

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Электропривод и автоматизация  
промышленных установок»

621.38(07)  
Ф505

М.В. Гельман, М.М. Дудкин,  
Н.М. Сапрунова, О.Г. Терещина

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебное пособие к лабораторным работам

Челябинск  
Издательство ЮУрГУ  
2007

УДК 621.38(07)  
Ф505

*Одобрено  
учебно-методической комиссией энергетического факультета.*

*Рецензенты:*  
В.Л. Кодкин, Б.Ю. Сидоренко

Ф505      **Физические основы электроники: учебное пособие к лабораторным работам / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, Н.М. Сапрунова, О.Г. Терещина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 96 с.**

Учебное пособие содержит описание и методику проведения лабораторных работ по физическим основам электроники. Лабораторные работы состоят из двух циклов: полупроводниковые приборы и микроэлектроника.

Учебное пособие предназначено для студентов всех электротехнических специальностей энергетического факультета.

УДК 621.38(07)

© Издательство ЮУрГУ, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие содержит лабораторные работы, выполняемые студентами при изучении курсов «Физические основы электроники», «Промышленная электроника» и других курсов с близкими названиями. Оно предназначено для студентов всех электротехнических специальностей энергетического факультета.

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

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

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

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

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

# ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

## Состав станда

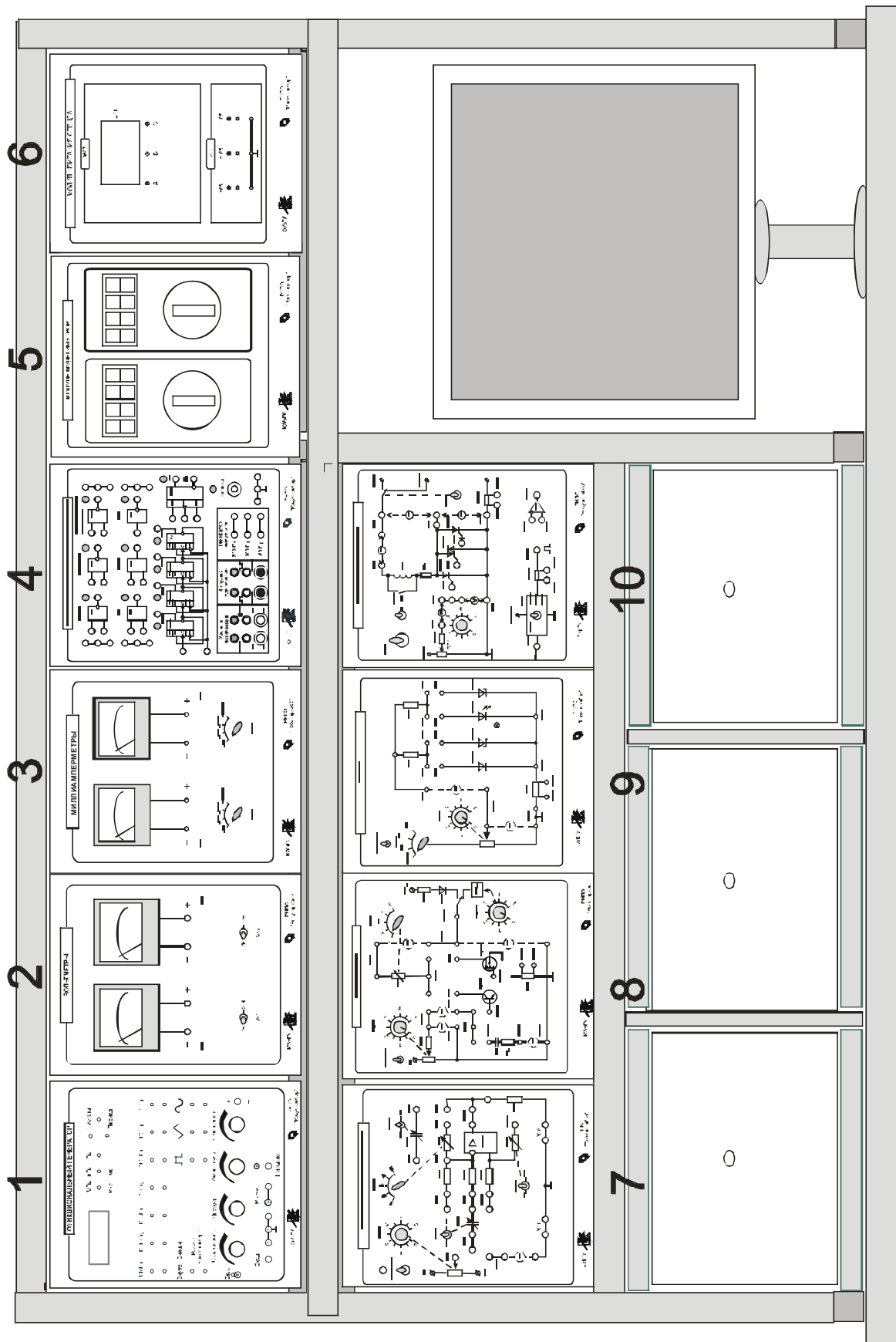


Рис. 1. Общий вид лабораторного комплекса по физическим основам электроники

Перечень модулей, входящих в цикл «Физические основы электроники» (рис. 1): 1 – Функциональный генератор, 2 – Вольтметры, 3 – Миллиамперметры, 4 – Логические элементы и триггеры, 5 – Мультиметры, 6 – Модуль питания стенда, 7 – Операционный усилитель, 8 – Транзисторы, 9 – Диоды, 10 – Тиристоры. Описания исследуемых модулей приведены в соответствующих лабораторных работах и техническом описании комплекса. Описание модулей, используемых для питания, измерения и т. д., приведено ниже.

### Модуль питания стенда

Модуль питания стенда (рис. 2) предназначен для ввода трехфазного напряжения 380 В из сети в лабораторный комплекс, защиты комплекса от токов короткого замыкания и подачи силовых и низких напряжений питания на модули стенда.

Модуль содержит автоматический трехполюсный выключатель  $QF1$  и вторичный источник питания низковольтных цепей модулей напряжениями  $\pm 15$  В и +5 В.

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

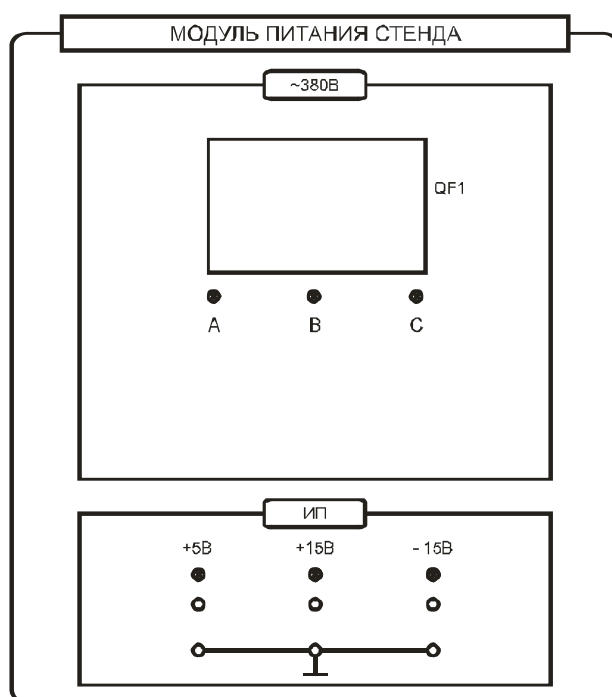


Рис. 2. Лицевая панель модуля питания стенда

### Модули «Миллиамперметры», «Вольтметры» и «Мультиметры»

Измерительный модуль «Миллиамперметры» (рис. 3) позволяет измерить стрелочными приборами магнитоэлектрического типа два тока (приборами А1 и А2). Диапазоны измерений приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование прибора	Диапазон измерения
А1	0...0,1; 0...1; 0...10; 0...100 мА
А2	0...0,1; 0...1; 0...10; 0...100 мА

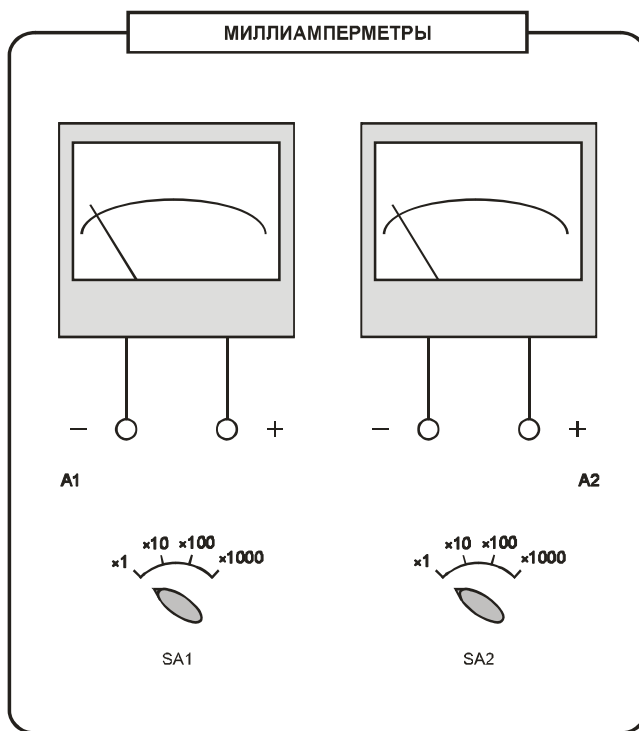


Рис. 3. Лицевая панель модуля «Миллиамперметры»

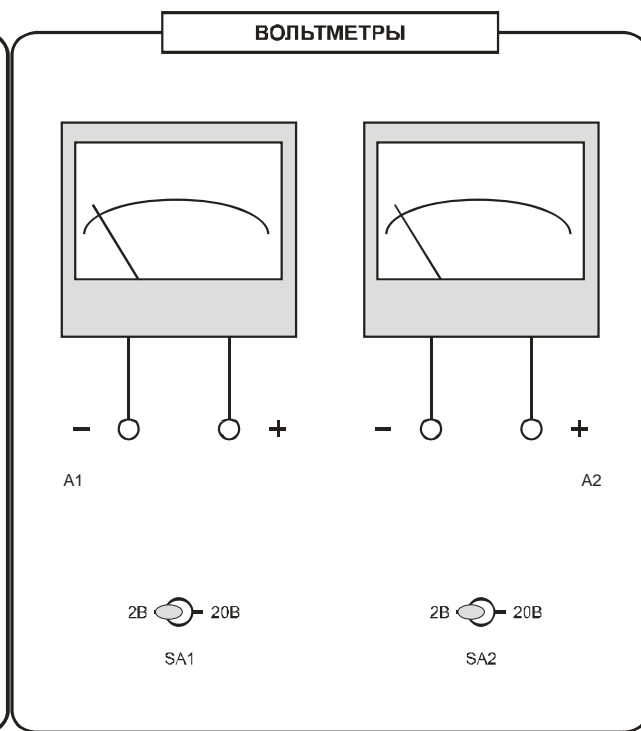


Рис. 4. Лицевая панель модуля «Вольтметры»

Измерительный модуль «Вольтметры» (рис. 4) позволяет измерить стрелочными приборами магнитоэлектрического типа два напряжения (приборами A1 и A2). Диапазоны измерений приборов приведены в табл. 2. Вольтметры имеют малое входное сопротивление и, если это мешает измерениям, следует использовать модуль «Мультиметры» (рис. 5).

Модуль «Мультиметры» (см. рис. 5) включает в себя два цифровых прибора типа М890 и используется в основном для измерения напряжений, диапазоны измерений которых приведены в табл. 3.

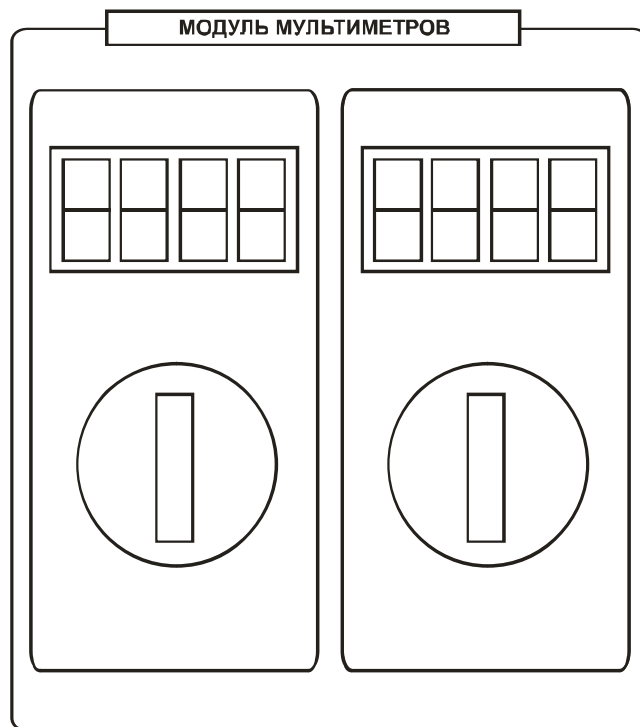


Рис. 5. Лицевая панель «Модуля мультиметров»

Таблица 2

Наименование прибора	Диапазон измерения
A1	0...2; 0...20 В
A2	0...2; 0...20 В

Таблица 3

Измеряемый параметр	Диапазоны измерения
Постоянное напряжение	0...±200 мВ; 0...±2 В; 0...±20 В; 0...±200 В; 0...±1000 В
Постоянный ток	0...±2 мА; 0...±20 мА; 0...±200 мА; 0...±10 А

**Примечание.** Будьте внимательны при измерении тока – входные гнезда мультиметра необходимо соответственно подключить на «мА» или «10 А»!

### Модуль «Функциональный генератор»

Модуль «Функциональный генератор» (рис. 6) предназначен для формирования тестовых сигналов синусоидальной, прямоугольной и пилообразной формы.

В модуле предусмотрена возможность регулирования частоты, амплитуды, смещения и скважности выходного сигнала. Диапазон частот разбит на семь декад: 1 Гц – 1 МГц. Максимальная амплитуда выходного сигнала 10 В. Модуль оснащен встроенным частотомером, который позволяет измерять частоту внешних сигналов до 1 МГц.

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

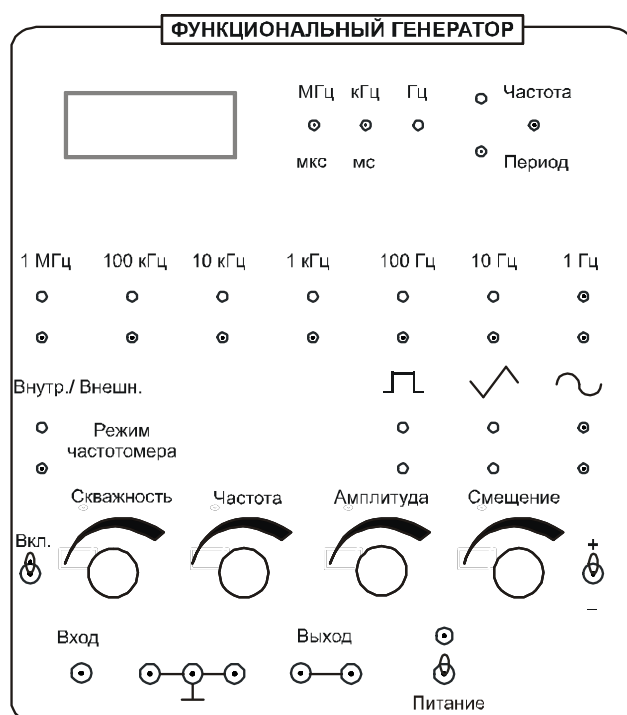


Рис. 6. Лицевая панель модуля «Функциональный генератор»

### Электронный осциллограф

Электронный осциллограф предназначен для наблюдения на экране электроно-лучевой трубки функциональных зависимостей сигналов, изменений электрических сигналов во времени, а также для измерения различных электрических величин. В лаборатории используется двухканальный осциллограф GOS-620 или С1-117.

Полоса пропускания осциллографа GOS-620 составляет 20 МГц, максимальная чувствительность – 1 мВ/дел., минимальный коэффициент развёртки – 0,2 мкс/дел.

Функциональная схема одноканального осциллографа приведена на рис. 7.

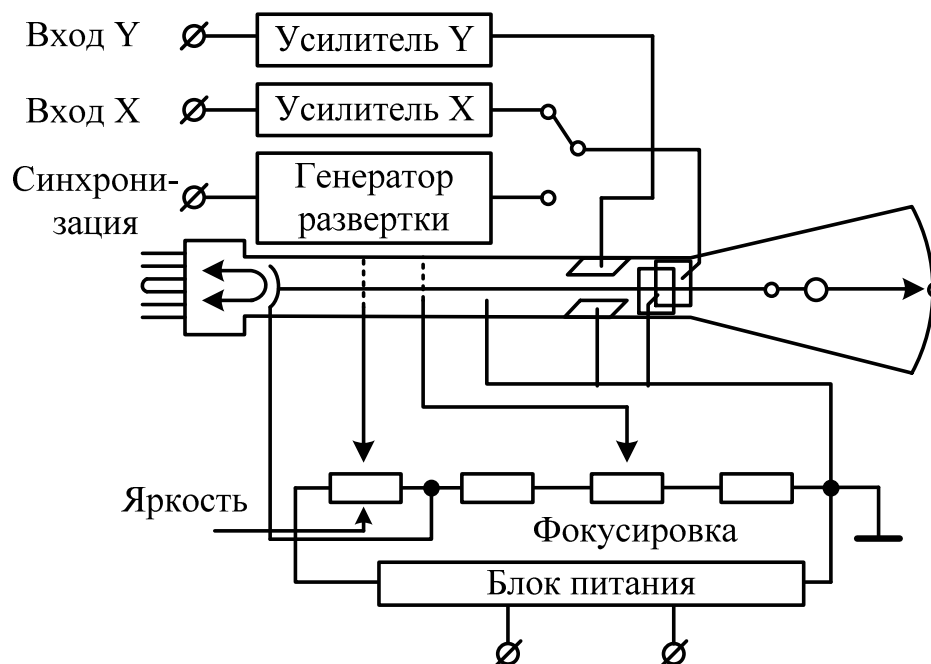


Рис. 7. Упрощенная функциональная схема одноканального осциллографа

На рис. 8 показана лицевая панель осциллографа GOS-620 с обозначением органов управления.

Включение питания осциллографа осуществляется кнопкой 6 «POWER». При его включенном состоянии загорается индикатор 5. Регулировка яркости и фокусировка изображения на экране осциллографа – позиция 33 – осуществляется вращением ручек 2 «INTEN» и 3 «FOCUS» соответственно. Изменение наклона изображения по горизонтали производится ручкой 4 «TRACE ROTATION». На выходе калибратора – позиция 1 – «CAL» напряжение 2 В и частота 1 кГц.

*Каналы ввода сигналов.* Исследуемые сигналы подаются на входы каналов CH1 гнездо 8 и CH2 гнездо 20.

Переключатели 10 и 18 режимов входов усилителей «AC-GND-DC»: «AC» (закрытый вход) – пропускает только переменную составляющую; «DC» (открытый вход) – постоянную и переменную составляющую; «GND» – вход усилителя отключается от источника сигнала и заземляется.

Дискретное изменение масштаба по оси Y для 1 и 2 каналов CH1 и CH2 от 5 мВ/дел. до 5 В/дел. в 10 диапазонах осуществляется регуляторами 7 и 22 «VOLTS/DIV» (вольт на деление) соответственно, с внешним делителем 1:10 от 50 мВ/дел. до 50 В/дел. Плавное изменение масштаба производится ручками 9 и 21 «VARIABLE». Когда ручка вытянута «режим ×5 раз» происходит дополнительное увеличение амплитуды в 5 раз. Масштабы будут соответствовать указанным, если ручки 9 и 21 находятся в крайнем правом положении.

В канале CH2 также можно осуществлять инвертирование сигнала нажатием кнопки 16 CH2 «INV».



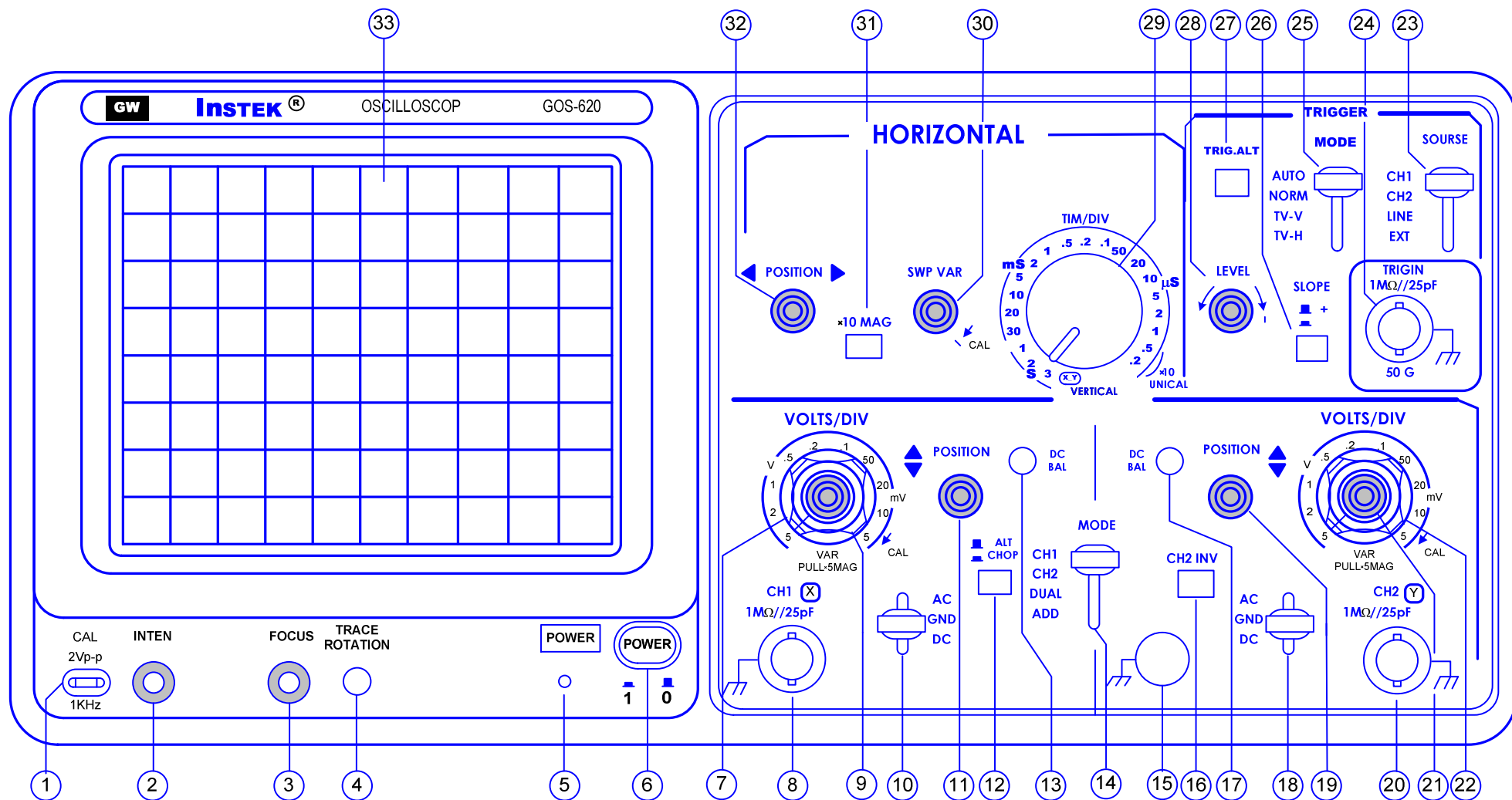


Рис. 8. Лицевая панель осциллографа GOS-620

Балансировку каналов *CH1* и *CH2* можно выполнять с помощью регуляторов 13 и 17 «*DC BAL*». Регулировка положения лучей обеих каналов по вертикали осуществляется соответственно ручками 11 и 19 «*POSITION*».

Для наблюдения на экране осциллографа одного или одновременно двух сигналов используется переключатель 14 режима работы усилителя «*MODE*». В положениях: *CH1* и *CH2* – на экране наблюдается сигнал канала 1 или 2 или входной сигнал *X*-оси или *Y*-оси для режима *X-Y*; «*DUAL*» – одновременное изображения сигналов обоих каналов; «*ADD*» – отображается сумма сигналов подаваемых на два канала *CH1* и *CH2* или их разность при нажатой кнопки *CH2* «*INV*». При этом, когда кнопка 12 «*ALT/CHOP*» отжата в двухканальном режиме, режим работы коммутатора выбирается автоматически исходя из положения ручки «время/дел.». При нажатии на кнопку коммутатор принудительно переключается в режим попеременного показа кривых.

Для заземления предназначено гнездо 15 «*GND*».

*Развертка.* Масштаб развертки устанавливается ручкой 29 «*TIME/DIV*» от 0,2 мкс/дел. до 0,5 с/дел. 20 ступенями. При переводе в положение *X-Y* обеспечивается наблюдение функциональной зависимости двух напряжений (фигур Лиссажу). Плавная регулировка коэффициента развертки производится ручкой 30 «*SWP.VAR*». Перемещение изображения по горизонтали – ручкой 32 «*POSITION*». При нажатой кнопке 31 «*×10 MAG*» – скорость развертки увеличивается в 10 раз.

*Синхронизация.* Выбор режима синхронизации осуществляется ручкой 23 «*SOURCE*»: *CH1* и *CH2* – развертка синхронизируется сигналом с первого или второго канала соответственно; «*LINE*» – развертка синхронизируется от сети 50 Гц; «*EXT*» – внешняя синхронизация и для подачи исследуемого сигнала непосредственно на входной усилитель *X*. Для входа внешней синхронизации используется вход 24 «*TRIG IN*»;

При нажатой кнопке 27 «*TRIG.ALT*» – развертка поочередно синхронизируется сигналом с 1 и 2 каналов.

Переключатель 26 полярности синхронизирующего сигнала «*SLOPE*» «+» или «-» развертка синхронизируется положительным или отрицательным перепадом исследуемого сигнала.

Регулировка уровня исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развертки, производится ручкой 28 «*LEVEL*».

Выбор режима работы запуска развертки – позиция 25 – «*TRIGGER MODE*» (полярность сигнала должна быть при этом отрицательной): «*AUTO*» – если нет сигнала синхронизации, развертка переходит в автоколебательный режим; «*NORM*» – развертка запускается только при наличии входного сигнала; «*TV-V*» и «*TV-H*» – синхронизация по вертикали (по кадрам) и по горизонтали (по строкам).

## ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### *Порядок выполнения работ*

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

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- 1) ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой [1–6] и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа;
- 2) выполнить предварительные расчеты и построения, указанные в задании для своего варианта;
- 3) изучить схему лабораторной установки и продумать методику выполнения лабораторной работы;
- 4) ответить на контрольные вопросы.

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

При выполнении лабораторной работы необходимо:

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

## Рекомендации по работе с осциллографом

Масштабы по напряжению  $m_u$  каналов ввода сигналов соответствует указанным на осциллографе около регуляторов 7 и 22, если ручки 9 и 21 установлены в крайние правые положения (до щелчка).

При измерении напряжения на шунте масштаб по току

$$m_i = \frac{m_u}{R_{ш}} \frac{A}{дел.}, \quad (1)$$

где  $R_{ш}$  – сопротивление шунта.

Масштаб в угловых единицах (градусах)

$$m_{от} = 360 f m_t \frac{град}{дел.}, \quad (2)$$

при этом масштаб по времени  $m_{от}$  должен быть выражен в «с/дел.».

Удобнее определять масштаб в градусах, зная период сигнала на экране. Тогда

$$m_{от} = \frac{360}{T_{дел}} \frac{град}{дел.}, \quad (3)$$

где  $T_{дел.}$  – длительность периода на экране в делениях.

## Рекомендации по обеспечению техники безопасности при работе с осциллографом

При применении двухканального осциллографа возникает опасность коротких замыканий в схеме через два провода входов, связанных с корпусом осциллографа.

Осциллограф должен быть специально подготовлен к работе на стенде. Сетевой шнур следует подключать только в розетку с заземленным контактом (евро-розетку).

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

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

Целесообразно, чтобы не менять (мало менять) масштабы, подавать сигналы напряжения на один канал, а тока – на другой. Канал *CH2*, позволяющий инвертировать входной сигнал, в лабораторных работах удобнее использовать для осциллографирования напряжений.

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

## Оформление отчетов по лабораторным работам

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

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

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

Опытные точки могут иметь разброс. Экспериментальные кривые проводят плавно, максимально приближая к экспериментальным точкам. На графиках приводят название, обозначают, к какому опыту они относятся, и указывают постоянные величины, определяющие условия опыта. На осях координат надо обязательно указать, какая величина по ним отложена, в каких единицах она измеряется, и нанести деления. Цена деления должна быть удобной для работы.

Пример обработки осциллограммы приведен на рис. 9.

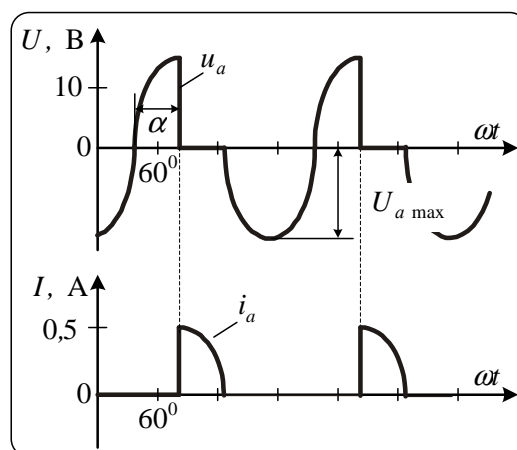


Рис. 9. Пример обработки осциллограмм

Работа № 1  
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ, НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ  
И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

*Цель работы*

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

*Описание лабораторной установки*

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

Лицевая панель модуля «Диоды» представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: выпрямительный диод  $VD1$ , диод Шоттки  $VD2$ ,

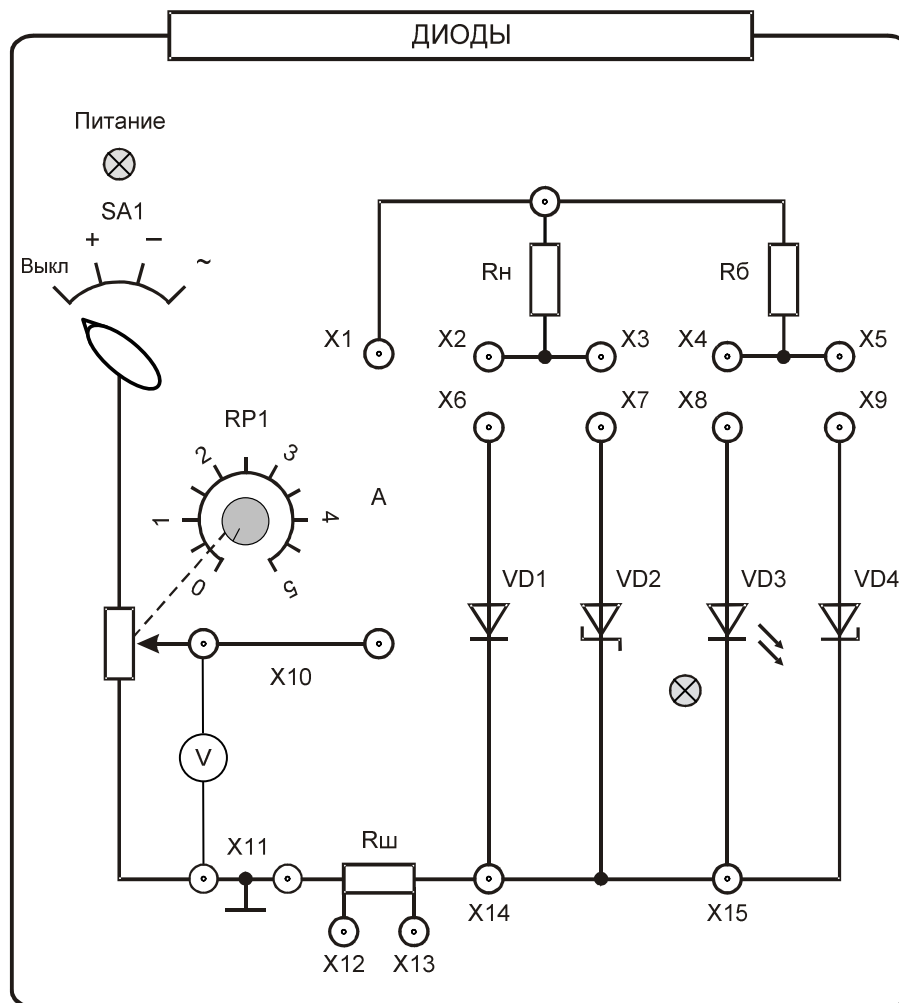


Рис. 1. Лицевая панель модуля «Диоды»

светодиод  $VD3$ , стабилитрон  $VD4$ , потенциометр  $RP1$  для изменения подаваемого напряжения, резистор  $R_n = 150 \text{ Ом}$ , и балластный резистор  $R_6 = 1,1 \text{ кОм}$ . Резистор  $R_n$  используется в качестве ограничивающего ток при снятии характеристик и в качестве сопротивления нагрузки при исследовании выпрямителя. Переключатель  $SA1$  предназначен для включения переменного или постоянного напряжения (положительного или отрицательного), а также выключения питания модуля. Шунт  $R_{ш} = 10 \text{ Ом}$  служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через диод. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений ( $X1 - X15$ ).

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

Для подачи напряжения на модуль необходимо включить автоматический выключатель «Модуля питания стенда».

### *Задание и методические указания*

#### *1. Предварительное домашнее задание:*

а) изучить тему курса «Полупроводниковые диоды» [1, с. 14–18; 52; 2, с. 88–101] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) начертить схему для снятия ВАХ выпрямительного диода на постоянном токе и схему для исследования параметрического стабилизатора;

в) начертить схему для снятия ВАХ выпрямительного диода на переменном токе и схему для исследования светодиода;

г) начертить схему для снятия ВАХ стабилитрона на переменном токе и схему для исследования выпрямителя;

д) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения  $u$ , выпрямленного напряжения  $u_n$ , анодного тока  $i_a$  и напряжения на вентиле  $u_a$ . Амплитудное значение  $U_m$  переменного напряжения взять из таблицы вариантов. Вентиль считать идеальным;

е) для идеализированной ВАХ стабилитрона построить линию нагрузки, если напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{ст} = 6,8 \text{ В}$ , его дифференциальное сопротивление  $r_d$  на участке стабилизации равно нулю, напряжение питания  $U_n$  – в соответствии с таблицей вариантов. Определить ток  $I_6$  через балластный резистор;

ж) для светодиода определить величину балластного сопротивления  $R_6$ , если максимально возможный ток через светодиод  $I_{max} = 10 \text{ мА}$ , пороговое напряжение светодиода  $U_0 = 2 \text{ В}$ , напряжение питания  $U_n$  взять из таблицы вариантов.

#### *2. Экспериментальное исследование выпрямительного диода:*

а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе (рис. 2). Соединить перемычкой гнезда  $X2 - X6$ . Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 1000$ » (максимальный ток  $100 \text{ мА}$ ) между гнездами  $X1 - X10$ . Для из-

мерения анодного напряжения между гнездами X3, X14 включить двухпредельный вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе «2 В», при больших напряжениях перейти на предел «20 В». Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

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

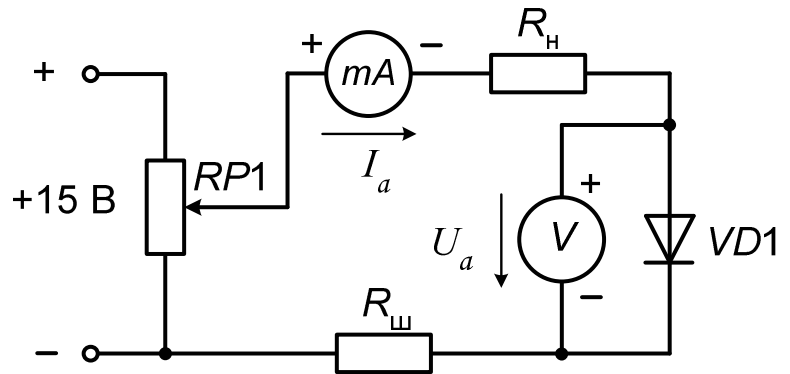


Рис. 2. Схема для исследования выпрямительного диода на постоянном токе

После выполнения эксперимента перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0»;

в) по построенной вольтамперной характеристике определить основные параметры диода: пороговое напряжение  $U_0$ , дифференциальное сопротивление  $r_d$ , обратный ток  $I_{обр}$ , прямое падение напряжения  $U_{a\max}$  при максимальном анодном токе  $I_{a\max}$ ;

г) собрать схему для исследования выпрямительного диода на переменном токе с целью получения ВАХ диода на экране осциллографа (рис. 3). Вход CH2(Y) осциллографа подключить к шунту  $R_{ш}$  (гнездо X13), а корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом X12. Вход CH1(X) осциллографа подключить к гнезду X3. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Подать питание – переключатель SA1 установить в положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра RP1 для изменения ВАХ диода. Определить масштабы по току и напряжению.

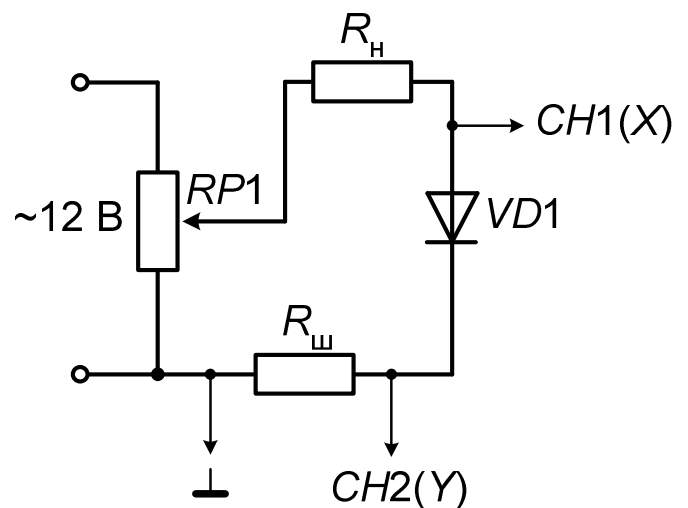


Рис. 3. Схема для исследования выпрямительного диода на переменном токе

После выполнения эксперимента перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0»;



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

3. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на диоде:

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

б) исследовать выпрямитель, для этого установить на входе напряжение с амплитудой  $U_m$ , указанной в таблице вариантов. Измерение напряжения производить при помощи осциллографа, подключив вход *CH2* осциллографа к гнезду X10, а корпус осциллографа «⊥» – к гнезду X12. Канал *CH1* осциллографа рекомендуется отключить от модуля;

в) снять осциллограммы напряжения на диоде  $u_a$  (вход *CH1* осциллографа подключить к гнезду X3) и анодного тока  $i_a$  (вход *CH2* осциллографа подключить к гнезду X13, а корпус осциллографа «⊥» уже соединен с гнездом X12). Переключить осциллограф в двухканальный режим «Dual». Зарисовать с экрана осциллографа временные диаграммы сигналов друг под другом. Снять осциллограмму напряжения на нагрузке  $u_n$ . Для этого корпус осциллографа подключить к гнезду X3, а вход канала *CH2* к гнезду X1 (не забудьте определить масштабы по току и напряжению).

После выполнения эксперимент перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0».

4. Экспериментальное исследование диода Шоттки:

а) собрать схему для исследования диода Шоттки на постоянном токе (рис. 4). Соединить перемычкой гнезда X3, X7. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе «×1000» (максимальный ток 100 мА) между гнездами X1 – X10. Для измерения анодного напряжения между гнездами X2 – X14 включить двухпредельный вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе «2 В», при больших напряжениях перейти на предел «20 В». Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

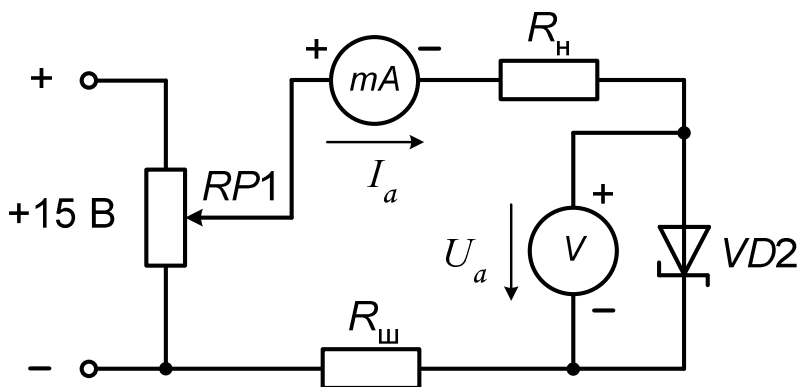


Рис. 4. Схема для исследования диода Шоттки на постоянном токе

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

После выполнения эксперимента перевести переключатель  $SA1$  в положение «Выкл». Ручку потенциометра  $RP1$  установить в положение «0»;

в) по построенной вольтамперной характеристике определить основные параметры диода Шоттки: пороговое напряжение  $U_0$ , дифференциальное сопротивление  $r_d$ , обратный ток  $I_{обр}$ , прямое падение напряжение  $U_{a\max}$  при максимальном анодном токе  $I_{a\max}$ . Сравнить с параметрами выпрямительного диода.

### 5. Экспериментальное исследование стабилитрона:

а) собрать схему для исследования стабилитрона  $VD4$  на переменном токе (рис. 5). Соединить перемычкой гнезда  $X5 - X9$ . Вход  $CH2(Y)$  осциллографа подключить к шунту  $R_{ш}$  (гнездо  $X13$ ), а корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом  $X12$ . Вход  $CH1(X)$  осциллографа подключить к гнезду  $X4$ . При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение  $X/Y$ . Подать питание – переключатель  $SA1$  установить в положение «~». Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Вращать ручку потенциометра  $RP1$  до положения «5». Зарисовать ВАХ стабилитрона, определить масштабы по току и напряжению.

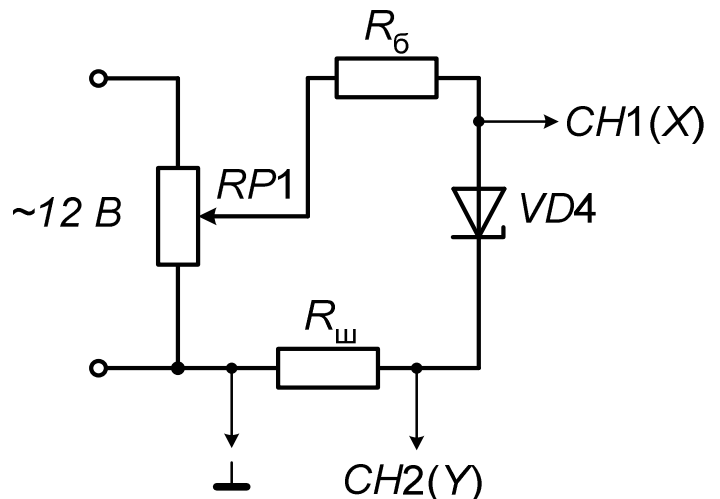


Рис. 5. Схема для исследования стабилитрона

После выполнения эксперимент перевести переключатель  $SA1$  в положение «Выкл». Ручку потенциометра  $RP1$  установить в положение «0»;

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

### 6. Экспериментальное исследование параметрического стабилизатора:

а) собрать схему параметрического стабилизатора напряжения (рис. 6). Включить вольтметры на пределе «20 В» на вход и выход стабилизатора, соответственно между гнездами  $X10 - X11$  и  $X4 - X15$ . Подать постоянное напряжение переключателем  $SA1$  (см. рис. 6, обратите внимание на полярность).

б) снять и построить зависимость выходного напряжения от напряжения источника питания  $U_{вых} = f(U_{п})$ . Для этого, изменяя потенциометром напряжение

питания  $U_{\text{п}}$  на входе стабилизатора, замерять соответствующее ему выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Определить напряжение стабилизации стабилизатора  $U_{\text{ст}}$ . Сравнить его с напряжением  $U_{\text{ст}}$ , найденным в п. 5 б.

Перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0»;

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

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{п}}}{\Delta U_{\text{вых}}}; \quad R_{\text{вых}} = r_{\text{д}}$$

### 7. Экспериментальное исследование светодиода:

а) собрать схему для исследования светодиода на постоянном токе.

Соединить перемычкой гнезда X4 – X8 (рис. 7). Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 100$ » (максимальный ток 10 мА) между гнездами X1 – X10. Для измерения анодного напряжения между гнездами X5 – X15 включить двухпредельный вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе «2 В», при больших напряжениях перейти на предел «20 В». Переключить тумблер SA1 в положение «+»;

б) снять по точкам вольтамперную характеристику светодиода на постоянном токе. Для этого, вращая ручку потенциометра RP1 до положения «5», изменять напряжение на входе, фиксируя анодный ток  $I_a$  и анодное напряжение  $U_a$  на светодиоде VD3.

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

Перевести переключатель SA1 в положение «Выкл». Ручку потенциометра RP1 установить в положение «0».

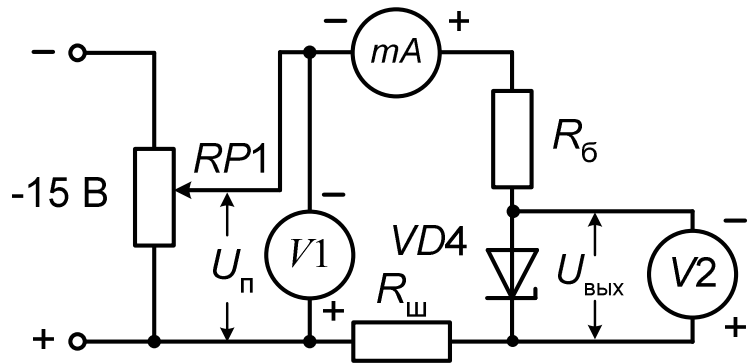


Рис. 6. Схема для исследования параметрического стабилизатора

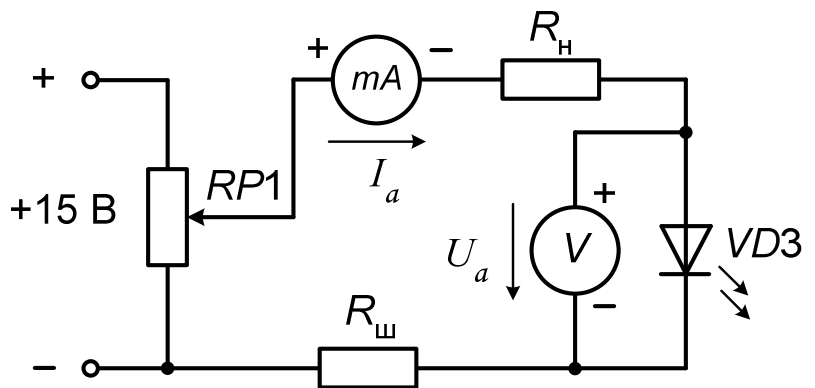


Рис. 7. Схема для исследования светодиода

## Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

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

## Контрольные вопросы

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

Таблица вариантов

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

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп.1 а, б, д; подвариант Б – пп. 1 а, в, е; подвариант В – пп. 1 а, г, ж.
2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.
3. При предварительном расчете принимать напряжение стабилизации стабилизатора  $U_{ст} = 6,8$  В,  $R_H = 150$  Ом,  $R_G = 1,1$  кОм.
4. При построении временных диаграмм диоды считать идеальными.



над тумблером. На мнемосхеме модуля изображены: биполярный транзистор  $VT1$ , потенциометр  $RP1$  для изменения напряжения, подаваемого на базу, токоограничивающий резистор  $R1$ , резистор нагрузки  $R2$ , сопротивление которого изменяется переключателем  $SA1$ . Величины сопротивлений, соответствующие положениям переключателя, приведены в табл. 1.

Таблица 1

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

Величина постоянного напряжения, подаваемого на коллектор, регулируется потенциометром  $RP2$ . Переключатель  $SA2$  предназначен для включения переменного или постоянного напряжения. Для подачи на коллектор только положительных полуволн переменного напряжения служит диод  $VD$ . Ток в этой цепи ограничивает резистор  $R3$ . Резистор  $R_G$  имитирует внутреннее сопротивление источника входного сигнала. Конденсатор  $C$  исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на положение рабочей точки покоя. Шунт  $R_{ш} = 50$  Ом служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через транзистор. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений ( $X1 - X16$ ).

### Задание и методические указания

#### 1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Биполярный транзистор» [1, с. 19–28; 2, с. 101–122] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) начертить принципиальные схемы для снятия характеристик биполярного транзистора в соответствии с заданным подвариантом;

в) используя выходные вольтамперные характеристики транзистора (рис. 2), для заданного варианта построить две линии нагрузки (для заданного  $R2$  и для  $R2 = 0$ , в последнем случае линия нагрузки параллельна оси тока  $I_k$ ). В соответствии с точками пересечений нагрузочных линий и выходных характеристик построить две характеристики прямой передачи по току  $I_k = f(I_{\bar{c}})$  при  $R2 = 0$  и при заданном  $R2$ . Определить область линейного усиления;

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

д) по заданным временным диаграммам переменной составляющей тока базы  $i_{\bar{c}}(t)$  (см. рис. 2) построить временные диаграммы тока коллектора  $i_k(t)$  и напряжения  $u_k(t)$ . Для классов А и В определить максимальную амплитуду неискаженного синусоидального выходного сигнала, а для класса D максимальную амплитуду прямоугольных выходных импульсов.

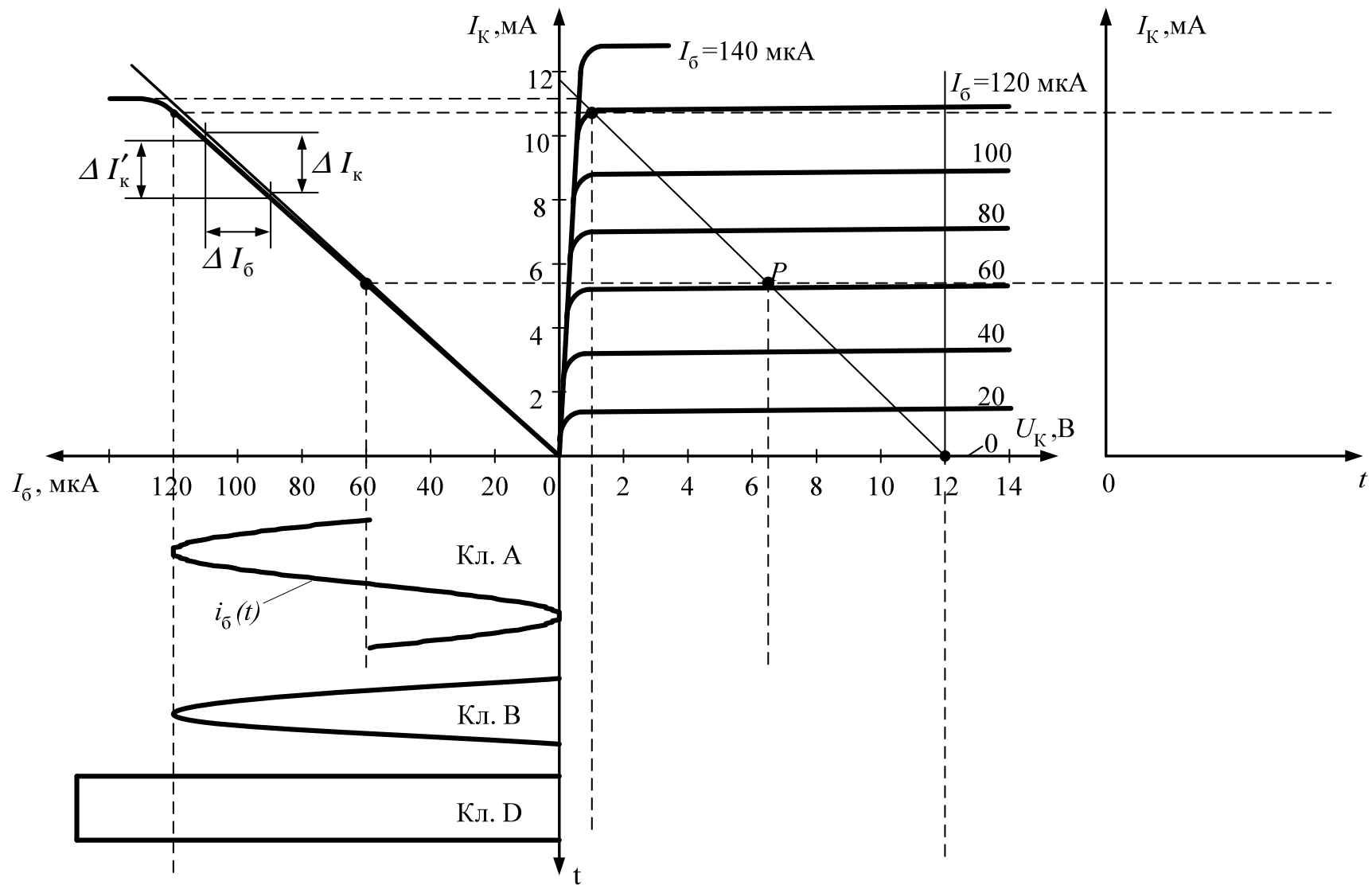


Рис. 2. Нагрузочная диаграмма для усилительного каскада на биполярном транзисторе



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

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

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

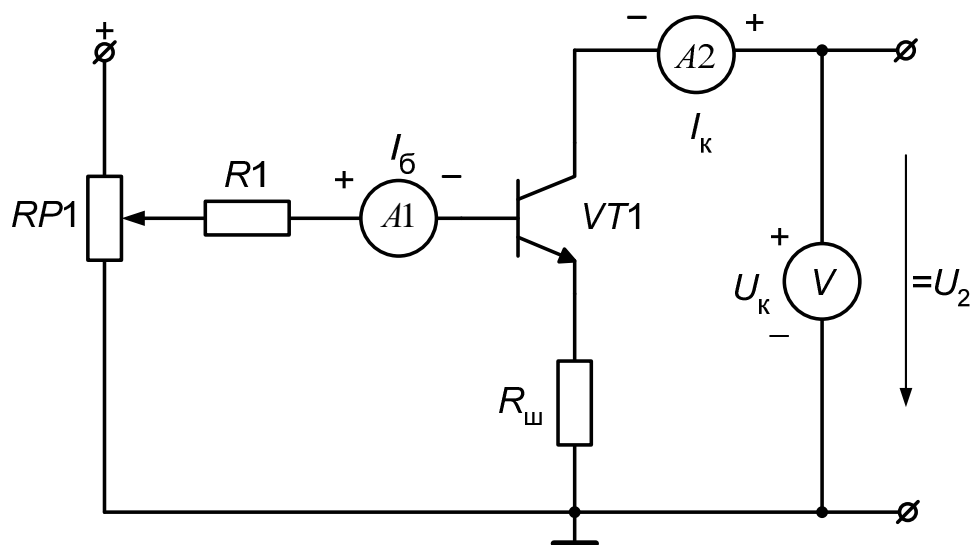


Рис. 3. Схема для снятия характеристик биполярного транзистора

б) снять статическую характеристику прямой передачи по току  $I_k = f(I_б)$  при  $U_k$  равном заданному значению  $U_2$  и  $R2 = 0$ , используя схему на рис. 3. Включить тумблер «Питание». Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на нагрузочную диаграмму транзистора, построенную при предварительной подготовке (см. рис. 2). Изменяя ток базы от нуля до максимального значения при помощи потенциометра RP1, снять статическую характеристику прямой передачи по току. Если показания миллиамперметров A1 и A2 выйдут за допустимые значения на установленных пределах, переключите измеряемые приборы на более высокий предел. Выключить тумблер «Питание»;

в) снять характеристику прямой передачи по току при наличии нагрузки R2. Схема для снятия характеристики представлена на рис. 4. При подготовке эксперимента необходимо убрать перемычку между гнездами X1 – X3, ручку потенциометра RP1 установить на «0». С помощью переключателя SA1 установите заданное значение резистора R2. Включить тумблер «Питание». При помощи потенциометра RP2 установить заданное значение  $U_2$ . В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. Изменяя ток базы от нуля до максимального значения при

помощи потенциометра  $RP1$ , снять нагрузочную характеристику прямой передачи по току. Вблизи перехода в область насыщения точки снимать чаще. Выключить тумблер «Питание»;

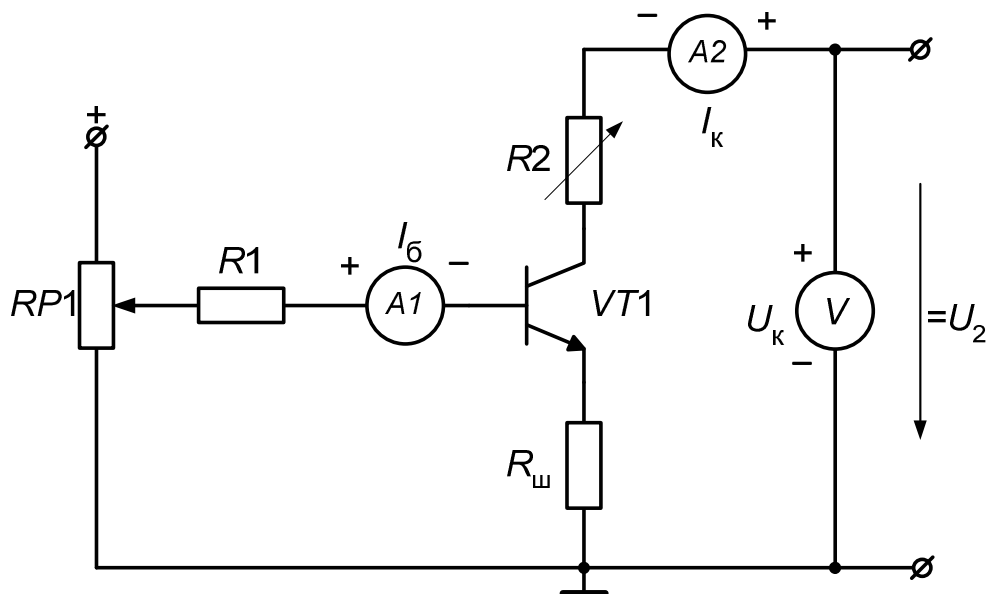


Рис. 4. Схема для снятия нагрузочной характеристики прямой передачи по току

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

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

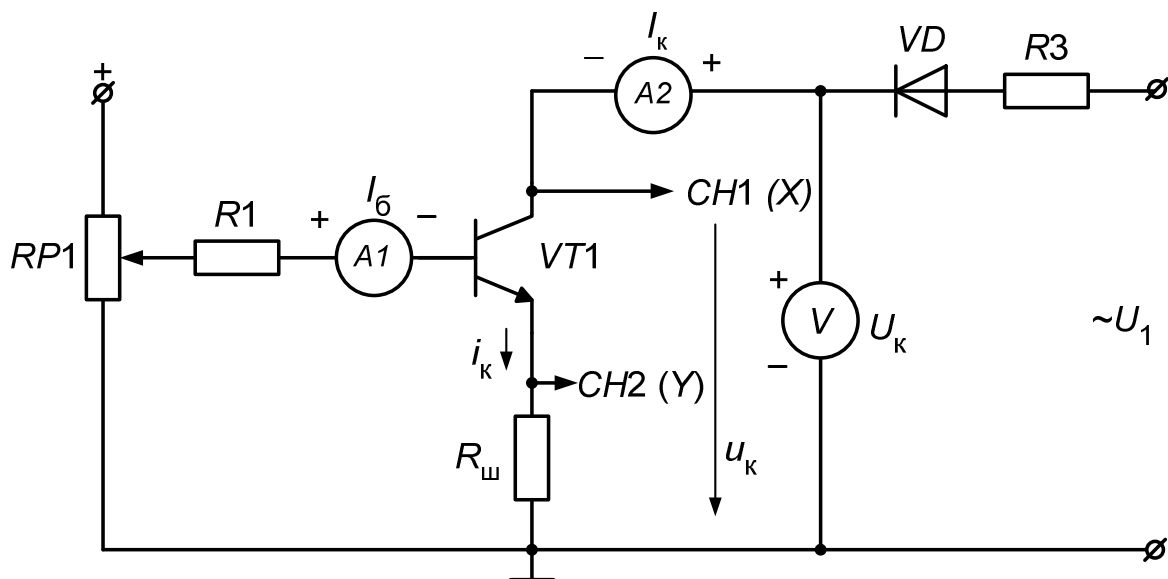


Рис. 5. Схема для снятия выходных статических ВАХ при помощи осциллографа

При подготовке эксперимента необходимо переключить тумблер SA2 в верхнее положение тем самым подключить к схеме источник полуволн напряжения. Соединить перемычкой гнезда X1 – X3. Подключить входы осциллографа к соответствующим точкам схемы: вход канала CH1 (X) – к гнезду X3, канала CH2 (Y) – к гнезду X14, корпус осциллографа ( $\perp$ ) – к гнезду X15. Перевести переключатель развертки осциллографа в положение X/Y. Установить луч на экране осциллографа в левом нижнем углу. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение. Включить питание модуля. Изменять ток базы от нуля до максимального значения, пронаблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений тока базы:  $I_{б1} = 0$ ,  $I_{б2} = 0,5 \cdot I_{б.max}$  и  $I_{б3} = I_{б.max}$ . Записать масштабы по напряжению и току. Выключить питание модуля.

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

а) собрать схему для исследования усилительного каскада (рис. 6). Для этого необходимо разомкнуть гнезда X1 – X3. К гнезду X13 подключить напряжение с выхода функционального генератора, соединив землю генератора ( $\perp$ ) с гнездом X16. Соединить перемычкой гнезда X9 – X10. Переключить тумблер SA2 в нижнее положение, тем самым, подключив к схеме источник постоянного напряжения  $U_2$ . Подключить канал CH1 осциллографа к входу усилителя (гнезду X9), а канал CH2 к выходу усилителя (гнезду X3 – X15). Переключить осциллограф в режим временной развертки. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал с частотой  $f$  в соответствии с таблицей вариантов; уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды. Переключить вход CH1 осциллографа в

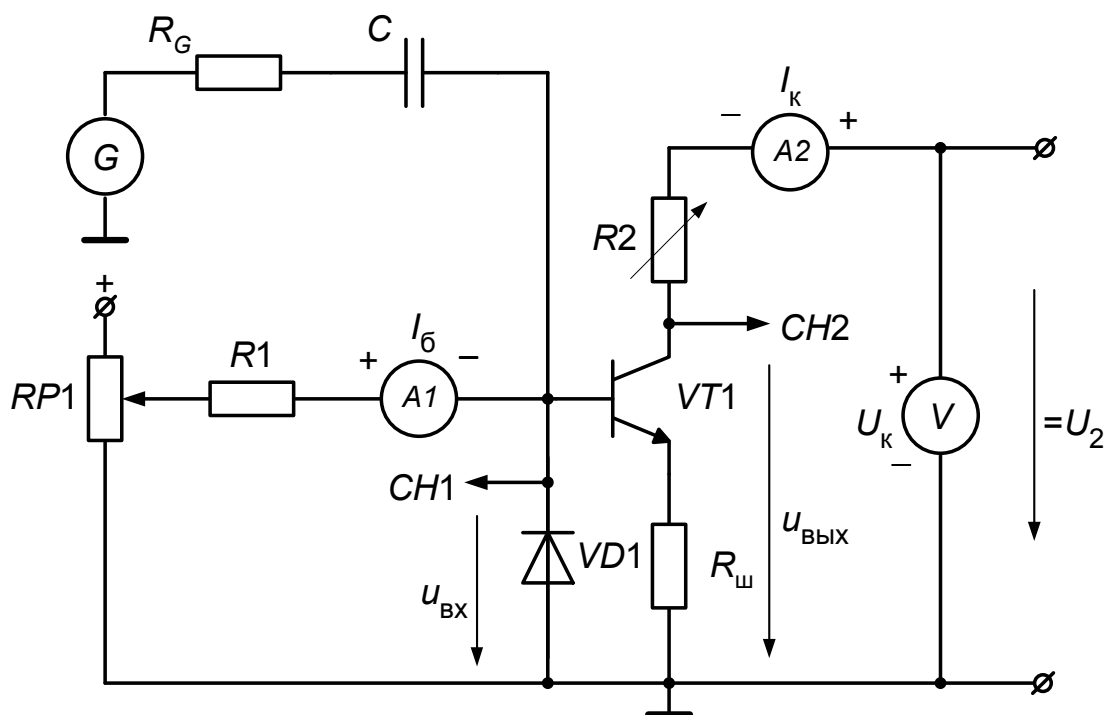


Рис. 6. Схема для исследования усилительного каскада

положение вход закорочен «GND». Включить питание стенда. При токе  $I_{\text{б}} = 0$  с помощью потенциометра  $RP2$  (см. рис. 1) установить заданное значение  $U_2$  и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра  $RP2$ ). Диод  $VD1$  (см. рис. 6) не показан на мнемосхеме модуля (см. рис. 1), он предназначен для защиты базо-эмиттерного перехода транзистора от напряжения отрицательной полярности;

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

в) определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения  $U_{\text{вых.м}}$  и уточнить положение рабочей точки покоя. Для этого установите постоянный ток базы равным  $I_{\text{бр}}$  и определите значения тока  $I_{\text{кр}}$  и напряжения  $U_{\text{кр}}$  (с помощью осциллографа). Плавно увеличивайте переменный входной сигнал ручкой регулятора амплитуды «Функционального генератора» до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратите внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости уточните положение рабочей точки покоя. По осциллографу определите максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения  $U_{\text{вых.м}}$ .

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

г) исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Для этого установите вновь рабочую точку  $I_{\text{бр}}$ ,  $I_{\text{кр}}$ ,  $U_{\text{кр}}$  и максимальную амплитуду синусоидального неискаженного выходного напряжения  $U_{\text{вых.м}}$ . Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей тока базы  $I'_{\text{б}} = 0,5 \cdot I_{\text{бр}}$  и  $I''_{\text{б}} = 1,5 \cdot I_{\text{бр}}$ , при этом переменный входной сигнал изменять не следует;

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

е) определить амплитуду выходного напряжения (полуволны) в классе В. Для этого с помощью потенциометра  $RP1$  установить  $I_6 = 0$  и, регулируя амплитуду входного сигнала, добиться максимальной неуплощенной полуволны синусоидального выходного напряжения; зарисовать и обработать осциллограмму. Если длительность полуволны меньше полупериода, повысьте потенциометром  $RP1$  постоянный ток  $I_6$  и, изменяя переменный входной сигнал, добейтесь воспроизведения усилителем примерно половины неискаженного синусоидального напряжения с максимальной амплитудой. Уменьшите входной сигнал (подаваемый от модуля «Функциональный генератор») до нуля и запишите ток  $I_6$ , который пришлось установить в рабочей точке покоя, чтобы не было искажений. Эта рабочая точка покоя соответствует классу АВ;

ж) исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите  $I_6 = 0$  и увеличьте входное синусоидальное напряжение регулятором амплитуды «Функционального генератора» до перехода транзистора в ключевой режим. Зарисуйте и обработайте осциллограмму выходного напряжения;

з) определите ток коллектора и напряжение на коллекторе на постоянном токе в двух точках: отсечки и насыщения. Для этого установите амплитуду входного синусоидального сигнала равной нулю. Для измерения напряжения на коллекторе переключите вольтметр, подключенный между гнездами X4 – X16, к гнездам X3 – X16. При помощи потенциометра  $RP1$  установите ток базы  $I_6 = 0$ , замерьте ток  $I_{ко}$  и напряжение  $U_{ко}$ , соответствующие точке отсечки транзистора. Для измерения тока коллектора и напряжения на коллекторе, соответствующие точке насыщения, установите потенциометр  $RP1$  в крайне правое положение и по приборам определите ток  $I_{кн}$  и напряжение  $U_{кн}$ . Выключите питание модуля.

*Внимание.* С целью получения достоверного результата при измерении напряжения на коллекторе транзистора рекомендуется использовать вольтметр с высоким входным сопротивлением из модуля «Мультиметры».

### Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов (заданного подварианта) в соответствии с мнемосхемой на рис. 1;
- в) результаты экспериментальных исследований: таблицы, экспериментально снятые и построенные характеристики, обработанные осциллограммы;
- г) при оформлении отчета определить и рассчитать:
  - коэффициент передачи транзистора по току  $\beta = \Delta I_k / \Delta I_6$  и коэффициент усиления каскада по току  $k_i = \Delta I'_k / \Delta I_6$ , используя экспериментальную статическую и нагрузочную характеристики прямой передачи по току. Расчет проводить вблизи рабочей точки покоя в классе А (см. рис. 2);

- дифференциальное сопротивление транзистора  $r_d = \Delta U_k / \Delta I_k$  при  $I_{\sigma} = \text{const}$  с использованием выходных статических ВАХ транзистора;
- рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ( $P_{кр} = U_{кр} \cdot I_{кр}$ ), в режиме насыщения ( $P_{кн} = U_{кн} \cdot I_{кн}$ ) и отсечки ( $P_{ко} = U_{ко} \cdot I_{ко}$ ) для класса D, а также средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ( $P_{к.ср} = (P_{кн} + P_{ко}) / 2$ ), воспользовавшись экспериментальными данными;
- д) сделать выводы по работе:
  - о результатах сравнения расчетных и экспериментальных значений неискаженного напряжения;
  - о причинах расхождения экспериментальных и расчетных характеристик в пп. 1 в, г; 2 б, в, д; 3 б, в;
  - охарактеризовать влияние выбора рабочей точки покоя на форму выходного напряжения (п. 3 г);
  - сравнить потери в классе А и в ключевом режиме. Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены при работе.

#### *Контрольные вопросы*

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

Таблица вариантов

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

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б, в, г, д (б – схему для снятия нагрузочной характеристики прямой передачи по току; г, д – для класса А); подвариант Б – пп. 1 а, б, в, г, д (б – схему для снятия выходных статических ВАХ при помощи осциллографа; г, д – для класса В); подвариант В – пп. 1 а, б, в, г, д (б – схему для исследования усилительного каскада; г, д – для класса D).

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 3  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА  
И ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

*Цель работы*

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

*Описание лабораторной установки*

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

Лицевая панель модуля «Транзисторы» представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. Тумблер «Питание» предназначен для включения модуля «Транзисторы». О включенном состоянии модуля указывает световой индикатор, расположенный над тумблером. На мнемосхеме модуля изображены: полевой транзистор VT2 с

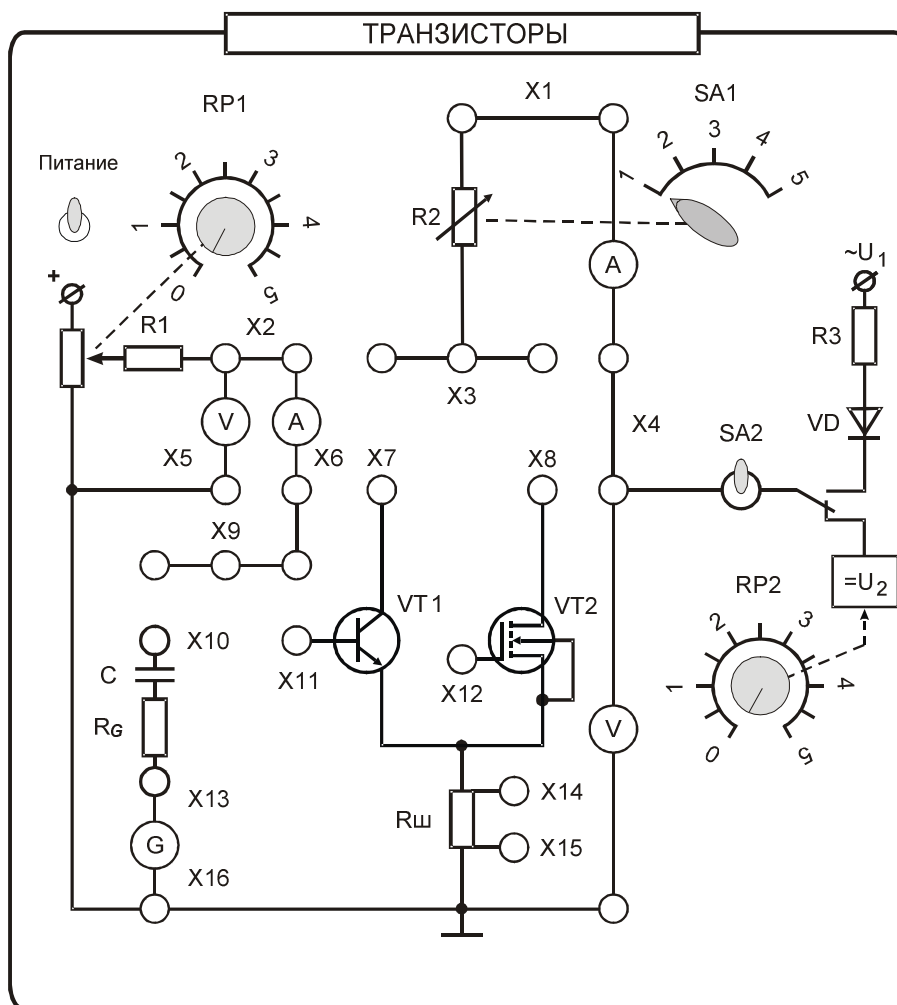


Рис. 1. Лицевая панель модуля «Транзисторы»



изолированным затвором и индуцированным каналом n-типа, потенциометр  $RP1$  для изменения напряжения, подаваемого на затвор, токоограничивающий резистор  $R1$ , не оказывающий практически никакого влияния на работу полевого транзистора, резистор нагрузки  $R2$ , сопротивление которого изменяется переключателем  $SA1$ . Величины сопротивлений, соответствующие положениям переключателя, приведены в табл. 1.

Таблица 1

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

Величина постоянного напряжения, подаваемого на сток транзистора, регулируется потенциометром  $RP2$ . Переключатель  $SA2$  предназначен для включения переменного или постоянного напряжения. Для подачи на сток только положительных полуволн переменного напряжения служит диод  $VD$ . Ток в этой цепи ограничивает резистор  $R3$ . Резистор  $R_G$  имитирует внутреннее сопротивление источника входного сигнала. Конденсатор  $C$  исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на положение рабочей точки покоя. Шунт  $R_{ш} = 50$  Ом служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через транзистор. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений ( $X1 - X16$ ).

### Задание и методические указания

#### 1. Предварительное домашнее задание:

- а) изучить тему курса «Полевой транзистор» [1, с. 28–31; 2, с. 134–153] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;
- б) начертить принципиальные схемы для снятия характеристик полевого транзистора в соответствии с заданным подвариантом;
- в) используя выходные вольтамперные характеристики транзистора (рис. 2), для заданного варианта построить две линии нагрузки (для заданного  $R2$  и для  $R2 = 0$ , в последнем случае линия нагрузки параллельна оси тока стока  $I_c$ ). В соответствии с точками пересечений нагрузочных линий и выходных характеристик построить две стокзатворные характеристики  $I_c = f(U_{зс})$  при  $R2 = 0$  и при заданном  $R2$ . Определить область линейного усиления;
- г) выбрать рабочую точку покоя для классов А, В, D; по характеристикам определить токи  $I_{ср}$ ,  $U_{зр}$  и напряжение  $U_{ср}$  в рабочей точке покоя;
- д) по заданным временным диаграммам переменной составляющей напряжения на затворе  $u_з(t)$  (см. рис. 2) построить временные диаграммы тока стока  $i_c(t)$  и напряжения на стоке  $u_c(t)$ . Для классов А и В определить максимальную амплитуду неискаженного синусоидального выходного сигнала, а для класса D максимальную амплитуду прямоугольных выходных импульсов.

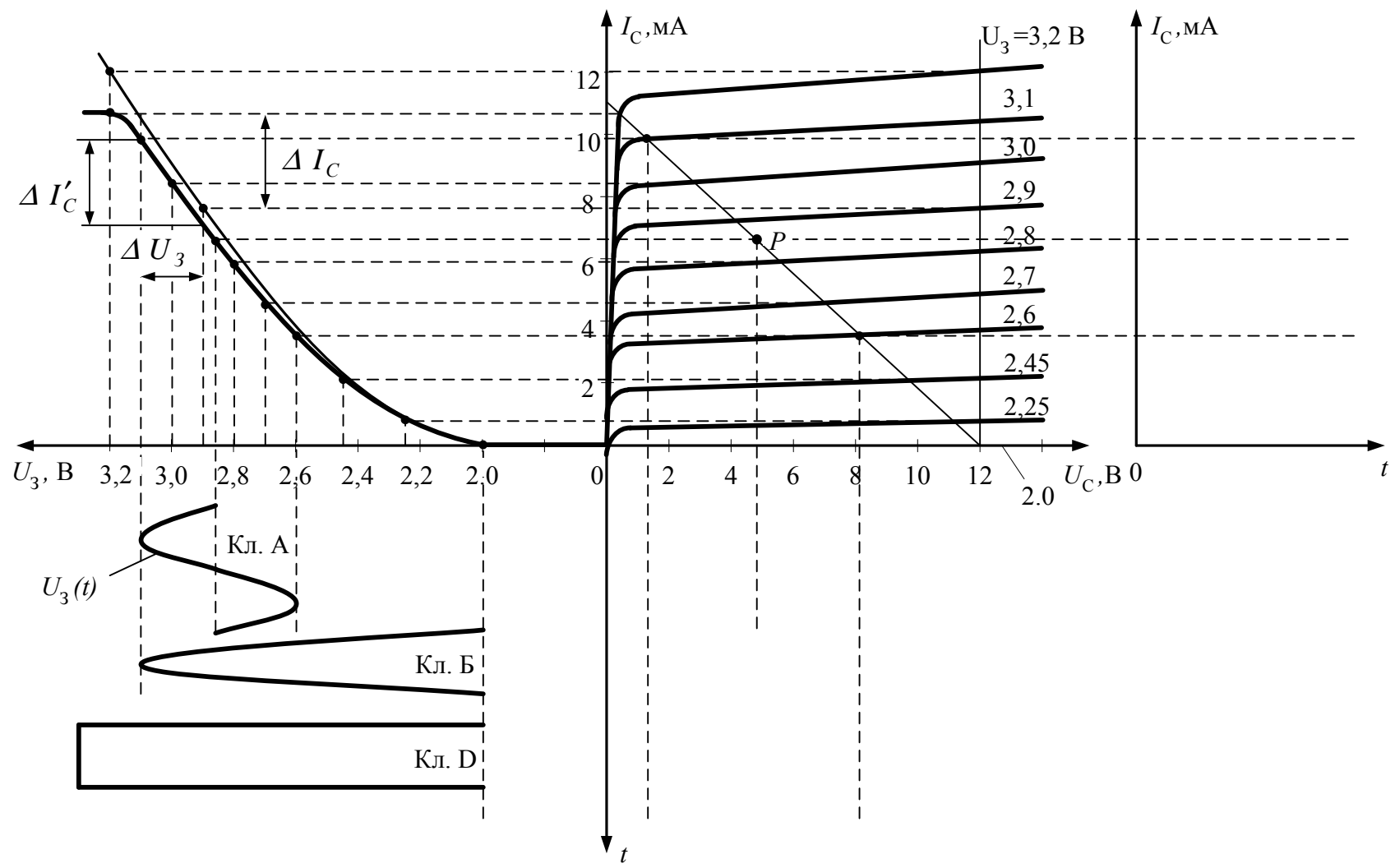


Рис. 2. Нагрузочная диаграмма для усилительного каскада на полевом транзисторе

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

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

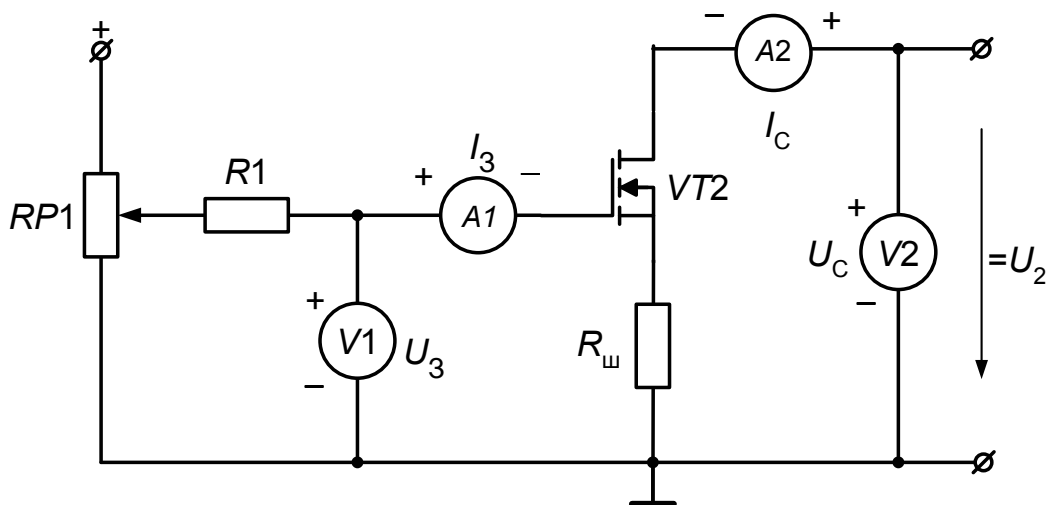


Рис. 3. Схема для снятия характеристик полевого транзистора

Для этого между гнездами X2 – X6 включить многопредельный миллиамперметр A1 (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 1$ » (100 мкА) и соединить перемычкой гнезда X9 – X12. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение. Между гнездами X1 – X4 включить второй миллиамперметр A2 (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 100$ » (10 мА). Соединить перемычкой гнезда X3 – X8. Включить вольтметры V1, V2 («Модуль мультиметров») на пределе « $\approx 20$  В» между гнездами X2 – X5 и X4 – X16. Тумблер SA2 установить в нижнее положение. Между гнездами X1 – X3 поставить перемычку;

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

в) снять стокзатворную характеристику при наличии нагрузки R2. Схема для снятия характеристики представлена на рис. 4.

При подготовке эксперимента необходимо убрать перемычку между гнездами X1 – X3. Ручку потенциометра RP1 установить на «0». С помощью переключателя SA1 установите заданное значение резистора R2, а при помощи потенциометра RP2 – заданное значение  $U_2$ . В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. Изменяя напряжение на затворе от нуля до максимального значения при помощи потенциометра RP1, снять стокзатворную характеристику при наличии нагрузки.

На начальном участке характеристики и вблизи перехода в область насыщения точки снимать чаще. Выключить тумблер «Питание»;

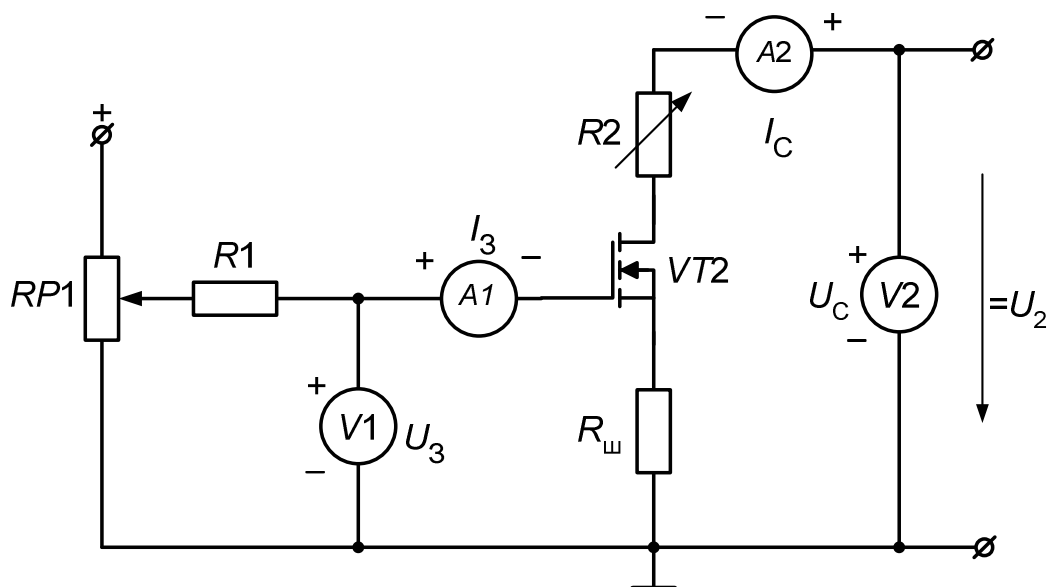


Рис. 4. Схема для снятия стокзатворной характеристики при наличии нагрузки

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

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа, используя схему на рис. 5. При подготовке эксперимента необходимо переключить тумблер SA2 в верхнее положение тем самым подключить к схеме источник полуволн напряжения. Соединить перемычкой гнезда X1 – X3. Подключить входы осциллографа к соответствующим точкам схемы: вход канала CH1 (X) – к гнезду X3, канала CH2 (Y) – к гнезду X14, корпус осциллографа ( $\perp$ ) – к гнезду X15. Перевести

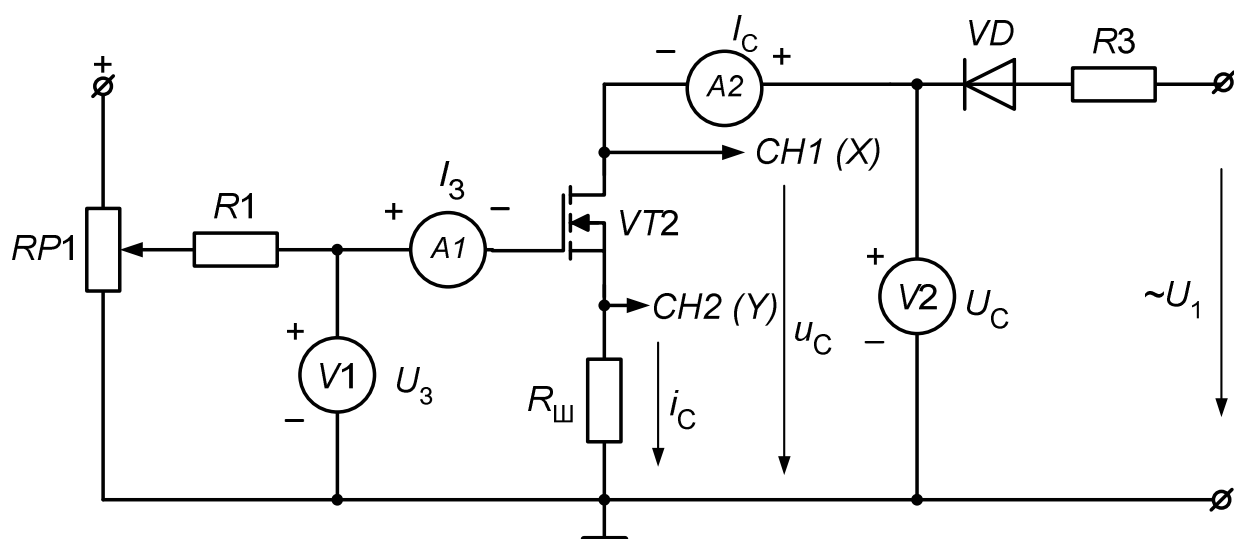


Рис. 5. Схема для снятия выходных статических ВАХ при помощи осциллографа

переключатель развертки осциллографа в положение  $X/Y$ . Установить луч на экране осциллографа в левом нижнем углу. Установить потенциометр  $RP1$  в крайнее левое положение. Включить питание модуля. Изменяя напряжение на затворе от нуля до максимального значения, пронаблюдать семейство выходных характеристик. Зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений напряжения на затворе:  $U_{з(1)} = 2 \text{ В}$ ,  $U_{з(2)} = 0,5 \cdot (U_{з(1)} + U_{з.макс})$  и  $U_{з(3)} = U_{з.макс}$ .

Записать масштабы по напряжению и току. Выключить питание модуля.

3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком (ОИ):

а) собрать схему для исследования усилительного каскада (рис. 6). Для этого необходимо разомкнуть гнезда  $X1 - X3$ . К гнезду  $X13$  подключить напряжение с выхода функционального генератора, соединив землю генератора ( $\perp$ ) с гнездом  $X16$ . Соединить перемычкой гнезда  $X9 - X10$ . Переключить тумблер  $SA2$  в нижнее положение, тем самым, подключив к схеме источник постоянного напряжения  $U_2$ . Подключить канал  $CH1$  осциллографа к входу усилителя (гнездо  $X9$ ), а канал  $CH2$  к выходу усилителя (гнезда  $X3 - X15$ ). Переключить осциллограф в режим временной развертки. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал с частотой  $f$  в соответствии с таблицей вариантов; уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды. Переключить вход  $CH1$  осциллографа в положение вход закорочен « $GND$ ». Включить питание стенда. При напряжении  $U_3 = 0$  установить с помощью потенциометра  $RP2$  (см. рис. 1) заданное значение « $=U_2$ » и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра  $RP2$ );

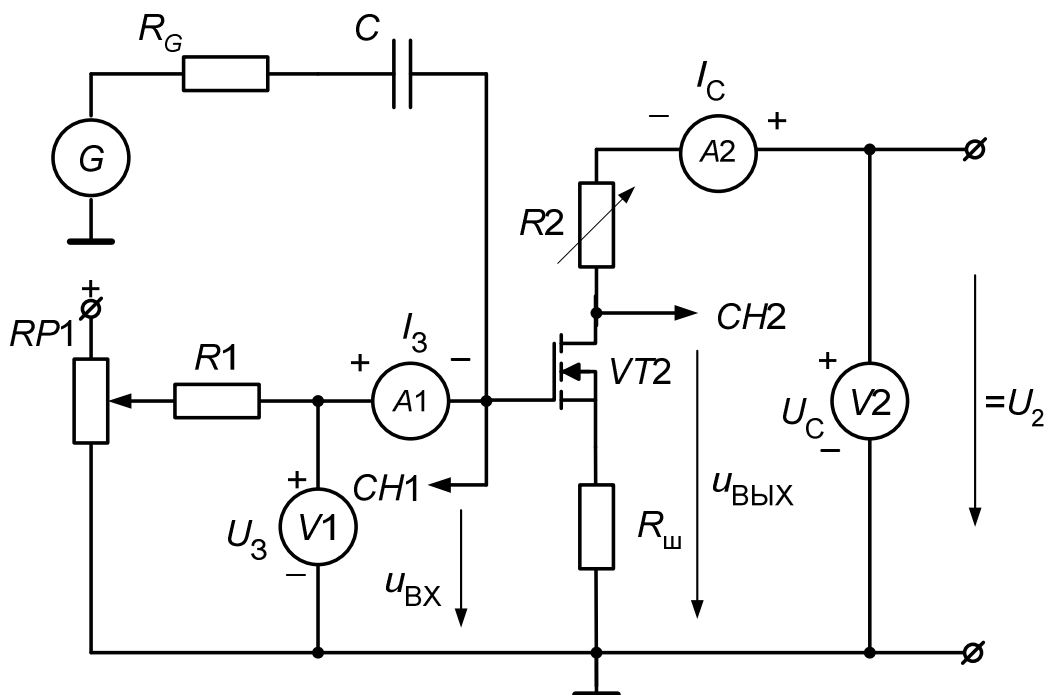


Рис. 6. Схема для исследования усилительного каскада

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

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

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

г) исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Для этого установите вновь рабочую точку покоя для класса А  $U_{зр}$ ,  $I_{ср}$ ,  $U_{ср}$  и максимальную амплитуду синусоидального неискаженного выходного напряжения  $U_{вых.м}$ . Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей напряжения на затворе  $U'_3 = 0,5 \cdot (U_{з(1)} + U_{зр})$  и  $U''_3 = 0,6 \cdot (U_{з(1)} + U_{зр})$ , при этом переменный входной сигнал изменять не следует;

д) определить коэффициент усиления каскада по напряжению  $k_u$  в классе А. Для этого установить  $U_3 = U_{зр}$ , раскоротить вход СН1 осциллографа, переключив его на открытый вход «АС». Изменяя переменный входной сигнал, добиться синусоидального по форме максимального выходного сигнала. Измерить с помощью осциллографа амплитуду выходного  $U_{вых.м}$  и входного  $U_{вх.м}$  сигналов, учесть масштабы осциллографа по обоим каналам. Определить коэффициент усиления усилителя  $k_u = U_{вых.м} / U_{вх.м}$ ;

е) определить амплитуду выходного напряжения (полуволны) в классе В. Для этого с помощью потенциометра  $RP1$  установить  $U_3 = 2$  В и, регулируя амплитуду входного сигнала, добиться максимальной неуплощенной полуволны синусоидального выходного напряжения, зарисовать и обработать осциллограмму. Если длительность полуволны меньше полупериода, повысьте потенциометром  $RP1$  постоянное напряжение  $U_3$  и, изменяя переменный входной сигнал, добейтесь воспроизведения усилителем ровно половины неискаженного синусоидального

напряжения с максимальной амплитудой. Уменьшите входной сигнал до нуля и запишите напряжение  $U_3$ , которое пришлось установить в рабочей точке покоя, чтобы не было искажений. Эта рабочая точка покоя соответствует классу АВ;

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

з) определите ток стока и напряжение стока на постоянном токе в двух точках: отсечки и насыщения. Для этого установите амплитуду входного синусоидального сигнала равным нулю, переключите вольтметр, подключенный между гнездами X4 – X16, к гнезду X3 – X16. При помощи потенциометра RP1 установите напряжение на затворе  $U_3 = 2 В$ , замерьте ток  $I_{co}$  и напряжение на стоке  $U_{co}$ , соответствующие точке отсечки транзистора. Для измерения тока стока и напряжения на стоке, соответствующие точки насыщения, установите потенциометр RP1 в крайнее правое положение, по приборам определите ток  $I_{сн}$  и напряжение  $U_{сн}$ . Выключить питание модуля.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

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

- охарактеризовать влияние выбора рабочей точки покоя на форму выходного напряжения (п. 3 г);
- сравнить потери в классе А и в ключевом режиме. Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены.

### *Контрольные вопросы*

1. Каков принцип действия полевого транзистора с изолированным затвором?
2. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к полемому транзистору с изолированным затвором и каналом  $n$ -типа, в усилительном каскаде с общим истоком?
3. Как выглядят выходные и стокзатворные статические характеристики в схеме с общим истоком?
4. Что такое статическая стокзатворная характеристика? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
5. Можно ли в лабораторной работе снять стокзатворную характеристику полевого транзистора при помощи осциллографа?
6. Как определить крутизну стокзатворной характеристики?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Как построить линию нагрузки?
9. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, АВ, В, D?
10. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим истоком.
11. Каково назначение элементов усилителя?
12. Как определить коэффициент усиления каскада по напряжению (графически и экспериментально)?
13. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
14. Что такое ключевой режим?
15. Каковы преимущества ключевого режима?
16. Как определить ток стока и напряжение на стоке транзистора в точках отсечки и насыщения на постоянном токе?



Таблица вариантов

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

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б, в, г, д (б – схему для снятия стокозатворной характеристики при наличии нагрузки; г, д – для класса А); подвариант Б – пп. 1 а, б, в, г, д (б – схему для снятия выходных статических ВАХ при помощи осциллографа; г, д – для класса В); подвариант В – пп. 1 а, б, в, г, д (б – схему для исследования усилительного каскада; г, д – для класса D).

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 4  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ, СИМИСТОРОВ, ЗАПИРАЕМЫХ  
 ТИРИСТОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
 ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

*Цель работы*

Изучение характеристик и параметров тиристоров – обычных (асимметричных), симметричных и запираемых. Ознакомление с применением этих приборов в качестве управляемых выпрямителей и преобразователей переменного напряжения.

*Описание лабораторной установки*

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

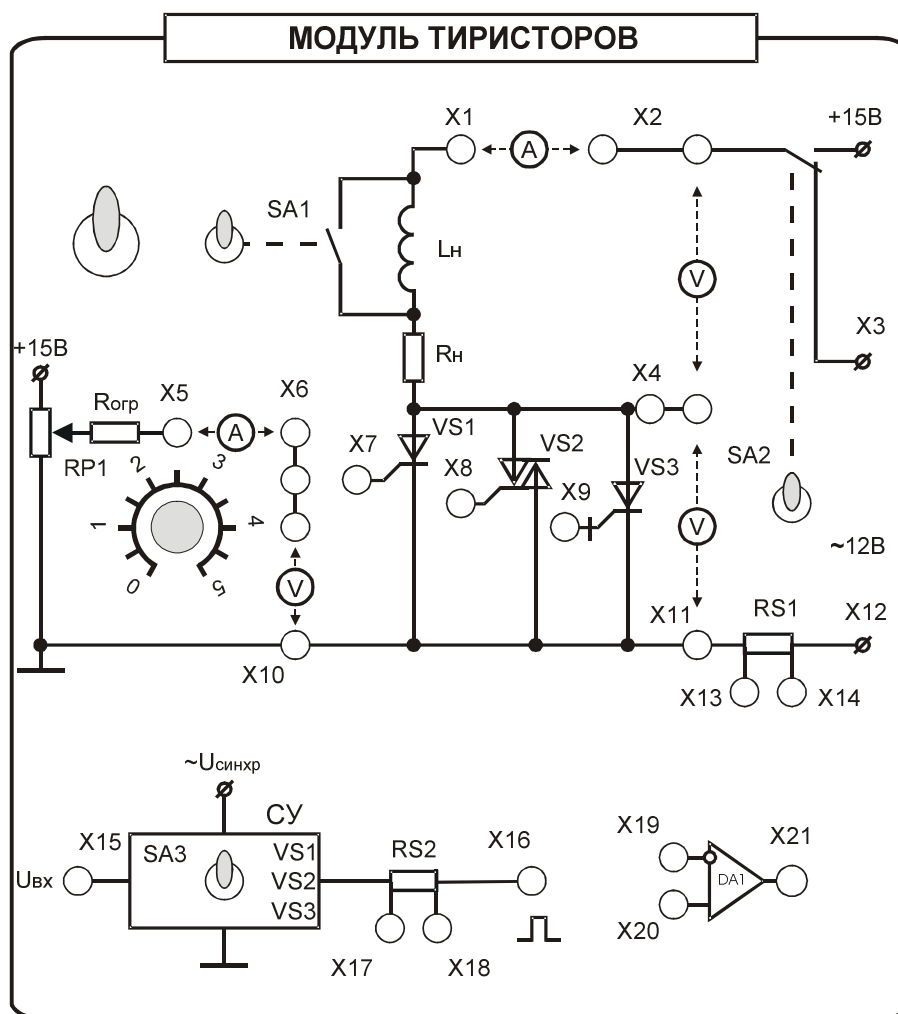


Рис. 1. Лицевая панель модуля «Тиристоры»

Лицевая панель модуля тиристоров представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: тиристор  $VS1$ , симметричный тиристор (симистор)  $VS2$ , запираемый тиристор  $VS3$ , активное и индуктивное сопротивления нагрузки ( $R_H = 150 \text{ Ом}$  и  $L_H = 70 \text{ мГн}$ ). Потенциометр  $RP1$  служит для изменения напряжения в цепи управления. Ток управления тиристором ограничен резистором  $R_{огр} = 8,2 \text{ кОм}$ . Система управления (СУ) формирует управляющие импульсы, сдвигаемые по фазе при изменении входного управляющего напряжения  $U_{ВХ} = 0 \dots 15 \text{ В}$ . Шунт  $RS1 = 10 \text{ Ом}$  служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через тиристор, а  $RS2 = 10 \text{ Ом}$  для осциллографирования тока управления. Усилитель  $DA1$  позволяет усиливать сигнал тока, снимаемый с шунта  $RS1$ . Также на передней панели размещены гнезда для осуществления внешних соединений  $X1 - X21$ , переключатель вида нагрузки  $SA1$  (активной – положение вверх или активно-индуктивной – положение вниз) и переключатель каналов подачи управляющих импульсов на соответствующие тиристоры  $SA$ .

3. Переключатель  $SA2$  подает на схему либо постоянное (+15 В), либо переменное (~12 В) напряжение.

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

### Задание и методические указания

#### 1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса «Тиристоры» [1, с. 37–48; 2, с. 127–134] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) начертить принципиальные схемы для выполнения экспериментов в соответствии с заданным подвариантом;

в) начертить диаграмму управления тиристора в соответствии с рис. 2. Для заданных по варианту  $E_y$  и  $R_{огр}$  построить линию нагрузки, проверить, находится ли она в разрешенной области. Определить, в каких пределах можно изменять  $R_{огр}$  при заданном по варианту  $E_y$ ;

г) построить в масштабе временные диаграммы переменного синусоидального напряжения  $u = \sim 12 \text{ В}$ , выпрямленного напряжения (или напряжения на нагруз-

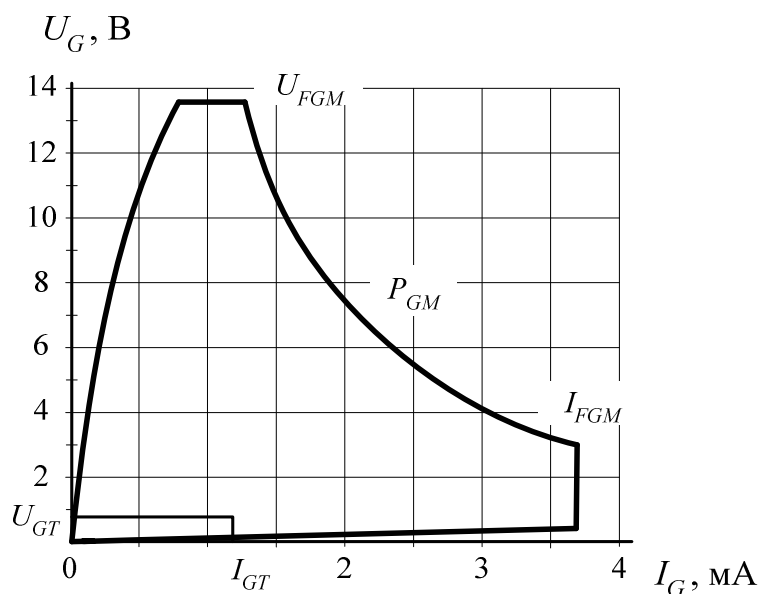


Рис. 2. Диаграмма управления тиристора

ке)  $u_n$ , анодного тока  $i_a$  и напряжения на вентиле  $u_a$  для заданных углов управления  $\alpha$ ; диаграммы построить для управляемого выпрямителя на обычном и запираемом тиристоре, а также для преобразователя переменного напряжения на симисторе.

## 2. Экспериментальное исследование тиристора:

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

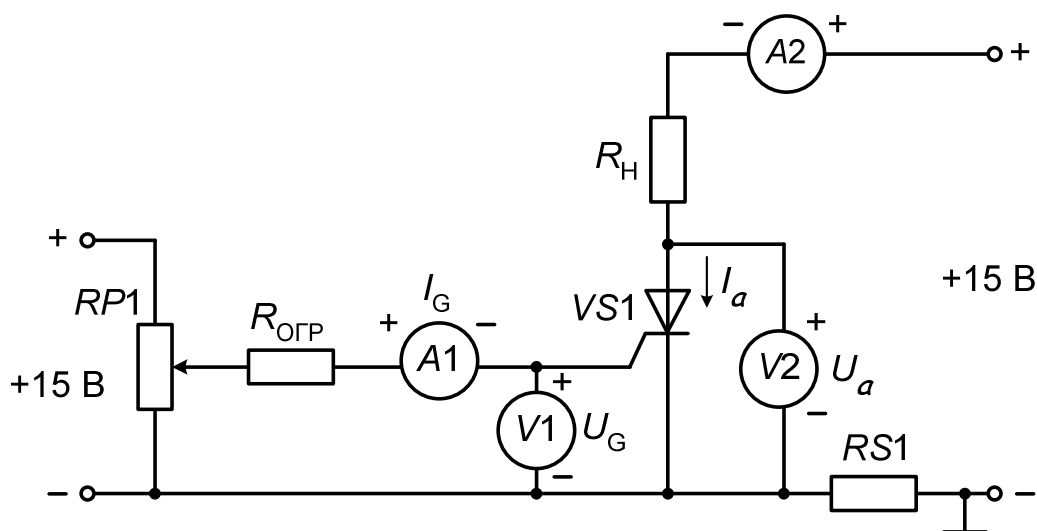


Рис. 3. Схема для исследования тиристора на постоянном токе

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

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

Выключить питание модуля;

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

д) собрать схему для исследования тиристора на переменном токе для получения анодной ВАХ тиристора на экране осциллографа (рис. 4). Для этого переключить тумблер SA2 в нижнее положение. Подключить входы осциллографа к соответствующим точкам схемы: вход канала CH1 (X) – к гнезду X4 (анодное напряжение тиристора  $u_a$ ), канал CH2 (Y) – к гнезду X13 (анодной ток  $i_a$ ), а корпус осциллографа ( $\perp$ ) присоединить к гнезду X14. Перевести переключатель развертки осциллографа в положение X/Y. Зарисовать ВАХ тиристора при двух значениях тока управления  $I_G$ , определить масштабы по току и напряжению. Выключить питание модуля;

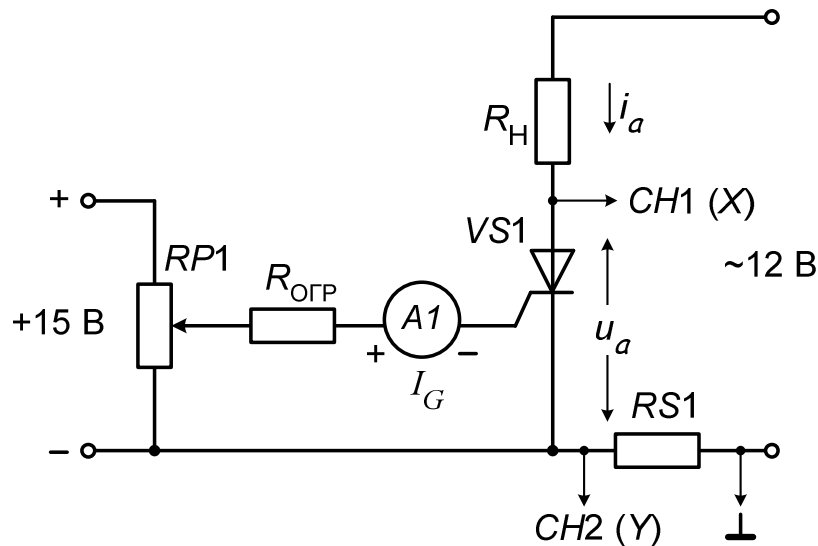


Рис. 4. Схема для исследования тиристора на переменном токе

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

### 3. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на тиристоре:

а) используя схему, приведенную на рис. 4, оценить качество регулирования угла управления  $\alpha$  за счет изменения постоянного тока управления  $I_G$ . Для этого подключить вход CH2 осциллографа к гнезду X4, а корпус ( $\perp$ ) – к гнезду X11 (напряжение на тиристоре  $u_a$ ). Переключатель развертки осциллографа перевести на временную развертку. Установить синхронизацию от сети. Переключить тумблер SA1 в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки  $L_H$ . Включить питание модуля, попробовать регулировать угол управления  $\alpha$ , изменяя ток управляющего электрода  $I_G$ . Определить максимальный угол управления согласно выражению

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{дел.}}}{T_{\text{дел.}}} 360, \text{ град.} \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  – угол управления тиристора (град);

$\alpha_{\text{дел.}}$  – угол управления на экране в делениях;

$T_{\text{дел.}}$  – длительность периода на экране в делениях.

Оценить качество регулирования угла управления за счет изменения тока управления. Выключить питание модуля;

б) исследование однополупериодного выпрямителя с импульсно-фазовым управлением. Для этого на управляющий электрод подать импульсы от системы управления (СУ), соединив перемычками гнезда X6 – X15 и X7 – X16 (рис. 5). Тумблер SA3 установить в верхнее положение соответствующее «VS1». Подключить вольтметр на пределе «=20 В» между гнездами X2 – X4 (напряжение на нагрузке) и канал осциллографа CH2 – к гнезду X4, а корпус ( $\perp$ ) – к гнезду X11 (напряжение на тиристоре  $u_a$ ). Включить питание модуля;

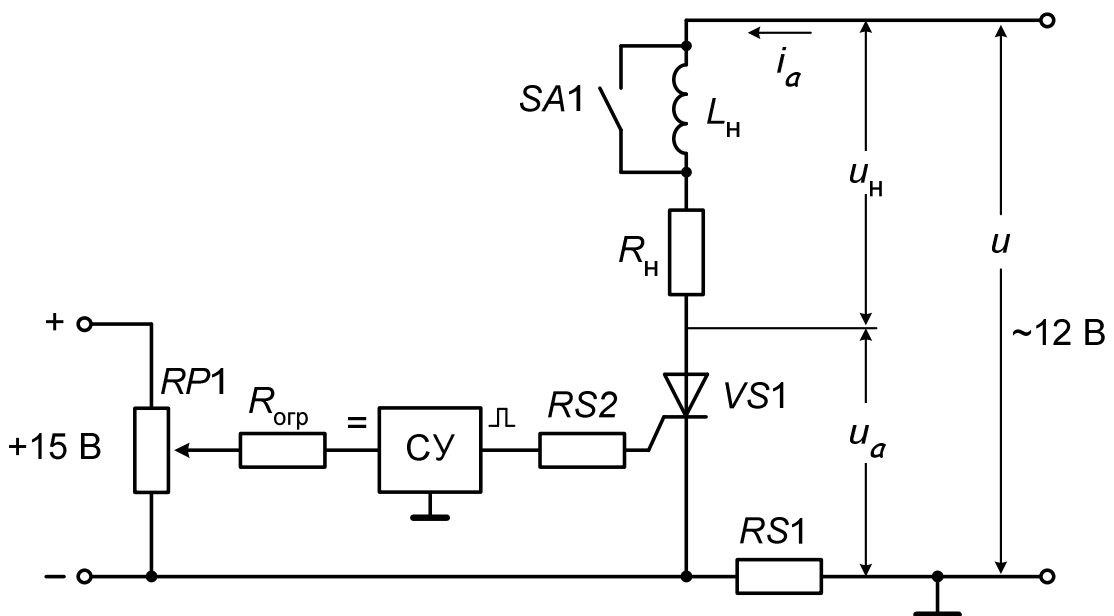


Рис. 5. Схема для исследования однополупериодного управляемого выпрямителя

в) вращая ручку потенциометра  $RP1$ , определить диапазон регулирования угла управления по осциллограмме напряжения на тиристоре  $u_a$ . Характер изменения среднего выпрямленного напряжения на нагрузке отследить по шкале вольтметра. Сравнить возможности регулирования с помощью импульсов и от постоянного тока;

г) при активной нагрузке и заданном угле управления снять осциллограммы напряжения на тиристоре  $u_a$  (вход CH1 осциллографа подключить к гнезду X4) и анодного тока  $i_a$  (снимается с шунта  $RS1$  – вход CH2 осциллографа подключить к гнезду X13, а корпус ( $\perp$ ) – к гнезду X14). Заданный угол управления на экране осциллографа установить согласно выражению (1). Снять отдельно осциллограмму напряжения на нагрузке  $u_H$  (вход CH2 осциллографа подключить к гнезду X2, а

корпус ( $\perp$ ) – к гнезду X4), а затем переменного напряжения  $u$ , подаваемого на тиристор (вход CH2 осциллографа подключить к гнезду X2, а корпус ( $\perp$ ) – к гнезду X14). Вход CH1 осциллографа временно отключить от модуля;

д) переключить тумблер SA1 в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки  $L_H$ . Снять те же осциллограммы (п. 3 г) при заданном по варианту угле управления и активно-индуктивной нагрузке. Выключить питание модуля. Сравнить осциллограммы.

#### 4. Экспериментальное исследование однофазного преобразователя переменного напряжения на симисторе:

а) собрать схему преобразователя рис. 6. Для этого подать на управляющий электрод импульсы от системы управления СУ, предварительно установив тумблер SA3 в среднее положение «VS2»; соединить гнезда X8 – X16 и X6 – X15. Подключить вход CH2 осциллографа к гнезду X4, а корпус ( $\perp$ ) – к X11 (напряжение на симисторе  $u_a$ ). Переключить тумблер SA1 в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки  $L_H$ . Включить питание модуля;

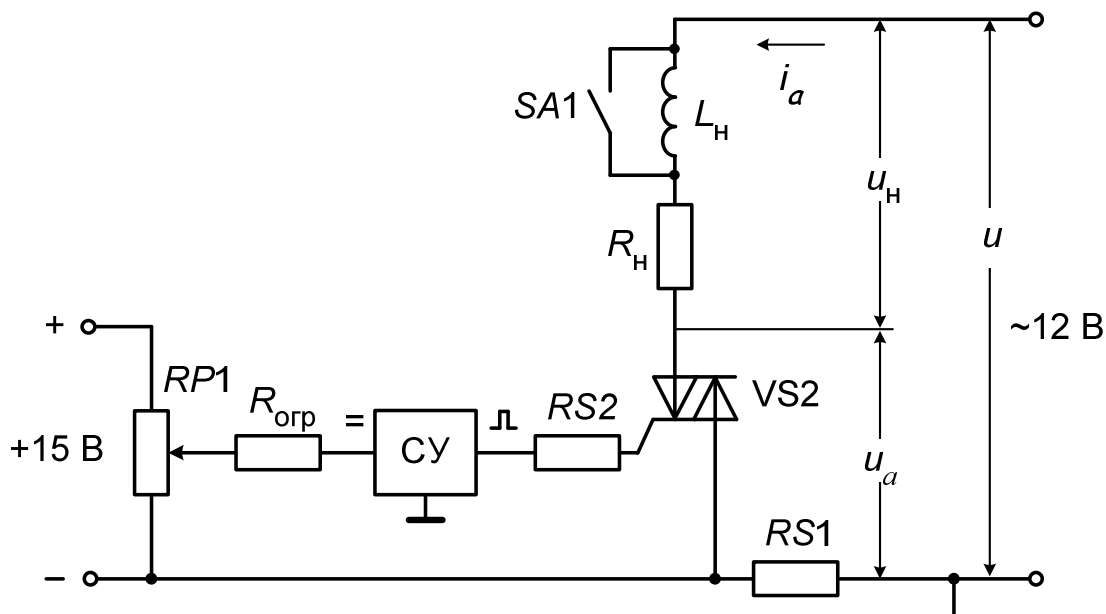


Рис. 6. Схема для исследования однофазного преобразователя переменного напряжения на симисторе

б) изучить влияние угла управления на напряжение на нагрузке ( $u_H$ ) и определить возможный диапазон изменения угла управления;

в) снять осциллограммы переменного напряжения  $u$ , подаваемого на симистор, напряжения на нагрузке  $u_H$ , на симисторе  $u_a$  и анодного тока  $i_a$  при активной нагрузке и заданном угле управления по аналогии с п. 3 г.

г) используя схему, приведенную на рис. 6, снять анодную ВАХ симистора при подачи импульсов от системы управления. Для этого подключить входы осциллографа к соответствующим точкам схемы: вход канала CH1 (X) – к гнезду X4 (напряжение на симисторе  $u_a$ ), канал CH2 (Y) – к гнезду X13 (анодной ток  $i_a$ ), а

корпус осциллографа ( $\perp$ ) присоединить к гнезду X14. Перевести переключатель развертки осциллографа в положение X/Y. Зарисовать ВАХ симистора при угле управления, взятом из таблицы вариантов. Определить масштабы по току и напряжению. Выключить питание модуля.

5. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на запираемом тиристоре:

а) собрать схему выпрямителя рис. 7. Для этого подать на управляющий электрод импульсы от системы управления СУ, переключив тумблер SA3 в положение «VS3», соединить гнезда X9 – X16 и X6 – X15. Подключить вход CH2 осциллографа к гнезду X4, а корпус ( $\perp$ ) – к X11 (напряжение на тиристоре  $u_a$ ). Переключить тумблер SA1 в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки  $L_H$ . Включить питание модуля;

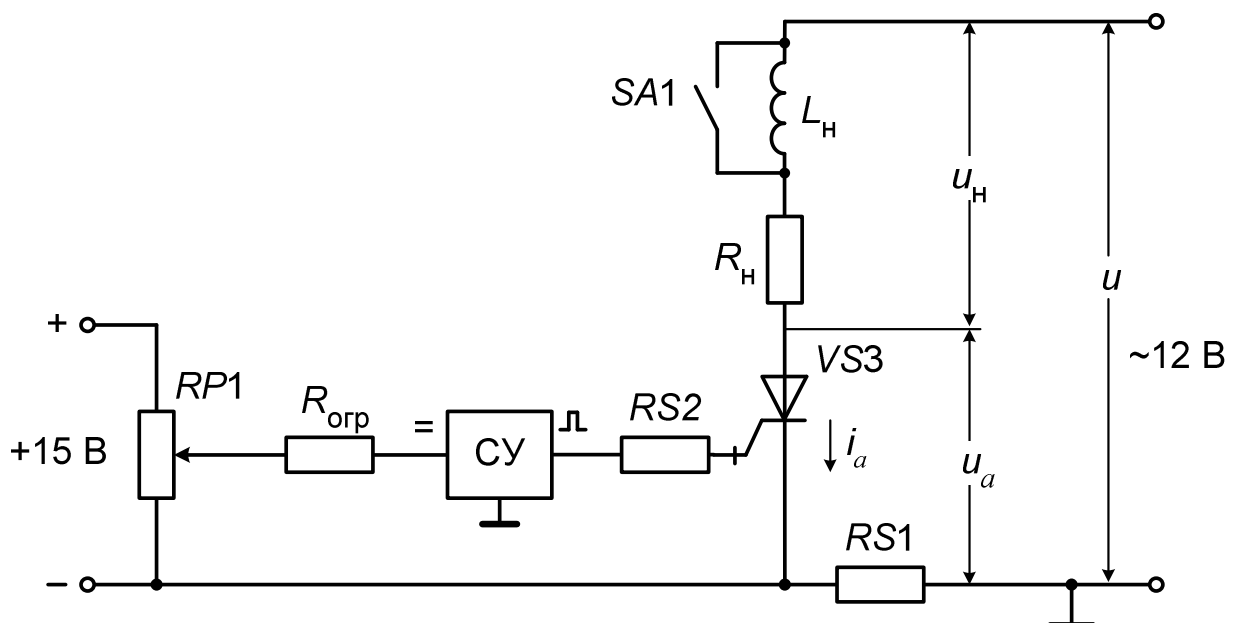


Рис. 7. Схема для исследования однополупериодного выпрямителя на запираемом тиристоре

б) вращая ручку потенциометра  $RP1$ , определить возможный диапазон изменения угла управления по осциллограмме напряжения на тиристоре  $u_a$ ;

в) снять осциллограммы переменного напряжения  $u$ , подаваемого на запираемый тиристор, напряжения на нагрузке  $u_H$ , на тиристоре  $u_a$  и анодного тока  $i_a$  при активной нагрузке и заданном угле управления, по аналогии с п. 3 г;

г) переключить тумблер SA1 в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки  $L_H$ . Снять те же осциллограммы (п. 5 в) при активно-индуктивной нагрузке. Обратит внимание на возникающие перенапряжения. Объяснить их причину. Выключить питание модуля.



## *Содержание отчета*

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой, показанной на рис. 1;
- в) временные диаграммы, построенные предварительно;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- е) обработанные осциллограммы;
- ж) выводы по работе. Обязательно ответить на контрольные вопросы 11–13.

## *Контрольные вопросы*

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

Таблица вариантов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_y, В$	15	14,5	14	13,5	13	12,5	12	11,5	11	10,5	10	15
$\alpha$ , град	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	15	25
№ варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$E_y, В$	14,5	14	13,5	13	12,5	12	11,5	11	10,5	10	15	14
$\alpha$ , град	35	45	55	65	75	85	95	10	20	30	40	50

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б, в, г (б – схему для снятия входной статической ВАХ на постоянном токе; г – для тиристора); подвариант Б – пп. 1 а, б, в, г (б – схему для снятия анодной ВАХ при помощи осциллографа; г – для симистора); подвариант В – пп. 1 а, б, в, г (б – схему для исследования однополупериодного управляемого выпрямителя; г – для запираемого тиристора).

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

3. Угол выключения  $\beta$  для запираемого тиристора принять:  $\beta = \alpha + 60^\circ$ ;

4. Сопротивление ограничения в цепи управления  $R_{огр} = 8,2 \text{ кОм}$ .

Работа № 5  
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ, ИНТЕГРАТОРА  
И КОМПАРАТОРОВ

*Цель работы*

Изучение схем включения и характеристик инвертирующего усилителя, интегратора, двухвходового компаратора и триггера Шмидта на базе операционного усилителя.

*Описание лабораторной установки*

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

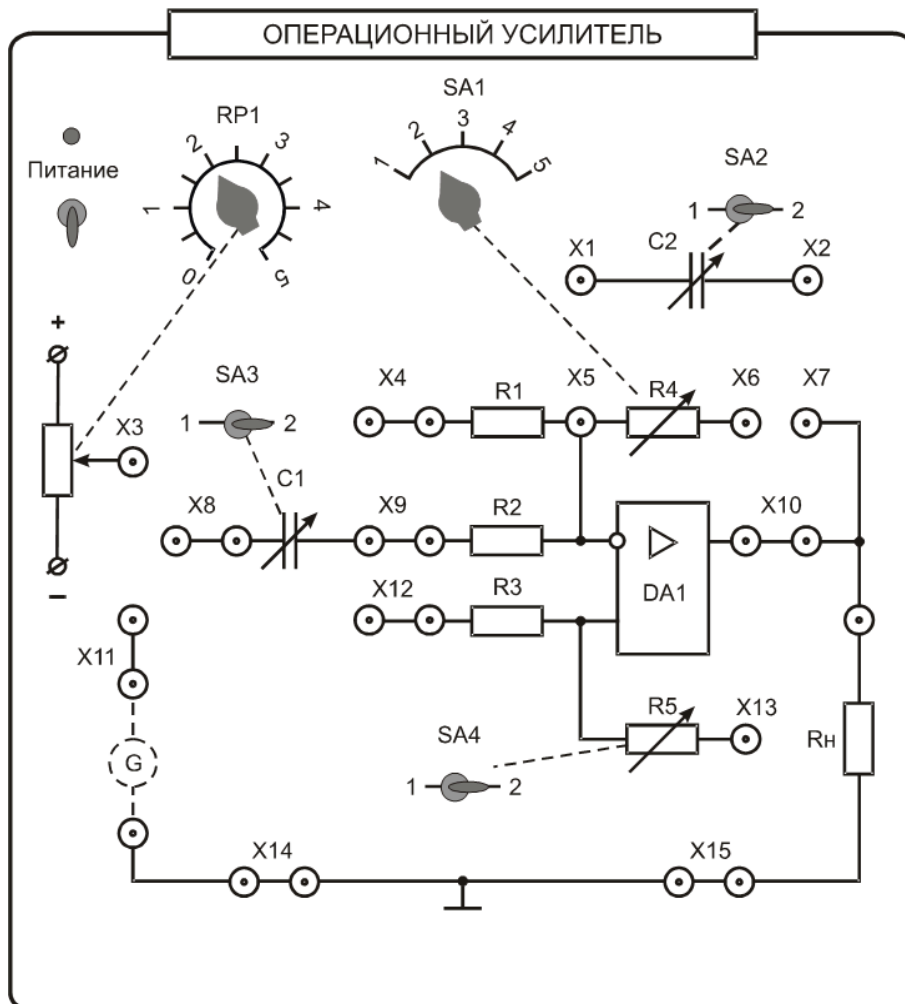


Рис. 1. Лицевая панель модуля  
«Операционный усилитель»

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

Таблица 1

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

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

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

Сопротивления на входах операционного усилителя равны  $R1 = R2 = R3 = 10 \text{ кОм}$ ; сопротивление нагрузки  $R_n = 10 \text{ кОм}$ . Напряжение питания ОУ двухполярное  $E_n = \pm 15 \text{ В}$ .

### Задание и методические указания

#### 1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Характеристики и параметры усилителей», «Обратные связи в усилителях», «Аналоговые интегральные микросхемы», «Схемы включения операционного усилителя» [1, с. 61–67; 80–87; 2, с. 389–421; 454–460; 635]; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схему для снятия амплитудной характеристик инвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе, вывести формулу для его коэффициента передачи. Определить коэффициент передачи усилителя и нарисовать временные диаграммы  $u_{\text{вх}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$  для заданного значения сопротивления  $R4$ , а также формы входного сигнала в соответствии с таблицей вариантов. Амплитуду входного сигнала выбрать так, чтобы при заданных значениях резисторов  $R1$  и  $R4$  усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Коэффициент передачи инвертирующего усилителя

$$k_{\text{OC}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R4}{R1}; \quad (1)$$

в) нарисовать схему для снятия временных диаграмм сигналов интегратора и вывести формулу для его выходного напряжения. Нарисовать диаграммы  $u_{\text{вх}}$  и  $u_{\text{вых}}$  для заданной частоты  $f$  знакопеременного прямоугольного сигнала  $u_{\text{вх}}$ . При

этом предварительно найти амплитуду  $U_{\max}$  прямоугольного сигнала  $u_{\text{вх}}$ , при которой выходной сигнал  $u_{\text{вых}}$  интегратора имеет пилообразную форму с амплитудой  $U_{\text{пmax}}$ , равной максимальному напряжению на выходе ОУ ( $U_{\text{вых.макс}} = 13,5 \text{ В.}$ )

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

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{U_{\text{вх}} \cdot t}{T_{\text{и}}} + U_{\text{вых}}(0), \quad (2)$$

где  $T_{\text{и}} = R1 \cdot C2$  – постоянная времени интегрирования;

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

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

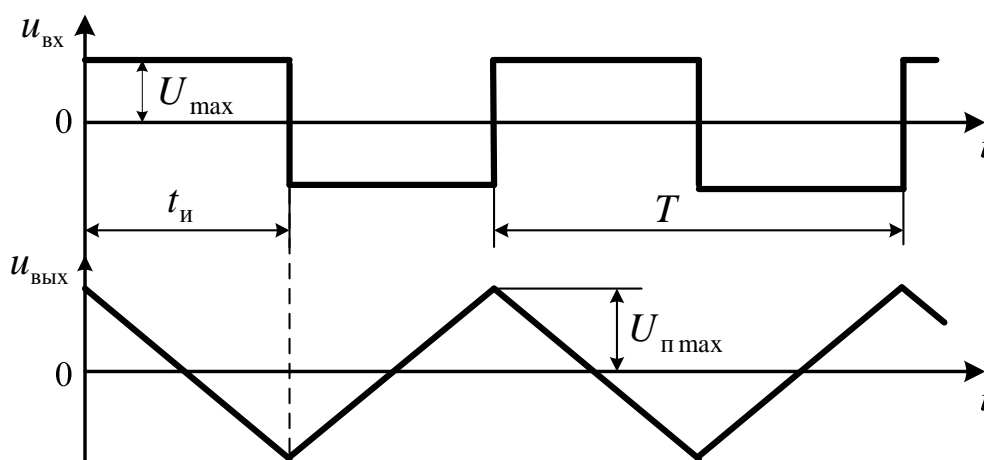


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов интегратора

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

$$U_{\max} = \frac{4 \cdot U_{\text{пmax}} \cdot T_{\text{и}}}{T}, \quad (3)$$

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

г) нарисовать схему для снятия передаточной характеристики регенеративного компаратора при помощи осциллографа, и вывести формулу для коэффициента передачи цепи обратной связи регенеративного компаратора. Нарисовать временные диаграммы входного  $u_{\text{вх}}(t)$  и выходного  $u_{\text{вых}}(t)$  напряжений в регенеративном компараторе, если на инвертирующий вход подано синусоидальное напряжение  $u_{\text{вх}}(t)$  с амплитудой 2,5 В, а на неинвертирующий – постоянное опорное на-

пряжение  $U_{оп}$  в соответствии с таблицей вариантов. Предварительно определить ширину петли гистерезиса  $U_{Г} = 2 \cdot U_{пор}$ , где  $U_{пор}$  – напряжение порога срабатывания.

$$|U_{пор}| = \frac{R3}{R3 + R5} \cdot |U_{вых.мах}|, \quad (4)$$

где  $U_{вых.мах}$  – максимальное напряжение на выходе ОУ, принять равным 13,5 В.

## 2. Экспериментальное исследование инвертирующего усилителя:

а) собрать схему инвертирующего усилителя согласно рис. 3.

Для этого собрать цепь отрицательной обратной связи по напряжению, соединив перемычками гнезда X6 – X7. К инвертирующему входу усилителя (гнездо X4) подключить источник постоянного регулируемого напряжения, соединив гнезда X3 – X4. Неинвертирующий вход усилителя (гнездо X12) заземлить, соединив перемычками гнезда X12 – X14. Для измерения напряжений на входе и выходе усилителя между гнездами X4 – X14 и X10 – X14 подключить вольтметры на пределе «=20 В». Обратите внимание на полярности вольтметров при их подключении на входе и выходе инвертирующего усилителя. Установить переключатель SA1 в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления  $R4$ . Включить питание модуля;

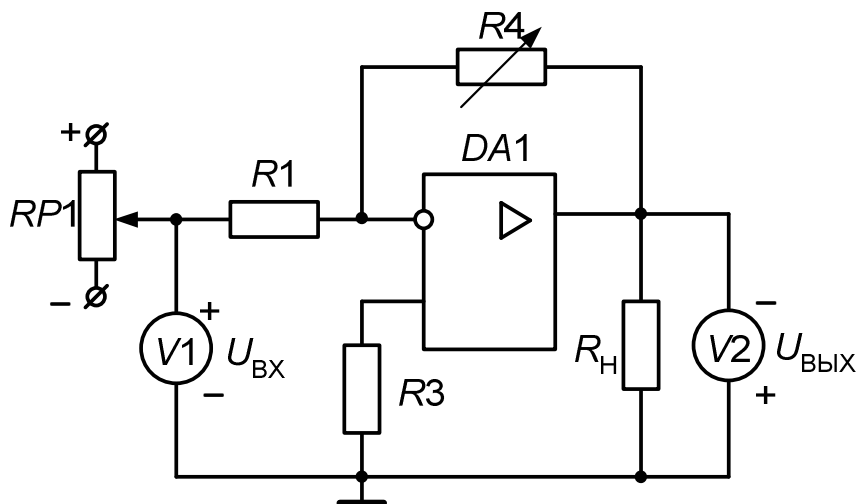


Рис. 3. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

Для измерения напряжений на входе и выходе усилителя между гнездами X4 – X14 и X10 – X14 подключить вольтметры на пределе «=20 В». Обратите внимание на полярности вольтметров при их подключении на входе и выходе инвертирующего усилителя. Установить переключатель SA1 в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления  $R4$ . Включить питание модуля;

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

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

Для снятия зависимости одной величины от другой необходимо использовать два канала осциллографа *CH1* и *CH2*. Вход *CH2* (*Y*) осциллографа подключить к выходу усилителя (гнездо *X10*), вход *CH1* (*X*) – к инвертирующему входу усилителя (гнездо *X4*), а корпус осциллографа « $\perp$ » к *X14*. Развертку луча переключить в положение *X/Y*. Установить на выходе функционального генератора переменное синусоидальное напряжение ( $\sim$ ) частотой порядка 300 Гц. Определить по характеристикам коэффициенты передачи;

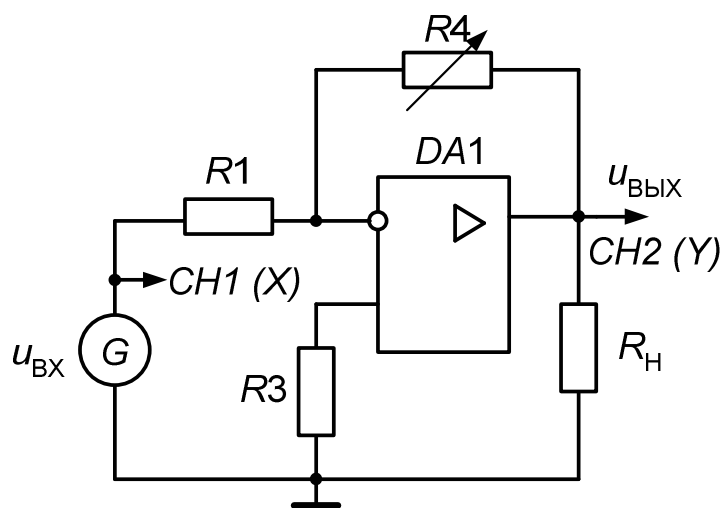


Рис. 4. Схема для снятия амплитудной характеристики инвертирующего усилителя на переменном токе

г) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) инвертирующего усилителя  $k_{\Pi} = F(f)$  при  $u_{\text{вх}} = \text{const}$  для заданного значения  $R4$ , используя схему на рис. 4. Для этого переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Входной сигнал выбрать так, чтобы усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Изменяя частоту синусоидального входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  ручкой модуля «Функциональный генератор», замерять при помощи осциллографа амплитуду выходного сигнала  $u_{\text{вых}}$ . Результаты заносить в таблицу. Построить АЧХ и по ней определить полосу пропускания усилителя для коэффициента частотных искажений на высоких частотах  $M_{\text{в}} = \sqrt{2}$ ;

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

### 3. Исследование интегратора:

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

б) исследовать работу интегратора в режиме генератора пилообразного напряжения (см. рис. 5). Для этого на функциональном генераторе установить прямоугольное знакопеременное напряжение с частотой  $f$ , заданной в таблице вариантов, и амплитудой  $U_{\text{max}}$ , рассчитанной в п. 1 в. Напряжение на входе  $u_{\text{вх}}$  и выходе  $u_{\text{вых}}$  контролировать при помощи осциллографа, подключив вход *CH2* осциллографа к выходу усилителя (гнездо *X10*), вход *CH1* – к инвертирующему входу усилителя (гнездо *X4*), а корпус осциллографа « $\perp$ » – к *X14*. При необходимости

подстроить амплитуду  $U_{\max}$  знакопеременного прямоугольного сигнала так, чтобы пилообразный выходной сигнал интегратора стал симметричным относительно нуля с амплитудой  $U_{\text{п max}} = U_{\text{вых. max}}$  (см. рис. 2). Зарисовать осциллограммы  $u_{\text{вх}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$ . Сравнить полученные результаты с расчетом по значениям  $U_{\max}, f, U_{\text{п max}}$ ;

в) снять и построить зависимость амплитуды выходного напряжения от частоты  $U_{\text{п max}} = F(f)$  при постоянном по

амплитуде входном прямоугольном сигнале, используя схему на рис. 5. Амплитуды напряжений замерять при помощи осциллографа. Результаты заносить в таблицу. Построить зависимость  $U_{\text{п max}} = F(f)$ . Выключить питание модуля.

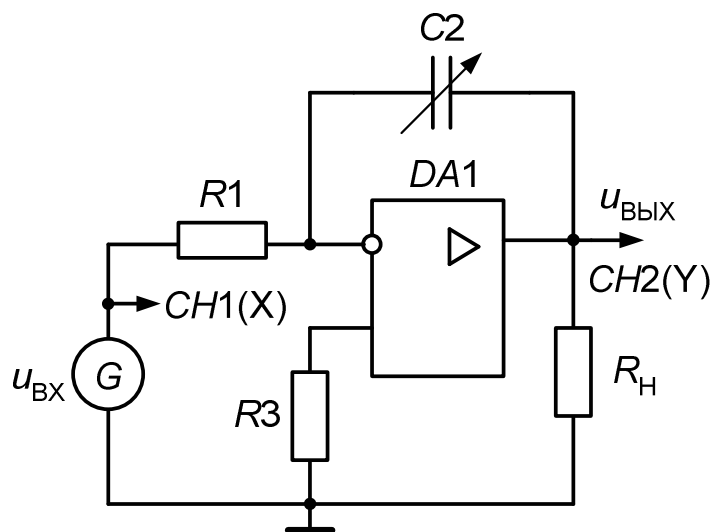


Рис. 5. Принципиальная схема интегратора

амплитуде входном прямоугольном сигнале, используя схему на рис. 5. Амплитуды напряжений замерять при помощи осциллографа. Результаты заносить в таблицу. Построить зависимость  $U_{\text{п max}} = F(f)$ . Выключить питание модуля.

#### 4. Исследование двухвходового компаратора:

а) собрать схему двухвходового компаратора рис. 6. Для этого источник опорного напряжения подключить к неинвертирующему входу ОУ (соединить перемычкой гнезда X3 – X12). Для измерения опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$  между гнездами X12 – X14 включить вольтметр (модуль «Вольтметры») на пределе «=20 В». Между гнездами X11 – X14 подключить источник входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  («Модуль функционального генератора») и соединить перемычкой гнезда X4 – X11.

Включить питание модуля;

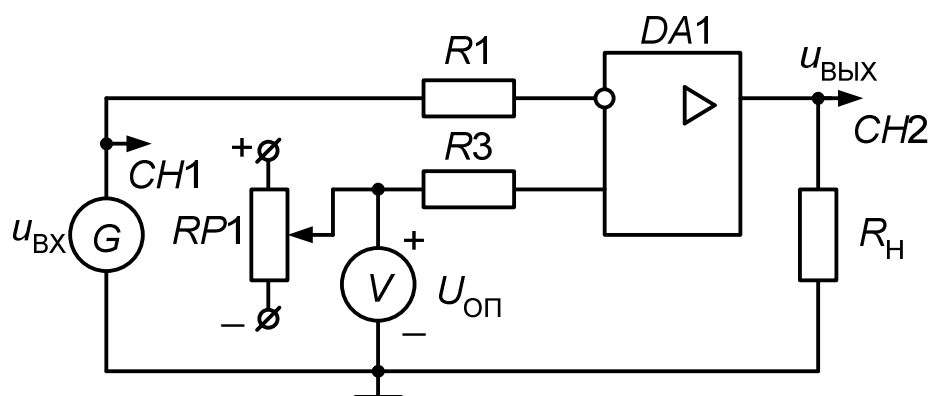


Рис. 6. Принципиальная схема для исследования двухвходового компаратора

б) снять осциллограммы работы компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений. Для этого канал CH2 (Y) осциллографа



подключить к выходному гнезду X10 операционного усилителя, а канал CH1 (X) – к входному переменному напряжению (гнездо X4), корпус осциллографа «L» соединить с гнездом X14. Установить амплитуду переменного синусоидального напряжения ручкой модуля «Функциональный генератор» на уровне 2,5 В с частотой 1 кГц и на протяжении всех опытов не изменять. Опорное напряжение  $U_{оп}$  установить согласно таблице вариантов. Зарисовать с экрана осциллографа входное  $u_{вх}$  и выходное  $u_{вых}$  напряжения. Определить масштабы по осям Y и X;

в) снять передаточную характеристику компаратора, переключив развертку осциллографа в положение X/Y. Частоту синусоидального сигнала установить на уровне 200 Гц. Зарисовать характеристику на кальку;

г) снять зависимость коэффициента заполнения положительных импульсов  $\gamma^+ = t_n^+ / T$  от величины опорного напряжения:  $\gamma^+ = f(U_{оп})$ . Здесь  $t_n^+$  – длительность положительных импульсов выходного напряжения;  $T$  – период выходного напряжения компаратора. Опорное напряжение изменять в пределах, которое обеспечивает работу компаратора (от –2,5 В до +2,5 В). Длительность периода  $T$  и положительных импульсов  $t_n^+$  замерять по экрану осциллографа, а напряжение  $U_{оп}$  – вольтметром. Измеренные величины заносить в таблицу.

Выключить питание модуля.

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

а) собрать схему двухвходового компаратора с положительной обратной связью согласно рис. 7, соединив гнезда X10 – X13;

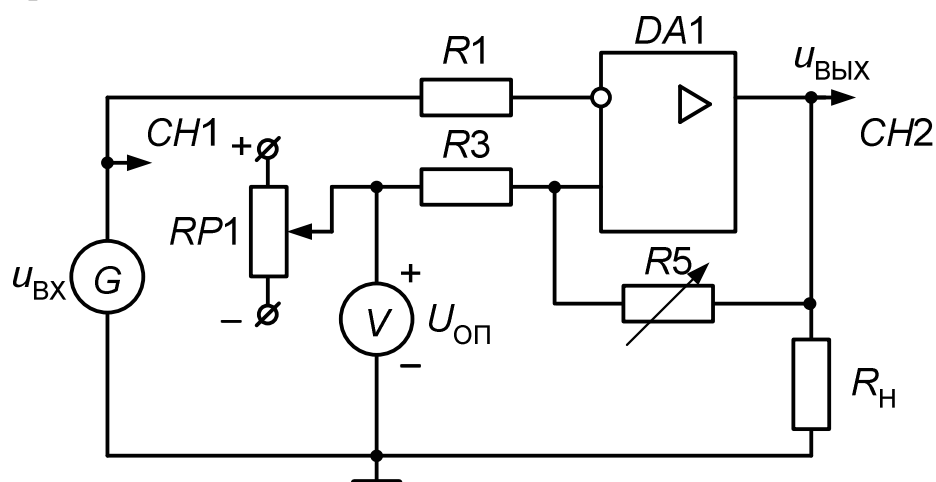


Рис. 7. Принципиальная схема для исследования регенеративного компаратора

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

в) снять передаточные характеристики компаратора для двух значений сопротивлений обратной связи ( $R5$ ) при заданном опорном напряжении, переключив развертку осциллографа в положение X/Y. Зарисовать характеристики на кальке.

Определить ширину петли гистерезиса  $U_{\Gamma}$  передаточной характеристики и сделать сравнение с расчетом (п. 1 г). Выключить питание модуля.

### *Содержание отчета*

Отчет должен содержать следующие пункты:

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

### *Контрольные вопросы*

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

16. Как получить периодические прямоугольные импульсы на выходе компаратора?

17. Как зависит вид характеристики передачи регенеративного компаратора от сопротивления обратной связи?

18. Как снять амплитудную характеристику инвертирующего усилителя или компаратора при помощи осциллографа?

Таблица вариантов

№ варианта	Инвертирующий усилитель		Интегратор		Компаратор	
	$R4$ , кОм	Форма $u_{вх}$	$C2$ , нФ	$f$ , Гц	$U_{оп}$ , В	$R5$ , кОм
1	20	~	10	500	1,6	200
2	50	~	10	460	-1,6	200
3	100	~	10	420	1,4	200
4	150	~	10	380	-1,4	200
5	200	~	10	340	1,2	200
6	20	~	10	300	-1,2	200
7	50	~	10	260	1,0	200
8	100	~	10	220	-1,0	200
9	150	~	10	180	0,8	200
10	200	~	10	480	-0,8	200
11	20	⌋	6,8	640	1,7	400
12	50	⌋	6,8	600	-1,7	400
13	100	⌋	6,8	560	1,5	400
14	150	⌋	6,8	520	-1,5	400
15	200	⌋	6,8	480	1,3	400
16	20	~	6,8	440	-1,3	400
17	50	~	6,8	400	1,1	400
18	100	~	6,8	360	-1,1	400
19	150	~	6,8	320	0,9	400
20	200	⌋	6,8	280	-0,9	400
21	100	⌋	10	440	0,7	200
22	200	~	10	400	-0,7	200
23	20	~	6,8	240	0,6	400
24	50	⌋	6,8	200	-0,6	400

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б; подвариант Б – пп. 1 а, в; подвариант В – пп. 1 а, г.

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 6  
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО  
И НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

*Цель работы*

Изучение схем включения и характеристик инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе операционного усилителя.

*Описание лабораторной установки*

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

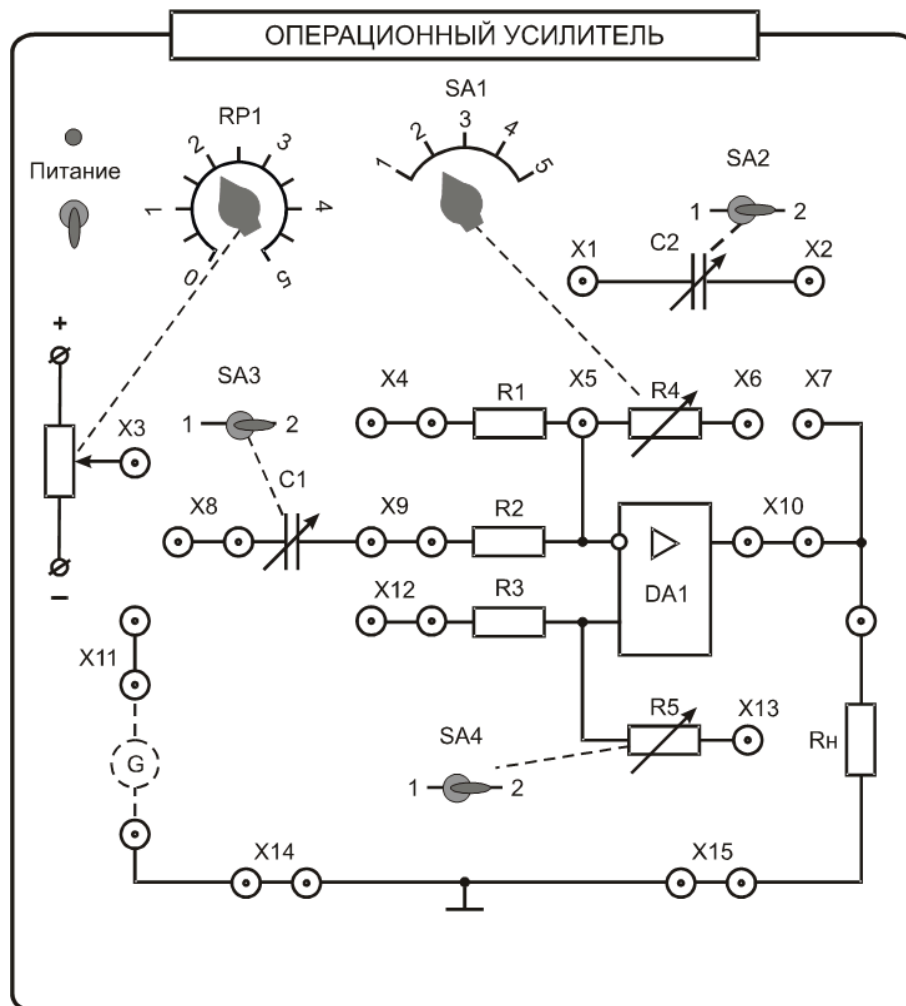


Рис. 1. Лицевая панель модуля  
«Операционный усилитель»

На ней изображена мнемосхема исследуемого усилителя и установлены регулирующие и коммутирующие элементы. С помощью потенциометра  $RP1$  на вход

усилителя (гнездамы X4, X8, X9, X12) может быть подано регулируемое постоянное напряжение с положительной так и отрицательной полярностью или переменный сигнал от функционального генератора, подключаемого между гнездами X11 – X14. С помощью переключателей SA1–SA4 изменяются параметры соответствующих элементов схемы (табл. 1).

Таблица 1

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

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

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

Сопротивления на входах операционного усилителя равны  $R1 = R2 = R3 = 10$  кОм; сопротивление нагрузки  $R_n = 10$  кОм. Напряжение питания ОУ двухполярное  $E_{\Pi} = \pm 15$  В.

### Задание и методические указания

#### 1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Характеристики и параметры усилителей», «Обратные связи в усилителях», «Аналоговые интегральные микросхемы», «Схемы включения операционного усилителя» [1, с. 61–67, 80–84; 2, с. 389–421, 454–460]; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схему для снятия амплитудной характеристик инвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе, вывести формулу для его коэффициента передачи. Определить коэффициент передачи усилителя, и нарисовать временные диаграммы  $u_{\text{вх}}(t)$ ,  $u_{\text{вых}}(t)$  для заданного значения сопротивления R4, частоты  $f$ , а также формы входного сигнала в соответствии с таблицей вариантов. Амплитуду входного сигнала выбрать так, чтобы при заданных значениях резисторов R1 и R4 усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Коэффициент передачи инвертирующего усилителя

$$k_{\text{OC}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R4}{R1}; \quad (1)$$

в) нарисовать схему для снятия амплитудной характеристики неинвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе, вывести формулу для его выходного напряжения. Нарисовать временные диаграммы  $u_{\text{вх}}(t)$ ,  $u_{\text{вых}}(t)$  для заданного значения сопротивления R4, частоты  $f$  и формы входного сигнала в соответствии с таблицей вариантов. Амплитуду входного сигнала выбрать так, чтобы

при заданных значениях резисторов  $R1$  и  $R4$  усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Коэффициент передачи неинвертирующего усилителя

$$k_{OC} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = 1 + \frac{R4}{R1}; \quad (2)$$

г) построить амплитудную характеристику для инвертирующего и неинвертирующего усилителя для заданного значения  $R4$  в соответствии с таблицей вариантов.

## 2. Экспериментальное исследование инвертирующего усилителя:

а) собрать схему инвертирующего усилителя согласно рис. 2. Для этого собрать цепь отрицательной обратной связи по напряжению, соединив переключками гнезда  $X6 - X7$ . К инвертирующему входу усилителя (гнездо  $X4$ ) подключить источник постоянного регулируемого напряжения, соединив гнезда  $X3 - X4$ . Неинвертирующий вход усилителя (гнездо  $X12$ ) заземлить, соединив переключками гнезда  $X12 - X14$ . Между гнездами

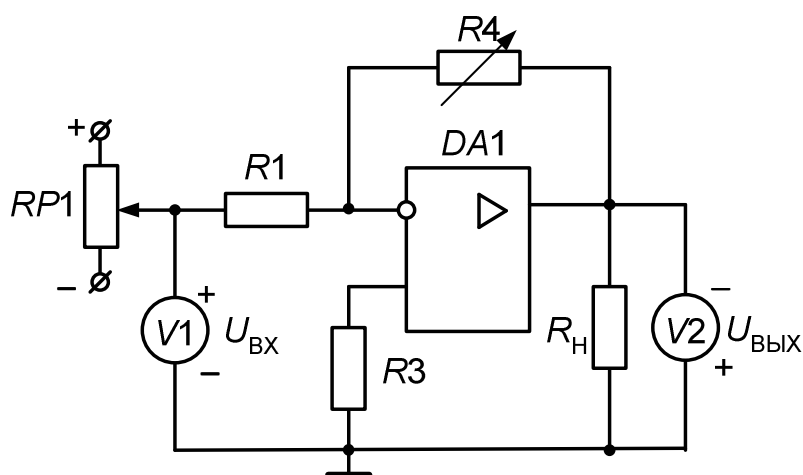


Рис. 2. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

$X4 - X14$  и  $X10 - X14$  подключить вольтметры на пределе « $\approx 20$  В». Обратите внимание на полярности вольтметров при их подключении на входе и выходе инвертирующего усилителя. Установить переключатель  $SA1$  в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления  $R4$ .

Включить питание модуля;

б) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{ВЫХ} = F(U_{ВХ})$  для заданного по варианту сопротивления обратной связи  $R4$ , используя схему на рис. 2. Для этого изменять постоянное напряжение на входе, регулируемое при помощи потенциометра  $RP1$ . Данные заносить в таблицу. По построенной характеристике, определить коэффициент передачи инвертирующего усилителя и сравнить его с расчетным значением, полученным в п. 1 б.

Выключить питание модуля;

в) снять амплитудные характеристики усилителя на переменном токе при помощи осциллографа для трех значений  $R4$  (заданного по варианту и двух соседних). Для этого необходимо подключить «Функциональный генератор» между гнездами  $X11 - X14$  и соединить переключкой гнезда  $X4 - X11$ , отсоединив источник постоянного регулируемого напряжения и вольтметры с входа и выхода усилителя (рис. 3). Для снятия зависимости одной величины от другой необходимо

использовать два канала осциллографа  $CH1$  и  $CH2$ . Вход  $CH2$  ( $Y$ ) осциллографа подключить к выходу усилителя (гнездо  $X10$ ), вход  $CH1$  ( $X$ ) – к инвертирующему входу усилителя (гнездо  $X4$ ), а корпус осциллографа « $\perp$ » – к  $X14$ . Развертку луча переключить в положение  $X/Y$ . Установить на выходе функционального генератора переменное синусоидальное напряжение ( $\sim$ ) частотой порядка 300 Гц. Определить по характеристикам коэффициенты передачи;

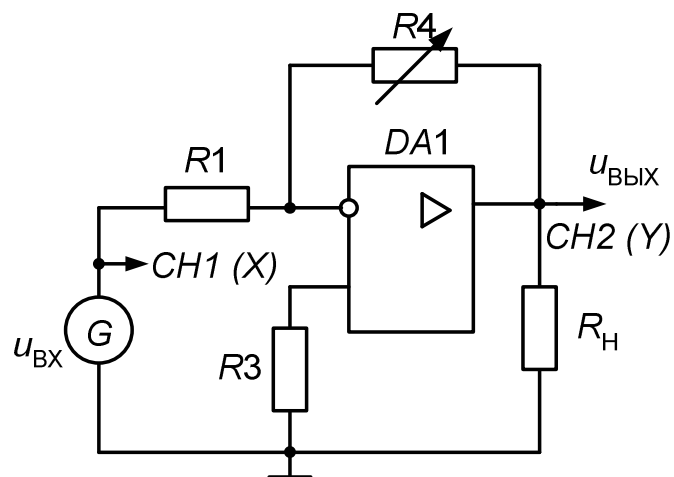


Рис. 3. Схема для снятия амплитудной характеристики инвертирующего усилителя на переменном токе

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

используя схему на рис. 3. Для этого переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Входной сигнал выбрать так, чтобы усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Изменяя частоту синусоидального входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  ручкой модуля «Функциональный генератор», замерять при помощи осциллографа амплитуду выходного сигнала  $u_{\text{вых}}$ . Результаты заносить в таблицу. Построить АЧХ и по ней определить полосу пропускания усилителя для коэффициента частотных искажений на высоких частотах  $M_{\text{в}} = \sqrt{2}$ ;

д) зарисовать осциллограммы  $u_{\text{вх}}(t)$ ,  $u_{\text{вых}}(t)$ , используя предыдущую схему из п. 2 г. Форму и частоту входного сигнала  $u_{\text{вх}}(t)$  установить в соответствии с таблицей вариантов. Определить масштабы по времени и осям  $Y$ ,  $X$ . Обработать осциллограммы.

Выключить питание модуля.

### 3. Экспериментальное исследование неинвертирующего усилителя:

а) собрать схему неинвертирующего усилителя согласно рис. 4.

Для этого собрать цепь отрицательной обратной связи по напряжению, соединив перемычками гнезда  $X6 - X7$ ;  $X4 - X14$ . Между гнездами  $X11 - X14$  подключить «Функциональный генератор» и соединить перемычкой гнезда  $X11 - X12$ . Установить переключатель  $SA1$  в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления  $R4$ .

Включить питание модуля;

б) снять амплитудные характеристики усилителя  $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$  на переменном токе при помощи осциллографа для трех значений  $R4$  (заданного по варианту и двух соседних). Для этого необходимо вход  $CH2$  ( $Y$ ) осциллографа подключить

к выходу усилителя (гнездо X10), вход CH1 (X) – к неинвертирующему входу усилителя (гнездо X12), а корпус осциллографа «L» – к X14. Развертку луча переключить в положение X/Y. Установить на выходе функционального генератора переменное синусоидальное напряжение (~) частотой порядка 300 Гц. Определить по характеристикам коэффициенты передачи. Сравнить коэффициент передачи неинвертирующего усилителя (при заданном R4 в таблице вариантов) с расчетным значением, полученным в п. 1 в;

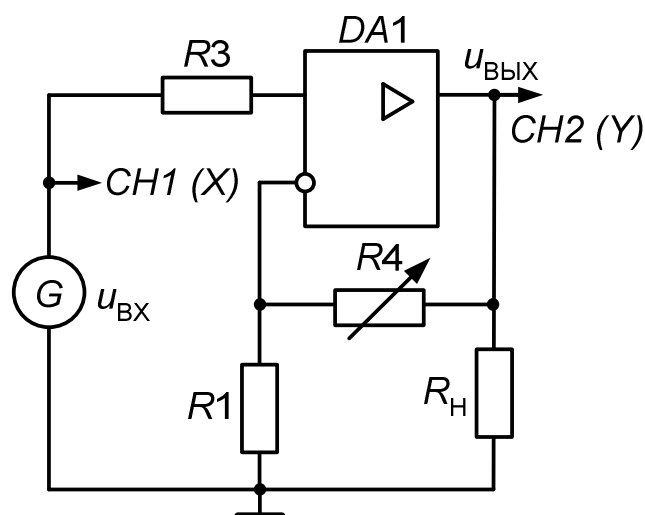


Рис. 4. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя

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

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

г) зарисовать осциллограммы  $u_{\text{вх}}(t)$ ,  $u_{\text{ввых}}(t)$ , используя предыдущую схему из п. 2 в. Форму и частоту входного сигнала  $u_{\text{вх}}(t)$  установить в соответствии с таблицей вариантов. Определить масштабы по времени и осям Y, X. Обработать осциллограммы.

Выключить питание модуля.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов, в соответствии с мнемосхемой показанной на рис. 1;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе;



- о влиянии сопротивления обратной связи на коэффициент передачи инвертирующего и неинвертирующего усилителей и их амплитудные характеристики;
- о влиянии частоты входного сигнала на коэффициент передачи инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

### *Контрольные вопросы*

1. Что называется операционным усилителем?
2. Каковы основные параметры операционного усилителя?
3. Почему операционный усилитель, включенный без обратной связи, работает как релейный элемент?
4. Какие допущения принимаются для операционного усилителя при выводе коэффициента передачи с различными обратными связями?
5. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
6. Какой знак будет иметь выходное напряжение инвертирующего и неинвертирующего усилителей, если на их входы подано отрицательное напряжение?
7. Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
8. Как определить полосу пропускания усилителя?
9. Назвать свойства усилителей с положительной обратной связью.
10. Назвать свойства усилителей с отрицательной обратной связью.
11. Как снять амплитудную характеристику инвертирующего и неинвертирующего усилителей на постоянном токе и при помощи осциллографа?

Таблица вариантов

№ варианта	$R4$ , кОм	Форма $u_{BX}$	$f$ , кГц
1	20	~	1,0
2	50	~	1,2
3	100	~	1,4
4	150	~	1,6
5	200	~	1,8
6	20	~	2,0
7	50	~	2,2
8	100	~	2,4
9	150	~	2,6
10	200	~	2,8
11	20	⌋	3,0
12	50	⌋	3,2
13	100	⌋	3,4
14	150	⌋	3,6
15	200	⌋	3,8
16	20	~	4,0
17	50	~	4,2
18	100	~	4,4
19	150	~	4,6
20	200	⌋	4,8
21	100	⌋	5,0
22	200	~	5,2
23	20	~	5,4
24	50	⌋	5,6

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б; подвариант Б – пп. 1 а, в; подвариант В – пп. 1 а, г.

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 7  
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО, СУММИРУЮЩЕГО  
И ВЫЧИТАЮЩЕГО ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

*Цель работы*

Изучение схем включения и характеристик инвертирующего, суммирующего и вычитающего (дифференциального) усилителей.

*Описание лабораторной установки*

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

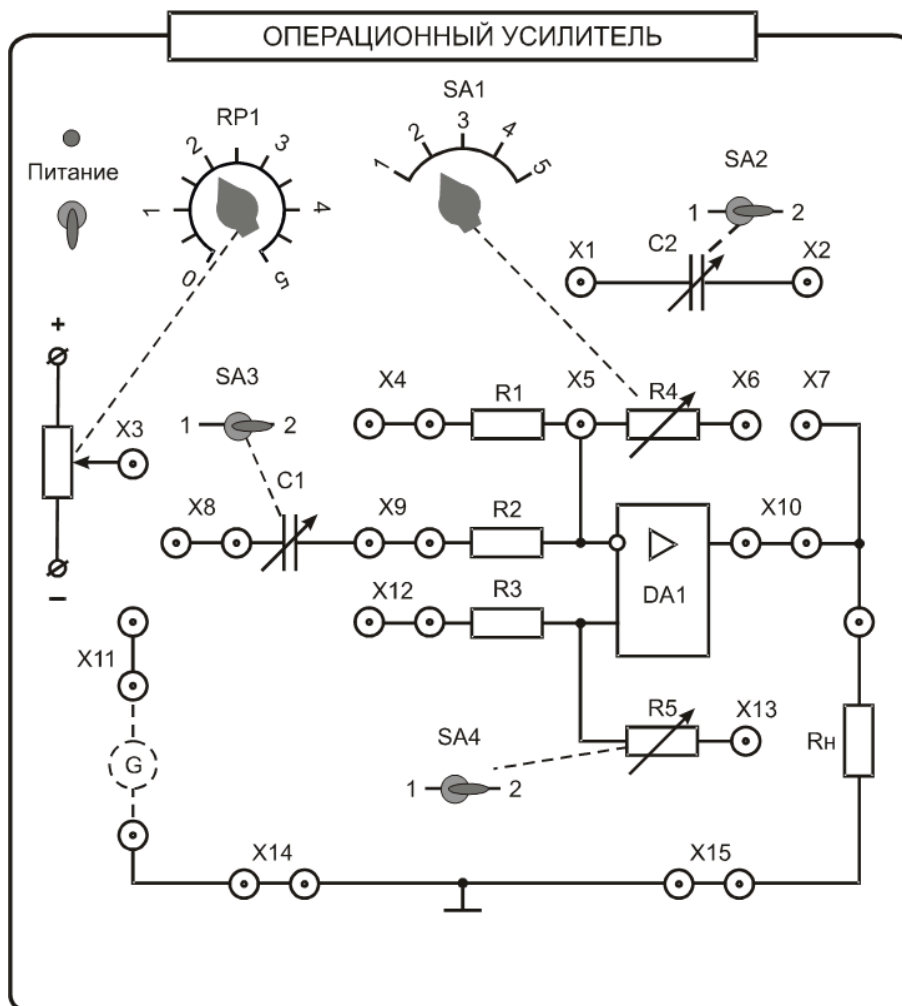


Рис. 1. Лицевая панель модуля  
«Операционный усилитель»

На ней изображена мнемосхема исследуемого усилителя и установлены регулирующие и коммутирующие элементы. С помощью потенциометра  $RP1$  на вход усилителя (гнезда  $X4$ ,  $X8$ ,  $X9$ ,  $X12$ ) может быть подано регулируемое постоянное

напряжение с положительной так и отрицательной полярностью или переменный сигнал от функционального генератора, подключаемого между гнездами X11 – X14. С помощью переключателей SA1–SA4 изменяются параметры соответствующих элементов схемы (табл. 1).

Таблица 1

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

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

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

Сопротивления на входах операционного усилителя равны  $R1 = R2 = R3 = 10$  кОм; сопротивление нагрузки  $R_n = 10$  кОм. Напряжение питания ОУ двухполярное  $E_{\Pi} = \pm 15$  В.

### Задание и методические указания

#### 1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса «Характеристики и параметры усилителей», «Обратные связи в усилителях», «Аналоговые интегральные микросхемы», «Схемы включения операционного усилителя (инвертирующее, суммирующее и дифференциальное)» [1, с. 61–67, с. 80–84; 2, с. 389–421]; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схему для снятия амплитудной характеристик инвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе, вывести формулу для его коэффициента передачи. Определить коэффициент передачи усилителя, и нарисовать временные диаграммы  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $u_{\text{вых}}(t)$  для заданного значения сопротивления R4, а также формы входного сигнала в соответствии с таблицей вариантов. Коэффициент передачи инвертирующего усилителя

$$k_{\text{OC}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R4}{R1}; \quad (1)$$

в) нарисовать схему суммирующего усилителя с двумя входами, вывести формулу для его выходного напряжения. Нарисовать временные диаграммы  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $U_{\text{вх2}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$  для заданного значения сопротивления R4, амплитуды и формы входных сигналов в соответствии с таблицей вариантов.

Напряжение на выходе суммирующего усилителя изменяется в соответствии с выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R4 \cdot \left( \frac{U_{\text{ВХ1}}}{R1} + \frac{U_{\text{ВХ2}}}{R2} + \dots + \frac{U_{\text{ВХ.n}}}{Rn} \right); \quad (2)$$

г) нарисовать схему вычитающего усилителя, и вывести формулу для его выходного напряжения. Нарисовать временные диаграммы  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $U_{\text{вх2}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$ , если на инвертирующий вход подано знакопеременное прямоугольное напряжение  $u_{\text{вх1}}(t)$  с амплитудой 2,0 В, а на неинвертирующий – постоянное напряжение  $U_{\text{вх2}}(t)$ , значения сопротивлений принять равными  $R1 = R3 = 10$  кОм,  $R4 = R5 = 200$  кОм.

Напряжение на выходе вычитающего усилителя изменяется в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = \left( \frac{R5}{R3 + R5} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R4}{R1} \right) \cdot U_{\text{вх2}} - \frac{R4}{R1} \cdot U_{\text{вх1}},$$

где  $U_{\text{вх1}}(t)$ ,  $U_{\text{вх2}}(t)$  – сигналы на инвертирующем и неинвертирующем входах усилителя соответственно.

При выполнении условий  $R1 = R3$  и  $R4 = R5$  усилитель становится дифференциальным и усиливает разность напряжений, приложенным к входам

$$U_{\text{вых}} = \frac{R4}{R1} \cdot (U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}). \quad (3)$$

## 2. Экспериментальное исследование инвертирующего усилителя:

а) собрать схему инвертирующего усилителя согласно рис. 2.

Для этого собрать цепь отрицательной обратной связи по напряжению, соединив перемычками гнезда X6 – X7. К инвертирующему входу усилителя (гнездо X4) подключить источник постоянного регулируемого напряжения, соединив гнезда X3 – X4. Неинвертирующий вход усилителя (гнездо X12) заземлить, соединив перемычками гнезда X12 – X14. Между гнездами X4 – X14 и X10 – X14 подключить вольтметры на пределе «=20 В». Обратите внимание на полярности вольтметров при их подключении на входе и выходе инвертирующего усилителя. Установить переключатель SA1 в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления  $R4$ . Включить питание модуля;

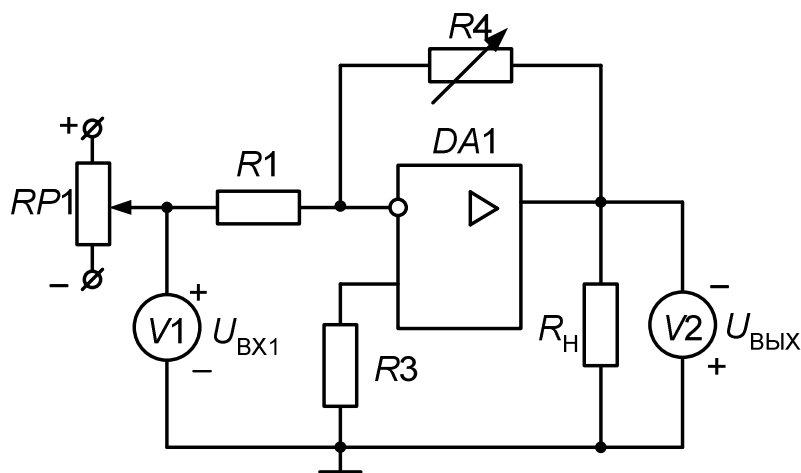


Рис. 2. Принципиальная схема инвертирующего усилителя

б) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх1}})$  для заданного по варианту сопротивления обратной связи  $R4$ , используя схему на рис. 2. Для этого изменять постоянное напряжение на входе, вращая ручку потенциометра  $RP1$ . Данные заносить в таблицу. По построенной

характеристике определить коэффициент передачи инвертирующего усилителя и сравнить его с расчетным значением, полученным в п. 1 б;

в) снять амплитудные характеристики усилителя на переменном токе при помощи осциллографа для трех значений  $R4$  (заданного по варианту и двух соседних). Для этого необходимо подключить модуль «Функциональный генератор» между гнездами  $X11 - X14$  и соединить перемычкой гнезда  $X4 - X11$ , отсоединив источник постоянного регулируемого напряжения и вольтметры с входа и выхода усилителя (рис. 3).

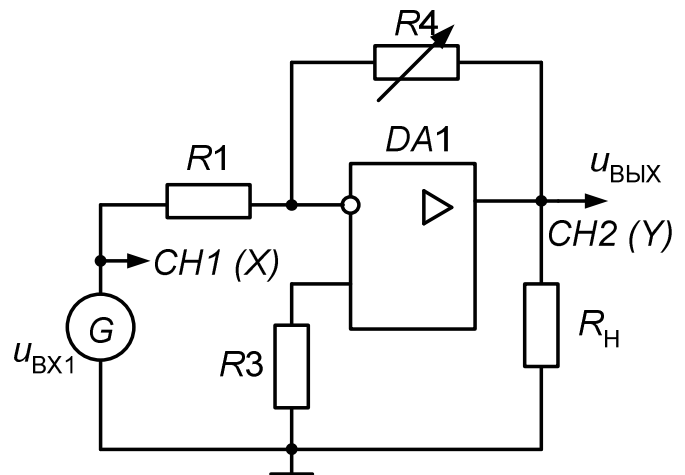


Рис. 3. Схема для снятия амплитудной характеристики инвертирующего усилителя на переменном токе

Для снятия зависимости одной величины от другой необходимо использовать два канала осциллографа  $CH1$  и  $CH2$ . Вход  $CH2$  ( $Y$ ) осциллографа подключить к выходу усилителя (гнездо  $X10$ ), вход  $CH1$  ( $X$ ) – к инвертирующему входу усилителя (гнездо  $X4$ ), а корпус осциллографа « $\perp$ » – к  $X14$ . Развертку луча переключить в положение  $X/Y$ . Установить на выходе функционального генератора переменное синусоидальное напряжение ( $\sim$ ) частотой порядка 300 Гц. Определить по характеристикам коэффициенты передачи;

г) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) инвертирующего усилителя  $k_{\Pi} = F(f)$  при  $u_{\text{вх1}} = \text{const}$  для заданного значения  $R4$ , используя схему на рис. 3. Для этого переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Входной сигнал выбрать так, чтобы усилитель работал на линейном участке амплитудной характеристики. Изменяя частоту синусоидального входного сигнала  $u_{\text{вх1}}$  ручкой модуля «Функциональный генератор», замерять при помощи осциллографа амплитуду выходного сигнала  $u_{\text{вх1}}$ . Результаты заносить в таблицу. Построить АЧХ и по ней определить полосу пропускания усилителя для коэффициента частотных искажений на высоких частотах  $M_B = \sqrt{2}$ ;

д) зарисовать осциллограммы  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $u_{\text{вх2}}(t)$  для частоты 1 кГц, используя предыдущую схему из п. 2 г. Форму входного сигнала  $u_{\text{вх1}}(t)$  установить в соответствии с таблицей вариантов. Определить масштабы по времени и осям  $Y, X$ . Обработать осциллограммы.

Выключить питание модуля.

### 3. Исследование суммирующего усилителя:

а) собрать схему суммирующего усилителя согласно рис. 4, соединив перемычками гнезда  $X6 - X7$ ,  $X12 - X14$ . Между гнездами  $X11 - X14$  подключить

«Функциональный генератор». На первый инвертирующий вход (гнездо X4) подать переменный сигнал  $u_{\text{вх1}}$  от функционального генератора, соединив переключкой гнезда X4 – X11. Ко второму инвертирующему входу усилителя (гнездо X9) подключить источник постоянного регулируемого напряжения  $U_{\text{вх2}}$ , соединив гнезда X3 – X9. Для измерения постоянного напряжения  $U_{\text{вх2}}$  между гнездами X9 – X14 подключить вольтметр на пределе «=20 В». Установить переключатель SA1 в соответствующее положение с учетом заданного по варианту значения сопротивления  $R4$ .

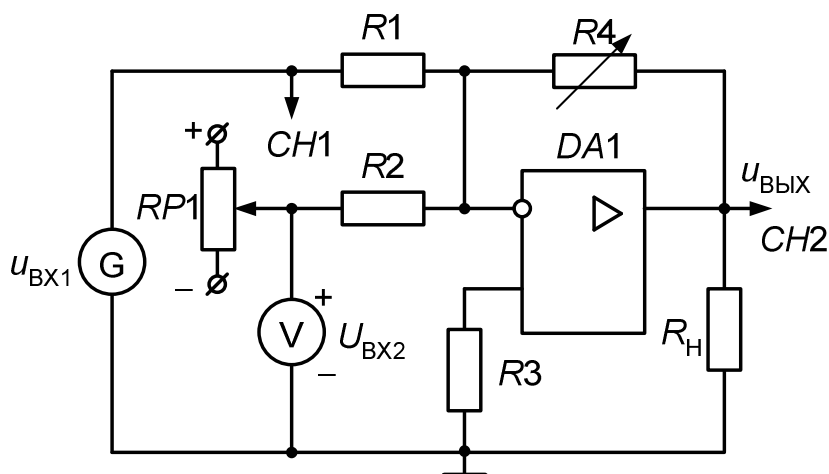


Рис. 4. Принципиальная схема суммирующего усилителя

Включить питание модуля;

б) нарисовать временные диаграммы сигналов  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $U_{\text{вх2}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$  для суммирующего усилителя. Для этого на функциональном генераторе установить заданную форму и амплитуду входного сигнала  $u_{\text{вх1}}$  в соответствии с таблицей вариантов, а также величину постоянного напряжения  $U_{\text{вх2}}$ , вращая ручку потенциометра RP1. Частоту  $u_{\text{вх1}}$  установить равной 1 кГц. Напряжение на входе  $u_{\text{вх1}}$  и выходе  $u_{\text{вых}}$  контролировать при помощи осциллографа, подключив вход CH2 осциллографа к выходу усилителя (гнездо X10), вход CH1 – к инвертирующему входу усилителя (гнездо X4), а корпус осциллографа «⊥» – к X14. Постоянное напряжение измерять при помощи вольтметра. Зарисовать и обработать осциллограммы  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $U_{\text{вх2}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$ . Сравнить полученные результаты с расчетными временными диаграммами (п. 1 в). Выключить питание модуля.

#### 4. Исследование вычитающего (дифференциального) усилителя:

а) собрать схему вычитающего усилителя согласно рис. 5.

Для этого соединить переключками гнезда X6 – X7, X13 – X14. Между гнездами X11 – X14 подключить «Функциональный генератор». На инвертирующий вход (гнездо X4) подать переменный сигнал  $u_{\text{вх1}}$  от функционального генератора, соединив переключкой гнезда X4 – X11. К неинвертирующему входу усилителя (гнездо X12) подключить источник постоянного регулируемого напряжения  $U_{\text{вх2}}$ , соединив гнезда X3 – X12. Для измерения постоянного напряжения  $U_{\text{вх2}}$  между гнездами X12 – X14 подключить вольтметр на пределе «=20 В». Установить переключатель SA1 в положение «5», соответствующее резистору  $R4 = 200 \text{ кОм}$  и SA4 – в положение «1» ( $R5 = 200 \text{ кОм}$ ). Включить питание модуля;

б) снять осциллограммы работы  $u_{\text{вх1}}(t)$ ,  $U_{\text{вх2}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$  вычитающего усилителя. Для этого ручкой на «Функциональном генераторе» установить амплитуду знакопеременного прямоугольного сигнала  $u_{\text{вх1}}$  на уровне 2,0 В с частотой 1 кГц и на протяжении всех опытов не изменять.

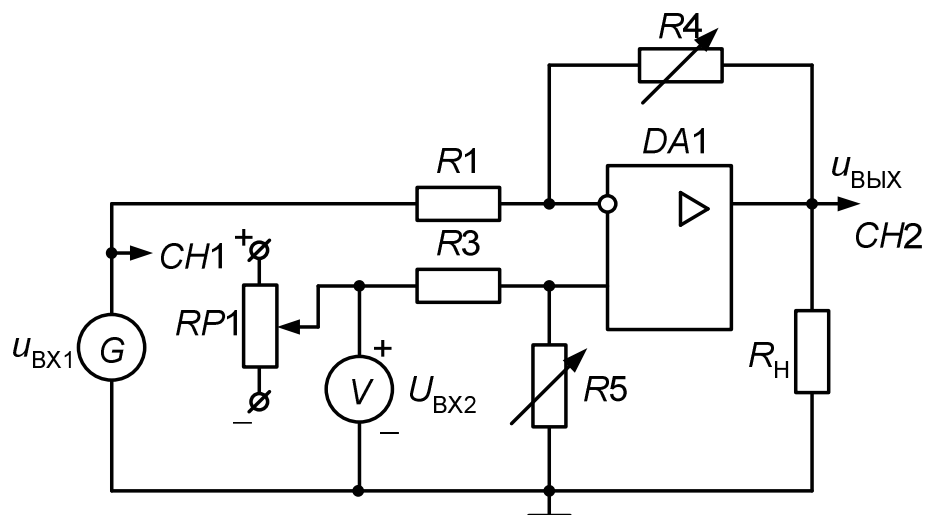


Рис. 5. Принципиальная схема вычитающего усилителя

Постоянное напряжение  $U_{\text{вх2}}$  установить согласно таблице вариантов. Напряжение на входе  $u_{\text{вх1}}$  и выходе  $u_{\text{вых}}$  контролировать при помощи осциллографа, подключив вход CH2 осциллографа к выходу усилителя (гнездо X10), вход CH1 – к инвертирующему входу усилителя (гнездо X4), а корпус осциллографа «⊥» – к X14. Зарисовать с экрана осциллографа входное  $u_{\text{вх1}}$  и выходное  $u_{\text{вых}}$  напряжения. Определить масштабы по осям Y и X. Обработать осциллограммы и сравнить их с расчетными (п. 1 г);

Выключить питание модуля;

в) исследовать работу дифференциального усилителя при передаче синфазного сигнала  $U_{\text{сф}}$ . Для этого собрать схему согласно рис. 6, закоротив перемычкой инвертирующий (гнездо X4) и неинвертирующий (гнездо X12) входы. На вход усилителя подать синфазный сигнал  $U_{\text{сф}}$  от источника постоянного напряжения, соединив перемычками гнезда X3 – X4. Для измерения синфазного сигнала  $U_{\text{сф}}$  и

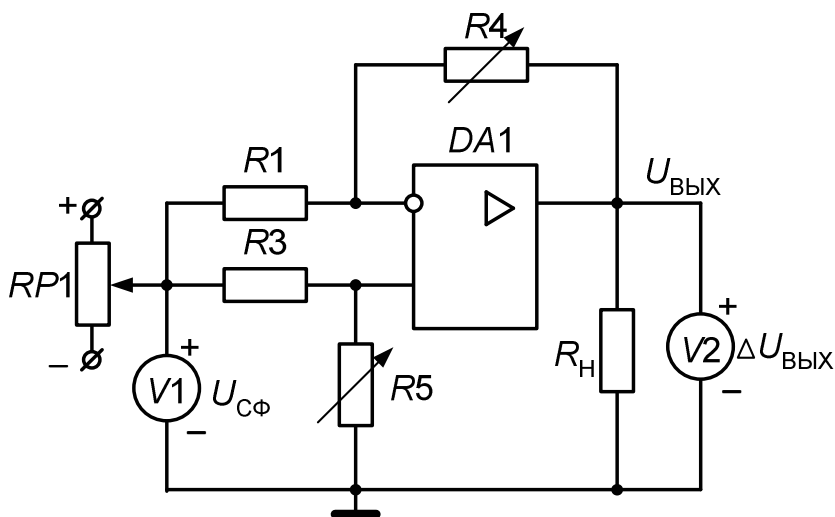


Рис.6. Схема дифференциального усилителя при передаче синфазного сигнала

ошибки на выходе  $\Delta U_{\text{вых}}$  при передаче синфазного сигнала между гнездами X12 – X14, X10 – X14 подключить вольтметры V1, V2 на пределе «=20 В».



Изменяя величину напряжения синфазного сигнала  $U_{\text{сф}}$  в диапазоне от  $-13$  В до  $+13$  В потенциометром  $RP1$ , замерять сигнал на выходе  $\Delta U_{\text{вых}}$  усилителя. Результаты заносить в таблицу;

г) построить зависимости коэффициента передачи синфазного сигнала  $k_{\text{у.с.}} = F(U_{\text{сф}})$  и коэффициента ослабления синфазного входного напряжения  $k_{\text{ос.сф}} = F(U_{\text{сф}})$  в логарифмическом масштабе. Коэффициенты передачи определить из выражений

$$k_{\text{у.с.}} = \left| \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{сф}}} \right|, \quad k_{\text{ос.сф}} = \frac{k_{\text{у.д.д.}}}{k_{\text{у.с.}}}$$

Здесь  $k_{\text{у.с.}}$  – коэффициента передачи синфазного сигнала;

$\Delta U_{\text{вых}}$  – погрешность работы дифференциального усилителя при усилении синфазного сигнала;

$U_{\text{сф}}$  – синфазное напряжение, которое подается на оба входа ОУ;

$k_{\text{ос.сф}}$  – коэффициента ослабления синфазного входного напряжения (коэффициент подавления синфазного сигнала). Вводится для количественной характеристики усиления дифференциального и синфазного сигналов;

$k_{\text{у.д.д.}} = R4/R1$  – коэффициент передачи дифференциального (вычитающего) входного сигнала.

Выключить питание модуля.

### *Содержание отчета*

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой, показанной на рис. 1;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе:
  - о влиянии сопротивления обратной связи на коэффициент передачи инвертирующего усилителя и его амплитудную характеристику;
  - о влиянии синфазного напряжения на коэффициент передачи синфазного сигнала и коэффициента ослабления синфазного входного напряжения.

### *Контрольные вопросы*

1. Что называется операционным усилителем?
2. Каковы основные параметры операционного усилителя?

3. Почему операционный усилитель, включенный без обратной связи, работает как релейный элемент?
4. Какие допущения принимаются для операционного усилителя при выводе коэффициента передачи с различными обратными связями?
5. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях? Назвать свойства усилителей с отрицательной обратной связью.
6. Какой знак будет иметь выходное напряжение инвертирующего усилителя, если на вход подано отрицательное напряжение?
7. Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
8. Как снять амплитудную и амплитудно-частотную характеристики инвертирующего усилителя при помощи осциллографа?
9. Как определить полосу пропускания усилителя?
10. Чем отличается инвертирующий усилитель от суммирующего?
11. Для чего используется дифференциальное включение операционного усилителя?
12. Почему потенциалы инвертирующего и неинвертирующего входов при дифференциальном включении одинаковы?
13. Что такое синфазный сигнал, коэффициент передачи синфазного и дифференциального сигналов?
14. Что показывает коэффициент ослабления синфазного входного напряжения?

Таблица вариантов

№ варианта	Инвертирующий и суммирующий усилители			Вычитающий усилитель
	$R_4$ , кОм	Форма/амплитуда $u_{вх1}$ , В	$U_{вх2}$ , В	$U_{вх2}$ , В
1	20	$\sim / 2,5$	3,0	1,4
2	50	$\sim / 2,0$	0,5	-1,4
3	100	$\sim / 0,8$	0,3	1,6
4	150	$\sim / 0,6$	0,2	-1,6
5	200	$\sim / 0,3$	0,3	1,8
6	20	$\sim / 2,5$	-3,0	-1,8
7	50	$\sim / 2,0$	-0,5	2,0
8	100	$\sim / 1,0$	-0,3	-2,0
9	150	$\sim / 0,6$	-0,2	2,2
10	200	$\sim / 0,3$	-0,4	-2,2
11	20	$\square / 2,5$	2,5	2,4
12	50	$\square / 2,0$	0,5	-2,4
13	100	$\square / 0,8$	0,4	2,5
14	150	$\square / 0,6$	0,2	-2,5
15	200	$\square / 0,3$	0,2	1,5
16	20	$\sim / 2,0$	4,0	-1,5
17	50	$\sim / 1,0$	1,5	1,7
18	100	$\sim / 0,5$	-0,4	-1,7
19	150	$\sim / 0,4$	-0,3	1,9
20	200	$\square / 0,2$	0,4	-1,9
21	20	$\square / 2,2$	2,8	2,1
22	50	$\sim / 1,0$	1,0	-2,1
23	20	$\sim / 1,5$	4,5	2,3
24	50	$\square / 1,2$	0,5	-2,3

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б; подвариант Б – пп. 1 а, в; подвариант В – пп. 1 а, г.

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 8  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАРАТОРОВ И МУЛЬТИВИБРАТОРА

*Цель работы*

Изучение различных схем включения и характеристик компараторов и мультивибратора на базе операционного усилителя.

*Описание лабораторной установки*

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

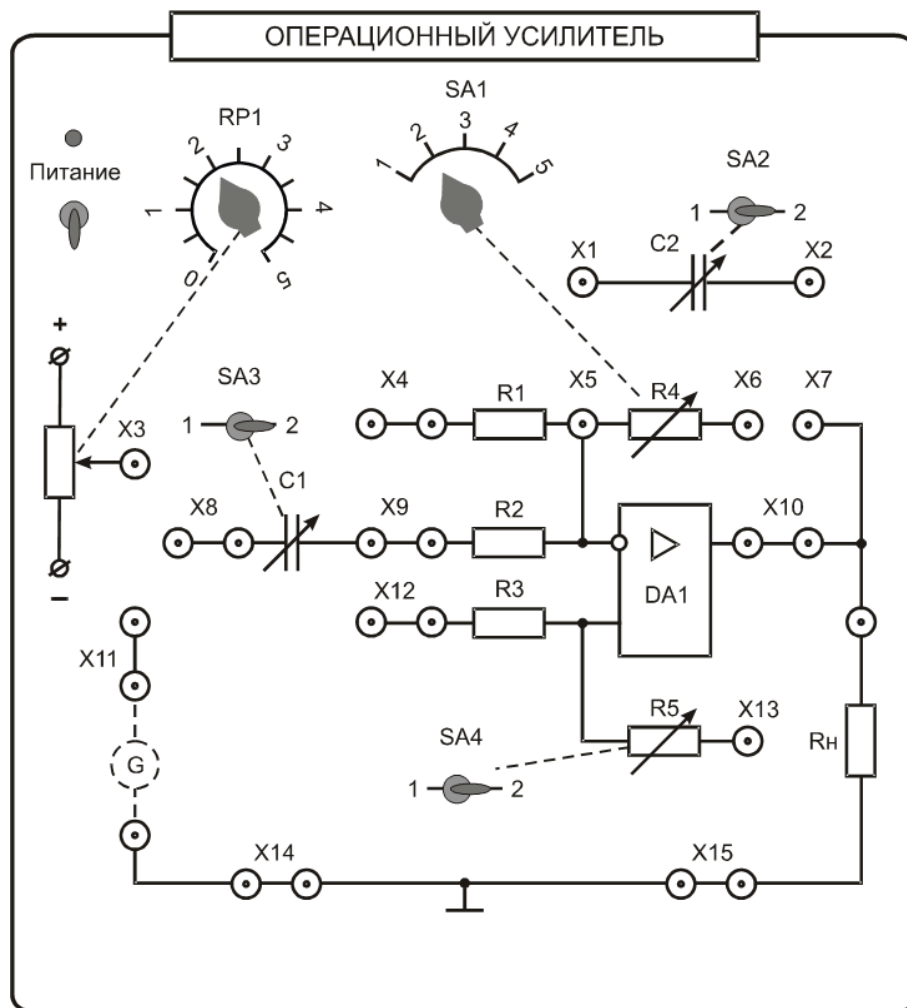


Рис. 1. Лицевая панель модуля  
«Операционный усилитель»

На ней изображена мнемосхема исследуемого усилителя и установлены регулирующие и коммутирующие элементы. С помощью потенциометра  $RP1$  на вход усилителя (гнезда  $X4$ ,  $X8$ ,  $X9$ ,  $X12$ ) может быть подано регулируемое постоянное напряжение с положительной так и отрицательной полярностью или переменный

сигнал от функционального генератора, подключаемого между гнездами X11 – X14. С помощью переключателей SA1–SA4 изменяются параметры соответствующих элементов схемы (табл.1).

Таблица 1

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

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

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

Сопротивления на входах операционного усилителя равны  $R1 = R2 = R3 = 10$  кОм; сопротивление нагрузки  $R_n = 10$  кОм. Напряжение питания ОУ двухполярное  $E_{\Pi} = \pm 15$  В.

### *Задание и методические указания*

#### *1. Предварительное домашнее задание:*

а) изучить темы курса «Характеристики и параметры операционных усилителей», «Обратные связи в усилителях», «Компараторы», «Регенеративный компаратор (триггер Шмидта)» и «Мультивибратор» [1, с. 61–67, 85–88; 2, с. 389–421, 646]; изучить содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) нарисовать схему для снятия передаточной характеристики одноходового компаратора при помощи осциллографа и временные диаграммы его входного и выходного напряжений, если на инвертирующий вход подано синусоидальное напряжение с амплитудой  $u_{вх} = 2,5$  В, а также постоянное опорное напряжение  $U_{оп}$  в соответствии с таблицей вариантов;

в) нарисовать схему для снятия передаточной характеристики двухходового компаратора и временные диаграммы его входного и выходного напряжений, если на инвертирующий вход подано синусоидальное напряжение с амплитудой  $u_{вх} = 2,5$  В, а на неинвертирующий – постоянное опорное напряжение  $U_{оп}$  в соответствии с таблицей вариантов;

г) нарисовать схему для снятия передаточной характеристики регенеративного компаратора и временные диаграммы его входного и выходного напряжений, если на инвертирующий вход подано синусоидальное напряжение с амплитудой  $u_{вх} = 2,5$  В, а на неинвертирующий – постоянное опорное напряжение  $U_{оп}$  в соответствии с таблицей вариантов. Для регенеративного компаратора определить

ширину петли гистерезиса  $U_T = 2U_{\text{пор}}$ , где  $U_{\text{пор}}$  – напряжение порога срабатывания,

$$|U_{\text{пор}}| = \frac{R3}{R3 + R5} \cdot |U_{\text{вых.мах}}|,$$

где  $U_{\text{вых.мах}}$  – максимальное напряжение на выходе ОУ, принять равным 13,5 В;

д) нарисовать временные диаграммы сигналов мультивибратора: напряжение на выходе  $u_{\text{вых}}$ , напряжение на инвертирующем  $u_c$  и неинвертирующем  $u_{oc}$  входах ОУ. В соответствии с таблицей вариантов определить частоту на выходе мультивибратора:

$$f = 1/T, \quad (1)$$

$$T = 2 \cdot R4 \cdot C2 \cdot \ln\left(1 + 2 \cdot \frac{R3}{R5}\right). \quad (2)$$

## 2. Исследование одноходового компаратора:

а) собрать схему одноходового компаратора согласно рис. 2. Для этого соединить перемычкой гнезда X12 – X14. К гнезду X9 подключить источник опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$ , соединив гнезда X3 – X9. Для измерения опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$  между гнездами X9

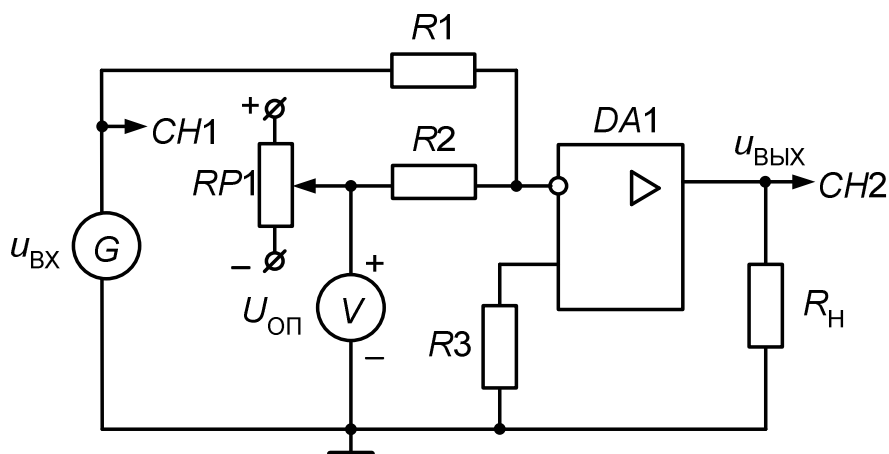


Рис. 2. Принципиальная схема одноходового компаратора

– X14 включить вольтметр на пределе «=20 В». Между гнездами X11 – X14 подключить источник входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  (модуль «Функциональный генератор»), и соединить перемычкой гнезда X4 – X11.

Включить питание модуля;

б) снять осциллограммы работы компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений. Для этого канал CH2 осциллографа подключить к выходному гнезду X10 операционного усилителя, а канал CH1 – к входному переменному напряжению (гнездо X4), корпус осциллографа «⊥» соединить с гнездом X14. Установить амплитуду переменного синусоидального напряжения ручкой модуля «Функциональный генератор» на уровне 2,5 В с частотой 1 кГц и заданное по варианту опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$ . Зарисовать с экрана

осциллографа входное  $u_{\text{ВХ}}$  и выходное  $u_{\text{ВЫХ}}$  напряжения. Определить масштабы по осям  $Y$  и  $X$ ;

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

Выключить питание модуля.

### 3. Исследование двухвходового компаратора:

а) собрать схему двухвходового компаратора рис. 3. Для этого разъединить гнезда  $X9 - X14$ . Источник опорного напряжения подключить к неинвертирующему входу ОУ (соединить перемычкой гнезда  $X3 - X12$ ). Вольтметр включить между гнездами  $X12 - X14$  на пределе « $\approx 20$  В». Включить питание модуля;

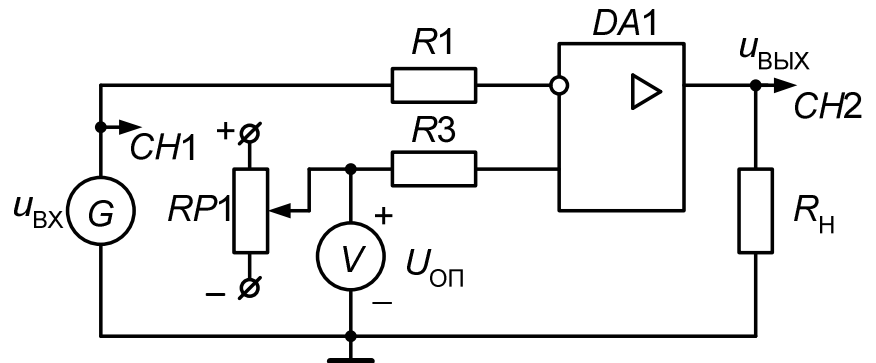


Рис. 3. Принципиальная схема двухвходового компаратора

б) снять осциллограммы работы компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений. Для этого канал  $CH2$  осциллографа подключить к выходному гнезду  $X10$  операционного усилителя, а канал  $CH1$  – к входному переменному напряжению (гнездо  $X4$ ), корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с гнездом  $X14$ . Установить амплитуду переменного синусоидального напряжения ручкой модуля «Функциональный генератор» на уровне 2,5 В с частотой 1 кГц и на протяжении всех опытов не изменять. Опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$  установить согласно таблице вариантов. Зарисовать с экрана осциллографа входное  $u_{\text{ВХ}}$  и выходное  $u_{\text{ВЫХ}}$  напряжения. Определить масштабы по осям  $Y$  и  $X$ ;

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

г) снять зависимость коэффициента заполнения положительных импульсов  $\gamma^+ = t_{\text{и}}^+ / T$  от величины опорного напряжения:  $\gamma^+ = f(U_{\text{оп}})$ . Здесь  $t_{\text{и}}^+$  – длительность положительных импульсов выходного напряжения;  $T$  – период выходного напряжения компаратора. Опорное напряжение изменять в пределах, которое обеспечивает работу компаратора (от  $-2,5$  до  $+2,5$  В). Длительность периода  $T$  и положительных импульсов  $t_{\text{и}}^+$  замерять по экрану осциллографа, а напряжение  $U_{\text{оп}}$  – вольтметром. Измеренные величины заносить в таблицу.

Выключить питание модуля.

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

а) собрать схему двухвходового компаратора с положительной обратной связью согласно рис. 4, соединив гнезда X10 – X13. Включить питание модуля;

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

в) снять передаточные характеристики компаратора для двух значений сопротивлений обратной связи ( $R5$ ) при заданном опорном напряжении, переключив развертку осциллографа в положение X/Y. Зарисовать характеристики на кальке. Определить ширину петли гистерезиса  $U_{\Gamma}$  передаточной характеристики и сделать сравнение с расчетом (см. п.1 г).

Выключить питание модуля.

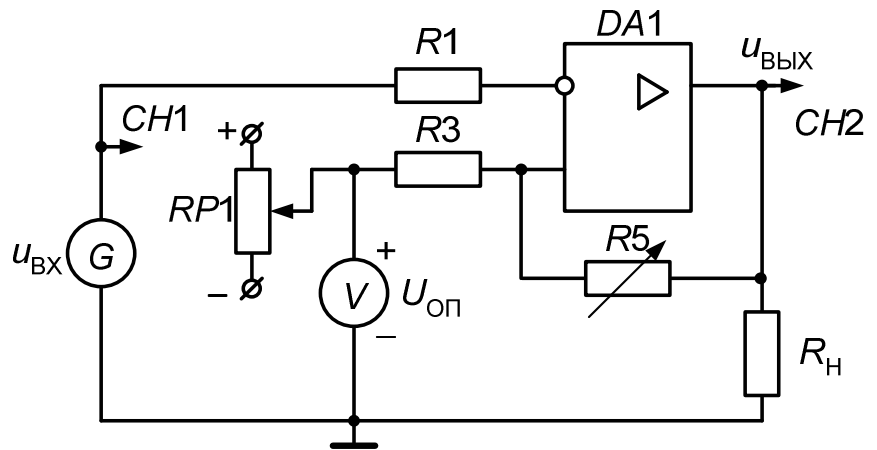


Рис. 4. Принципиальная схема регенеративного компаратора

5. Исследование мультивибратора:

а) собрать схему мультивибратора (рис. 5). Для этого отсоединить все источники напряжений от входных цепей операционного усилителя (гнезда X4, X8, X9, X12). Собрать цепь положительной обратной связи, соединив перемычкой гнезда: X10 – X13 и X12 – X14, а затем RC-цепь, установив дополнительные перемычки между гнездами: X6 – X7, X1 – X5 и X2 – X14. При помощи переключателей SA1, SA2 и SA4 установить заданные значения сопротивлений и емкостей в соответствии с таблицей вариантов. Включить питание модуля;

б) снять осциллограммы работы мультивибратора. Для этого канал CH2 осциллографа подключить к выходному гнезду X10 операционного усилителя, а канал CH1 – к инвертирующему входу ОУ

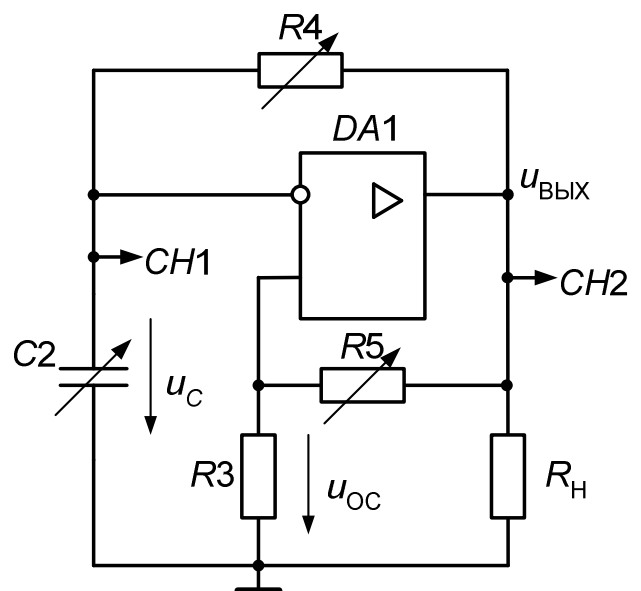


Рис. 5. Принципиальная схема мультивибратора



(гнездо  $X1$ ), корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с гнездом  $X14$ . Зарисовать с экрана осциллографа выходное напряжение  $u_{\text{ВЫХ}}$  и напряжение на инвертирующем входе  $u_c$  (напряжение на емкости  $C2$ ). Обработать осциллограммы. Определить масштабы по осям  $Y$  и  $X$ , частоту на выходе мультивибратора. Сравнить экспериментальное значение частоты на выходе мультивибратора с расчетной (см. п. 1 д);

в) исследовать влияние сопротивлений  $R4$  и  $R5$  на изменение частоты на выходе мультивибратора. Для этого с помощью переключателя  $SA1$  установить любое значение  $R4$ . Зарисовать осциллограммы сигналов:  $u_{\text{ВЫХ}}$  и  $u_c$ . Определить выходную частоту мультивибратора. Установить первоначальное значение сопротивления  $R4$ . Аналогичные действия повторить для сопротивления  $R5$ .

Выключить питание модуля.

### *Содержание отчета*

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой, показанной на рис. 1;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе:
  - сформулировать условия переключения одноходового, двухходового и регенеративного компараторов;
  - влияние сопротивления в цепи обратной связи регенеративного компаратора на его передаточную характеристику;
  - влияние сопротивлений  $R4$  и  $R5$  на выходную частоту мультивибратора.

### *Контрольные вопросы*

1. Что называется операционным усилителем?
2. Каковы основные параметры операционного усилителя?
3. Что называется компаратором?
4. Почему операционный усилитель, включенный без обратной связи, работает как релейный элемент (компаратор)?
5. Зачем в компараторе применяется положительная обратная связь?
6. Как получить периодические прямоугольные импульсы на выходе компаратора?
7. Что такое передаточная характеристика и как она выглядит для разных схем компаратора?
8. Как зависит вид передаточной характеристики регенеративного компаратора от сопротивления обратной связи?

9. Как снять передаточную характеристику компаратора при помощи осциллографа?

10. Что такое коэффициент заполнения? Как изменяется коэффициент заполнения от опорного напряжения при синусоидальном входном сигнале в разных схемах компаратора?

11. Что такое мультивибратор? Его принцип работы.

12. Как можно изменить частоту на выходе мультивибратора?

*Таблица вариантов*

№ варианта	$U_{оп}$ , В	$R_4$ , кОм	$R_5$ , кОм	$C_2$ , нФ
1	1,6	20	200	10
2	1,4	50	200	10
3	1,2	100	200	10
4	1,0	150	200	10
5	0,8	200	200	10
6	1,8	20	400	10
7	1,6	50	400	10
8	1,4	100	400	10
9	1,2	150	400	10
10	1,0	200	400	10
11	1,5	20	200	6,8
12	1,3	50	200	6,8
13	1,1	100	200	6,8
14	0,9	150	200	6,8
15	0,7	200	200	6,8
16	1,7	20	400	6,8
17	1,5	50	400	6,8
18	1,3	100	400	6,8
19	1,1	150	400	6,8
20	0,9	200	400	6,8
21	0,7	100	200	10
22	0,6	200	200	10
23	0,8	20	400	10
24	0,7	50	400	6,8

Примечания:

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

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 9  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
МИКРОСХЕМ

*Цель работы*

Ознакомление с основными функциями простейших логических элементов («И-НЕ», «И», «ИЛИ-НЕ», «ИЛИ», «НЕ», «Исключающее ИЛИ»).

*Описание лабораторной установки*

Работа проводится на лабораторном модуле «Логические элементы и триггеры», лицевая панель которого изображена на рис. 1.

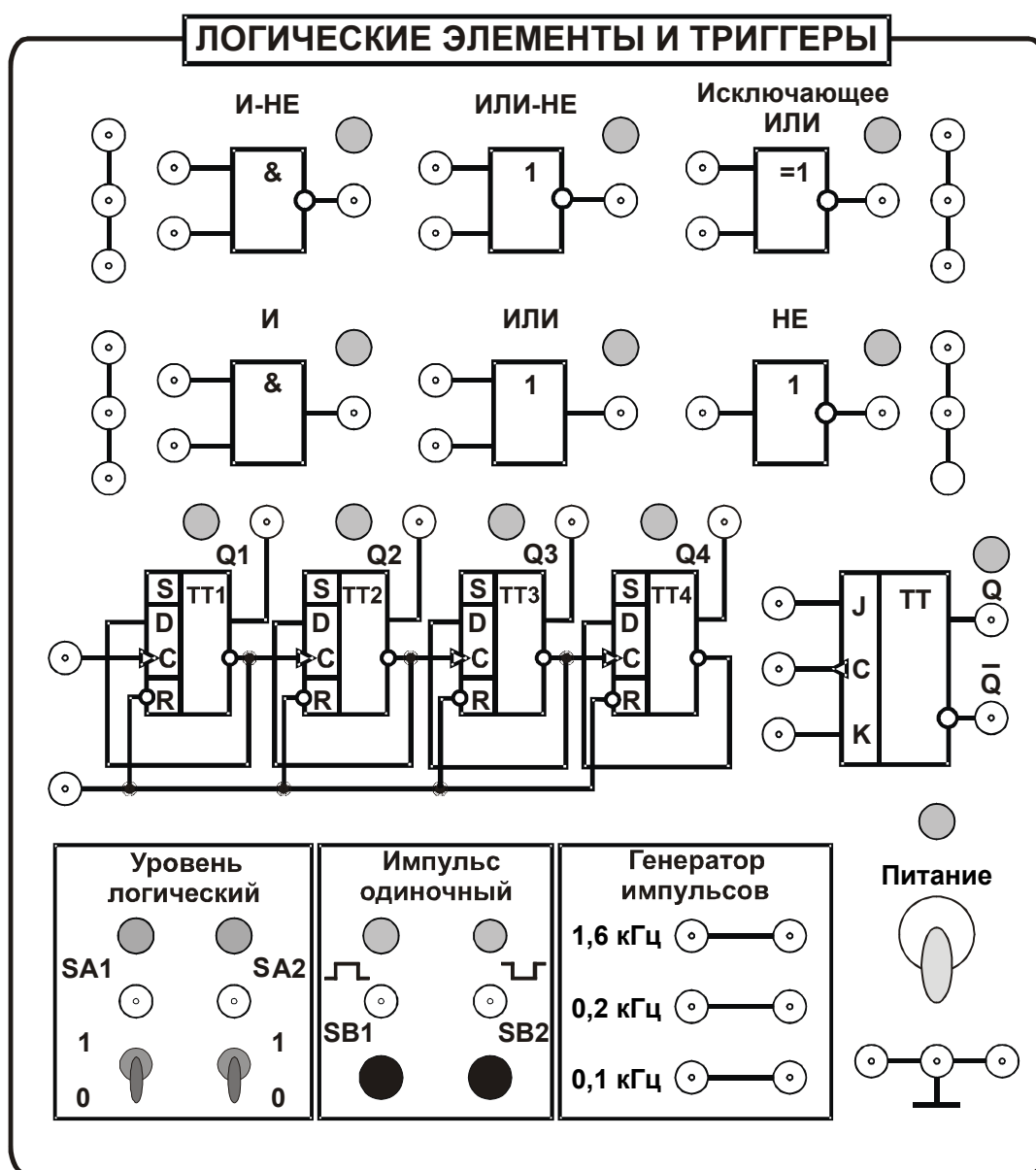


Рис. 1. Лицевая панель модуля «Логические элементы и триггеры»

В работе исследуются простейшие комбинационные логические схемы типа «И-НЕ», «И», «ИЛИ-НЕ», «ИЛИ», «НЕ», «Исключающее ИЛИ», внутренняя структура которых построена на основе КМОП-логики (комплиментарная структура «металл-окисел-полупроводник»).

Источник «Уровень логический» предназначен для формирования логических сигналов высокого «1» и низкого «0» уровней. Включение соответствующих сигналов осуществляется при помощи тумблеров SA1 и SA2. С помощью светодиодов осуществляется индикация сигналов, соответствующих логической «1».

Генератор «Импульс одиночный» формирует одиночные импульсы с положительной ( $\neg$ ) и отрицательной ( $\neg$ ) полярностью. При нажатии на кнопку SB1 на выходе генератора, находящемся в состоянии «0», вырабатывается сигнал логической «1», а при нажатии на кнопку SB2 – сигнал логического «0». С помощью светодиодов осуществляется индикация сигналов логической «1».

«Генератор импульсов» предназначен для образования последовательности прямоугольных импульсов с частотами 0,1 кГц; 0,2 кГц и 1,6 кГц.

Устройства коммутации (тумблеры, кнопки) предназначены для подключения входных цепей исследуемых схем к соответствующим гнездам. Органы управления и индикации объединены в функциональные группы и снабжены надписями на лицевой панели (рис. 1).

### *Задание и методические указания*

#### *1. Предварительное домашнее задание:*

а) изучить тему курса «Логические функции и элементы» [2, с. 583–589; 3, с. 200–211] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) начертить схему для исследования логических элементов «И», «ИЛИ-НЕ», составить их таблицу истинности, и построить временные диаграммы входных  $X1$ ,  $X2$  и выходных  $Y$  сигналов для заданной последовательности импульсов  $X1$ ,  $X2$  (рис. 2);

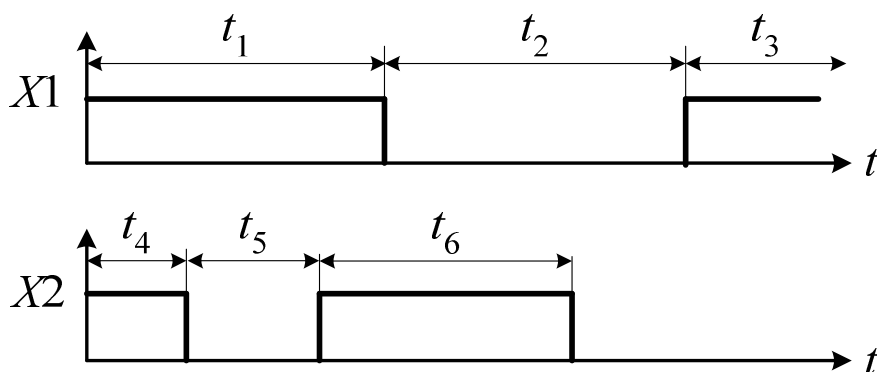


Рис. 2. Временные диаграммы входных сигналов

в) начертить схему для исследования логических элементов «ИЛИ», «И-НЕ», составить их таблицу истинности, и построить временные диаграммы входных

$X1$ ,  $X2$  и выходных  $Y$  сигналов для заданной последовательности импульсов  $X1$ ,  $X2$  (см. рис. 2);

г) начертить схему для исследования логических элементов «Исключающее ИЛИ», «НЕ», составить их таблицу истинности, и построить временные диаграммы входных  $X1$ ,  $X2$  и выходных  $Y$  сигналов для заданной последовательности импульсов  $X1$ ,  $X2$  (см. рис. 2). Для логического элемента «НЕ» в качестве входного сигнала использовать  $X1$ .

2. Экспериментальное исследование комбинационных цифровых интегральных микросхем:

а) составить таблицу истинности логического элемента «И-НЕ». Для этого собрать схему (рис. 3), подключив выходы гнезд «Уровень логический» к соответствующим входам логического элемента «И-НЕ». Включить тумблер «Питание». Задавая различные комбинации входных логических сигналов ( $X1$ ,  $X2$ ) тумблерами  $SA1$  и  $SA2$ , фиксировать по светодиоду выходной сигнал  $Y$  логического элемента. Составить таблицу истинности исследуемого элемента. Результаты занести в табл. 1. Выключить тумблер «Питание»;

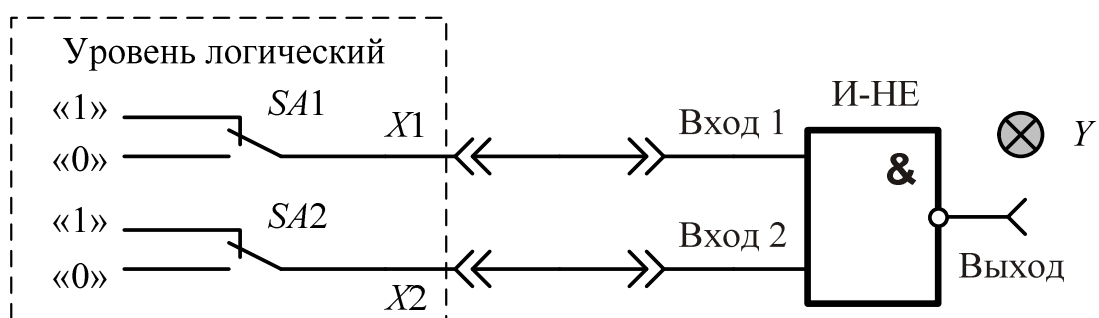


Рис. 3. Схема соединений для исследования логического элемента И-НЕ

Таблица 1

$X1$	$X2$	$Y$					
		И-НЕ	И	ИЛИ-НЕ	ИЛИ	НЕ	Исключающее ИЛИ
0	0						
1	0						
0	1						
1	1						

б) проверить работу логического элемента «И-НЕ», подключив выходные гнезда «Генератора импульсов» с частотой 0,1 кГц и 0,2 кГц к «Входу 1» и «Входу 2» логического элемента соответственно (см. рис. 3). Включить тумблер «Питание». Зарисовать временные диаграммы сигналов на входах и выходе логического элемента. Для этого осциллограф перевести в режим внешней синхронизации «EXT», соединив вход осциллографа «TRIG IN» с гнездом «Генератора импульсов» 0,1 кГц. Затем вход осциллографа  $CH1$  подключить к «Входу 1» элемента «И-НЕ», а вход осциллографа  $CH2$  – к «Входу 2» элемента (корпус осцилло-

графа « $\perp$ » соединить с общей точкой модуля). Для размножения входов элемента «И-НЕ» использовать коннекторы. Зарисовать на кальке входные сигналы друг под другом. Переключить вход осциллографа *CH2* к «Выходу» элемента «И-НЕ», и зарисовать на той же кальке выходной сигнал. Выключить тумблер «Питание»;

в) аналогично выполнить п. а и б для логических элементов «И», «ИЛИ-НЕ», «ИЛИ», «НЕ», «Исключающее ИЛИ».

### *Содержание отчета*

Отчет должен содержать следующие пункты:

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой, показанной на рис. 1;
- в) результаты экспериментальных исследований, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Какие виды логики вы знаете?
2. Назовите основные преимущества и недостатки КМОМ-логики по сравнению с ТТЛ.
3. Какие логические элементы исследуются в данной работе и к какому виду логики они относятся?
4. Перечислите основные параметры логических элементов.
5. Приведите структурную схему логического элемента «И-НЕ» на основе ТТЛ и КМОМ-логики.
6. Составьте таблицы истинности для логических элементов «И-НЕ», «И», «ИЛИ-НЕ», «ИЛИ», «НЕ», «Исключающее ИЛИ».
7. Нарисуйте схемные обозначения трехвходовых логических элементов «И-НЕ», «И», «ИЛИ-НЕ», «ИЛИ», «НЕ», «Исключающее ИЛИ».
8. Можно ли использовать логический элемент «Исключающее ИЛИ» в качестве элемента «НЕ»? Если да, то как; если нет, то почему?
9. Как составить таблицу истинности логического элемента в лабораторной работе?
10. Как снять временные диаграммы входных и выходных сигналов логического элемента при помощи осциллографа в лабораторной работе?

Таблица вариантов

№ варианта		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X1	$t_1$ , мс	2,5	1	1,5	0,5	3,5	0,5	2	2,5	0,5	3,5	4	0,5
	$t_2$ , мс	1,5	2,5	1	3	0,5	3	1,5	1	2	0,5	1	1,5
	$t_3$ , мс	1	3	2,5	1	1	1,5	1,5	1,5	2	0,5	0,5	4
X2	$t_4$ , мс	0,5	1,5	0,5	1,5	1	2	1,5	0,5	1	1,5	3	1
	$t_5$ , мс	4	1	3	1	1	2	1,5	3,5	2,5	1	2	2,5
	$t_6$ , мс	1	0,5	0,5	2,5	1	0,5	1,5	0,5	1	0,5	1	1,5
№ варианта		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
X1	$t_1$ , мс	1	0,5	1,5	2	2,5	3	3,5	4	0,5	2	3,5	1,5
	$t_2$ , мс	2	4	1,5	2	0,5	1	1	1	4	1	1	1
	$t_3$ , мс	3	2	1	0,5	1,5	1	0,5	0,5	2	2,5	1	0,5
X2	$t_4$ , мс	0,5	2	0,5	2,5	0,5	2	1,5	3	1	1,5	0,5	3,5
	$t_5$ , мс	1	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1	2	0,5	1	1	0,5
	$t_6$ , мс	4	2	2,5	0,5	2	1,5	0,5	1	3,5	1,5	2,5	0,5

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б; подвариант Б – пп. 1 а, в; подвариант В – пп. 1 а, г.

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

Работа № 10  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТНЫХ ЦИФРОВЫХ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

*Цель работы*

Изучение работы триггеров и двоичного асинхронного суммирующего счетчика в интегральном исполнении.

*Описание лабораторного модуля*

Работа проводится на лабораторном модуле «Логические элементы и триггеры», лицевая панель которого изображена на рис. 1.

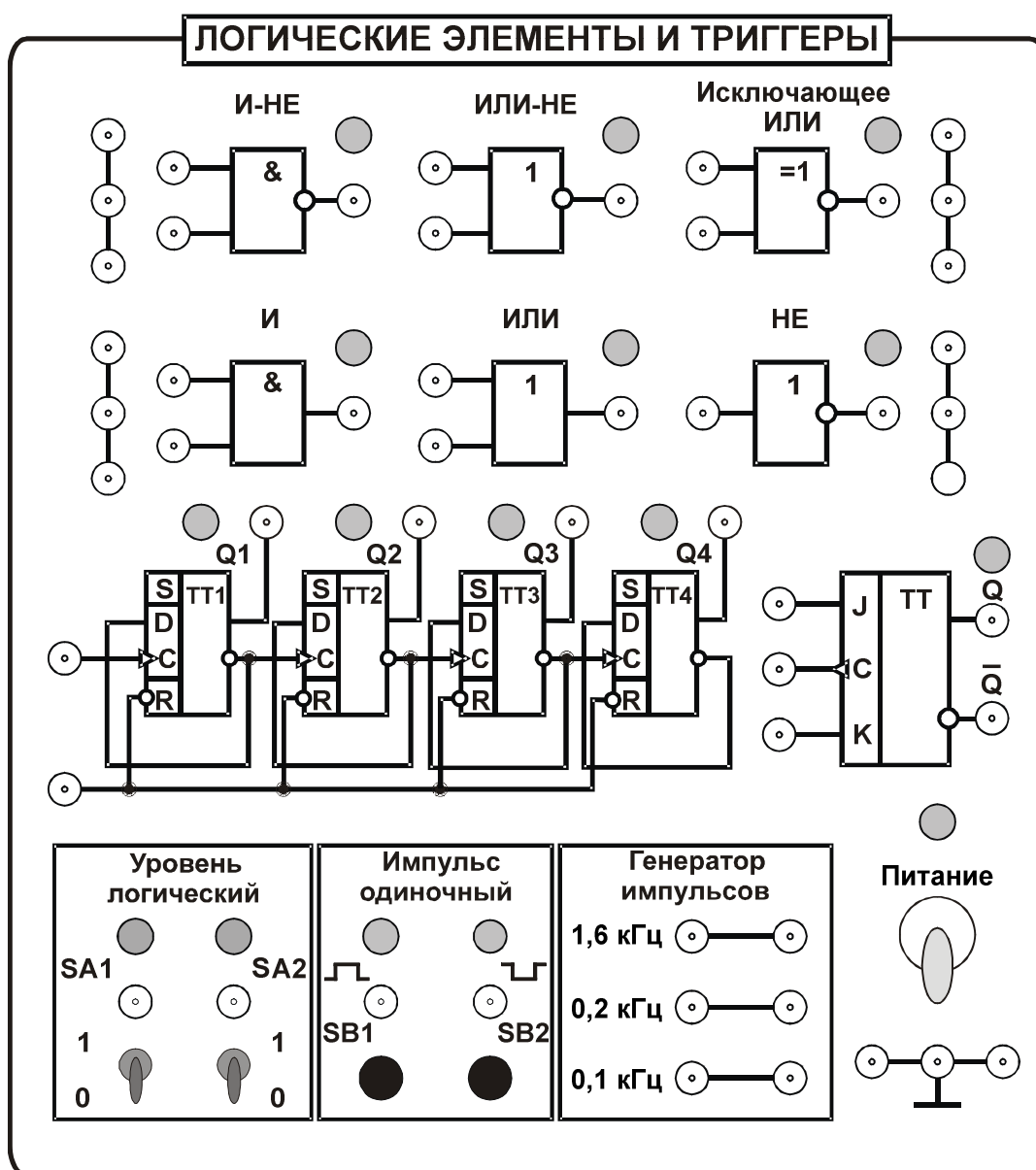


Рис. 1. Лицевая панель модуля «Логические элементы и триггеры»



В работе исследуются следующие последовательностные цифровые схемы: *JK*-триггер, *RS*-триггер, собираемый, например, на основе двух логических элементов «И-НЕ», асинхронный четырехразрядный двоичный счетчик, который имеет общий вход сброса «*R*», счетный вход «*C*» и четыре выхода (*Q*<sub>1</sub>, *Q*<sub>2</sub>, *Q*<sub>3</sub>, *Q*<sub>4</sub>), соответствующие младшему и старшему разрядам четырехразрядного кода соответственно. Все исследуемые цифровые микросхемы построены на основе КМОП-логики (комплиментарная структура «металл-окисел-полупроводник»).

Источник «Уровень логический» предназначен для формирования логических сигналов высокого «1» и низкого «0» уровней. Включение соответствующих сигналов осуществляется при помощи тумблеров *SA*<sub>1</sub> и *SA*<sub>2</sub>. С помощью светодиодов осуществляется индикация сигналов, соответствующих логической «1».

Генератор «Импульс одиночный» формирует одиночные импульсы с положительной ( $\neg$ ) и отрицательной ( $\neg$ ) полярностью. При нажатии на кнопку *SB*<sub>1</sub> на выходе генератора, находящемся в состоянии «0», вырабатывается сигнал логической «1», а при нажатии на кнопку *SB*<sub>2</sub> – сигнал логического «0». С помощью светодиодов осуществляется индикация сигналов логической «1».

«Генератор импульсов» предназначен для образования последовательности прямоугольных импульсов с частотами 0,1 кГц; 0,2 кГц и 1,6 кГц.

Устройства коммутации (тумблеры, кнопки) предназначены для подключения входных цепей исследуемых схем к соответствующим гнездам. Органы управления и индикации объединены в функциональные группы и снабжены надписями на лицевой панели (рис. 1).

### *Задание и методические указания*

#### *1. Предварительное домашнее задание:*

а) изучить тему курса «Триггеры», «Счетчики» [1, с. 538–589, 614–631, 666–670; 3, с. 249–250, с. 258–260] и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) начертить схему *RS*-триггера с инверсным управлением, состоящего из двух логических элементов «И-НЕ», и построить его временные диаграммы сигналов для заданной последовательности импульсов  $S = X_1$  и  $R = X_2$  (рис. 2). Показать временные диаграммы  $S$ ,  $R$ ,  $Q$ ,  $\bar{Q}$  синхронно друг под другом;

в) начертить схему *JK*-триггера, и построить его временные диаграммы сигналов для заданной последовательности импульсов  $J = X_1$ ,  $K = X_2$ ,  $C = X_3$  (см. рис. 2). Показать временные диаграммы  $J$ ,  $K$ ,  $C$ ,  $Q$ ,  $\bar{Q}$  синхронно друг под другом;

г) начертить схему асинхронного четырехразрядного двоичного счетчика, состоящего из *D*-триггеров, и построить его временные диаграммы сигналов для заданной последовательности импульсов  $C = X_4$ ,  $R = X_5$  (см. рис. 2). Показать временные диаграммы  $C$ ,  $R$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  синхронно друг под другом.

2. Экспериментальное исследование *RS*-триггера:

а) собрать схему *RS*-триггера, соединив переключками логические элементы «И-НЕ», «И», «НЕ», в соответствии с рис. 3. Для размножения гнезд использовать коннекторы. *S* и *R* входы подключить к выходным гнездам «Уровень логический». Включить тумблер «Питание»;

б) задавая тумблерами *SA1* и *SA2* различные комбинации входных логических сигналов, подаваемых на входы *S* и *R*, составить таблицу истинности *RS*-триггера. Уровню логической «1» на выходе триггера *Q* и  $\bar{Q}$  соответствует свечение светодиода. Результаты занести в табл. 1. Выключить тумблер «Питание»;

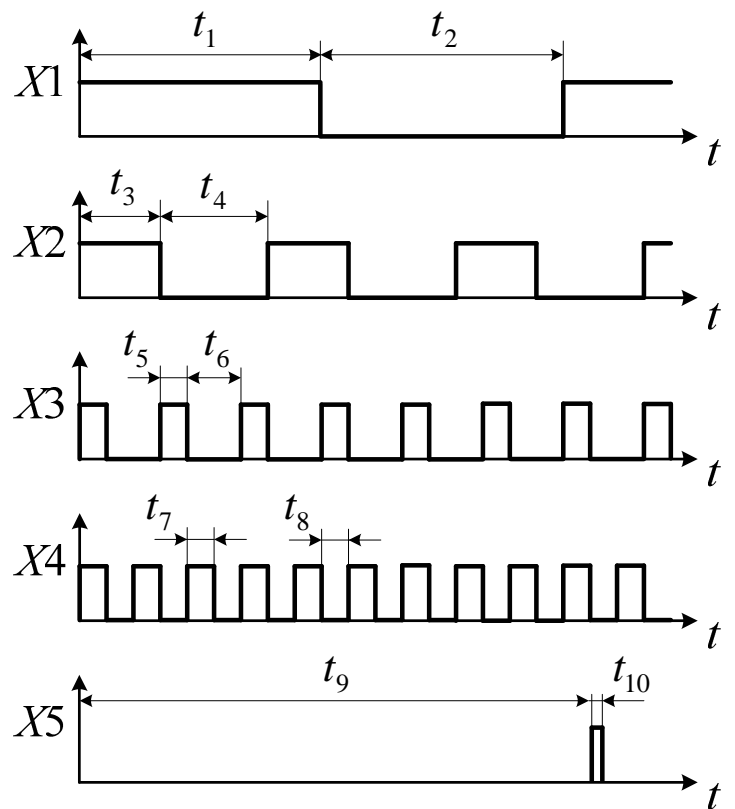


Рис.2. Временные диаграммы входных сигналов

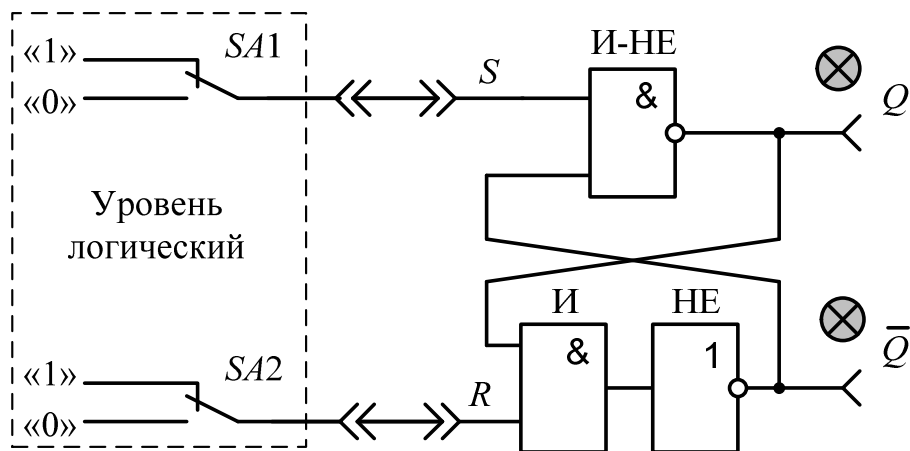


Рис. 3. Схема соединений для исследования *RS*-триггера

Таблица 1

<i>S</i>	<i>R</i>	<i>Q</i>	$\bar{Q}$
0	1		
1	0		
1	1		
0	0		

Примечание: комбинация входных сигналов  $R = S = 0$  является запрещенной!

в) проверить работу  $RS$ -триггера, подключив выходные гнезда «Генератора импульсов» с частотой 0,1 кГц и 0,2 кГц к  $S$  и  $R$  входам триггера соответственно (рис. 3). Включить тумблер «Питание». Зарисовать временные диаграммы сигналов на входах и выходах  $RS$ -триггера. Для этого осциллограф перевести в режим внешней синхронизации « $EXT$ », соединив вход осциллографа « $TRIG IN$ » с гнездом «Генератора импульсов» 0,1 кГц. Затем вход осциллографа  $CH1$  подключить к входу  $S$  триггера, а вход осциллографа  $CH2$  – к входу  $R$  (корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с общей точкой модуля). Зарисовать на кальке входные сигналы друг под другом. Переключить вход осциллографа  $CH2$  к выходу  $Q$ , а затем к инверсному выходу  $\bar{Q}$  триггера, зарисовать на той же кальке выходные сигналы. Для размножения входов и выходов  $RS$ -триггера использовать коннекторы. Выключить тумблер «Питание».

### 3. Исследование $JK$ -триггера:

а) собрать схему  $JK$ -триггера в соответствии с рис. 4. Для этого  $J$  и  $K$  входы подключить к выходным гнездам «Уровень логический», а синхронизирующий вход  $C$  – к гнезду ( $\sqcap$ ) генератора «Импульс одиночный». Включить тумблер «Питание»;

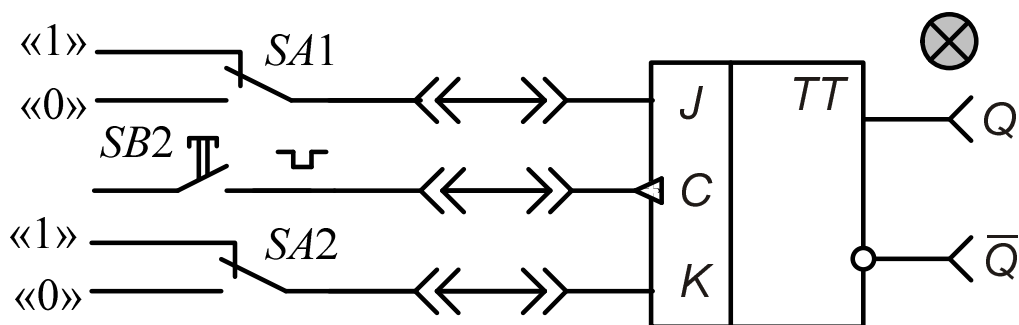


Рис. 4. Схема соединений  $JK$ -триггера

б) задавая тумблерами  $SA1$  и  $SA2$  различные комбинации входных логических сигналов при одновременном нажатии на кнопку  $SB2$  (синхронизирующий импульс), составить таблицу истинности  $JK$ -триггера. Уровню логической «1» на выходе триггера  $Q$  соответствует свечение светодиода. Состояние инверсного выхода  $\bar{Q}$  определять при помощи осциллографа. Результаты занести в табл. 1. Обратите внимание, на каком фронте синхроимпульса « $C$ » происходит переключение  $JK$ -триггера. Выключить тумблер «Питание»;

Таблица 2

$J$	$K$	$C$	$Q$	$\bar{Q}$
1	0	$\sqcap$		
0	1	$\sqcap$		
1	0	$\sqcap$		
1	1	$\sqcap$		

в) проверить работу  $JK$ -триггера в счетном режиме. Для этого на входы  $J$  и  $K$  подать сигналы логической «1» с выходных гнезд «Уровень логический», а на вход  $C$  – прямоугольные импульсы с частотой 1,6 кГц с выхода «Генератора импульсов». Нарисовать три осциллограммы на одном рисунке:  $C(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $\bar{Q}(t)$ . Сначала вход осциллографа  $CH1$  подключить к синхронизирующему входу  $C$  триггера, а вход осциллографа  $CH2$  – к выходу  $Q$  (корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с общей точкой модуля), затем переключить вход осциллографа  $CH2$  к инверсному выходу  $\bar{Q}$  триггера, зарисовать на кальке осциллограммы сигналов синхронно друг под другом. Убедиться, что сигналы  $Q$  и  $\bar{Q}$  противоположны по знаку. Выключить тумблер «Питание».

#### 4. Исследование асинхронного четырехразрядного двоичного счетчика:

а) составить таблицу состояний асинхронного четырехразрядного двоичного счетчика. Для этого собрать схему в соответствии с рис. 5, подключив выходные гнезда генератора «Импульс одиночный» к синхронизирующему  $C$  и  $R$  входам счетчика. Включив питание модуля, установить все разряды счетчика ( $Q1 - Q4$ ) в исходное (нулевое) положение. Для этого нажать на кнопку  $SB2$ , и подать сигнал логического «0» на входы  $R$  всех триггеров. Составить таблицу состояния счетчика (табл. 3), периодически нажимая на кнопку  $SB1$ , формирующей одиночные положительные импульсы ( $\neg$ ) на входе  $C$  счетчика. Состояния выходных разрядов счетчика ( $Q1, Q2, Q3, Q4$ ) определять по свечению светодиодов.

Выключить тумблер «Питание»;

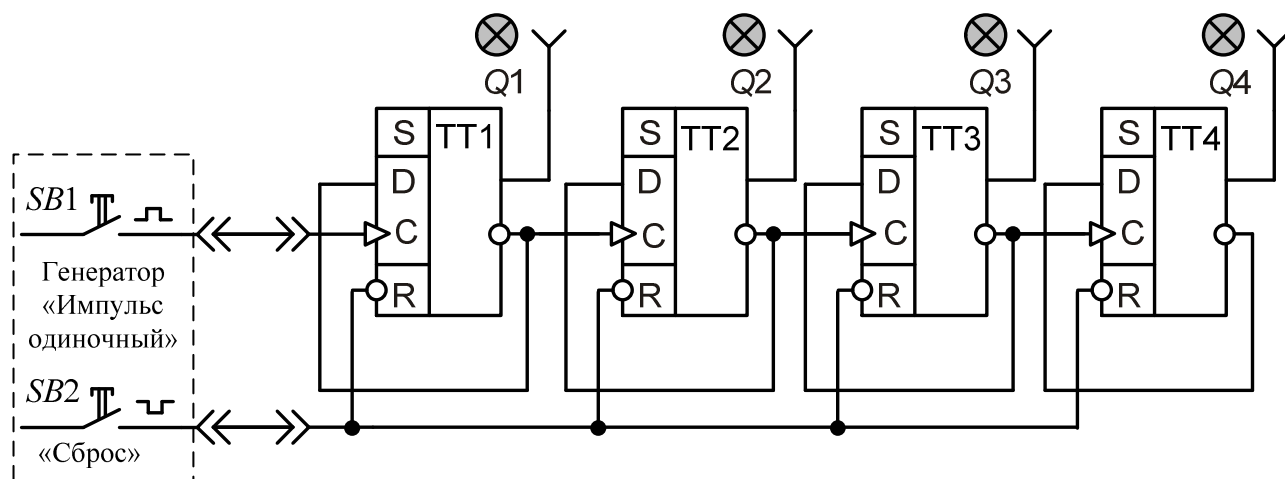


Рис. 5. Схема соединений для исследования асинхронного четырехразрядного двоичного счетчика

б) проверить работу счетчика, подключив выходное гнездо «Генератора импульсов» с частотой 1,6 кГц к синхронизирующему  $C$  входу. Включить тумблер «Питание». Зарисовать временные диаграммы сигналов на входе  $C$  и выходах  $Q1, Q2, Q3$  счетчика. Для этого осциллограф перевести в режим внешней синхронизации « $EXT$ », соединив вход осциллографа « $TRIG IN$ » с выходом старшего разряда

счетчика  $Q4$ . Масштаб развертки осциллографа  $TIME/DIV$  перевести в положение  $0,5 \text{ ms}/DIV$ . Затем вход осциллографа  $CH1$  подключить к выходу младшего разряда  $Q1$  счетчика, а вход осциллографа  $CH2$  – к входу  $C$  (корпус осциллографа «L» соединить с общей точкой модуля). Зарисовать на кальке сигналы  $C$  и  $Q1$  друг под другом. Последовательно переключая вход осциллографа  $CH1$  к выходам  $Q2$ ,  $Q3$ , зарисовать на той же кальке выходные сигналы счетчика.

Выключить тумблер «Питание».

Таблица 3

№ импульса (вход $C$ )	Выходы			
	$Q4$	$Q3$	$Q2$	$Q1$
Уст. «0»				
1				
2				
.....	.....	.....	.....	.....
15				

### Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие пункты:

- наименование и цель работы;
- принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов в соответствии с мнемосхемой, показанной на рис. 1;
- результаты экспериментальных исследований, помещенные в соответствующие таблицы;
- обработанные осциллограммы;
- выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- Что называется триггером?
- Чем отличаются последовательностные схемы от комбинационных?
- Что означает термин «запрещенная комбинация» для  $RS$ -триггера?
- При каких комбинациях входных сигналов изменяется состояние  $RS$ -триггера?
- В каком положении устанавливается выход  $Q$  и  $\bar{Q}$   $JK$ -триггера после ухода синхронизирующего импульса для различных сочетаний сигналов  $J$  и  $K$ ?
- Чем отличаются таблицы истинности  $RS$  и  $JK$ -триггера?
- Нарисуйте схему  $T$ -триггера, реализованную на базе  $JK$ -триггера.
- Нарисуйте схему  $D$ -триггера, реализованную на базе  $JK$ -триггера.
- На основе каких элементов строятся счетчики?
- Нарисовать схему двоичного суммирующего четырехразрядного счетчика на базе  $JK$ -триггеров?

11. Чем отличаются асинхронные счетчики от синхронных? Перечислить основные преимущества синхронных счетчиков по сравнению с асинхронными.

12. Что нужно изменить в мнемосхеме суммирующего счетчика (рис. 1), чтобы получить вычитающий асинхронный счетчик?

13. Сколько разрядов должен иметь двоичный счетчик, чтобы обеспечить возможность счета 64 импульсов?

*Таблица вариантов*

№ варианта	Сигнал									
	X1		X2		X3		X4		X5	
	$t_1$ , мс	$t_2$ , мс	$t_3$ , мс	$t_4$ , мс	$t_5$ , мс	$t_6$ , мс	$t_7$ , мс	$t_8$ , мс	$t_9$ , мс	$t_{10}$ , мс
1, 9, 17	30	30	15	20	2	25	2	2	46	1
2, 10, 18	25	20	15	15	2	29	2	2	50	1
3, 11, 19	20	25	15	10	2	31	2	2	58	1
4, 12, 20	35	20	20	15	2	33	2	2	38	1
5, 13, 21	20	30	20	10	4	25	1	1	28	0,5
6, 14, 22	35	30	25	15	4	27	1	1	26	0,5
7, 15, 23	30	40	25	10	4	29	1	1	22	0,5
8, 16, 24	30	35	25	5	4	31	1	1	18	0,5

Примечания:

1. При выполнении предварительного домашнего задания студенты, получившие подвариант А, выполняют пп. 1 а, б; подвариант Б – пп. 1 а, в; подвариант В – пп. 1 а, г.

2. При вычерчивании схем для заданного подварианта использовать мнемосхему, приведенную на рис. 1, и описание к ней.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гельман, М.В. Преобразовательная техника. Полупроводниковые приборы и элементы микроэлектроники: учебное пособие / М.В. Гельман. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – Ч. 1. – 106 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: учебник для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2004. – 790 с.
3. Цытович, Л.И. Элементы аналоговой и цифровой электроники в автоматизированном электроприводе: учебник для вузов / Л.И. Цытович. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2001. – 480 с.
4. Электротехника: учебное пособие: в 3 кн. / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – М.: Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – Т. 2. – 711 с.
5. Горбачев, Г.Н. Промышленная электроника / Г.Н. Горбачев, Е.Е Чаплыгин. – М.: Энергоиздат, 1988. – 320 с.
6. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Описание лабораторного комплекса .....	4
Общие рекомендации к выполнению лабораторных работ .....	11
Работа №1. Исследование диодов, неуправляемого выпрямителя и параметрического стабилизатора напряжения .....	14
Работа №2. Исследование биполярного транзистора и транзисторного усилительного каскада .....	22
Работа №3. Исследование полевого транзистора и транзисторного усилительного каскада .....	32
Работа №4. Исследование тиристоров, симисторов, запираемых тиристоров, управляемых выпрямителей и преобразователей переменного напряжения .....	42
Работа №5. Исследование инвертирующего усилителя, интегратора и компаратора .....	51
Работа №6. Исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителя .....	60
Работа №7. Исследование инвертирующего, суммирующего и вычитающего операционных усилителей .....	67
Работа №8. Исследование компараторов и мультивибратора .....	76
Работа №9. Исследование комбинационных цифровых интегральных микросхем .....	83
Работа №10. Исследование последовательных цифровых интегральных микросхем .....	88
Библиографический список .....	95