

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Южно-Уральский государственный университет
Филиал в г. Златоусте
Кафедра «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов»

681.38(07)
Т19

И.Н. Таранов, О.В. Терентьев, П.А. Торопыгин

АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие к выполнению лабораторных работ

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2007

УДК 621.38(075.8)

T19

*Одобрено
учебно-методической комиссией филиала ЮУрГУ в г. Златоусте*

*Рецензенты:
В.В. Цыпышев, О.А. Щетина*

Таранов, И.Н.
T19 Аналоговая электроника: учебное пособие к выполнению лабораторных работ / И.Н. Таранов, О.В. Терентьев, П.А. Торопыгин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 97 с.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и очно-заочной форм обучения электротехнических специальностей при проведении лабораторного практикума по дисциплинам «Аналоговая электроника» и «Физические основы электроники».

УДК 621.38(075.8)

© Издательство ЮУрГУ, 2007

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

Назначение и технические характеристики

Учебно-лабораторный комплекс «Аналоговая электроника» (в дальнейшем изложении комплекс) предназначен для обучения студентов различных специальностей средних специальных и высших учебных заведений, изучающих дисциплины «Физические основы электроники», «Схемотехника», «Основы радиоэлектроники». Комплекс может быть использован также для обучения учащихся профессионально-технических училищ и слушателей отраслевых учебных центров повышения квалификации инженерно-технических работников.

В состав комплекса входят (рис. 1):

- каркас;
- модуль питания и измерений;
- модуль «Функциональный генератор»;
- лабораторные модули;
- соединительные проводники со штырями.

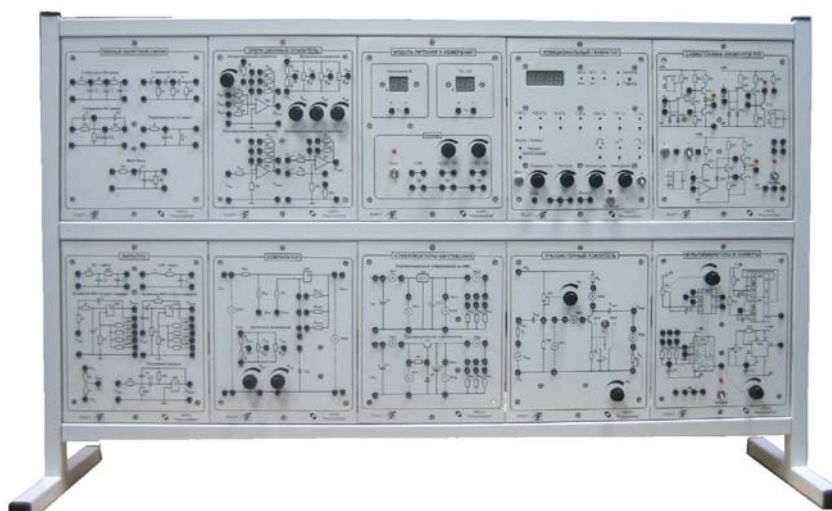


Рис. 1. Общий вид лабораторного комплекса

Технические характеристики комплекса

Количество мест для обучаемых.....	2–3
Электропитание от сети, В.....	220
Частота питающего напряжения, Гц	50
Потребляемая мощность, не более, Вт	50
Габаритные размеры (без ПК), мм	1004×190×610
Масса, не более, кг	30
Диапазон рабочих температур, °С	–10...+35
Влажность, %.....	до 80

Электрические измерения

Модуль питания и измерений (ручная версия)

Модуль питания и измерений является вспомогательным модулем, позволяющим проводить измерения электрических величин при проведении лабораторных работ. Он используется для измерения постоянных и переменных токов и напряжений в цепях схем лабораторных модулей, а также служит источником стабилизированного и регулируемых напряжений.

Основные технические характеристики

Напряжение питания сети, В	220 ± 20
Максимальный допустимый ток стабилизированного источника, А	0,65
Диапазон напряжений регулируемых источников, В	0...12
Максимальный допустимый ток регулируемых источников, А	0,65
Диапазон измерений цифрового вольтметра, В	0...15
Диапазон измерений цифрового амперметра, мА	0...100
Диапазон частот измеряемого переменного напряжения и тока, Гц	50–10 ⁵
Габаритные размеры, мм, не более:	
высота	250
ширина	200
глубина	120

Устройство модуля и краткое описание

Передняя панель модуля разбита на несколько функциональных полей:

- верхнее поле – измерительное, включающее в себя два цифровых прибора для измерения как постоянного, так и переменного напряжения и тока, с выводом результата измерения на двухразрядный семисегментный индикатор;
- нижнее поле – питание, служащее для подачи напряжения всего лабораторного комплекса и регулируемых напряжений.

Внешний вид модуля с органами управления приведен на рис. 2.

Модуль питания и измерений обеспечивает:

- независимую установку двух напряжений в пределах от 0 до 12 В;
- вывод результатов измерений на семисегментный индикатор;
- измерение как постоянного, так и переменного напряжения и тока.

Индикация режимов работы цифровых приборов:

- мигание десятичной точки соответствующего разряда свидетельствует об измерении переменного сигнала;
- при несоблюдении полярности постоянного входного напряжения на индикаторе высвечивается комбинация «-0.»;
- при подаче напряжения более 15 В на индикаторе высвечивается комбинация «ПП» (переполнение).

Модуль питания и измерений имеет защиту от короткого замыкания в нагрузке.

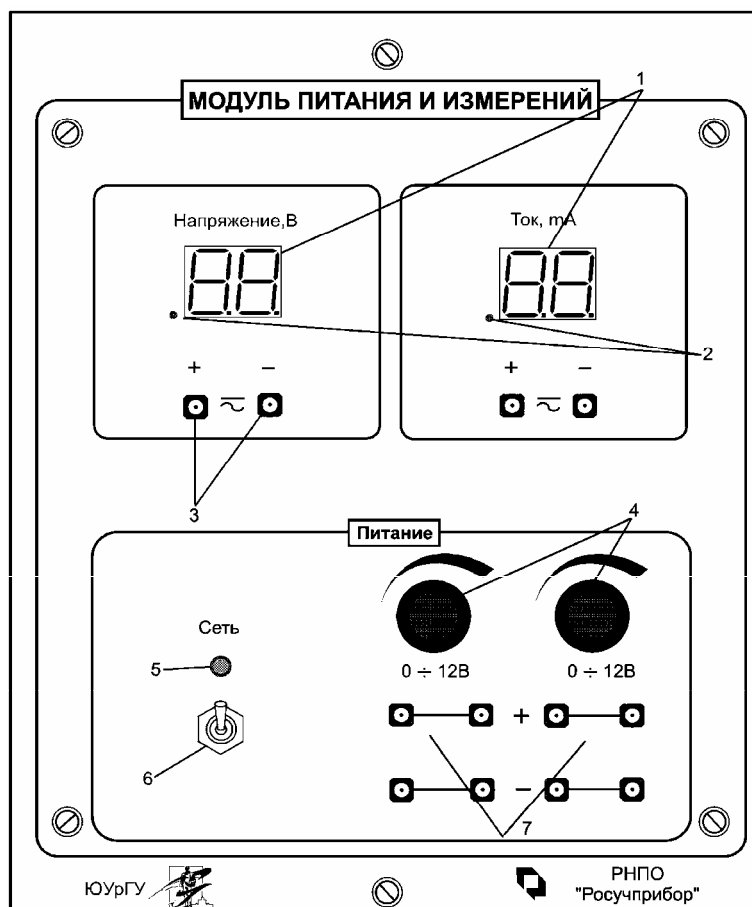


Рис. 2. Внешний вид модуля питания и измерений: 1 – семисегментные индикаторы вывода результата измерения тока и напряжения; 2 – десятичная точка вывода старшего разряда; 3 – гнезда для включения измерительного прибора в цепь исследуемой схемы; 4 – регуляторы напряжений; 5 – светодиод, индицирующий наличие напряжения питания; 6 – тумблер включения питания лабораторного комплекса; 7 – гнезда регулируемого напряжения

Порядок работы

1. Установить тумблер 6 в нижнее положение, соответствующее выключенному состоянию лабораторного комплекса.
2. Подключить нагрузку к источникам питания, соблюдая полярность, регуляторы напряжения 4 установить в положение минимума (против часовой стрелки до упора).
3. Включить соответствующий измерительный прибор при помощи соединительных проводников в схему лабораторного стенда, соблюдая полярность подключения.
4. Включить тумблер 6, о включенном состоянии модуля будет свидетельствовать свечение семисегментных индикаторов 1 и светодиода 5. Размерность результата измерения нанесена на передней панели модуля, при снятии измерений следует учитывать положение десятичной точки на индикаторе.

Техническая безопасность

1. Модуль питания и измерений нельзя разбирать без отключения от сети.
2. Не допускать попадания какой-либо жидкости внутрь модуля.

3. Перед применением модуля питания и измерений проверьте провода, соединители на отсутствие в них трещин или разрывов.

4. Во избежание порчи модуля питания и измерений, не измеряйте напряжения, значения которых могут превысить 15 В относительно общего провода данного лабораторного модуля.

Модуль ввода/вывода (компьютерная версия)

Лабораторный модуль питания и измерений предназначен для компьютерной версии комплекса «Цифровая электроника». Он состоит из аппаратной части и программного обеспечения.

Аппаратная часть модуля ввода/вывода включает в себя:

- переднюю панель с гнездами для подключения устройств;
- на обратной стороне модуля расположены разъемы для подключения к сетевому блоку питания и LPT или USB-порту персонального компьютера.

Программное обеспечение модуля ввода/вывода включает в себя:

- программу для редактирования базы данных по лабораторным работам «DataBase»;
- программное обеспечение для выполнения лабораторных работ «Analizator»;
- мультимедийное руководство к выполнению лабораторных работ.

Минимальные требования к аппаратному и программному обеспечению: компьютер 486 и выше, операционная система Windows-98 и выше, 2 Мб на жестком диске.

Основные технические характеристики

Число цифровых входных каналов	4
Число аналоговых входных каналов.....	4
Максимальная частота выборок АЦП на канал, кв/с	320
Входное сопротивление каждого канала, кОм	100
Формат выходных данных	последовательный
Диапазоны измеряемых напряжений, В	± 10
Разрядность АЦП с возможностью выбора, бит.....	8 или 10
Ошибка АЦП, бит.....	± 1
Габаритные размеры, мм не более:	
высота	248
ширина	200
глубина	120

Краткое описание и устройство модуля

Внешний вид модуля с органами управления приведен на рис. 3.

Для работы с модулем ввода/вывода необходимо:

- 1) соединить каналы модуля с исследуемым лабораторным модулем посредством проводников;
- 2) для измерения тока на лицевой панели предусмотрены датчики тока.

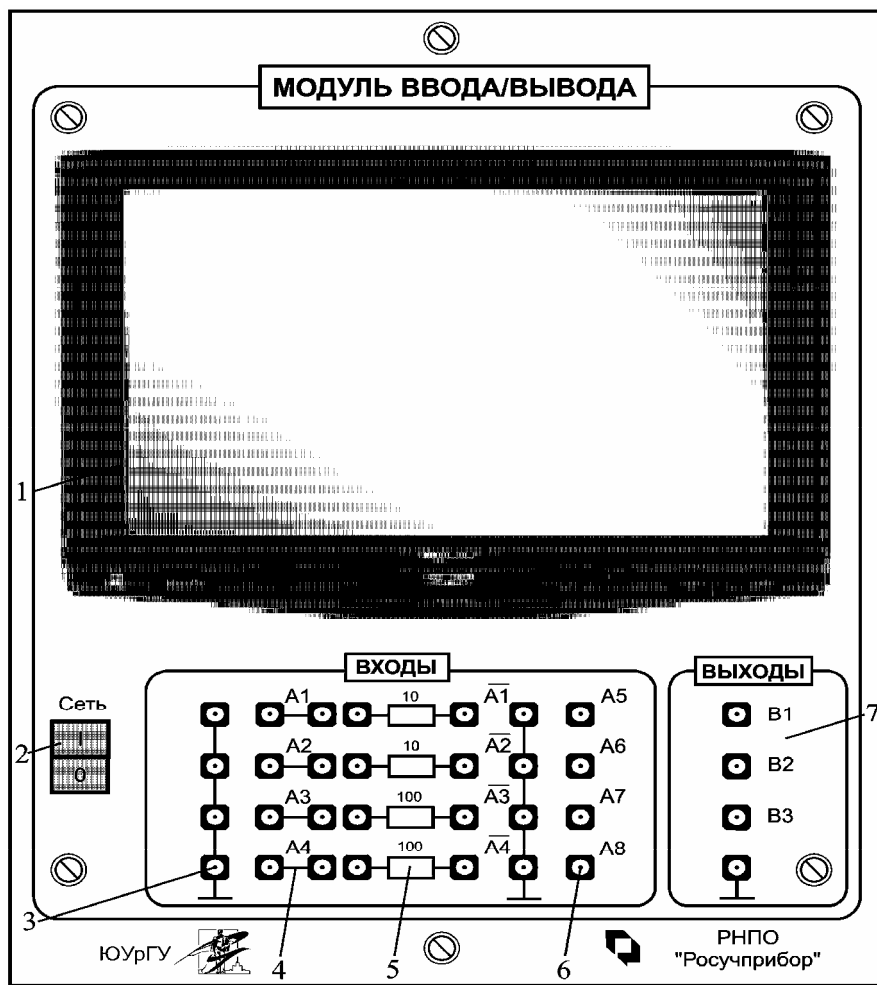


Рис. 3. Внешний вид модуля ввода/вывода:
1 – сенсорный монитор; 2 – тумблер включения питания; 3 – общий вывод;
4 – аналоговые входы; 5 – датчики тока; 6 – цифровые входы; 7 – аналоговые выходы

Задание сигналов. Модуль «Функциональный генератор»

Функциональный генератор представляет собой источник сигнала в диапазоне частот до 1 МГц с малыми искажениями. Внешний вид лабораторного модуля приведён на рис. 4.

Для наблюдения и исследования формы сигнала необходимо подключить осциллограф (ручная версия) или «Модуль питания и измерений» (компьютерная версия). Встроенный частотомер может быть использован для измерения частоты внешнего сигнала до 1 МГц.

Основные функции модуля:

- генерация сигнала синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной формы;
- диапазон частот разбит на семь декад: 0,5 Гц...1 МГц;
- регулировка скважности/асимметрии сигнала;
- управление частотой генератора;
- основной выход с возможностью смещения сигнала постоянным напряжением и регулируемой амплитудой сигнала и ограничением выходного тока;

– встроенный частотомер может быть использован для измерения частоты внешнего сигнала до 1 МГц либо периода посредством нажатия на кнопку «Частота-Период».

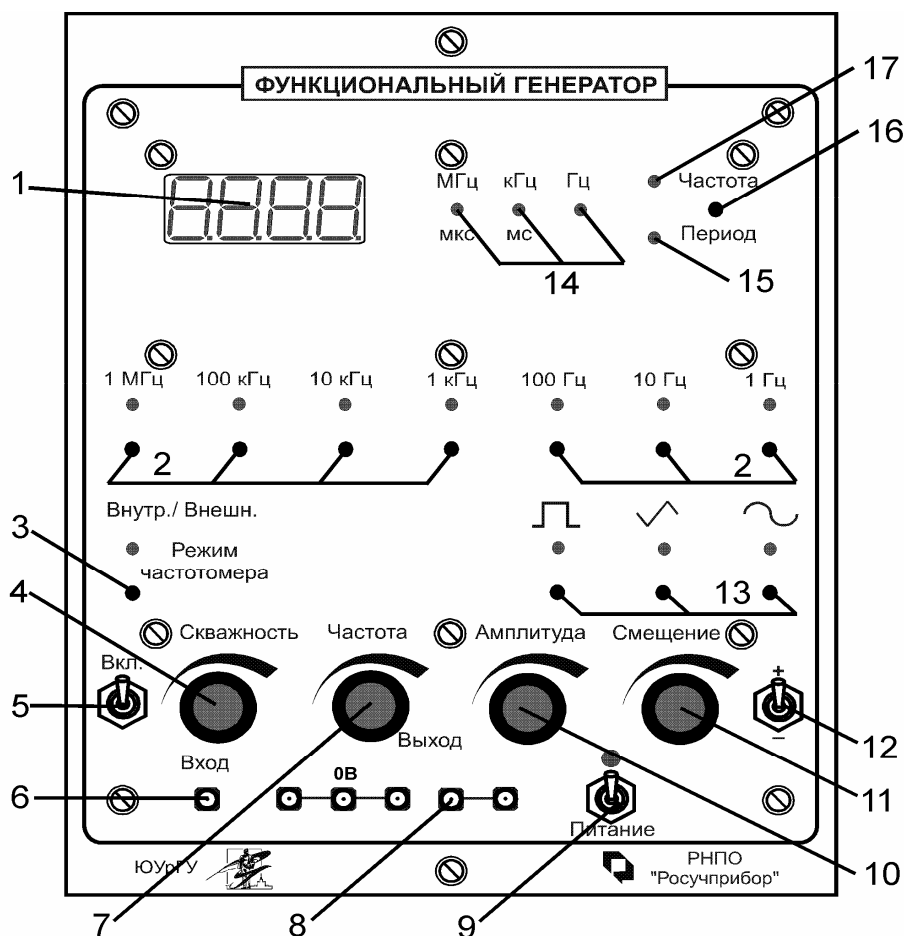


Рис. 4. Внешний вид модуля «Функциональный генератор»: 1 – семисегментные индикаторы; 2 – кнопки для выбора необходимого диапазона частот; 3 – кнопка выбора режима работы встроенного частотомера; 4 – регулятор скважности; 5 – тумблер включения режима изменения скважности или несимметрии сигнала; 6 – гнездо для подачи входного сигнала; 7 – регулятор плавной установки частоты; 8 – гнездо выхода основного сигнала; 9 – тумблер включения питания; 10 – регулятор амплитуды выходного сигнала; 11 – регулятор смещения выходного сигнала постоянным напряжением; 12 – тумблер переключения полярности смещения выходного сигнала; 13 – кнопки выбора необходимой формы выходного сигнала; 14 – индикатор размерности частоты/периода сигнала; 15 – индикатор «Период» режима работы частотомера; 16 – кнопка переключения режима измерения частоты или периода; 17 – индикатор «Частота»

Основные технические характеристики

Частотный диапазон	0,5 Гц...1 МГц
Амплитуда выходного сигнала	±10В
Ограничение выходного тока на выходе не менее, мА	100
Смещение постоянного напряжения	<-10В->10В
Скважность/асимметрия	1,25...4
Дисплей	четырёхразрядный светодиодный семисегментный индикатор
Погрешность установки частоты по встроенному частотомеру	±5%
Сигнал синусоидальной формы	
Коэффициент нелинейных искажений	1%, 0,5 Гц...1 МГц (действительно для уровня от max до 1/10)
Сигнал треугольной формы	
Линейность	95%, 0,5 Гц...1 МГц
Сигнал прямоугольной формы	
Время нарастания или спада	0,1 мкс
при максимальном выходном сигнале (при 75-омной нагрузке)	

Характеристики частотомера

Режим измерения	Внутренний/Внешний
Диапазон измерения во внутреннем и внешнем режиме	0,5 Гц...1 МГц
Уровень внешнего сигнала	ТТЛ
Погрешность измерения	
Погрешность опорного генератора	±1 импульс
Полное входное сопротивление	100 кОм/150 пФ
Напряжение питающей сети, В	±15
Потребляемая мощность не более, Вт	10
Габаритные размеры, мм не более:	
высота	248
ширина	200
глубина	120

Краткое описание и устройство модуля

В состав модуля входят следующие блоки: генератор, частотомер и клавиатура. Генерацию сигналов осуществляет микросхема МАХ038. Клавиатура управляет выбором режима измерения частоты (для блока частотомера), выбором диапазона генерируемой частоты, выбором формы сигнала и режима частотомера (внутренний/внешний). Блок регулировки задаёт значение частоты из выбранного диапазона, смещение сигнала и скважность. Выходной сигнал выводится на разъём «Выход» и одновременно подаётся в блок частотомера, который измеряет частоту или период и индицирует значение на семисегментных индикаторах. Для

измерения частоты внешнего сигнала, сигнал необходимо подать на разъём «Вход».

Порядок работы с лабораторным стендом «Аналоговая электроника»

Подавая различные сигналы и напряжения посредством соединительных проводников на исследуемый модуль и собирая схему соединений соответствующей лабораторной работы, снимаем характеристики, заполняем таблицы режимов работы согласно методическим указаниям к выполнению лабораторных работ. После проверки правильности собранной схемы преподавателем или лаборантом подать питание на стенд и тумблером «Питание» соответствующего модуля (либо соединительными проводниками с модуля питания и измерений) подать напряжение питания на исследуемую схему.

По окончании лабораторных работ необходимо отключить питание стенда, разобрать схему, предоставить стенд в полной комплектности и исправности преподавателю или лаборанту. Отчеты по лабораторным работам оформляются согласно требованиям ЕСКД и стандартов предприятия.

Перечень лабораторных модулей, входящих в комплекс

1. Биполярный транзистор.
2. Полевой транзистор.
3. IGBT транзистор.
4. Тиристор и динистор.
5. Оптопара и стабилитрон.
6. Транзисторный усилитель.
7. Схемы на операционных усилителях.
8. Звенья обратной связи.
9. Фильтры.
10. Стабилизаторы напряжения.
11. Компаратор.
12. Модуль питания и измерений (ручная или компьютерная версия).
13. Функциональный генератор.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При выполнении лабораторных работ, питание которых осуществляется от сети с напряжением 220 В, на металлических корпусах приборов может при нарушении изоляции возникнуть опасное для жизни человека напряжение. В связи с этим студентам не разрешается самостоятельно вскрывать корпуса блоков питания, стендов и производить электромонтажные присоединения в приборах.

При выполнении лабораторных работ студентам **запрещается**:

- 1) находиться в верхней одежде в лаборатории;
- 2) курить, осуществлять приём пищи и напитков в лаборатории;
- 3) производить какие-либо работы с лабораторным стендом, не имея допуска на выполнение данной лабораторной работы;
- 4) производить работы в лаборатории, не связанные непосредственно с лабораторной работой;
- 5) самостоятельно подключать силовое питание лабораторных стендов;
- 6) подавать питание на собранную схему без проверки правильности соединений преподавателем или техническим персоналом;
- 7) использовать для выполнения лабораторной работы оборудование, не входящее в комплект стенда, без соответствующих указаний преподавателя или технического персонала;
- 8) приводить в негодное состояние как отдельные комплектующие лабораторного стенда, так и весь стенд в целом;
- 9) подавать на стенд сигналы, не предусмотренные данной лабораторной работой;
- 10) производить какие-либо переключения на стенде при включенном питании;
- 11) уходить из лаборатории, по окончании лабораторной работы, не отчитавшись о комплектности стенда и его исправности преподавателю или техническому персоналу.

Порядок выполнения лабораторных работ

1. Вход в лабораторию разрешается только по разрешению преподавателя.
2. На первом занятии преподаватель:
 - делит группу на подгруппы по 2 человека;
 - закрепляет каждую подгруппу за рабочим местом (столом) в лаборатории, которое не меняется в течение всего семестра;
 - проводит инструктаж по технике безопасности;
 - напоминает студентам о необходимости бережного отношения к лаборатории и о материальной ответственности каждого из них за сохранность оборудования и обстановки лаборатории.

При обнаружении повреждений оборудования персональную ответственность несут студенты, выполнявшие лабораторную работу за этим рабочим местом. Виновники обязаны возместить материальные ущербы кафедре. В завершение инструктажа студенты расписываются в лабораторном журнале в порядке подгрупп (номер подгруппы – номер лабораторного стола).

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента лабораторного стенда необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу).

4. Приступить к лабораторной работе после проверки подготовки студента к выполнению лабораторной работы в виде коллоквиума (теста).

5. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены.

6. Собрав электрическую (монтажную) схему, необходимо пригласить преподавателя для её проверки и только после этого начать выполнение работы.

7. Если во время проведения опыта замечены какие-либо неисправности оборудования, необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу.

8. После выполнения измерения, необходимо показать полученные результаты преподавателю и только после проверки им таблицы с экспериментальными данными электрическую схему можно разбирать. Перед разборкой схемы необходимо выключить источники питания.

9. После окончания лабораторной работы рабочее место привести в порядок.

Методические указания к выполнению лабораторных работ

1. К выполнению работы необходимо подготовиться до начала занятия в лаборатории. Кроме описания работы в данном учебном пособии, используйте рекомендованную литературу и конспект лекций. При подготовке полезно продумывать ответы на контрольные вопросы. К выполнению работы допускаются только подготовленные студенты.

2. Перед включением генератора постоянного напряжения ручку регулировки напряжения выведите влево до упора.

3. При проведении эксперимента результаты измерений и расчетов записывайте четко и кратко в заранее подготовленные таблицы.

4. При обработке результатов измерений:

а) помните, что точность расчетов не может превышать точности результатов прямых измерений;

б) результаты измерений записывайте в виде доверительного интервала.

5. Отчеты по лабораторным работам оформляются согласно требованиям ЕСКД и стандартов предприятия:

- дата выполнения лабораторной работы, список студентов выполнявших данную лабораторную работу;

- черновик с измерениями, выполненными в лаборатории, подписанный преподавателем;

- название лабораторной работы и её цель;
- используемое оборудование;
- ход выполнения лабораторной работы;
- таблицы измерений и расчётных данных;
- краткие выводы по каждой работе, анализ полученных данных;
- обобщающий вывод по всей лабораторной работе – краткое заключение о результатах работы, согласующееся с её целью. Вывод включает в себя:

- а) основные численные результаты работы;

б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента;

в) анализ результатов:

- сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
- список использованной литературы.

К выполнению следующей лабораторной работы без сдачи отчета о предыдущей работе студент не допускается.

Лабораторная работа № 1 **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИТРОНА**

Цель работы: изучение принципа действия электронно-дырочного перехода, исследование вольтамперной характеристики стабилитрона.

Область на границе двух полупроводников (ПП) с различными типами электропроводности называется **электронно-дырочным (ЭДП)** или **p-n-переходом**.

ЭДП при отсутствии внешнего напряжения

В результате того, что носители заряда в каждом ПП совершают беспорядочное тепловое движение, происходит их диффузия из одного ПП в другой. Как и при любой другой диффузии, например, в газах или жидкостях, носители перемещаются туда, где их градиент концентрации меньше. Таким образом, из ПП n-типа в ПП p-типа диффундируют электроны, а в обратном направлении – диффундируют дырки (рис. 5).

В результате диффузии носителей по обе стороны границы раздела двух ПП с различным типом электропроводности создаются объемные заряды различных знаков. В области n возникает объемный положительный заряд, который образуется главным образом положительно заряженными атомами и в небольшой степени – пришедшими в эту область дырками. Подобно этому в области p возникает отрицательный объемный заряд, образованный отрицательно заряженными атомами и, отчасти, пришедшими сюда электронами. Между образовавшимися объемными зарядами возникает так называемая контактная разность потенциалов $U_k = \varphi_n - \varphi_p$, а следовательно, и электрическое поле с напряженностью E_k , т.е. в p-n-переходе возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузионному переходу носителей. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта.

Причем, чем больше концентрация примесей, тем выше концентрация основных носителей и тем большее их число диффундирует через границу.

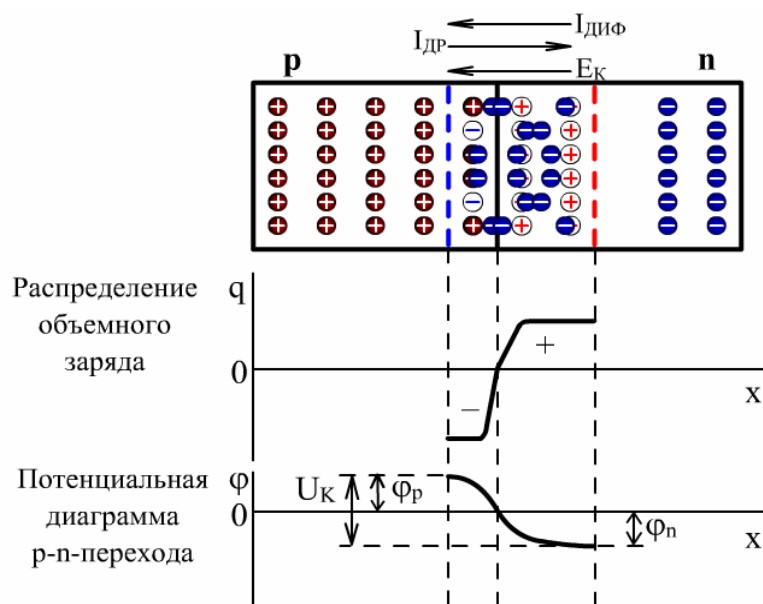


Рис. 5. При отсутствии внешнего напряжения происходит дрейф и диффузия носителей заряда

Плотность объемных зарядов возрастает и увеличивается контактная разность потенциалов U_k , т.е. высота потенциального барьера. При этом толщина р-п-перехода уменьшается, так как соответствующие объемные заряды образуются в приграничных слоях меньшей толщины.

Одновременно с диффузионным перемещением основных носителей через границу происходит и обратное перемещение носителей под действием электрического поля контактной разности

потенциалов. Это поле перемещает дырки из п-области обратно в р-область и электроны из р-области обратно в п-область (дрейф). При постоянной температуре р-п-переход находится в состоянии динамического равновесия. Каждую секунду через границу в противоположных направлениях диффундирует определенное число электронов и дырок, а под действием поля столько же их дрейфует в обратном направлении.

Перемещение носителей за счет диффузии образует **диффузионный ток** ($I_{диф}$), а движение носителей под действием поля объемных зарядов – **ток дрейфа** ($I_{др}$). В установившемся режиме, т.е. при динамическом равновесии перехода, эти токи равны и противоположны по направлению. Поэтому полный ток через переход равен 0.

В р-п-переходе концентрация электронов и дырок плавно меняется от минимального значения к максимальному. В результате этого в средней части перехода образуется слой с малой концентрацией носителей (так называемый обедненный носителями слой). Соответственно и удельная электрическая проводимость р-п-перехода будет во много раз меньше, чем в остальных частях областей п и р. Таким образом в р-п-переходе возникает слой, называемый запирающим и обладающий большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением остальных областей п- и р-ПП [4].

ЭДП при прямом напряжении

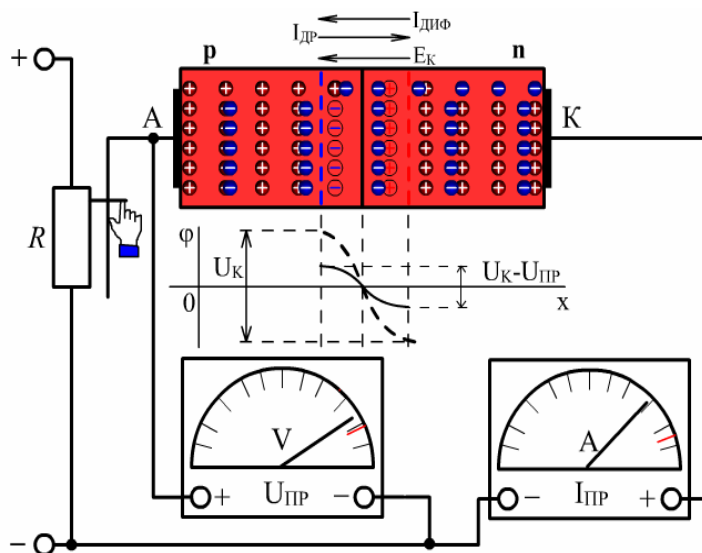


Рис. 6

Напряжение на ЭДП, у которого полярность совпадает с полярностью основных носителей, называется прямым. Электрод, к которому подключается положительный вывод источника, называют **анодом** (А). Электрод, к которому подключается отрицательный вывод источника, называют **катодом** (К) (рис. 6). Электрическое поле, создаваемое прямым напряжением действует навстречу полю контактной разности потенциалов. Результирующее поле становится слабее, и разность потенциалов в переходе

уменьшается, т.е. высота потенциального барьера понижается, возрастает диффузионный ток, так как большее число носителей может преодолеть пониженный барьер. Ток дрейфа при этом почти не изменяется, так как он зависит главным образом от числа неосновных носителей, попадающих за счет своих тепловых скоростей на р-п-переход из п- и р-областей. Напряжение на переходе можно считать равным $U_K - U_{пр}$. При прямом напряжении $I_{диф} > I_{др}$ и поэтому полный ток через переход, т.е. прямой ток, уже не равен 0:

$$I_{пр} = I_{диф} - I_{др} > 0.$$

Если барьер значительно понижен, то тогда $I_{диф} \gg I_{др}$ и можно считать, что $I_{диф} = I_{пр}$, т.е. прямой ток в переходе является чисто диффузионным. Введение носителей заряда через пониженный под действием прямого напряжения потенциальный барьер в область, где эти носители являются не основными, называется инжекцией носителей заряда. Область ППП, из которой инжектируются носители, называется эмиттером. А область, в которой инжектируются неосновные для этой области носители заряда, называется базой. Таким образом, если рассматривать инжекцию электронов, то п-область является эмиттером, а р-область – базой. Для инжекции дырок, наоборот, эмиттером служит р-область, а базой – п-область. При прямом напряжении не только понижается потенциальный барьер но также уменьшается толщина запирающего слоя и его дифференциальное сопротивление в прямом направлении становится малым (единицы – десятки Ом). Поскольку высота потенциального барьера U_K при отсутствии внешнего напряжения составляет несколько десятых долей вольта, то для значительного понижения барьера и уменьшения сопротивления запирающего слоя достаточно подвести к р-п-переходу такое же прямое напряжение (десятые доли вольта). Поэтому большой прямой ток можно получить при очень небольшом прямом напряжении. Вольтамперная характеристика (ВАХ) ЭДП при прямом приложенном напряжении представлена

на рис. 7. Вследствие протекания большого прямого тока, велика вероятность наступления теплового пробоя при общем перегреве р-п-перехода в виду ухудшения условий теплоотвода. Тепловой пробой является необратимым и может привести к разрушению ЭДП [1].



Рис. 7. Прямая ветвь ВАХ диода

ЭДП при обратном напряжении

На рис. 8 представлена обратная ветвь ВАХ диода.

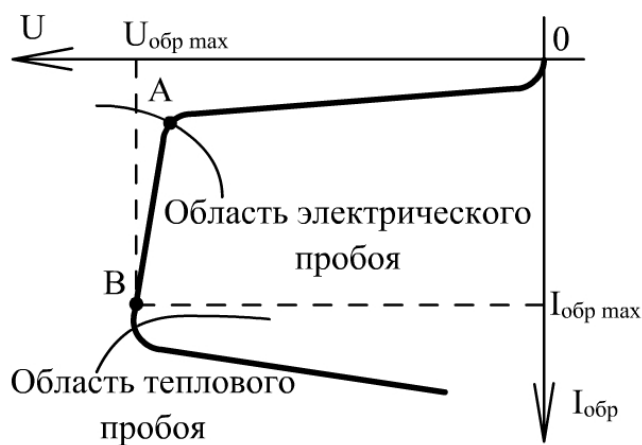


Рис. 8. Обратная ветвь ВАХ диода

Под действием обратного напряжения $U_{OБP}$ через переход протекает очень небольшой обратный ток $I_{OБP}$, что объясняется следующим образом. Поле, создаваемое обратным напряжением, складывается с полем контактной разности потенциалов. Результирующее поле усиливается, и высота потенциального барьера становится равной сумме $U_K + U_{OБP}$ (рис. 9).

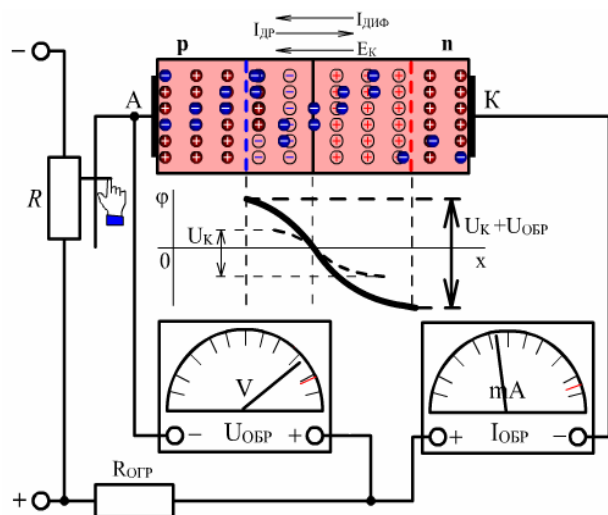


Рис. 9

обратным напряжением, называется экстракцией носителей заряда. Таким образом, обратный ток I_{OBR} представляет собой ток проводимости, вызванный перемещением неосновных носителей.

Обратный ток получается не очень большим, так как неосновных носителей слишком мало и, кроме того, сопротивление запирающего слоя при обратном напряжении очень велико. Так как при повышении обратного напряжения поле в месте перехода становится сильнее и под действием этого поля больше основных носителей «выталкивается» из пограничных слоев в глубь n- и p-областей, то с увеличением обратного напряжения увеличивается не только высота потенциального барьера, но и толщина запирающего слоя. Этот слой еще сильнее обедняется носителями, и его сопротивление значительно возрастает, т.е. $R_{OBR} \gg R_{ПР}$. Уже при сравнительно небольшом обратном напряжении обратный ток становится практически постоянным. Влияние генерации носителей заряда в p-n-переходе обычно сказывается при повышенных обратных напряжениях. Оно проявляется вначале в нарушении линейной зависимости изменения обратного тока от напряжения, а затем в резком возрастании обратного тока (участок АВ), характеризующим электрический пробой p-n-перехода. В зависимости от причин, вызывающих появление дополнительных носителей заряда в p-n-переходе, различают лавинный и туннельный пробой. **Лавинный пробой** обусловлен лавинным размножением носителей в p-n-переходе в результате ударной ионизации атомов кристаллической решетки быстрыми носителями заряда. В основе **туннельного пробоя** лежит непосредственный отрыв валентных электронов от атомов кристаллической решетки под действием сильного электрического поля. Лавинный и туннельный виды пробоя являются обратимыми процессами, т.е. они не приводят к повреждению ЭДП и при снижении напряжения его свойства сохраняются.

Стабилитроны — полупроводниковые приборы, имеющие на своей вольтамперной характеристике (ВАХ), представленной на рис. 10, при обратном включении в области электрического пробоя участок, на котором напряжение слабо зависит от изменения тока. Следовательно, стабилитрон может быть

При небольшом повышении барьера диффузионное перемещение основных носителей через переход прекращается, т.е. $I_{ДИФ}=0$, так как собственные скорости носителей недостаточны для преодоления барьера. А ток проводимости остается почти неизменным, поскольку он определяется главным образом числом неосновных носителей, попадающих на p-n-переход из n- и p-областей (участок 0А).

Выведение неосновных носителей через p-n-переход ускоряющим электрическим полем, созданным

использован для стабилизации напряжения. Прямая ветвь ВАХ стабилитрона такая же, как и у обычных диодов.

На рис. 10 участок ВАХ стабилитрона АБ – область лавинного пробоя стабилитрона (режим стабилизации); участок БВ – область теплового необратимого пробоя. К основным параметрам стабилитрона относятся:

$U_{ст}$ – напряжение стабилизации – это напряжение, при котором обратный ток стабилитрона равен $I_{ст.ном}$;

$I_{ст.min}$, $I_{ст.max}$ – минимальный и максимальный ток, при которых возможен режим стабилизации;

P_{max} – максимально допустимая мощность, рассеиваемая в стабилитроне;

$R_{дифф} = dU/dI$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона в режиме стабилизации, характеризующее качество стабилизации (чем меньше его величина, тем круче наклон ВАХ на участке АБ рис. 10, тем выше качество стабилизации). Дифференциальное сопротивление представляет собой сопротивление переменному току. Влияние температуры оценивается температурным коэффициентом напряжения стабилизации (ТКН), который характеризует изменение напряжения $U_{ст}$ при изменении температуры на 1 градус и определяется следующим выражением:

$$ТКН = dU_{ст}/(U_{ст}dT).$$

Для низковольтных стабилитронов ТКН – отрицательный, для высоковольтных – положительный.

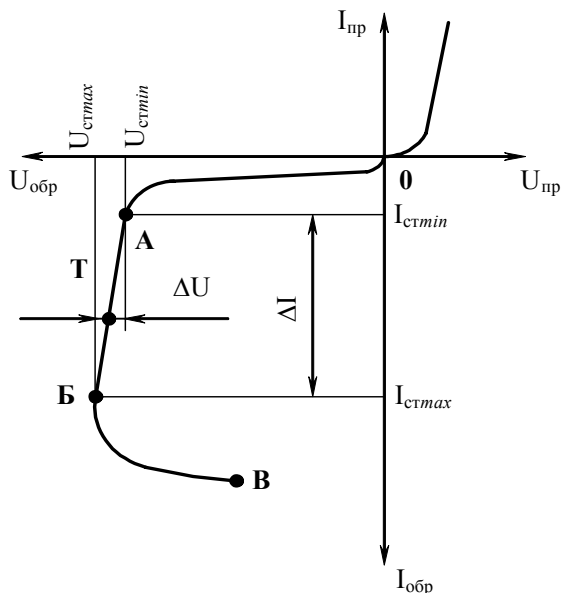


Рис. 10. Вольтамперная характеристика стабилитрона

Основная схема включения стабилитрона представляет собой простейший параметрический стабилизатор напряжения, в котором нагрузка включается параллельно стабилитрону. Поэтому в режиме стабилизации напряжение на стабилитроне почти постоянно, такое же напряжение будет и на нагрузке. Все изменения напряжения источника E при его нестабильности почти полностью поглощаются ограничительным сопротивлением $R_{огр}$ (рис. 11).

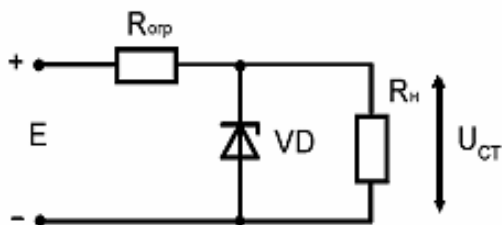


Рис. 11. Основная схема включения стабилитрона

Наиболее часто стабилитрон работает в таком режиме, когда напряжение источника нестабильно, а сопротивление нагрузки R_H постоянно. Для установления и поддержания правильного режима стабилизации в этом случае сопротивление $R_{огр}$ должно иметь определенное значение. Обычно $R_{огр}$ рассчитывают для средней точки T характеристики стабилитрона (см. рис. 10). Если напряжение E меняется от E_{min} до E_{max} , то можно $R_{огр}$ найти по следующей формуле:

$$R_{огр} = \frac{E_{ср} - U_{ст}}{I_{ср} - I_H},$$

где $E_{ср}$ – среднее значение напряжения источника питания, определяемое по формуле $E_{ср} = 0,5(E_{min} + E_{max})$;

$I_{ср}$ – средний ток стабилизации стабилитрона, $I_{ср} = 0,5(I_{min} + I_{max})$;

I_H – ток нагрузки.

Если напряжение E меняется, то соответственно будет изменяться ток стабилитрона, но напряжение на нем, а следовательно, и на нагрузке, будет почти постоянным. Поскольку все изменения напряжения источника должны поглощаться ограничительным резистором, то наибольшее изменение этого напряжения, равное $E_{max} - E_{min}$ должно соответствовать наибольшему возможному изменению тока $I_{max} - I_{min}$, при котором еще сохраняется стабилизация. Откуда следует, что если значение E изменяется на ΔE , то стабилизация будет осуществляться только при выполнении условия

$$\Delta E \leq (I_{max} - I_{min}) \cdot R_{огр}.$$

Стабилитроны часто используются как источники опорного (образцового) напряжения в устройствах сравнения стабилизаторов [3].

Порядок выполнения работы

1. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Оптопара и стабилитрон» приведен на рис. 12. Собрать схему, приведенную на рис. 13, подключить модуль питания.

2. Подключить измерительные приборы.

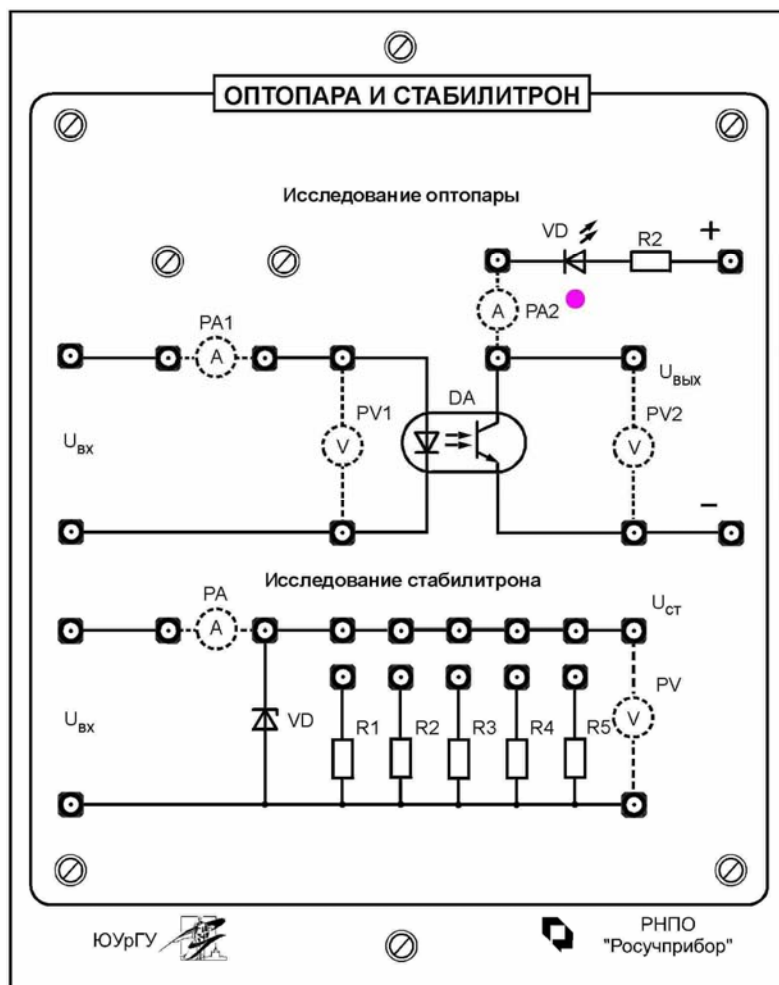


Рис. 12. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Оптопара и стабилизатор»

3. Изменяя постоянное напряжение на входе схемы $U_{вх}$, по показаниям приборов РА и РВ необходимо снять обратную ветвь вольтамперной характеристики стабилизатора, данные измерений занести в табл. 1.

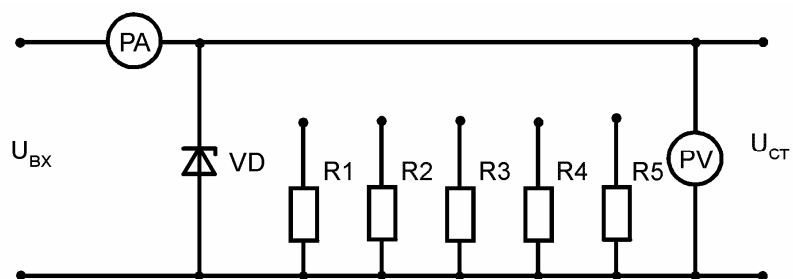


Рис. 13. Схема исследования характеристики стабилизатора

Таблица 1

Обратная вольтамперная характеристика стабилизатора

$U_{обр}, В$									
$I_{обр}, мА$									

Изменив полярность напряжения питания $U_{вх}$ и изменяя его величину, по показаниям приборов РА и РV снять прямую ветвь ВАХ стабилитрона, данные измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Прямая вольтамперная характеристика стабилитрона

$U_{пр}, В$									
$I_{пр}, мА$									

По данным измерений построить прямую и обратную ветви ВАХ стабилитрона – $I_{пр} = f(U_{пр})$ и $I_{обр} = f(U_{обр})$, на которой обозначить характерные точки: $I_{ст. min}$, $I_{ст. max}$, $U_{ст. min}$, $U_{ст. max}$, $I_{ст. ном}$, $U_{ст. ном}$.

4. Сопоставить значения характерных точек со справочными значениями.
5. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Нарисовать качественную ВАХ стабилитрона и обозначить на ней характерные участки и точки.
2. Нарисовать схему включения стабилитрона. Чем ограничен ток стабилитрона и как он выбирается?
3. Дайте определение лавинного пробоя.
4. Что такое анод, катод?
5. Дайте определение ЭДП.
6. Что такое ток дрейфа?
7. Для каких целей применяются стабилитроны?
8. Как определить коэффициент стабилизации?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение параметров, характеристик биполярного транзистора.

Биполярные транзисторы представляют собой ППП, пригодные для усиления электрических сигналов, имеющие 3 или более выводов.

Наиболее распространены транзисторы с двумя р-п-переходами, называемые **биполярными**, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

По своим структурным признакам биполярные транзисторы делятся на два основных типа: n-p-n и p-n-p.

Средняя область транзистора называется **базой** (Б). Крайнюю область, от которой начинают движение основные носители заряда, называют **эмиттером** (Э).

Другую крайнюю область, к которой стремятся основные носители заряда, называют **коллектором** (К) (рис. 14). Таким образом, в транзисторе имеются 2 p-n-перехода: **эмиттерный** (между эмиттером и базой) и **коллекторный** (между базой и коллектором). Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от напряжения на его переходах. При работе в **активном** режиме на эмиттерном переходе напряжение прямое, на коллекторном – обратное. Режим **отсечки** (запирания) достигается подачей обратного напряжения на оба перехода. Если на обоих переходах напряжение прямое, то транзистор работает в режиме **насыщения** [3].

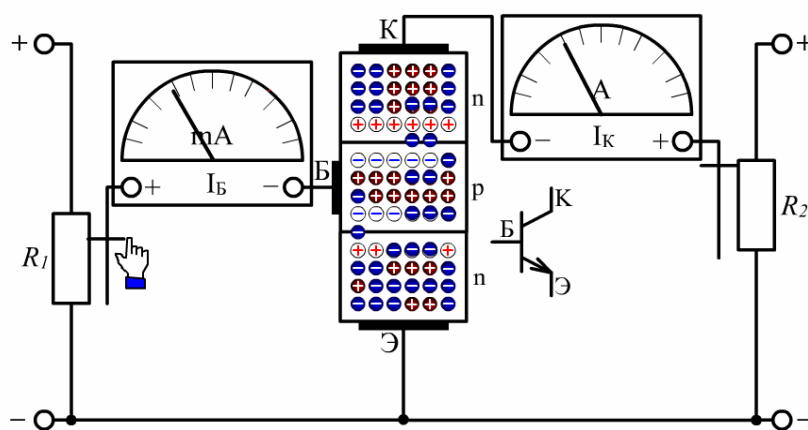


Рис 14

Рассмотрим работу транзистора типа p-n-p в активном режиме без нагрузки, когда включены только источники постоянных питающих напряжений.

Полярность их такова, что на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном обратное. Поэтому сопротивление эмиттерного перехода мало и

для получения нормального тока в этом переходе достаточно напряжения в десятые доли вольта. Сопротивление коллекторного перехода велико и напряжение обычно составляет десятки вольт.

Напряжения между электродами транзистора связаны простой зависимостью:

$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ}.$$

При работе транзистора в активном режиме обычно $U_{БЭ} \ll U_{КБ}$ и, следовательно, $U_{КЭ} \gg U_{КБ}$.

Если к эмиттерному переходу напряжение не приложено, то практически можно считать, что в этом переходе нет тока. В этом случае область коллекторного перехода имеет большое сопротивление постоянному току. Через коллекторный переход протекает лишь очень небольшой ток, вызванный перемещением неосновных носителей.

При увеличении прямого входного напряжения $U_{БЭ}$ понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и соответственно возрастает ток через этот переход – ток эмиттера $I_Э$. Дырки этого тока инжектируются из эмиттера в базу и благодаря диффузии протекают сквозь базу в коллекторный переход, увеличивая ток коллектора $I_К$. В результате того, что коллекторный переход работает при обратном включении, в этом переходе возникают объемные заряды, которые создают электрическое поле. Оно способствует продвижению (экстракции) через коллекторный переход дырок, пришедших сюда из эмиттера, т.е. втягивает дырки в область коллекторного перехода. Чем больше ток эмиттера,

тем больше дырок приходит к коллекторному переходу и тем меньше становится его сопротивление. Соответственно увеличивается ток коллектора.

Если толщина базы достаточно мала и концентрация электронов в ней невелика, то большинство дырок, пройдя через базу, не успевает рекомбинировать с электронами базы и достигает коллекторного перехода. Лишь небольшая часть дырок рекомбинирует в базе с электронами, создавая ток базы I_B . Обычно ток базы составляет малую долю тока эмиттера, т.е. $I_B \ll I_E$, следовательно, ток коллектора лишь незначительно меньше тока эмиттера и можно считать $I_K \gg I_B$.

Биполярный транзистор является управляемым нелинейным элементом, его вольтамперные характеристики могут быть представлены в соответствии с рис. 15.

Зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером – $I_K = f(U_{КЭ})$ при фиксированных значениях тока базы – $I_B = \text{const}$ называют семейством выходных (коллекторных) характеристик транзистора (рис. 15, а).

Зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора – $I_B = f(U_{БЭ})$ называют входной или базовой характеристикой транзистора (рис. 15, б).

Входная характеристика практически не зависит от напряжения $U_{КЭ}$. Выходные характеристики почти прямолинейны в широком диапазоне изменения напряжения [1].

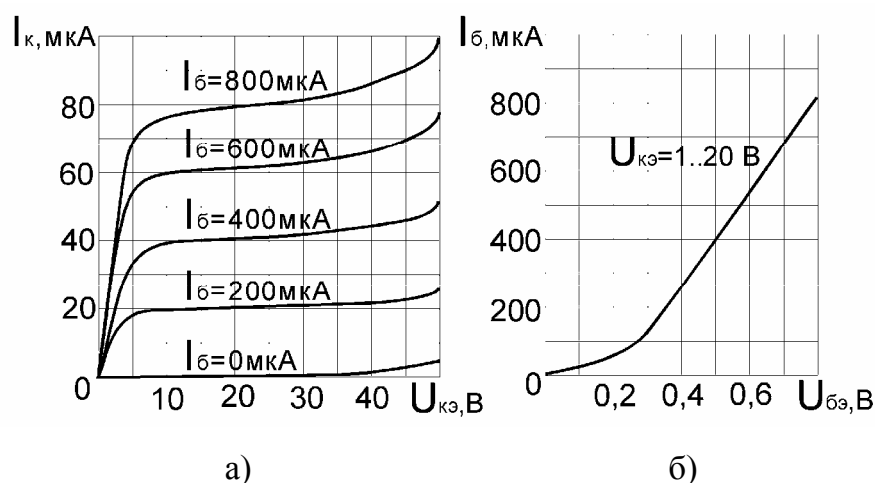


Рис. 15. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора: а – выходные; б – входная

Порядок выполнения работы

1. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Биполярный транзистор» приведен на рис. 16. Собрать схему представленную на рис. 17. Подключить измерительные приборы, к модулю биполярного транзистора, схема с общим эмиттером, и модуль питания в соответствии со схемой.

а) Снять входную характеристику биполярного транзистора. Изменяя величину входного напряжения, записать показания приборов PV1 и PA1. Результаты измерений занести в табл. 3.

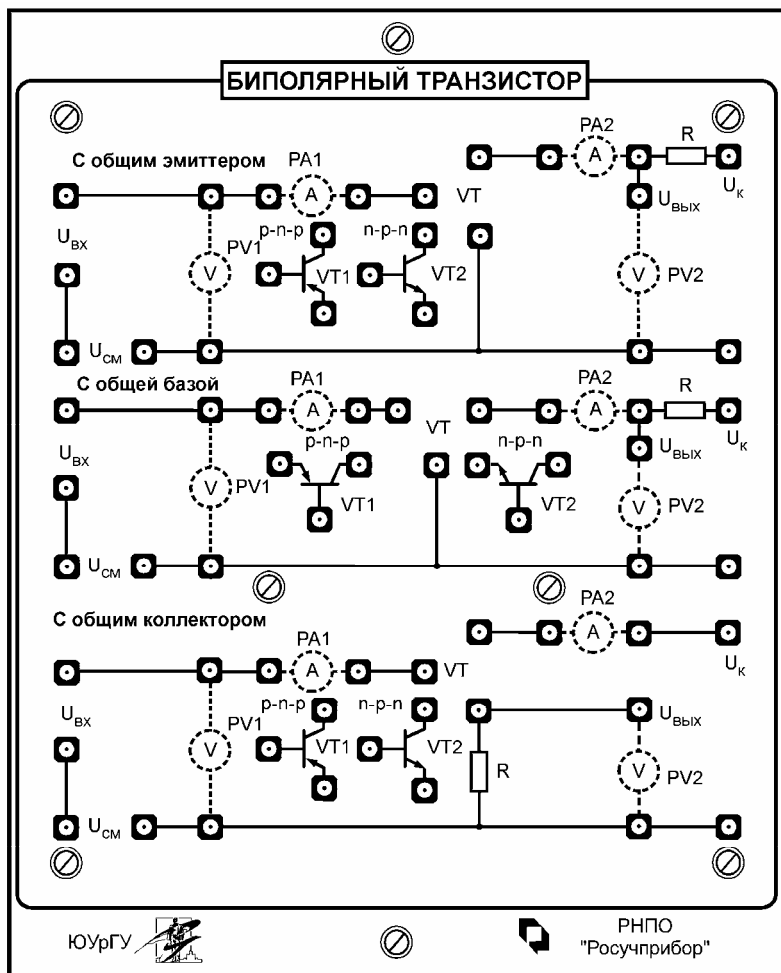


Рис. 16. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Биполярный транзистор»

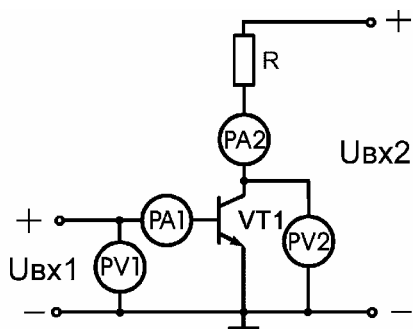


Рис. 17. Схема исследования характеристик биполярного транзистора типа n-p-n

Таблица 3

Входная характеристика биполярного транзистора

$U_{БЭ}, В$									
$I_B, мА$									

По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора.

б) Снять выходные характеристики биполярного транзистора. Изменяя величину входного напряжения, записать показания приборов PV2 и PA2, для трех фиксированных значений тока базы ($I_B=0$, $I_B=0,5I_{B\max}$, $I_B=I_{B\max}$) контроль за величиной тока базы осуществляется с помощью амперметра PA1. Результаты измерений занести в табл. 4.

По результатам измерений построить выходные ВАХ транзистора.

Таблица 4

Выходные характеристики биполярного транзистора

$I_B = \text{мА};$		$I_B = \text{мА};$		$I_B = \text{мА};$	
$U_{КЭ}, \text{В};$	$I_K, \text{А};$	$U_{КЭ}, \text{В};$	$I_K, \text{А};$	$U_{КЭ}, \text{В};$	$I_K, \text{А};$

Исследовать характеристики биполярного транзистора типа р-п-р, включив его в схему исследования, в соответствии с рис. 18.

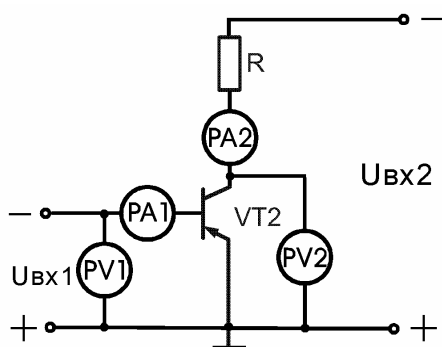


Рис. 18. Схема исследования характеристик биполярного транзистора типа р-п-р

Контрольные вопросы

1. Как выглядят выходные и входные статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ?
2. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как её построить? Как она изменяется при наличии нагрузки?
3. Как определяется статический коэффициент передачи тока $h_{21Э}$?
4. Как снять статические входные характеристики?
5. Укажите факторы, определяющие силу тока, протекающего через коллектор биполярного транзистора.
6. Что можно сказать по выходным характеристикам о зависимости тока коллектора от тока базы и напряжения коллектор-эмиттер?
7. Зависит ли дифференциальное входное сопротивление биполярного транзистора от тока эмиттера?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение схем включения и режимов работы биполярного транзистора.

При решении задач усиления электрических сигналов в частности используют биполярные транзисторы. Простейшим усилителем является усилительный каскад (рис. 19), содержащий нелинейный управляемый элемент УЭ, в частности биполярный транзистор, резистор R и источник электрической энергии. Усилительный каскад имеет входную цепь, к которой подводится входное напряжение $U_{вх}$ (усиливаемый сигнал), и выходную цепь для получения выходного напряжения $U_{вых}$ (усиленный сигнал). Усиленный сигнал имеет значительно большую мощность по сравнению со входным сигналом. Увеличение мощности происходит за счет источника электрической энергии E . Процесс усиления осуществляется посредством изменения сопротивления нелинейного управляемого элемента УЭ, а следовательно, и тока в выходной цепи под воздействием входного тока.

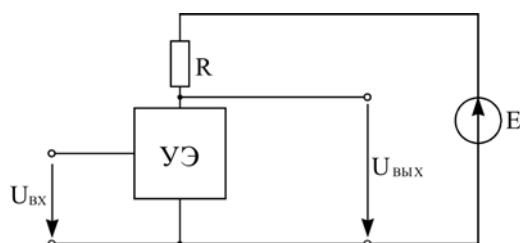


Рис. 19. Структурная схема усилительного каскада

Существует три схемы включения биполярного транзистора в усилительных каскадах:

- схема с общим эмиттером (ОЭ);
- схема с общим коллектором (ОК);
- схема с общей базой (ОБ).

Одной из наиболее распространенных схем включения биполярных транзисторов является схема с общим эмиттером. В этой схеме эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей, а резистор R , который является нагрузкой каскада, включается в коллекторную цепь транзистора. Для коллекторной цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$U_{\pi} = U_{кэ} + RI_{к}.$$

Расчет такой нелинейной цепи, то есть определение $I_{к}$, $U_{рк}$ и $U_{кэ}$ для различных значений токов базы $I_{б}$ и сопротивлений резистора R , можно произвести графически (рис. 20). Для этого на семействе коллекторных характеристик необходимо построить вольтамперную характеристику коллекторного резистора $R_{к}$ (линию нагрузки по постоянному току). Эту характеристику строят по двум характерным точкам:

- режим ХХ при $I_{к} = 0$ $U_{кэ} = U_{\pi}$;
- режим КЗ при $U_{кэ} = 0$ $I_{к} = U_{\pi}/R_{к}$.

Точки пересечения линии нагрузки с коллекторными характеристиками дают переходную характеристику $I_K = f(I_B)$.

Графический расчет режима работы транзистора с общим эмиттером представлен на рис. 20, с общим эмиттером произведен для режима А, при уровне входного сигнала $U_{BX}=0,4$ В. Биполярный транзистор с характеристиками, показанными на рис. 1, при $U_{П}=40$ В и $R=500$ Ом обеспечивает уровень выходного сигнала $U_{ВЫХ}=25$ В, коэффициент усиления по напряжению $h_{12}=62,5$ и коэффициент передачи по току $h_{21}=100$ [1].

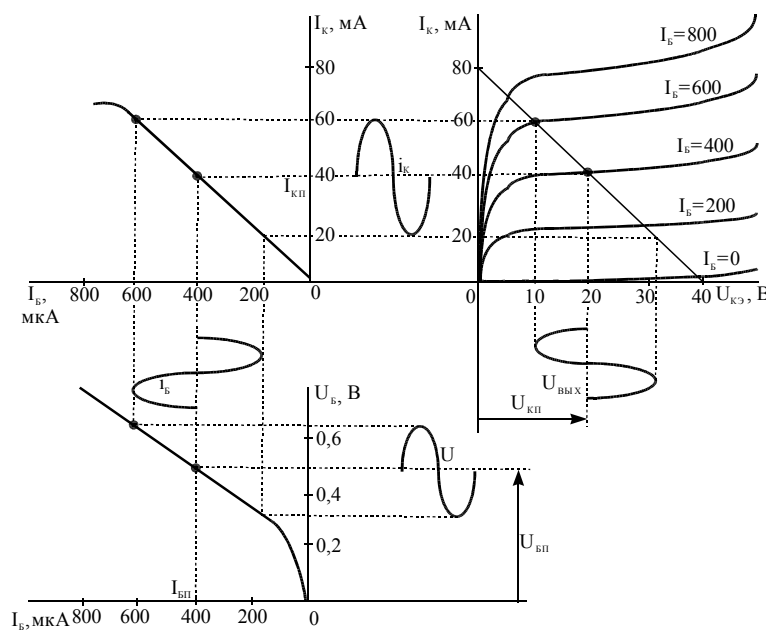


Рис. 20. Графический расчет усилительного каскада с общим эмиттером

Порядок выполнения работы

1. Последовательно собрать схемы, представленные на рис. 21. Установить напряжение U_{BX2} на уровне 12 В, напряжение U_{BX1} на уровне 1 В. Записать показания приборов в табл. 5.

Для указанных схем включения определить следующие коэффициенты:

- а) входное сопротивление $h_{11}=U_{BX}/I_{BX}$;
- б) коэффициент передачи по напряжению $h_{12}=U_{BX}/U_{ВЫХ}$;
- в) коэффициент передачи по току $h_{21}=I_{ВЫХ}/I_{BX}$;
- г) выходная проводимость $h_{22}=I_{ВЫХ}/U_{BX}$.

Значения коэффициентов свести в табл. 5.

2. Сделать выводы о возможности использования схем включения транзисторов в усилительных каскадах напряжения, тока и мощности.

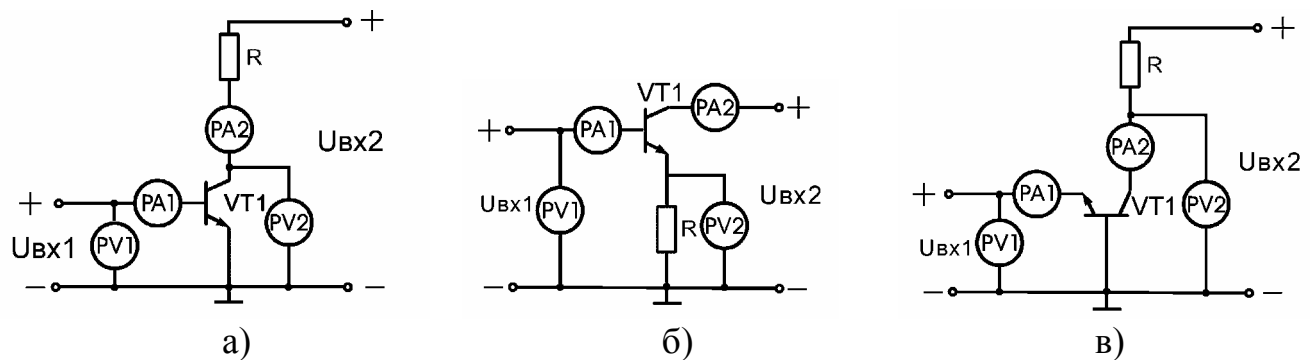


Рис. 21. Схемы включения биполярного транзистора типа n-p-n: а – с общим эмиттером (ОЭ); б – с общим коллектором (ОК); в – с общей базой (ОБ)

Таблица 5

Исследование схем включения биполярных транзисторов

Схема включения	С общим эмиттером	С общим коллектором	С общей базой
U_{BX}, B			
U_{BIX}, B			
I_{BX}, A			
I_{BIX}, A			
h_{11}			
h_{12}			
h_{21}			
h_{22}			

3. Построить передаточную характеристику (при $R=100 \text{ Ом}$) и сравнить полученные коэффициенты с графическим расчетом.

Исследование схем включения биполярного транзистора (ОЭ, ОК, ОБ) типа p-n-p. Последовательно собрать схемы представленные на рис. 22. Установить напряжение U_{BX2} на уровне 12 В, напряжение U_{BX1} на уровне 1 В. Записать показания приборов в табл. 5.

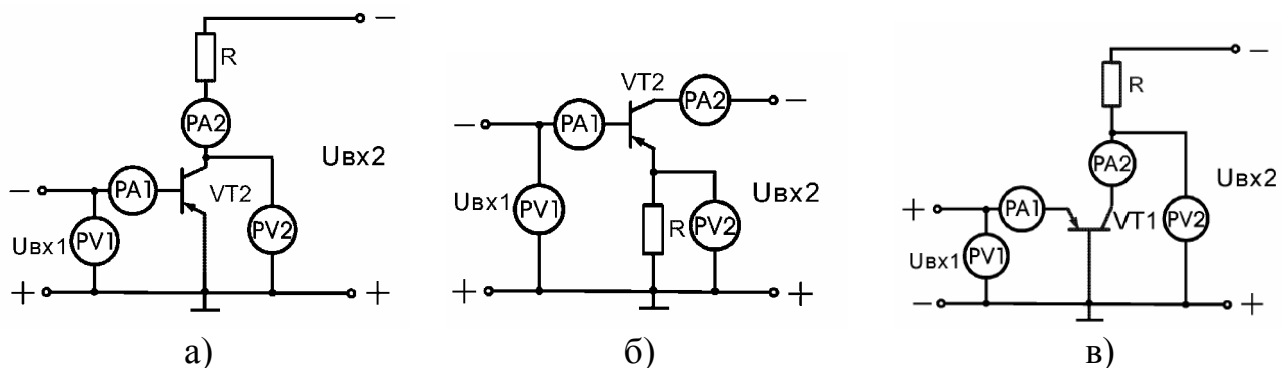


Рис. 22. Схемы включения биполярного транзистора типа p-n-p: а – с общим эмиттером (ОЭ); б – с общим коллектором (ОК); в – с общей базой (ОБ)

Контрольные вопросы

1. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, В, Д?
2. Каково назначение элементов усилителя?
3. Изобразите возможные схемы включения биполярного транзистора.
4. Чем определяется положение рабочей точки биполярного транзистора?
5. При каком условии биполярный транзистор будет находиться в режиме отсечки?
6. Чем определяется падение напряжения между коллектором и эмиттером в режиме насыщения?

Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение параметров, характеристик полевого транзистора.

Полевые транзисторы представляют собой ППП, обладающие высоким входным сопротивлением.

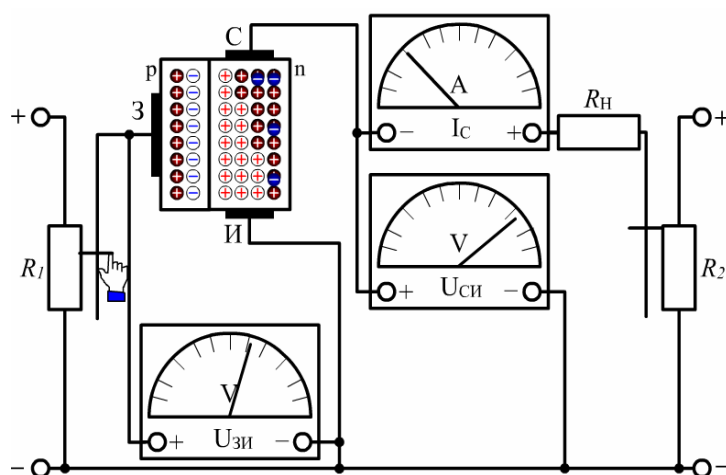


Рис. 23

По своим структурным признакам полевые транзисторы делятся на два основных типа: с n-каналом и p-каналом.

Электрод, из которого в канал вытекают основные носители заряда, называют истоком (И). Из канала носители переходят к электроду, который называется стоком (С). Управляющий электрод, предназначенный для регулирования площади поперечного сечения канала, называется затвором (3) (рис.23)

Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Полевой транзистор» приведен на рис. 24.

Рассмотрим принцип действия полевого транзистора с n-каналом. При изменении входного напряжения изменяется обратное напряжение на p-n-переходе, и от этого изменяется толщина запирающего (обедненного) слоя. Соответственно этому изменяется площадь поперечного сечения области, через которую проходит поток основных носителей заряда, т.е. выходной ток. Эта область называется каналом [4].

Если увеличивать напряжение затвора $U_{зи}$, то запирающий слой p-n-перехода становится толще и площадь поперечного сечения канала уменьшается. Следовательно, его сопротивление постоянному току R_0 возрастает и ток стока I_C становится меньше. При некотором запирающем напряжении $U_{зи,зап}$ площадь

поперечного сечения канала станет равной 0 и ток I_C станет очень малым. Транзистор запирается. А при $U_{зи} = 0$ сечение канала наибольшее, сопротивление R_0 наименьшее (около сотен Ом) и ток I_C получается наибольшим.

Полевой транзистор является управляемым нелинейным элементом, его вольтамперные характеристики могут быть представлены в соответствии с рис. 25.

Зависимость тока стока от напряжения между стоком и истоком – $I_C = f(U_{си})$ при фиксированных значениях напряжения между затвором и истоком – $U_{зи} = \text{const}$ называют семейством выходных характеристик транзистора (рис. 25, а).

Зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора – $I_б = f(U_{бэ})$ называют входной или базовой характеристикой транзистора (рис. 25, б).

Входная характеристика практически не зависит от напряжения $U_{си}$. Выходные характеристики почти прямолинейны в широком диапазоне изменения напряжения [1].

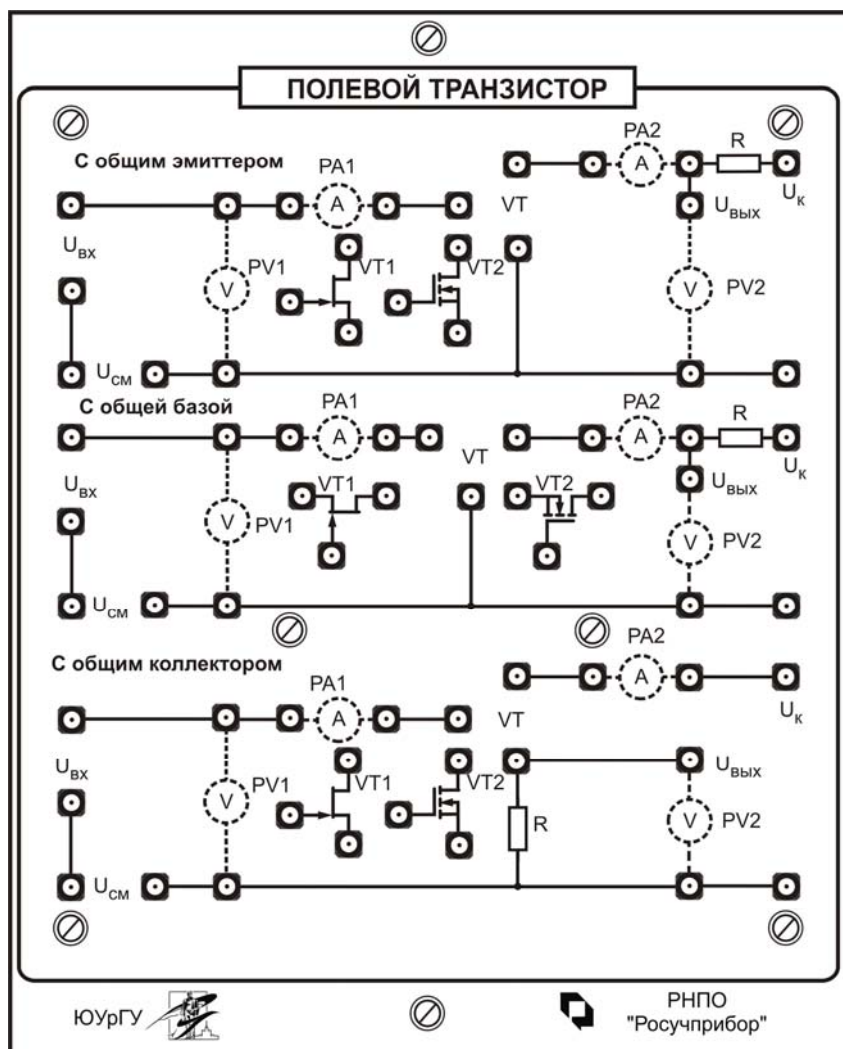


Рис. 24. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Полевой транзистор»

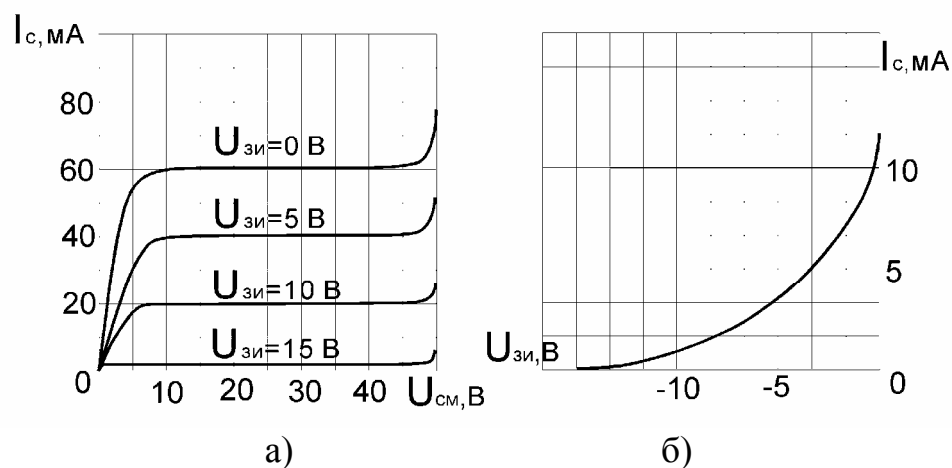


Рис. 25. Вольтамперные характеристики полевого транзистора:
а – выходные; б – входная

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 26. Подключить измерительные приборы к модулю полевого транзистора, схема с общим истоком, и модуль питания в соответствии со схемой.

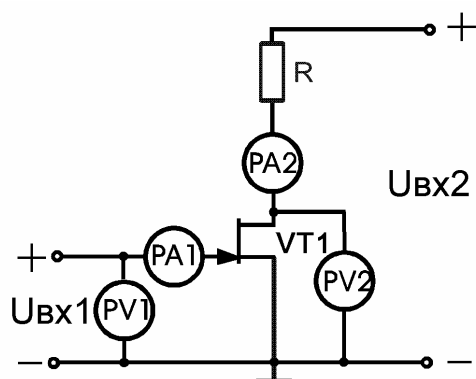


Рис. 26. Схема исследования характеристик полевого транзистора с n-каналом

а) Снять входную характеристику полевого транзистора $I_3=f(U_{зи})$. Изменяя величину входного напряжения, записать показания приборов $PV1$ и $PA2$. Результаты измерений занести в табл. 6. По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора.

б) Снять выходные характеристики полевого транзистора $I_c=f(U_{си})$ при $U_{зи}=const$. Изменяя величину входного напряжения $U_{си}$, записать показания приборов $PV2$ и $PA2$, для трех фиксированных значений напряжения ($U_{зи}=0$, $U_{зи}=0,5U_{зи\max}$, $U_{зи}=U_{зи\max}$) контроль за величиной напряжения $U_{зи}$ осуществляется с помощью вольтметра $PV1$. Результаты измерений занести в табл. 7.

Таблица 6

Входная характеристика полевого транзистора

$U_{зи}, В$									
$I_3, мА$									

Таблица 7

Выходные характеристики полевого транзистора

U _{зи} = мА		U _{зи} = мА		U _{зи} = мА	
U _{си} , В	I _с , А	U _{си} , В	I _с , А	U _{си} , В	I _с , А

- По результатам измерений построить выходные ВАХ транзистора.
- Исследовать характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом, включив его в схему исследования в соответствии с рис. 27.

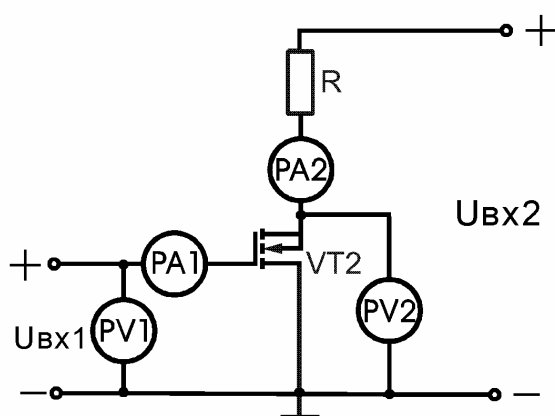


Рис. 27. Схема исследования характеристик полевого транзистора с индуцированным каналом

Контрольные вопросы

- Какие транзисторы называют полевыми?
- Как устроен полевой транзистор с управляющим р-п переходом?
- Перечислите типы полевых транзисторов.
- Какие характерные области выделяют на ВАХ полевого транзистора?
- Каким преимуществом обладают полевые транзисторы по сравнению с биполярными?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение схем включения и режимов работы полевого транзистора.

При решении задач усиления электрических сигналов в частности используют полевые транзисторы. Простейшим усилителем является усилительный каскад (рис. 28), содержащий нелинейный управляемый элемент УЭ, в частности биполярный транзистор, резистор R и источник электрической энергии. Усилительный каскад имеет входную цепь, к которой подводится входное напряжение $U_{вх}$ (усиливаемый сигнал), и выходную цепь для получения выходного напряжения $U_{вых}$ (усиленный сигнал). Усиленный сигнал имеет значительно большую мощность по сравнению со входным сигналом. Увеличение мощности происходит за счет источника электрической энергии E . Процесс усиления осуществляется посредством изменения сопротивления нелинейного управляемого элемента УЭ, а следовательно, и тока в выходной цепи под воздействием входного тока.

Существует три схемы включения полевого транзистора в усилительных каскадах:

- схема с общим истоком (ОИ);
- схема с общим стоком (ОС);
- схема с общим затвором (ОЗ).

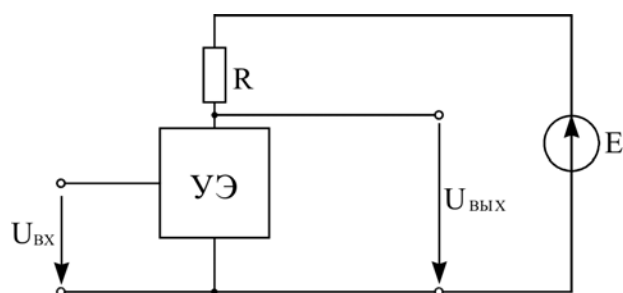


Рис. 28. Структурная схема усилительного каскада

Одной из наиболее распространенных схем включения полевых транзисторов является схема с общим истоком. В этой схеме исток является общим электродом для входной и выходной цепей, а резистор R , который является нагрузкой каскада, включается в стоковую цепь транзистора. Для стоковой цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$U_{п} = U_{си} + RI_c.$$

Расчет такой нелинейной цепи, то есть определение I_c , $U_{гк}$ и $U_{си}$ для различных значений токов затвора I_3 и сопротивлений резистора R , можно произвести графически (рис. 29). Для этого на семействе коллекторных характеристик необходимо построить вольтамперную характеристику коллекторного резистора R_c (линию нагрузки по постоянному току). Эту характеристику строят по двум характерным точкам:

Режим ХХ при $I_c = 0$ $U_{си} = U_{п}$;

Режим КЗ при $U_{си} = 0$ $I_c = U_{п}/R_c$.

Точки пересечения линии нагрузки со стоковыми характеристиками дают однозначную переходную характеристику $I_c = f(I_3)$.

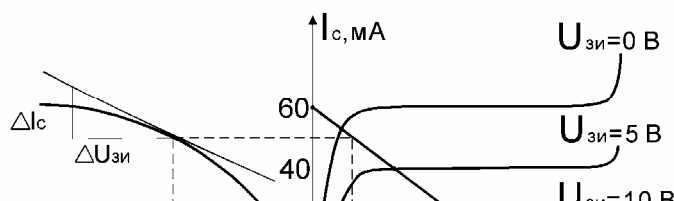


Рис. 29. Графический расчет усилительного каскада с общим истоком

Графический расчет режима работы транзистора с общим истоком представлен на рис. 29, с общим истоком произведен для режима А, при уровне входного сигнала $U_{вх}=7,5$ В. Полевой транзистор с характеристиками, показанными на рис. 29, при $U_{п}=40$ В и $R=667$ Ом обеспечивает уровень выходного сигнала $U_{вых}=6$ В, коэффициент усиления по напряжению $K_u=2,4$ [1].

Порядок выполнения работы

1. Последовательно собрать схемы, представленные на рис. 30. Установить напряжение $U_{вх2}$ на уровне 12 В, напряжение $U_{вх1}$ на уровне 1 В. Записать показания приборов в табл. 8.

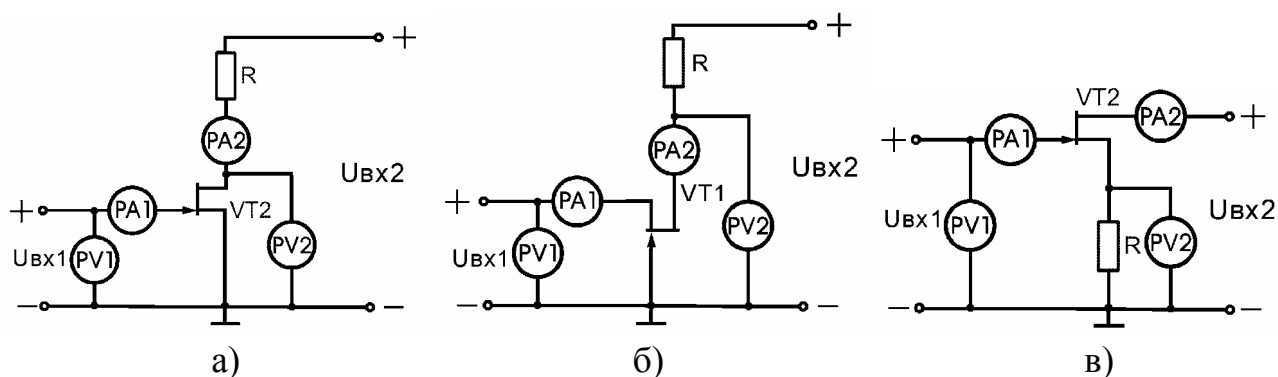


Рис. 30. Схемы включения полевого транзистора с n-каналом: а – с общим истоком (ОИ); б – с общим стоком (ОС); в – с общим затвором (ОЗ)

2. Для указанных схем включения определить следующие коэффициенты:
 - а) коэффициент передачи по напряжению $K_u = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}$;
 - б) крутизна $s = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$;
 - в) дифференциальное (внутреннее) сопротивление $r_{вых} = \Delta U_{си} / \Delta I_c$;
 - г) дифференциальное сопротивление участка затвор – сток $R_{зс} = \Delta U_{зс} / \Delta I_c$.
 Значения коэффициентов свести в табл. 8.

Исследование схем включения полевого транзистора

Схема включения	С общим истоком	С общим стоком	С общим затвором
U_{BX}, B			
$U_{ВЫХ}, B$			
I_{BX}, A			
$I_{ВЫХ}, A$			
S			
$r_{ВЫХ}$			
r_{BX}			
R_{3C}			

3. Сделать выводы о возможности использования схем включения транзисторов в усилительных каскадах напряжения, тока и мощности.

4. Построить передаточную характеристику (при $R=100 \text{ Ом}$) и сравнить полученные коэффициенты с графическим расчетом.

5. Исследование схем включения полевого транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) с индуцированным затвором. Последовательно собрать схемы, представленные на рис. 31. Установить напряжение U_{BX2} на уровне 12 В, напряжение U_{BX1} на уровне 1 В. Записать показания приборов в табл. 8.

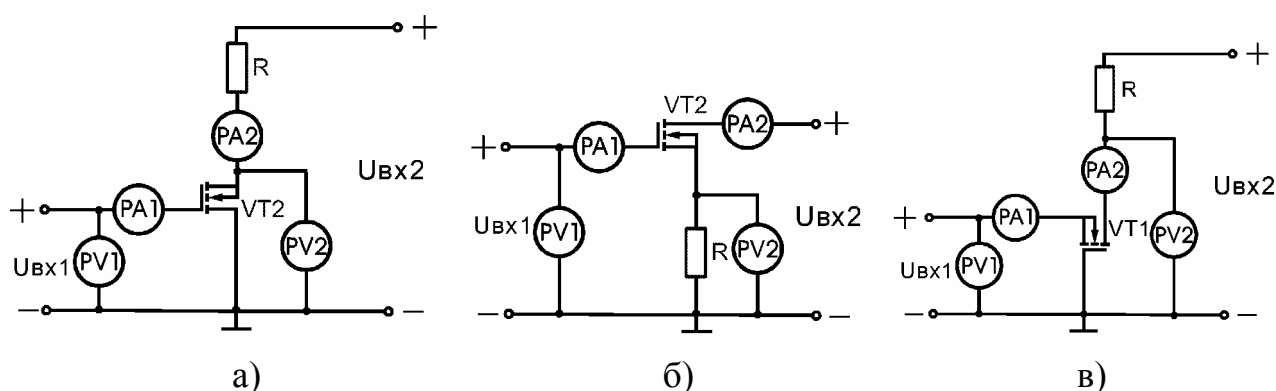


Рис. 31. Схемы включения полевого транзистора с индуцированным затвором: а – с общим истоком (ОИ); б – с общим стоком (ОС); в – с общим затвором (ОЗ)

Контрольные вопросы

1. Каково назначение элементов усилителя?
2. Каковы особенности применения полевого транзистора в зависимости от положения его рабочей точки на выходных характеристиках?
3. Каковы основные схемы включения полевого транзистора?
4. Приведите временную диаграмму полевого транзистора.

5. Укажите коэффициент усиления по току для различных схем включения.

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК IGBT ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение параметров IGBT транзистора.

IGBT транзистор является управляемым нелинейным элементом, его вольтамперные характеристики могут быть представлены в соответствии с рис. 32. Зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером – $I_K = f(U_{КЭ})$ при фиксированных значениях напряжения затвора – $U_3 = \text{const}$ называют семейством выходных (коллекторных) характеристик транзистора (рис. 32, а). Зависимость между током и напряжением во входной цепи транзистора – $I_K = f(U_{зз})$ называют входной или затворной характеристикой транзистора (рис. 32, б).

Входная характеристика практически не зависит от напряжения $U_{КЭ}$. Выходные характеристики почти прямолинейны в широком диапазоне изменения напряжения [6].

Рис. 32. Вольтамперные характеристики IGBT транзистора: а – выходные; б – входная

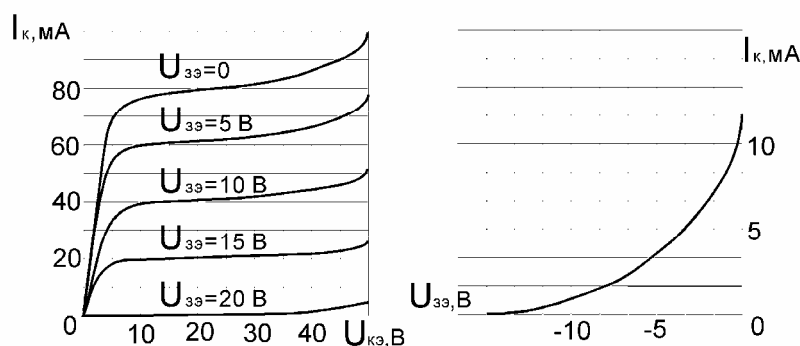
а)

б)

Порядок выполнения работы

1. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Полевой транзистор» приведен на рис. 33. Собрать схему, представленную на рис. 34. Подключить измерительные приборы к модулю IGBT транзистора, схема с общим эмиттером, и модуль питания в соответствии со схемой.

а) Снять входную характеристику IGBT транзистора $I_K = f(U_{зз})$. Изменяя величину входного напряжения, записать показания приборов PV1 и PA2. Результаты измерений занести в табл. 9.



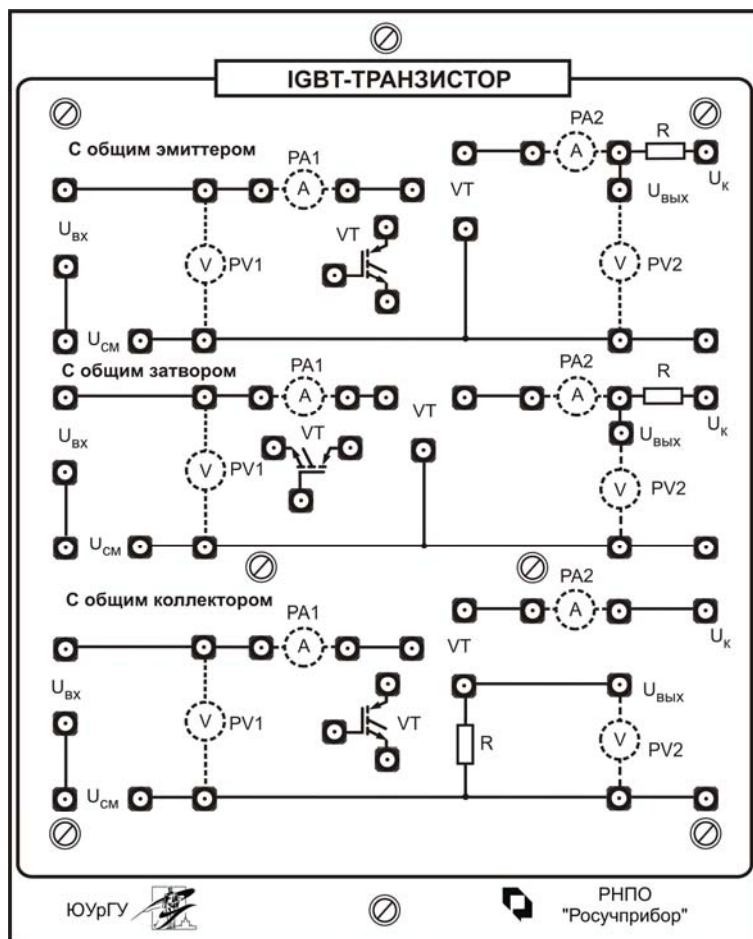


Рис. 33. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «IGBT транзистор»

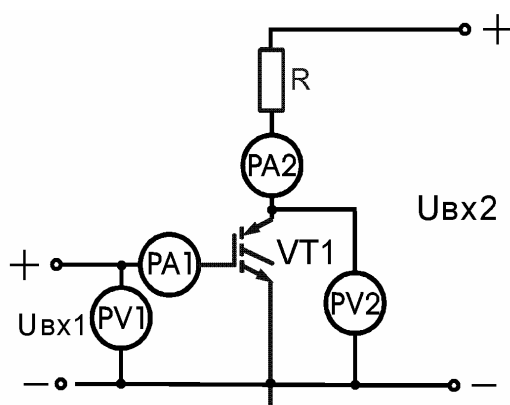


Рис. 34. Схема исследования характеристик IGBT транзистора

Таблица 9

Входная характеристика IGBT транзистора

$U_{3Э}, В$									
$I_K, мА$									

По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора.

б) Снять выходные характеристики IGBT транзистора $I_K = f(U_{КЭ})$ при $U_{3Э} = \text{const}$. Изменяя величину входного напряжения $U_{КЭ}$, записать показания приборов PV2 и PA2 для трех фиксированных значений напряжения ($U_{3Э} = 0$, $U_{3Э} = 0,5U_{3Э\text{max}}$, $U_{3Э} = U_{3Э\text{max}}$), контроль за величиной напряжения $U_{3Э}$ осуществляется с помощью

вольтметра PV1. Результаты измерений занести в табл. 10. По результатам измерений построить выходные ВАХ транзистора.

Таблица 10

Выходные характеристики IGBT транзистора

$U_{3Э} = \text{мА}$		$U_{3Э} = \text{мА}$		$U_{3Э} = \text{мА}$	
$U_{КЭ}, \text{В}$	$I_{К}, \text{А}$	$U_{КЭ}, \text{В}$	$I_{К}, \text{А}$	$U_{КЭ}, \text{В}$	$I_{К}, \text{А}$

Контрольные вопросы

1. Чем является IGBT транзистор?
2. Изобразите внутреннюю структуру IGBT транзистора.
3. Изобразите входную и выходную характеристики IGBT транзистора.
4. Перечислите основные преимущества IGBT транзистора.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ IGBT ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение режимов работы и схем включения IGBT транзистора.

При решении задач усиления электрических сигналов в частности используют биполярные транзисторы с МОП-управлением. Простейшим усилителем является усилительный каскад (рис. 35), содержащий нелинейный управляемый элемент УЭ, в частности IGBT транзистор, резистор R и источник электрической энергии. Усилительный каскад имеет входную цепь, к которой подводится входное напряжение $U_{вх}$ (усиливаемый сигнал), и выходную цепь для получения выходного напряжения $U_{вых}$ (усиленный сигнал). Усиленный сигнал имеет значительно большую мощность по сравнению со входным сигналом. Увеличение мощности происходит за счет источника электрической энергии E. Процесс усиления осуществляется посредством изменения сопротивления нелинейного управляемого элемента УЭ; а следовательно, и тока в выходной цепи под воздействием входного тока [7].

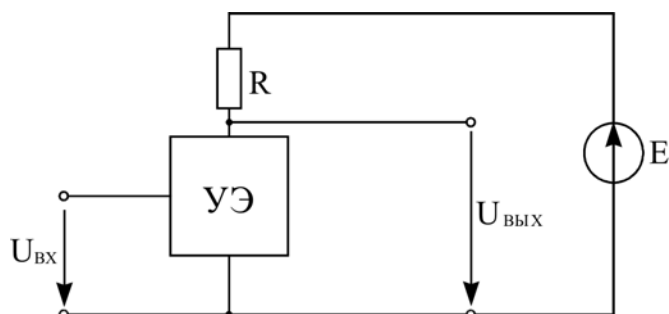


Рис. 35. Структурная схема усилительного каскада

Существует три схемы включения IGBT транзистора в усилительных каскадах:

- схема с общим эмиттером (ОЭ);
- схема с общим коллектором (ОК);
- схема с общим затвором (ОЗ).

Одной из наиболее распространенных схем включения IGBT транзисторов является схема с общим эмиттером. В этой схеме эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей, а резистор R , который является нагрузкой каскада, включается в коллекторную цепь транзистора. Для коллекторной цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$U_{\Pi} = U_{КЭ} + R I_{К}.$$

Расчет такой нелинейной цепи, то есть определение $I_{К}$, $U_{ТК}$ и $U_{КЭ}$ для различных значений токов затвора I_3 и сопротивлений резистора R , можно произвести графически (рис. 36). Для этого на семействе коллекторных характеристик необходимо построить вольтамперную характеристику коллекторного резистора R_K (линию нагрузки по постоянному току).

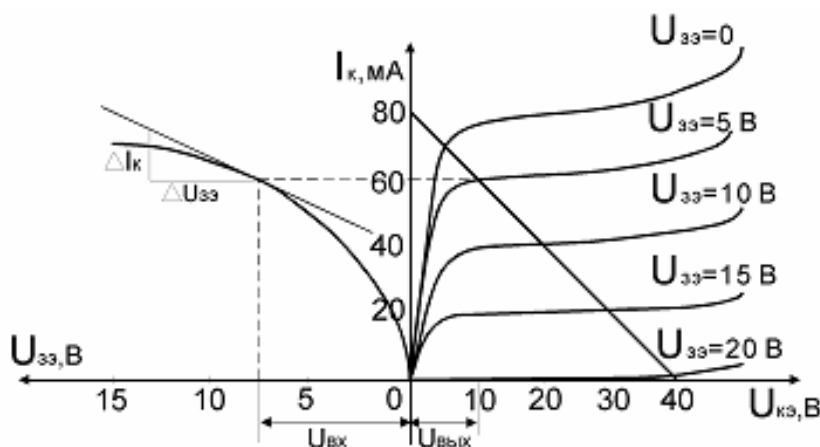


Рис. 36. Графический расчет усилительного каскада с общим эмиттером

Эту характеристику строят по двум точкам:

режим ХХ при $I_{К} = 0$ $U_{КЭ} = U_{\Pi}$;

режим КЗ при $U_{КЭ} = 0$ $I_{К} = U_{\Pi}/R_{К}$.

Точки пересечения линии нагрузки с коллекторными характеристиками дают однозначную переходную характеристику

$$I_{К} = f(I_3).$$

Графический расчет усилительного каскада с общим эмиттером представлен на рис. 36, с общим эмиттером произведен для режима А, при амплитуде входного сигнала $U_{ВХ} = 7,5 В$. Данный тип транзистора при $U_{\Pi} = 40 В$, $R = 667 Ом$ обеспечивает амплитуду выходного сигнала $U_{ВЫХ} = 10 В$ и коэффициент усиления по напряжению $K_u = 60 [1]$.

Порядок выполнения работы

1. Последовательно собрать схемы, представленные на рис. 37. Установить напряжение U_{BX2} на уровне 12 В, напряжение U_{BX1} на уровне 1 В. Записать показания приборов в табл. 11.

2. Сделать выводы о возможности использования схем включения транзисторов в усилительных каскадах напряжения, тока и мощности.

3. Построить передаточную характеристику (при $R=100\text{ Ом}$).

Таблица 11

Исследование схем включения IGBT транзистора

Схема включения	С общим эмиттером	С общим коллектором	С общим затвором
$U_{BX}, \text{В}$			
$U_{ВЫХ}, \text{В}$			
$I_{BX}, \text{А}$			
$I_{ВЫХ}, \text{А}$			

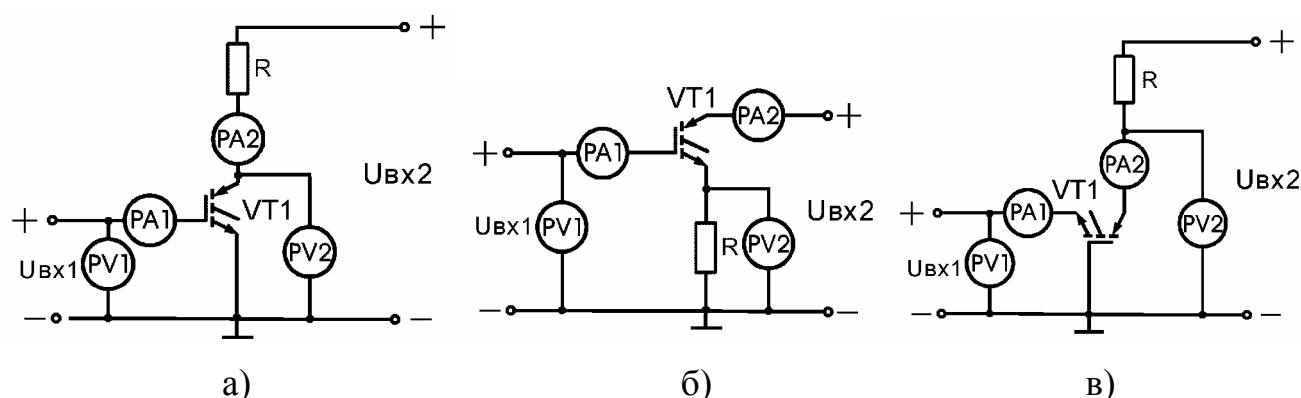


Рис. 37. Схемы включения IGBT транзистора: а – с общим эмиттером (ОЭ); б – с общим коллектором (ОК); в – с общим затвором (ОЗ)

Контрольные вопросы

1. Каково назначение элементов усилителя?
2. Изобразите возможные схемы включения IGBT транзистора.
3. Какая из схем включения IGBT транзистора является наиболее распространенной?
4. Чем определяется положение рабочей точки IGBT транзистора?
5. Чему равен коэффициент усиления?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНИСТОРА

Цель работы: ознакомление с принципом действия динистора, исследование его вольтамперной характеристики.

Диодными тиристорами называют полупроводниковые приборы с тремя р-п переходами, предназначенные для использования в качестве электронных ключей в схемах переключения электрических токов. Динисторы имеют два вывода, через которые проходит как основной ток, так и ток управления. Условно-графическое обозначение динистора (УГО) приведено на рис. 38, а.

В своей структуре тиристор имеет три р-п перехода (рис. 38, б), причём два из них (P_1 и P_3) работают в прямом направлении, а средний переход P_2 – в обратном направлении.

Крайнюю область р называют анодом, а крайнюю область *n* – катодом. Тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы (модели), состоящей из двух транзисторов VT1 и VT2 типа *n*-р-*n* и *p*-*n*-*p*, соединённых, как показано на рис. 38, в. Получается, что переходы P_1 и P_3 являются эмиттерными переходами этих транзисторов, а переход P_2 работает в обоих транзисторах в качестве коллекторного перехода.

Через переходы P_1 и P_3 , работающие в прямом направлении, в области, примыкающие к переходу P_2 , инжектируются неосновные носители заряда, которые уменьшают сопротивление перехода P_2 . И при превышении напряжения включения такая структура переходит в проводящее состояние.

Качественная ВАХ динистора представлена на рис. 39. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Тиристор и динистор» приведен на рис. 40.

При увеличении прямого напряжения на динисторе сначала ток невелик и растёт медленно, что соответствует участку 0 А. В этом режиме динистор закрыт.

На сопротивление коллекторного перехода P_2 (см. рис. 38) влияют два взаимно противоположных процесса. С одной стороны повышение обратного напряжения на этом переходе увеличивает его сопротивление, так как под влиянием обратного напряжения переход P_2 всё больше обедняется основными носителями. Но с другой стороны, повышение прямых напряжений на эмиттерных переходах P_1 и P_3 усиливает инжекцию носителей, которые, подходя к переходу P_2 , обогащают его и уменьшают его сопротивление. До точки А перевес имеет первый процесс и сопротивление растёт, но всё медленнее и медленнее, так как постепенно усиливается второй процесс [7].

Около точки А при некотором напряжении, называемом напряжением включения $U_{вкл}$, влияние обоих процессов уравнивается, а затем ничтожно малое повышение напряжения создаёт перевес второго процесса и сопротивление перехода P_2 начинает уменьшаться. Вследствие возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания динистора. Этот процесс сопровождается следующими явлениями: ток скачком возрастает (участок АВ), так как увеличение напряжения на P_1 и P_3 уменьшает сопротивление P_2 и напряжение на нём, за счёт чего ещё больше возрастает напряжение на P_1 и P_3 , а это, в свою очередь, приводит к ещё большему возрастанию тока, уменьшению сопротивления P_2 и так далее, т.е. возникает положительная обратная связь по току. В результате устанавливается большой ток при малом напряжении (участок ВВ). Ток в этом режиме, когда прибор открыт, определяется, главным образом,

последовательно включенным сопротивлением нагрузки R_H . За счёт возникшего большого тока всё напряжение источника питания падает на нагрузке R_H .

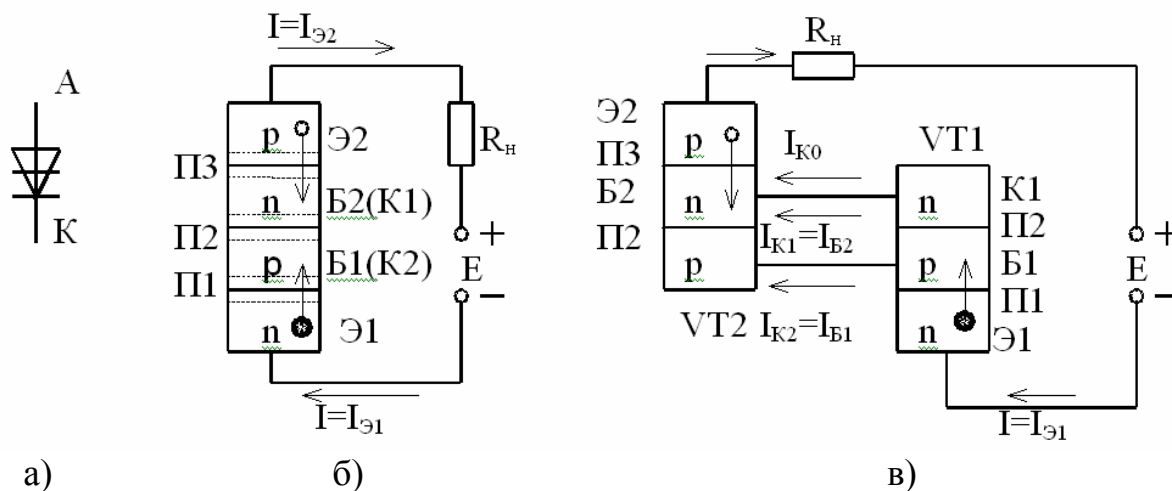


Рис. 38. Диодный тиристор: а – УГО диодного тиристора; б – структура диодного тиристора (динистора); в – эквивалентная схема динистора на двух транзисторах

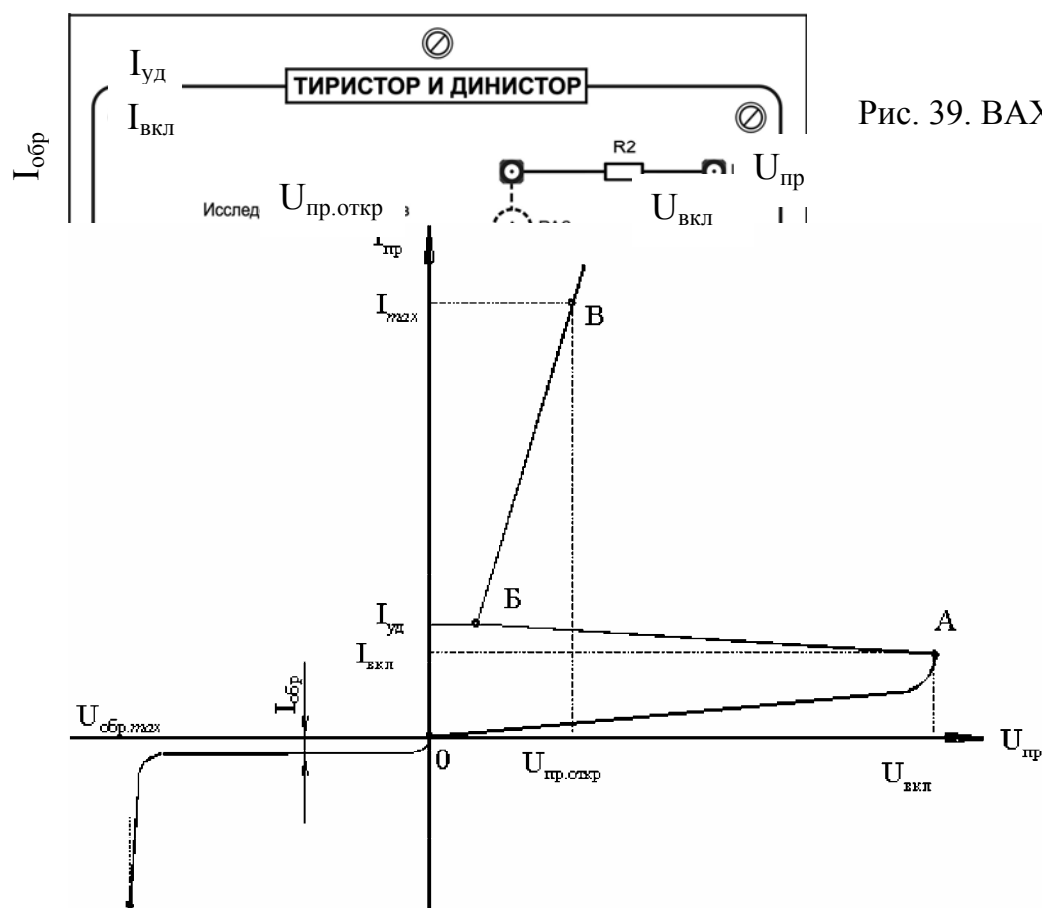


Рис. 39. ВАХ диодного тиристора

Рис. 40. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Тиристор и динистор»

Процесс скачкообразного переключения тиристора из закрытого состояния в открытое можно очень просто объяснить путем логических рассуждений. Из эквивалентной схемы (см. рис. 38, в) видно, что ток тиристора I является током первого эмиттера $I_{э1}$ или током второго эмиттера $I_{э2}$. Иначе ток I можно рассматривать как сумму двух коллекторных токов $I_{к1}$ и $I_{к2}$, равных соответственно $\alpha_1 I_{э1}$ и $\alpha_2 I_{э2}$, где α_1 и α_2 – коэффициенты передачи эмиттерного тока транзисторов VT1 и VT2. Кроме того, в состав тока I входит ещё начальный ток коллекторного перехода $I_{ко}$. Таким образом, можно записать выражение

$$I = \alpha_1 I_{э1} + \alpha_2 I_{э2} + I_{ко}.$$

Учитывая, что $I_{э1} = I_{э2} = I$, получаем следующее выражение:

$$I = \alpha_1 I + \alpha_2 I + I_{ко}.$$

Решая которое относительно I , получаем:

$$I = I_{ко} / (1 - (\alpha_1 + \alpha_2)).$$

При малых токах коэффициенты α_1 и α_2 значительно меньше единицы и сумма их также меньше единицы и ток I получается небольшим. С увеличением тока значения α_1 и α_2 растут, что приводит к возрастанию тока I . При некотором токе, являющимся током включения $I_{вкл}$, сумма $(\alpha_1 + \alpha_2)$ становится равной единице и ток I возрастал бы до бесконечности, если бы его не ограничивало сопротивление нагрузки. Диодный тиристор характеризуется максимальным допустимым значением прямого тока $I_{мах}$ при котором на приборе будет небольшое напряжение $U_{пр.откр}$.

Если уменьшать ток, то при некотором его значении, называемым током удержания $I_{уд}$, ток резко уменьшается, а напряжение резко повышается, т.е. прибор скачкообразно переходит обратно в закрытое состояние. При обратном напряжении характеристика получается такой же, как и для обратного тока

обычных диодов, поскольку к переходам Π_1 и Π_3 будет приложено обратное напряжение.

Время включения тиристоров обычно не более единиц микросекунд, а время выключения, связанное с рекомбинацией носителей, доходит до десятков микросекунд. Поэтому тиристоры могут работать только на сравнительно низких частотах [1].

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему представленную на рис. 41. Подключить измерительные приборы к модулю динистора и модуль питания в соответствии со схемой.

а) Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики IGBT динистора $I_{\text{ПР}} = f(U_{\text{ПР}})$. Изменяя величину входного напряжения, записать показания приборов PV1 и PA1. Результаты измерений занести в табл. 12.

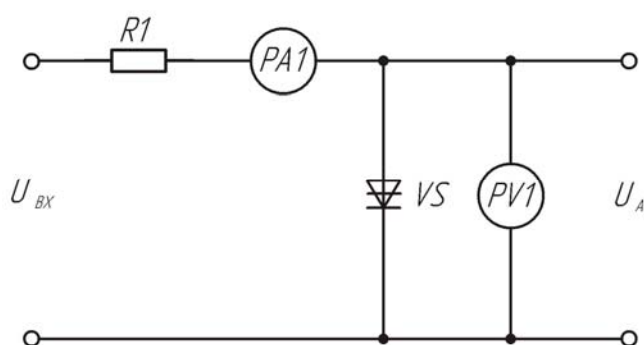


Рис. 41. Схема исследования вольтамперной характеристики динистора

Таблица 12

Прямая ветвь вольтамперной характеристики динистора

$U_{\text{ПР}}, \text{ В}$									
$I_{\text{ПР}}, \text{ мА}$									

Примечание: наблюдать загорание светодиода при переключении динистора. При включенном состоянии динистора светодиод HL2 горит.

б) Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики IGBT динистора $I_{\text{ОБР}} = f(U_{\text{ОБР}})$, изменив полярность подключения. Изменяя величину входного напряжения, записать показания приборов PV1 и PA1. Результаты измерений занести в табл. 13.

Таблица 13

Обратная ветвь вольтамперной характеристики динистора

$U_{\text{ПР}}, \text{ В}$									
$I_{\text{ПР}}, \text{ А}$									

По результатам измерений построить ВАХ динистора.

Контрольные вопросы

1. Нарисовать качественную ВАХ динистора.
2. Обозначить на вольтамперной характеристике динистора характерные участки и точки, пояснив обозначения.
3. Привести структурную схему динистора.
4. Какова область применения динисторов?
5. Нарисовать схему включения динистора.

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА

Цель работы: ознакомление с принципом действия тиристора, исследование его вольтамперной характеристики.

Если от одной из базовых областей сделан управляющий вывод, то получается управляемый переключающий прибор, называемый триодным тиристором или тринистором. Его УГО и ВАХ представлены на рис. 42. Подавая управляющее прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно регулировать значение $U_{\text{вкл}}$. Чем больше ток через такой управляющий переход I_y , тем ниже $U_{\text{вкл}}$, т.е. чем больше этот ток, тем сильнее инжекция носителей заряда от соответствующего эмиттера к среднему коллекторному переходу и тем меньшее требуется напряжение на тиристоре для начала процесса отпирания тиристора. Наиболее высокое $U_{\text{вкл}}$ получается при отсутствии тока управления, когда триодный тиристор превращается в диодный. При значительном токе I_y характеристика тиристора приближается к характеристике обычного диода. Подобный тиристор называют тиристором с управлением по катоду, так как управляющим электродом является базовая область p, ближайшая к катодной области n.

Обычные тринисторы не запираются по управляющей цепи и для запираения необходимо уменьшить ток в тринисторе до значения ниже $I_{\text{уд}}$. Однако существуют так называемые запираемые тринисторы (GTO), которые замыкаются при подаче через управляющий электрод короткого импульса обратного напряжения. Разработаны также симметричные тиристоры или симисторы, имеющие n-p-n-p-n или p-n-p-n-p структуры, которые отпираются при любой полярности напряжения и проводят ток в оба направления, позволяя коммутировать обе полуволны входного напряжения.

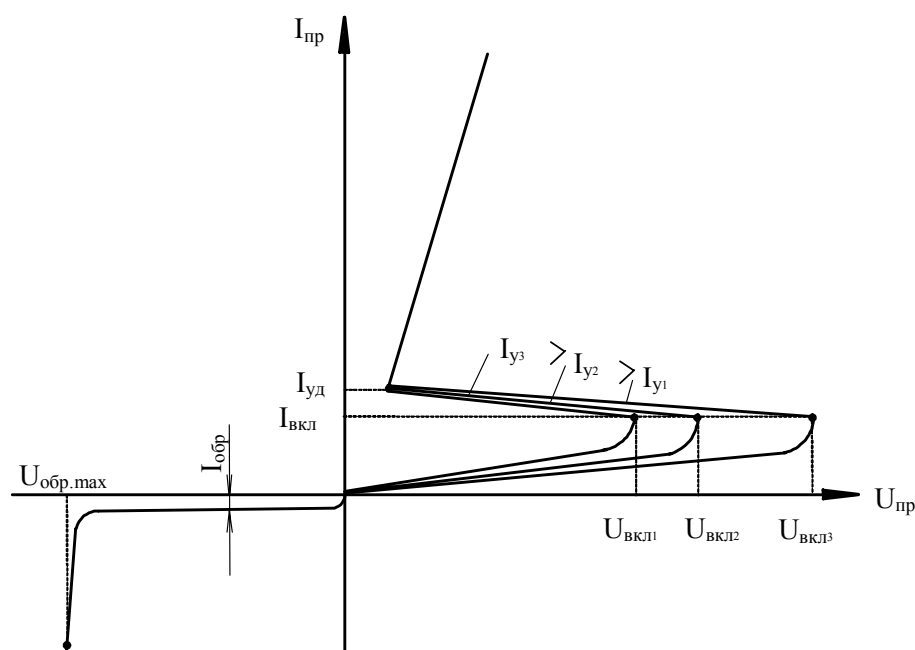


Рис. 42. УГО и ВАХ тиристора

Полупроводниковые переключательные приборы широко используются для управления яркостью осветительных приборов или скоростью вращения двигателей. В качестве регулирующих элементов в таких схемах используются симисторы. При управлении нагрузкой переменного тока используется запаздывающее включение симистора. Изменяя время задержки отпирающего импульса на управляющем электроде относительно перехода фазы питающего напряжения через ноль, можно управлять временем открытого состояния симистора, а следовательно, и средней мощностью, потребляемой нагрузкой, сводя при необходимости её к нулю [1].

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему представленную на рис. 43. Подключить измерительные приборы к модулю тиристора и модуль питания в соответствии со схемой.
2. Изменяя значения $U_{вх}$ по показаниям амперметров РА1 и РА2 и вольтметра PV2 необходимо снять ВАХ тиристора, для одного фиксированного значения тока управления I_y . Результаты измерений занести в табл. 14.

Таблица 14

Прямая ветвь вольтамперной характеристики тиристора

$I_y = \text{мА}$									
$U_{пр}, \text{В}$									
$I_{пр}, \text{А}$									

Примечание. Наблюдать загорание светодиода при переключении тиристора. При включенном состоянии тиристора светодиод HL1 горит.

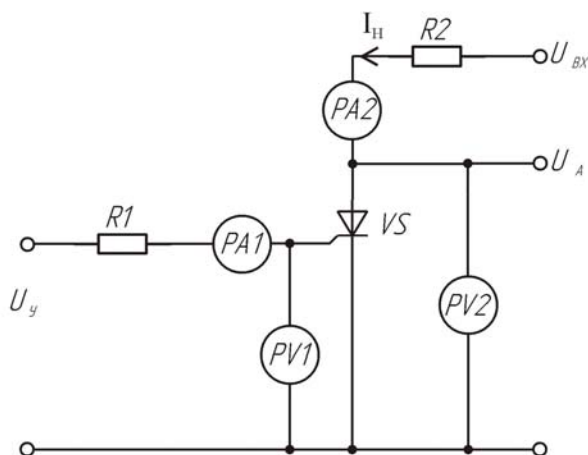


Рис. 43. Схема исследования вольтамперной характеристики тиристора

По результатам измерений построить ВАХ тиристора.

3. На построенной характеристике показать напряжение включения тиристора $U_{\text{вкл}}$, ток включения $I_{\text{вкл}}$, ток удержания $I_{\text{уд}}$ и напряжение на тиристоре при этом токе.

4. Собрать схему, представленную на рис. 44. Подключить измерительные приборы к модулю тиристора и модуль питания в соответствии со схемой.

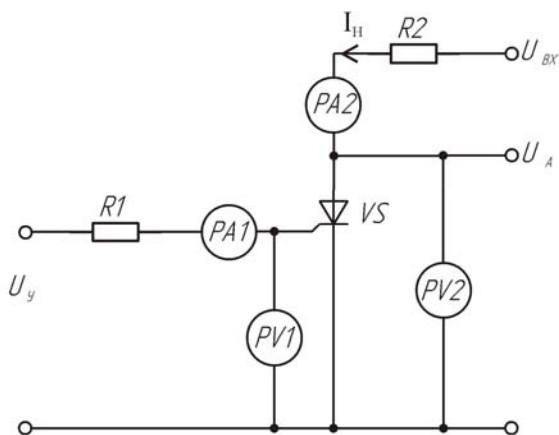


Рис. 44. Схема исследования режимов работы тиристора

В качестве напряжения $U_{\text{вх}}$ использовать переменное синусоидальное напряжение, поданное с модуля питания частотой $f = 50$ Гц и амплитудой 16 В (~ 16 В). Изменяя величину постоянного управляющего напряжения U_y , добиться открывания тиристора. Построить временные диаграммы $U_{\text{вых}} = f(t)$. Объяснить характер временных диаграмм и на них обозначить амплитудные и временные параметры. По временным диаграммам определить время отпирания тиристора.

Контрольные вопросы

1. Нарисовать качественную ВАХ триодного тиристора.
2. Обозначить на вольтамперной характеристике характерные участки и точки, пояснив назначение.
3. Привести структурную схему тиристора.

4. Нарисовать схему тиристора.
5. Чему равен ток удержания тиристора – току управления или анодному току тиристора?
6. Как можно добиться отпирания тиристора, если ток управления I_y равен нулю?

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: изучение видов и принципов работы основных видов оптоэлектронных приборов индикации, исследование и сравнение ВАХ различных типов светодиодов с ВАХ обычного диода.

Полупроводниковый прибор отображения информации – это полупроводниковый излучатель энергии видимой области спектра, предназначенный для отображения визуальной информации.

Инфракрасный излучающий диод (ИК-диод) – это полупроводниковый излучатель, представляющий собой диод, способный излучать энергию инфракрасной области спектра. Полупроводниковые приборы отображения информации, в структуре которых имеется выпрямляющий электрический переход (р-п-переход или гетеропереход) (рис. 45) [2].

Излучение полупроводниковых приборов отображения информации и инфракрасных излучающих диодов вызвано самопроизвольной рекомбинацией носителей заряда при прохождении прямого тока через выпрямляющий электрический переход. Рекомбинация носителей заряда может происходить как в самом выпрямляющем электрическом переходе, так и в прилегающих к этому переходу областях структуры. Чтобы кванты энергии – фотоны, освобожденные при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ($\Delta\mathcal{E} > 1,7$ эВ). При меньшей

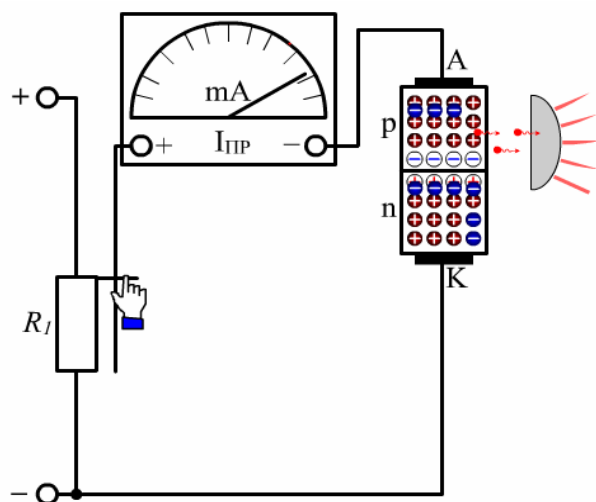


Рис. 45

ширине запрещенной зоны исходного полупроводника кванты энергии, освобождающиеся при рекомбинации носителей заряда, соответствуют инфракрасной области излучения. Таким образом, разница между полупроводниковыми приборами отображения информации (визуального представления информации) и инфракрасными излучающими диодами заключается только в отличии исходного полупроводникового материала.

Основным методом формирования р-n-переходов и гетеропереходов при создании полупроводниковых излучателей на основе арсенида галлия GaAs, фосфида галлия GaP, твердых растворов этих соединений $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ является метод эпитаксиального наращивания. Обычно это жидкофазная эпитаксия, иногда – эпитаксия из газовой фазы.

Для формирования р-n-переходов в карбиде кремния SiC используют метод диффузии примесей, а иногда и метод эпитаксиального наращивания. Одной из интересных особенностей карбида кремния является его политипизм, т.е. существование нескольких кристаллических модификаций, отличающихся, в частности, шириной запрещенной зоны.

Высокая физико-химическая стабильность карбида кремния и относительно малые коэффициенты диффузии примесей в нем создают предпосылки для изготовления высокостабильных полупроводниковых излучателей на основе этого материала. Однако технология изготовления монокристаллов карбида кремния и технология формирования выпрямляющих электрических переходов в этих монокристаллах отличаются сложностью. Кроме того, в полупроводниковых излучателях из карбида кремния не удастся получить высокий квантовый выход.

Большой интерес для изготовления полупроводниковых излучателей представляет нитрид галлия GaN, имеющий наибольшую ширину запрещенной зоны ($\Delta E = 3,5$ эВ) среди соединений типа AIII BV, освоенных в технологическом отношении. Энергии фотонов, которые могут быть возбуждены в этом материале, перекрывают всю видимую область спектра. Однако независимо от метода получения и легирования нитрид галлия обладает только электропроводностью n-типа. Поэтому для получения излучения при рекомбинации неравновесных носителей заряда в данном случае надо создать выпрямляющий электрический переход в виде перехода Шотки на контакте металла с нитридом галлия.

Сопоставление эффективности люминесценции различных материалов показывает, что квантовый выход растет с увеличением длины волны. Поэтому, если зрительное восприятие информации не является обязательным, предпочтение следует отдать инфракрасным излучающим диодам на основе арсенида галлия [1].

Полупроводниковые приборы отображения информации в зависимости от структуры, конструкции и назначения могут быть разделены на светоизлучающие диоды, полупроводниковые знаковые индикаторы, шкалы и экраны.

Светоизлучающий диод – это полупроводниковый прибор отображения информации, представляющий собой диод.

Таким образом, в структуре светоизлучающего диода есть только один выпрямляющий электрический переход или один полупроводниковый излучающий элемент.

Полупроводниковый излучающий элемент – часть полупроводникового прибора отображения информации, состоящая из излучающей поверхности и контактов для подключения к электрической схеме.

Полупроводниковый знаковый индикатор – это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих

элементов, предназначенный для представления информации в виде знаков и организованный в один или несколько разрядов.

Пример конструкции одноразрядного знакового индикатора показан на рис. 46. Структура этого знакового индикатора состоит из семи излучающих элементов и десятичной точки, т.е. восьми р-п-переходов в одном монокристалле полупроводника, излучающих свет при прохождении тока в прямом направлении. Различные комбинации излучающих элементов, обеспечиваемые внешней коммутацией, позволяют воспроизвести цифры от 0 до 9, десятичную точку и различные символы.

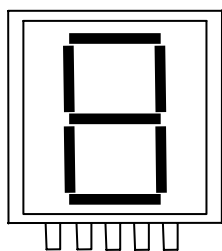


Рис. 46. Конструкция одноразрядного знакового индикатора (цифрового индикатора)

Полупроводниковая шкала – это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из полупроводниковых излучающих элементов, предназначенный для представления аналоговой информации.

Структура полупроводниковой шкалы может представлять собой несколько светоизлучающих диодов, расположенных вдоль одной линии, или несколько р-п-переходов, также расположенных по одной линии на общей подложке.

Полупроводниковый экран – это полупроводниковый прибор отображения информации, состоящий из излучающих элементов, расположенных вдоль одной линии, и содержащий n строк излучающих элементов, предназначенный для использования в устройствах отображения аналоговой и цифровой информации.

Примером полупроводникового экрана могут служить полупроводниковые приборы отображения информации АЛ306А – АЛ306И, выпускаемые, однако, как знаковые индикаторы. Они состоят из 36 дискретных светоизлучающих диодов, соединенных в матрицу (семь строк по пять диодов и один диод отдельно) с перекрестной коммутацией и позволяющих воспроизводить цифры и буквы [7].

Основные характеристики и параметры оптоэлектронных приборов

Яркость излучения. Яркость излучения является параметром полупроводниковых приборов отображения информации. Единицей яркости в системе СИ служит кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) – яркость источника излучения, каждый квадратный метр излучающей поверхности которого имеет в данном направлении силу света, равную одной канделе. Следует отметить, что световые измерения, строго говоря, не вполне объективны. Основным «прибором», с помощью которого можно измерять светотехнические величины, в конечном счете, является глаз человека. Эффективность воздействия света на глаз человека определяется специальной величиной, которая получила название видности. Видность V – это отношение светового потока Φ (т.е. оцениваемой

нашим глазом мощности) к соответствующей истинной, полной мощности лучистой энергии Φ_0 :

$$V = \Phi / \Phi_0.$$

На рис. 47 приведена зависимость видности от длины волны, определенная Международной комиссией по освещению (МКО). Чувствительность глаза максимальна на длине волны 0,555 мкм.

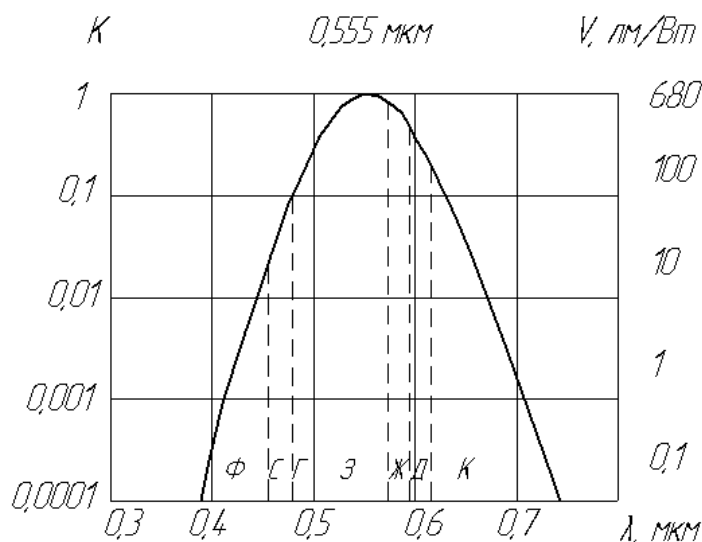


Рис. 47. Относительная K и абсолютная V видности стандартного фотометрического наблюдателя в зависимости от длины волны излучения

Для стандартного фотометрического наблюдателя 1 Вт лучистой энергии в максимуме чувствительности глаза соответствует 680 лм. Отношение видности света данной длины волны V_λ к максимальной видности V_{\max} называют относительной видностью

$$K = V_\lambda / V_{\max}.$$

Таким образом, излучатель, который всю свою энергию отдает только в виде излучения с длиной волны 0,555 мкм, обладает наибольшей яркостью и экономичностью с точки зрения глаза человека. Однако полупроводниковые излучатели часто используют для передачи информации в виде импульсов излучения, которые поступают на приемники излучения со спектральными характеристиками, существенно отличающимися от спектральной характеристики видности глаза человека. В этом случае яркость излучения может оказаться совершенно бесполезным параметром. Так, для инфракрасных излучающих диодов основным параметром является полная мощность излучения в ваттах или милливаттах при определенном прямом токе [5].

Яркостная характеристика. Полупроводниковые излучатели с выпрямляющим электрическим переходом обладают относительно малым сопротивлением при включении этого перехода в прямом направлении. Поэтому такие излучатели следует считать токовыми приборами, питаемыми от источников или генераторов тока. Соответственно яркостной характеристикой полупроводниковых приборов отображения информации является зависимость яркости от проходящего через прибор тока. Желательно иметь прямую пропорциональность яркости излучения от проходящего тока, что будет

соответствовать неизменности квантового выхода или неизменности отношения излучательных и безызлучательных актов рекомбинации при изменении тока. Аналогом яркостной характеристики для инфракрасных излучающих диодов является зависимость мощности излучения от проходящего тока.

Спектральная характеристика – зависимость мощности излучения от длины волны излучаемых электромагнитных колебаний. В первом приближении спектральный состав излучения можно характеризовать цветом свечения полупроводниковых приборов отображения информации, а инфракрасных излучательных диодов – длиной волны излучения в максимуме спектральной характеристики. Но более подробные сведения дает, конечно, спектральная характеристика.

Параметры, полупроводниковых излучателей как элементов электрической схемы определяются **вольтамперной характеристикой**. Различия прямых ветвей ВАХ полупроводниковых излучателей из разных материалов вызваны, прежде всего, различием в ширине запрещенной зоны и соответственно в высоте потенциального барьера на р-п-переходе (рис. 48). Обратные ветви ВАХ не представляют практического интереса, так как полупроводниковые излучатели с выпрямляющим электрическим переходом должны работать только при включении в прямом направлении. Следует, однако, иметь в виду, что напряжения пробоя полупроводниковых излучателей с выпрямляющим электрическим переходом не превышают нескольких вольт.

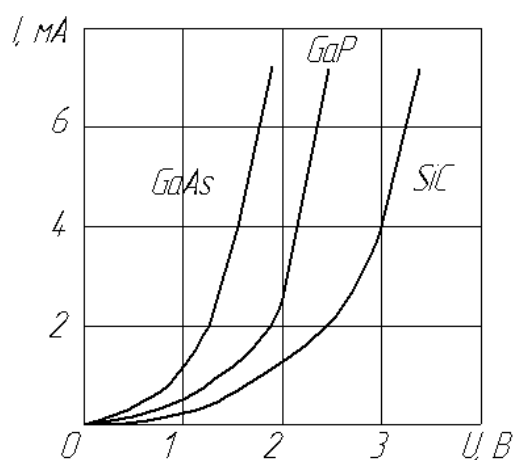


Рис. 48. Вольтамперные характеристики полупроводниковых излучателей, изготовленных на основе различных полупроводниковых материалов

Инерционность полупроводниковых излучателей характеризуют временем нарастания импульса излучения и временем спада импульса излучения, которые принято измерять между уровнями излучения 0,1 и 0,9 от амплитуды импульса излучения. Эти времена составляют обычно единицы или десятые доли микросекунды. Таким образом, времена нарастания и спада импульса излучения оказываются несущественными параметрами для полупроводниковых приборов отображения информации, предназначенных для визуальной индикации, так как инерционность глаза человека достаточно велика (около 50 мс).

Наоборот, для инфракрасных излучающих диодов, которые предназначены для обработки информации без визуализации, времена нарастания и спада импульса излучения могут быть одними из основных параметров [1].

Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Оптоэлектронные приборы индикации» приведен на рис. 49.

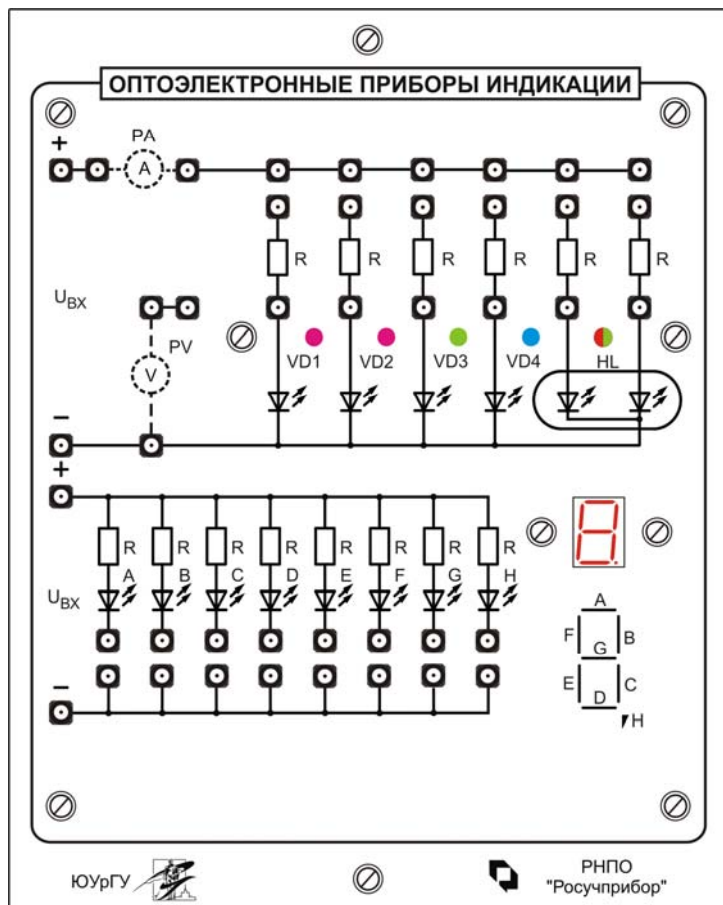
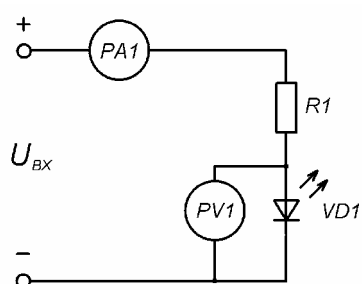


Рис. 49. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Оптоэлектронные приборы индикации»

Порядок выполнения работы



1. Собрать схему, представленную на рис. 50. Подключить измерительные приборы и модуль питания к модулю «Оптоэлектронные приборы» в соответствии со схемой.

Рис. 50. Схема исследования вольтамперной характеристики светодиода

2. Изменяя постоянное напряжение на входе схемы U_{BX} , по показаниям приборов PA1 и PV1 необходимо снять прямую ветвь вольтамперной

Таблица 15

[illegible]

VD2 – суперяркий светодиод (L-53SRD-H); VD3 – мигающий светодиод, содержит встроенный генератор (L-56BSRD-B); VD4 – синий светодиод (L-53PBC); HL – двухцветный светодиод, содержит два светодиода в одном корпусе (L-59SRSGW-CC).

4. Подключить светодиоды, выставить постоянное напряжение на уровне $U_{\text{вх}}=12 \text{ В}$ и визуально сравнить яркости свечения светодиодов. По наблюдениям сделать вывод о характере яркости свечения каждого светодиода.

6. Путём последовательного подключения каждого светодиода семисегментного индикатора заполнить табл. 16, в которой отображается зависимость светящегося символа от комбинации подключенных сегментов.

Таблица 16

[illegible]

Контрольные вопросы

1. Нарисовать качественную вольтамперную характеристику светодиода и обозначить на ней характерные участки и точки.
2. Нарисовать схему включения светодиода. Чем ограничивается ток светодиода?
3. При какой ширине запрещенной зоны исходного полупроводника кванты энергии, освобождающейся при рекомбинации носителей заряда, соответствуют визуальной области излучений и при какой инфракрасной области излучения?
4. Сравнить эти запрещенные зоны между собой.
5. Определение полупроводникового типа.
6. Чем вызвано излучение полупроводникового прибора при прохождении прямого тока через них?
7. Определение полупроводникового знакового индикатора.
8. Определение спектральной характеристики.
9. В каких полупроводниках оптоэлектронных приборах времена нарастания и спада импульса излучения являются несущественными параметрами и наоборот для каких полупроводников оптоэлектронных приборов являются одним из основных параметров?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОПАРЫ

Цель работы: ознакомление с принципом действия оптопары, изучение ее вольтамперных характеристик.

Работа различных полупроводниковых приемников излучения (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры) основана на использовании внутреннего фотоэффекта, который состоит в том, что под действием излучения в полупроводниках происходит генерация пар носителей зарядов электронов и дырок. Эти дополнительные носители увеличивают электронную проводимость. Такая добавочная проводимость, обусловленная действием фотонов, получила название фотопроводимости. В некоторых приборах за счет фотогенерации электронов и дырок возникает ЭДС, которую принято называть фото-ЭДС, и тогда эти приборы работают как источники тока.

Транзисторная оптопара выполняется с фотоприёмным элементом на основе фоторезистора. Как правило, в оптронах используются фототранзисторы со структурой n-p-n на основе кремния, чувствительные к излучению длиной волны около 1 мкм. Излучателями служат обычно арсенидгаллиевые диоды, максимум спектрального излучения которых лежит вблизи области наибольшей

чувствительности фототранзистора. Излучательный диод конструктивно расположен так, что большая часть света направляется на базовую область фототранзистора (рис. 52). Так же, как и в других оптопарах, излучатель и приёмник изолированы друг от друга оптически прозрачной средой [4].

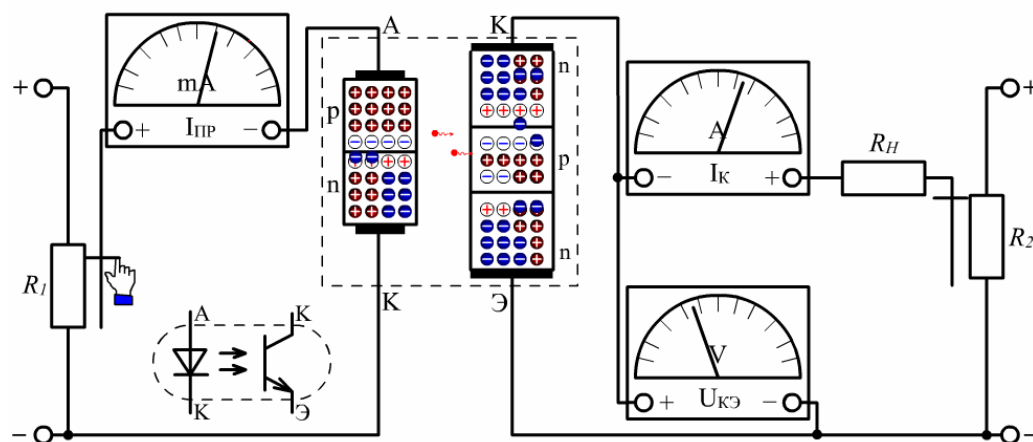


Рис. 52

При отсутствии излучения в цепи коллектора фототранзистора, включенного по схеме с ОЭ, протекает обратный (емновой) ток, аналогичный по происхождению и характеристикам току в обычных биполярный транзисторах. При повышении температуры на десять градусов обратный темновой ток примерно удваивается.

При облучении в базовой области генерируются пары «электрон – дырка». Электроны вытягиваются из базы в сторону положительно заряженного коллектора, а дырки остаются в базе и создают положительный заряд. Это эквивалентно возникновению отпирающего тока транзистора, вследствие чего ток коллектора также увеличивается. Соотношение между током базы и током коллектора можно представить следующим выражением:

$$I_{\text{ВЫХ}} = h_{21Э} I_{\text{ФБ}},$$

где $I_{\text{ВЫХ}}$ – выходной ток в цепи коллектора; $h_{21Э}$ – коэффициент передачи тока базы транзистора; $\Phi_{\text{Б}}$ – генерированный излучателем фототок в базе транзистора.

Таким образом, фототранзистор обладает внутренним усилением фототока.

Транзисторные оптопары находят преимущественное применение в аналоговых и ключевых коммутаторах сигналов, схемах согласования датчиков с измерительными блоками, для гальванической развязки в линиях связи, оптоэлектронных реле. Примером могут служить оптопары типа АОТ110, АОТ127 [2].

Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Оптопара и стабилитрон» приведен на рис. 53.

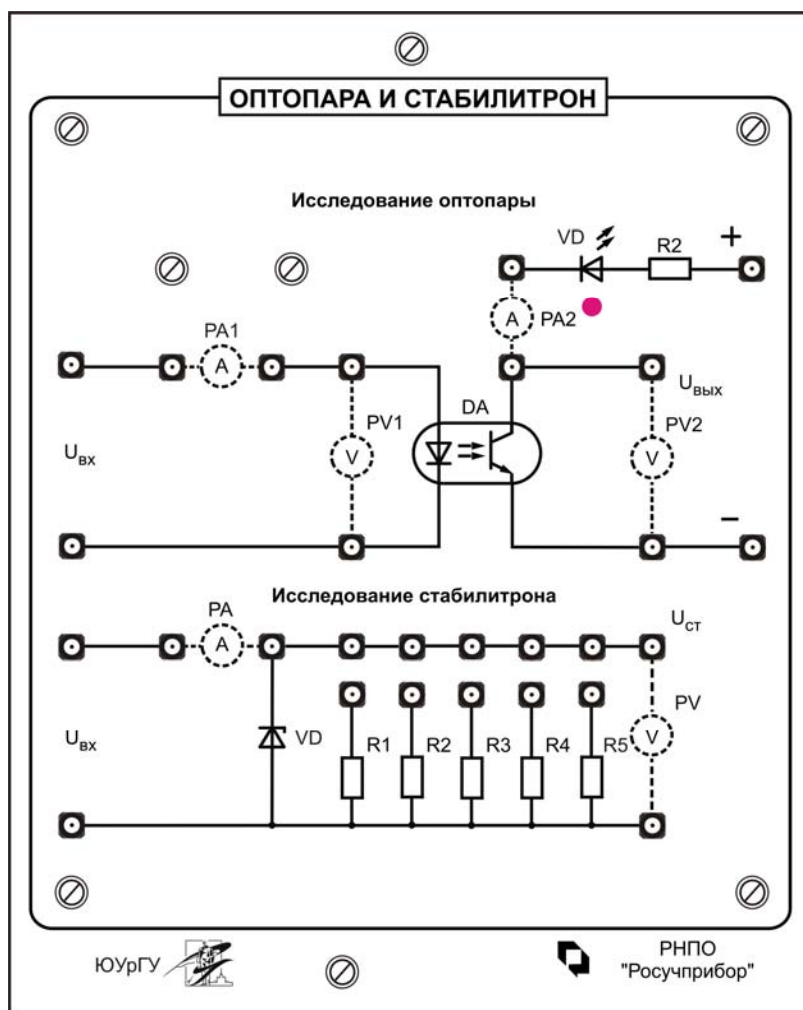


Рис. 53. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Оптопара и стабилитрон»

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 54. Подключить измерительные приборы к модулю оптопары и модуль питания в соответствии со схемой.

а) Изменяя входное напряжение $U_{вх}$, по показаниям измерительных приборов PV1 и PA1 необходимо снять входную вольтамперную характеристику оптопары. Результаты измерений занести в табл. 17.

По результатам измерений построить входную характеристику – зависимость входного тока от входного напряжения – $I_{вх}=f(U_{вх})$.

б) Снять выходные характеристики фототранзистора $I_k=f(U_{кэ})$ при $I_{вх}=const$. Изменяя величину напряжения $U_{кэ}$, записать показания приборов PV2 и PA2 для трех фиксированных значений тока ($I_{вх}=0$, $I_{вх}=0,5I_{вх\max}$, $I_{вх}=I_{вх\max}$), контроль за величиной тока осуществляется с помощью амперметра PA1. Результаты измерений занести в табл. 18.

По результатам измерений необходимо построить выходные характеристики фототранзистора $I_k=f(U_{кэ})$ – зависимость тока коллектора I_k от напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$.

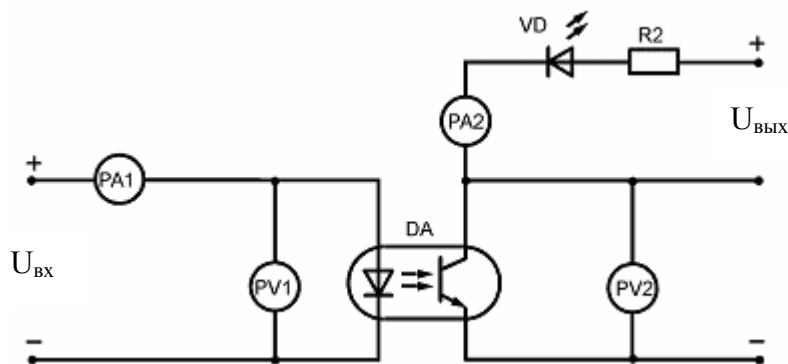


Рис. 54. Схема исследования характеристик оптопары

Таблица 17

Входная вольтамперная характеристика оптопары

U_{BX}, B									
I_{BX}, mA									

Таблица 18

Выходные характеристики полевого фототранзистора

$I_{BX} = A$		$I_{BX} = A$		$I_{BX} = A$	
$U_{KЭ}, B$	I_K, A	$U_{KЭ}, B$	I_K, A	$U_{KЭ}, B$	I_K, A

в) Для определения зависимости длительности времени фронта и времени спада при работе в ключевом режиме от входного импульса на вход схемы необходимо подать с внешнего генератора прямоугольные импульсы частотой 10 кГц и амплитудой 4 В относительно катода светодиода, расположенного внутри транзисторной оптопары. Одним каналом осциллографа необходимо поочередно наблюдать ток на входе (PA1) и напряжение на выходе схемы (PV2). По результатам измерений необходимо построить графики функций $t_{\phi} = f(I_{BX})$, $t_{сп} = f(I_{BX})$ – зависимости длительности времени фронта и времени спада при работе в ключевом режиме от входного импульсного тока.

Контрольные вопросы

1. Определение фотоэлектрического прибора.
2. В чем состоит внутренний фотоэффект?
3. По какой схеме включен фоторезистор?
4. В каких схемах преимущественно применяются транзисторные оптопары?
5. Определение фоторезистора?
6. Что такое оптопара?

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ

С ОБРАТНОЙ И БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Цель работы: исследование основных характеристик многокаскадных транзисторных усилителей с резистивно-емкостной связью.

Электрическая схема транзисторного усилителя содержит два усилительных каскада на биполярных транзисторах VT1 и VT2 типа КТ312А, включенных по схеме с общим эмиттером (рис. 55).

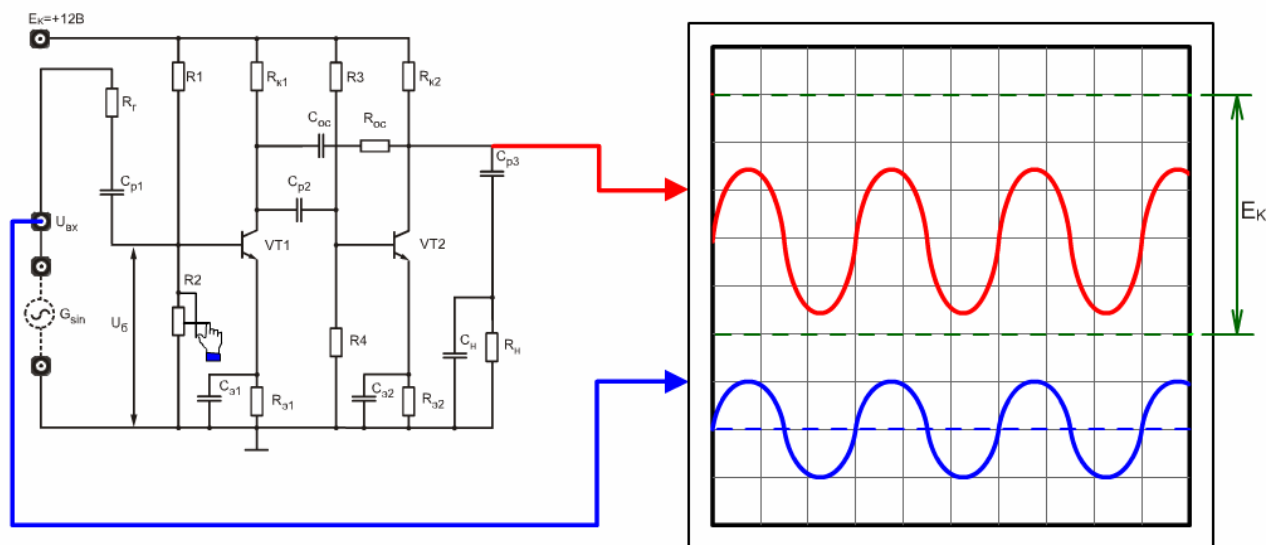


Рис. 55

Все схемы усилительных каскадов питаются от одного общего источника питания с $E_K=12\text{ В}$. На входе и выходе каждого каскада находятся разделительные конденсаторы C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} для разделения каскадов по постоянному току. Делители напряжения R_1-R_2 , R_3-R_4 служат для подачи прямого смещения на вход транзисторов VT1 и VT2. Резисторы $R_{Э1}$ и $R_{Э2}$ создают отрицательную обратную связь по постоянному току для температурной стабилизации рабочей точки покоя. Конденсаторы $C_{Э1}$ и $C_{Э2}$ шунтируют резисторы $R_{Э1}$ и $R_{Э2}$ по переменному сигналу. Резисторы $R_{К1}$ и $R_{К2}$ являются коллекторными нагрузками каждого каскада [6].

С помощью конденсатора $C_{ОС}$ и резистора $R_{ОС}$ в усилителе создается общая последовательная обратная связь по напряжению с выхода усилителя на его вход. Резистор $R_{Г}$ учитывает в схеме внутреннее сопротивление источника сигнала.

Входное напряжение $U_{ВХ}$ усиливается первым каскадом усилителя на транзисторе VT1. Сигнал, усиленный первым каскадом, через конденсатор C_{p2} поступает на вход второго каскада, выполненного на транзисторе VT2. Нагрузкой второго каскада является резистор $R_{Н}$.

Качество работы усилителя определяется амплитудной (рис. 56) и частотной (рис. 57) характеристиками.

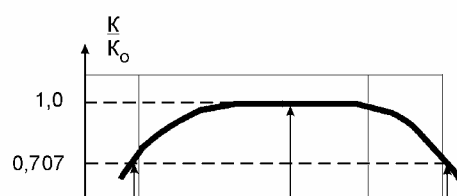
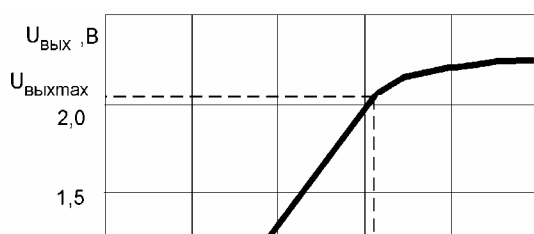


Рис. 56. Амплитудная характеристика

Рис. 57. Амплитудно-частотная характеристика

Амплитудная характеристика усилителя представляет собой зависимость $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$ при $f=\text{const}$. Она линейна при малых входных напряжениях и угол наклона определяет коэффициент усиления:

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = K_1 \cdot K_2,$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты усиления первого и второго каскадов соответственно.

Линейная часть характеристики ограничена $U_{\text{ВХmax}}$. Если $U_{\text{ВХmax}} > U_{\text{ВХ}}$, то на выходе усилителя имеется напряжение неискаженной формы. В случае если $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХmax}}$, то форма выходного напряжения искажается из-за нелинейности характеристик транзисторов. Динамический диапазон усилителя по входу определяется по формуле

$$D_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХmax}}/U_{\text{ВХmin}}.$$

Амплитудно-частотная или просто частотная характеристика усилителя (см. рис. 57) представляет собой зависимость $K=F(f)$ при $U_{\text{ВХ}}=\text{const}$, где K – модуль коэффициента усиления по напряжению; f – частота усиливаемого напряжения. Уменьшение коэффициента усиления в области низших и высших частот связано с частотными искажениями. При усилении несинусоидальных сигналов отдельные составляющие их усиливаются по-разному из-за неравномерности частотной характеристики, и поэтому форма усиленного сигнала на выходе усилителя отличается от формы сигнала на его входе.

Уменьшение коэффициента усиления оценивается коэффициентами частотных искажений $M_{\text{Н}}$ и $M_{\text{В}}$ в области нижних и верхних частот:

$$M_{\text{Н}}=K_{\text{О}}/K_{\text{Н}}, M_{\text{В}}=K_{\text{О}}/K_{\text{В}},$$

где $K_{\text{О}}$, $K_{\text{Н}}$, $K_{\text{В}}$ – коэффициенты усиления в области средних $f_{\text{О}}$, нижних $f_{\text{Н}}$ и высоких частот $f_{\text{В}}$ [3].

Порядок выполнения работы

1. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Транзисторный усилитель» приведен на рис. 58. Собрать схему, представленную на рис. 59.

Подключить измерительные приборы, модуль питания и функциональный генератор к модулю транзисторного усилителя в соответствии со схемой.

2. Установить переключатели сопротивлений генератора SA1 в положение R_r , нагрузки SA5 – в R_{H1} ($R_H = 1 \text{ кОм}$) и разделительных конденсаторов SA2 и SA4 – в C_{p1} и C_{p3} соответственно.

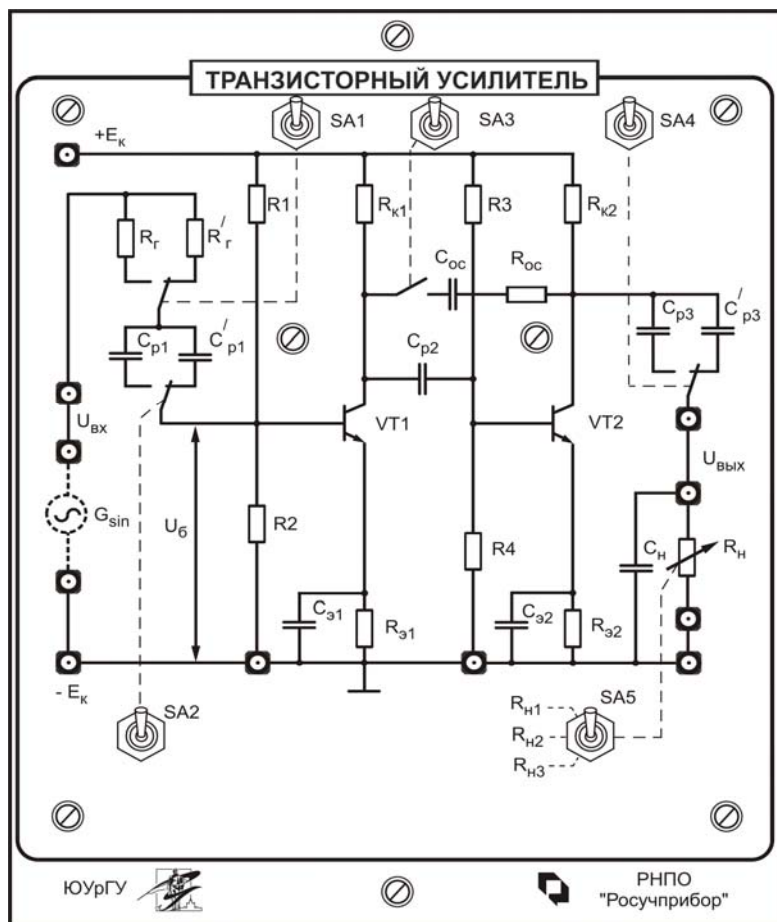


Рис. 58. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Транзисторный усилитель»

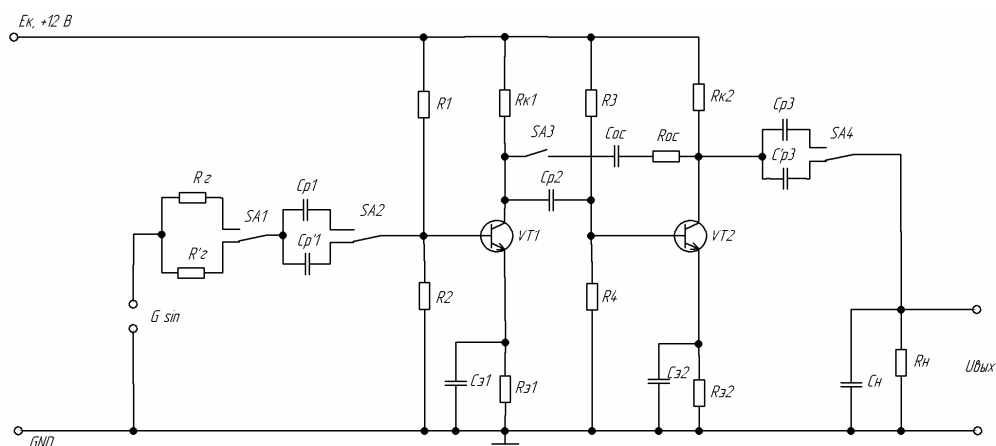


Рис. 59. Схема исследования характеристики транзисторного усилителя

На вход усилителя подать синусоидальный сигнал частотой 100 Гц с модуля функционального генератора, изменяя входное напряжение $U_{вх}$ от 0...4 В, записать показания приборов и занести их в табл. 19.

По данным табл. 19 построить амплитудную характеристику усилителя $U_{\text{ВЫХ}}=f(U_{\text{ВХ}})$.

3. Определить рабочий участок характеристики, динамический диапазон $D_{\text{ВХ}}$ усилителя и максимальный неискаженный выходной сигнал. Определить параметры усилителя: K'_U , K_U , K_I , K_P при значении сопротивления нагрузки $R_{\text{Н1}}=1$ кОм. Для этого следует измерить напряжение источника сигнала G_{sin} , входное $U_{\text{ВХ}}$ и выходное $U_{\text{ВЫХ}}$ напряжения на линейном участке амплитудной характеристики.

Таблица 19

Амплитудная характеристика усилителя

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

4. Снять амплитудно-частотную характеристику усилителя $K/K_0=F(f)$ при $U_{\text{ВХ}}=\text{const}$, изменяя частоту выходного сигнала от 10 Гц до 100 кГц. Результаты измерений занеси в табл. 20.

Таблица 20

Амплитудно-частотная характеристика усилителя

$f, \text{Гц}$									
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

5. По данным таблицы 20 построить амплитудно-частотную характеристику усилителя $K/K_0=F(f)$.

6. Определить полосу пропускания усилителя по амплитудно-частотной характеристике при $M=M_{\text{Н}}=M_{\text{В}}=\sqrt{2}$.

7. Установить переключатели сопротивлений генератора SA1 в положение $R'_Г$, нагрузки SA5 – в $R_{\text{НЗ}}$ ($R_{\text{НЗ}} = 3$ кОм) и разделительных конденсаторов SA2 и SA4 – в положение $C'_{\text{Р1}}$ и $C'_{\text{Р3}}$ соответственно. Повторить пп. 1–6.

Исследование параметров и характеристик усилителя с обратной связью

Ввести в схему усилителя обратную связь, замкнув тумблер SA3. Повторить пункты выполнения лабораторной работы с 1 по 7.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение элементов усилителя?
2. Что такое области активного усиления, насыщения и отсечки?
3. Каково назначение элементов в схемах усилителей с ОЭ и ОИ?
4. Что произойдет в схеме усилителя с ОЭ, если возникает пробой C_2 , C_3 , обрыв в цепях R_1 , R_2 ?
5. Что произойдет в схеме усилителя с ОИ, если возникает пробой C_2 , обрыв цепи R_2 ?
6. Что называется амплитудной характеристикой усилителя, как снять её экспериментально?
7. Что называется амплитудно-частотной характеристикой усилителя, как снять её экспериментально?
8. Что такое нелинейное искажение, как определить их появление экспериментально?
9. Чему равно K_i полевого транзистора с индуцированным каналом?
10. Как влияет сопротивление нагрузки на K_i в схемах с ОЭ и ОИ?
11. Как экспериментально снять зависимость K_n , $R_{\text{вых}}$ от R_n в схеме ОЭ и ОИ?
12. Каков вид временных диаграмм для схемы с ОЭ, ОИ если на вход поступает гармонический сигнал?
13. Как экспериментально измерить выходное сопротивление усилительного каскада?

Лабораторная работа № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИЗАТОРА

Цель работы: изучение видов и принципов работы линейных стабилизаторов напряжения, исследование и сравнение характеристик различных типов стабилизаторов.

Стабилизатор – это устройство, которое служит для поддержания постоянного тока или напряжения на выходе устройства, к которому подключена нагрузка.

Стабилизатор представляет собой четырёхполюсник, связывающий между собой питающую сеть и сопротивление нагрузки. Требования к стабилизаторам тока и стабилизаторам напряжения различны:

- при изменении сопротивления нагрузки R_n или изменении входного напряжения $U_{\text{вх}}$, ток на выходе $I_{\text{вых}}$ должен оставаться неизменным (стабилизатор тока);
- при изменении сопротивления нагрузки R_n или изменении входного напряжения $U_{\text{вх}}$, напряжение на выходе $U_{\text{вых}}$ должно оставаться неизменным (стабилизатор напряжения) [8].

Параметрический стабилизатор. Простейшим типом стабилизаторов является параметрический. Для стабилизации постоянного напряжения используют полупроводниковые параметрические стабилизаторы, в которых главным задающим элементом является полупроводниковый стабилитрон.

Полупроводниковый стабилитрон – это диод, рассчитанный на работу в режиме электрического пробоя. При работе стабилитрона в схеме стабилизации напряжения используется обратная ветвь его вольтамперной характеристики, представленной на рис. 60. Максимально допустимый ток нагрузки для стабилизатора со стабилитроном малой мощности составляет 10...20 мА. Любое дальнейшее увеличение нагрузки приводит к уменьшению тока диода настолько, что он выходит из режима стабилизации (участок АБ на рис. 60).

Наиболее рациональным решением данной проблемы является применение эмиттерного повторителя (рис. 61), тогда максимальный выходной ток такого стабилизатора возрастает в число раз, равное коэффициенту передачи по току транзистора и будет ограничен только максимальным током транзистора и мощностью, рассеиваемой на нём.

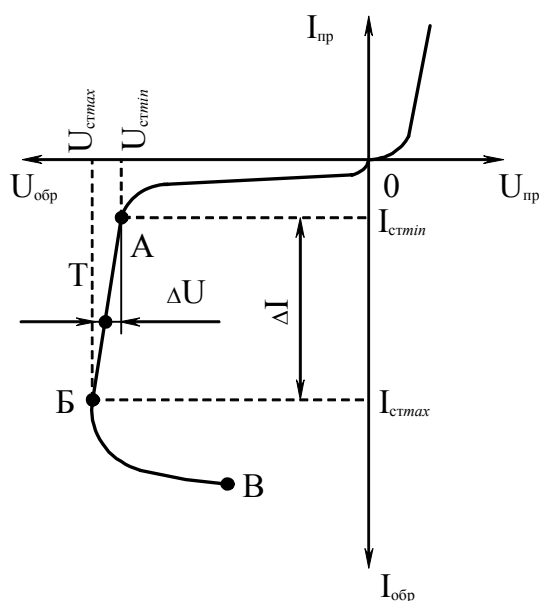


Рис. 60. Вольтамперная характеристика стабилитрона

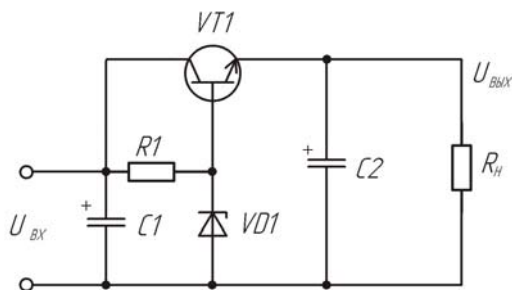


Рис. 61. Принципиальная схема параметрического стабилизатора

Часто для повышения выходной мощности и коэффициента стабилизации используют составной транзистор VT. При расчётах таких стабилизаторов следует учитывать, что напряжение стабилизации стабилитрона выбирается большим на величину падения напряжения на переходе транзистора база–эмиттер (0,5...1,0 В), чем требуемое напряжение на нагрузке.

Балластное сопротивление R1 рассчитывается в соответствии с режимом стабилизации, по формуле:

$$R1 = \frac{U_{\text{ВХ.min}} \cdot U_{\text{Н}}}{I_{\text{ст.min}} + I_{\text{б}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вх.мин}}$ – минимальное входное напряжение, В; $U_{\text{н}}$ – напряжение на нагрузке, В; $I_{\text{ст.мин}}$ – минимальный ток стабилизации, А; $I_{\text{б}}$ – ток базы транзистора, А. При использовании такого стабилизатора особое внимание должно быть обращено на недопущение короткого замыкания на выходе. Если в результате этого транзистор VT был выведен из строя так, что между коллектором и эмиттером у него нулевое сопротивление, то всё входное напряжение стабилизатора окажется приложенным к его выходу и вызовет необратимые процессы в питаемой схеме. Промышленные схемы обычно включают в себя датчик повышения напряжения на выходе, подключенный к тиристорному устройству, которое быстро шунтирует шину питания, сводя выходное напряжение к нулю прежде, чем оно достигнет опасного уровня (рис. 62).

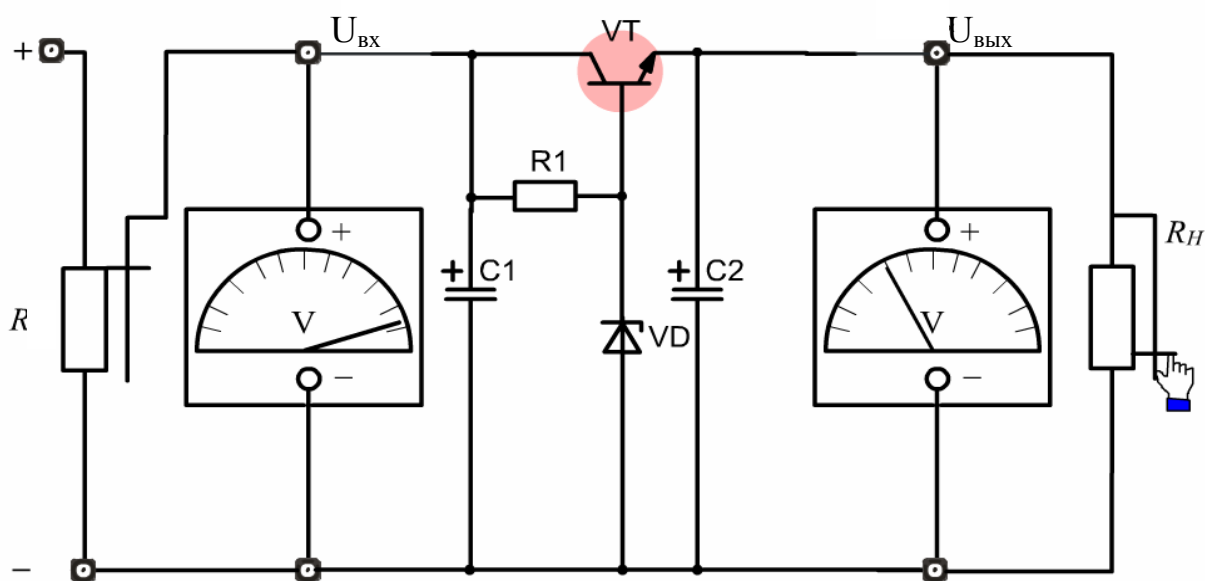


Рис. 62

Основным параметром, характеризующим качество работы всех стабилизаторов, является коэффициент стабилизации. Для стабилизатора напряжения коэффициент стабилизации по напряжению определяется следующим выражением:

$$K_{\text{ст.У}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ.НОМ}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ.НОМ}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ – номинальные значения входного и выходного напряжений, В; $\Delta U_{\text{ВХ}}$, $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ – приращения входного и выходного напряжений.

Коэффициент полезного действия стабилизатора характеризует мощность потерь в нем, является основным энергетическим показателем стабилизатора и определяется следующим выражением:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{н}}$ – полезная мощность на нагрузке, Вт; $P_{\text{вх}}$ – входная мощность стабилизатора, Вт.

Следующим параметром стабилизатора напряжения является выходное сопротивление, показывающее, во сколько раз изменится напряжение на выходе стабилизатора ΔU_H при изменении тока нагрузки, и определяется следующим выражением:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_H}.$$

При питании усилителей переменного тока большое выходное сопротивление стабилизатора приводит к появлению паразитных обратных связей через источник питания, вызывающих изменения параметров усилителей и самовозбуждение. Поэтому снижение выходного сопротивления стабилизатора является важной задачей [1].

Компенсационный стабилизатор – это система автоматического регулирования, в которой, благодаря наличию отрицательной обратной связи, обеспечивается постоянство тока или напряжения на нагрузке с высокой степенью точности. Компенсационный стабилизатор включают между сглаживающим фильтром и нагрузкой. Компенсационный стабилизатор напряжения, структурная схема которого представлена на рис. 63, состоит из источника опорного напряжения ИОН, сравнивающего устройства СС, усилителя постоянного тока У и регулирующего элемента (транзистора) РЭ.

Структурная схема, подобная рис. 63, реализована в микросхеме MC78M05CDT. Стабилизатор напряжения выполнен в одном корпусе. Микросхема имеет три вывода (1, 2, 3), схема соединений элементов стабилизатора напряжения на ИМС представлена на рис. 64.

Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Стабилизаторы напряжения» приведен на рис. 65.

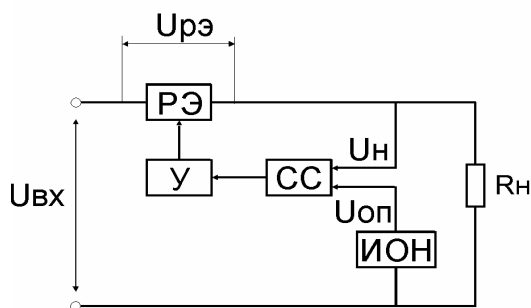


Рис. 63. Структурная схема компенсационного стабилизатора

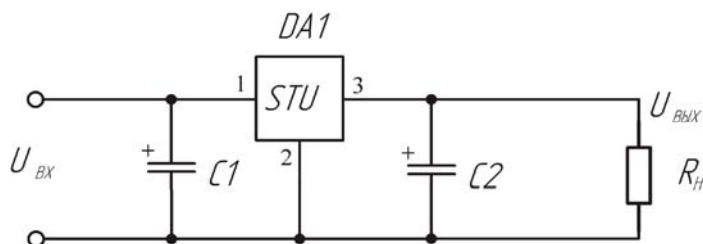


Рис. 64. Принципиальная схема компенсационного стабилизатора на ИМС

Данная микросхема обладает следующими характеристиками:
входное напряжение – 5...18 В;

выходное напряжение – $5 \pm 0,2$ В;
 ток стабилизации – 350 мА;
 температурный режим – $0 < T < 125$ °С.

Разработано много микросхем – стабилизаторов положительной и отрицательной полярности для ряда фиксированных выходных напряжений. Если в проектируемом устройстве требуется нестандартное значение стабилизированного выходного напряжения или плавное его регулирование, то удобно использовать специализированные регулируемые микросхемные стабилизаторы. Такие микросхемы имеют низкую стоимость, малые размеры, высокую стабильность выходного напряжения [2].

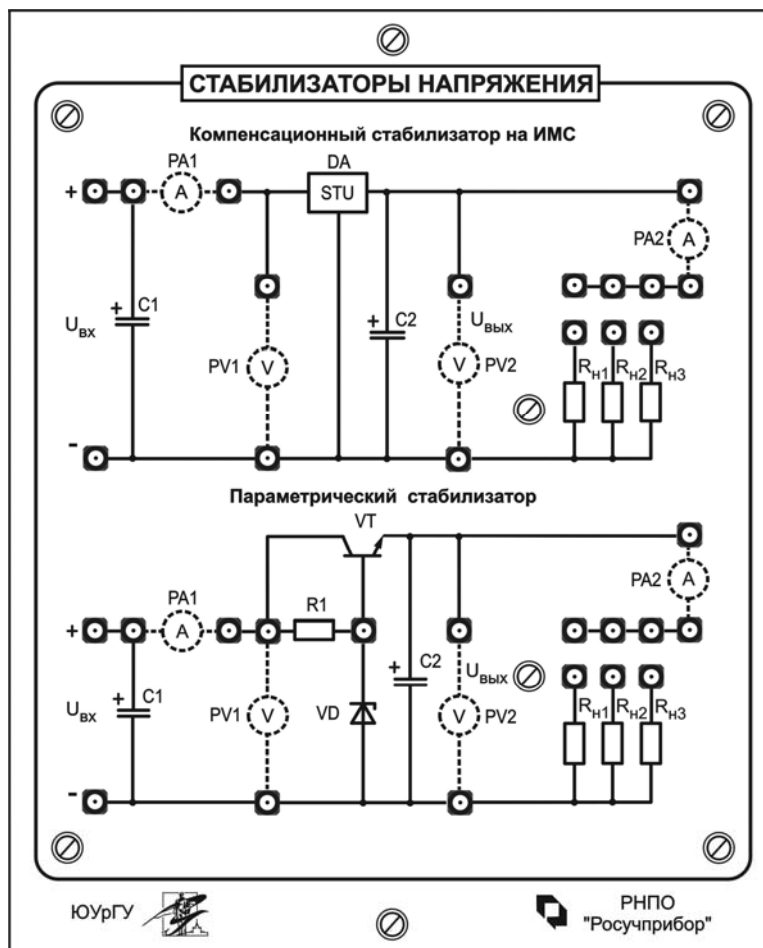


Рис. 65. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Стабилизаторы напряжения»

Порядок выполнения работы

1. Собрать последовательно схемы, представленные на рис. 66. Подключить измерительные приборы к модулю стабилизатора и модуль питания в соответствии со схемой.

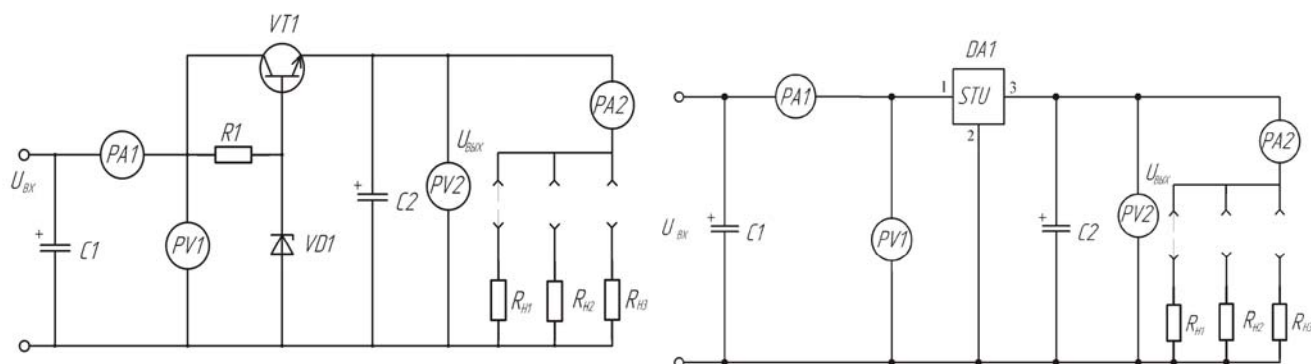


Рис. 66. Схемы исследования характеристик стабилизаторов

а) Изменяя постоянное напряжение на входе схемы U_{BX} от 1 до 12 В, занести показания приборов PV1, PV2, PA1 и PA2 в табл. 21.

По данным измерений рассчитать K_{CT} и η по формулам (2) и (3). По значениям табл. 21 построить характеристики $K_{CT}=f(U_{BX})$ и $\eta=f(U_{BX})$.

б) Установить величину входного напряжения на уровне 12 В. Изменяя сопротивление нагрузки, занести показания приборов PV1, PV2, PA1 и PA2 в табл. 22.

По данным измерений рассчитать K_{CT} и η по формулам 2 и 3. По значениям таблицы построить характеристики $K_{CT}=f(R_H)$, $\eta=f(R_H)$ и внешнюю характеристику $U_{ВЫХ}=f(I_{ВЫХ})$.

Таблица 21

Исследование характеристик стабилизатора

$U_{BX}, В$									
$U_{ВЫХ}, В$									
$I_{BX}, А$									
$I_{ВЫХ}, А$									
K_{CT}									
η									

Таблица 22

Исследование характеристик стабилизатора

R_H	$R_1 R_2 R_3$	$R_2 R_3$	$R_1 R_3$	$R_1 R_2$	R_1	R_2	R_3
$U_{BX}, В$							
$U_{ВЫХ}, В$							
$I_{BX}, А$							
$I_{ВЫХ}, А$							
K_{CT}							
η							

Контрольные вопросы

1. Назначение стабилизатора напряжения и стабилизатора тока, их основные отличия.
2. Перечислите и запишите основные параметры стабилизаторов напряжения.
3. Чем задано опорное напряжение в каждом из видов стабилизаторов?
4. Нарисуйте схему параметрического стабилизатора напряжения со стабилитроном в качестве источника опорного напряжения.
5. Чем ограничен максимальный ток в каждом из стабилизаторов напряжения?
6. Проанализировать работу схемы при пробое перехода коллектор-эмиттер транзистора VT параметрического стабилизатора напряжения.
7. Перечислите элементы схемы, снижающие КПД стабилизатора, представленные на рис. 61.
8. Какая ветвь ВАХ стабилитрона используется при его включении в стабилизаторах напряжения, представленных на рис. 60?
9. Какое напряжение будет на выходе параметрического стабилизатора, если включить стабилитрон VD в прямом направлении?

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение свойств и характеристик неинвертирующего усилителя (рис. 68).

Операционный усилитель (ОУ) – это высококачественный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, выполненный по интегральной технологии, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схеме с отрицательной обратной связью (ООС).

Операционный усилитель является усилителем постоянного тока с высокой верхней граничной частотой благодаря очень высокому коэффициенту усиления (десятки и сотни тысяч) и широкому диапазону усиливаемых частот за счёт введения различных обратных связей, позволяет создавать усилительные каскады реализующие множество функциональных преобразований. Областями применения операционных усилителей является аналоговая техника, аппаратура обработки сигналов, радиоизмерительная техника, а также применение для генерации электрических колебаний различной формы и частоты.

Параметры реальных ОУ отличаются от параметров идеального, следовательно, их стремятся приблизить к параметрам идеального ОУ. Идеальный ОУ – это усилитель постоянного тока, имеющий:

- дифференциальный вход с усилением по напряжению дифференциального сигнала $K_U \rightarrow \infty$ и полным входным сопротивлением $Z_{ВХ}$ бесконечно большим на всех частотах;

- бесконечный коэффициент ослабления синфазных сигналов;
- нулевой дрейф, шум и сдвиг нуля;
- нулевые входные токи смещения и сдвига;
- нулевое выходное сопротивление;
- выходной сигнал напряжения, имеющий возможность одинаково изменяться в сторону, как положительного напряжения, так и отрицательного напряжения относительно потенциала точки покоя выхода.

На практике широко применяются инвертирующие и неинвертирующие сумматоры на ОУ. В схеме неинвертирующего усилителя (рис. 67) входной сигнал поступает на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход подаётся сигнал обратной связи. В неинвертирующем усилителе ОУ охвачен последовательный ООС по напряжению [1].

Поскольку $U_{ВХ}$ и сигнал ООС подаются на разные входы ОУ, то для идеального ОУ $U_{ВХ}$ определяется следующим выражением:

$$U_{ВХ} = U_{ВЫХ} (R_2 / (R_2 + R_{OC})).$$

Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по напряжению определяется следующим выражением:

$$K_{U.неинв} = 1 + R_{OC} / R_2.$$

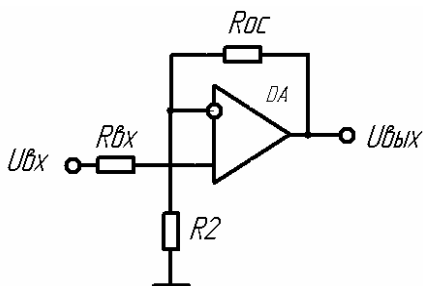


Рис. 67. Схема неинвертирующего усилителя

Сравнивая $K_{U.неинв}$ и $K_{U.инв}$, можно записать следующую формулу:

$$K_{U.неинв} = 1 + K_{U.инв}.$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 67. Подключить измерительные приборы и модуль питания к модулю операционные усилители в соответствии со схемой. Подключить вывод делителя напряжения $U_{ВЫХ1}$ к выводу $U_{ВХ}$ усилителя.

2. Изменяя величину входного напряжения, для нескольких значений R_{OC} , снять амплитудную характеристику $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$. R_{OC} изменяется путем подключения набора резисторов или их комбинаций. Результаты измерений занести в табл. 23. По данным измерений построить амплитудную характеристику.

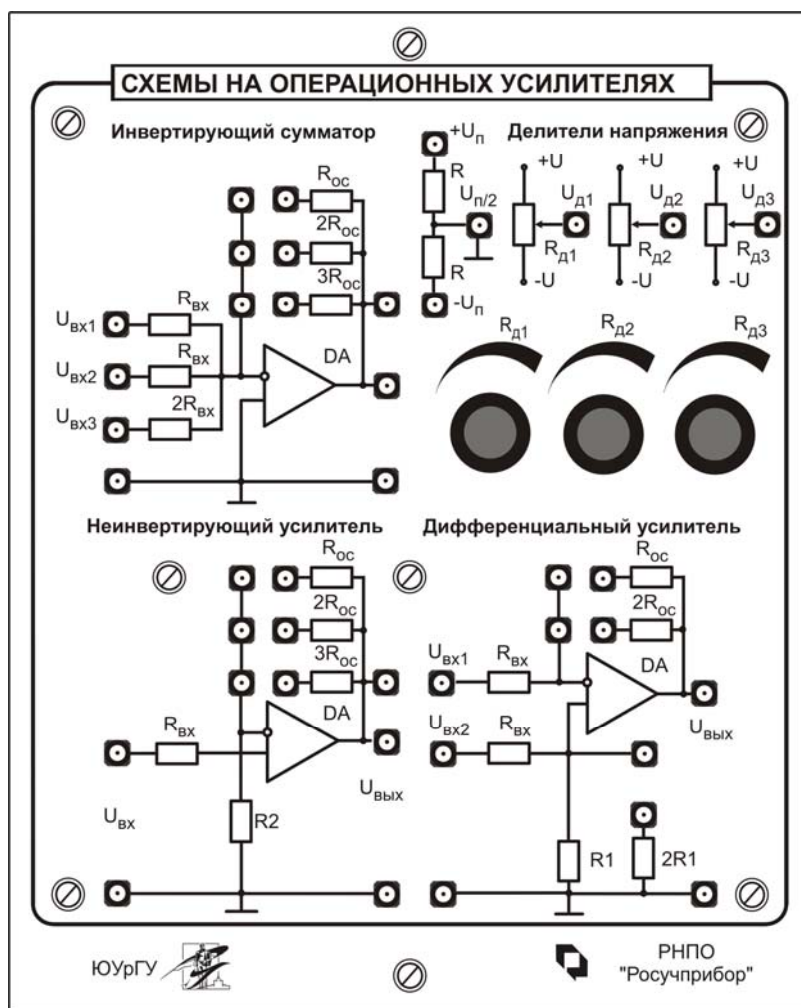


Рис. 68. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Схемы на операционных усилителях»

Таблица 23

Амплитудная характеристика неинвертирующего усилителя

$U_{ВХ1}, В$									
$U_{ВХ2}, В$									
$U_{ВХ3}, В$									
$U_{ВЫХ}, В$									

Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель?
2. Что такое амплитудная и амплитудно-импульсная характеристики?
3. Зарисуйте АЧХ не инвертирующего операционного усилителя.
4. Что такое дрейф нуля?
5. Какие каскады используются в основе операционного усилителя?
6. Приведите схемы инверсного включения операционного усилителя.

Лабораторная работа № 15

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНВЕРТИРУЮЩЕГО СУММАТОРА

Цель работы: изучение свойств и характеристик инвертирующего сумматора.

На практике широко применяются инвертирующие и неинвертирующие сумматоры на ОУ. На рис. 69 представлена схема инвертирующего сумматора.

При использовании идеального ОУ можно считать, что сумма входных токов усилителя, вызванных напряжениями U_{BX1} , U_{BX2} , U_{BX3} равна току, протекающему по R_{OC} , то есть можно записать следующее выражение:

$$\frac{U_{BX1}}{R_1} + \frac{U_{BX2}}{R_2} + \frac{U_{BX3}}{R_3} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}}.$$

Используя вышеприведённое выражение, запишем следующую формулу:

$$U_{ВЫХ} = -\left(\frac{U_{BX1} \cdot R_{OC}}{R_1} + \frac{U_{BX2} \cdot R_{OC}}{R_2} + \frac{U_{BX3} \cdot R_{OC}}{R_3} \right).$$

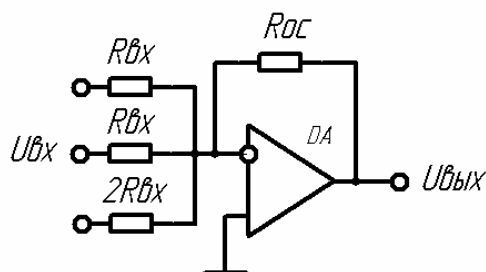


Рис. 69. Схема инвертирующего сумматора

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 69. Подключить измерительные приборы и модуль питания к модулю «Операционные усилители» в соответствии со схемой. Подключить выводы делителей напряжения $U_{ВЫХ1}$, $U_{ВЫХ2}$, $U_{ВЫХ3}$ к выводам U_{BX1} , U_{BX2} , U_{BX3} сумматора.

2. Изменяя величину входного напряжения, для нескольких значений R_{OC} , снять амплитудную характеристику $U_{ВЫХ}=f(U_{ВХ})$. R_{OC} изменяется путем подключения набора резисторов или их комбинаций. Результаты измерений занести в табл. 24.

Таблица 24

Амплитудная характеристика инвертирующего усилителя

U_{BX1} , В									
U_{BX2} , В									
U_{BX3} , В									
$U_{ВЫХ}$, В									

3. По данным измерений построить амплитудную характеристику.

Контрольные вопросы

1. Что такое амплитудная и амплитудно-импульсная характеристики?
2. Зарисуйте АЧХ инвертирующего операционного усилителя.
3. В чем разница между инвертирующим и неинвертирующим входом операционного усилителя?
4. Приведите схему неинверсного включения операционного усилителя.
5. Запишите связь между входным и выходным напряжениями.

Лабораторная работа № 16 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение свойств и характеристик дифференциального усилителя.

Дифференциальный (разностный) усилитель (рис. 70) на ОУ можно рассматривать как совокупность инвертирующего и неинвертирующего вариантов. Входные сигналы подаются как на инвертирующий вход так и на неинвертирующий.

Для $U_{\text{ВЫХ}}$ разностного усилителя запишем следующее выражение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{U.\text{инв}} U_{\text{ВХ1}} + K_{U.\text{неинв}} U_{\text{ВХ2}} R_1 / (R_{\text{ВХ}} + R_{\text{ВХ}}).$$

Для частного случая, когда $R_{\text{ОС}} = R_1$ запишем выражение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}.$$

Поэтому следует, что устройство может осуществлять вычитание двух напряжений с коэффициентом пропорциональности, равным единице. Недостатком разностного усилителя является сложность регулировки коэффициента усиления и разная величина входных сопротивлений. Эти недостатки устраняются в устройствах на нескольких ОУ, так как разностный усилитель можно рассматривать как сумму инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Дифференциальные усилители применяются, как правило, в тех случаях, когда нежелательные помехи наводятся на соединительных проводах. Эта проблема часто возникает при наличии промышленных помех, когда чувствительные электронные измерительные приборы должны работать рядом с электрическими механизмами, от которых могут исходить значительные помехи [1].

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 70. Подключить измерительные приборы и модуль питания к модулю операционные усилители в соответствии со схемой. Подключить выводы делителей напряжения $U_{\text{ВЫХ1}}$, $U_{\text{ВЫХ2}}$ к выводам $U_{\text{ВХ1}}$, $U_{\text{ВХ2}}$ дифференциального усилителя.

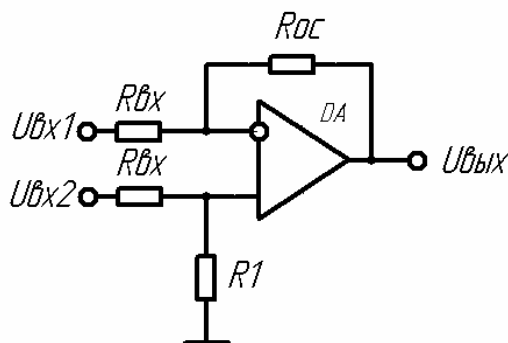


Рис. 70. Схема дифференциального усилителя

2. Экспериментально определить выходное напряжение дифференциального усилителя и сравнить его с расчетным значением по нижеприведённой формуле

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}.$$

3. Определить коэффициент усиления в инвертирующей $K_{\text{У.инв}}$ и неинвертирующей цепи $K_{\text{У.неинв}}$.

Контрольные вопросы

1. Как сбалансировать дифференциальный усилитель?
2. Что такое коэффициент ослабления синфазного сигнала?
3. Приведите схему включения операционного усилителя в режиме дифференциального усилителя.
4. Запишите связь между входным и выходным напряжениями.

Лабораторная работа № 17

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы: изучение принципов построения, свойств и характеристик активных фильтров низкой частоты.

Активные RC-фильтры предназначены для выделения из спектра сигнала области частот и передачи этих частот с выхода на вход. Все частоты, лежащие вне полосы пропускания, должны быть подавлены.

Добиться идеального разделения частот невозможно. На логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) любого фильтра существуют области спада. С добавлением полюсов фильтра (увеличением его порядка) крутизна спада увеличивается.

Наряду с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой фильтра низких частот (рис. 71) и почти всегда приходится учитывать их логарифмическую фазовую частотную характеристику (ЛФЧХ) (рис. 72), а во многих случаях – и переходную характеристику при импульсных воздействиях.

У активных фильтров второго порядка при соответствующем подборе номиналов резисторов и конденсаторов наклон асимптот составляет 40 дБ/дек (20 дБ/дек у фильтров первого порядка) [2].

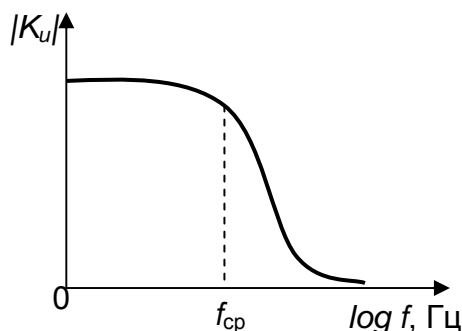


Рис. 71. ЛАЧХ фильтра низкой частоты

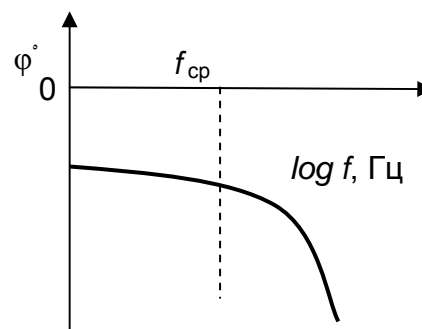


Рис. 72. ЛФЧХ фильтра низкой частоты

Таким образом, можно получить фильтры различных типов, характеристики которых имеют вид функции Баттерворта, Чебышева, Бесселя, причём выбрать наилучшую нельзя, так как каждая функция является наилучшей в смысле тех или иных свойств. Фильтр Баттерворта хорош, если нужна максимально плоская характеристика в полосе пропускания. Фильтр Чебышева обеспечивает наиболее крутой спад от полосы пропускания к полосе задержания, но с появлением некоторой неравномерности характеристики в полосе пропускания. Фильтр Бесселя имеет наилучшую фазочастотную характеристику (постоянное запаздывание сигнала в полосе пропускания).

Основные достоинства активных фильтров таковы:

- малое число элементов, как активных, так и пассивных;
- лёгкость регулировки;
- малое влияние разбросов параметров, в особенности значений емкостей конденсаторов;
- отсутствие жёстких требований к применяемому операционному усилителю (скорость нарастания сигнала на выходе, ширина полосы пропускания, полное входное сопротивление);
- возможность создания высокودобротных фильтров;
- нечувствительность характеристик фильтра по отношению к параметрам элементов и коэффициенту усиления ОУ.

В табл. 25 приведены справочные данные коэффициента усиления K и нормируемого множителя f_H для фильтра каждого типа.

Таблица 25

Параметры фильтров

Параметры	Фильтр Баттерворта	Фильтр Бесселя	Фильтр Чебышева	
			(0,5 дБ)	(0,2 дБ)
f_H	1	1,274	1,231	0,907

К	1,586	1,268	1,842	2,114
---	-------	-------	-------	-------

Частота среза f_c либо значения RC вычисляются по формуле

$$RC = 1/\pi 2f_c f_H.$$

При использовании в качестве элемента схемы ОУ можно синтезировать характеристику любого RLC-фильтра без применения катушек индуктивности. Такие безиндуктивные фильтры известны под названием «активные фильтры» из-за наличия в их системе активного элемента (усилителя).

Активные фильтры можно использовать для реализации фильтров нижних и верхних частот, полосовых фильтров, выбирая тип фильтра в зависимости от наиболее важных свойств характеристики, таких, как максимальная равномерность усиления в полосе пропускания, крутизна переходной области или независимость времени запаздывания от частоты (рис. 73) [1].

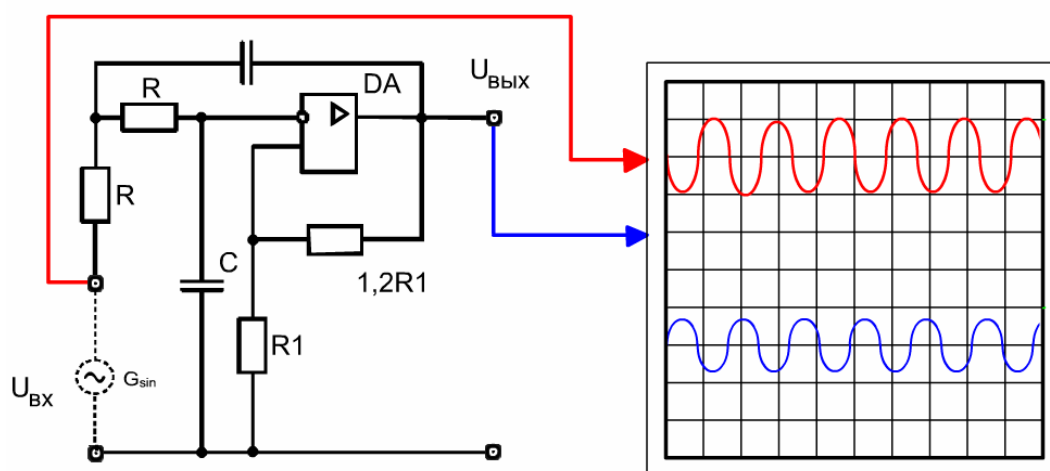


Рис. 73

Порядок выполнения работы

1. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Фильтры» приведен на рис. 74. Собрать схему, представленную на рис. 75. Подключить измерительные приборы и функциональный генератор к модулю «Активные фильтры» в соответствии со схемой.

2. Изменяя частоту выходного синусоидального сигнала функционального генератора от 10 Гц до 30 кГц с амплитудой 4 В, оценить величину коэффициента усиления и сдвиг фазы сигнала при переходе от входных зажимов к выходным, результаты измерений занести в табл. 26.

По результатам измерений построить характеристики.

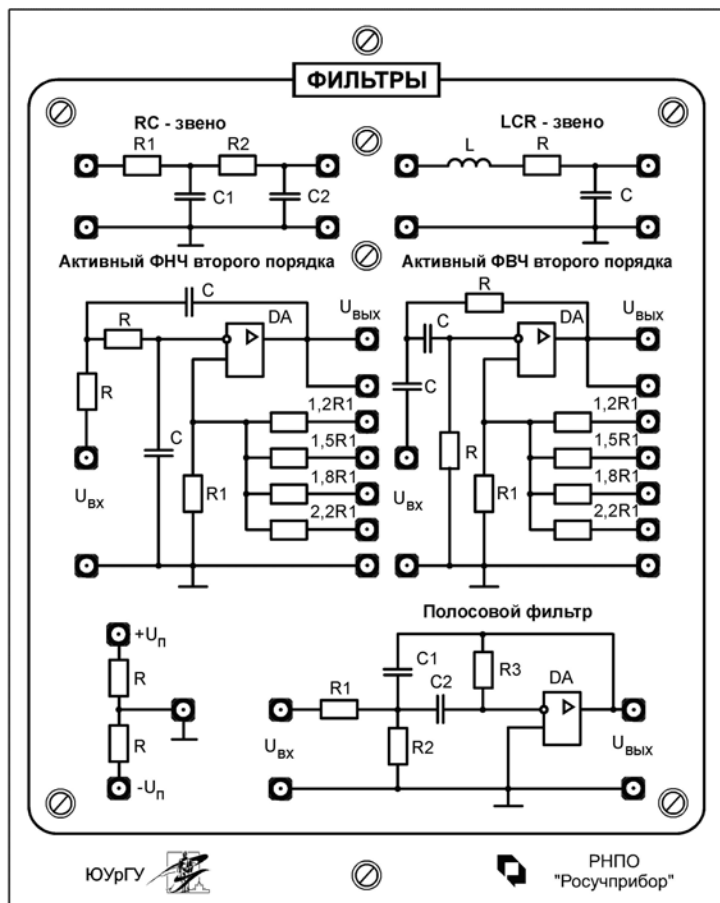


Рис. 74. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Фильтры»

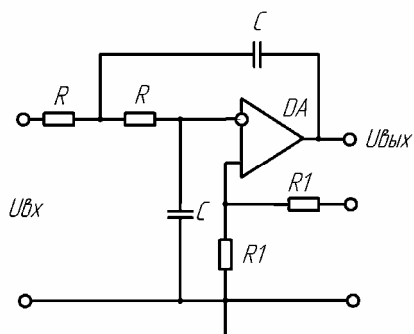


Рис. 75. Фильтр низкой частоты второго порядка

Таблица 26

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики фильтра низкой частоты второго порядка

f, Гц									
$U_{ВХ}$, В									
$U_{ВЫХ}$, В									
K_{β}									
φ_{β} , град.									

Контрольные вопросы

1. Что такое активный фильтр?
2. Что такое фильтр низкой частоты?

3. Приведите АЧХ фильтра низкой частоты первого и второго порядка.
4. Перечислите основные желательные свойства, которыми должен обладать фильтр низкой частоты.

Лабораторная работа № 18

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы: изучение принципов построения, свойств и характеристик активных фильтров высокой частоты.

Активные RC-фильтры предназначены для выделения из спектра сигнала области частот и передачи этих частот с выхода на вход. Все частоты, лежащие вне полосы пропускания, должны быть подавлены.

Добиться идеального разделения частот невозможно. На логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) любого фильтра существуют области спада. С добавлением полюсов фильтра (увеличением его порядка) крутизна спада увеличивается.

Наряду с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой фильтра высоких частот (рис. 76) и почти всегда приходится учитывать их логарифмическую фазовую частотную характеристику (ЛФЧХ) (рис. 77), а во многих случаях – и переходную характеристику при импульсных воздействиях.

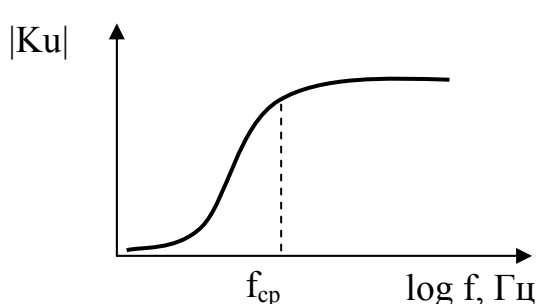


Рис. 76. ЛАЧХ фильтра высокой частоты

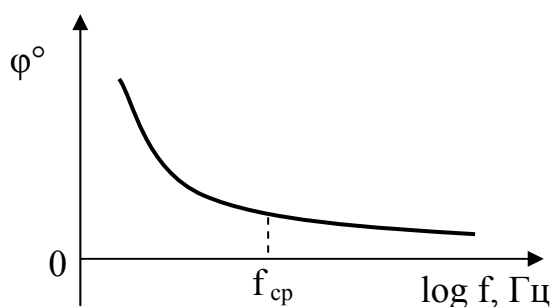


Рис. 77. ЛФЧХ фильтра высокой частоты

Частота среза f_c фильтров высокой частоты либо значения RC вычисляются по формуле

$$RC = 1/\pi 2f_c f_B.$$

Для реализации фильтров нижних и верхних частот можно использовать активные фильтры, выбирая тип фильтра в зависимости от наиболее важных свойств характеристики, таких, как максимальная равномерность усиления в полосе пропускания, крутизна переходной области или независимость времени запаздывания от частоты [1].

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему представленную на рис. 78. Подключить измерительные приборы и функциональный генератор к модулю «Активные фильтры» в соответствии со схемой.

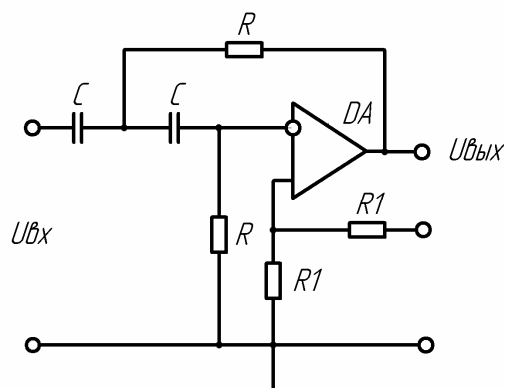


Рис. 78. Фильтр высокой частоты второго порядка

2. Изменяя частоту выходного синусоидального сигнала функционального генератора от 10 Гц до 30 кГц с амплитудой 4 В, оценить величину коэффициента усиления и сдвиг фазы сигнала при переходе от входных зажимов к выходным, результаты измерений занести в табл. 27.

Таблица 27

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики фильтра высокой частоты второго порядка

$f, \text{Гц}$									
$U_{\text{вх}}, \text{В}$									
$U_{\text{вых}}, \text{В}$									
$K_{\text{в}}$									
$\varphi_{\text{в}}, \text{град.}$									

3. По результатам измерений построить характеристики.

Контрольные вопросы

1. Что такое фильтр высокой частоты?
2. Приведите АЧХ фильтра высокой частоты первого и второго порядка.
3. Перечислите основные желательные свойства, которыми должен обладать активный фильтр высокой частоты.

Лабораторная работа № 19

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА

Цель работы: изучение принципов построения, свойств и характеристик активных полосовых фильтров.

На логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) любого фильтра существуют области спада. С добавлением полюсов фильтра (увеличением его порядка) крутизна спада увеличивается. Наряду с фильтрами низких частот используют полосовой фильтр (рис. 79) [1].

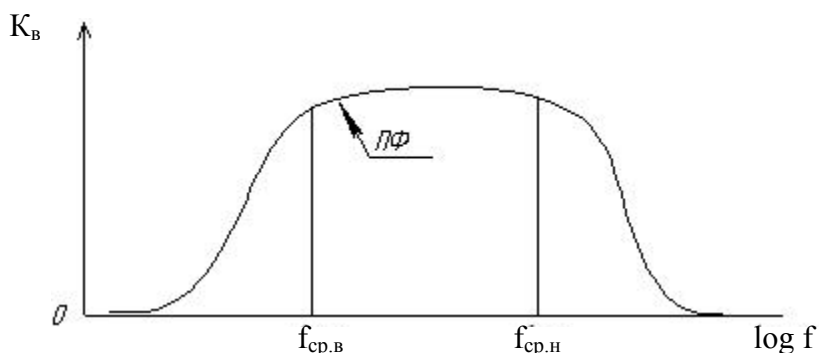


Рис. 79. ЛАЧХ полосового фильтра

Частота срезов f_c либо значения RC вычисляются по следующим формулам:

$$RC = 1/\pi \, 2f_c f_H;$$

$$RC = 1/\pi \, 2f_c f_B.$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 80. Подключить измерительные приборы и функциональный генератор к модулю «Активные фильтры» в соответствии со схемой.

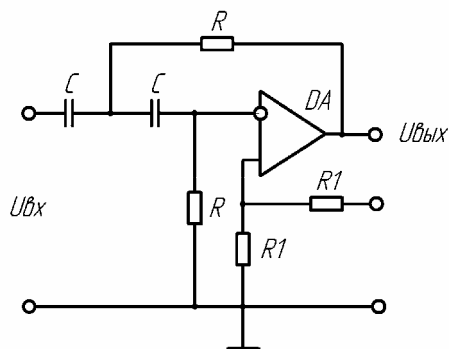


Рис. 80. Фильтр высокой частоты второго порядка

2. Изменяя частоту выходного синусоидального сигнала функционального генератора от 10 Гц до 30 кГц с амплитудой 4 В, оценить величину коэффициента усиления и сдвиг фазы сигнала при переходе от входных зажимов к выходным, результаты измерений занести в табл. 28.

Таблица 28

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики полосового фильтра

$f, \text{Гц}$									
$U_{ВХ}, \text{В}$									
$U_{ВЫХ}, \text{В}$									

K_{β}									
φ_{β} , град.									

3. По результатам измерений построить характеристики.

Контрольные вопросы

1. Что такое полосовой фильтр?
2. Приведите АЧХ полосового фильтра.
3. Перечислите основные желательные свойства, которыми должен обладать активный фильтр.
4. Нарисуйте схему полосового фильтра.

Лабораторная работа № 20

КАСКАДНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ФВЧ И ФНЧ И ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА

Цель работы: изучение принципов построения, свойств и характеристик активных полосовых фильтров, полученных при каскадном соединении ФВЧ и ФНЧ.

Для получения полосового фильтра можно использовать каскадное включение ФВЧ и ФНЧ. При этом АЧХ полосового фильтра получается путем сложения частотных характеристик ФВЧ и ФНЧ. Частота среза ФВЧ должна быть меньше частоты среза ФНЧ.

Добиться идеального разделения частот невозможно. На логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) любого фильтра существуют области спада. С добавлением полюсов фильтра (увеличением его порядка) крутизна спада увеличивается, наряду с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой фильтра низких частот (рис. 81) [1].

Частота срезов f_c либо значения RC вычисляются по следующим формулам:

$$R_2 C_2 = 1/\pi 2f_c f_H;$$

$$R_1 C_1 = 1/\pi 2f_c f_B.$$

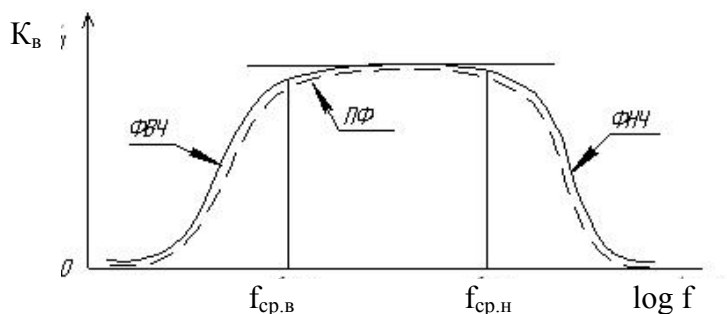


Рис. 81. ЛАЧХ полосового фильтра

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на (рис. 82). Подключить измерительные приборы и функциональный генератор к модулю «Активные фильтры» в соответствии со схемой.

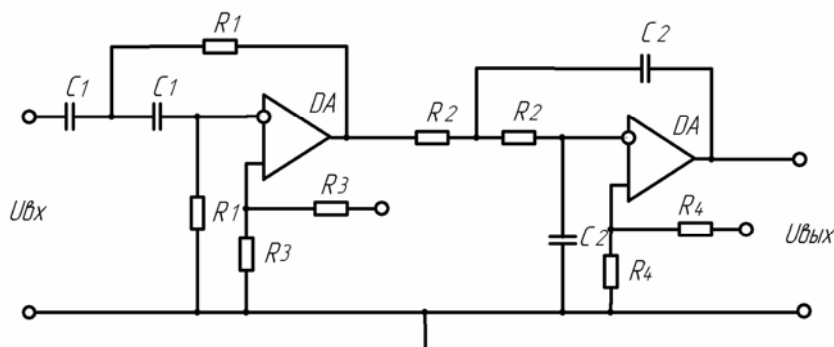


Рис. 82. Фильтр полосовой

2. Изменяя частоту выходного синусоидального сигнала функционального генератора от 10 Гц до 30 кГц с амплитудой 4 В, оценить величину коэффициента усиления и сдвиг фазы сигнала при переходе от входных зажимов к выходным, результаты измерений занести в табл. 29.

3. По результатам измерений построить характеристики.

Таблица 29

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики полосового фильтра

f, Гц									
$U_{ВХ}$, В									
$U_{ВЫХ}$, В									
K_{β}									
φ_{β} , град.									

Контрольные вопросы

1. Что такое полосовой фильтр?
2. Приведите АЧХ фильтра первого и второго порядка.
3. Перечислите основные желательные свойства, которыми должен обладать активный фильтр.
4. Нарисуйте структурную схему полосового фильтра.

Лабораторная работа № 21

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ И ФАЗОВО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Цель работы: исследование частотных характеристик звеньев обратной связи.

Лабораторный модуль содержит шесть основных схем обратных связей различных типов.

1. Г-образное RC-звено представлено на рис. 83.

Частота среза рассчитывается по формуле: $f_c = \sqrt{6} / 2\pi RC$.

2. Г-образное CR-звено представлено на рис. 84.

Частота среза рассчитывается по формуле: $f_c = 1/2\pi \sqrt{6} RC$.

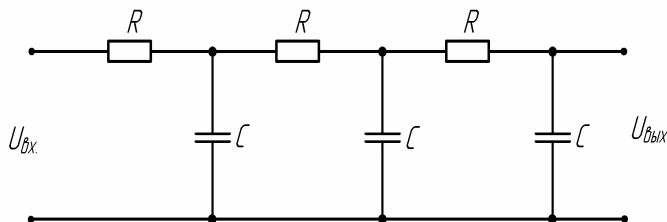


Рис. 83. Г-образное RC звено

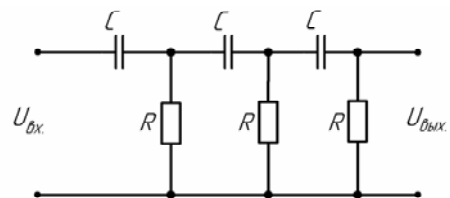


Рис. 84. Г-образное CR звено

3. Т-образное RC-звено представлено на рис. 85.

Частота среза рассчитывается по формуле: $f_c = 1/2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$.

4. Мост Вина представлен на рис. 86.

Частота среза рассчитывается по формуле: $f_c = 1/2\pi RC$.

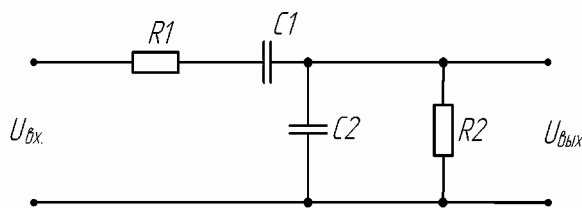


Рис. 85. Т-образное RC звено

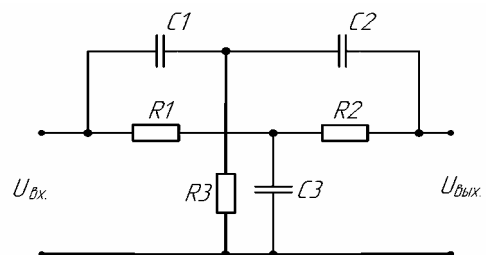


Рис. 86. Мост Вина

5. Параллельное LC-звено представлено на рис. 87.

Частота среза рассчитывается по формуле: $f_c = 1/2\pi \sqrt{LC}$.

6. Мост Вина с кварцевым резонатором представлен на рис. 88.

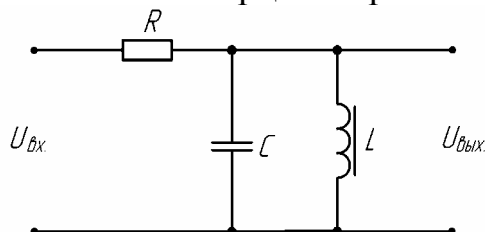


Рис. 87. Параллельное LC звено

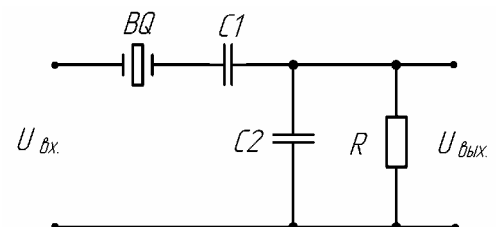


Рис. 88. Мост Вина с кварцевым резонатором

7. Схема замещения кварцевого резонатора представлена на рис. 89.

Частота среза рассчитывается по формуле:

$$f_c = 1/2\pi \sqrt{L_{\text{эâ}} C_{\text{эâ}}}.$$

Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Звенья обратной связи» приведен на рис. 90.

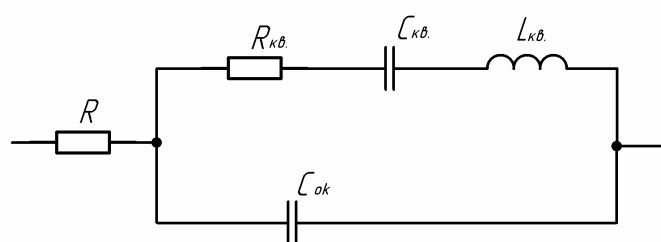


Рис. 89. Схема замещения кварцевого резонатора

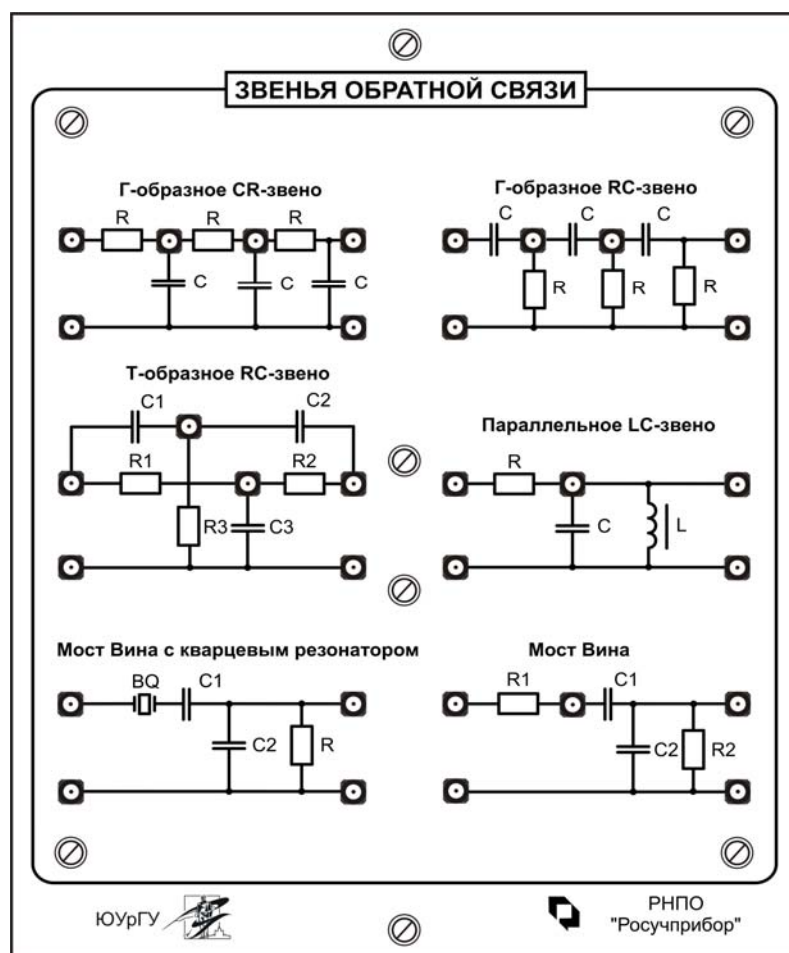


Рис. 90. Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Звенья обратной связи»

Порядок выполнения работы

1. Последовательно собрать схемы, представленные на рис. 83–89. Подключить измерительные приборы и функциональный генератор к модулю «Звенья обратной связи» в соответствии со схемой.

3. Изменяя частоту выходного синусоидального сигнала функционального генератора от 10 Гц до 30 кГц с амплитудой 4 В, оценить величину коэффициента усиления звена и сдвиг фазы сигнала при переходе от входных зажимов к выходным, результаты измерений занести в табл. 30.

Таблица 30

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики звеньев обратной связи

f, Гц									
$U_{ВХ}$, В									
$U_{ВЫХ}$, В									
K_{β}									
φ_{β} , град.									

По результатам измерений построить частотные характеристики звеньев обратной связи.

Контрольные вопросы

1. Назовите виды звеньев обратной связи и особенности каждого звена.
2. Нарисуйте схему одного из звеньев обратной связи по усмотрению преподавателя.
3. Запишите формулы для расчета частоты среза каждого звена обратной связи.
4. Почему на низких частотах выгоднее применять RC-звенья обратной связи?
5. Нарисуйте и объясните АЧХ и ФЧХ параллельного LC-звена.
6. Какое преимущество у звеньев обратной связи с кварцевым резонатором?
7. Нарисуйте схемы звеньев обратной связи с кварцевыми резонаторами.

Лабораторная работа № 22

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОГЕНЕРАТОРА

Цель работы: изучить виды и принципы работы генераторов гармонических колебаний, исследовать влияние обратных связей на процесс и условия возбуждения генераторов гармонических колебаний.

Электронным генератором гармонических колебаний называют устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний синусоидальной формы требуемой мощности и частоты (рис. 91) [8].

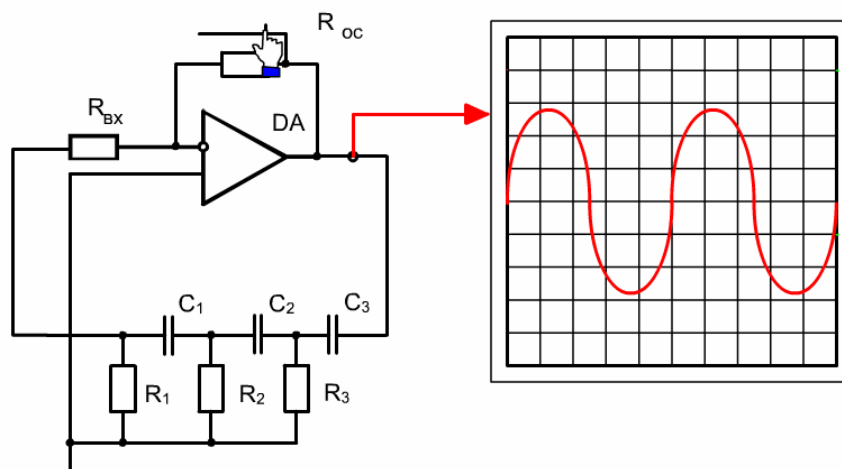


Рис. 91

Электронный генератор состоит из усилителя с коэффициентом усиления K , цепи положительной обратной связи с коэффициентом обратной связи β и источника питания постоянного тока.

Для существования устойчивых колебаний на выходе генератора необходимо выполнение следующих условий:

$$K_{\beta} K_{OC} = 1; \quad (1)$$

$$j_K + j_{\beta} = 2\pi n, \quad (2)$$

где j_K – сдвиг фазы сигнала усилителем; j_{β} – сдвиг фазы сигнала цепью обратной связи; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Выражение (1) определяет условие баланса амплитуд, а равенство (2) характеризует условие баланса фаз.

В схемах генераторов стационарных гармонических колебаний выражения (1) и (2) выполняются на одной фиксированной частоте ω_p , которая является резонансной или квазирезонансной [1].

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 92. Подключить измерительные приборы модуль операционные усилители и функциональный генератор к модулю «Звенья обратной связи» в соответствии со схемой.

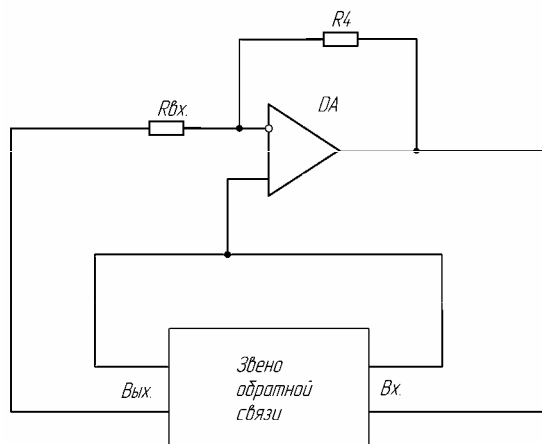


Рис. 92. Обобщенная схема автогенератора

2. Для каждого звена обратной связи определить частоту и амплитуду генерируемого сигнала, результаты измерений

занесите в табл. 31.

Таблица 31

Характеристики автогенераторов

Звено ОС	Г-образ- ное RC-звено	Г-образ- ное CR-звено	Т-образ- ное RC-звено	Мост Вина	Параллельное LC-звено	Мост Вина с кварцевым резонатором
f , Гц						
$U_{ВЫХ}$, В						

3. Сопоставить результаты с частотными характеристиками звеньев обратной связи.

Контрольные вопросы

1. Назначение автоколебательных систем.
2. На какие типы подразделяются генераторы сигналов? Нарисуйте структурную схему автогенератора.
4. Приведите условия возбуждения автогенератора.
5. С чего начинается процесс возбуждения колебаний в автогенераторе?

Лабораторная работа № 23

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАРАТОРА

Цель работы: ознакомление с принципом работы, основными параметрами, характеристиками.

Компаратор (от латинского слова «comparator» – сравнивающий) – устройство сравнения аналоговых сигналов.

На рис. 93 представлена гистерезисная схема сравнения с симметричной передаточной характеристикой. Для получения различных напряжений отпускания и срабатывания в цепи ПОС ОУ необходимо использовать четырехполюсник, коэффициент передачи которого зависит от полярности его входного напряжения.

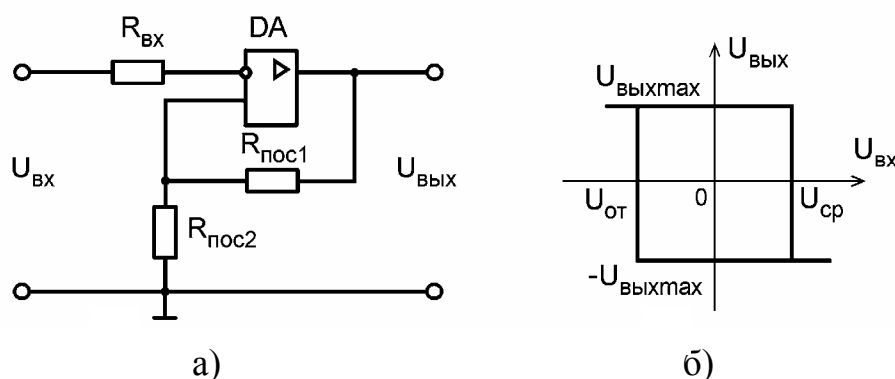


Рис. 93. Гистерезисная схема сравнения: а – схема принципиальная; б – передаточная характеристика

В качестве четырехполюсника можно использовать диод, коэффициент передачи ПОС будет зависеть от падения напряжения на прямосмещенном диоде VD . При отрицательных выходных напряжениях диод заперт и напряжение отпускания определяется как и в схеме на рис. 94, а. На рис. 94, б приведена передаточная характеристика данной схемы, очевидно, что она несимметрична относительно начала координат.

Несимметрии передаточной характеристики схемы сравнения можно добиться за счет дополнительных источников смещения, рис. 95, а. Здесь источник смещения подключен последовательно с резистором $R_{пос2}$ делителя цепи ПОС. Это приводит к смещению всей характеристики на величину напряжения смещения. На рис. 95, б показана передаточная характеристика схемы с использованием напряжения смещения положительной полярности. Следует отметить, что в данном случае направление смещения передаточной характеристики совпадает с полярностью источника смещения.

Рис. 94. Гистерезисная схема сравнения с цепью нелинейной ПОС: а –

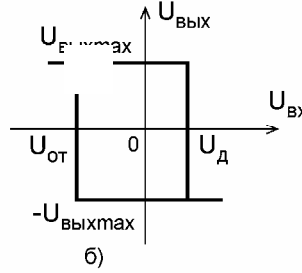
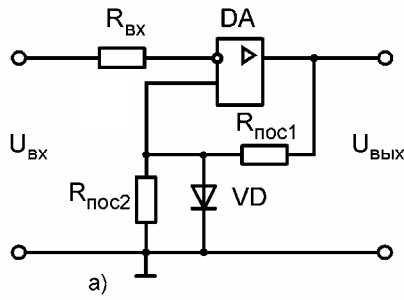


схема принципиальная;
б – передаточная
характеристика

сравнения при
совпадающих
полярностях
напряжений $U_{ВХ}$
и $E_{СМ}$: а – схема
принципиальная

б –

передаточная
характеристика

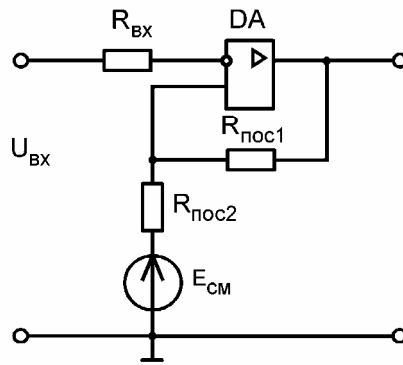
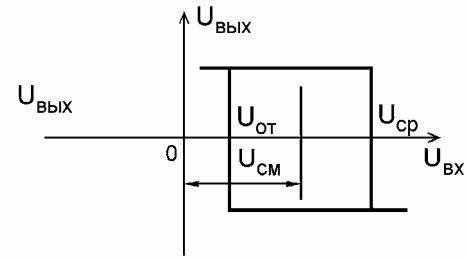


Рис. 95. Гистерезисная схема



Если напряжение смещения подать на инвертирующий вход ОУ (рис. 96, а), то направление смещения передаточной характеристики будет противоположно полярности напряжения источника смещения, т. е. смещение будет отрицательным (рис. 96, б) [1].

Внешний вид передней панели лабораторного модуля «Компаратор» приведен на рис. 97.

Рис. 96. Гистерезисная сравнения при несовпадающих полярностях напряжений $U_{ВХ}$ и $E_{СМ}$: а – схема принципиальная; б – передаточная характеристика

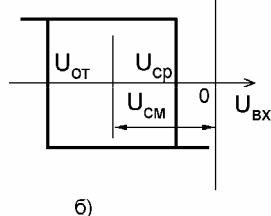
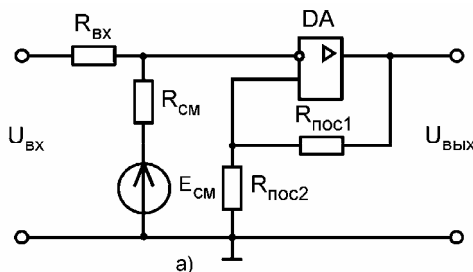
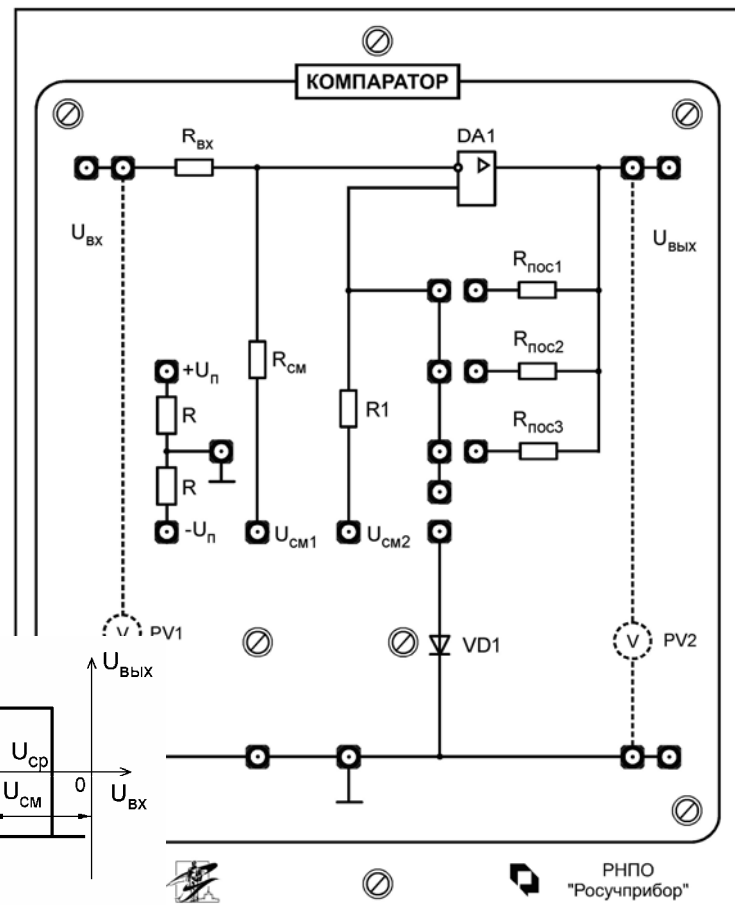


Рис. 97. Внешний



Порядок выполнения работы

1. Последовательно собрать схемы, представленные на рис. 98. Подключить измерительные приборы к модулю компаратора и модуль питания в соответствии со схемой.

2. Изменяя постоянное напряжение на входе схемы $U_{ВХ}$ в сторону увеличения от 0 до 12 В, а затем в сторону уменьшения от 12 В до 0, по показаниям приборов PV1 и PV2 необходимо снять передаточную характеристику компаратора для трех значений сопротивления $R_{пос1}$, данные измерений занести в табл. 32. Величину $E_{см}$ установить от 1 до 3 В.

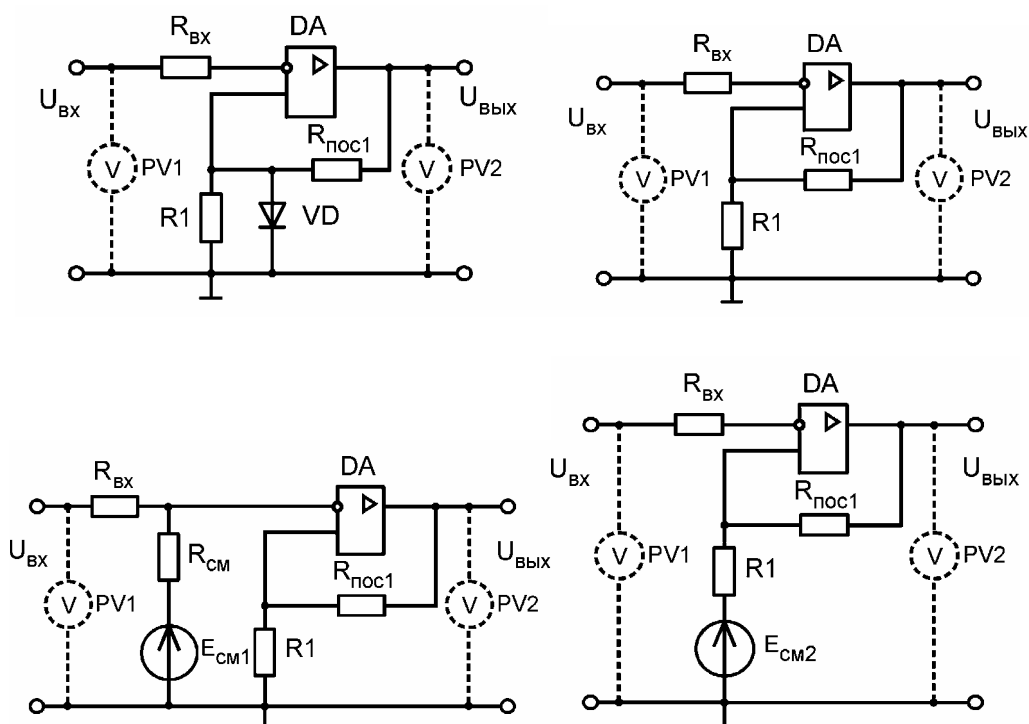


Рис. 98. Схемы исследования передаточной характеристики компаратора

Передаточная характеристика компаратора

Увеличение $U_{ВХ}$						Уменьшение $U_{ВХ}$					
$R_{ПОС1} = Ом$		$R_{ПОС2} = Ом$		$R_{ПОС3} = Ом$		$R_{ПОС1} = Ом$		$R_{ПОС2} = Ом$		$R_{ПОС3} = Ом$	
$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$	$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$	$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$	$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$	$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$	$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$

3. По данным измерений построить передаточные характеристики.

Контрольные вопросы

1. Что такое компаратор?
2. Для чего вводится положительная обратная связь?
3. Какую передаточную характеристику имеет гистерезисная схема сравнения?
4. Как можно изменить порог срабатывания схемы сравнения?
5. Как задается смещение передаточной характеристики в гистерезисных схемах сравнения?

Лабораторная работа № 24

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОМПАРАТОРОВ НА ПЕРЕМЕННОМ СИГНАЛЕ

Цель работы: ознакомление с принципом работы и применением компараторов на операционных усилителях.

Входные аналоговые сигналы компаратора: $U_{ВХ}$ – исследуемый сигнал и $U_{ОП}$ – опорное напряжение сравнения, выходной сигнал $U_{ВЫХ}$ – цифровой сигнал, содержащий 1 бит информации. Поэтому компараторы чаще всего играют роль элементов связи между аналоговыми и цифровыми устройствами, т.е. являются простейшими аналого-цифровыми преобразователями. Также компараторы применяются в импульсных генераторах, ограничителях, пороговых устройствах и т.д. Состояние компаратора определяется величиной его выходного напряжения $U_{ВЫХ}$, которое может принимать два значения U_0 и U_1 :

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} U^1, & \text{если } U_{ВХ} > U_{ОП} \\ U^0, & \text{если } U_{ВХ} < U_{ОП} \end{cases}.$$

Иногда эту функцию компаратора определяют так:

$$A_{ВЫХ} = \begin{cases} 1, & \text{при } A_{ВХ} > 0 \\ 0, & \text{при } A_{ВХ} < 0 \end{cases} = \text{Sg}(A_{ВЫХ}),$$

где Sg – логическая функция знака входного сигнала $A_{ВЫХ}$.

Чтобы состояние компаратора изменилось на конечную величину, при бесконечно малом изменении входного напряжения, необходимо иметь бесконечно большой коэффициент усиления (эпюра 1 рис. 99) при отсутствии шумов во входном сигнале. Такую характеристику можно имитировать двумя способами: во-первых, использовать усилитель с большим коэффициентом усиления, а во-вторых, ввести положительную обратную связь. При $U_{ВХ} \gg 0$, как бы велико ни было усиление, характеристика имеет вид, представленный на рис. 100. Это приведет к следующим последствиям: при очень медленном изменении $U_{ВХ}$, сигнал на выходе будет также изменяться замедленно, что плохо отобразится на работе следующих логических схем (эпюра 2 на рис. 99). Причем, при таком медленном изменении $U_{ВХ}$ около нуля, выход операционного усилителя может многократно изменять свое состояние под воздействием шумов и помех (эпюра 3 на рис. 99), что приведет к сбоям в системе.

Применяемый выход из положения – введение положительной обратной связи, охватывающей усилитель с большим коэффициентом усиления K_U , который обычно представляет подобие ОУ, т.е. имеет дифференциальный выход и большой коэффициент усиления по току.

Рассмотрим работу ОУ в режиме компаратора. При $U_{ВХ} \ll U_{ОП}$ выходной сигнал – «0» и $U_{0ВЫХ} \gg 0$. При $R_1 \ll R_2$ и $U_{ВХ} \gg U_{ОП}$ выход схемы переключится в «1». В момент переключения на входе «+» возникнет скачок положительного напряжения: $U_{1ВЫХ} \cdot R_1 / (R_1 + R_2) \gg U_{1ВЫХ} \cdot R_1 / R_2$, удерживающий схему в состоянии «1», даже если $U_{ВХ}$ и качнется в отрицательную сторону. Напряжение $U_{ВЫХ}$ схемы подтверждает входное воздействие (за счет ПОС) и фиксирует ее состояние. Чтобы перевести выход схемы обратно в «0», потребуется значение сигнала не $U_{ВХ} \gg U_{ОП}$, а $U_{ВХ} \gg U_{ОП} - U_{1ВЫХ} \cdot R_1 / R_2$. При этом значении $U_{ВХ}$ разность потенциалов между входами «+» или «-» компаратора пройдет через 0 В, что и вызовет его переключение, при этом входной сигнал, став «0», сдвинет потенциал на входе «+» в отрицательную сторону – напряжение на входе «+» скачком изменится в отрицательную сторону на величину $-U_{0ВЫХ} \cdot R_1 / R_2$, что подтвердит воздействие изменения $U_{ВХ}$. При переключениях изменение $U_{ВЫХ}$, подтверждая тенденцию, обусловленную $U_{ВХ}$, ускоряет процесс переключения, и если усиление в петле ПОС > 1 , то схема обладает гистерезисом и ведет себя как усилитель с бесконечно большим K_U и быстродействием, ограниченным только свойствами его внутренних цепей [1].

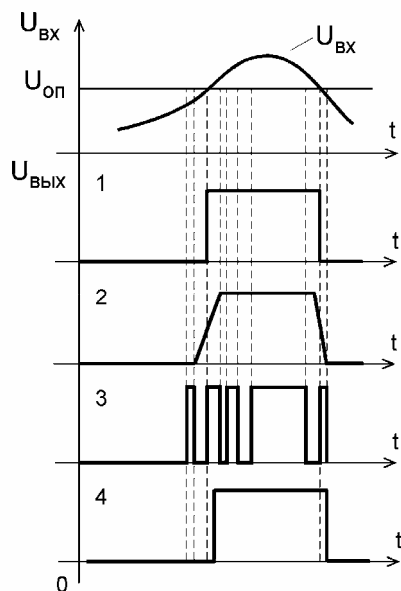


Рис. 99. Временные диаграммы работы компаратора

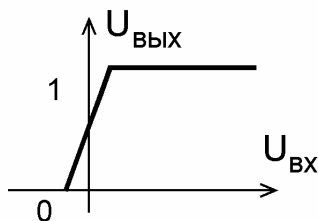


Рис. 100. Изменение напряжения на выходе компаратора

На рис. 101, а представлена схема компаратора с положительной обратной связью (триггер Шмидта). При отсутствии на его входе опорного напряжения ($U_{оп} = 0$) компаратор срабатывает по собственному порогу. На выходе будет сигнал $U_{ВЫХ} = U + m$ (точка 1 на рис. 101, б), а на неинвертирующем входе:

$$U_H = \beta \cdot U + m.$$

Коэффициент положительной ОС определяется резисторами в цепи обратной связи ОУ: $b = R_1 / (R_1 + R_2)$.

Если входное напряжение больше нуля и увеличивается, то при сравнении его амплитуды с опорным, равным напряжению срабатывания $U_{сп} = \beta \cdot U + m$, компаратор переключается. При этом происходит скачок выходного напряжения со значения $U + m$, на значение $U - m$ (переход от точки 2 к точке 3 на рис. 101, б).

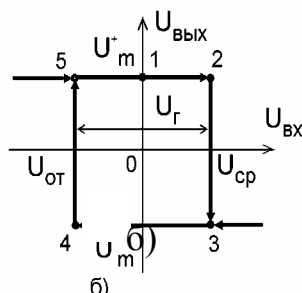
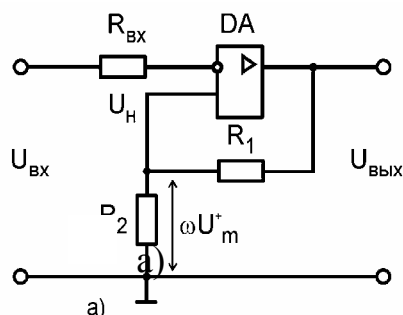
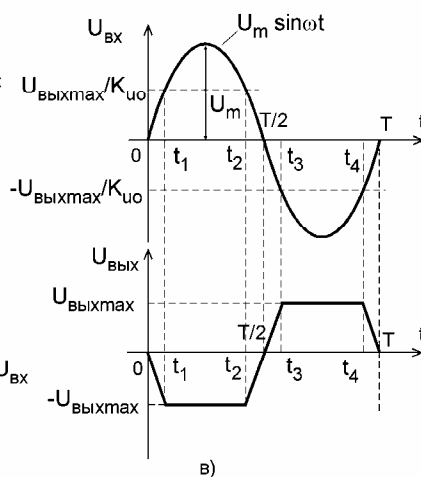
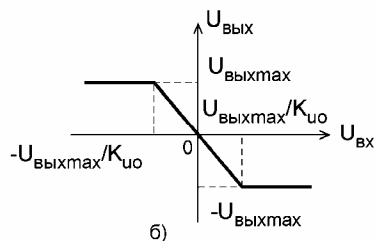
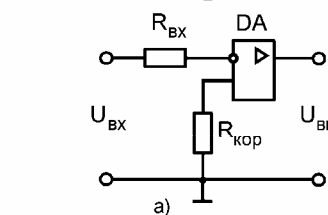


Рис. 101. Компаратор: а – схема принципиальная; б – передаточная характеристика

Дальнейшее увеличение входного напряжения не изменит состояния компаратора, и напряжение на неинвертирующем входе ОУ останется постоянным. При уменьшении входного сигнала до значения опорного, равного напряжению отпускания $U_{ВХ} = U_{отп} = \beta \cdot U - m$, произойдет возврат компаратора в исходное состояние. Выходное напряжение изменится с $U - m$ на $U + m$ (переход от точки 4 к точке 5 на рис. 101, б).

Таким образом, передаточная характеристика имеет вид петли гистерезиса.



Такой компаратор обладает триггерным (переключающим) эффектом. Компараторы с гистерезисом (триггеры Шмидта) позволяют устранить дребезг нуля. В них после переключения компаратора, напряжение гистерезиса

$U_{\Gamma} = U_{\text{ср}} + U_{\text{отп}} = 2 \cdot \beta \cdot U_m$, служит запасом на помехоустойчивость, поскольку возврат компаратора в исходное состояние возможен лишь, когда $U_{\text{вх}}$ уменьшится на величину U_{Γ} . При этом помехи, величина которых меньше U_{Γ} , не могут вызывать случайного срабатывания компаратора. Рассмотрим случай, когда при изменении входного напряжения выходное напряжение достигнет своего максимально возможного уровня (рис. 102).

Рис. 102. Детектор нуля:
а – схема принципиальная;
б – передаточная характеристика;
в – временные диаграммы

Пусть ОУ обладает несколько отличным от бесконечности коэффициентом усиления $K_{\text{УО}}$ и на вход усилителя подаем переменное напряжение $U_{\text{вх}} = U_m \cdot \sin \omega t$, причем амплитуда U_m больше максимального значения входного сигнала, обеспечивающего работу без ограничения выходного напряжения. Нетрудно заметить, что чем больше по абсолютному значению U_m , тем меньшую часть периода будет сохранять пропорциональность между входным и выходным напряжениями и тем дольше выходное напряжение ОУ будет равно своему максимуму. Такое время потребуется для изменения выходного напряжения от $U_{\text{ВЫХmax}}$ до $-U_{\text{ВЫХmax}}$ [2].

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рис. 103. Подключить измерительные приборы, функциональный генератор и модуль питания к модулю компаратора со схемой.

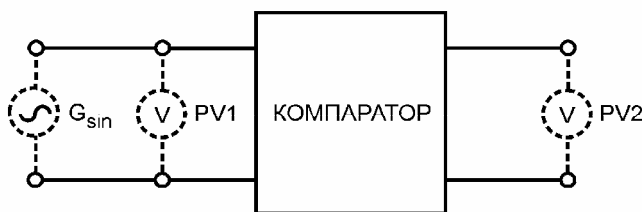


Рис. 103. Структурная схема исследования режимов работы различных компараторов

2. Используя различные схемы компараторов (см. рис. 98), установить амплитуду выходного синусоидального сигнала функционального генератора на уровне 4 В с частотой 50 Гц. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов. 3. Сопоставить временные диаграммы с передаточными характеристиками соответствующих компараторов.

Контрольные вопросы

1. Какие выходные напряжения могут формироваться на выходе схемы сравнения?
2. Построить временную диаграмму работы гистерезисной схемы сравнения с нелинейным ПОС.
3. Построить временную диаграмму работы гистерезисной схемы сравнения с положительным ПОС.
4. Построить временную диаграмму работы гистерезисной схемы сравнения с отрицательным ПОС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия: Телеком, 2003.
2. Гусев, В.Г. Электроника: учебное пособие / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высшая школа, 1991.
3. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: Высшая школа, 1982.
4. Шимони, К. Физическая электроника / К. Шимони; пер. с нем. – М.: Энергия, 1977.
5. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – 5-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Королев, В.Г. Электронные устройства автоматики: учебное пособие / В.Г. Королев. – 2-е изд., доп и перераб. – М.: Высшая школа, 1991.
7. Игунов, Д.В. Полупроводниковые устройства непрерывного действия / Д.В. Игунов, Г.П. Кокшунина. – М.: Радио и связь, 1990.
8. Иванов-Цыганов, А.Н. Электропреобразовательные устройства РЭС: учебник для вузов по спец. «Радиотехника» / А.Н. Иванов-Цыганов. – 4-е изд., доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1991.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Техническое описание учебно-лабораторного комплекса	3
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	10
Лабораторная работа № 1. Исследование вольтамперной характеристики стабилитрона	13
Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик биполярного транзистора	21
Лабораторная работа № 3. Исследование схем включения биполярного транзистора	26
Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик полевого транзистора	29
Лабораторная работа № 5. Исследование схем включения полевого транзистора	33
Лабораторная работа № 6. Исследование характеристик IGBT транзистора....	36
Лабораторная работа № 7. Исследование схем включения IGBT транзистора	38
Лабораторная работа № 8. Исследование вольтамперной характеристики динистора	41
Лабораторная работа № 9. Исследование вольтамперной характеристики тиристора	45
Лабораторная работа № 10. Исследование вольтамперной характеристики оптоэлектронных приборов	48
Лабораторная работа № 11. Исследование вольтамперной характеристики оптопары	55
Лабораторная работа № 12. Исследование параметров и характеристик усилителя с обратной и без обратной связи	59
Лабораторная работа № 13. Исследование характеристик стабилизатора	63
Лабораторная работа № 14. Исследование характеристик неинвертирующего усилителя	69
Лабораторная работа № 15. Исследование характеристик инвертирующего сумматора	72
Лабораторная работа № 16. Исследование характеристик дифференцирующего усилителя	73
Лабораторная работа № 17. Исследование характеристик фильтров низкой частоты	74
Лабораторная работа № 18. Исследование характеристик фильтров высокой частоты	78
Лабораторная работа № 19. Исследование характеристик полосового фильтра	80
Лабораторная работа № 20. Каскадное соединение ФВЧ и ФНЧ и формирование характеристик полосового фильтра	81

Лабораторная работа № 21. Исследование амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик звеньев обратной связи	83
Лабораторная работа № 22. Исследование характеристик автогенератора	85
Лабораторная работа № 23. Исследование передаточных характеристик компаратора	87
Лабораторная работа № 24. Исследование работы компараторов на переменном сигнале	91
Библиографический список	95