2, поданным на инвертирующий вход DA2 на его выходе появляется импульс, приводящий к замыканию S1 и разряду конденсатора C1. На выходе DA1 формируется пилообразное напряжение.

В правой части на ОУ3 собран интегратор без сброса. При подаче на его вход прямоугольных импульсов от XFG1 на выходе DA3 формируется напряжение треугольной формы.

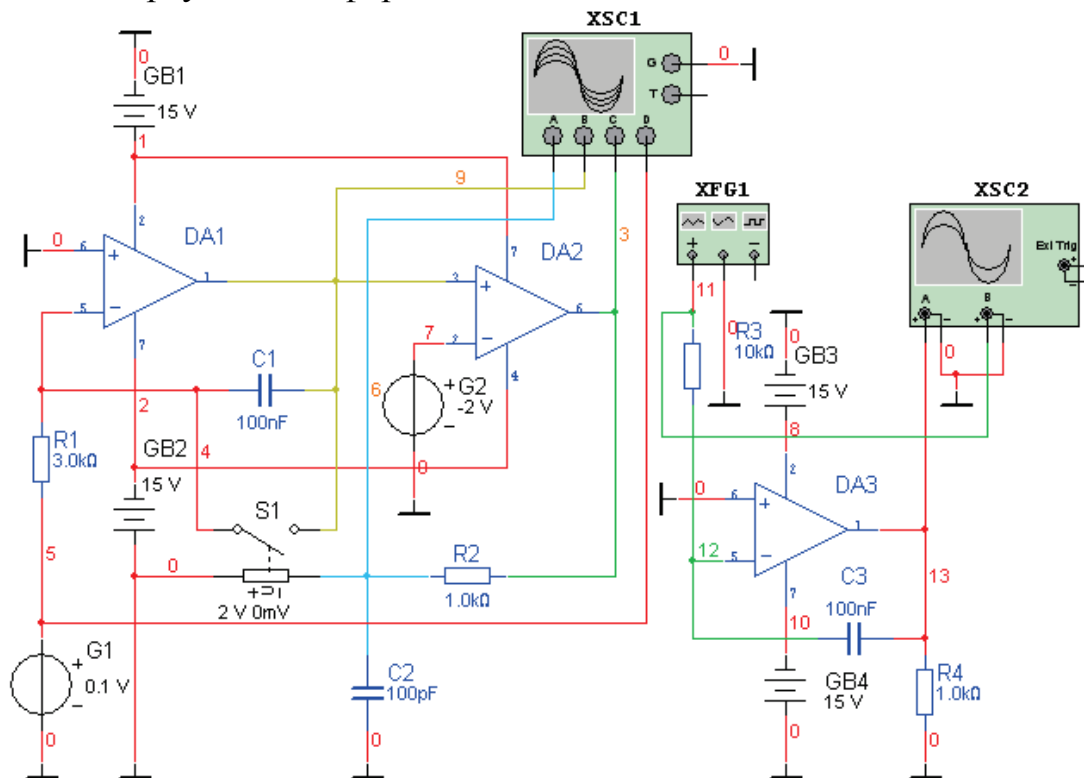


Рис. 30

Изучить, зарисовать и объяснить ход напряжений в контрольных точках.

8.9. Контрольные вопросы

- 1) Что называют операционным усилителем? Каковы его характерные свойства?
- 2) Какими допущениями обычно пользуются для упрощения расчета схем с операционными усилителями?
- 3) Опишите основные включения операционного усилителя.
- 4) Как вычислить коэффициент усиления по напряжению для инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ?
- 5) Каково входное и выходное сопротивления ОУ при инвертирующем и неинвертирующем включении?
- 6) Что такое дрейф нуля в УПТ? Каковы его причины? Указать меры борьбы с дрейфом нуля.
- 7) Почему ОУ сильно подавляет синфазные помехи и обеспечивает максимальное усиление противофазного сигнала?
- 8) Как обеспечивается устойчивость операционного усилителя при охвате его глубокими отрицательными связями?
- 9) Опишите основные линейные включения ОУ.
- 10) Опишите нелинейные включения ОУ.
- 11) Поясните работу автоколебательного мультивибратора на ОУ.
- 12) Поясните работу ждущего мультивибратора на ОУ.

- 13) От чего зависит зона гистерезиса триггера Шмитта на ОУ?
- 14) Как работает компаратор сигналов и используется для обработки сигналов.
- 15) Каковы амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики ОУ? Как их построить, пользуясь асимптотическими амплитудно-частотными и фазо-частотными характеристиками каскадов ОУ?
- 16) Что такое устойчивость усилителя, охваченного обратной связью?
- 17) Каковы критерии устойчивости усилителя по Найквисту.
- 18) Каковы критерии устойчивости усилителя по Боде?
- 19) Как осуществить перемножение двух сигналов на ОУ?
- 20) Каковы недостатки операционных усилителей?
- 21) Опишите области применения операционных усилителей.
- 22) Почему не имеет смысла строить импульсные и широкополосные усилители на ОУ?

9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Целью работы является изучение принципов работы, методик расчета, исследование основных характеристик нерегулируемых выпрямителей, а также знакомство с работой сглаживающих фильтров.

9.1. Краткие сведения по содержанию работы

Работа проводится на схеме, показанной на рис. 31 (файл rect7.ms9).

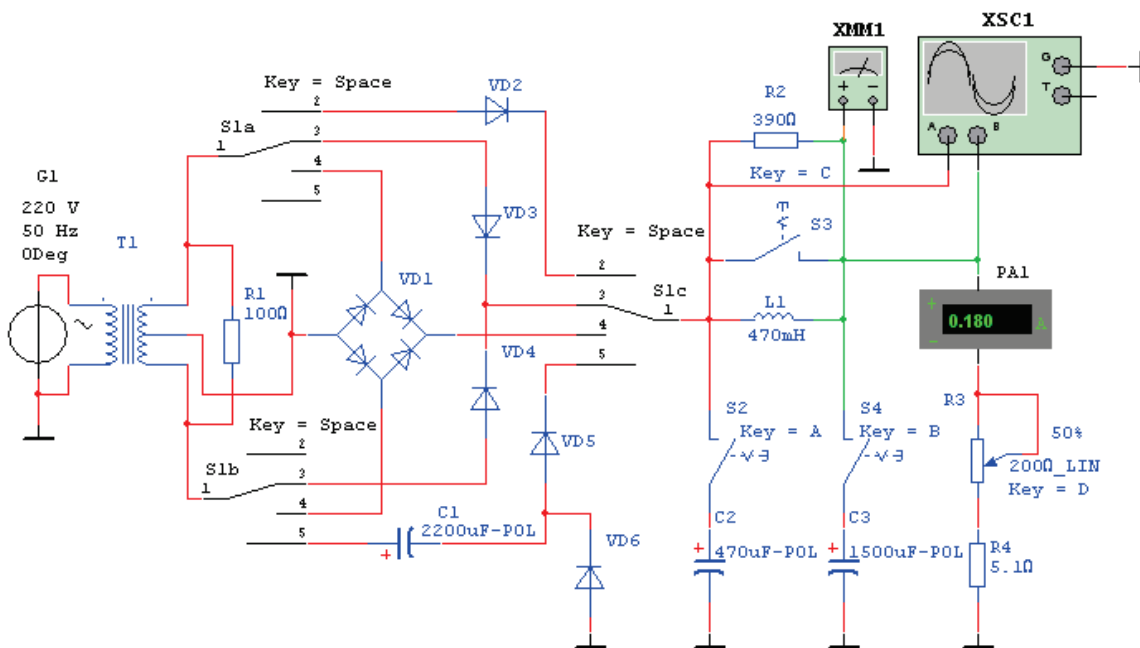


Рис.31

Стенд включает в себя:

- однотоктную однофазную, однотоктную двухфазную и мостовую схемы нерегулируемых выпрямителей;
- схему удвоения напряжения;
- сглаживающие фильтры.

Однотоктная однофазная (однополупериодная) схема выпрямления собрана на диоде VD2. Она использует одностороннюю проводимость диода, через который ток течет только в течение одного полупериода входного напряжения. Это снижает КПД схемы и не позволяет повысить частоту пульсаций выпрямленного напряжения, что затрудняет его последующую фильтрацию.

Этих недостатков лишена однотоктная двухфазная (двухполупериодная) схема, которая собрана на диодах VD3 и VD4.

Мостовая схема собрана на диодной сборке VD1.

Схема удвоения напряжения (VD5, C1, VD6, C2) состоит из двух последовательно соединенных однофазных однотоктных выпрямителей. За отрицательный полупериод ток, текущий через диод VD5, заряжает конденсатор C1 так, что на левой его обкладке накапливается отрицательный заряд, а на правой - положительный. В положительный полупериод ток будет течь через заряженный конденсатор C1, диод VD6, заряжая C2 до примерно удвоенного напряжения.

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения переменной составляющей на выходе выпрямителя до величины, при которой обеспечивается нормальная работа питаемого устройства.

Принцип работы сглаживающих фильтров основан на использовании элементов, имеющих различную проводимость для постоянного и переменного тока.

По своему составу сглаживающие фильтры делятся на однозвенные и многозвенные. Многозвенный фильтр получается за счет последовательного включения однозвенных фильтров.

На рис. 26 показаны схемы индуктивного, емкостного и г-образных LC- и RC-фильтров.

Показателем качества сглаживающих фильтров служит коэффициент сглаживания пульсаций $K_{сп}$, равный отношению коэффициентов пульсаций на входе $K_{п\text{ вх}}$ и выходе (нагрузке) $K_{н}$ фильтра: $K_{сп} = K_{п\text{ вх}} / K_{н}$.

Коэффициент сглаживания пульсаций определяется произведением коэффициента фильтрации $K_{ф}$ и коэффициента передачи K фильтра.

$$K_{сп} = K \cdot K_{ф}; \quad K_{ф} = U_{m1\text{ вх}} / U_{m1\text{ н}}; \quad K = U_{н} / U_{вх},$$

где $U_{m1\text{ вх}}$ и $U_{m1\text{ н}}$ – амплитуды первых гармоник выпрямленного напряжения на входе и выходе фильтра. При хорошем качестве фильтра $K \rightarrow 1$ и тогда $K_{сп} \approx K_{ф}$.

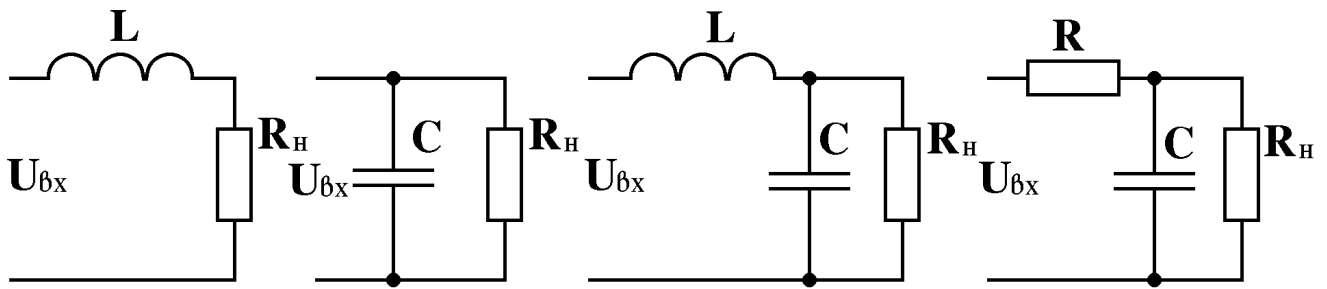


Рис. 32

Для L-фильтра, включенного на выходе m -фазного выпрямителя, выполняется условие $m \cdot \omega \cdot L \gg R_H$ и величины переменных составляющих на входе и выходе фильтра могут быть найдены из соотношений

$$U_{m1вх} = I_{m1} \sqrt{R_H^2 + X_L^2}; \quad U_{m1н} = I_{m1} \cdot R_H, \quad \text{что при } m \cdot \omega \cdot L \gg R_H \text{ дает } K_\phi = m \cdot \omega \cdot L / R_H.$$

Для г-образного LC-фильтра при $R_H \gg 1/(m \cdot \omega \cdot C)$ и $R_H \gg R_L$

$$K_\phi = I_{m1}(X_L + X_C) / (I_{m1} \cdot X_C) = [m \cdot \omega \cdot L + 1/(m \cdot \omega \cdot C)] / [1/(m \cdot \omega \cdot C)] = (m \cdot \omega)^2 \cdot L \cdot C + 1.$$

Аналогично для г-образного RC-фильтра $K_\phi = m \cdot \omega \cdot R \cdot C$.

Для емкостного фильтра при $R_H \gg 1/(m \cdot \omega \cdot C)$ можно найти изменение напряжения за период пульсаций T/m и коэффициент пульсаций

$$U_{m1н} = \frac{1}{2 \cdot C} \int_0^{T/m} I_H dt = \frac{I_H \cdot T}{2 \cdot m \cdot C} = \frac{U_H}{2m \cdot C \cdot f \cdot R_H}; \quad K_\pi = \frac{U_{m1н}}{U_H} = 1 / (2 \cdot m \cdot C \cdot f \cdot R_H).$$

Порядок выполнения работы

9.2. Снять нагрузочную характеристику и определить коэффициент пульсаций однофазного однотактного выпрямителя.

Для этого установить сопротивление R_3 в максимальное положение, переключатель S_1 в положение "2", тумблеры S_2, S_3 поставить в положение "Вкл", тумблер S_4 - в положение "Выкл". Осциллограф, подключенный к выходу выпрямителя должен находиться в режиме измерения с емкостным входом.

Изменяя величину R_3 от максимальной до минимальной, снять по милливольтметру ХММ1 и амперметру РА1 зависимость выходного напряжения от тока в нагрузке. Одновременно по осциллографу отмечать амплитуды пульсаций U_{m1} . Рассчитать коэффициенты пульсаций $K_\pi = U_{m1}/U_H$ для каждого положения R_3 . Зарисовать осциллограммы напряжений на нагрузке при минимальном и максимальном значениях R_3 и при различных положениях тумблера S_3 .

9.3. Повторить измерения, указанные в п. 9.2, для двух других схем нерегулируемых выпрямителей. Результаты занести в табл. 17 и отобразить на едином графике.

Таблица 17

Схема	Параметр	I_n при различных положениях R3										
		100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	5%
Однотакт. однофазн. схема	U_n											
	K_n											
Однотакт. двухфазн. схема	U_n											
	K_n											
Схема удвоения	U_n											
	K_n											

Сделать выводы о причинах изменения измеряемых величин.

9.4. Оценить влияние реактивных элементов на величину пульсаций на выходе выпрямителя.

Установить сопротивление R3 в среднее положение, а переключатель S1 в положение "3".

Измерить коэффициенты пульсаций при различных сочетаниях положений тумблеров S2, S3, S4.

Наблюдать и зарисовать осциллограммы напряжений на сопротивлении нагрузки. Проанализировать причины влияния на форму осциллограмм реактивных элементов фильтров.

9.5. Контрольные вопросы

- 1) Что называют нерегулируемым выпрямителем?
- 2) Чем отличается регулируемый выпрямитель от нерегулируемого?
- 3) Нарисуйте схему однополупериодного выпрямителя и поясните ее принцип работы, указав осциллограммы напряжений и токов в характерных точках схемы.
- 4) Нарисуйте схему двухполупериодного выпрямителя и поясните ее принцип работы, указав осциллограммы напряжений и токов в характерных точках схемы.
- 5) Нарисуйте схему мостового выпрямителя и поясните ее принцип работы, указав осциллограммы напряжений и токов в характерных точках схемы.
- 6) Нарисуйте схему удвоения напряжения и поясните ее принцип работы, указав осциллограммы напряжений и токов в характерных точках схемы.
- 7) Дайте сравнительную характеристику исследованных схем нерегулируемых выпрямителей.
- 8) Поясните принцип работы схемы регулируемого тиристорного выпрямителя.
- 9) Что называют нагрузочной характеристикой выпрямителя?

- 10) Что называют коэффициентом пульсаций?
- 11) Почему коэффициент пульсаций меняется при изменении тока в нагрузке?
- 12) Что называют коэффициентом использования трансформатора выпрямителя?
- 13) Что называют коэффициентом преобразования мощности?
- 14) Как определить габаритную мощность трансформатора?
- 15) Как влияет характер нагрузки на работу выпрямителя?
- 16) Почему габариты трансформатора, нагруженного на однофазную однофазную схему больше, чем при нагрузке его на двухтактную однофазную схему при одинаковых токах в R_H ?
- 17) Каково назначение и принципы работы электрических фильтров?
- 18) Каковы особенности основных звеньев электрических фильтров?
- 19) Почему г-образные фильтры рекомендуют использовать при изменяющихся токах нагрузки?

10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Целью работы является изучение компенсационного стабилизатора напряжения, приобретение навыков по его эксплуатации и расчету.

10.1. Краткие сведения по содержанию работы

В настоящее время известны два основных способа стабилизации напряжения или тока: параметрический и компенсационный.

В параметрических стабилизаторах используются элементы, имеющие нелинейные вольтамперные характеристики, с пологим участком, в пределах которого стабилизируемая величина (напряжение или ток) меняются незначительно при воздействии дестабилизирующих факторов.

Действие компенсационных стабилизаторов основано на измерении отклонения выходного напряжения или тока от заданного значения и воздействии на регулирующий элемент.

Схема компенсационного стабилизатора напряжения приведена на рис. 33. Транзистор VT2 служит регулирующим элементом, поддерживающим заданное напряжение на нагрузке. Транзистор VT3 выполняет функции усилителя тока и схемы сравнения. Он вырабатывает управляющий сигнал для VT2 путем сравнения части выходного напряжения стабилизатора, снимаемого с делителя R3, R4, и опорного напряжения, создаваемого параметрическим стабилизатором R2, VD1.

Работа проводится на схеме, показанной на рис. 33 (файл stab8.ms9).

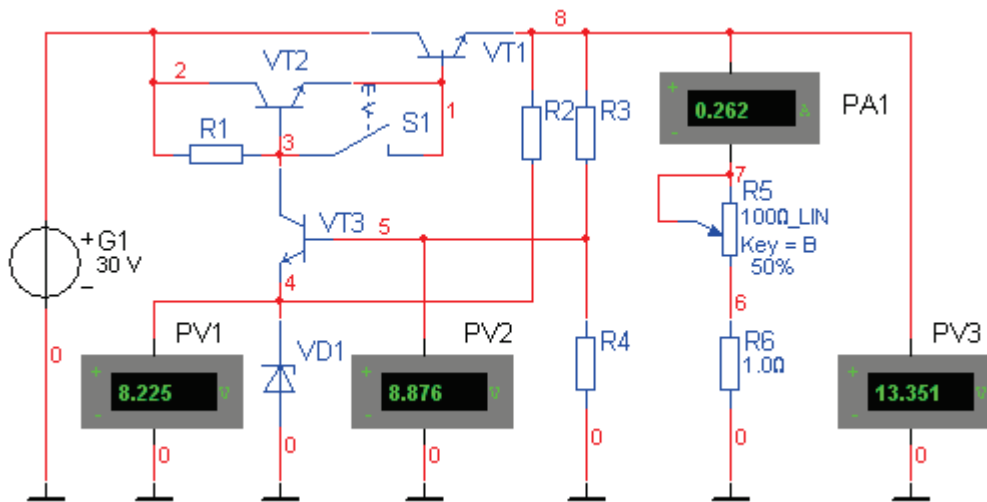


Рис. 33

Порядок выполнения работы

10.2. Снять регулировочную характеристику компенсационного стабилизатора напряжения.

Для этого регулятор R5 поставить в среднее положение.

Изменяя входное напряжение выпрямителя на источнике G1 от 0 В до 30 В снять зависимость $U_H = f(U_{ВХ})$. Результаты записать в табл. 18 и отобразить на графике.

Таблица 18

$U_{ВХ}$, В	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
U_H , В																

10.3. Снять нагрузочную характеристику компенсационного стабилизатора напряжения.

Для этого подать от источника G1 напряжение 30 В. Изменяя величину R5 от максимальной до минимальной, снять зависимость $U_H = f(I_H)$. Результаты записать в табл. 19. Повторить измерения при замкнутом тумблере S1. При этом от схемы отключается транзистор VT2 и у усилителя тока (проходной транзистор VT1) уменьшается усиление. Тем самым можно оценить влияние коэффициента усиления этого транзистора на стабильность выходного напряжения. Полученные данные отобразить на графике.

Таблица 19

Параметр	R5							
	100%	80%	60%	40%	20%	10%	5%	0%
I_H , А								
U_H , В								

10.4. Рассчитать коэффициент стабилизации исследуемой схемы.

Для этого по результатам измерений по п. 10.2 рассчитать коэффициент стабилизации схемы, выбрав и обосновав положение рабочего участка нагрузочной характеристики.

10.5. Поставить R5 в максимальное и минимальное положение. Замерить с помощью вольтметра постоянного тока напряжения в характерных точках схемы относительно общего провода.

Результаты занести в таблицу.

Таблица 20

Вольтметр	PV1		PV2		PV3	
	R5 _{мин}	R5 _{макс}	R5 _{мин}	R5 _{макс}	R5 _{мин}	R5 _{макс}
Напряжение						

10.6. Контрольные вопросы

- 1) Что называют коэффициентом стабилизации напряжения?
- 2) Что называют параметрическим стабилизатором? Каковы его недостатки?
- 3) На каких элементах может быть собран параметрический стабилизатор напряжения и тока? Какими свойствами они должны обладать?
- 4) Нарисовать электрическую схему простейшего параметрического стабилизатора напряжения, пояснить его принцип работы.
- 5) Нарисовать электрическую схему простейшего параметрического стабилизатора тока, пояснить его принцип работы.
- 6) Как рассчитать параметрический стабилизатор напряжения на стабилитроне?
- 7) Что называют компенсационным стабилизатором?
- 8) Нарисовать электрическую схему компенсационного стабилизатора напряжения, пояснить его принцип работы.
- 9) На что влияет соотношение сопротивлений в делителе на выходе компенсационного стабилизатора напряжения?
- 10) Нарисовать электрическую схему компенсационного стабилизатора тока, пояснить его принцип работы.
- 11) Какова форма нагрузочной характеристики компенсационного стабилизатора напряжения? От чего она зависит?
- 12) Объясните ход регулировочной характеристики стабилизатора напряжения.
- 13) Что влияет на коэффициент стабилизации напряжения компенсационного стабилизатора?
- 14) Почему стабильность выходного напряжения компенсационного стабилизатора лучше, чем у параметрического?
- 15) Что влияет на динамическое выходное сопротивление компенсационного стабилизатора?
- 16) Как динамическое сопротивление стабилитрона влияет на постоянство выходного напряжения параметрического стабилизатора?
- 17) Какие интегральные схемы стабилизаторов напряжения Вы знаете? Их основные характеристики.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Цепи смещения, температурной стабилизации, работа каскада.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Исследование параметров усилителя при различных способах включения транзисторов.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование двухтактного усилителя.....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование схем коррекции частотных и переходных характеристик.....	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследование усилителя постоянного тока...	28
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 Исследование схем с операционными усилителями.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. Исследование схем выпрямителей и сглаживающих фильтров.....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. Исследование стабилизатора напряжения....	45