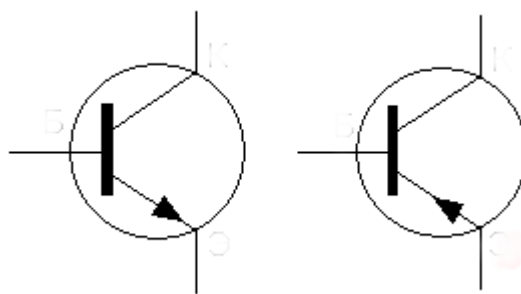


Р. Н. Кулагин, Н. В. Федорова

ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 1

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ
И УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Р.Н.Кулагин, Н.В.Федорова

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Часть 1

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСИЛИТЕЛЬНЫЕ
УСТРОЙСТВА**



Волгоград
2012

УДК 621.038

Рецензенты: кафедра «Информационные системы и технологии»
НОУ ВПО «Волгоградский институт бизнеса», зав. кафедрой
канд. техн. наук С. В. Шостенко

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волго-
градского государственного технического университета

Кулагин, Р.Н. Электроника (Учебное пособие). В 2-х ч. – Ч.1 По-
лупроводниковые приборы и усилительные устройства/Сост. Р.Н.Кулагин,
Н.В.Федорова; ВолГТУ. - Волгоград, 2012. - 48 с.

Даны краткие сведения о полупроводниковых приборах и усилительных устрой-
ствах и методические указания по выполнению лабораторных работ и практических за-
даний по 1-ой части курса "Электроника".

Предназначено для студентов очной и заочной формы обучения по направлени-
ям бакалавриата 220400 «Управление в технических системах» и 220700 «Автоматиза-
ция технологических процессов и производств».

Табл. 21. Ил. 21. Библиогр. 2

ISBN

© Волгоградский
государственный
технический
университет 2012

Оглавление

1. Лабораторный практикум	4
Лабораторная работа № 1 «Исследование характеристик полупроводниковых приборов	6
Лабораторная работа № 2 «Исследование усилительных каскадов на биполярном транзисторе»	15
Лабораторная работа № 3 «Исследование транзисторного трехкаскадного усилителя напряжения и мощности	21
Лабораторная работа № 4 «Исследование интегрально-го операционного усилителя»	27
2. Сборник задач	35
2.1. Основные компоненты электронной техники	35
2.2. Усилительные устройства	42
Список рекомендуемой литературы	47

1.ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Описание лабораторного стенда

Все лабораторные работы выполняются фронтальным методом на универсальных стендах, содержащих 12 исследуемых схем, обозначенных соответствующими номерами и расположенных на двух панелях стенда.

Схемы на левой панели относятся к курсу «Электроника», на правой панели – к курсу «Технические средства автоматизации».

Необходимые соединения элементов схем производятся с помощью гнезд и перемычек между ними.

Средняя панель стенда служит для включения 4-х источников напряжения. Верхний тумблер на этой панели включает сетевое напряжение 220 В. При этом загорается сигнальная лампочка над тумблером.

Второй тумблер включает источник постоянного напряжения «плюс» 5 В, которое можно регулировать рукояткой потенциометра R1, а измерять внешним вольтметром на гнездах под рукояткой.

Третий тумблер имеет три положения. Верхнее положение обеспечивает включение источника постоянного напряжения «плюс» 8 В. нижнее - источника постоянного напряжения «минус» 8 В. В среднем положении тумблера эти источники отключаются.

Регулирование уровня напряжения указанных источников осуществляется рукояткой потенциометра R2, а его измерение можно произвести на гнездах под этой рукояткой.

Четвертым источником является генератор переменного напряжения, частота которого устанавливается переключателем на 11 положений, соответствующих частотам: 32 Гц, 64 Гц, 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц, 1 КГц, 2 кГц, 4 кГц, 8 кГц, 16 кГц, 32 кГц.

Уровень напряжения на выходе генератора можно регулировать рукояткой потенциометра R3 в пределах 0 – 50 мВ, а измерять - на гнездах под этой рукояткой.

Потенциометры R1, R2, R3 соединены с исследуемыми схемами проводами внутри стенда.

Сборка схем должна производиться при выключенном сетевом напряжении, для чего верхний тумблер переводится в нижнее положение. После проверки преподавателем стенд включается в работу в соответствии с методическими указаниями.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить принцип действия и характеристики биполярного транзистора (БТ), полевого транзистора (ПТ) и тиристора. Определить основные параметры приборов.

1. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 1.1. Исследование входных и выходных характеристик БТ. Определение параметров $r_{вх}$, $g_{вых}$.
- 1.2. Исследование усилительных свойств БТ. Определение коэффициента усиления β .
- 1.3. Снятие выходных и сток–затворных характеристик ПТ с управляющим $p-n$ переходом. Определение параметров $I_{с.нач.}$, S , $U_{отс.}$.
- 1.4. Ознакомление с работой тиристора и определение его параметров $U_{у.от.}$, $I_{у.от.}$, $U_{отк.}$.

2. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

2.1. Принцип работы БТ

В зависимости от принципа действия и конструктивных признаков транзисторы подразделяются на два класса: биполярные и полевые.

Биполярными транзисторами называют приборы с тремя слоями полупроводника и двумя взаимодействующими $p-n$ переходами. Ток в этих приборах образуется за счёт носителей зарядов двух типов: электронов и дырок. В зависимости от типа электропроводности различают транзисторы структуры $p-n-p$ и $n-p-n$. В биполярном транзисторе к одному переходу прикладывается небольшое прямое напряжение, а к другому – обратное. При этом переход, к которому приложено прямое напряжение, называют эмиттерным (Э), средний слой – базой (Б), а второй переход, смещённый в

обратном направлении, – коллекторным (К). Условные обозначения транзисторов разной проводимости приведены на рис 1.1.

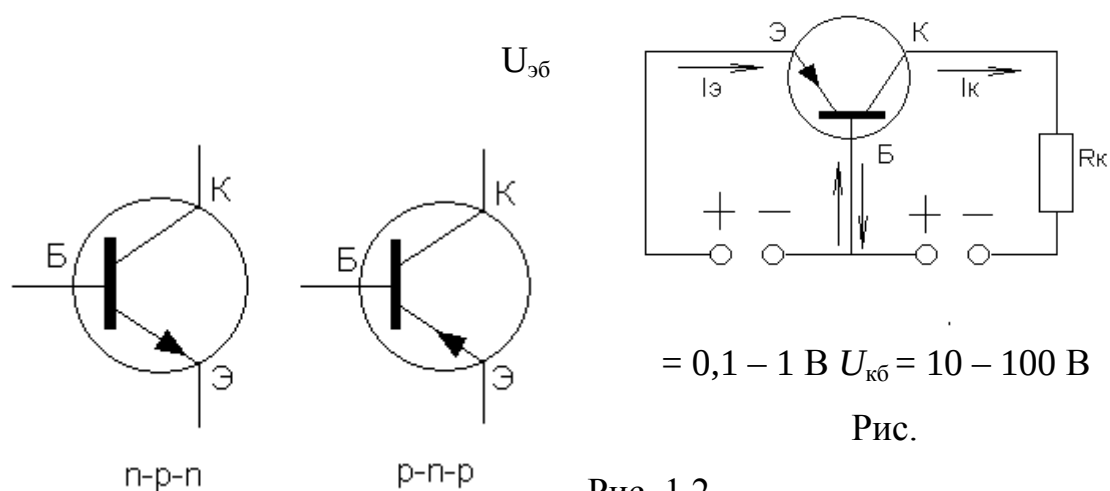


Рис. 1.2

При отсутствии входного напряжения ($U_{эб} = 0$) ток в эмиттере также отсутствует, а через переход К – Б под действием напряжения $U_{кб}$ протекает небольшой обратный ток коллектора I_k , обусловленный неосновными носителями.

Если к переходу Э – Б приложить открывающее напряжение ($U_{эб} > 0$) (рис. 1.2), возникает значительный прямой ток эмиттера $I_э$, который частично обусловлен рекомбинацией основных носителей в базе. Большая часть этих носителей заряда проходит через тонкий слой базы, имеющий большое удельное сопротивление, достигает коллектора и под действием $U_{кб}$ образует основную составляющую выходного тока коллектора:

$$I_k = I_{k0} + \alpha I_э,$$

где $\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э}$ – коэффициент передачи тока.

Так как напряжение источника питания $U_{кб}$ в выходной цепи больше, чем во входной, то всякое небольшое изменение входного напряжения вызывает значительные изменения напряжения на нагрузке R_k , включённой в цепь коллектора. На этом основан принцип усиления напряжения в

транзисторном каскаде.

Свойства транзистора и его вольт–амперные характеристики зависят от схемы включения, среди которых наиболее распространена схема включения с общим эмиттером (ОЭ), исследуемая в данной работе. В этой схеме транзистор имеет большую чувствительность по сравнению с рассмотренной схемой ОБ, входной ток базы значительно меньше тока I_y .

$$\begin{cases} I_a = I_y - I_e = (1 - \alpha) I_y - I_{e0} \ll I_y, \\ I_e = \beta I_a + (\beta + 1) I_{e0} \end{cases}$$

Входные характеристики БТ (рис. 1.3) для схемы ОЭ показывают зависимость $I_b = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$. Эти характеристики дают возможность определить входное сопротивление БТ по постоянному току $r_{вх=}$ и по переменному току (дифференциальное) $r_{вх\sim}$:

$$r_{вх=} = \frac{U_{бэ}}{I_{бэ}} = \text{tg } \theta; \quad r_{вх\sim} = h_{11} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_b} = \text{tg } \gamma.$$

Выходные характеристики БТ отражают зависимость $I_k = f(U_{кэ})$ при $I_b = \text{const}$ (рис. 1.4) и позволяет определить выходную проводимость по постоянному и переменному току:

$$g_{вых=} = \frac{I_k}{U_{кэ}} = \text{tg } \theta; \quad g_{вых\sim} = h_{22} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{кэ}} = \text{tg } \gamma.$$

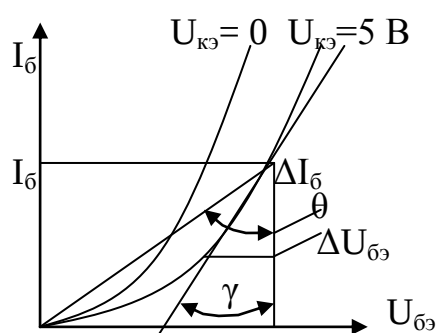


Рис. 1.3. Входные характеристики биполярного транзистора

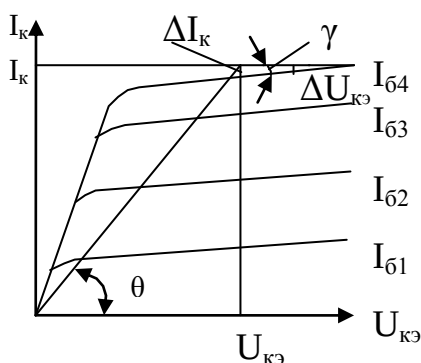


Рис. 1.4. Выходные характеристики биполярного транзистора

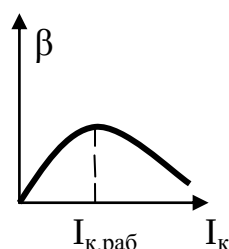


Рис. 1.5

Усилительные свойства БТ характеризуются коэффициентом передачи тока β (рис. 1.5).

2.2. Принцип работы ПТ

Приборы, работа которых основана на модуляции сопротивления полупроводникового материала электрическим полем, называются полевыми транзисторами. У них в создании тока участвуют носители заряда только одного типа: дырки или электроны, в зависимости от типа полупроводника в канале.

Полевые транзисторы бывают двух видов: с управляющим $p-n$ переходом и с изолированным затвором.

Транзистор с управляющим $p-n$ переходом представляет собой пластинку из полупроводникового материала (рис. 1.6), имеющего электропроводность определённого типа, от концов которой сделаны два вывода: электроды стока (С) и истока (И). Вдоль пластины выполнен электрический $p-n$ переход, от которого сделан третий вывод – затвор (З). Внешнее напряжение $U_{си}$ вызывает между электродами стока и истока протекание электрического тока, а напряжение, приложенное к затвору, смещает электрический переход в обратном направлении. Сопротивление области полупроводника, расположенной под электрическим переходом, которая носит название канала, зависит от напряжения на затворе. Это обусловлено тем, что размеры перехода и области, обеднённой носителями, увеличиваются с увеличением приложенного к нему обратного напряжения $U_{зи}$, а часть канала, проводящая ток I_c , уменьшается. Напряжение между затвором и истоком, при котором ток стока I_c становится практически равным нулю, называют напряжением отсечки $U_{отс}$. В зависимости от типа проводимости различают n – и p – каналные транзисторы. Условные графические обозначения полевых транзисторов с управляющим $p-n$ переходом приведены на рис. 1.7.

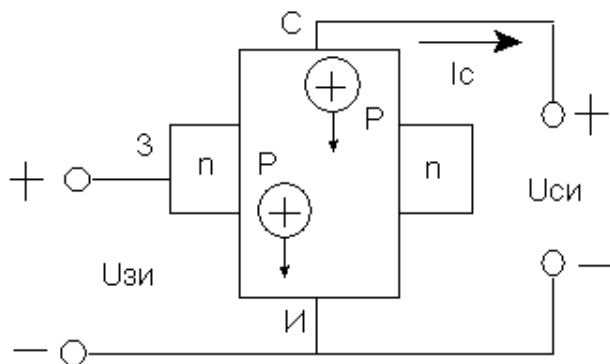


Рис. 1.6

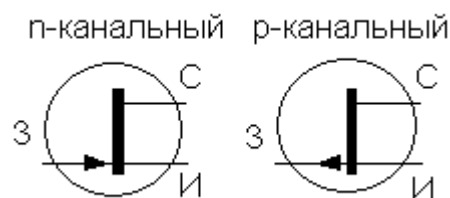


Рис.1.7

Выходные характеристики полевого транзистора $I_c = f(U_{си})$ аналогичны характеристикам биполярного транзистора, с тем отличием, что вместо $I_б$ фигурирует напряжение на затворе $U_{зи}$ (рис. 1.3). Входные характеристики полевого транзистора интереса не представляют, поскольку полностью совпадают с обратной ветвью $p-n$ перехода. Вместо них используется характеристика передачи или сток – затворная. Вид этих характеристик представлен на рис. 1.8 и рис. 1.9.

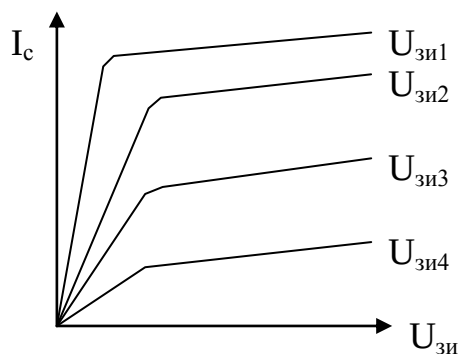


Рис. 1.8. Выходные характеристики полевого транзистора

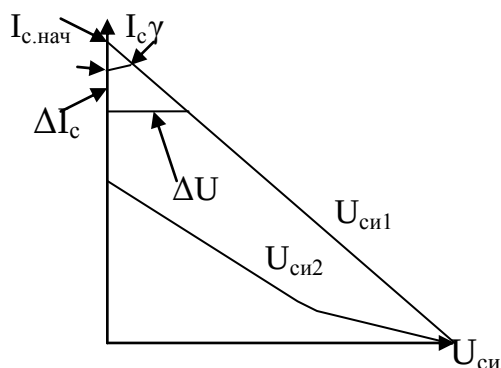


Рис. 1.9. Сток-затворная характеристика полевого транзистора

2.3. Принцип действия тиристора

Тиристорами называются четырёхслойные полупроводниковые приборы с тремя $p-n$ переходами, предназначенные для использования в качестве электронных ключей. В отличие от транзисторов, плавное увеличение

управляющего напряжения или тока приводит к скачкообразному изменению выходного тока, то есть включению тиристора. Это происходит за счет наличия положительной обратной связи во внутренней структуре тиристора. После включения тиристор остаётся во включённом состоянии сколь угодно долго, даже после снятия напряжения управления U_y . Для того, чтобы выключить тиристор, надо уменьшить протекающий через него анодный ток ниже некоторого критического значения, либо подать в цепь управляющего электрода импульс тока противоположной полярности. Тиристоры, включаемые подачей такого импульса, называют запираемыми. Условное обозначение тиристора приведено на рис. 1.10.

Основными параметрами тиристора являются: открывающее напряжение управляющего электрода $U_{y.от}$, открывающий ток управляющего электрода $I_{y.от}$ и напряжение на аноде открытого тиристора $U_{отк}$.

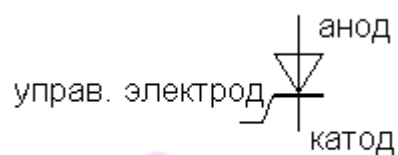


Рис. 1.10
Рис. 1.10

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Снять и построить характеристики биполярного транзистора КТ603А проводимости $n-p-n$, включённого по схеме с ОЭ. Для этого собрать на стенде с помощью перемычек схему для исследования транзистора (рис.1.11) и включить источники питания цепи базы U_1 и коллекторной цепи U_2 положительной полярности.

3.1.1. Входные характеристики $I_b = f(U_{бэ})$ снять при двух значениях коллекторного напряжения $U_{кэ} = const$ (табл. 1.1).

Таблица 1.1

I_b , мкА	0	20	40	60	80	100	120	140	$U_{кэ}$, В
$U_{бэ}$, В									0
									4

Установка тока базы I_6 производится регулятором напряжения R_1 , а измерение этого тока осуществляется методом измерения падения напряжения. Для этого на резисторе $R_3 = 10 \text{ кОм}$, включенном в цепь базы, измеряется внешним вольтметром падение напряжения ΔU , а затем значение тока I_6 определяется по формуле

$$I_6 = \frac{\Delta U}{R_3} = 0,1 \cdot \Delta U \text{ (мкА)},$$

где ΔU – показания вольтметра (мВ).

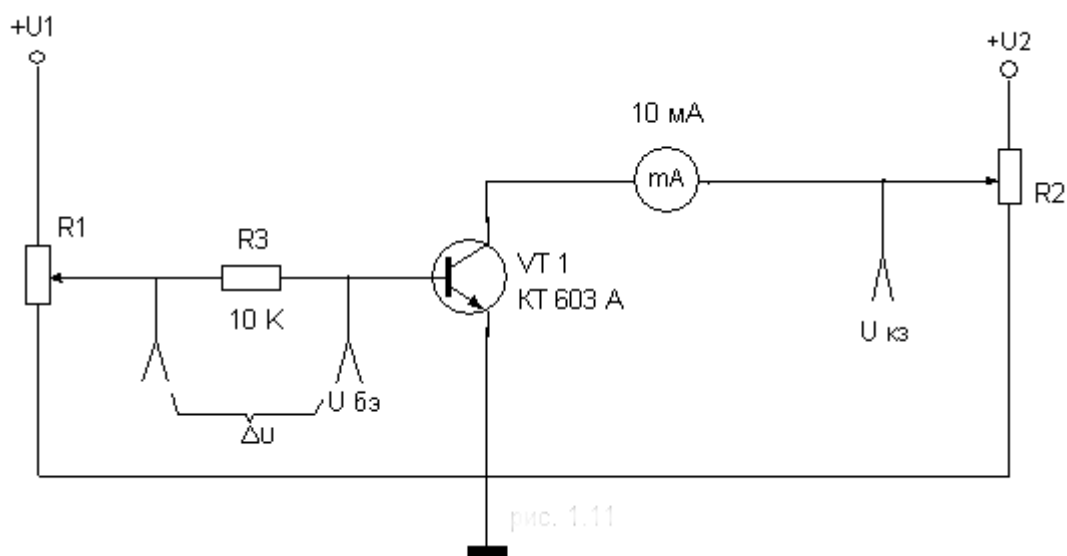


Рис. 1.11

После установки I_6 один провод вольтметра из гнезда источника питания U_1 переключается на общий провод (эмиттер) и измеряется напряжение $U_{6э}$. Коллекторное напряжение $U_к$ устанавливается регулятором R_2 и измеряется внешним вольтметром.

По экспериментальным данным определить входное сопротивление транзистора по постоянному току $r_{вх=}$ и по переменному току $r_{вх\sim} = h_{11}$ при $I_6=60 \text{ мкА}$, $U_{кэ} = 4 \text{ В}$.

3.1.2. Выходные характеристики $I_к = f(U_{кэ})$ снять при трёх значениях тока базы I_6 . (табл. 1.2).

Измерение напряжения $U_{кэ}$ и тока I_6 производится с помощью внеш-

него вольтметра, а коллекторного тока I_k – встроенным миллиамперметром (шкала 0 – 10 мА).

По подученным данным определить выходную проводимость транзистора $g_{\text{вых}} = g_{\text{вых}\sim} = h_{22}$ при $U_{k3} = 4 \text{ В}$, $I_6 = 75 \text{ мкА}$.

Таблица 1.2

$U_{k3}, \text{ В}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	$I_6, \text{ мкА}$
$I_k, \text{ мА}$									50
									100
									150

3.1.3. Статическая токовая характеристика $I_k = f(I_6)$ снимается при $U_{k3}=4\text{В}$ (табл. 1.3).

Таблица 1.3

$I_k, \text{ мА}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_6, \text{ мкА}$										
β										

Ток базы I_6 изменять таким образом, чтобы фиксировать коллекторный ток I_k через 1мА по встроенному миллиамперметру.

По полученным данным определить коэффициент передачи тока $\beta = h_{21} = \Delta I_k / \Delta I_6$, занести результаты в табл. 1.3 и построить график $\beta = f(I_k)$.

3.2. Снять и построить характеристики полевого транзистора КП103М с каналом p – типа. Для этого собрать с помощью перемычек схему измерений и включить источники положительного напряжения затвора U_1 и отрицательного напряжения стока U_2 . Включить отрицательную полярность напряжения U_2 питания и миллиамперметра (рис. 1.12).

3.2.1. Выходные характеристики $I_c = f(U_{\text{си}})$ снять при трех значениях напряжения на затворе $U_{\text{зи}} = \text{const}$ (табл. 1.4).

Напряжение стока $U_{\text{си}}$ и затвора $U_{\text{зи}}$ измерять внешним вольтметром, а ток стока I_c – внешним миллиамперметром.

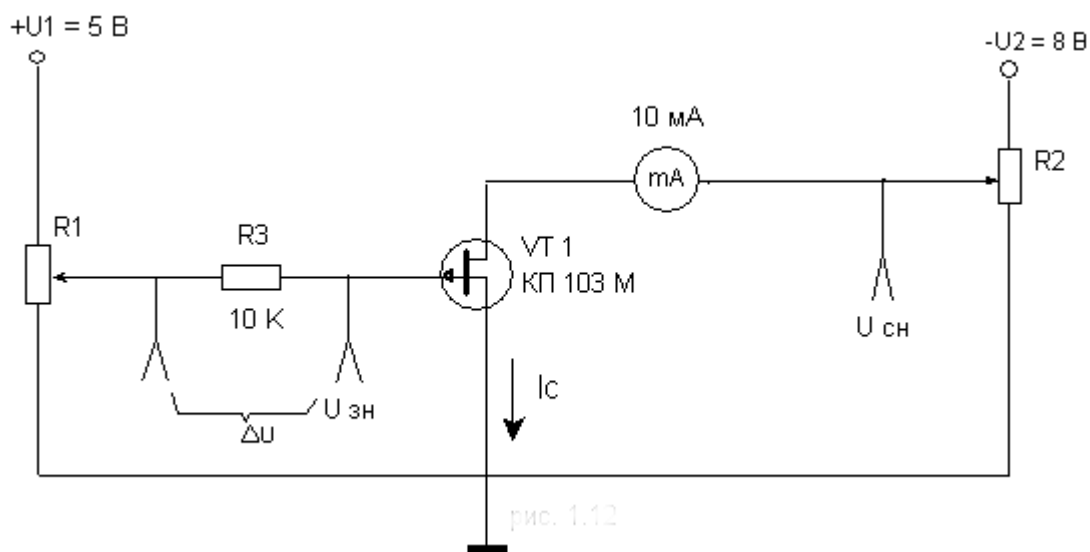


Рис.1.12

Таблица 1.4

$U_{си}, В$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8	$U_{зи}, В$
$I_c, мА$											0
											1
											2

3.2.2. Статическая сток–затворная характеристика $I_c = f(U_{зи})$ снимается при двух значениях напряжения стока $U_{си} = const$ (табл. 1.5)

Таблица 1.5

$U_{зи}, В$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	$U_{си}, В$
$I_c, мА$											4
											8

По полученным данным определить параметры полевого транзистора: крутизну характеристики $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}$, при $U_{зи} = 0$, начальный ток стока $I_{с.нач.}$ при $U_{зи} = 0$ и напряжение отсечки $U_{з.отс.}$

3.3. Исследовать режим работы тринистора КУ101Е при открывании

по управляющему электроду. Для этого собрать схему измерений и включить источники управляющего напряжения U_1 и анодного напряжения U_2 положительной полярности (рис. 1.13).

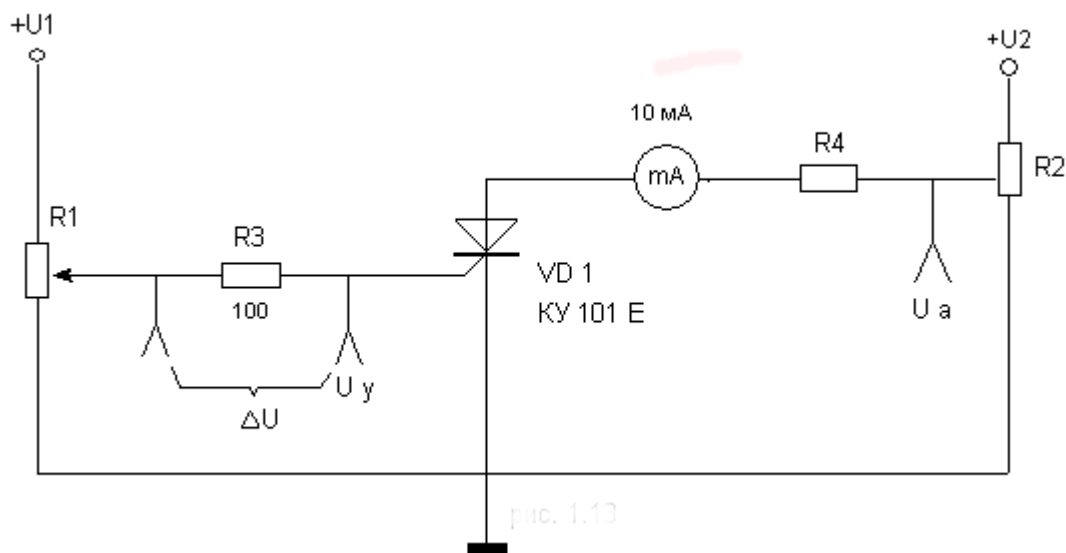


Рис. 1.13

3.3.1. Определить отпирающий ток управляющего электрода I_y от тринистора. Для этого установить регулятором напряжения R_2 на аноде тринистора $U_a = 8\text{В}$ при отсутствии управляющего сигнала ($U_1 = 0$). Постепенно увеличивать напряжение на управляющем электроде U_y регулятором R_1 до отпирания тринистора в момент резкого увеличения анодного тока I_a , который регистрируется по миллиамперметру. Зафиксировать при этом отпирающий ток $I_{y.от}$, для чего измерить внешним вольтметром падение напряжения ΔU на резисторе $R_3 = 10\text{ кОм}$ и затем использовать формулу

$$I_{y.от} = \frac{\Delta U}{R_3} = 0,1 \cdot \Delta U \text{ (мкА)}, \text{ где } \Delta U - \text{мВ}.$$

Измерить также внешним вольтметром отпирающее напряжение на управляющем электроде $U_{y.от}$ и напряжение на аноде открытого тринистора $U_{отк} = U_{пр}$ относительно катода.

3.3.2. Убедиться, что тринистор остается открытым после снятия управляющего сигнала, для чего выключить источник напряжения U_1 . Закрыть тринистор по аноду, выключив и включив источник напряжения U_2 .

Состояние транзистора регистрировать по миллиамперметру.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Экспериментальные таблицы – 5 шт.
2. Графики входных и выходных характеристик биполярного транзистора.
3. График зависимости коэффициента передачи биполярного транзистора по току от тока коллектора.
4. Определение параметров БТ: $r_{вх}$, $r_{вых}$, $g_{вх}$, $g_{вых}$.
5. Сток – затворная и входная характеристики полевого транзистора.
6. Определение параметров ПТ: S , $I_{с. нач}$, $U_{отс}$.
7. Значения параметров включения тиристора: $U_{у. от}$, $I_{у. от}$, $U_{отк}$.
8. Исследуемые схемы – 3 шт.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид имеют входные характеристики германиевого и кремниевого биполярного транзисторов?
2. Как определяется и от чего зависит входное сопротивление транзистора, что оно означает на графике входной характеристики?
3. Какой вид имеют выходные характеристики транзистора?
4. Как определяется выходная проводимость транзистора?
5. Как определяется коэффициент передачи тока и от чего он зависит?
6. Перечислить предельные параметры биполярного транзистора.
7. Какой вид имеют сток – затворные характеристики полевого транзистора с каналом p – типа и n – типа?
8. Перечислить основные параметры полевого транзистора.
9. Как отличаются входные сопротивления полевого и биполярного транзисторов?
10. Перечислить основные параметры тиристора, в том числе предельные.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить свойства усилительного каскада при включении транзистора по схеме с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). Определить основные показатели каскада.

1. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1.1. Наладка режима работы усилительного каскада на БТ с помощью электронного осциллографа.

1.2. Исследование амплитудной и нагрузочной характеристик усилительного каскада с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК). Определение, показателей $R_{вх}$, $U_{вх}$, K_1 .

2. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Способ управления энергией, при котором путем затраты небольшого количества энергии можно управлять энергией, во много раз большей, называется усилением. При этом необходимо, чтобы процесс управления являлся непрерывным, плавным и однозначным. Устройство, осуществляющее такое управление, называется усилителем. Простейший усилитель – это усилительный каскад на одном транзисторе. Свойства такого каскада описываются целым рядом параметров и характеристик, которые зависят от схемы включения транзистора. Амплитудная характеристика – зависимость амплитудного значения выходного напряжения от амплитуды синусоидального входного сигнала: $U_{вых} = f(U_{вх})$.

Нагрузочная характеристика – зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки R_n или тока I_n при определённом значении входного сигнала: $U_{вых} = f(I_n)$. Входное сопротивление $R_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}}$ для уси-

лителя напряжения должно быть как можно больше. Коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ должен иметь определённое заданное значение. Коэффициент усиления по току $K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$ характеризует нагрузочную способность усилительного каскада.

В схеме усилительного каскада с ОЭ (рис. 2.1) входной и выходной токи проходят через эмиттер. Режим работы транзистора по постоянному току определяется выражением

$$U_{\text{к}} = U_{\text{н}} - I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}, \quad (2.1)$$

а показатели каскада можно рассчитать по формулам:

$$R_{\text{âô}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{11}} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_7}}, \quad (2.2)$$

$$K_U = \frac{\beta}{h_{11}} \cdot \frac{R_{\text{ê}} \cdot R_{\text{í}}}{R_{\text{ê}} + R_{\text{í}}} \quad (2.3)$$

$$K_I = K_U \cdot \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{н}}} \quad (2.4)$$

Для схемы ОК (рис. 2.2) общим электродом для входной и выходной цепи является коллектор. Режим работы и показатели каскада определяются выражениями:

$$U_{\text{э}} = I_{\text{к}} R_{\text{э}} + I_{\text{б}} R_{\text{э}} \approx I_{\text{к}} R_{\text{э}}, \quad (2.5)$$

$$R_{\text{âô}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{11} + \beta R_{\text{ý}}} + \frac{1}{R_{\text{á}}}} \quad (2.6)$$

$$K_U = \frac{\beta R_{\text{экв}}}{(h_{11} + \beta R_{\text{экв}})}, \quad (2.7)$$

$$K_I = K_U \cdot \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{н}}}, \quad (2.8)$$

где $R_{\text{ýêâ}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{ý}}} + \frac{1}{R_{\text{í}}}}$ – эквивалентное сопротивление в цепи эмиттера.

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Собрать на стенде и исследовать схему усилительного каскада ОЭ (рис. 2.1).

3.1.1. Произвести наладку режима работы транзистора, установив его рабочую точку. Для этого на вход усилителя подать от внутреннего генератора синусоидальное напряжение U_3 частотой 1000 Гц (переключатель частоты в положении 6). Подключить осциллограф к выходу каскада и, увеличивая входной сигнал регулятором напряжения U_3 , получить ограничение формы выходного сигнала $U_{\text{вых}} = U_4$. Установить такое сопротивление переменного резистора R_5 в цепи смещения транзистора, при котором обеспечивается симметричное ограничение выходного сигнала.

3.1.2. Снять и построить амплитудную характеристику усилительного каскада ОЭ $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ при частоте входного сигнала 1000 Гц для режима холостого хода ($R_{\text{н}} = \infty$) и заданного сопротивления нагрузки $R_{\text{н}} = R_{11} = 1 \text{ кОм}$ (табл. 2.1). Переменные напряжения на входе $U_{\text{вх}}$ и на выходе $U_{\text{вых}} = U_4$ измерять внешним вольтметром относительно общего провода. Значения $U_{\text{вх}}$ необходимо выбирать таким образом, чтобы 5 – 6 точек соответствовали линейной части характеристики, а 2 – 3 точки – области нелинейных искажений (в виде ограниченной амплитуды напряжения $U_{\text{вых}}$).

Одновременно измерять значения входного тока $I_{\text{вх}}$ методом падения напряжения ΔU на резисторе $R_1 = 1 \text{ кОм}$, используя формулу

$$I_{\text{вх}} = \frac{\Delta U}{R_1} (\text{мкА}),$$

где ΔU – мВ.

Измерить и зарегистрировать постоянное напряжение $U_{\text{к}}$ в рабочей точке транзистора.

3.1.3. По опытным данным рассчитать и занести в табл. 2.1 показатели усилительного каскада: $R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$, $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$, $K_I = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}} R_{\text{н}}}$.

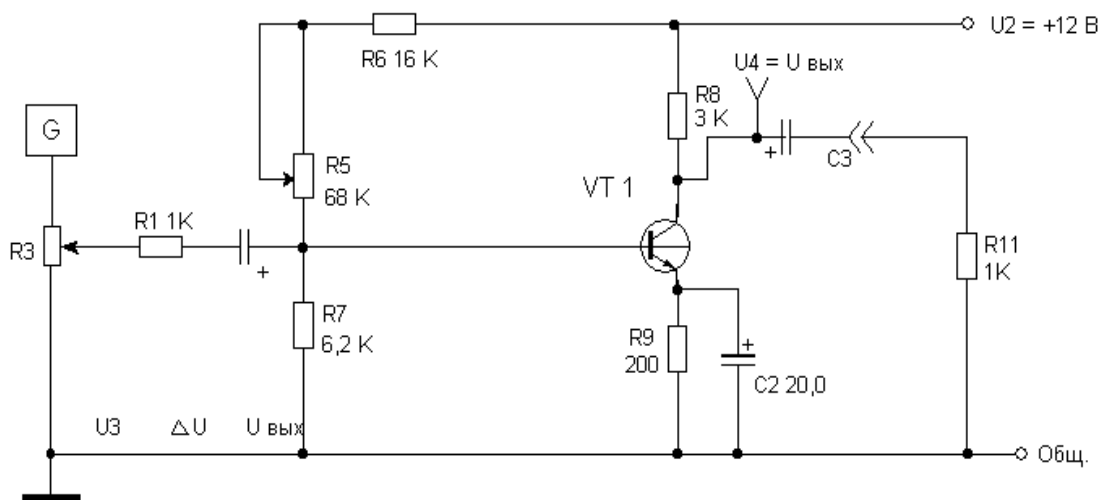


рис. 2.1

Рис. 2.1

3.1.4. Вычислить теоретическое значение показателей каскада: $R_{вх}$, K_U , K_I , используя выражения (2.2) – (2.4) при $h_{11} = 1,5 \text{ кОм}$, $\beta = 50$.

Таблица 2.1

Результаты измерения	$U_{\text{вх}}$, мВ	0	8	16	24	32	40	48	56	Режим измерения
	$I_{\text{вх}}$, мкА									$R_{\text{н}} = \infty$
	$U_{\text{вых}}$, В									
	$I_{\text{вх}}$, мкА									$R_{\text{н}} = 1\text{кОм}$
	$U_{\text{вых}}$, В									
Результаты расчёта	Показатели									Режим измерения
	Условные обозначения	Экспериментальные значения				Теоретические значения				
	$R_{\text{вх}}$, кОм									$R_{\text{н}} = \infty$
	K_U									
	K_U									$R_{\text{н}} = 1\text{кОм}$
	K_I									

3.2. Собрать на стенде и исследовать схему усилительного каскада ОК (рис. 2.2).

3.2.1. Снять и построить амплитудную характеристику каскада ОК для режима с нагрузкой $R_H = 1 \text{ кОм}$ по аналогии с п. 3.1.2. Результаты

занести в табл. 2.2. Измерить постоянное рабочее напряжение $U_э$ на эмиттере транзистора.

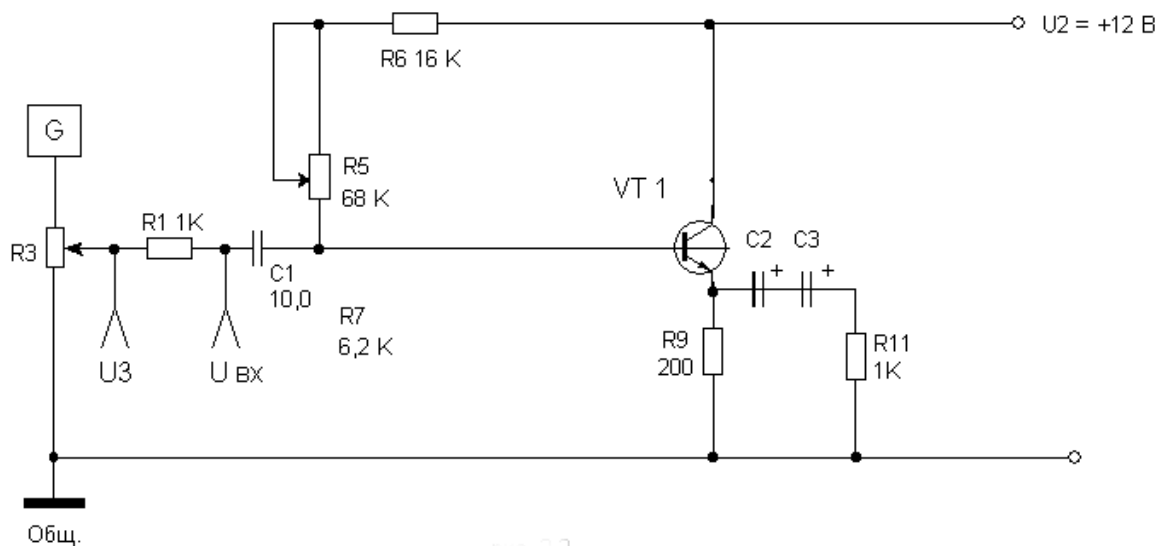


рис. 2.2

Рис. 2.2

Таблица 2.2

Результаты измерения	$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$							Режим
	$I_{\text{вх}}, \text{ мкА}$							
	$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$							
Результаты расчёта	Показатели	Эксперим.			Теоретические			$R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$
	$R_{\text{вх}}, \text{ кОм}$							
	K_U							
	K_I							

3.2.2. Рассчитать экспериментальные значения показателей усилительного каскада ОК по аналогии с п. 3.1.3.

3.2.3. Вычислить теоретическое значение показателей каскада: $R_{вх}$, K_U , K_I , используя выражения (2.6) – (2.8).

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Амплитудные характеристики усилительных каскадов ОЭ и ОК – 2 шт.
2. Таблицы экспериментальных и расчётных данных – 2 шт.

3. Расчеты показателей усилительных каскадов: $R_{\text{вх}}$, K_U , K_I .
4. Экспериментальные схемы усилительных каскадов с ОЭ и ОК.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются схемы усилительных каскадов ОЭ и ОК?
2. Объяснить назначение всех элементов схемы.
3. Определить по опытным данным постоянный ток коллектора в рабочей точке транзистора для схемы ОЭ и ОК.
4. От чего зависит и как отличается $R_{\text{вх}}$ в схемах ОЭ и ОК?
5. От чего зависят коэффициенты усиления K_U и K_I ?
6. Как отличаются амплитудные характеристики схем ОЭ и ОК?
7. От чего зависят нелинейные искажения в каскаде?
8. Оценить сходимость теоретических и опытных значений коэффициента K_U для схемы ОЭ и ОК.
9. Как производится экспериментальная настройка режима работы усилительного каскада ОЭ?
10. Принцип эмиттерной стабилизации рабочего тока коллектора в усилительном каскаде.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХКАСКАДНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать амплитудные и частотные характеристики трехкаскадного усилителя с емкостной связью и двухтактным выходным каскадом. Изучить влияние обратных связей и режима работы транзисторов на свойства усилителя.

1. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Произвести наладку работы усилителя.
2. Снять амплитудную и амплитудно-частотную (АЧХ) характеристики многокаскадного усилителя с обратной связью и без обратной связи.

2. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Многокаскадные усилители применяются для получения большого результирующего коэффициента усиления K_U , который определяется произведением коэффициентов отдельных каскадов.

Амплитудно-частотной характеристикой усилителя называют зависимость модуля коэффициента усиления от частоты входного гармонического сигнала $K_U = f(\omega)$.

Практически используются логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ), для которых по оси ординат откладывается коэффициент усиления в децибелах $K_{U[дБ]} = 20 \cdot \lg K_U$, а по оси ординат – частота ω в логарифмическом масштабе. Это повышает точность отсчёта низких частот при широком частотном диапазоне, а также даёт возможность графического сложения ЛАЧХ отдельных каскадов для получения результирующей ЛАЧХ всего усилителя.

Полоса пропускания частот усилителя определяется по ЛАЧХ между низшей f_n и высшей f_v частотами, при которых коэффициент усиления

уменьшается на 3 дБ по сравнению с его значением на средних частотах. При этом низшая частота f_n зависит от ёмкости разделительного конденсатора и входного сопротивления каскадов. На высших частотах уменьшение коэффициента усиления обуславливается входной ёмкостью каскадов и «паразитной» ёмкостью монтажа.

Обратной связью (ОС) в усилителях называют явление передачи сигнала из выходной цепи во входную. Электрические цепи, обеспечивающие эту передачу, носят название цепей обратной связи.

Петлёй обратной связи называют замкнутый контур, включающий в себя цепь ОС и часть усилителя между точками её подключения. Местной обратной связью принято называть ОС, охватывающую отдельные каскады или части усилителя, а общей обратной связью – ОС, охватывающую весь усилитель целиком.

Обратную связь называют отрицательной, если её сигнал вычитается из входного сигнала, и положительной, если сигнал ОС суммируется с входным. При отрицательной ОС коэффициент усиления уменьшается, а при положительной – увеличивается. Существуют схемные решения, позволяющие осуществлять обратную связь для постоянной и переменной составляющих, а также всего сигнала.

По способу включения ОС делят на четыре типа. Два из них обуславливаются видом сигнала ОС, снимаемого с выхода усилителя, то есть по напряжению или по току. Два других характеризуют схему соединения цепи ОС и входа усилителя, которое может быть последовательным или параллельным.

Несмотря на то, что отрицательная ОС уменьшает результирующий коэффициент усиления, она расширяет полосу пропускания частот, повышает стабильность всех параметров усилителя и уменьшает нелинейные искажения.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Собрать схему трёхкаскадного усилителя без общей обратной связи (рис. 3.1). Во входной цепи усилителя включить делитель напряжения $R_1 - R_2$ с коэффициентом деления $K_d = 0,1$.

3.2. Произвести наладку режима работы 1 и 3 каскадов. Для этого подключить осциллограф к выходу первого каскада, подать входной сигнал частотой 1000 Гц и, увеличивая его регулятором напряжения U_3 , обеспечить с помощью переменного резистора R_5 симметричное ограничение формы выходного сигнала $U_{\text{вых1}} = U_4$. Переключить осциллограф на выход 3 каскада, составленного по двухтактной схеме. Уменьшить выходной сигнал $U_{\text{вых3}} = U_8$ до уровня 1 В и устранить с помощью переменного резистора R_7 искажение типа «ступенька». Зарисовать форму выходного напряжения с искажениями типа «ограничение» и «ступенька».

3.3. Снять и построить амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ усилителя без и с ОС на частоте входного сигнала 1000 Гц (табл. 3.1). Значения входного напряжения $U_{\text{вх}} = U_1$ выбирать таким образом, чтобы 5 – 6 точек соответствовали линейной части характеристики, а 2 – 3 точки – области нелинейных искажений. Переменные напряжения на входе $U_{\text{вх}}$ и на выходе $U_{\text{вых}}$ усилителя измерять внешним вольтметром относительно общего провода. По экспериментальным данным определить коэффициент усиления $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ и занести его значения в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$									K_U		Схема
									экспер.	теор.	
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$											без ОС
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$											с ОС

3.4. Вычислить теоретическое значение общего коэффициента усиления $K_U = K_{U1} K_{U2} K_{U3}$ без ОС. При этом необходимо учесть, что в 1–м

каскаде действует местная ОС за счет резистора R_3 , в эмиттере транзистора. Когда сопротивление резисторов R_3 и R_k соизмеримы, для определения K_U можно использовать выражение:

$$K_{U1} = \frac{R_k^{\text{экв}}}{R_3}, \text{ где } R_e^{\text{экв}} = \frac{1}{\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_{a\bar{o}2}} + h_{22}};$$

3-й каскад является повторителем и его коэффициент усиления близок к единице: $K_{U3} \approx 1$.

3.5. Снять и построить амплитудную характеристику усилителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ при наличии общей отрицательной ОС. Для этого включить цепь ОС, повторить измерения и расчёты аналогично пункту 3.3 и занести результаты в табл. 3.1.

3.6. Вычислить теоретический коэффициент усиления при ОС:

$$K_U^{\text{ос}} = \frac{K_U}{(1 + K_U K_{\text{ос}})}, \text{ где } K_{\text{ос}} = \frac{R_8}{(R_8 + R_9)} - \text{коэффициент цепи передачи ОС.}$$

3.7. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) $K_{U[\text{дБ}]} = F(f)$ усилителя без ОС. Для этого подать входной сигнал $U_{\text{вх}} = U_1 = 10 \text{ мВ}$ и, изменяя его частоту в пределах от 32 Гц до 64 кГц, измерять выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_8$ внешним вольтметром (табл. 3.2).

По полученным данным определить $K_{U[\text{дБ}]} = 20 \cdot \lg K_U$. При построении графика АЧХ наносить частоту f в логарифмическом масштабе.

Таблица 3.2

f , кГц	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	Схема
$U_{\text{вых}}$, В													Без ОС
K_U													
$K_{U, \text{дБ}}$													
$U_{\text{вых}}$, В													с ОС
K_U													
$K_{U, \text{дБ}}$													

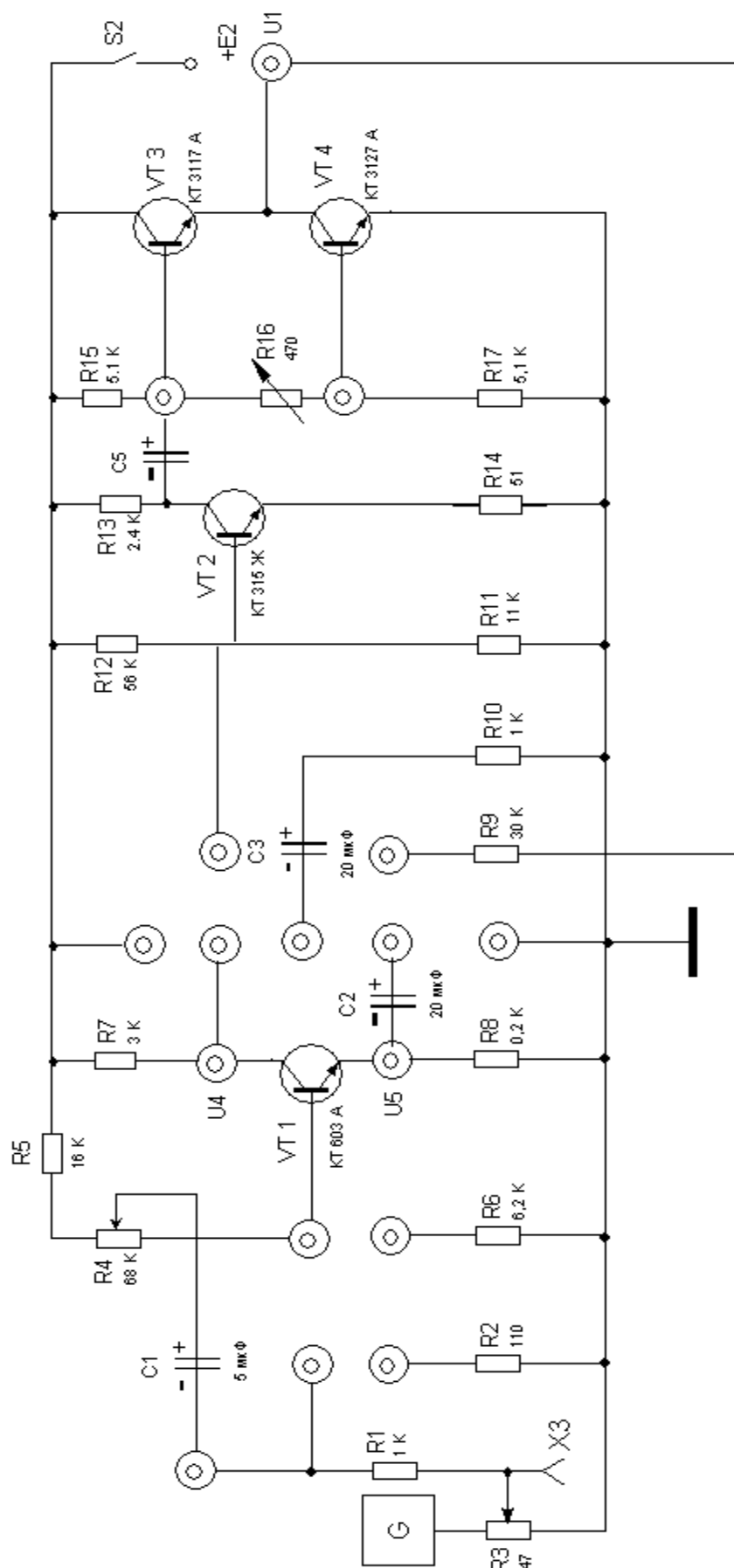


рис. 3.1

3.8. Снять и построить АЧХ усилителя $K_{U[\text{дБ}]} = F(f)$ с ОС. Для этого включить цепь ОС и провести измерения и расчёты по аналогии с пунктом 3.7. Результаты занести в табл. 3.2. АЧХ по пункту 3.7 и 3.8 строить совместно на одном графике.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Таблицы экспериментальных и расчётных данных – 2 шт.
2. Амплитудные характеристики усилителя с ОС и без ОС.
3. АЧХ усилителя без ОС и с ОС, построенное в логарифмическом масштабе на одном графике.
4. Экспериментальная схема.
5. Графики $U_{\text{вых}}(t)$ с искажениями типа «ограничение» и «ступенька».

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснять назначение всех элементов схемы усилителя.
2. В каком каскаде усилителя возникают и от чего зависят искажения сигнала типа «ступенька» и «ограничение»?
3. Как определяется общий K_U многокаскадного усилителя?
4. К какому типу по способу включения относится ОС исследуемого усилителя?
5. Как влияет ОС на амплитудную характеристику усилителя и его коэффициент усиления?
6. От чего зависит «завал» АЧХ на низких и высоких частотах?
7. С какой целью используется логарифмический масштаб на графике АЧХ?
8. Как влияет ОС на АЧХ усилителя?
9. Как определить полосу пропускания частот усилителя напряжения?
10. Как отличается КПД усилительного каскада класса А и класса В?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить свойства интегрального операционного усилителя (ОУ) типа К140УД7 на примере четырёх схем включения: инвертирующего масштабного ОУ, неинвертирующего масштабного ОУ, интегрирующего ОУ и дифференцирующего ОУ.

1. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Исследование инвертирующей и неинвертирующей схем включения операционного усилителя (ОУ). Определение параметров K_U , $R_{вх}$, $R_{вых}$.
2. Снятие АЧХ масштабного ОУ.
3. Снятие временных диаграмм выходного напряжения дифференцирующего и интегрирующего ОУ.

2. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Операционными усилителями (ОУ) называют высококачественные усилители постоянного тока (УПТ), предназначенные для выполнения различных операций над аналоговыми величинами (сигналами).

В настоящее время в качестве УПТ в основном используют интегральные операционные усилители в виде микросхем. По конструктивному исполнению они являются законченными широкополосными УПТ, имеющими большой коэффициент усиления и широкое применение не только для выполнения математических операций, но и в различных функциональных устройствах.

ОУ всегда применяется с цепью глубокой отрицательной ОС. В этом случае результирующий коэффициент усиления K_U определяется только параметрами цепи ОС и не зависит от исходного коэффициента усиления K_0 и его изменений.

Инвертирующий масштабный ОУ (рис. 4.1) имеет параллельную ОС по напряжению, образуемую резисторами R_2 и R_1 . Резистор R_3 служит для выравнивания входных токов ОУ и уменьшения напряжения смещения нуля $I_{см}$. Параметры схем определяются простыми выражениями:

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1}, \quad R_{вх} = R_1.$$

Неинвертирующий масштабный ОУ (рис. 4.2) охвачен последовательной ОС по напряжению, образуемой теми же резисторами R_2 и R_1 .

$$\text{Для этой схемы } K_U = \frac{R_2}{R_1} + 1, \quad R_{вх} \approx R_{вх.сф},$$

где $R_{вх.сф}$ – синфазное входное сопротивление ОУ.

Интегрирующий ОУ (рис. 4.3) содержит реактивный элемент – конденсатор, включенный вместо резистора R_2 в цепи ОС.

Передаточная функция ОУ имеет вид:

$$W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{Z_{ос}(p)}{Z(p)} = \frac{1}{pC_{ос}R_1}.$$

Связь между $U_{вых}$ и $U_{вх}$ в операторной форме имеет вид:

$$U_{вых}(p) = W(p) \cdot U_{вх}(p) = \frac{U_{вх}(p)}{pC_1R_1}.$$

Переходя к оригиналу, получим временную зависимость между $U_{вых}$ и $U_{вх}$:

$$U_{вых}(t) = \frac{1}{C_1R_1} \int U_{вх}(t)dt + U_0.$$

При подаче постоянного входного напряжения на выходе интегратора получим линейно нарастающее напряжение:

$$U_{вых}(t) = \frac{U_{вх} \cdot t}{C_1R_1}.$$

Дифференцирующий ОУ (рис. 4.4) содержит конденсатор C на входе вместо резистора R_1 . Его передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{Z_{ос}(p)}{Z_1(p)} = pR_{ос}C_1.$$

а временная зависимость между $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = R_{\text{ос}} C_1 \frac{dU_{\text{ВХ}}(t)}{dt}.$$

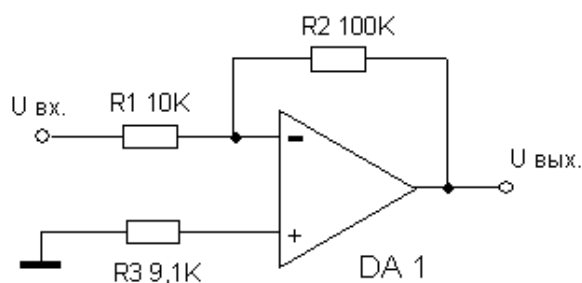


Рис 4.1

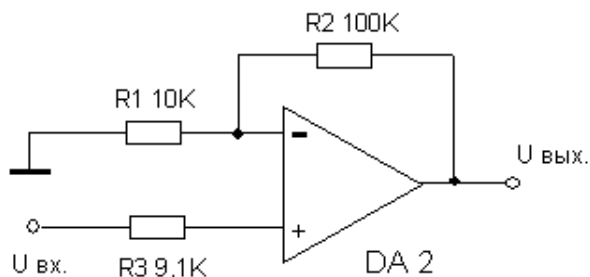


Рис 4.2

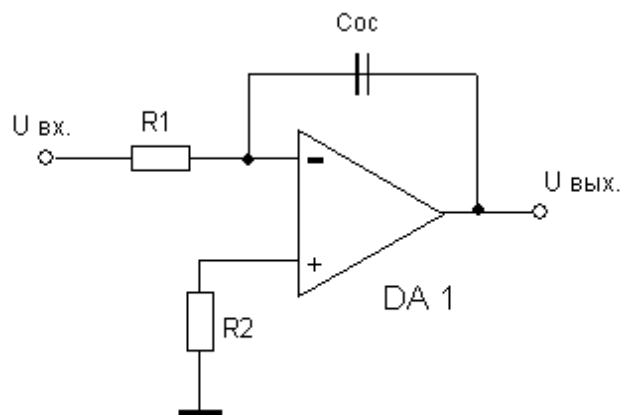


Рис. 4.3

Рис 4.3

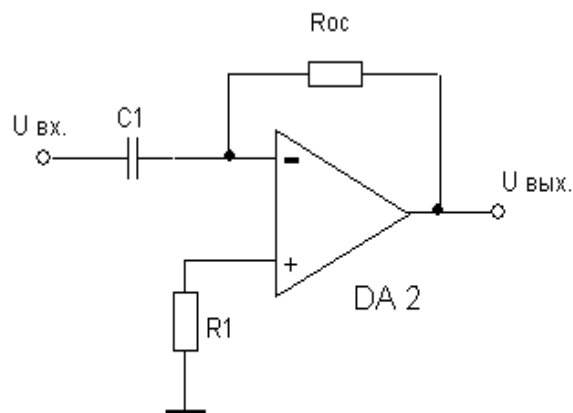


Рис. 4.4

Рис 4.4

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Исследование инвертирующего ОУ.

3.1.1. Собрать на стенде схему исследуемого ОУ (рис. 4.5). Для этого инвертирующий вход ОУ подключить через резистор $R_5=10$ кОм к источнику входного сигнала U_1 , неинвертирующий вход соединить через резистор $R_4 = 10$ кОм с общей шиной, а в цепи ОС включить резистор $R_6 = 100$ кОм. Зарисовать исследуемую схему. Источник сигнала U_1 отключить выключателем S_1 .

3.1.2. Произвести балансировку схемы ОУ. Для этого подключить к выходу ОУ вольтметр постоянного тока и установить с помощью переменного резистора R_9 нуль на выходе ОУ. Измерить и занести в табл. 4.1 величину разбаланса на выходе U_0 при $R_4 = 0$, для чего кратковременно закоротить R_4 перемычкой.

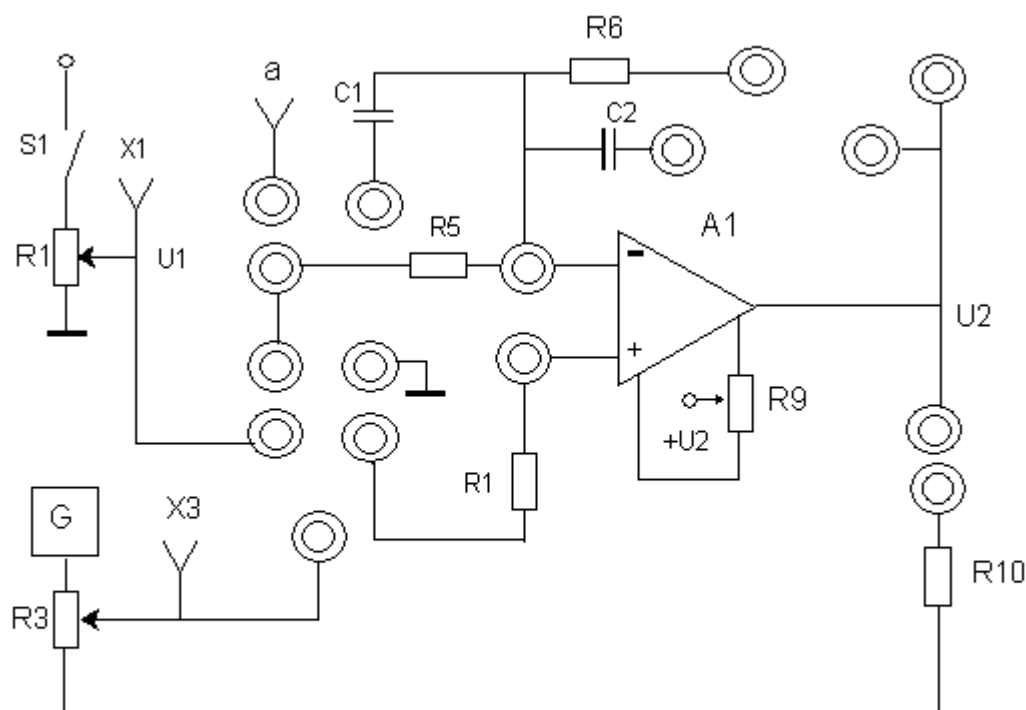


Рис. 4.5

Рис. 4.5

3.1.3. Определить коэффициент K_U усиления ОУ. Для этого подать входной сигнал $U_1 = 0,5 \text{ В}$, измерить выходной сигнал U_2 с учетом знака и занести его величину в табл. 4.1. Определить коэффициент усиления $K_U = \frac{U_2}{U_1}$ и сравнить его с теоретическим значением $K_U = -\frac{R_6}{R_5}$. Результаты занести в табл. 4.1.

3.1.4. Определить входное сопротивление ОУ. Для этого подать входной сигнал $U_1 = 0,5 \text{ В}$, измерить вольтметром падение напряжение ΔU

на входном резисторе R_5 , рассчитать входной ток $I_{\text{вх}} = \frac{\Delta U}{R_5}$ и $R_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I_{\text{вх}}}$.

Сравнить эту величину с теоретическим значением $R_{\text{вх}} = R_5$. Результаты занести в табл. 4.1.

3.1.5. Определить выходное сопротивление ОУ. Для этого при входном сигнале $U_1 = 0,5$ В измерить выходной сигнал U_2 на холостом ходу и с подключенной нагрузкой $U_{2\text{н}}$, подсоединив перемычкой нагрузочный резистор $R_{10} = 100$ Ом.

Определить выходное сопротивление по формуле $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}} \left(\frac{U_2}{U_{2\text{н}}} - 1 \right)$.

Сравнить эту величину с нормируемым значением для исследуемого типа ОУ ($R_{\text{вых}} = 500$ Ом без ОС). Результаты измерений и расчетов занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Параметры	Вид схемы												
	Инвертирующий ОУ							Неинвертирующий ОУ					
Условные обозначения	U_0 , мВ	U_2 , В	K_U	ΔU , В	$R_{\text{вх}}$, кОм	$U_{2\text{н}}$, В	$R_{\text{вых}}$, Ом	U_2 , В	K	ΔU , В	$R_{\text{вх}}$, кОм	$U_{2\text{н}}$, В	$R_{\text{вых}}$, Ом
Эксперим.													
Теорет.	—			—		—				—		—	

3.2. Исследование неинвертирующего ОУ.

3.2.1. Собрать на стенде схему исследуемого ОУ (рис. 4.2). Неинвертирующий вход (рис. 4.5) подключить через резистор $R_4 = 10$ кОм к источнику входного сигнала U_1 , инвертирующий вход подключить через резистор $R_5 = 10$ кОм к общей шине, в цепи ОС включить резистор $R_6 = 100$ кОм. Зарисовать схему ОУ.

3.2.2. Определить коэффициент усиления ОУ. Для этого произвести измерения по аналогии с п. 3.1.3. и сравнить результат с теоретическим значением коэффициента $K = \left(\frac{R_6}{R_5} \right) + 1$.

3.2.3. Определить входное сопротивление ОУ. Для этого произвести операции по аналогии с п. 3.1.4. и сравнить результаты с нормируемым входным сопротивлением для синфазного сигнала $R_{вх} = 400 \text{ кОм}$.

3.2.4. Определить выходное сопротивление. Для этого произвести операции по аналогии с п.3.1.5.

3.2.5. Снять АЧХ ОУ. Для этого подать на неинвертирующий вход ОУ через резистор R_4 синусоидальный сигнал $U_3 = 50 \text{ мВ}$ от внутреннего генератора с изменяемой частотой от 32 Гц до 64 кГц. Измерить вольтметром переменного тока выходной сигнал U_2 на этих частотах и заполнить табл. 4.2, включив в неё результат измерения K_U при постоянном токе при $f = 0$ (п. 3.2.2). Построить график АЧХ.

Таблица 4.2

$f, \text{ кГц}$	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$												
K_U												

3.3. Исследование интегрирующего ОУ.

3.3.1. Собрать схему исследуемого ОУ (рис. 4.5). В цепи включить конденсатор $C_2 = 1 \text{ мкФ}$ (рис. 4.5), неинвертирующий вход соединить через резистор R_4 с общей шиной, а инвертирующий вход подключить через резистор R_5 к генератору прямоугольного переменного напряжения (точка А). Генератор построить на основе дополнительного ОУ без ОС, подав на его инвертирующий вход максимальный синусоидальный сигнал U_3 частотой 32 Гц с помощью проводника. Выход этого генератора соединен через разделительный конденсатор с гнездом в точке А (генератор и точка А находятся на стенде).

3.3.2. Снять осциллограммы сигналов на входе и выходе интегрирующего ОУ. Эти сигналы зарисовать в синхронной связи один под другим.

3.3.3. Рассчитать теоретически амплитуду выходного сигнала инте-

грирующего ОУ, используя выражение $U_{2m} = 0,25 \cdot U_{\text{вх.т}} \cdot \frac{T}{R_5 C_5}$, и сравнить её с экспериментальным значением, полученным из осциллограммы.

3.4. Исследование дифференцирующего ОУ.

3.4.1. Собрать схему исследуемого ОУ. В цепи ОС включить резистор $R_6 = 100 \text{ кОм}$, неинвертирующий вход соединить через резистор R_4 с общей шиной, а инвертирующий вход подключить через конденсатор $C_1 = 1000 \text{ пФ}$ к генератору переменного прямоугольного напряжения (точка А).

3.4.2. Снять осциллограммы сигналов на входе и выходе ОУ по аналогии с п. 3.3.2.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Экспериментальные схемы – 5 шт.
2. Экспериментальные таблицы – 2 шт.
3. График АЧХ ОУ.
4. Осциллограммы сигналов на входе и выходе интегрирующего ОУ.
5. Осциллограммы сигналов на входе и выходе дифференцирующего ОУ.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить основные схемы включения и области применения ОУ.
2. Перечислить основные параметры интегральных ОУ.
3. Объяснить назначение элементов в исследуемых схемах.
4. Как и почему отличаются коэффициенты усиления в схемах инвертирующего и неинвертирующего ОУ?
5. Как и почему отличаются входные сопротивления инвертирующего и неинвертирующего ОУ?
6. Как и почему отличаются АЧХ усилителя с емкостной связью и интегрального ОУ?
7. Объяснить форму выходного сигнала интегрирующего ОУ.

8. Объяснить форму выходного сигнала дифференцирующего ОУ.
9. Обосновать метод определения выходного сопротивления по опытным данным.
10. Обосновать выражение для расчета амплитуды выходного сигнала интегрирующего ОУ.

2. СБОРНИК ЗАДАЧ

2.1. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В задачах этого раздела рассматриваются на простых практических схемах условия выбора, параметры и режимы работы полупроводниковых приборов - выпрямительных диодов, стабилитронов, фотодиодов и светодиодов, транзисторов и тиристоров. Для резисторов и конденсаторов, рассчитанные параметры округляются до ближайшего номинального значения из ряда E6, E12, E24.

Задача 2.1.1. Представить схему мостового выпрямителя с конденсатором фильтра на выходе, выбрать тип диодов, определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и емкость конденсатора фильтра $C_{\text{ф}}$ при заданных значениях коэффициента пульсаций $p = 0,02$, входного напряжения $U_{\text{вх}}$ и тока нагрузки $I_{\text{н}}$ (табл. 2.1.1). Представить условия выбора диодов при наличии конденсатора фильтра $C_{\text{ф}}$ и без него.

Таблица 2.1.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{вх}}, В$	5	6,3	10	12,6	15	19	24	56	127	220
$I_{\text{н}}, А$	0,41	0,52	0,35	0,45	0,26	0,34	0,2	0,1	0,045	0,076

Методические указания

Диоды выбираются по двум максимально допустимым параметрам $U_{\text{обр.макс}}$ и $I_{\text{пр.ср.макс}}$, которые должны превышать на 20 – 30%.

соответствующие фактические значения $U_{\text{обр.м}}$ и $I_{\text{пр.ср}}$. В свою очередь величины $U_{\text{обр.м}}$ и $I_{\text{пр.ср}}$ связаны с напряжениями $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ и током нагрузки $I_{\text{н}}$ определенными соотношениями в зависимости от схемы выпрямителя и наличия сглаживающего фильтра. Эти соотношения приводятся в литературе и должны использоваться как условия выбора диодов.

Емкость конденсатора фильтра определяется по заданному коэффициенту пульсации p , сопротивлению нагрузки $R_n = U_{\text{вых}} / I_n$ с учетом частоты пульсации f_n , равной удвоенной частоте питающей сети из выражения:

$$p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_\phi \cdot R_n}.$$

Задача 2.1.2. Представить схему и произвести расчет параметрического стабилизатора напряжения с заданными значениями коэффициента стабилизации $k_{\text{ст}}$, выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и сопротивления нагрузки R_n (табл. 2.1.2). Выбрать тип полупроводникового стабилитрона, определить необходимое напряжение питания E_n , сопротивление балластного резистора R_b и его мощность P_R . Рассчитать фактическое изменение выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ при подключении нагрузки R_n и при изменении напряжения питания E_n на 20% в условиях холостого хода.

Таблица 2.1.2

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{\text{ст}}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\text{вых}}, B$	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56
R_n, Ω	50	80	100	180	440	540	1100	1560	2350	2800

Методические указания

Тип стабилитрона выбирается по величине $U_{\text{вых}}$ с учетом тока нагрузки $I_n = U_{\text{вых}} / R_n$ из условий: $U_{\text{ст}} = U_{\text{вых}}$, $I_{\text{ст}} = I_{\text{ст.мин}} + I_n$. При этом должно выполняться соотношение $I_{\text{ст.макс}} > I_{\text{ст}}$.

Напряжение питания E_n и сопротивление R_b можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{\text{Б}} = \frac{E_{\text{П}} - U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{СТ.МИН}} + I_{\text{Н}}}; \\ k_{\text{СТ}} = \frac{R_{\text{Б}} + r_{\text{Д}}}{r_{\text{Д}}} \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{П}}}, \end{cases}$$

где $r_{\text{Д}}$ - дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Параметр $r_{\text{Д}}$ берется из справочника для тока стабилизации, являющегося средним значением между $I_{\text{СТ.МИН}}$ и $I_{\text{СТ}} = I_{\text{СТ.МИН}} + I_{\text{Н}}$.

Тип резистора $R_{\text{Б}}$ выбирается по рассеиваемой на нем мощности

$$P = (I_{\text{СТ.МИН}} + I_{\text{Н}})^2 \cdot R_{\text{Б}}.$$

После расчета сопротивление балластного резистора $R_{\text{А}}$ необходимо округлить до ближайшего номинального значения в соответствии с типовым рядом сопротивлений. В зависимости от точности изготовления резисторов предусматривается: ряд E12 (допуст. погрешность 10%); ряд E24 (погрешность 5%); ряд E48 (доп. погрешность 2%) и др. (см. табл. 2.1.3.)

Таблица 2.1.3

E_{12}	1		1,2		1,5		1,8		2,2		2,7	
	3,3		3,9		4,7		5,6		6,8		8,2	
E_{24}	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,7	3,0
	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Фактическое сопротивление резистора R определяется выражением:

$$R = E \cdot 10^n,$$

где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ - порядок числа.

Наиболее широко применяются резисторы типов МЛТ (маломощные) и ПЭВ, С5 – 35В (мощные).

МЛТ – металлопленочный, лакированный, теплостойкий. Они выпускаются 5 видов по номинальной мощности от 0,125 Вт до 2 Вт и имеют

соответствующее обозначение: МЛТ-0,125; МЛТ-0,25; МЛТ-0,5; МЛТ-1; МЛТ-2.

Сопротивление этих резисторов соответствуют рядам: E12; E24; E48 и находятся в пределах: 1 – 910 Ом; 1 – 910 кОм; 1 – 10 МоМ.

ПЭВ – проволочные, эмалированные, радиальные выводы. Выпускаются 11 видов по номинальной мощности: 3 Вт; 7,5 Вт; 10 Вт; 15 Вт; 20 Вт; 25 Вт; 30 Вт; 40 Вт; 50 Вт; 75 Вт; 100 Вт.

Сопротивление этих резисторов соответствуют ряду E24 и находятся в пределах 1 – 56000 Ом в зависимости от мощности.

Изменения выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ при изменении напряжения питания $\Delta E_{\text{п}} = 0,2 \cdot E_{\text{п}}$ и подключении нагрузки $R_{\text{н}}$ определяются из выражений:

$$\Delta U_{\text{вых}}^{E_{\text{п}}} = \Delta E_{\text{п}} \cdot \frac{r_{\text{д}}}{R_{\text{б}} + r_{\text{д}}},$$

$$\Delta U_{\text{вых}}^{R_{\text{н}}} = U_{\text{вых}} \cdot \frac{r_{\text{д}}}{R_{\text{н}} + r_{\text{д}}}.$$

Задача 2.1.3. Представить схему оптоэлектронного позиционного датчика с управляемым оптическим каналом, содержащую светодиод и фотодиод с соответствующими резисторами $R_{\text{с}}$ и $R_{\text{ф}}$. Выбрать типы светодиода и фотодиода, задать режимы их работы и определить сопротивление резисторов в схеме при напряжении питания датчика $U_{\text{п}} = 12\text{В}$. Рассчитать напряжение на выходе датчика $U_{\text{вых}}$ при световом потоке Φ через оптический канал и нагрузке $R_{\text{н}}$ (табл. 2.1.4).

Таблица 2.1.4

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\Phi 10^{-3}, \text{лм}$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
$R_{\text{н}}, \text{кОм}$	800	700	600	500	400	350	300	250	200	150

Методические указания

Целесообразно выбрать светодиод с инфракрасным спектром излучения, при котором фотодиод может использоваться с защитным ИК-фильтром. Номинальный ток светодиода $I_{\text{ном}}$ в позиционном датчике выбирается в пределах до 20% от максимального тока $I_{\text{пр.макс}}$ для повышения срока службы излучателя.

Фотодиод выбирается на основе кремния, что уменьшает темновой ток $I_{\text{т}}$ и повышает термостабильность датчика.

Сопротивление ограничительного резистора светодиода равно

$$R_{\text{с}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}}{I_{\text{ном}}},$$

где $U_{\text{пр}}$ - прямое падение напряжения на светодиоде (из справочника).

Сопротивление выходного резистора $R_{\text{ф}}$ в цепи фотодиода выбирается в пределах 10 – 100 кОм в зависимости от сопротивления внешней нагрузки $R_{\text{н}}$ из условия $R_{\text{ф}} \leq 0,1 \cdot R_{\text{н}}$.

Выходной сигнал датчика можно определить, используя выражение

$$U_{\text{вых}} = R_{\text{ф}} \cdot (I_{\text{т}} + S_{\text{л}} \cdot \Phi),$$

где $S_{\text{л}}$ - интегральная чувствительность фотодиода (из справочника).

Рекомендуемые типы светодиода и фотодиода:

светодиод - АЛ 107Б ($U_{\text{пр}} = 2\text{В}$, $I_{\text{пр.макс}} = 100\text{мА}$);

фотодиод - ФД – 27К ($I_{\text{т}} = 1\text{мкА}$, $S_{\text{л}} = 4\text{мА/лм}$, $U_{\text{раб}} \leq 20\text{В}$).

Задача 2.1.4. Определить фактические параметры транзистора в рабочей точке $U_{\text{кэ}} = 10\text{В}$, $U_{\text{бэ}}$ (табл. 2.1.5), используя его входные и выходные вольтамперные характеристики (рис. 1.24), [2]:

$$r_{\text{вх.ст}} = U_{\text{бэ}} / I_{\text{б}} \quad \text{- статическое входное сопротивление}$$

(по постоянному току);

$r_{\text{вх}} = h_{11} = \Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{б}}$	- дифференциальное входное сопротивление (по переменному току);
$r_{\text{вых.ст}} = U_{\text{кэ}} / I_{\text{к}}$	- статическое выходное сопротивление (по постоянному току);
$r_{\text{вых}} = \frac{1}{h_{22}} = \Delta U_{\text{кэ}} / \Delta I_{\text{к}}$	- дифференциальное выходное сопротивление (по переменному току);
$\beta_{\text{ст}} = I_{\text{к}} / I_{\text{б}}$	- статический коэффициент передачи тока;
$\beta = h_{21} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}$	- дифференциальный коэффициент передачи тока.

Таблица 2.1.5

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_{\text{бэ}}, \text{В}$	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75

Сравнить полученные значения статических и дифференциальных параметров транзистора и показать их отличие в виде неравенств.

Методические указания

Для определения дифференциальных сопротивлений транзистора на графике входных или выходных характеристик откладывают приращения функции как катеты треугольника с вершиной в рабочей точке. Для определения статических сопротивлений используют координаты этой точки.

При определении коэффициента передачи β необходимо взять приращение токов базы и коллектора между соседними выходными характеристиками для заданного напряжения $U_{\text{кэ}}$ в рабочей точке.

Задача 2.1.5. Представить схему тиристорного выключателя для управления силовым электромагнитом при его питании от мостового вы-

прямителя. Выбрать тип тиристора, определить параметры сигнала управления и мощность, рассеиваемую тиристором, при заданных значениях напряжения питания $U_{\text{п}}$ и сопротивления электромагнита $R_{\text{эм}}$ (табл. 2.6). Определить также максимальную мощность в нагрузке, которую может коммутировать выбранный тиристор.

Таблица 2.1.6

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{п}}, \text{В}$	12	24	36	48	60	110	127	127	220	380
$R_{\text{эм}}, \text{Ом}$	8	15	20	12	20	65	80	60	200	760

Методические указания

Тиристор выбирается по максимально допустимым параметрам $U_{\text{пр.зкр.макс}}$ и $I_{\text{откр.макс}}$, которые должны превышать на 20 – 30% соответствующие фактические максимальные значения $U_{\text{пр.зкр}}$ и $I_{\text{откр}}$.

Фактическое значение $U_{\text{пр.зкр}}$ определяется амплитудой напряжения питания (при использовании защитного диода). Ток $I_{\text{откр}}$ соответствует току нагрузки тиристора $I_{\text{откр}} \approx U_{\text{п}} / R_{\text{эм}}$.

Мощность, рассеиваемая тиристором, определяется падением напряжения на открытом тиристоре $U_{\text{откр}}$ и током $I_{\text{откр}}$.

Максимальная мощность в нагрузке, коммутируемая тиристором, определяется по предельным параметрам $U_{\text{пр.зкр.макс}}$ и $I_{\text{откр.макс}}$.

2.2. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

В этом разделе рассматриваются инженерные методы расчета усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах, вычитающего и интегрирующего операционных усилителей, влияние обратной связи на параметры усилителя.

Задача 2.2.1. В двухкаскадном транзисторном усилителе с ОС последовательно-параллельного типа определить собственный коэффициент усиления K_0 , если необходимо ограничить изменение результирующего коэффициента усиления K в заданных пределах δ (табл. 2.2.1) при изменениях β каждого транзистора в 2 раза. Рассчитать входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилителя, если заданы входные и выходные сопротивления усилительного каскада ($r_{вх} = 0,5 \text{ кОм}$, $r_{вых} = 1 \text{ кОм}$).

Таблица 2.2.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$\delta, \%$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Методические указания

Для решения задачи необходимо использовать известное выражение, связывающее коэффициенты усиления замкнутого усилителя K , разомкнутого усилителя K_0 и коэффициент передачи цепи обратной связи $K_{ос}$. Так как в этом выражении два неизвестных коэффициента K_0 и $K_{ос}$, то их необходимо включить в систему двух уравнений. В первое уравнение, связывающее K_0 , $K_{ос}$ и K , подставляется исходное заданное значение K . Во втором аналогичном уравнении вместо K_0 берется $4K_0$ в соответствии с изменением коэффициента β двух транзисторов, а вместо

K подставляется увеличенное его значение $K + \delta/100 \cdot K$, как следствие изменения β .

Получив из этой системы уравнений значение коэффициента K_o , можно рассчитать сопротивления $R_{вх}$ и $R_{вых}$, которые определяются глубиной ОС, т.е. отношением K_o / K .

Задача 2.2.2. Составить и рассчитать схему транзисторного и усилительного каскада с общим эмиттером, определить его коэффициент усиления K_U , входное сопротивление $R_{вх}$ и выходное сопротивление $R_{вых}$ для условий холостого хода ($R_H = \infty$) и при включенной нагрузке $R_H = 2 \cdot R_K$. Построить диаграммы напряжений на входе, коллекторе и нагрузке. В схеме предусмотреть эмиттерную стабилизацию режима работы транзистора.

Исходные данные:

- напряжение питания $U_{п} = 12В$;
- сопротивление резистора в цепи коллектора R_K (таблица 2.2.2);
- частота входного сигнала $f = 400Гц$;
- параметры транзистора $h_{11} = 200Ом$, $\beta_{ст} = 60$.

Таблица 2.2.2

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_K, Ом$	390	430	470	510	560	620	680	750	820	910

Методические указания

Расчет каскада начинают с определения рабочей точки транзистора ($U_{Кр.}, I_{Кр.}$), обеспечивающей режим работы каскада в классе А. Используя коэффициент передачи транзистора $\beta_{ст}$, определяют рабочий ток базы

$I_{Б.р.}$ и напряжение $U_{Б.р.}$, по которому рассчитываются сопротивления базового делителя. При этом задают ток делителя $I_{Д} = (10 - 20) \cdot I_{Б.р.}$ и напряжение на эмиттере $U_{Э} = (0,1 - 0,2) \cdot U_{н.}$.

Емкость C конденсаторов на входе, выходе и эмиттере определяется из условия $x_0 \ll R$, где R - сопротивление резистора $R_{вх}$, $R_{н}$ или $R_{э}$.

Параметры усилительного каскада K_U , $R_{вх}$ и $R_{вых}$ рассчитываются по известным формулам, при этом для нагруженного усилительного каскада вместо R_k подставляется эквивалентное сопротивление

$$R_{К.эКВ} = \frac{R_k \cdot R_{н}}{R_k + R_{н}}.$$

При построении диаграммы напряжения на коллекторе необходимо учитывать постоянную составляющую $U_{Е.д.}$, а также сдвиг фазы этого сигнала относительно входного.

В связи с малым значением сопротивлений $R_{вх}$ и $R_{э}$ емкость конденсаторов может быть значительной (10 – 100 МкФ). Поэтому выбираются конденсаторы, например, типа К50 -16. Номинальные значения емкости этих конденсаторов соответствуют ряду Е12, а рабочие напряжения выбираются из ряда: 6,3 В; 10 В; 15 В; 20 В; 25 В и т.д.

Задача 2.2.3. Представить схему вычитающего операционного усилителя (ОУ), в котором сигнал U_1 через резистор $R_1 = 10 \text{ кОм}$ подается на инвертирующий вход, сигнал U_2 подводится через делитель напряжения $R_3 - R_4$ к неинвертирующему входу, а в цепи ОС включен резистор $R_2 = 20 \text{ кОм}$. Выбрать и обосновать теоретически сопротивления резисторов R_3 , R_4 в делителе напряжения, рассчитать выходной сигнал $U_{вых}$ вычитающего ОУ при заданных входных сигналах U_1 и U_2 (табл. 2.2.3) и

определить входное сопротивление по каждому из входов $R_{\text{вх-}}$ и $R_{\text{вх+}}$, учитывая собственные параметры усилителя: $K_o = 30000$, $r_{\text{вх}} = 0,4 \text{ МОм}$, $r_{\text{сф}} = 10 \text{ МОм}$.

Таблица 2.2.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_1, \text{В}$	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15
$U_2, \text{В}$	0,35	0,55	0,75	0,95	1,15	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15

Методические указания

Определение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ осуществляется методом суперпозиции с использованием коэффициентов передачи ОУ по инвертирующему и неинвертирующему входам. Последние рассчитываются по известным зависимостям, приведенным в литературе.

При определении входного сопротивления по неинвертирующему входу $R_{\text{вх+}}$ необходимо учитывать сопротивления делителя R_3 , R_4 , а коэффициент $M_{\text{сф}}$ принять равным ∞ .

Задача 2.2.4. Составить схему интегрирующего операционного усилителя (ОУ) со сбросом заряда конденсатора. Определить максимальный уровень выходного напряжения ОУ при двух видах входного сигнала: четырех однополярных импульсах со скважностью $Q = 2$ и переменном напряжении прямоугольной формы. Построить в соответствующем масштабе

диаграммы напряжений на входе и выходе ОУ.

Исходные данные:

- сопротивление входного резистора $R_1 = 0,1 \text{ МОм}$;
- емкость конденсатора в цепи ОС $C = 0,25 \text{ мкФ}$;

- амплитуда входного сигнала $U_{\text{вх}}$ и его частота $f_{\text{вх}}$ - заданы в табл.2.2.4.

Таблица 2.2.4

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{вх}}, B$	0,5	0,9	1,4	2,0	2,7	3,5	4,4	5,4	6,5	7,7
$f_{\text{вх}}, Гц$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70

Методические указания

Выходное напряжение интегрирующего ОУ для рассматриваемого случая можно определить, учитывая его реакцию на ступенчатый входной сигнал

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int U_{\text{вх}}(t) dt = -\frac{U_{\text{вх}}}{R \cdot C} \cdot t + U_{\text{вых.о}}, \quad (2.2.1)$$

где $U_{\text{вых.о}}$ - начальное напряжение на выходе ОУ.

Перед вычислением выходного напряжения $U_{\text{а\ddot{u}\ddot{o}}}$ целесообразно построить диаграммы сигналов на входе и выходе интегратора. Как следует из выражения (2.2.1) выходное напряжение ОУ линейно нарастает за время действия каждого входного импульса. В паузах между импульсами это напряжение остается неизменным.

При знакопеременном входном напряжении конденсатор C перезаряжается в каждом полупериоде и на выходе ОУ формируется переменное напряжение треугольной формы.

При построении диаграмм необходимо учитывать смену знака выходного сигнала относительно входного, а также удвоение скорости изменения напряжения $U_{\text{вых}}$ при переменном входном сигнале.

Определив по диаграммам фактическое время интегрирования при заданной частоте (и количестве) входных импульсов, подставляют эту величину в выражение (2.2.1) для определения напряжения $U_{\text{вых}}$.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: Учебник для вузов /Ростов-на Дону: Феникс, 2005., 260 с.
2. Основы промышленной электроники: Учеб. для вузов / Под ред. В.Г. Герасимова. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1986. – 336 с.

Составители: Роберт Николаевич Кулагин
Наталья Валерьевна Федорова

ЭЛЕКТРОНИКА (Учебное пособие) Часть 1
«Полупроводниковые приборы и усилительные устройства»

Редактор

Темплан 2012, позиция №
Подписано в печать Формат 60х84 1/16. Бумага газетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. Уч. – изд. л.
Тираж экз. Заказ .

Волгоградский государственный технический университет.
400066 Волгоград, просп. Ленина, 28.

РПК “Политехник”
Волгоградского государственного технического университета
400066 Волгоград, ул. Советская, 35

