

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»

УТВЕРЖДАЮ:
директор
Многопрофильного колледжа

О.В. Прохорова
19 января 2024

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
по выполнению лабораторных работ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»
основных профессиональных образовательных программ
15.02.10 МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА (ПО ОТРАСЛЯМ),
15.02.18 ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ
РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА (ПО ОТРАСЛЯМ)

Челябинск 2024

Методические рекомендации печатаются по решению Педагогического совета Многопрофильного колледжа ИСТиС ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» №5, протокол №5 от «30» марта 2023 г.

Составитель: Дудкин М.М., профессор кафедры ЭПМЭМ

Рецензент:

Григорьев М.А., заведующий кафедрой, преподаватель кафедры Электропривод, мехатроника и электромеханика

Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физические основы электроники» являются частью учебно-методического комплекса (УМК) по специальности.

Методические рекомендации предназначены для студентов специальностей 15.02.10 Мехатроника и робототехника (по отраслям), 15.02.18 Техническая эксплуатация и обслуживание роботизированного производства (по отраслям) по подготовке к написанию курсовой работы (проекта).

Методические рекомендации составлены в соответствии с требованиями ФГОС СПО.

Методические рекомендации адресованы студентам очной формы обучения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Общие рекомендации к выполнению лабораторных работ.....	3
Работа №1. Исследование диодов, неуправляемого выпрямителя и параметрического стабилизатора.....	12
Работа №2. Исследование биполярного транзистора и транзисторного усилительного каскада.....	19
Работа №3. Исследование полевого транзистора и транзисторного усилительного каскада.....	27
Работа №4. Исследование тиристоров, симисторов, запираемых тиристоров, управляемых выпрямителей и преобразователей переменного напряжения.....	36
Работа №5. Исследование схем включения операционных усилителей (инвертирующий усилитель, интегратор и компараторы).....	44
Литература.....	53

ВВЕДЕНИЕ

Методические рекомендации содержит лабораторные работы, выполняемые студентами по специальностям 15.02.10 Мехатроника и робототехника (по отраслям), 15.02.18 Техническая эксплуатация и обслуживание роботизированного производства (по отраслям) при изучении курса "Физические основы электроники".

Основная задача данного цикла лабораторных работ – предоставить студентам возможность практически изучить полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, а также простейшие устройства на их основе. Студенты должны приобрести навыки работы с электронными схемами и закрепить материал, изученный теоретически.

Для более глубокого изучения материала студенты дома до выполнения лабораторной работы производят предварительные расчеты и построения. Каждый студент получает индивидуальное задание. Лабораторная работа в значительной степени является проверкой предварительно выполненного задания. При отсутствии домашнего задания выполнение лабораторной работы нецелесообразно.

Для проверки знаний студентов перед лабораторной работой проводится коллоквиум на основе контрольных вопросов, помещенных в пособие.

Особое внимание при выполнении лабораторных работ уделяется развитию навыков работы с электронным осциллографом.

После выполнения лабораторной работы студенты составляют индивидуальные отчеты. Отчеты содержат как результаты проверки индивидуальных заданий, так и результаты общих экспериментальных исследований.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Порядок выполнения работ

Перед выполнением работ все студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к лаборатории промышленной электроники, для чего преподавателем проводится инструктаж. Краткий инструктаж проводится также на каждом занятии.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;
- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему лабораторной установки и продумать методику выполнения лабораторной работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

Перед выполнением каждой лабораторной работы необходимо сдать коллоквиум и представить отчет по предыдущей работе. Вопросы коллоквиума составлены на основе контрольных вопросов пособия.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

- 1) ознакомиться с рабочим местом, проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводов;
- 2) проверить положение стрелок электроизмерительных приборов и если требуется, установить на нуль; приборы с несколькими пределами измерения включить на наибольший предел;
- 3) произвести сборку схемы;
- 4) после разрешения преподавателя включить питание и приступить к выполнению работы;
- 5) в начале каждого опыта, изменяя напряжения и токи в допустимых пределах, качественно оценить характер зависимости, а затем произвести требуемые измерения. При снятии характеристик надо обязательно снять крайние точки. Наибольшее число измерений следует производить на участках резкого изменения наклона характеристик, а на линейных участках независимо от их протяженности достаточно снимать по три точки. Характеристики строятся непосредственно во время проведения эксперимента;
- 6) в ходе работы и по ее окончанию полученные данные представлять на проверку преподавателю;
- 7) схему разбирать только после проверки преподавателем результатов опыта (перед разборкой не забудьте выключить источник питания!),
- 8) по окончании работы привести в порядок рабочее место.

Оформление отчетов по лабораторным работам

В отчете должна быть сформулирована цель проведенной работы и представлены следующие материалы:

- 1) схемы экспериментов;
- 2) расчет заданного варианта;
- 3) рассчитанные характеристики и подтверждающие их экспериментальные характеристики, построенные в одних осях координат;
- 4) сравнительные таблицы экспериментальных и расчетных данных;
- 5) все остальные экспериментальные характеристики;
- 6) обработанные осциллограммы;
- 7) выводы (анализ экспериментальных данных, вида кривых, причин погрешностей и т.д.).

Отчет оформляется чернилами или шариковой ручкой. Схемы вычерчиваются карандашом. Графики строятся на листах миллиметровой бумаги карандашом и клеиваются в отчет. Отчет может быть напечатан на принтере.

Опытные точки могут иметь разброс. Экспериментальные кривые проводят плавно, максимально приближая к экспериментальным точкам. На графиках приводят название, обозначают, к какому опыту они относятся, и

указывают постоянные величины, определяющие условия опыта. На осях координат надо обязательно указать, какая величина по ним отложена, в каких единицах она измеряется, и нанести деления. Цена деления должна быть удобной для работы.

Описание лабораторного комплекса

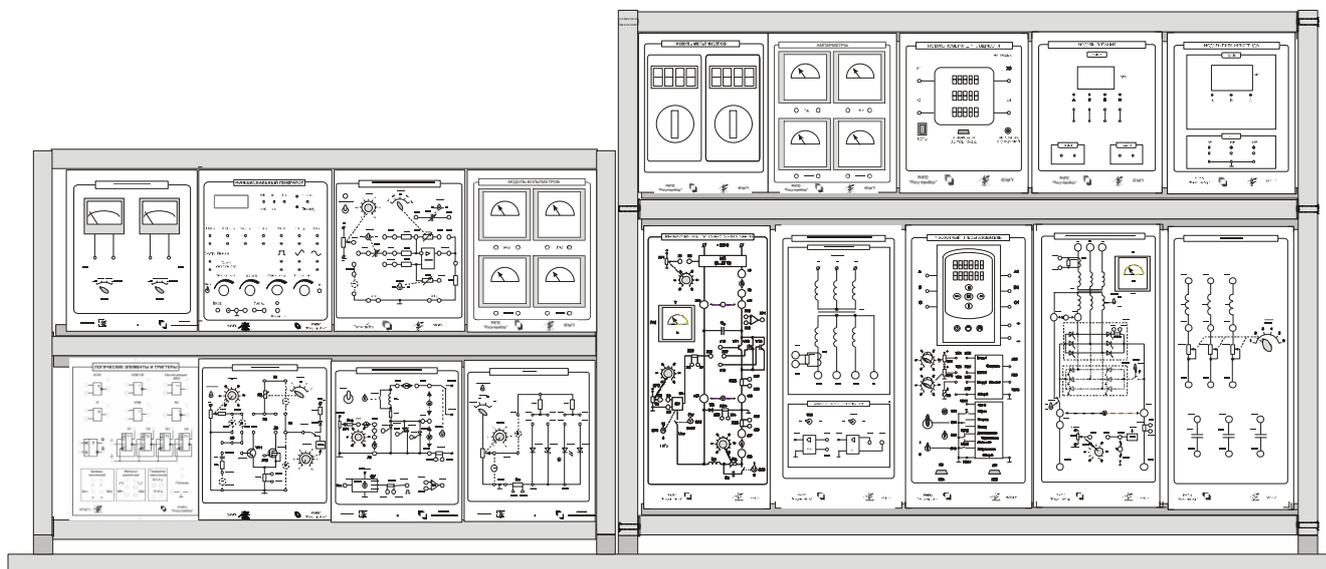


Рис. 1. Общий вид лабораторного комплекса

Перечень модулей входящих в цикл «Физические основы электроники». Описания исследуемых модулей приведены в соответствующих лабораторных работах и техническом описании комплекса. Описание модулей, используемых для питания, измерения и т.д. приведено ниже.

Модуль питания стенда

Модуль питания стенда (МПС) предназначен для ввода трехфазного напряжения 380В из сети в лабораторный комплекс, защиты комплекса от токов короткого замыкания и подачи силовых и маломощных напряжений питания на модули стенда.

Модуль содержит автоматический трехполюсный выключатель QF1, вторичный источник питания напряжениями ± 15 В и + 5В маломощных цепей модулей.

На лицевой части имеется индикация подачи силового напряжения по фазам А, В и С, а также маломощных напряжений питания +5В, +15В и –15В. Кроме этого возможны контроль и подача маломощных напряжений с лицевой панели (выведены соответствующие гнезда напряжений и общего провода).

Модуль «Миллиамперметры» и «Вольтметры»

Измерительный модуль «Миллиамперметры» позволяет измерить стрелочными приборами магнитоэлектрического типа два тока (приборами А1 и А2). Диапазоны измерений приборов приведены в табл.1.

Таблица 1

Наименование прибора	Диапазон измерения	Класс точности
РА1	0...0,1; 1; 10; 100 мА	1,5
РА2	0...0,1; 1; 10; 100 мА	1,5

Измерительный модуль «Вольтметры» позволяет измерить стрелочными приборами магнитоэлектрического типа два напряжения (приборами А1 и А2) с пределами измерения 0...2 В и 0...20 В и классом точности 1,5.

Модуль «Функциональный генератор»

Модуль функционального генератора предназначен для получения измерительных сигналов различной формы, частоты и амплитуды.

Его основные функции: генерация сигналов синусоидальной, прямоугольной и пилообразной формы.

Предусмотрена возможность регулирования частоты и амплитуды сигнала, смещение сигналом постоянного напряжения и регулирование скважности. Диапазон частот разбит на семь декад: 0,5Гц – 1МГц, встроенный частотомер может быть использован для измерения частоты внешнего сигнала до 1МГц.

Максимальная амплитуда выходного сигнала 2,7-3В.

Перед началом лабораторной работы на функциональном генераторе тумблер скважности переключить в положение «Выкл», ручку смещения вывести в крайнее левое положение и во время лабораторных работ не изменять.

Электронный осциллограф

Для проведения лабораторных работ необходим двухканальный осциллограф, например GOS-620, С1-117.

Электронный осциллограф предназначен для записи или наблюдения на экране электронно-лучевой трубки изменений электрических сигналов во времени, а также для измерения различных электрических величин. Структурная схема осциллографа GOS-620 приведена на рис. 2.

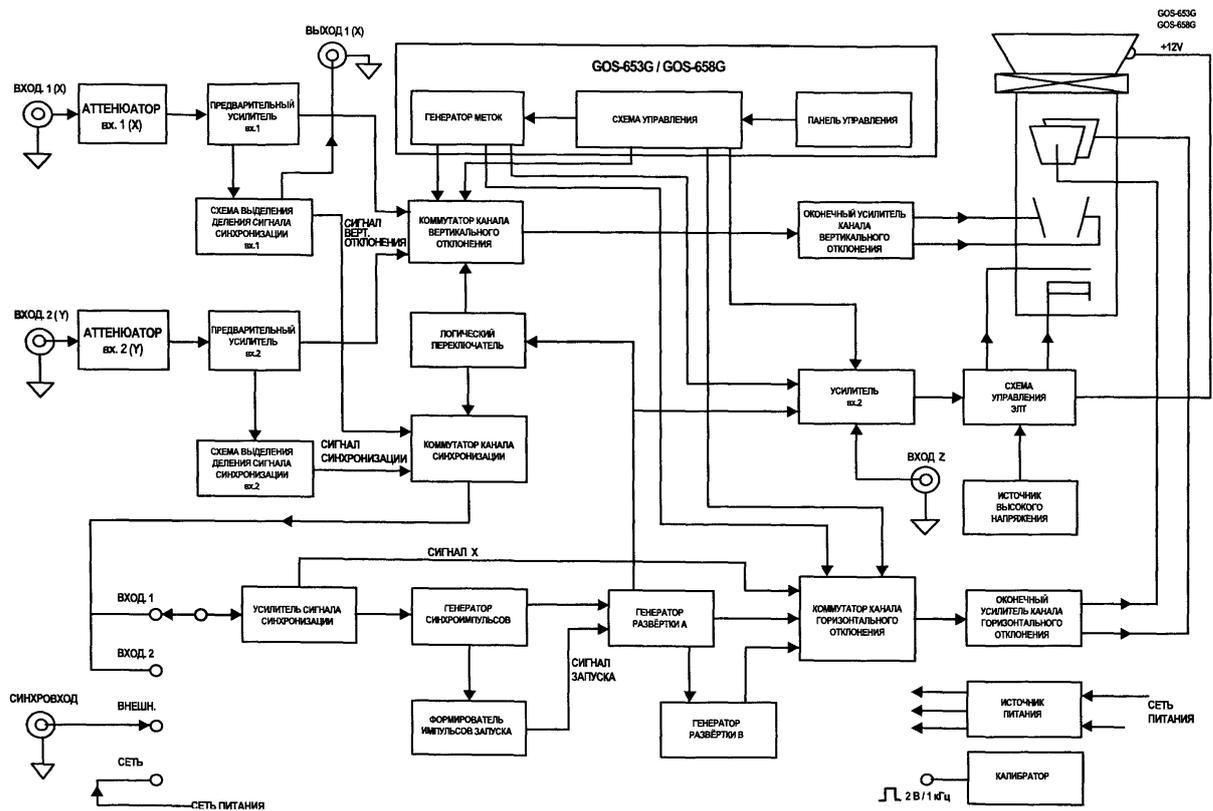


Рис.2. Упрощенная структурная схема осциллографа GOS-620

Осциллограф GOS-620 это двухканальный осциллограф со встроенным многофункциональным генератором. Полоса пропускания осциллографа 20 МГц, максимальная чувствительность 1 мВ/дел, минимальный коэффициент развёртки 0,2 мкс/дел. Возможно установление времени развёртки 100 нс/дел при растяжке в 10 раз. Осциллограф имеет 6-дюймовую (12,5 см) прямоугольную электронно-лучевую трубку с красной внутренней шкалой.

На рис.3 показана лицевая панель осциллографа GOS-620 с обозначением органов управления.

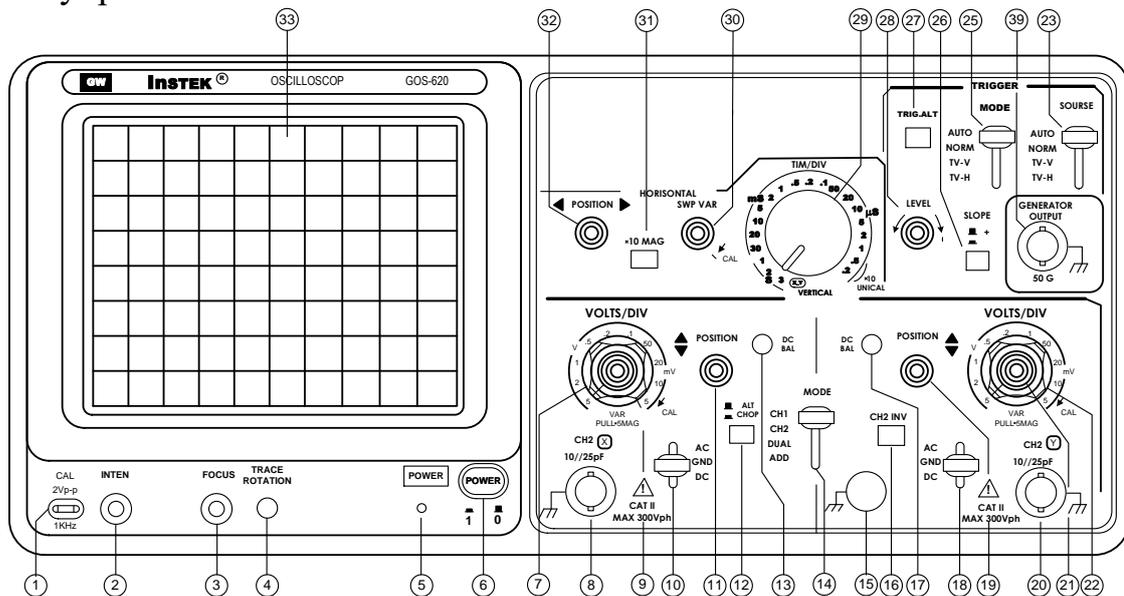


Рис.3 – Лицевая панель осциллографа GOS-620

Таблица 3. Назначение обозначений на лицевой панели осциллографа

POWER	Выключатель сетевого питания
INTEN	ЯРКОСТЬ
TRACE	ЛУЧ
TRACE ROTATION	ПОВОРОТ ЛУЧА
FOCUS	ФОКУС
ILLUM	ПОДСВЕТКА
CAL	КАЛИБРАТОР
VERTICAL POSITION	ПОЛОЖЕНИЕ ПО ВЕРТИКАЛИ
VOLTS/DIV	ВОЛЬТ/ДЕЛ
VAR	ПЛАВНО
PULLx5MAG	ТЯНУТЬ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ В 5 РАЗ
CH1 CH2	КАНАЛ1 КАНАЛ2
AC/DC	ПОСТОЯННЫЙ/ПЕРЕМЕННЫЙ
GND	ЗЕМЛЯ
ALT/CHOP/ADD	ПОПЕРЕМЕННО/ПООЧЕРЕДНО/СУММА
INV	ИНВЕРСИЯ
HORIZONTAL POSITION	ПОЛОЖЕНИЕ ПО ГОРИЗОНТАЛИ
×10	РАСТЯЖКА В 10 РАЗ
TRIGGER LEVEL	УРОВЕНЬ ЗАПУСКА
TRIGGER ALT	СЛОЖЕНИЕ СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ
MODE	РЕЖИМ
SOURCE	ИСТОЧНИК
SLOPE	ПОЛЯРНОСТЬ
TV-V	ТВ СТРОКИ
TV-H	ТВ КАДРЫ
FREQUENCY	ЧАСТОТА
RANGE	ДИАПАЗОН
FUNC	ФОРМА СИГНАЛА
AMPLITUDE	АМПЛИТУДА
PULL DC-OFFSET	ТЯНУТЬ ПОСТОЯННОЕ СМЕЩЕНИЕ

При применении двухканального осциллографа возникает опасность коротких замыканий в схеме через два провода входов, связанных с корпусом осциллографа. Осциллограф должен быть специально подготовлен к работе на стенде. Сетевой шнур следует подключать только в заземленную розетку.

От осциллографа в исследуемую схему должен идти только один провод, связанный с корпусом «⊥». Этот провод необходимо сохранить в кабеле, предназначенном для измерения меньших напряжений. При этом оба сигнала будут измеряться относительно точки, к которой подсоединен корпус осциллографа («⊥»).

Аналогично, сигнал внешней синхронизации должен подаваться на вход внешней синхронизации одним проводом. При этом сигнал подается относительно точки, к которой подключен корпус осциллографа («⊥»).

Эти рекомендации являются обязательными. Их невыполнение может привести к выходу из строя модулей комплекса.

Непосредственное включение осциллографа осуществляется нажатием кнопки (6) POWER. При его включенном состоянии загорается индикатор (8). Регулировка яркости и фокуса изображения на экране осциллографа

осуществляется вращением ручек (2) INTEN и (3) FOCUS соответственно. Изменение наклона изображения по горизонтали, т.е. регулировка изображения, параллельно линиям шкалы - (4) TRACE ROTATION.

Клеммы (8) CH1 и (20) CH2 являются входами каналов 1 и 2, в режиме X-Y – входные каналы X и Y-осей соответственно.

Переключатель режима входов усилителя (10)(18) AC-DC-GND имеет три положения: AC - закрытый вход – показывает только переменную составляющую; DC - открытый вход – постоянную и переменную составляющую; GND – Вход усилителя отключается от источника сигнала и заземляется.

Дискретное изменение масштаба по оси X для 1 и 2 каналов от 5 мВ/дел до 5 В/дел в 10 диапазонах осуществляется регуляторами (7)(22) VOLTS/DIV (вольт на деление) соответственно, с делителем 1:10 от 50 мВ/дел до 50 В/дел. Плавное изменение производится ручкой (9)(21) VARIABLE. Когда ручка вытянута (режим x5 раз) происходит дополнительное увеличение амплитуды в 5 раз.

В канале 2 также можно осуществлять инвертирование сигнала нажатием кнопки (16) INV CH2.

Балансировку каналов 1 и 2 можно выполнять с помощью регуляторов (13) CH1 и (17) CH2 DC BAL. Регулировка положения лучей обоих каналов по вертикали осуществляется ручками (11) и (19) POSITION (положение) соответственно.

Для наблюдения на экране осциллографа одного или одновременно двух сигналов используется (14) VERT MODE переключатель режим работы усилителя в положениях: CH 1 – на экране наблюдается сигнал канала 1; CH 2 – сигнал канала 2; ALT – на экране наблюдаются изображения сигналов обоих каналов; ADD – на экране наблюдается алгебраическая сумма или разность (при нажатии кнопки CH 2 INV сигналов каналов 1 и 2. При этом, когда кнопка (12) ALT/CHOP отжата в двухканальном режиме, режим работы коммутатора выбирается автоматически исходя из положения ручки время/дел. При нажатии на кнопку коммутатор принудительно переключается в режим попеременный.

Режимы синхронизации (23) SOURCE

CH 1 – Развертка синхронизируется сигналом с первого канала; CH 2 – Развертка синхронизируется сигналом со второго канала; LINE – Развёртка синхронизируется от сети; (23) EXT(EXT HOR) – Вход внешней синхронизации и для подачи исследуемого сигнала непосредственно на входной усилитель X. Чтобы использовать этот вход переключите выключатель (23) в положение EXT. Для входа синхронизации используйте вход EXT TRIG IN на задней панели;

(27) TRIG.ALT – Развертка поочередно синхронизируется сигналом с 1-го и 2-го каналов.

(26) SLOPE – Переключатель полярности синхронизирующего сигнала. "+" –развёртки синхронизируются положительным перепадом исследуемого сигнала; "-" – развёртки синхронизируются отрицательным перепадом исследуемого сигнала.

(28) LEVEL – Выбор уровня исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развёртки.

(25) TRIGGER MODE выбор режима работы запуска развертки:

AUTO если нет сигнала синхронизации или он меньше 25 Гц, развертка переходит в автоколебательный режим; NORM развертка запускается только при наличии входного сигнала; TV-V синхронизация по вертикали (по кадрам); TV-H синхронизация по горизонтали (по строкам). В двух последних режимах полярность сигнала должна быть отрицательной.

Органы управления развёрткой

(29) ВРЕМЯ /ДЕЛ устанавливает коэффициент развёртки от 0,2 мкс/дел до 0,5 с/дел 20 ступенями. При переводе в положение X-Y обеспечивается наблюдение фигур Лисажу.

(30) SWP.VAR – Плавная регулировка коэффициента развёртки с перекрытием 2,5 раза в каждом положении переключателя время/дел.

(32) POSITION – Перемещение изображения по горизонтали.

(31) ×10 MAG – Увеличение скорости развертки в 10 раз.

Осциллограф GOS-620 также содержит встроенный функциональный генератор (1) CAL выход калибратора 2 В и частотой 1 кГц

Гнездо (15) GND используется для дополнительного подключения заземления. (НЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ???)

РАБОТА №1 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ, НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА

Цель работы

Изучение характеристик и параметров диодов – выпрямительных, Шоттки, стабилитронов и светодиодов. Ознакомление с применением выпрямительных диодов в неуправляемых выпрямителях, стабилитронов в параметрических стабилизаторах постоянного напряжения, светодиодов в индикаторах.

Описание лабораторной установки

При выполнении работы используются следующие модули: «Диоды», «Миллиамперметры», «Вольтметры», а также двухканальный осциллограф.

Передняя панель модуля «Диоды» представлена на рис.1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: выпрямительный диод VD1, диод Шоттки VD2, светодиод VD3, стабилитрон VD4, потенциометр RP1 для изменения подаваемого напряжения, резистор $R_H = 150 \text{ Ом}$, и балластный резистор $R_B = 1.1 \text{ кОм}$. Резистор R_H используется в качестве ограничивающего ток при снятии характеристик и в качестве сопротивления нагрузки при исследовании выпрямителя. Переключатель SA1 предназначен для включения переменного или постоянного напряжения (положительного или отрицательного), а также выключения питания модуля. Шунт $R_{ш} = 10 \text{ Ом}$ служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через диод. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений (X1 - X15).

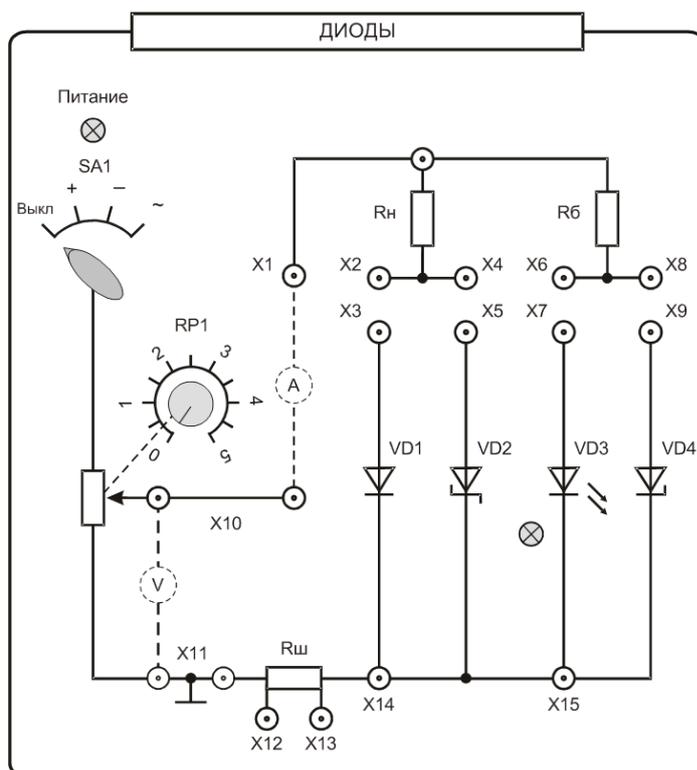


Рис.1. Лицевая панель модуля
«Диоды»

Питание модуля осуществляется от источников переменного и постоянного напряжения $\pm 15\text{В}$. Для подачи постоянного напряжения

необходимо включить автоматический выключатель модуля питания стенда.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Полупроводниковые диоды» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь мнемосхемой (рис.1) начертить схемы для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения на входе $u_{вх}$, выпрямленного напряжения $u_{н}$, анодного тока i_a и напряжения на вентиле u_a . Амплитудное значение U_m входного переменного напряжения взять из таблицы вариантов. Вентиль считать идеальным;

г) для идеализированной ВАХ стабилитрона построить линию нагрузки, если напряжение стабилизации стабилитрона $U_{ст} = 6,8 В$, его дифференциальное сопротивление r_d на участке стабилизации равно нулю, напряжение питания $U_{п}$ – в соответствии с таблицей вариантов. Определить ток I_b через балластный резистор;

д) для светодиода определить величину балластного сопротивления R_b , если максимально возможный ток через светодиод $I_{max} = 10 мА$, пороговое напряжение светодиода $U_0 = 2В$, напряжение питания $U_{п}$ – взять из таблицы вариантов.

2. Экспериментальное

исследование выпрямительного диода:

а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе (рис.2). Соединить перемычкой гнезда X2, X3. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 1000$ (максимальный ток 100 мА) между гнездами X1, X10. Для измерения анодного напряжения между гнездами X4, X14 включить двухпредельный вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе 2В, при больших напряжениях перейти на предел 20В. Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

б) снять по точкам вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе. Для этого потенциометром RP1 изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на диоде VD1. ВАХ снимать сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель SA1 на «-». При смене ветви не забыть изменить полярность миллиамперметра и его предел измерения!

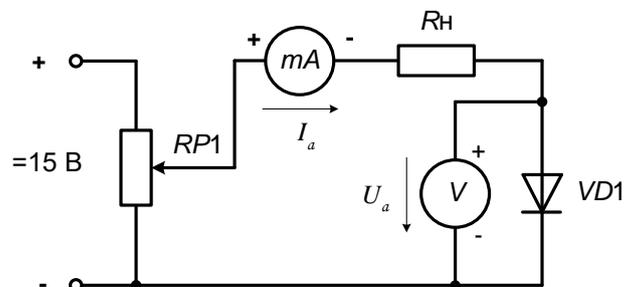


Рис.2. Схема для исследования выпрямительного диода на постоянном токе

По построенной вольт-амперной характеристике определить основные параметры диода: пороговое напряжение U_0 , дифференциальное сопротивление r_d , обратный ток $I_{обр}$, прямое падение напряжение $U_a \text{ max}$ при максимальном анодном токе $I_a \text{ max}$;

в) собрать схему для исследования выпрямительного диода на переменном токе с целью получения ВАХ диода на экране осциллографа (рис.3). Для этого установить тумблер SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0». Вход CH2(Y) осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$ (гнездо X13), а корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом X12. Вход CH1(X) осциллографа подключить к гнезду X4. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Подать питание – переключатель SA1 установить в положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра RP1 до положения «5». Зарисовать ВАХ диода, определить масштабы по току и напряжению;

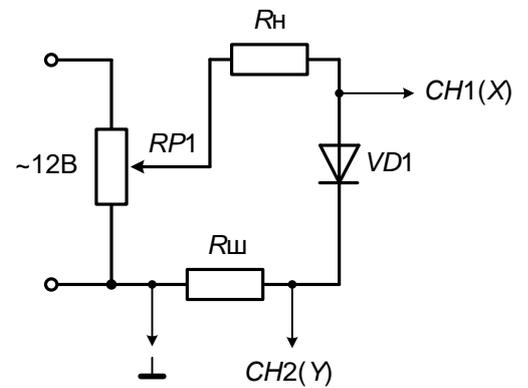


Рис.3. Схема для исследования выпрямительного диода на переменном токе

г) определить по осциллограмме параметры диода: пороговое напряжение U_0 , дифференциальное сопротивление r_d , обратный ток $I_{обр}$, прямое падение напряжение $U_a \text{ max}$ при максимальном анодном токе $I_a \text{ max}$. Сравнить с параметрами определенными в п.2 б, объяснить причину различий;

3. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на диоде:

а) собрать схему выпрямителя (рис.3) – это не потребует никаких переключений на модуле. Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. На экране осциллографа Вы увидите осциллограммы анодного тока i_a и напряжения на диоде u_a ;

б) исследовать выпрямитель, для этого установить на входе напряжение с амплитудой U_m , указанной в таблице вариантов. Измерение напряжения производить при помощи осциллографа, подключив вход CH2 осциллографа к гнезду X10. Канал CH1 осциллографа подключить к гнезду X13, а корпус осциллографа «⊥» - к гнезду X12.

Снять осциллограммы напряжения на диоде u_a (вход CH2) осциллографа переключить к гнезду X4) и анодного тока i_a (вход CH1 осциллографа уже подключен к гнезду X13, а корпус осциллографа «⊥» уже соединен с гнездом X12). Переключить осциллограф в двухканальный режим (Dual). Зарисовать с экрана осциллографа временные диаграммы сигналов друг под другом. Снять осциллограмму напряжения на нагрузке ин. Для этого корпус осциллографа подключить к гнезду X4, а вход канала CH2 к гнезду X1 (не забудьте

определить масштабы по току и напряжению!).

4. Экспериментальное исследование диода Шоттки:

а) собрать схему для исследования диода Шоттки на постоянном токе (рис.4). Для этого установить тумблер SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0». Соединить перемычкой гнезда X4, X5. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 1000$ (максимальный ток 100 мА) между гнездами X1, X10. Для измерения анодного напряжения между гнездами X2, X14 включить двухпредельный вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе 2В, при больших напряжениях перейти на предел 20В. Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

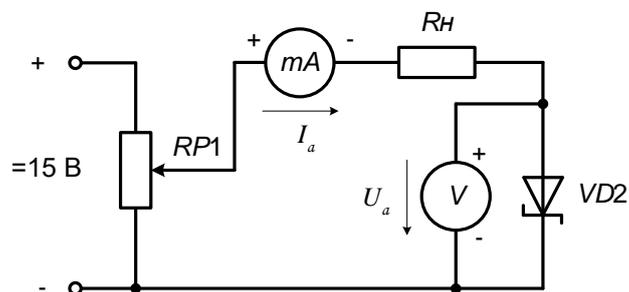


Рис.4. Схема для исследования диода Шоттки на постоянном

б) снять по точкам вольтамперную характеристику диода Шоттки на постоянном токе. Для этого потенциометром RP1 изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на диоде VD2. ВАХ снять сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель SA1 на «-». При смене ветви не забыть изменить полярность миллиамперметра и его предел измерения!

По построенной вольт-амперной характеристике определить основные параметры диода Шоттки: пороговое напряжение U_0 , дифференциальное сопротивление r_d , обратный ток $I_{обр}$, прямое падение напряжение U_a max при максимальном анодном токе I_a max. Сравнить с параметрами выпрямительного диода;

5. Экспериментальное исследование стабилитрона:

а) собрать схему для исследования стабилитрона VD4 на переменном токе (рис.5). Установить тумблер SA1 в положение «Выкл», ручку потенциометра RP1 установить в положение «0», соединить перемычкой гнезда X8, X9. Вход CH2(Y) осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$ (гнездо X13), а корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом X12. Вход CH1(X) осциллографа подключить к гнезду X6. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Подать питание – переключатель SA1 установить в

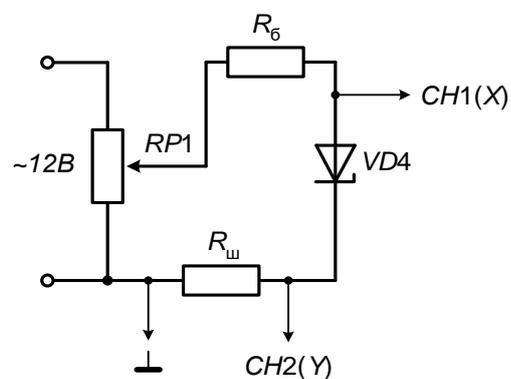


Рис.5. Схема для исследования стабилитрона

положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра RP1 до положения «5». Зарисовать ВАХ стабилитрона, определить масштабы по току и напряжению;

По снятой ВАХ определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона и дифференциальное сопротивление r_d на участке стабилизации.

6. Экспериментальное исследование параметрического стабилизатора:

а) собрать схему параметрического стабилизатора напряжения. Для этого на вход подать постоянное напряжение переключателем SA1 (рис.6, обратите внимание на полярность!); включить вольтметры на пределе 20В на вход и выход стабилизатора, соответственно между гнездами X10 - X11 и X6 - X15.

б) снять и построить зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания $U_{вых} = f(U_{п})$. Для этого, изменяя потенциометром напряжение питания $U_{п}$ на входе стабилизатора, замерять соответствующее ему выходное напряжение $U_{вых}$. Определить напряжение стабилизации стабилизатора $U_{вых}$. Сравнить его с напряжением $U_{ст}$, найденным в п.5 а.

в) определить коэффициент стабилизации стабилизатора $K_{ст}$ и выходное сопротивление $R_{вых}$ на участке стабилизации.

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_n}{\Delta U_{вых}}; \quad R_{вых} = r_d.$$

7. Экспериментальное исследование светодиода:

а) собрать схему для исследования светодиода на постоянном токе.

Установить тумблер SA1 в положение «Выкл», ручку потенциометра RP1 установить в положение «0», соединить перемычкой гнезда X6–X7 (рис.7). Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 1000$ (максимальный ток 100 мА) между гнездами X1, X10. Для измерения анодного напряжения между гнездами X8, X15 включить двухпредельный вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе 2В, при больших напряжениях перейти на предел 20В. Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

б) снять по точкам вольт-

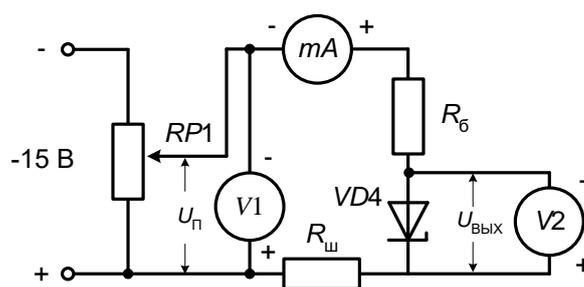


Рис.6. Схема для исследования параметрического стабилизатора

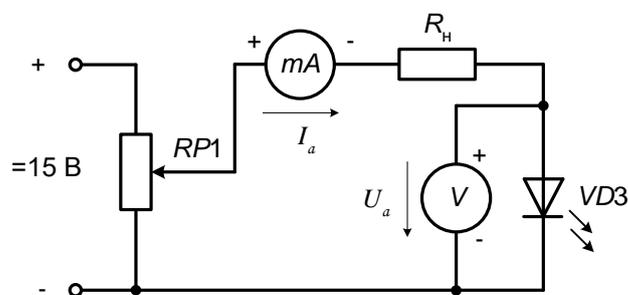


Рис.7. Схема для исследования светодиода

амперную характеристику светодиода на постоянном токе. Для этого, вращая ручку потенциометра RP1 до положения «5», изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на светодиоде VD3.

Снимать только прямую ветвь ВАХ светодиода. Записать значение анодного тока I_a при котором становится заметным свечение.

Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов, в соответствии с мнемосхемой на рис.1;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе; в выводах обязательно ответить на контрольные вопросы 7, 12 – 15, указать причины отличий результатов полученных на постоянном токе и с помощью осциллографа.

Контрольные вопросы

- Чем отличаются полупроводники типа p и n?
- Каковы свойства p-n перехода?
- Объясните вид ВАХ p-n перехода?
- Как снять по точкам ВАХ диода?
- Как снять ВАХ диода с помощью осциллографа?
- Поясните вид ВАХ стабилитрона.
- В чем отличие ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки, стабилитрона и светодиода?
- Как работает неуправляемый выпрямитель?
- Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
- Как работает параметрический стабилизатор напряжения? Для чего служит балластный резистор?
- Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при повышении температуры?
- При каком минимальном напряжении на входе стабилизатора еще возможна стабилизация напряжения?
- От какого параметра зависит качество стабилизации напряжения?
- От чего зависит яркость свечения светодиода?
- Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде?
- Каким образом на экране осциллографа получают изображение функциональной зависимости двух напряжений?
- Каким образом на экране осциллографа получается изображение периодической функции времени?

Таблица вариантов

№ варианта	Амплитуда переменного напряжения диода	Напряжение источника питания стабилитрона, светодиода
	U_m , В	$U_{п}$, В
1, 13	13,5	8
2, 14	10,5	8,5
3, 15	11,5	9
4, 16	12,5	9,5
5, 17	8	10
6, 18	9	10,5
7, 19	10	11
8, 20	11	11,5
9, 21	12	12
10, 22	13	13
11, 23	14	14
12, 24	15	15

Примечание:

При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп.1 а, в, б - схему для снятия ВАХ выпрямительного диода на постоянном токе и схему для исследования параметрического стабилизатора; подвариант Б – пп.1 а, г, б – схему для снятия ВАХ выпрямительного диода на переменном токе и исследования светодиода; подвариант В – пп.1 а, д, б – схему для снятия ВАХ стабилитрона на переменном токе и схему для исследования выпрямителя.

В предварительных расчетах. Напряжение стабилизации стабилитрона принимать $U_{ст} = 6,8$ В, $R_n = 150$ Ом; при построении временных диаграмм диоды считать идеальными.

РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА И ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Цель работы

Изучение характеристик, параметров и режимов работы биполярного транзистора и усилительного каскада с общим эмиттером (ОЭ).

Описание лабораторной установки

В комплект лабораторной установки входят следующие модули: «Транзисторы», «Функциональный генератор», «Миллиамперметры», «Вольтметры», двухканальный осциллограф.

Лицевая панель модуля «Транзисторы» представлена на рис.1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. Тумблер «Питание» предназначен для включения модуля «Транзисторы». О включенном состоянии модуля указывает световой индикатор, расположенный над тумблером. На мнемосхеме модуля изображены: биполярный транзистор $VT1$, потенциометр $RP1$ для изменения напряжения, подаваемого на базу, токоограничивающий резистор $R1$, резистор нагрузки $R2$, сопротивление которого изменяется переключателем $SA1$. Величины сопротивлений, соответствующие положениям переключателя приведены в табл. 2.1.

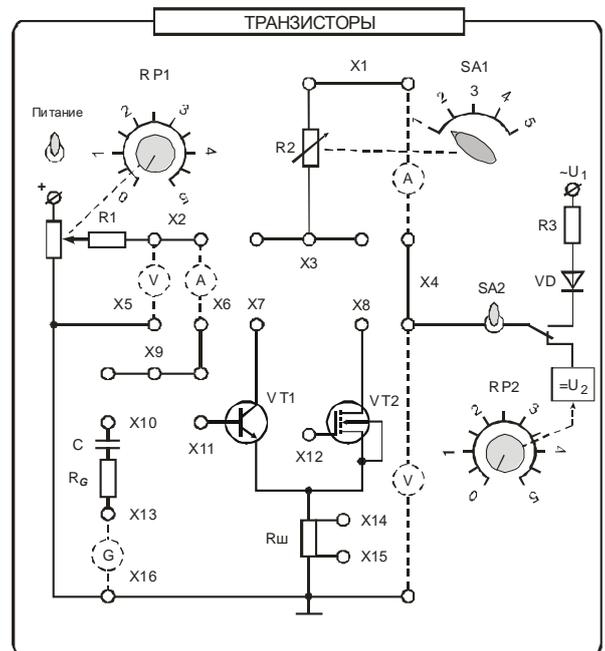


Рис.1. Лицевая панель модуля
«Транзисторы»

Таблица 2.1

№ позиции	1	2	3	4	5
Сопротивление $R2$, кОм	1	1,2	1,5	1,8	2,4

Величина постоянного напряжения, подаваемого на коллектор, регулируется потенциометром $RP2$. Переключатель $SA2$ предназначен для включения переменного или постоянного напряжения. Для подачи на коллектор только положительных полуволн переменного напряжения служит диод VD . Ток в этой цепи ограничивает резистор $R3$. Резистор R_G имитирует внутреннее сопротивление источника входного сигнала. Конденсатор C исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на положение рабочей точки покоя. Шунт $R_{ш} = 50$ Ом служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через транзистор. На

передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений (X1 – X16).

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса “Биполярный транзистор” и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схемы для всех опытов, пользуясь мнемосхемой (рис.1) и описанием;

в) используя выходные вольтамперные характеристики транзистора (рис.2), для заданного варианта построить две линии нагрузки (для заданного R_2 и для $R_2 = 0$, в последнем случае линия нагрузки параллельна оси тока I_K). В соответствии с точками пересечений нагрузочных линий и выходных характеристик построить две характеристики прямой передачи по току $I_K = f(I_6)$ при $R_2 = 0$ и при заданном R_2 . Определить область линейного усиления;

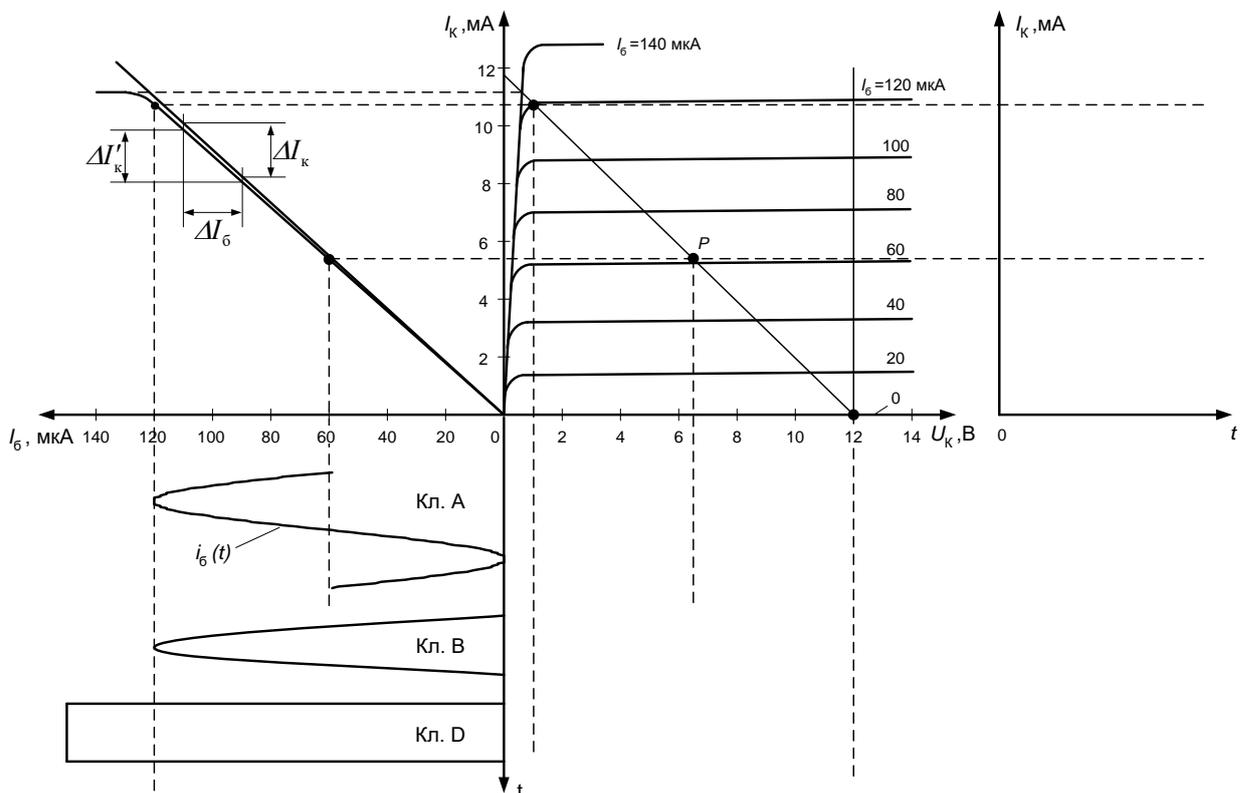


Рис.2. Нагрузочная диаграмма биполярного транзистора

г) выбрать рабочую точку покоя для классов А, В, D; по характеристикам определить токи $I_{кр}$, $I_{бр}$ и напряжение $U_{кр}$ в рабочей точке покоя P;

д) по заданным временным диаграммам переменной составляющей тока базы $i_6(t)$ (рис.2) построить временные диаграммы тока коллектора $i_K(t)$ и напряжения $u_K(t)$. Для классов А и В определить максимальную амплитуду

неискаженного синусоидального выходного сигнала, а для класса D максимальную амплитуду прямоугольных выходных импульсов.

2. Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора, включенных по схеме с общим эмиттером (ОЭ):

а) собрать схему для снятия характеристик биполярного транзистора (рис.3).

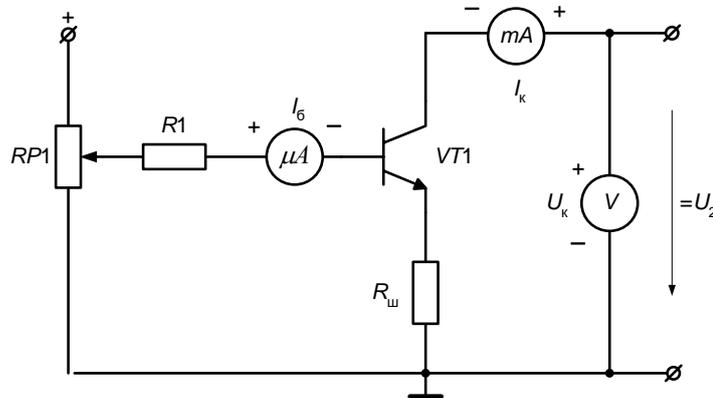


Рис.3. Схема для снятия характеристик биполярного транзистора

Для этого между гнездами X2, X6 включить многопредельный миллиамперметр A1 (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 1$ (100 мкА) и соединить перемычкой гнезда X9, X11. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение. Между гнездами X1, X4 включить второй миллиамперметр A2 (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 100$ (10 мА). Соединить перемычкой гнезда X3, X7. Включить вольтметр («Модуль вольтметров») на пределе $=20$ В между гнездами X4, X16. Тумблер SA2 установить в нижнее положение. Между гнездами X1, X3 поставить перемычку;

б) снять статическую характеристику прямой передачи по току $I_k = f(I_b)$ при U_k равном заданному значению $=U_2$ и $R_2 = 0$, используя схему на рис.3. Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на нагрузочную диаграмму транзистора, построенную при предварительной подготовке (рис.2). Изменяя ток базы от нуля до максимального значения при помощи потенциометра RP1, снять статическую характеристику прямой передачи по току. Если показания миллиамперметров A1 и A2 выйдут за допустимые значения на установленных пределах, переключите измеряемые приборы на более высокий предел;

в) снять характеристику прямой передачи по току при наличии нагрузки R_2 . Схема для снятия характеристики представлена на рис.4. При подготовке эксперимента необходимо убрать перемычку между гнездами X1, X3. С помощью переключателя SA1 установите заданное значение резистора R2, а при помощи потенциометра RP2 – заданное значение $=U_2$. В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. Изменяя ток базы от нуля до максимального значения при помощи потенциометра RP1, снять нагрузочную характеристику

прямой передачи по току. Вблизи перехода в область насыщения точки снимать чаще. Выключить тумблер «Питание» модуля «Транзисторы»;

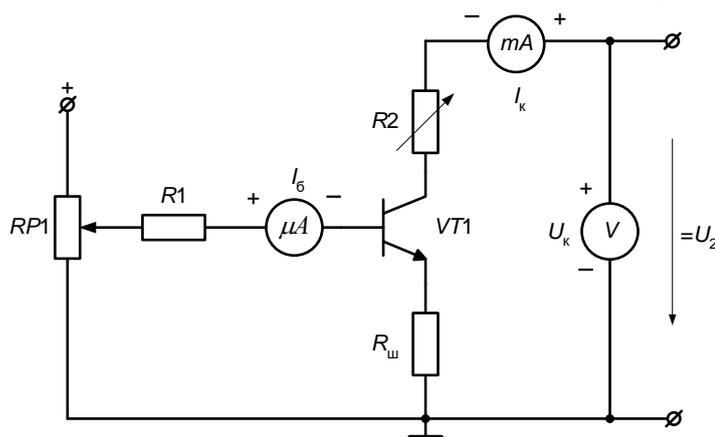


Рис.4. Схема для снятия нагрузочной характеристики прямой передачи по току

г) по построенной в п. 2в характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток $I_{б.max}$, при котором еще обеспечивается линейное усиление;

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа, используя схему на рис.5.

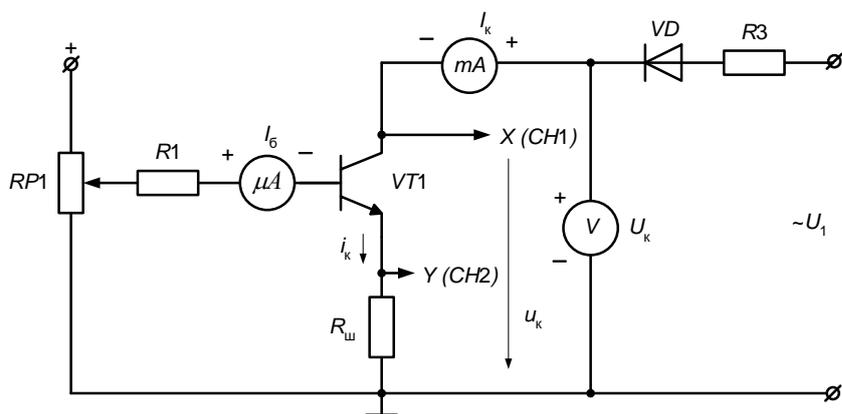


Рис.5. Схема для снятия выходных статических ВАХ при помощи осциллографа

При подготовки эксперименты необходимо переключить тумблер SA2 в верхнее положение тем самым подключить к схеме источник полуволн напряжения. Соединить перемычкой гнезда X1, X3. Подключить входы осциллографа к соответствующим точкам схемы: вход канала CH1 (X) – к гнезду X3, канала CH2 (Y) – к гнезду X14, корпус осциллографа (\perp) – к гнезду X15. Перевести переключатель развертки осциллографа в положение X/Y. Установить луч на экране осциллографа в левом нижнем углу. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение. Включить питание модуля. Изменять ток базы от нуля до максимального значения, пронаблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений тока базы: $I_{б1} = 0$, $I_{б2} = 0.5 \cdot I_{б.max}$ и

$I_{б3} = I_{б.max}$. Записать масштабы по напряжению и току. Выключить питание модуля.

3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером (ОЭ):

а) собрать схему для исследования усилительного каскада (рис.6).

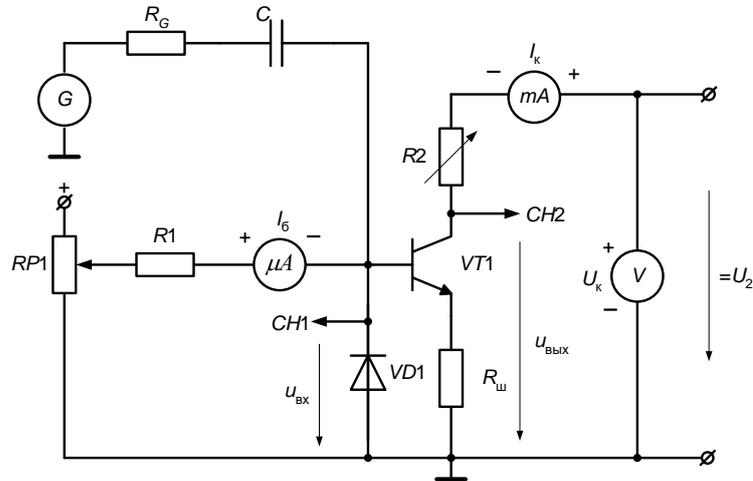


Рис.6. Схема для исследования усилительного каскада

Для этого необходимо разомкнуть точки X1, X3. К гнезду X13 подключить напряжение с выхода функционального генератора, соединив землю генератора (\perp) с гнездом X16. Соединить перемычкой гнезда X9 и X10. Переключить тумблер SA2 в нижнее положение, тем самым подключив к схеме источник постоянного напряжения $=U_2$. Подключить канал CH1 осциллографа к входу усилителя (гнезда X9, X15), а канал CH2 к выходу усилителя (гнездо X3). Переключить осциллограф в режим временной развертки. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал с частотой f в соответствии с таблицей вариантов; уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды. Переключить вход CH1 осциллографа в положение «**ВХОД ЗАКОРЧЕН**». Включить питание стенда. При токе $I_б = 0$ с помощью потенциометра RP2 установить заданное значение $=U_2$ и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра RP2!). Диод VD1 (рис.6) не показан на мнемосхеме модуля (рис.1) и предназначен для защиты базно-эмиттерного перехода транзистора от отрицательной полярности напряжения;

б) по снятой ранее характеристике прямой передачи по току при наличии нагрузки определить величины токов $I_{бр}$ и $I_{кр}$ для режима усиления класса А; по выходным характеристикам определить $U_{кр}$;

в) определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{вых.m}$ и уточнить положение рабочей точки покоя. Для этого установите постоянный ток базы равным $I_{бр}$ и определите значения тока $I_{кр}$ и напряжения $U_{кр}$ (с помощью осциллографа). Плавно увеличивайте переменный входной сигнал регулятором

амплитуды «Функционального генератора» до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратите внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости уточните положение рабочей точки покоя. По осциллографу определите максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{\text{вых.м}}$.

Зарисуйте на кальке выходное напряжение с искажениями и предельное без искажения. При зарисовке осциллограмм не забудьте нанести положение нулевой линии. Определите масштабы по напряжению и по времени. Дальнейшие измерения выходного сигнала необходимо производить в том же масштабе. Определите значения $I_{\text{бр}}$, $I_{\text{кр}}$, $U_{\text{кр}}$ при $u_{\text{вх}} = 0$ и сравните с определенными в п. 3б;

г) исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Для этого установите вновь рабочую точку $I_{\text{бр}}$, $I_{\text{кр}}$, $U_{\text{кр}}$ и максимальную амплитуду синусоидального неискаженного выходного напряжения $U_{\text{вых.м}}$. Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей тока базы $I_{\text{б}}' = 0.5 \cdot I_{\text{бр}}$ и $I_{\text{б}}'' = 1.5 \cdot I_{\text{бр}}$, при этом переменный входной сигнал изменять не следует;

д) определить коэффициент усиления каскада по напряжению k_u в классе А. Для этого установить $I_{\text{б}} = I_{\text{бр}}$, раскоротить вход $СН1$ осциллографа, переключив его на открытый вход (АС). Изменяя переменный входной сигнал, добиться синусоидального по форме максимального выходного сигнала. Измерить с помощью осциллографа амплитуды выходного $U_{\text{вых.м}}$ и входного $U_{\text{вх.м}}$ сигналов, учесть масштабы осциллографа по обоим каналам. Определить коэффициент усиления усилителя $k_u = U_{\text{вых.м}} / U_{\text{вх.м}}$;

е) определить амплитуду выходного напряжения (полуволны) в классе В. Для этого с помощью потенциометра $RP1$ установить $I_{\text{б}} = 0$ и, регулируя амплитуду входного сигнала, добиться максимальной неуплощенной полуволны синусоидального выходного напряжения; зарисовать и обработать осциллограмму. Если длительность полуволны меньше полупериода, повысьте потенциометром $RP1$ постоянный ток $I_{\text{б}}$ и, изменяя переменный входной сигнал, добейтесь воспроизведения усилителем примерно половины неискаженного синусоидального напряжения с максимальной амплитудой. Уменьшите входной сигнал до нуля и запишите ток $I_{\text{б}}$, который пришлось установить в рабочей точке покоя, чтобы не было искажений. Эта рабочая точка покоя соответствует классу АВ;

ж) исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите $I_{\text{б}} = 0$ и увеличьте входное синусоидальное напряжение регулятором амплитуды «Функционального генератора» до перехода транзистора в ключевой режим. Зарисуйте и обработайте осциллограмму выходного напряжения;

з) определите ток коллектора и напряжение на коллекторе на постоянном токе в двух точках: отсечки и насыщения. Для этого установите амплитуду входного синусоидального сигнала равным нулю. Для измерения напряжения на коллекторе переключите вольтметр, подключенный между клеммами X4, X16, к клеммам X3, X16. При помощи потенциометра RP1 установите ток базы $I_{\text{б}} = 0$ и замерьте ток $I_{\text{ко}}$ и $U_{\text{ко}}$, соответствующий точке отсечки транзистора. Для измерения тока коллектора и напряжения на коллекторе, соответствующие точки насыщения, установите потенциометр RP1 в крайне правое положение и по приборам определите ток $I_{\text{кн}}$ и напряжение $U_{\text{кн}}$.

Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов (своего подварианта) в соответствии с мнемосхемой на рис.1;
- в) результаты экспериментальных исследований: таблицы, экспериментально снятые и построенные характеристики, обработанные осциллограммы. При оформлении отчета определить и рассчитать:
 - коэффициент передачи транзистора по току $\beta = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}$ и коэффициент усиления каскада по току $k_i = \Delta I'_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}$, используя экспериментальную статическую и нагрузочную характеристики прямой передачи по току. Расчет проводить вблизи точки насыщения (рис.2);
 - дифференциальное сопротивление транзистора $r_d = \Delta U_{\text{к}} / \Delta I_{\text{к}}$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$ с использованием выходных статических ВАХ транзистора;
 - рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ($P_{\text{кр}} = U_{\text{кр}} \cdot I_{\text{кр}}$), в режиме насыщения ($P_{\text{кн}} = U_{\text{кн}} \cdot I_{\text{кн}}$) и отсечки ($P_{\text{ко}} = U_{\text{ко}} \cdot I_{\text{ко}}$) для класса D, а также средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ($P_{\text{к.ср}} = (P_{\text{кн}} + P_{\text{ко}}) / 2$), воспользовавшись экспериментальными данными;
- г) сделать выводы по работе:
 - о результатах сравнения расчетных и экспериментальных значений неискаженного напряжения;
 - о причинах расхождения экспериментальных и расчетных характеристик в пп. 1 в, г; 2 б, в, д; 3 б, в;
 - охарактеризовать влияние выбора рабочей точки покоя на форму выходного напряжения (п. 3г);
 - сравнить потери в классе А и в ключевом режиме (энергетическую эффективность этих режимов работы). Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены при работе.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия биполярного транзистора?
2. Какие существуют схемы включения биполярных транзисторов?

3. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору типа $n-p-n$ при различных схемах включения?
4. Как выглядят выходные и входные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
5. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
6. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току β ?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Как построить линию нагрузки?
9. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, АВ, В, D?
10. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером.
11. Каково назначение элементов усилителя?
12. Как определить коэффициент усиления каскада по току и напряжению (графически и экспериментально)?
13. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
14. Что такое ключевой режим?
15. Каковы преимущества ключевого режима?
16. Как определить ток коллектора и напряжение на коллекторе транзистора в точках отсечки и насыщения на постоянном токе?

Таблица вариантов

№ варианта	$=U_2, В$	$R_2, кОм$	$f, кГц$	№ варианта	$=U_2, В$	$R_2, кОм$	$f, кГц$
1.	10	1,0	0,1	13.	7	1,0	1,3
2.	10	1,2	0,2	14.	7	1,2	1,4
3.	10	1,5	0,3	15.	6	1,0	1,5
4.	10	1,8	0,4	16.	10,5	1,0	1,6
5.	10	2,4	0,5	17.	10,5	1,2	1,7
6.	9	1,0	0,6	18.	10,5	1,5	1,8
7.	9	1,2	0,7	19.	10,5	1,8	1,9
8.	9	1,5	0,8	20.	10,5	2,4	2,0
9.	9	1,8	0,9	21.	9,5	1,0	2,1
10.	8	1,0	1,0	22.	9,5	1,2	2,2
11.	8	1,2	1,1	23.	9,5	1,5	2,3
12.	8	1,5	1,2	24.	9,5	1,8	2,4

Примечание:

При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б, в (г, д – для класса А); подвариант Б – пп. 1 а, б, в (г, д – для класса В); подвариант В – пп. 1 а, б, в (г, д – для класса D).

РАБОТА №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА И ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Цель работы

Изучение характеристик, параметров и режимов работы полевого транзистора с изолированным затвором и каналом n-типа и усилительного каскада с общим истоком.

Описание лабораторной установки

В комплект лабораторной установки входят следующие модули: «Транзисторы», «Функциональный генератор», «Миллиамперметры», «Модуль мультиметров», двухканальный осциллограф.

Передняя панель модуля «Транзисторы» представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. Тумблер «Питание» предназначен для включения модуля «Транзисторы». О включенном состоянии модуля указывает световой индикатор, расположенный над тумблером. На мнемосхеме модуля изображены: полевой транзистор **VT2** с изолированным затвором и индуцированным каналом n-типа, потенциометр **RP1** для изменения напряжения, подаваемого на затвор, токоограничивающий резистор **R1**, не оказывающий практически никакого влияния на работу полевого транзистора, резистор нагрузки **R2**, сопротивление которого изменяется переключателем **SA1**. Величины сопротивлений, соответствующие положениям переключателя приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ позиции	1	2	3	4	5
Сопротивление R2, кОм	1	1,2	1,5	1,8	2,4

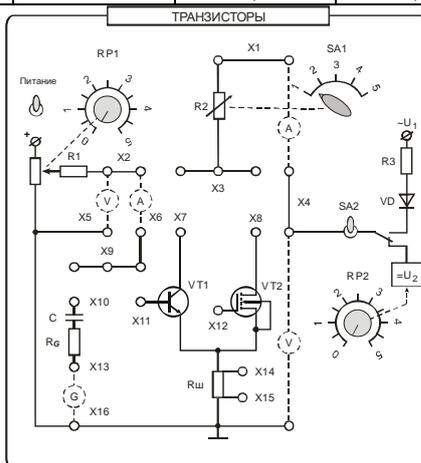


Рис. 1. Модуль «Транзисторы»

Величина постоянного напряжения, подаваемого на сток транзистора регулируется потенциометром **RP2**. Переключатель **SA2** предназначен для включения переменного или постоянного напряжения. Для подачи на сток только положительных полувольт переменного напряжения служит диод **VD**.

Ток в этой цепи ограничивает резистор R_3 . Резистор R_G имитирует внутреннее сопротивление источника входного сигнала. Конденсатор C исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на положение рабочей точки покоя. Шунт $R_{ш} = 10$ Ом служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через транзистор. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений ($X1 - X16$).

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса “Полевой транзистор” и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схемы для всех опытов, пользуясь мнемосхемой (рис.1) и описанием;

в) используя выходные вольтамперные характеристики транзистора (рис. 2), для заданного варианта построить две линии нагрузки (для заданного R_2 и для $R_2 = 0$, в последнем случае линия нагрузки параллельна оси тока стока I_c). В соответствии с точками пересечений нагрузочных линий и выходных характеристик построить две стоко-затворных характеристики $I_c = f(U_3)$ при $R_2 = 0$ и при заданном R_2 . Определить область линейного усиления;

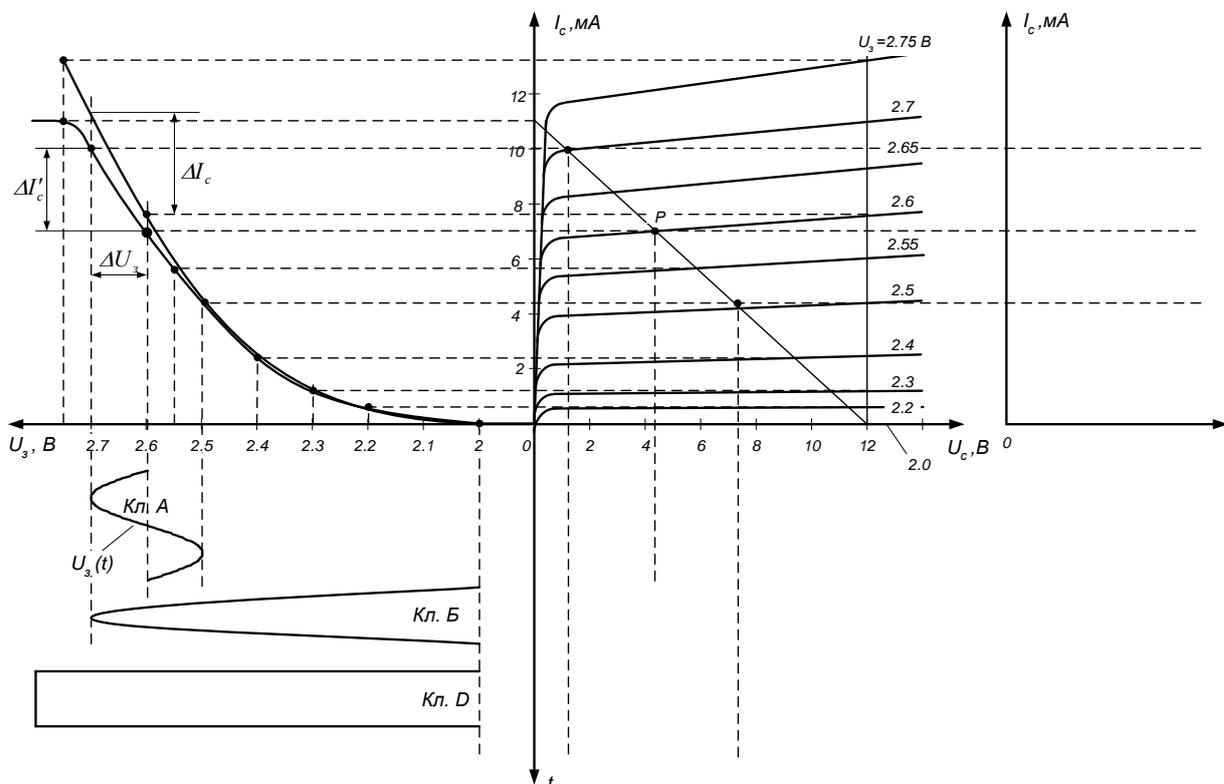


Рис. 2

г) выбрать рабочую точку покоя для классов А, В, D; по характеристикам определить токи I_{cp} , $U_{зр}$ и напряжение U_{cp} в рабочей точке покоя;

г) по заданным временным диаграммам переменной составляющей напряжения на затворе $u_3(t)$ (рис.2) построить временные диаграммы тока стока $i_c(t)$ и напряжения на стоке $u_c(t)$. Для классов А и В определить максимальную амплитуду неискаженного синусоидального выходного сигнала, а для класса D максимальную амплитуду прямоугольных выходных импульсов.

2. Экспериментальное исследование характеристик полевого транзистора, включенных по схеме с общим эмиттером (ОЭ):

а) собрать схему для снятия характеристик полевого транзистора (рис. 3).

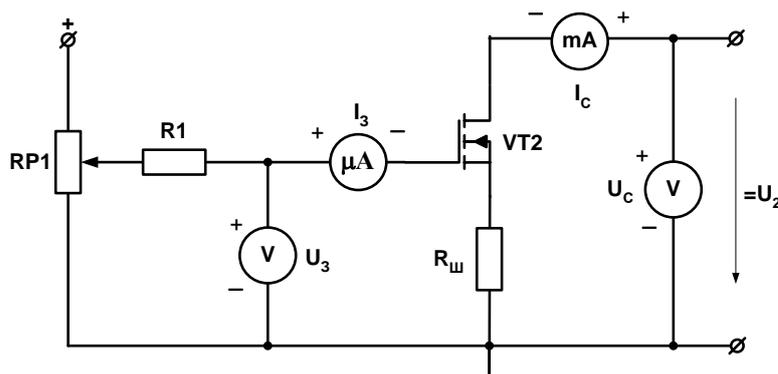


Рис. 3. Схема для снятия характеристик полевого транзистора

Для этого между гнездами **X2–X6** включить многопредельный миллиамперметр А1 (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 1$ (100 мкА) и соединить перемычкой гнезда **X9, X12**. Установить потенциометр **RP1** в крайнее левое положение. Между гнездами **X1, X4** включить второй миллиамперметр А2 (модуль «Миллиамперметры») на пределе $\times 100$ (10 мА). Соединить перемычкой гнезда **X3, X8**. Включить вольтметры («Модуль мультиметров») на пределе $=20$ В между гнездами **X2, X5** и **X4, X16**. Тумблер **SA2** установить в нижнее положение. Между гнездами **X1, X3** поставить перемычку.

б) снять стоко-затворную характеристику $I_c = f(U_3)$ при напряжении на стоке U_c равном заданному значению $=U_2$ и $R_2 = 0$, используя схему на рис. 3. Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на график, построенный при предварительной подготовке. Изменяя напряжение на затворе от нуля до максимального значения при помощи потенциометра **RP1**, снять стоко-затворную характеристику при отсутствии нагрузки. При снятии характеристики убедитесь, что ток затвора I_3 мал (составляет несколько мкА). На начальном участке характеристики точки снимать чаще;

в) снять стоко-затворную характеристику при наличии нагрузки R_2 . Схема для снятия характеристики представлена на рис. 4.

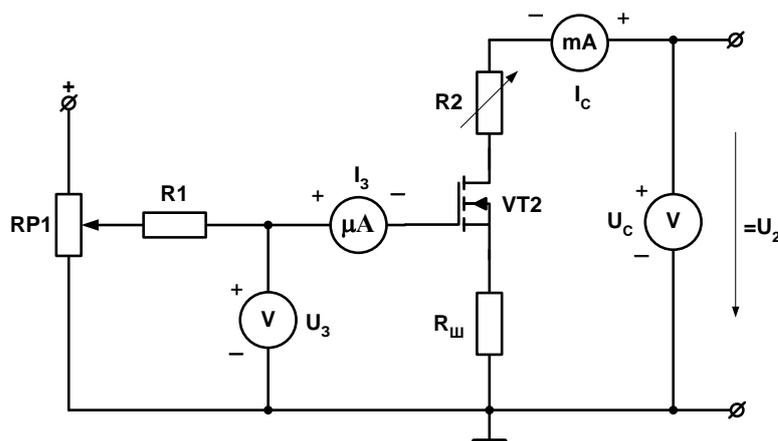


Рис. 4. Схема для снятия стоко-затворной характеристики при наличии нагрузки

При подготовке эксперимента необходимо убрать перемычку между гнездами **X1**, **X3**. С помощью переключателя **SA1** установите заданное значение резистора **R2**, а при помощи потенциометра **RP2** – заданное значение $=U_2$. В дальнейшем ручку регулировки **RP2** не трогать. Изменяя напряжение на затворе от нуля до максимального значения при помощи потенциометра **RP1**, снять стоко-затворную характеристику при наличии нагрузки. На начальном участке характеристики и вблизи перехода в область насыщения точки снимать чаще. Выключить тумблер «Питание» модуля «Транзисторы»;

г) по построенной в п. 2в характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальное напряжение на затворе $U_{з. max}$, при котором еще обеспечивается линейное усиление;

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа, используя схему на рис. 5.

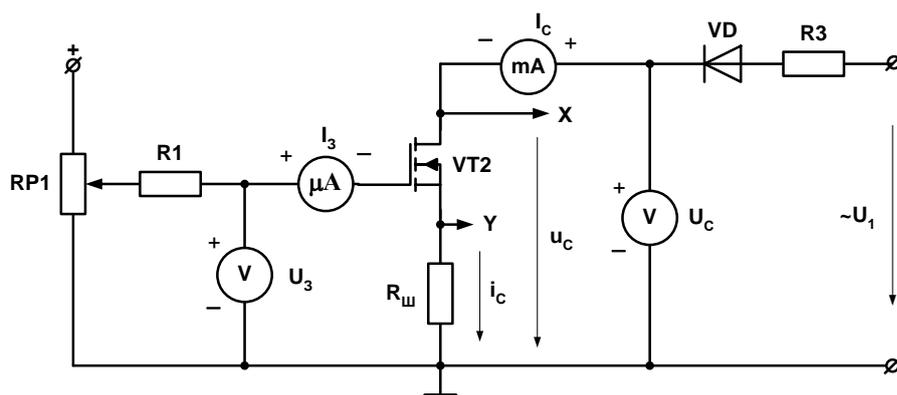


Рис. 5. Схема для снятия выходных статических ВАХ при помощи осциллографа

При подготовки эксперимента необходимо переключить тумблер **SA2** в верхнее положение тем самым подключить к схеме источник полуволн напряжения. Соединить перемычкой гнезда **X1**, **X3**. Подключить входы осциллографа к соответствующим точкам схемы: вход канала **CH1** (X) – к гнезду **X3**, канала **CH2** (Y) – к гнезду **X14**, корпус осциллографа (\perp) – к гнезду

X15. Перевести переключатель развертки осциллографа в положение X/Y. Установить луч на экране осциллографа в левом нижнем углу. Установить потенциометр **RP1** в крайнее левое положение. Включить питание модуля. Изменяя напряжение на затворе от нуля до максимального значения, пронаблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений напряжения на затворе: $U_{з(1)} = 2 В$, $U_{з(2)} = 0.5 \cdot (U_{з(1)} + U_{з.max})$ и $U_{з(3)} = U_{з.max}$. Записать масштабы по напряжению и току. Выключить питание модуля.

3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на полевом транзисторе с общим эмиттером (ОЭ):

а) собрать схему для исследования усилительного каскада (рис. 6).

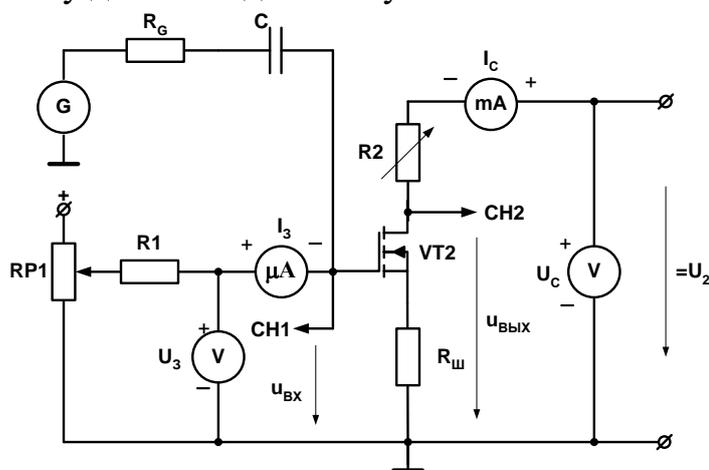


Рис. 6. Схема для исследования усилительного каскада

Для этого необходимо разомкнуть точки **X1**, **X3**. К гнезду **X13** подключить напряжение с выхода функционального генератора, соединив землю генератора (\perp) с гнездом **X16**. Соединить перемычкой гнезда **X9** и **X10**. Переключить тумблер **SA2** в нижнее положение, тем самым подключив к схеме источник постоянного напряжения $=U_2$. Подключить канал **CH1** осциллографа ко входу усилителя (гнезда **X9**, **X15**), а канал **CH2** к выходу усилителя (гнездо **X3**). Переключить осциллограф в режим временной развертки. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал с частотой **f** в соответствии с таблицей вариантов; уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды. Переключить вход **CH1** осциллографа на положение «вход закорочен». Включить питание стенда. При токе $U_3 = 0$ установить с помощью потенциометра **RP2** заданное значение $=U_2$ и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра **RP2!**);

б) по снятой ранее стоко-затворной характеристике при наличии нагрузки определить рабочую точку покоя для режима усиления класса А (напряжение на затворе $U_{зр}$ и ток стока $I_{ср}$); по выходным характеристикам определить $U_{ср}$;

в) определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{вых.m}$ и уточнить

положение рабочей точки покоя. Для этого установите постоянное напряжение на затворе $U_{зр}$ и определите значения тока $I_{ср}$ и напряжения $U_{ср}$ (с помощью осциллографа). Плавно увеличивайте переменный входной сигнал регулятором амплитуды «Функционального генератора» до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратите внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости уточните положение рабочей точки покоя. По осциллографу определите максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{вых.м}$.

Зарисуйте на кальке выходное напряжение с искажениями и предельное без искажения. При зарисовке осциллограмм не забудьте нанести положение нулевой линии. Определите масштабы по напряжению и по времени. Дальнейшие измерения выходного сигнала необходимо производить в том же масштабе. Определите значения $U_{зр}$, $I_{ср}$, $U_{ср}$ при $u_{вх} = 0$ и сравните с определенными в п. 3б;

г) исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Для этого установите вновь рабочую точку покоя для класса А $U_{зр}$, $I_{ср}$, $U_{ср}$ и максимальную амплитуду синусоидального неискаженного выходного напряжения $U_{вых.м}$. Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей напряжения на затворе $U'_з = 0.5 \cdot (U_{з(1)} + U_{зр})$ и $U''_з = 1.5 \cdot (U_{з(1)} + U_{зр})$, при этом переменный входной сигнал изменять не следует;

д) определить коэффициент усиления каскада по напряжению k_u в классе А. Для этого установить $U_з = U_{зр}$, раскоротить вход **СН1** осциллографа, переключив его на открытый вход (**АС**). Изменяя переменный входной сигнал, добиться синусоидального по форме максимального выходного сигнала. Измерить с помощью осциллографа амплитуду выходного $U_{вых.м}$ и входного $U_{вх.м}$ сигналов, учесть масштабы осциллографа по обоим каналам. Определить коэффициент усиления усилителя $k_u = U_{вых.м} / U_{вх.м}$;

е) определить амплитуду выходного напряжения (полуволны) в классе В. Для этого с помощью потенциометра **RP1** установить $U_з = 2B$ и, регулируя амплитуду входного сигнала, добиться максимальной неуплощенной полуволны синусоидального выходного напряжения; зарисовать и обработать осциллограмму. Если длительность полуволны меньше полупериода, повысьте потенциометром **RP1** постоянное напряжение $U_з$ и, изменяя переменный входной сигнал, добейтесь воспроизведения усилителем ровно половины неискаженного синусоидального напряжения с максимальной амплитудой. Уменьшите входной сигнал до нуля и запишите напряжение $U_з$, которое пришлось установить в рабочей точке покоя, чтобы не было искажений. Эта рабочая точка покоя соответствует классу АВ;

ж) исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите $U_3 = 2V$ и увеличьте входное синусоидальное напряжение регулятором амплитуды «Функционального генератора» до перехода транзистора в ключевой режим. Зарисуйте и обработайте осциллограмму выходного напряжения;

з) определите ток стока и напряжение стока на постоянном токе в двух точках: отсечки и насыщения. Для этого установите амплитуду входного синусоидального сигнала равным нулю. При помощи потенциометра **RP1** установите напряжение на затворе $U_3 = 2V$ и замерьте ток I_{co} , соответствующий точке отсечки транзистора. Для измерения напряжения на стоке U_{co} переключите вольтметр, подключенный между клеммами **X4**, **X16**, к клеммам **X3**, **X16**. Подумайте почему при определении тока и напряжения в точке отсечки сначала был измерен ток I_{co} , а затем был подключен вольтметр? Сравните показания токов I_{co} до и после подключения вольтметра. Сделайте вывод о влиянии вольтметра на показание тока I_{co} .

Для измерения тока стока и напряжения на стоке, соответствующие точки насыщения, установите потенциометр **RP1** в крайне правое положение и по приборам определите ток I_{cn} и напряжение U_{cn} .

Содержание отчета

- 1) Наименование и цель работы;
- 2) Принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов;
- 3) Результаты экспериментальных исследований: таблицы, экспериментально снятые и построенные характеристики, обработанные осциллограммы. При оформлении отчета **определить и рассчитать**:
 - а) крутизну стоко-затворной характеристик при отсутствии нагрузки $S = \Delta I_c / \Delta U_3$ и при наличии нагрузки $S' = \Delta I_c' / \Delta U_3$. Расчет проводить на линейном участке стоко-затворной характеристики (рис. 2).
 - б) дифференциальное сопротивление транзистора $r_d = \Delta U_c / \Delta I_c$ при $U_3 = const$ с использованием выходных статических ВАХ транзистора;
 - в) рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ($P_{cp} = U_{cp} \cdot I_{cp}$), в режиме насыщения ($P_{cn} = U_{cn} \cdot I_{cn}$) и отсечки ($P_{co} = U_{co} \cdot I_{co}$) для класса D, а также средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ($P_{с.ср} = (P_{cn} + P_{co})/2$), воспользовавшись экспериментальными данными.
- 4) Выводы:
 - а) сделать вывод о результатах сравнения расчетных и экспериментальных значений неискаженного напряжения;
 - б) сделать выводы о причинах расхождения экспериментальных и расчетных характеристик в пп. 1 в, г; 2 б, в, д; 3 б, в;

в) охарактеризовать влияние выбора рабочей точки покоя на форму выходного напряжения (п. 3г);

г) сравнить потери в классе А и в ключевом режиме (энергетическая эффективность этих режимов работы). Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены.

Контрольные вопросы

17. Каков принцип действия полевого транзистора с изолированным затвором?

18. Какие существуют схемы включения полевых транзисторов?

19. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к полемому транзистору с изолированным затвором и каналом n-типа, в усилительном каскаде с общим истоком?

20. Как выглядят выходные и стоко-затворные статические характеристики в схеме с общим истоком?

21. Что такое статическая стоко-затворная характеристика? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?

22. Можно ли в лабораторной работе снять стоко-затворную характеристику полевого транзистора при помощи осциллографа?

23. Как определить крутизну стоко-затворной характеристики?

24. Как снять статические выходные характеристики?

25. Как построить линию нагрузки?

26. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, АВ, В, D?

27. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим истоком.

28. Каково назначение элементов усилителя?

29. Как определить коэффициент усиления каскада по напряжению (графически и экспериментально)?

30. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?

31. Что такое ключевой режим?

32. Каковы преимущества ключевого режима?

33. Как определить ток стока и напряжение на стоке транзистора в точках отсечки и насыщения на постоянном токе?

34. Почему при определении тока стока и напряжения на стоке в точке отсечки сначала необходимо измерить ток I_{co} , а затем только подключить вольтметр для измерения напряжения U_{co} ?

Таблица вариантов

№ варианта	$=U_2, В$	$R_2, кОм$	$f, кГц$	№ варианта	$=U_2, В$	$R_2, кОм$	$f, кГц$
13.	10	1,0	0,1	25.	10,5	1,0	1,3
14.	10	1,2	0,2	26.	10,5	1,2	1,4
15.	10,5	1,0	0,3	27.	11	1,0	1,5
16.	10,5	1,2	0,4	28.	11	1,2	1,6
17.	11	1,0	0,5	29.	9	1,0	1,7
18.	11	1,2	0,6	30.	9	1,2	1,8
19.	9	1,0	0,7	31.	9,5	1,0	1,9
20.	9	1,2	0,8	32.	9,5	1,2	2,0
21.	9,5	1,0	0,9	33.	11	1,0	2,1
22.	9,5	1,2	1,0	34.	11	1,2	2,2
23.	10	1,0	1,1	35.	10,5	1,0	2,3
24.	10	1,2	1,2	36.	10,5	1,2	2,4

Примечание:

При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б, в (г, д – для класса А); подвариант Б – пп. 1 а, б, в (г, д – для класса В); подвариант В – пп. 1 а, б, в (г, д – для класса D).

РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ, СИМИСТОРОВ, ЗАПИРАЕМЫХ ТИРИСТОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

Изучение характеристик и параметров тиристоров – обычных (асимметричных), симметричных и запираемых. Ознакомление с применением этих приборов в качестве управляемых выпрямителей и в преобразователях электрической энергии.

Описание лабораторной установки

В лабораторной работе используются следующие модули: «Тиристоры», «Миллиамперметры», «Вольтметры». Для проведения лабораторной работы необходим двухканальный осциллограф.

Лицевая панель модуля тиристоров представлена на рис.1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: тиристор $VS1$, симметричный тиристор (симистор) $VS2$, запираемый тиристор $VS3$, активное и индуктивное сопротивления нагрузки однополупериодного выпрямителя $R_H = 150 \text{ Ом}$ и $L_H = X$. Потенциометр $RP1$ служит для изменения напряжения в цепи управления. Ток управления тиристором ограничен резистором $R_{огр} = 8.2 \text{ кОм}$. Система управления (СУ), формирует управляющие импульсы, сдвигаемые по фазе при изменении входного управляющего напряжения $U_G = 0 \dots 15 \text{ В}$. Шунт $RS1 = 10 \text{ Ом}$ служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через тиристор, а $RS2 = 10 \text{ Ом}$ для осциллографирования тока управления. Усилитель $DA1$ позволяет усиливать сигнал тока, снимаемый с шунта $RS1$. Также на передней панели размещены гнезда для осуществления внешних соединений $X1 - X21$, ручка регулировки потенциометра $RP1$, переключатель вида нагрузки $SA1$ (активной – положение вверх или активно-индуктивной – положение вниз) и переключатель каналов подачи управляющих импульсов на соответствующие тиристоры $SA3$. Переключатель $SA2$ подает на схему либо постоянное (+15 В), либо переменное (~12 В) напряжение.

Подача питания выполняется при включении сетевого выключателя, установленного на модуле.

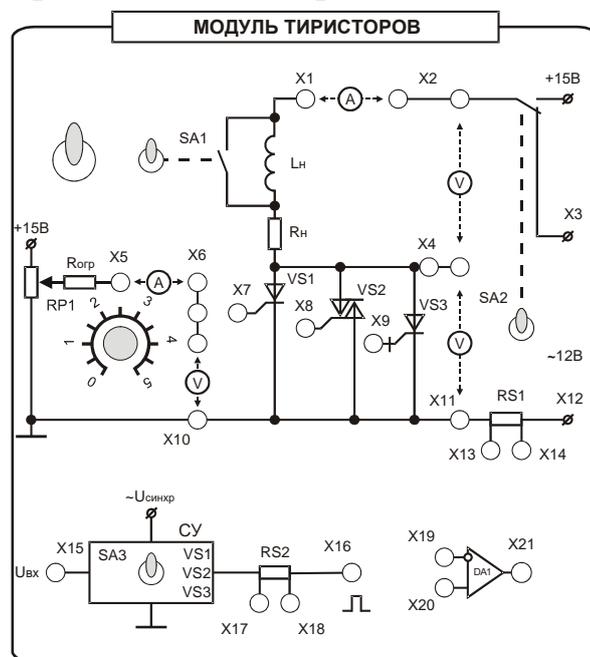


Рис.1. Лицевая панель модуля «Тиристоры»

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Тиристоры» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь мнемосхемой начертить схемы для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;

в) начертить диаграмму управления тиристора в соответствии с рис.2. Для заданных по варианту E_y и $R_{огр}$ построить линию нагрузки, проверить, находится ли она в

разрешенной области.

Определить, в каких пределах можно изменять $R_{огр}$ при заданном по варианту E_y .

г) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения $u = \sim 12V$, выпрямленного

напряжения (или напряжения на нагрузке)

u_d , анодного тока i_a и напряжения на вентиле

u_b для заданных углов

управления α ; диаграммы построить для управляемого выпрямителя на обычном и запираемом тиристоре и для регулятора переменного напряжения на симисторе;

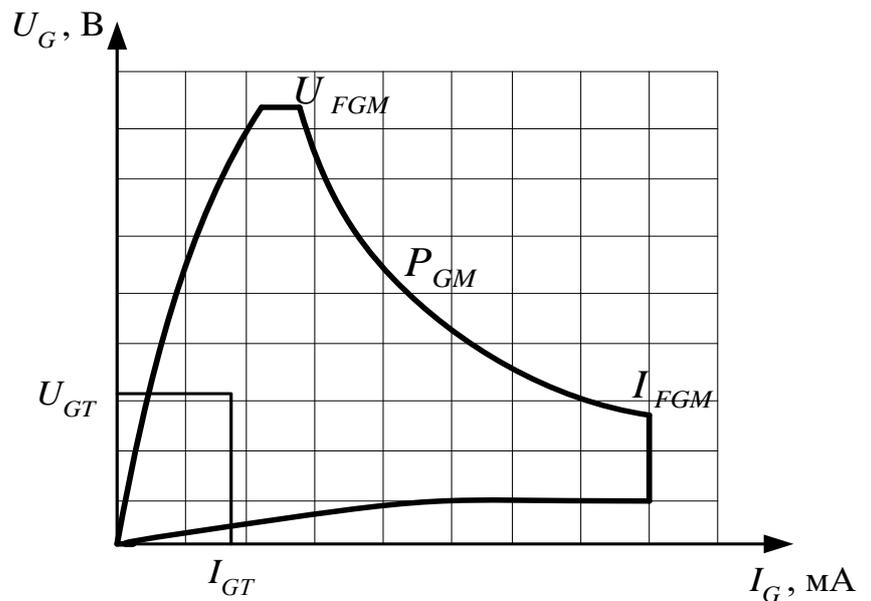


Рис.2. Диаграмма управления

2. Экспериментальное исследование тиристора:

а) собрать схему в соответствии с рис.3 для исследования тиристора на постоянном токе. Замкнуть перемычкой гнезда X6, X7. Переключить тумблеры SA1, SA2 в верхнее положение. Для измерения тока управления I_G и анодного тока I_a включить многопредельные миллиамперметры A1 на пределе 10 мА, а A2 на пределе 100 мА соответственно между гнездами X5–X6 и X1–X2. Для измерения напряжения на вентиле U_b и напряжения управления U_G включить вольтметры на пределе ≈ 20 В между клеммами X4 – X11 и X6 – X10 соответственно.

б) определить отпирающий постоянный ток управления I_{GT} и отпирающее постоянное напряжение управления U_{GT} , при которых происходит включение тиристора, если на аноде постоянное напряжение +15 В. Для этого плавно вращать ручку потенциометра RP1, увеличивая ток управления I_G , зафиксировать, при каком значении тока управления I_{GT} и напряжения управления U_{GT} включится тиристор. О включении тиристора судить по резкому уменьшению напряжения на аноде U_b и увеличению анодного тока I_a .

Нанести найденные значения тока и напряжения управления на диаграмму управления;

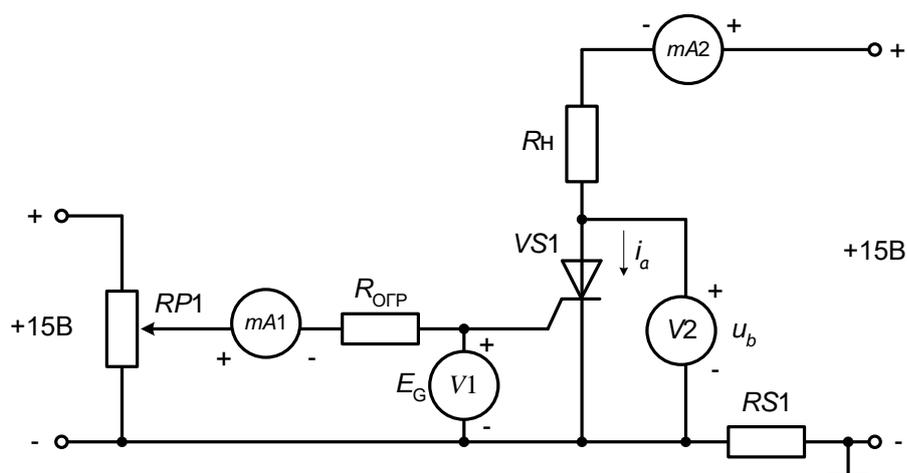


Рис.3. Схема для исследования тиристора на постоянном токе

в) исследовать возможность выключения тиристора по цепи управления и по анодной цепи. Для этого, включив тиристор, уменьшать до нуля ток управления I_G . Выключить тиристор, разорвав цепь анода. Наблюдая за изменением анодного тока I_a и напряжения U_b , сделать вывод об управляемости тиристора, сформулировав условия включения и выключения тиристора. Выключить питание модуля;

г) снять и нанести на диаграмму управления входную характеристику тиристора $U_G = f(I_G)$ (при разорванной анодной цепи). Проверить, входит ли она в область существования входных характеристик.

По входной характеристике определить дифференциальное сопротивление $r_T = dU_G / dI_G$ вблизи точки I_{GT} и U_{GT} .

д) собрать схему для исследования тиристора на переменном токе для получения анодной ВАХ тиристора на экране осциллографа (рис.4). Для этого переключить тумблер SA2 в нижнее положение. Подключить вход усилителя DA1 к шунту RS1, соединив гнезда X13–X19 и X14–X20, подать на вход CH2 (Y) осциллографа напряжение с гнезда X21, пропорциональное току в анодной цепи i_a ,

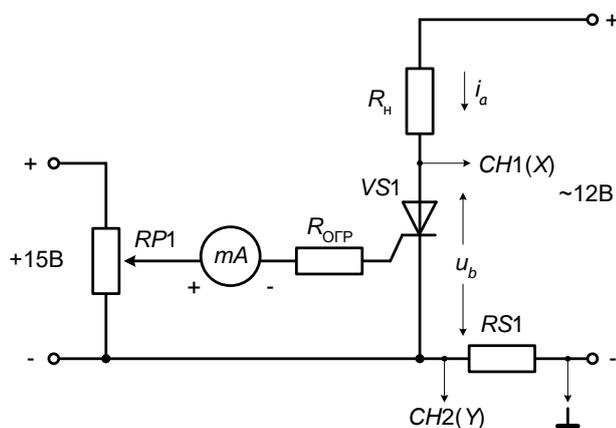


Рис.4.Схема для исследования тиристора на переменном токе

а на вход $CH1$ (X) – анодное напряжение тиристора u_b с гнезда $X4$ (при этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y). Корпус осциллографа (\perp) присоединить к гнезду $X14$. Зарисовать ВАХ тиристора при трех разных значениях тока управления I_G , определить масштабы по току и напряжению. Выключить питание;

е) определить по осциллограммам максимальное напряжение между анодом и катодом $U_{b\max}$ в открытом состоянии при максимальном анодном токе $I_{a\max}$, ток удержания $I_{уд}$, пороговое напряжение $U_{T(T0)}$ и дифференциальное сопротивление r_T ;

3. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на тиристоре:

а) используя схему на рис.4, оценить качество регулирования угла управления α за счет изменения постоянного тока управления I_G . Для этого подключить вход $CH2$ осциллографа к гнезду $X4$, а корпус (\perp) – к клемме $X14$ (напряжение на тиристоре u_b). Переключить тумблер $SA1$ в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки L_H . Включить питание модуля, попробовать регулировать угол управления α , изменяя ток управляющего электрода I_G . Определить предельный угол управления и оценить качество регулирования. Выключить питание модуля;

б) исследование регулировочных свойств однополупериодного выпрямителя на основе фазового управления. Для этого на управляющий электрод подать импульсы от системы управления (СУ), соединив перемычками клеммы $X6 - X15$ и $X7 - X16$ (рис.5). Тумблер $SA3$ установить в верхнее положение соответствующее $VS1$;

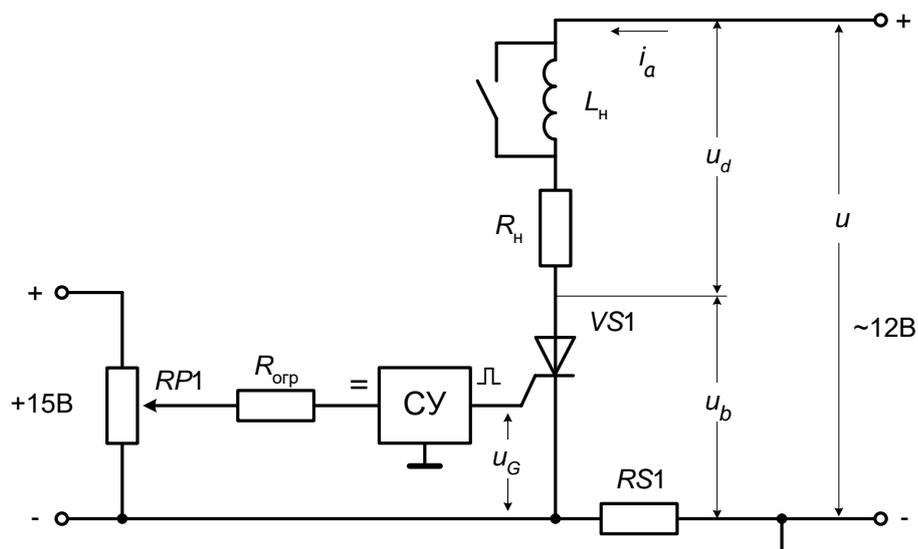


Рис.5. Схема однополупериодного выпрямителя

в) изучить влияние угла управления на напряжение на нагрузке u_d и определить возможный диапазон изменения угла управления α . Для этого подключить вход $CH2$ осциллографа к гнезду $X2$, а корпус (\perp) – к клемме $X14$ (напряжение на тиристоре u_a). Включить питание модуля, регулировать угол

управления α , изменяя напряжение управления. Оценить качество регулирования тиристора от фазового управления. Выключить питание модуля;

д) снять осциллограммы переменного напряжения подаваемого на тиристор $u = \sim 12\text{В}$ (подключить вход *CH1* осциллографа к гнезду *X2*) и анодного тока i_a (снимается с шунта *RS1*- вход *CH1* осциллографа к гнезду *X13*, а корпус (\perp) – к клемме *X14*), затем снять отдельно осциллограммы напряжения на нагрузке u_d (вход *CH1* осциллографа подключить к гнезду *X2*, а корпус (\perp) – к клемме *X4*); напряжения на тиристоре u_b (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду *X4*, а корпус (\perp) – к клемме *X14*) и при активной нагрузке в диодном режиме работы тиристора и при заданном по варианту угле управления;

е) переключить тумблер *SA1* в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки L_n ; снять те же осциллограммы при заданном по варианту угле управления и активно-индуктивной нагрузке;

ж) сравнить возможности регулирования с помощью импульсов и от постоянного тока.

з) снять регулировочную характеристику тиристора $U_d=f(\alpha)$ для диапазона регулирования угла α определенного в п.3, в. Для этого переключить тумблер *SA1* обратно в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки L_n . Между клеммами *X2* и *X4* подключить модуль «Вольтметров» для измерения напряжения на нагрузке U_d . Вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду *X3*, а корпус (\perp) – к клемме *X14* - напряжение на тиристоре u_b . Изменяя ток управляющего электрода I_G , осуществлять регулирование угла управления α . По осциллограмме u_b определять угол управления в соответствии с рис.6 и выражением (1)

$$\alpha = t_\alpha \cdot 180^\circ \cdot 2 \cdot f_{\text{сети}} \quad (1)$$

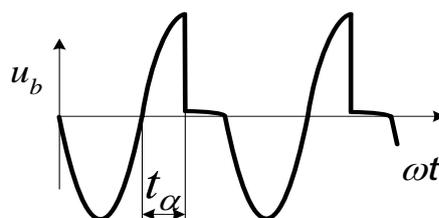


Рис.6. Временная диаграмма напряжения на тиристоре u_b для определения угла управления α

4. Экспериментальное исследование однофазного регулятора переменного напряжения на симисторе:

а) собрать схему регулятора рис.7. Подключить вольтметр между гнездами *X2–X4* (напряжение на нагрузке u_d). Подключить вход *CH2* осциллографа к гнезду *X4*, а корпус (\perp) к *X11* (напряжение на тиристоре u_b). Переключить тумблер *SA1* в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки L_n ;

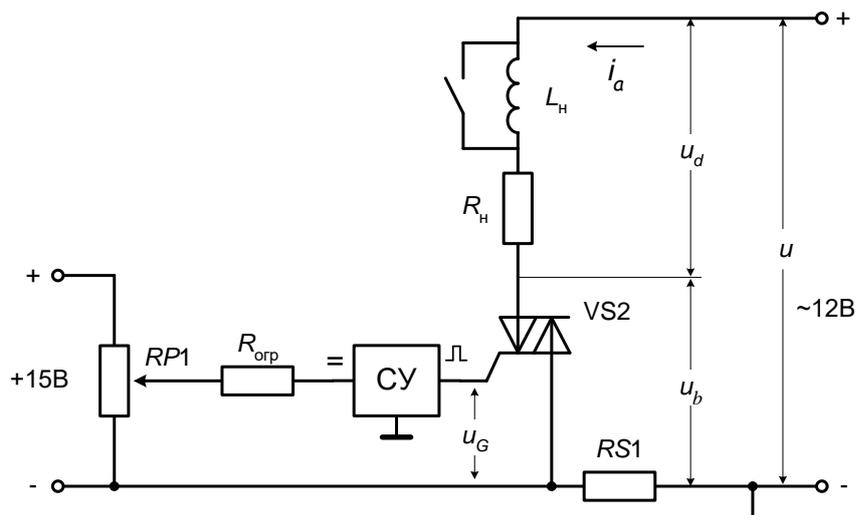


Рис.7.Схема для исследования однофазного регулятора переменного напряжения на симисторе

б) подать на управляющий электрод импульсы от системы управления (СУ), предварительно установив тумблер SA3 в среднее положение VS2; убрать переключку X6 – X8 и соединить гнезда X8–X16; соединить гнезда X6 – X15;

в) изучить влияние угла управления на напряжение на нагрузке (u_d) и определить возможный диапазон изменения угла управления;

г) снять осциллограммы переменного напряжения подваемого на симистор $u \approx 12\text{В}$, на нагрузке u_d , напряжения на симисторе u_b и анодного тока i_a (снимается с шунта RS1) при активной нагрузке в диодном режиме работы симистора и при заданном по варианту угле управления по аналогии с п.3;

е) переключить тумблер SA1 в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки L_H ; снять те же осциллограммы при заданном по варианту угле управления и активно-индуктивной нагрузке. Сравнить полученные результаты с п.4 г.

5. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на запираемом тиристоре:

а) собрать схему выпрямителя рис.8. Подключить вольтметр между гнездами X2–X4 (напряжение на нагрузке u_d). Подключить вход CH2 осциллографа к гнезду X4, а корпус (\perp) к X11 (напряжение на тиристоре u_b). Переключить тумблер SA1 в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки L_H ;

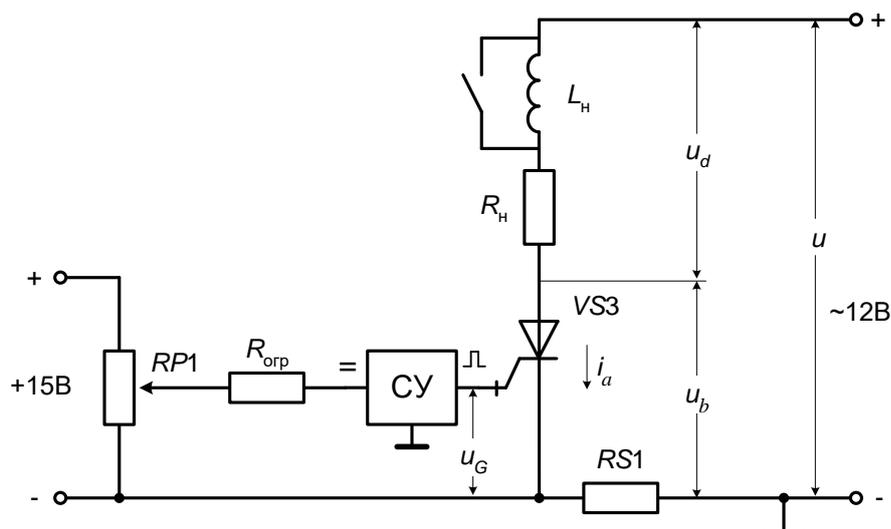


Рис.8.Схема для исследования однополупериодного выпрямителя на запираемом тиристоре

б) подать на управляющий электрод импульсы от системы управления (СУ), переключив тумблер SA3 в положение VS3; убрать перемычку X6 – X9 и соединить гнезда X9 – X16; соединить гнезда X6 – X15;

в) изучить влияние угла управления на напряжение на нагрузке u_d и определить возможный диапазон изменения угла управления;

г) снять осциллограммы переменного напряжения, подаваемого на запираемый тиристор $u = \sim 12\text{В}$, на нагрузке u_d , напряжения на тиристоре u_b и анодного тока i_a (снимается с шунта RS1) при активной нагрузке в диодном режиме работы тиристора и при заданном по варианту угле управления, по аналогии с п.3;

е) переключить тумблер SA1 в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки L_H ; снять те же осциллограммы при заданном по варианту угле управления и активно-индуктивной нагрузке;

Обратить внимание на возникающие перенапряжения. Объяснить их причину.

Содержание отчета

а) наименование и цель работы;

б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой показанной на рис.1;

в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;

г) экспериментально снятые и построенные характеристики;

д) обработанные осциллограммы;

е) выводы по работе. Обязательно ответить на контрольные вопросы 11-

13.

Контрольные вопросы

1. Поясните вид выходной ВАХ тиристора.
2. Поясните вид входной ВАХ тиристора.
3. Как определить пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии?
4. Как снять выходную ВАХ тиристора?
5. Сравните свойства тиристорov и транзисторов по управляемости.
6. Объясните назначение диаграммы управления тиристора.
7. Чем отличаются выходные ВАХ тиристора и симистора?
8. Как выключить запираемый тиристор?
9. Как работает однополупериодный управляемый выпрямитель?
10. Что такое угол управления? По какой осциллограмме его можно определить?
11. На что влияет угол управления?
12. Можно ли в однофазном однополупериодном выпрямителе увеличить угол управления более 90 град. При управлении постоянным током?
13. От чего зависит форма напряжения на нагрузке?
14. Можно ли выполнить управляемый выпрямитель на транзисторе? Если нет, то почему, если да, то как?

Таблица вариантов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α , град	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
E_y , В	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	13
№ варианта	10 0	40	50	60	70	80	90	45	55	65	75	10 0
E_y , В	12	11	10	9	8	7	6	5	4	7	8	9
α , град	25	30	35	40	45	50	55	60	15	20	25	30

Примечание:

При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют п. 1а, б, в, г для тиристора; Б - выполняют п. 1а, б, г для симистора; В - выполняют п. 1а, б, г для запираемого тиристора.

РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ (ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ, ИНТЕГРАТОР И КОМПАРАТОРЫ)

Цель работы

Изучение схем включения и характеристик инвертирующего усилителя, интегратора, двухвходового и регенеративного компараторов на базе операционного усилителя.

Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуется операционный усилитель (ОУ) **КР140УД608**. Передняя панель лабораторного модуля «Операционный усилитель» представлена на рис.1.

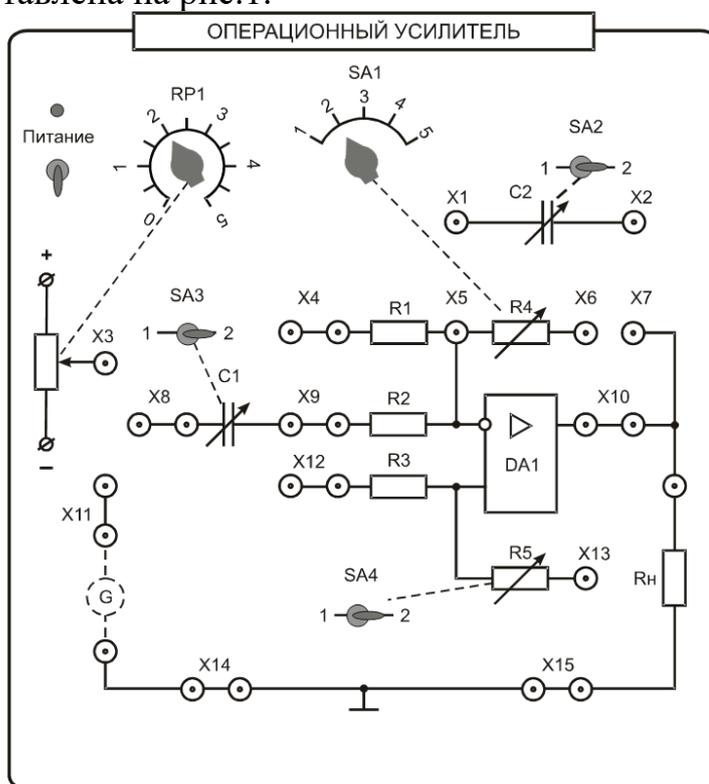


Рис.1. Модуль «Операционный усилитель»

На ней изображена мнемосхема исследуемого усилителя и установлены регулирующие и коммутирующие элементы. С помощью потенциометра **RP1** на вход усилителя (клеммы **X4**, **X8**, **X9**, **X12**) может быть подано регулируемое постоянное напряжение с положительной так и отрицательной полярностью или переменный сигнал от функционального генератора, подключаемого между клеммами **X11** и **X14**. С помощью переключателей **SA1...SA4** изменяются параметры соответствующих элементов схемы (табл.1).

Таблица 1

SA1	SA2	SA3	SA4
R4, кОм	C2, нФ	C1, нФ	R5, кОм
20; 50; 100; 150; 200	6,8; 10	1,5; 10	200; 400

Большому значению на шкалах переключателей соответствуют большие значения номиналов резисторов и конденсаторов.

В качестве источника переменного входного сигнала используется «Модуль функциональный генератор». Измерение постоянных напряжений осуществляется при помощи модуля «Мультиметры». Для осциллографирования сигналов применяется двухканальный осциллограф.

Сопrotивления на входах операционного усилителя равны $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ кОм}$; сопротивление нагрузки $R_n = 10 \text{ кОм}$. Напряжение питания ОУ двухполярное $E_{II} = \pm 15 \text{ В}$.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса "Характеристики и параметры усилителей", "Обратные связи в усилителях", "Аналоговые интегральные схемы", "Схемы включения операционного усилителя"; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схемы для всех опытов, пользуясь мнемосхемой (рис.1) и описанием;

в) сделать вывод формулы для коэффициента передачи инвертирующего усилителя (рис. 3) и определить его для заданного варианта. Нарисовать временные диаграммы $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$ для заданного значения сопротивления R_4 и формы входного сигнала в соответствии с таблицей вариантов. Амплитуду входного сигнала выбрать так, чтобы при заданных значениях резисторов R_1 и R_4 усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Коэффициент передачи инвертирующего усилителя

$$k_{II} = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = -\frac{R_4}{R_1};$$

г) сделать вывод формулы для выходного напряжения интегратора (рис.5). Нарисовать диаграммы u_{ex} и $u_{вых}$ для заданной частоты f знакопеременного прямоугольного сигнала u_{ex} . При этом предварительно найти амплитуду U_m прямоугольного сигнала u_{ex} , при которой выходной сигнал $u_{вых}$ интегратора имеет пилообразную форму с амплитудой U_{nm} , равной максимальному напряжению на выходе ОУ $U_{вых.max} = 15 \text{ В}$.

Напряжение на выходе интегратора при постоянном входном сигнале изменяется по линейному закону

$$u_{вых}(t) = -\frac{U_{ex} \cdot t}{T_u} + U_{вых}(0), \quad (1)$$

где $T_u = R_1 \cdot C_2$ – постоянная времени интегрирования;

$U_{вых}(0)$ – начальное напряжение на конденсаторе.

При периодическом прямоугольном входном сигнале напряжение на выходе интегратора имеет пилообразную форму с амплитудой U_{nm} (рис. 2).

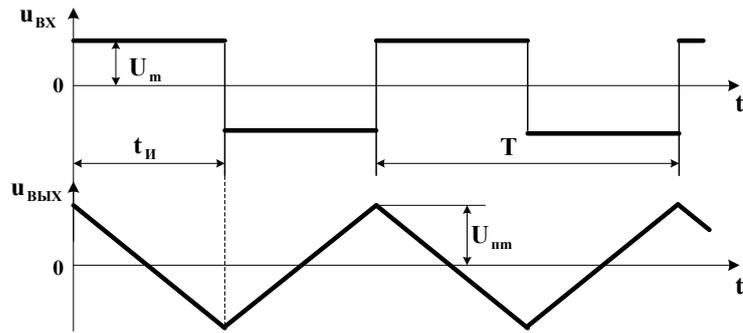


Рис.2. Временные диаграммы сигналов интегратора

В реальной схеме интегратора вследствие дрейфа нуля ОУ сигнал на выходе $u_{\text{вых}}$ оказывается смещенным относительно нуля. Для получения симметричного сигнала $u_{\text{вых}}$ относительно нуля примем $U_{\text{нм}} = U_{\text{вых.мах}}$ и найдем амплитуду прямоугольного входного сигнала U_m . Для интервала времени t_u (рис.2) подставим в уравнение (1): $u_{\text{вых}}(t) = -U_{\text{нм}} = -U_{\text{вых.мах}}$; $t = t_u = T/2$; $U_{\text{вх}} = U_m$; $U_{\text{вых}}(0) = U_{\text{нм}} = U_{\text{вых.мах}}$, тогда

$$U_m = \frac{4 \cdot U_{\text{нм}} \cdot T_u}{T}, \quad (2)$$

где $T = 1/f$ – период прямоугольного входного сигнала.

д) сделать вывод формулы коэффициента передачи цепи обратной связи регенеративного компаратора (рис.7). Нарисовать временные диаграммы входного и выходного напряжений в регенеративном компараторе, если на инвертирующий вход подано синусоидальное напряжение с амплитудой 2.5 В и частотой 500 Гц, а на неинвертирующий – постоянное опорное напряжение $U_{\text{оп}}$. Предварительно определить ширину петли гистерезиса $U_{\text{Г}} = 2 \cdot U_{\text{пор}}$, где $U_{\text{пор}}$ – напряжение порога срабатывания.

$$|U_{\text{пор}}| = \frac{R_3}{R_3 + R_5} \cdot |U_{\text{вых.мах}}|,$$

где $U_{\text{вых.мах}} = \pm E = \pm 15 \text{ В}$; $\pm E$ – напряжение источника питания ОУ.

2. Экспериментальное исследование инвертирующего усилителя:

а) собрать схему инвертирующего усилителя согласно рис.3.

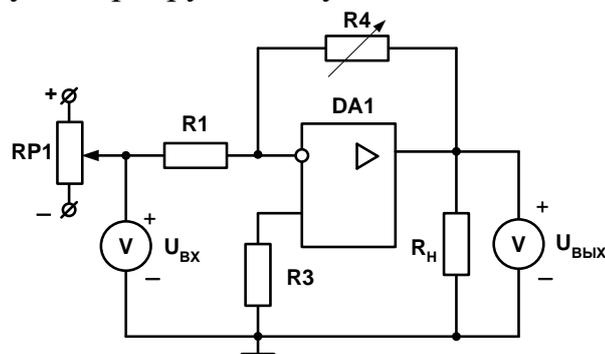


Рис.3. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

Для этого собрать цепь отрицательной обратной связи по напряжению, соединив перемычками гнезда **X6 - X7**. К инвертирующему входу усилителя (клемма **X4**) подключить источник постоянного регулируемого напряжения, соединив клеммы **X3 - X4**. Неинвертирующий вход усилителя (гнездо **X12**) заземлить, соединив перемычками клеммы **X12 - X14**. Между гнездами **X4 - X14** и **X10 - X14** подключить вольтметры («Модуль мультиметры») на пределе ≈ 20 В для измерения напряжений на входе и выходе усилителя. Установить переключатель **SA1** в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления **R4**. Включить питание модуля «Операционный усилитель».

б) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх1}})$ для заданного по варианту сопротивления обратной связи **R4**, используя схему на рис.3. Для этого изменять постоянное напряжение на входе, регулируемое при помощи потенциометра **RP1**. Данные заносить в таблицу. По построенной характеристике определить коэффициент передачи инвертирующего усилителя и сравнить его с расчетным значением, полученным в 1 в.

в) снять амплитудные характеристики усилителя на переменном токе при помощи осциллографа для трех значений **R4**: заданного и двух соседних. Для этого необходимо подключить «Функциональный генератор» между клеммами **X11 - X14** и соединить перемычкой гнезда **X4 - X11**, отсоединив источник постоянного регулируемого напряжения и вольтметры с входа и выхода усилителя (рис.4).

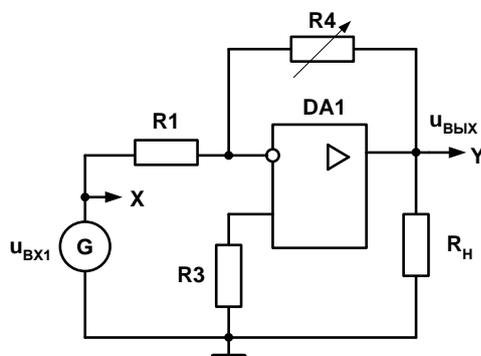


Рис.4. Схема инвертирующего усилителя для снятия амплитудной характеристики на переменном токе

Для снятия зависимости одной величины от другой надо использовать два канала осциллографа **CH1** и **CH2**. Вход **CH2 (Y)** осциллографа подключается к выходу усилителя (клемма **X10**), вход **CH1 (X)** – к инвертирующему входу усилителя (клемма **X4**), а корпус осциллографа «⊥» к **X14**. Развертку луча переключить в положение **X/Y**. Установить на выходе функционального генератора переменное синусоидальное напряжение (\sim) частотой порядка **150 Гц**. Определить по характеристикам коэффициенты передачи;

г) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) инвертирующего усилителя $k_{\Pi} = F(f)$ при $u_{\text{вх}} = \text{const}$ для заданного значения **R4**, используя

схему на рис.4. Для этого переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Входной сигнал выбрать так, чтобы усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Изменяя частоту синусоидального входного сигнала $u_{вх}$ модулем «Функциональный генератор», замерять при помощи осциллографа амплитуду выходного сигнала $u_{вых}$. Результаты заносить в таблицу. Построить АЧХ и по ней определить полосу пропускания усилителя для коэффициента частотных искажений на высоких частотах $M_{\phi} = \sqrt{2}$;

д) зарисовать осциллограммы $u_{вх}(t)$, $u_{вых}(t)$ для частоты 1 кГц, используя предыдущую схему из опыта 2 г. Форму входного сигнала $u_{вх}(t)$ установить в соответствии с таблицей вариантов. Определить масштабы по времени и осям Y и X. Обработать осциллограммы. Выключить модуль.

3. Исследование интегратора:

а) собрать схему интегратора согласно рис.5, соединив перемычками клеммы X1 и X5, X2 и X7, X4 и X11, X12 и X14. Между клеммами X11 и X14 подключить «Функциональный генератор». Установить переключатель SA2 в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения емкости C2;

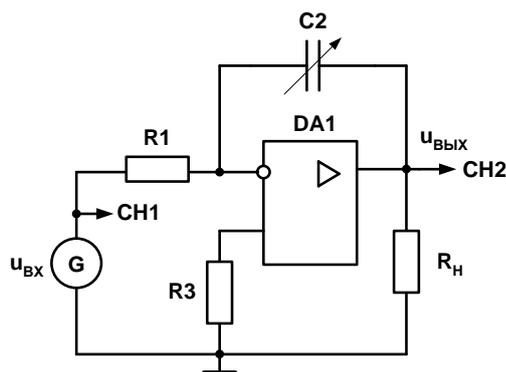


Рис. 5. Принципиальная схема интегратора

б) исследовать работу интегратора в режиме генератора пилообразного напряжения (рис.5). Для этого на функциональном генераторе установить прямоугольное знакопеременное напряжение с частотой f , заданной в таблице вариантов, и амплитудой U_m , рассчитанной в п. 1 в. Напряжение на входе $u_{вх}$ и выходе $u_{вых}$ контролировать при помощи осциллографа, подключив вход CH2 осциллографа к выходу усилителя (клемма X10), вход CH1 – к инвертирующему входу усилителя (клемма X4), а корпус осциллографа «L» – к X14. При необходимости подстроить амплитуду U_m знакопеременного прямоугольного сигнала так, чтобы пилообразный выходной сигнал интегратора стал симметричным относительно нуля с амплитудой $U_{nm} = U_{вых.мах}$ (рис. 2). Зарисовать осциллограммы $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$. Сравнить полученные результаты с расчетом по значениям U_m, f, U_{nm} ;

в) снять и построить зависимость амплитуды входного напряжения от частоты $U_{nm} = F(f)$ при постоянной амплитуде пилообразного напряжения $U_{nm} = U_{вых.мах}$, используя схему на рис.5. Амплитуды U_m и U_{nm} замерять при помощи осциллографа. Результаты заносить в таблицу. Построить зависимость $U_{nm} = F(f)$. Выключить питание модуля.

4. Исследование двухвходового компаратора:

а) собрать схему двухвходового компаратора рис.6.

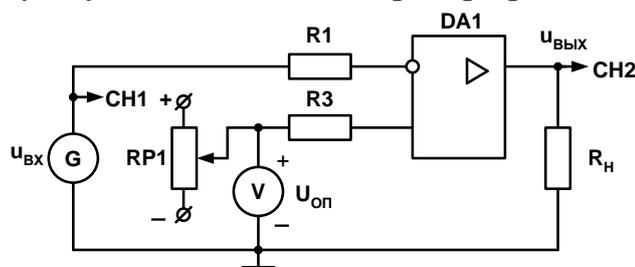


Рис.6. Принципиальная схема двухвходового компаратора

Для этого источник опорного напряжения подключить к неинвертирующему входу ОУ (соединить перемычкой клеммы **X3** и **X12**). Для измерения опорного напряжения U_{on} между клеммами **X12** и **X14** включить вольтметр («Модуль мультиметров») на пределе ≈ 20 В. Между клеммами **X11**, **X14** подключить источник входного сигнала $u_{вх}$ («Модуль функционального генератора») и соединить перемычкой гнезда **X4** и **X11**. Включить питание модуля «Операционный усилитель».

б) снять осциллограммы работы компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений. Для этого канал **CH2** (**Y**) осциллографа подключить к выходной клемме **X10** операционного усилителя, а канал **CH1** (**X**) – к входному переменному напряжению (клемма **X4**), корпус осциллографа «**⊥**» соединить с гнездом **X14**. Установить амплитуду переменного синусоидального напряжения «Фнкционального генератора» на уровне 2.5 В с частотой 500 Гц и на протяжении всех опытов не изменять. Опорное напряжение U_{on} установить согласно таблице вариантов. Зарисовать с экрана осциллографа входное $u_{вх}$ и выходное $u_{вых}$ напряжения. Определить масштабы по осям **Y** и **X**;

в) снять передаточную характеристику компаратора, переключив развертку осциллографа в положение **X/Y**. Зарисовать характеристику на кальку;

г) снять зависимость коэффициента заполнения положительных импульсов $\gamma^+ = t_u^+ / T$ от величины опорного напряжения: $\gamma^+ = f(U_{on})$. Здесь t_u^+ - длительность положительных импульсов выходного напряжения; T - период выходного напряжения компаратора. Опорное напряжение изменять в пределах, которое обеспечивает работу компаратора (от -2.5 до 2.5 В). Длительность периода T и положительных импульсов t_u^+ замерять по экрану

осциллографа, а напряжение $U_{оп}$ - вольтметром. Измеренные величины заносить в таблицу.

5. Исследование регенеративного компаратора с положительной обратной связью (триггера Шмидта):

а) собрать схему двухвходового компаратора с положительной обратной связью согласно рис. 7, соединив клеммы **X10** и **X13**.

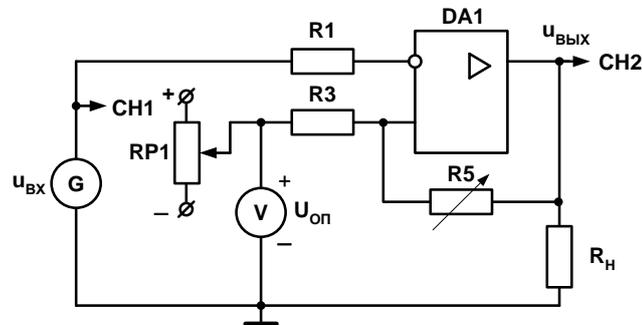


Рис.7. Принципиальная схема регенеративного компаратора

б) снять осциллограммы работы компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений, повторив последовательность действий п.3 б);

в) снять передаточные характеристики компаратора для двух значений сопротивлений обратной связи (**R5**) при заданном опорном напряжении, переключив развертку осциллографа в положение **X/Y**. Зарисовать характеристики на кальке. Определить ширину петли гистерезиса U_T передаточной характеристики и сделать сравнение с расчетом (п.1 д). Выключить питание модуля;

Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов, в соответствии с мнемосхемой показанной на рис.1;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) выводы по работе:
 - о влиянии сопротивления обратной связи на коэффициент усиления инвертирующего усилителя и его амплитудную характеристику;
 - о влиянии частоты входного напряжения и емкости конденсатора обратной связи на амплитуду выходного пилообразного напряжения в интеграторе;
 - о влиянии сопротивления в цепи обратной связи регенеративного компаратора на его передаточную характеристику.

Контрольные вопросы

1. Что называется операционным усилителем?
2. Каковы основные параметры операционного усилителя?
3. Почему операционный усилитель, включенный без обратной связи, работает как релейный элемент?
4. Какие допущения принимаются для операционного усилителя при выводе коэффициента усиления с различными обратными связями?
5. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
6. Какой знак будет иметь выходное напряжение инвертирующего усилителя, если на вход подано отрицательное напряжение?
7. Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
8. Как определить полосу пропускания усилителя?
9. Назвать свойства усилителей с положительной обратной связью.
10. Назвать свойства усилителей с отрицательной обратной связью.
11. Как получить на выходе интегрирующего усилителя пилообразное напряжение?
12. Как определяется постоянная времени интегрирования?
13. Какое соотношение должно быть между длительностью импульса, поступающего на вход интегрирующего усилителя, и постоянной времени интегрирования для того, чтобы на выходе избежать ошибки интегрирования?
14. Что называется компаратором?
15. Зачем в компараторе применяется положительная обратная связь?
16. Как получить периодические прямоугольные импульсы на выходе компаратора?
17. Как зависит вид характеристики передачи регенеративного компаратора от сопротивления обратной связи?
18. Как снять амплитудную характеристику инвертирующего усилителя или компаратора при помощи осциллографа?

Таблица вариантов

№ варианта	Инвертирующий усилитель		Интегратор		Компаратор с положительной обратной связью	
	R_4 , кОм	Форма $u_{\text{вых}}$	C_2 , нФ	f , Гц	$U_{\text{он}}$, В	R_5 , кОм
1	20	~	10	60	1,6	200
2	50	~	10	80	-1,6	200
3	100	~	10	100	1,4	200
4	150	~	10	120	-1,4	200
5	200	~	10	140	1,2	200
6	20	~	10	160	-1,2	200
7	50	~	10	180	1,0	200
8	100	~	10	200	-1,0	200
9	150	~	10	220	0,8	200
10	200	~	10	240	-0,8	200

11	20	Л	6,8	260	1,7	400
12	50	Л	6,8	280	-1,7	400
13	100	Л	6,8	300	1,5	400
14	150	Л	6,8	320	-1,5	400
15	200	Л	6,8	340	1,3	400
16	20	~	6,8	360	-1,3	400
17	50	~	6,8	380	1,1	400
18	100	~	6,8	400	-1,1	400
19	150	~	6,8	420	0,9	400
20	200	Л	6,8	440	-0,9	400
21	100	Л	10	150	0,7	200
22	200	~	10	250	-0,7	200
23	20	~	6,8	350	0,6	400
24	50	Л	6,8	450	-0,6	400

Примечание:

Для студентов, получивших подвариант: **А** – выполнить п.1 а, б, в; **Б** - выполнить п.1 а, б, г; **В** - выполнить п.1 а, б, д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельман М. В. Преобразовательная техника : Учеб. пособие. Ч. 1 / Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Электропривод и автоматизация пром. установок; ЮУрГУ. - Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 2000. - 105,[1] с.: ил.. URL: http://www.lib.susu.ac.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000198763
2. Горбачев Г. Н. Промышленная электроника : Учеб. для энерг. спец. вузов / Под ред. В. А. Лабунцова. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 319,[1] с.: ил.
3. Гусев В. Г. Электроника : Учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов. - 2-е изд., перераб. и доп.. - М. : Высшая школа, 1991. - 621,[1] с.: ил.
4. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учеб. пособие для энергет. и электромехан. специальностей вузов / Ю. С. Забродин. - 2-е изд., стер.. - М. : Альянс, 2013. - 495, [1] с.: ил.
5. Электротехника : учеб. пособие : В 3 кн.. Кн. 2 / Ю. П. Галишников, А. Л. Шестаков, М. В. Гельман и др.; под ред. П. А. Бутырина и др.; Юж.-Урал. гос. ун-т, Моск. энергет. ин-т (техн. ун-т). - Челябинск ; М. : Издательство ЮУрГУ, 2004. - 709, [1] с.: ил.