

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра электроники

Лабораторный практикум  
по курсу  
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ  
для студентов всех специальностей БГУИР  
В 2-х частях

Часть 2  
Аналоговые и импульсные устройства

Минск 1999

УДК 621.382

ББК 32.852

Л12

Бельский А.Я., Березовский В.К., Валенко В.С., Дробот С.В., Дунаева Г.П., Мельников В.А., Путилин В.Н., Русакович В.Н., Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Лабораторный практикум по курсу "Электронные приборы" для студентов всех специальностей БГУИР. В 2 Ч. Ч 2. Аналоговые и импульсные устройства. – Мн.: БГУИР, 1999. – 111 с.

Лабораторный практикум по курсу "Электронные приборы" включает 13 лабораторных работ, выполняемых студентами в соответствии с учебными планами и программами специальностей БГУИР. Материал по каждой работе содержит цель, краткие теоретические сведения, методические указания и порядок выполнения работы.

В первую часть настоящего практикума вошли лабораторные работы по исследованию приборов полупроводниковой электроники. Вторая часть включает работы по исследованию аналоговых и импульсных устройств.

Предназначен для студентов всех специальностей БГУИР.

Ч.1. Бельский А.Я., Березовский В.К., Валенко В.С., Дробот С.В., Дунаева Г.П., Мельников В.А., Путилин В.Н., Русакович В.Н., Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Лабораторный практикум по курсу "Электронные приборы" для студентов всех специальностей БГУИР. В 2 Ч. Ч 1. Активные компоненты полупроводниковой электроники. – Мн.: БГУИР, 1999.

© Коллектив авторов, 1999

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания

Лабораторная работа № 5.

Исследование одиночных усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах

Лабораторная работа № 6.

Исследование эмиттерного и истокового повторителей

Лабораторная работа № 7.

Исследование многокаскадных усилителей с обратными связями

Лабораторная работа № 8.

Исследование оконечных (выходных) усилительных каскадов

Лабораторная работа № 9.

Исследование операционных усилителей

Лабораторная работа № 10.

Исследование электронных ключей

Лабораторная работа № 11.

Исследование цифровых базовых логических элементов

Лабораторная работа № 12.

Исследование триггерных устройств на полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах

Лабораторная работа № 13.

Исследование мультивибраторов

## Общие методические указания

Лабораторные занятия по курсу "Электронные приборы" проводятся фронтальным методом. На первом занятии студент должен пройти инструктаж по технике безопасности, ознакомиться с лабораторным стендом и правилами выполнения лабораторных работ.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:  
изучить материал по рекомендуемой литературе,  
выполнить необходимые предварительные расчеты.

Исследования проводятся на универсальных лабораторных стендах, содержащих необходимые измерительные приборы и источники питания. При подключении измерительных приборов, расположенных на вертикальной панели стенда, необходимо обращать внимание на полярность приборов и соответствие выбранного предела измерений ожидаемому значению измеряемой величины.

Сборка схемы производится при выключенных источниках питания. Напряжение питания включается только после проверки ее лаборантом или преподавателем. Перед включением блока питания ручки всех регулировочных потенциометров должны быть повернуты против часовой стрелки до упора.

Описания дополнительной радиоизмерительной аппаратуры (электронные осциллографы, генераторы, вольтметры и пр.), используемой в работах, имеются на каждом рабочем месте в виде инструкций.

Схемы исследуемых устройств, измерительных установок и графики экспериментальных характеристик выполняются в соответствии с требованиями ЕСКД.

По каждой выполненной лабораторной работе студент должен составить отчет и представить его преподавателю к защите на следующем занятии в лаборатории.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

#### Цель работы

1. Изучить характеристики и параметры усилительных каскадов, а также режимы работы и способы задания рабочей точки активных элементов в усилителях.
2. Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры одиночных усилительных каскадов.

#### Краткие теоретические сведения

Усилителем электрических сигналов называется устройство, предназначенное для усиления мощности сигнала, поданного на его вход. Процесс усиления основан на преобразовании активным элементом (биполярным, полевым транзистором) энергии источника постоянного напряжения в энергию переменного напряжения на нагрузке при изменении сопротивления активного элемента под действием входного сигнала.

Усилители сигналов являются базовыми устройствами для построения сложных аналоговых электронных устройств. В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения: с общей базой или общим затвором (ОБ или ОЗ); с общим эмиттером или общим истоком (ОЭ или ОИ); общим коллектором или общим стоком (ОК или ОС). Работа усилительных устройств описывается рядом параметров и характеристик.

**Коэффициент усиления или коэффициент передачи** – отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале. Сигнал может описываться напряжением, током или мощностью, поэтому различают:

коэффициент усиления по напряжению  $K_u = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ ;

коэффициент усиления по току  $K_i = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}}$ ;

коэффициент усиления по мощности  $K_p = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$ .

Для многокаскадных усилителей коэффициент усиления определяется произведением коэффициентов усиления отдельных каскадов, выраженных в абсолютных единицах:

$K_u = K_{u1} K_{u2} \dots K_{un}$  (раз) или суммой коэффициентов усиления, выраженных в децибелах:

$K_u = K_{u1} + K_{u2} + \dots + K_{un}$  (дБ).

**Входное сопротивление усилителя** (полное  $Z_{\text{ВХ}}$  или резистивное  $R_{\text{ВХ}}$ ) представляет собой сопротивление между входными зажимами усилителя и определяется отношением входного напряжения ко входному току  $Z_{\text{ВХ}} = \dot{U}_{\text{ВХ}} / \dot{I}_{\text{ВХ}}$ . Характер входного сопротивления зависит от диапазона усиливаемых частот.

**Выходное сопротивление** (полное  $Z_{\text{ВЫХ}}$  или резистивное  $R_{\text{ВЫХ}}$ ) определяют между выходными зажимами при отключенном сопротивлении нагрузки  $Z_{\text{ВЫХ}} = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{I}_{\text{ВЫХ}}$ .

**Коэффициент демпфирования** – отношение сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению  $K_{\text{д}} = R_{\text{н}} / R_{\text{ВЫХ}}$ . Для усилителей высшего класса он лежит в пределах от 10 до 100.

**Выходная мощность** – мощность на выходе усилителя при работе на расчетную нагрузку и заданном коэффициенте гармоник или нелинейных искажений  $P_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{м Вых}}^2 / 2R_{\text{н}}$ .

**Коэффициент полезного действия** – отношение выходной мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку, к общей мощности, потребляемой от источника питания  $\eta = (P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{п}}) 100 \%$ .

**Чувствительность** (номинальное входное напряжение) – напряжение, которое нужно подать на вход усилителя, чтобы получить на выходе заданную мощность.

**Динамический диапазон** – отношение наибольшего допустимого значения входного напряжения к его наименьшему допустимому значению  $D = U_{\text{ВХ макс}} / U_{\text{ВХ мин}}$ .

**Диапазон усиливаемых частот** (полоса пропускания) – разность между верхней и нижней граничными частотами  $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ , в которой коэффициент усиления усилителя изменяется по определенному закону с заданной точностью.

**Коэффициент нелинейных искажений** (коэффициент гармоник) определяет нелинейные искажения усилителя в процентах

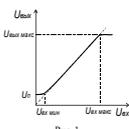
$$K_{\text{Г}} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} 100 \%,$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – мощности гармонических составляющих выходного сигнала ( $nf_1$ ) при синусоидальном входном сигнале с частотой  $f_1$ . Источником нелинейных искажений является нелинейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) активных элементов усилителя.

Линейные искажения определяются зависимостями параметров транзисторов от частоты и реактивными элементами усилительных устройств. Линейные искажения бывают трех видов: частотные, фазовые и переходные.

**Амплитудная характеристика (АХ)** – это зависимость амплитуды (или действующего значения) первой гармоники выходного напряжения от амплитуды (или действующего значения) гармонического синусоидального сигнала на входе устройства (рис. 1). Для идеального усилителя АХ линейна и проходит через начало координат (штриховая линия), наклон характеристики к оси абсцисс определяется коэффициентом усиления

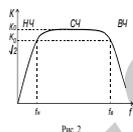
$$U_{\text{ВЫХ}} = K_u \cdot U_{\text{ВХ}}$$



Отличие реальной АХ от идеальной обусловлено влиянием помех (шумы усилителя, наводки, фон и т.д.), что приводит к наличию напряжения на выходе при отсутствии напряжения сигнала на входе. АХ реального усилителя становится нелинейной при превышении входного напряжения значения  $U_{\text{ВХ макс}}$ , что обусловлено нелинейностью ВАХ активного элемента. По АХ легко определить динамический диапазон усилителя.

Минимальным значением входного сигнала следует считать такой входной сигнал, при котором выходной сигнал в два раза превышает уровень шумов на выходе усилителя. Максимальное значение входного сигнала ограничивается допустимыми нелинейными искажениями выходного сигнала.

**Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)** определяет зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала на входе усилителя. На рис. 2 представлена типичная АЧХ апериодического (нерезонансного) усилителя.

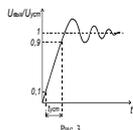


В области низких частот на ход АЧХ влияют разделительные и блокировочные конденсаторы в цепях усилителя. На высоких частотах влияние оказывают частотные свойства транзисторов, емкости монтажа и комплексный характер сопротивления нагрузки. Частоты на которых коэффициент усиления уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с усилением на средних частотах определяют нижнюю  $f_H$  и верхнюю  $f_B$  границы частотного диапазона усиления и называются граничными частотами.

Измерение АЧХ проводят при фиксированном уровне входного сигнала, соответствующем линейному участку АХ, обычно  $U_{\text{ВХ}} = (0,1 \dots 0,3) U_{\text{ВХ макс}}$ . Часто используется логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ), по оси частот которой используется ло-

гарифмический масштаб (десятикратному изменению частоты – декаде – соответствуют равные геометрические отрезки).

**Переходная характеристика (ПХ)** устанавливает зависимость мгновенного значения напряжения на выходе усилителя от времени при бесконечно быстром скачкообразном изменении входного сигнала. ПХ оценивает искажения усиливаемых импульсных сигналов, которые обусловлены реактивными элементами схемы усилителя.



На рис. 3 представлена ПХ усилителя при подаче на вход прямоугольного импульса. В области низких частот (малых времен) передний фронт импульса выходного сигнала оказывается растянутым во времени и характеризуется временем установления  $t_{уст}$ . Время установления определяется временным интервалом, в течение которого выходное напряжение изменяется от 0,1 до 0,9 установившегося значения  $U_{уст}$ . При усилении гармонического сигнала время установления связано с верхней граничной частотой следующей зависимостью:  $t_{уст} = 0,35/f_B$ .

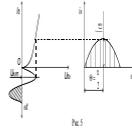
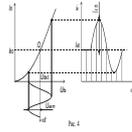
В усилительных каскадах при отсутствии входного сигнала во входной и выходной цепях устанавливаются определенные значения постоянных токов и напряжений, такой режим работы каскада называют статическим (режимом по постоянному току, режимом покоя). Значения постоянных составляющих токов и напряжений определяются напряжением источников питания и сопротивлением нагрузок во входной и выходной цепях активного элемента. Рабочая точка выбирается исходя из требуемого режима работы усилительного каскада.

**Режим класса А.** Рабочая точка покоя выбирается так, что входной сигнал полностью помещается на линейном участке входной характеристики, а значение тока покоя  $I_{б0}$  располагается на середине этого участка (рис. 4). Рабочая точка на выходной характеристике задается напряжением  $U_{кэ0} \approx U_{ип} / 2$ .

Режим класса А характеризуется работой транзистора на почти линейных участках своих ВАХ. В связи с этим нелинейные искажения сигнала минимальны ( $K_T \leq 1\%$ ), а КПД менее 50 %.

**Режим класса В.** Ток через транзистор протекает только в течение половины периода входного сигнала. Рабочая точка на ВАХ выбирается так, что ток покоя равен нулю (рис. 5). При этом входной ток имеет форму импульса с углом отсечки  $90^\circ$ .

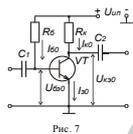
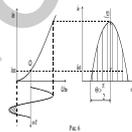
Угол отсечки – половина части периода, выраженная в радианах или градусах, в течение которой транзистор открыт и через него протекает ток.



Для усиления другой полуволны входного сигнала используют еще один каскад (усилитель называется двухтактным). Режим класса В характеризуется большими нелинейными искажениями сигнала ( $K_T \leq 10\%$ ), вследствие работы на нелинейных начальных участках ВАХ транзистора, а КПД лежит в пределах (60...70%).

**Режим класса АВ.** Используется для уменьшения нелинейных искажений. В режиме покоя транзистор приоткрыт, и через него протекает ток, равный 5...15% максимального тока при заданном входном сигнале (рис. 6). Угол отсечки достигает 120...150°.

В режиме класса АВ в двухтактном каскаде происходит перекрытие положительной и отрицательной полуволн тока плеч двухтактного каскада. Коэффициент нелинейных искажений уменьшается ( $K_T \leq 3\%$ ) и уменьшается КПД за счет малого входного тока покоя  $I_{Б0}$ .



Существует несколько способов задания режима по постоянному току.

**Схема с фиксированным током базы.** Режим по постоянному току задается с помощью резисторов  $R_б$ ,  $R_к$  и источника питания  $U_{ИП}$  (рис. 7). Уравнение по второму закону Кирхгофа для входной цепи имеет вид

$$U_{ИП} = I_{Б0} \cdot R_б + U_{БЭ0},$$

где  $U_{БЭ0} \approx (0,3...0,6)$  В (эмиттерный переход открыт), т.е.  $U_{БЭ0} \ll U_{ИП}$ , поэтому ток в цепи базы  $I_{Б0} \approx U_{ИП}/R_б$  не зависит от параметров транзистора, а определяется параметрами входной цепи. Для выходной цепи уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$U_{ИП} = I_{К0} \cdot R_к + U_{КЭ0}.$$

С учетом связи  $I_{к0} \approx h_{21Э} I_{б0}$  видно, что внешние элементы, задавая ток покоя базы  $I_{б0}$ , тем самым определяют ток покоя коллектора  $I_{к0}$ .

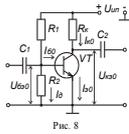


Рис. 8

**Схема с фиксированным напряжением база-эмиттер.** В этой схеме (рис. 8) режим покоя обеспечивается фиксированным напряжением на базе  $U_{бэ0}$  транзистора с помощью источника питания и делителя из резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , сопротивление которых определяется из выражений

$$R_1 = \frac{U_{ип} - U_{бэ0}}{I_{д} + I_{б0}}; \quad R_2 = \frac{U_{бэ0}}{I_{д}}, \quad \text{где } I_{д} = (5...10)I_{б0}.$$

Тогда напряжение на базе транзистора  $U_{бэ0} = I_{д} \cdot R_2 \approx \frac{U_{ип} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ , т.е. не зависит от параметров транзистора, а определяется только внешней цепью.

Недостатком рассмотренных схем задания рабочей точки является сильное влияние изменения температуры, параметров транзистора, напряжения питания на положение рабочей точки. При увеличении температуры обратный ток насыщения эмиттерного перехода  $I_{эб0}$  и ток покоя базы  $I_{б0}$  изменяются практически одинаково, что приводит к увеличению  $I_{к0}$ , а точка покоя перемещается в сторону режима насыщения. Использование в данных схемах транзисторов с параметрами, отличными от принятых при расчете, также приводит к сильному изменению рабочей точки. Для температурной стабилизации рабочей точки транзисторов усилительных каскадов используют обратные связи по постоянному току или напряжению.

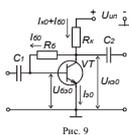


Рис. 9

**Схема с коллекторной стабилизацией.** На рис. 9 представлена схема с коллекторной стабилизацией, в которой резистор  $R_б$  подключается к коллектору транзистора с напряжением

$U_{кэ0}$ , тогда

$$I_{б0} = \frac{U_{кэ0}}{R_б} \approx \frac{U_{ип} - I_{к0} \cdot R_к}{R_б}.$$

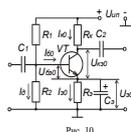
При повышении температуры коллекторный ток должен увеличиваться, следовательно, коллекторное напряжение  $U_{кэ0}$  уменьшается, а значит уменьшается ток базы  $I_{б0}$ , что должно привести к уменьшению коллекторного тока  $I_{к0}$ , т.е. рабочая точка стремится вернуться в исходное положение.

**Схема с эмиттерной стабилизацией.** Наиболее эффективной является схема с эмиттерной стабилизацией рабочей точки (рис. 10). Повышение температуры должно увеличить ток  $I_{к0}$ , что приведет к увеличению

эмиттерного тока  $I_{э0} = I_{к0} + I_{б0}$  и увеличению падения напряжения на резисторе  $R_э$ . Поскольку потенциал база транзистора  $U_{б0} = U_{R2}$  зафиксирован делителем напряжения  $R_1, R_2$ , то напряжение между базой и эмиттером  $U_{бэ0}$  уменьшится

$$|U_{бэ0}| = |U_{R2}| - |I_{э0}R_э| = \left| \frac{U_{инп} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right| - |I_{э0}R_э|,$$

что приведет к уменьшению  $I_{б0}$ , а значит, ток коллектора  $I_{к0}$  практически не изменится.



Наличие резистора  $R_э$  – резистора обратной связи – при отсутствии конденсатора  $C_э$  не только стабилизирует рабочую точку, но и изменяет работу каскада по переменному току. Для схемы изменяющийся входной сигнал также является дестабилизирующим фактором. Переменная составляющая эмиттерного тока  $I_{э\sim}$  создает на резисторе  $R_э$  падение напряжения, которое уменьшает переменное напряжение  $U_{бэ\sim}$

$$U_{бэ\sim} = U_{вх\sim} - R_э I_{э\sim},$$

что приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

**Исследование амплитудной характеристики** усилителя проводится на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 11. При измерении напряжений входного и выходного сигналов необходимо помнить, что вольтметры переменного напряжения показывают действующее значение, а при использовании осциллографа можно измерять амплитудное значение переменного напряжения.

**Исследование амплитудно-частотной характеристики** проводится при фиксированном уровне входного сигнала, выбранном на линейном участке АХ  $U_{вх} \cong (0,1 \dots 0,3) U_{вх \max}$  с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 11. Для упрощения вычислений коэффициента усиления по напряжению желательно выбрать круглое значение амплитуды напряжения входного сигнала. Например: 1 мВ, 5 мВ, 10 мВ. Исследуемые усилительные каскады имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – изменение чего-либо в десять раз, в данном случае частоты). Поэтому при построении графиков АЧХ необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб. При снятии

АЧХ в области средних частот, где коэффициент усиления практически не изменяется, измерения необходимо проводить в трех...пяти точках на каждую декаду. Например: 100, 300, 500, 700 Гц; 1, 2, 3, 5, 7 кГц и т.д. Значения нижней и верхней граничных частот ( $f_H$  и  $f_B$ ) необходимо определять по уменьшению коэффициента усиления в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с максимальным значением коэффициента усиления в области средних частот. Заключительным этапом исследования АЧХ является определение полосы пропускания усилителя  $\Delta f = f_B - f_H$ .

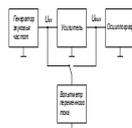


Рис. 11

**Измерение входного и выходного сопротивлений** усилителя проводятся на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) при уровне входного сигнала, соответствующем линейному участку АХ. Измерительная установка собирается согласно структурной схеме, представленной на рис. 12.

Входное сопротивление  $R_{ВХ}$  измеряется косвенным методом. Дополнительный резистор  $R$  на входе усилителя и входное сопротивление усилительного каскада  $R_{ВХ}$  образуют делитель напряжения, для которого можно записать

$$\frac{U_{\Gamma}}{U_{ВХ}} = \frac{R + R_{ВХ}}{R_{ВХ}},$$

где  $U_{\Gamma}$  – напряжение на выходе генератора низких частот (до резистора  $R$ );  $U_{ВХ}$  – напряжение непосредственно на входе усилителя. Необходимо измерить напряжения  $U_{\Gamma}$  и  $U_{ВХ}$ , а входное сопротивление рассчитать по формуле

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ} R}{U_{\Gamma} - U_{ВХ}}.$$

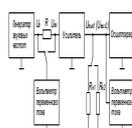


Рис. 12

Если  $R_{\text{вх}}$  усилителя велико и соизмеримо со входным сопротивлением вольтметра, измеряют выходное напряжение  $U_{\text{выхR}}$  при наличии  $R$  и при его отсутствии  $U_{\text{вых0}}$ . В этом случае входное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{выхR}} R}{U_{\text{вых0}} - U_{\text{выхR}}}.$$

Выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  также измеряется косвенным методом, согласно которому проводятся измерения выходных напряжений  $U_{\text{вых1}}$  и  $U_{\text{вых2}}$  при двух известных сопротивлениях нагрузки  $R_{\text{н1}}$  и  $R_{\text{н2}}$  соответственно. Значение выходного сопротивления рассчитывается по формуле

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}} = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{\frac{U_{\text{вых2}}}{R_{\text{н2}}} - \frac{U_{\text{вых1}}}{R_{\text{н1}}}}.$$

Если  $R_{\text{н1}} = \infty$  (нагрузка отсутствует), то

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{н2}}(U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}})}{U_{\text{вых2}}} = R_{\text{н2}} \left( \frac{U_{\text{вых1}}}{U_{\text{вых2}}} - 1 \right).$$

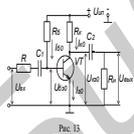
### Порядок выполнения работы

1. Исследовать основные характеристики и параметры усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ, рабочая точка которого задается фиксированным током базы.

1.1. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 13. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{\text{ип}} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

1.2. При отключенном источнике входного сигнала измерить с помощью вольтметра постоянные напряжения  $U_{\text{кэ0}}$  и  $U_{\text{бэ0}}$ . Рассчитать постоянные составляющие тока базы  $I_{\text{б0}} = (U_{\text{ип}} - U_{\text{бэ0}})/R_{\text{б}}$  и тока коллектора  $I_{\text{к0}} = (U_{\text{ип}} - U_{\text{кэ0}})/R_{\text{к}}$ , определить статический коэффициент передачи по току транзистора в схеме с ОЭ  $h_{21Э} = I_{\text{к0}}/I_{\text{б0}}$ .

1.3. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 11 и снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$ . Величину  $U_{\text{вх макс}}$



определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя.

1.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$  при напряжении входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{ВХ}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

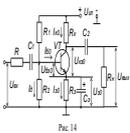
1.5. Измерить входное  $R_{\text{ВХ}}$  и выходное  $R_{\text{ВЫХ}}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

2. Исследовать основные характеристики и параметры усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ, рабочая точка которого задается схемой эмиттерной стабилизации.

2.1. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 14. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{\text{ИП}} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

2.2. При отключенном источнике входного сигнала измерить с помощью вольтметра постоянные напряжения  $U_{\text{КЭ0}}$ ,  $U_{\text{Э0}}$  и  $U_{\text{БЭ0}}$ . Рассчитать постоянные составляющие тока эмиттера  $I_{\text{Э0}} = U_{\text{Э0}}/R_{\text{Э}}$ , тока коллектора  $I_{\text{К0}} = (U_{\text{ИП}} - U_{\text{КЭ0}} - U_{\text{Э0}})/R_{\text{К}}$  и тока базы  $I_{\text{Б0}} = I_{\text{Э0}} - I_{\text{К0}}$ .

2.3. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 11 и снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$ . Величину  $U_{\text{ВХ}}$  макс определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя.

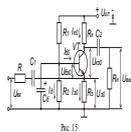


2.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений емкости разделительного конденсатора  $C_1$  при напряжении входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ ,

соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

2.5. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив амплитуду входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

3. Исследовать основные характеристики и параметры усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОБ, рабочая точка которого задается схемой эмиттерной стабилизации.



3.1. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 15. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{ИП} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

3.2. При отключенном источнике входного сигнала измерить с помощью вольтметра постоянные напряжения  $U_{КЭ0}$ ,  $U_{Э0}$  и  $U_{БЭ0}$ . Рассчитать постоянные составляющие тока эмиттера  $I_{Э0} = U_{Э0}/R_{Э}$ , тока коллектора  $I_{К0} = (U_{ИП} - U_{КЭ0} - U_{Э0})/R_{К}$  и тока базы  $I_{Б0} = I_{Э0} - I_{К0}$ .

3.3. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 11 и снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{Н}$ . Величину  $U_{ВХ макс}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя.

3.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений емкости разделительного конденсатора  $C_1$  при напряжении входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

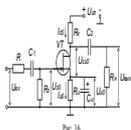
3.5. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив амплитуду входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

4. Исследовать основные характеристики и параметры усилительного каскада на полевом транзисторе с ОИ, рабочая точка которого задается схемой автосмещения.

4.1. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 16. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{ИП} = 10 \text{ В}$ . Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

4.2. При отключенном источнике входного сигнала измерить с помощью вольтметра постоянные напряжения  $U_{СИ0}$ ,  $U_{И0}$  и  $U_{З0}$ . Рассчитать постоянные составляющие тока стока и истока  $I_{И0} = I_{С0} = U_{И0}/R_{И}$ .

4.3. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 11 и снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$  для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{Н}$ . Величину  $U_{ВХ \text{ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя.



4.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений емкости разделительного конденсатора  $C_2$  при напряжении входного сигнала

$U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

4.5. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ , установив амплитуду входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

#### Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Принципиальные схемы исследуемых усилительных каскадов.
3. Результаты исследования каскадов по постоянному току.
4. Табличные и графические результаты исследования АХ каскадов.

5. Табличные и графические результаты исследования АЧХ каскадов.
6. Сводная таблица с результатами измерений входных и выходных сопротивлений каскадов.
7. Анализ полученных результатов: влияние сопротивления нагрузки и емкости разделительных конденсаторов на параметры и характеристики усилителей; сравнение входных и выходных сопротивлений исследованных каскадов.

#### Контрольные вопросы

1. Амплитудная характеристика и методика ее измерения.
2. Амплитудно-частотная характеристика и методика ее измерения.
3. Входное и выходное сопротивление и методика их измерений.
4. Динамический диапазон усилителя и способ его определения.
5. Покажите пути прохождения постоянных токов в схемах с фиксированным током базы и эмиттерной стабилизацией.
6. Покажите на входных и выходных характеристиках транзистора, как располагается рабочая точка по постоянному току в различных режимах работы.
7. Объясните принцип действия эмиттерной стабилизации режима работы по постоянному току.
8. Как влияет уменьшение сопротивления нагрузки каскада на его коэффициент усиления по напряжению?
9. Как влияет увеличение емкости разделительного конденсатора на АЧХ усилителя?

#### Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Полупроводниковые усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1997.
3. Ногин В.М. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1992.
4. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО И ИСТОКОВОГО ПОВТОРИТЕЛЕЙ

#### Цель работы

1. Изучить особенности схемотехники, назначение, область применения эмиттерного и истокового повторителей.
2. Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры эмиттерного и истокового повторителей.

#### Краткие теоретические сведения

Эмиттерный и истоковый повторители нашли широкое применение в усилительных устройствах как согласующие и выходные каскады. Электрическая схема эмиттерного повторителя представлена на рис. 1.

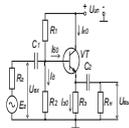


Рис. 1

Резистор, с которого снимается выходное напряжение, включен в эмиттерную цепь. Коллектор через очень малое внутреннее сопротивление источника питания по переменному сигналу (емкость источника питания велика) соединен с землей, значит, вывод коллектора является общим для входной и выходной цепей усилителя.

Для каскада с ОК справедливо равенство

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{бэ}} + U_{\text{ВЫХ}} .$$

Если выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  значительно больше напряжения  $U_{\text{бэ}}$ , то выходное напряжение приблизительно равно входному. В связи с этим каскад с ОК называют эмиттерным повторителем. Этот каскад относится к усилителям с глубокой 100%-ной отрицательной ОС по напряжению. Эта связь определяет широкополосность каскада и малые нелинейные искажения сигнала. В данном каскаде сильно ослаблено влияние емкости перехода база-эмиттер по сравнению со схемой с ОЭ, поскольку переход находится под напряжением, равным разности его входного и выходного напряжений.

В режиме покоя, т.е. при  $U_{\text{ВХ}} = 0$  резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  задают начальный ток смещения. Их сопротивление выбирают таким образом, чтобы рабочая точка в режиме покоя находилась примерно посередине линейного участка входной характеристики. Разделительные конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  выполняют те же функции, что и в каскаде с ОЭ.

В каскаде с ОК напряжение входного переменного сигнала подается между базой и коллектором (общей шиной) через разделительный конден-

сатор  $C_1$ . Выходное напряжение, равное падению напряжения на резисторе  $R_3$  от переменной составляющей эмиттерного тока, снимается с эмиттера

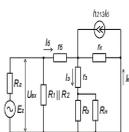


Рис. 2

через конденсатор связи  $C_2$ . Расчет каскада по постоянному току проводят по аналогии с каскадом ОЭ. Анализ каскада по переменному сигналу проводят с помощью эквивалентной схемы, представленной на рис. 2.

**Входное сопротивление** в области низких и средних частот каскада с ОК определяется параллельным соединением резисторов  $R_1$  и  $R_2$  и сопротивлением входной цепи транзистора  $r_{вх}$ :

$$R_{вх} = R_1 || R_2 || r_{вх}. \quad (1)$$

Входное сопротивление транзистора определяется выражением

$$r_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{б}} = r_{б} + (1 + h_{21э})(r_{э} + R_3 || R_{н}). \quad (2)$$

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что сопротивление входной цепи транзистора  $r_{вх}$  и входное сопротивление каскада с ОК больше, чем в схеме с ОЭ. В практических схемах  $R_{вх}$  достигает значений 100...300 кОм. Входное сопротивление не остается постоянным, а изменяется в зависимости от сопротивления нагрузки. Для увеличения входного сопротивления часто не включают резистор  $R_2$ . Высокое входное сопротивление является одним из главных преимуществ каскада с ОК. Это требуется в случае применения каскада в качестве согласующего устройства при работе от источника входного сигнала с большим внутренним сопротивлением.

**Выходное сопротивление** каскада с ОК представляет собой сопротивление схемы со стороны эмиттера и определяется выражением

$$R_{вых} = R_3 || \left[ r_{э} + \frac{r_{б} + R_{г} || R_1 || R_2}{1 + h_{21э}} \right] \approx R_3 || \left[ r_{э} + \frac{r_{б} + R_{г}}{1 + h_{21э}} \right] \approx \approx r_{э} + \frac{r_{б} + R_{г}}{1 + h_{21э}}. \quad (3)$$

Выходное сопротивление каскада с ОК мало, имеет величину порядка десятков ом (10...50 Ом) и сильно зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала. Малое выходное сопротивление очень важно для применении каскада в качестве согласующего устройства при работе на низкоомную нагрузку.

**Коэффициент усиления по току** в каскаде с ОК определяется следующим образом:

$$K_I = I_H / I_{BX}, \quad (4)$$

где  $I_H = (1 + h_{21э}) I_б \frac{R_э || R_H}{R_H}, \quad I_б = I_{BX} \frac{R_{BX}}{r_{BX}},$

тогда

$$K_I = (1 + h_{21э}) \frac{R_{BX}}{r_{BX}} \frac{R_э || R_H}{R_H} \approx (1 + h_{21э}) \frac{R_э}{R_э + R_H}. \quad (5)$$

Анализ выражения показывает, что каскад с ОК имеет большой коэффициент усиления по току, по сравнению с каскадами с ОЭ и ОБ.

**Коэффициент усиления по напряжению** каскада с ОК относительно входного генератора равен

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_э R_э || R_H}{I_б (R_{BX} + R_Г)} \approx (1 + h_{21э}) \frac{R_э || R_H}{R_{BX} || R_Г}. \quad (6)$$

Коэффициент усиления по напряжению каскада с ОК меньше единицы, поэтому его часто называют коэффициентом передачи напряжения.

Эмиттерный повторитель обычно применяют для согласования высокоомного источника усиливаемого сигнала с низкоомным нагрузочным устройством. Температурная стабилизация в каскаде с ОК обеспечивается резистором  $R_э$ .

Каскад с ОК характеризуется высоким входным сопротивлением (порядка сотен килоом), зависящим от сопротивления нагрузки; низким выходным сопротивлением (порядка единиц ом), зависящим от внутреннего сопротивления источника сигнала; высоким коэффициентом усиления по току; низким коэффициентом усиления по напряжению, меньшим единицы; совпадением по фазе входного и выходного напряжений.

**Эмиттерный повторитель со следящей связью.** Анализ выражений (1)-(2) показывает, что в большинстве случаев  $r_{BX} \geq R_1 || R_2$ , а значит, входное сопротивление всего каскада определяется сопротивлением делителя напряжения  $R_1 || R_2$ . Для повышения входного сопротивления всего каскада и уменьшения шунтирующего действия делителя используют так называемую следящую связь по переменному току за счет конденсатора  $C_{ос}$  (рис. 3). Смещение на базу транзистора задается резисторами  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_д$ . Наличие конденсатора  $C_{ос}$  приводит к тому, что падение переменного напряжения на резисторе  $R_д$  близко к нулю, поскольку  $K_{ц} \approx 1$  и  $U_{ВЫХ} \approx U_{ВХ}$ . Емкость конденсатора  $C_{ос}$  выбирается из следующего условия  $X_{C_{ос}}(2\pi f_H) \ll R_д$ . При этом эквивалентное сопротивление резистора  $R_д$  определяется следующим выражением:

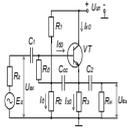


Рис. 3

$$R_{д экв} = \frac{R_{д}}{1 - K_u}$$

Схема усилительного каскада с общим стоком представлена на рис. 4. В этом каскаде нагрузочный резистор  $R_{и}$  включен в цепь истока, а сток по переменным составляющим тока и напряжения соединен с общей точкой каскада, т.е. вывод стока является общим для входной и выходной цепей усилительного каскада. Основными элементами каскада являются резистор  $R_{и}$  и транзистор. Выбор и обеспечение режима покоя производится так же, как и в каскаде с ОИ.

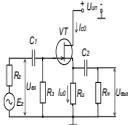


Рис. 4

Выходное напряжение, равное амплитуде переменной составляющей падения напряжения на резисторе  $R_{и}$ , подается через разделительный конденсатор  $C_2$  в нагрузку. Для истокового повторителя напряжение на нагрузке совпадает по фазе со входным напряжением и связано с ним равенством

$$U_{вых} = U_{вх} - U_{зи};$$

$$U_{вых} = I_c R_{и}.$$

Коэффициент передачи по напряжению каскада с ОС в области средних частот определяется выражением

$$K_U = \frac{SR_{и}}{1 + SR_{и}}.$$

Видно, что коэффициент усиления по напряжению сильно зависит от крутизны транзистора и сопротивления резистора в цепи истока и при увеличении произведения  $SR_{и}$  стремится к единице. Поэтому в истоковых повторителях предпочитают использовать транзисторы с высоким значением крутизны.

**Входное сопротивление** истокового повторителя для низких и средних частот, как и в усилительном каскаде с ОИ, определяется величиной  $R_3$  и составляет единицы мегаом.

**Выходное сопротивление** для каскада с ОС в области средних частот определяется как

$$R_{вых} = R_{и} \parallel \frac{R_i}{1 + \mu} \approx \frac{1}{S}.$$

Откуда следует, что выходное сопротивление каскада с ОС значительно меньше, чем в каскаде с ОИ и составляет сотни ом.

## Методические указания по выполнению лабораторной работы

### Исследование амплитудной характеристики усилителя проводится

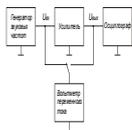


Рис. 5

на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 5. При измерении напряжений входного и выходного сигналов необходимо помнить, что вольтметры переменного напряжения показывают действующее значение, а при использовании осциллографа можно измерять амплитудное значение переменного напряжения.

**Исследование амплитудно-частотной характеристики** проводится при фиксированном уровне входного сигнала, выбранном на линейном участке АХ  $U_{вх} \cong (0,1 \dots 0,3)U_{вх \text{ макс}}$  с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 5. Для упрощения вычислений коэффициента усиления по напряжению желательно выбрать круглое значение амплитуды напряжения входного сигнала. Например: 1 мВ, 5 мВ, 10 мВ. Исследуемые усилительные каскады имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – изменение чего-либо в десять раз, в данном случае частоты). Поэтому при построении графиков АЧХ необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб. При снятии АЧХ в области средних частот, где коэффициент усиления практически не изменяется, измерения необходимо проводить в трех...пяти точках на каждую декаду. Например: 100, 300, 500, 700 Гц; 1, 2, 3, 5, 7 кГц и т.д. Значения нижней и верхней граничных частот ( $f_{н}$  и  $f_{в}$ ) необходимо определять по уменьшению коэффициента усиления в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с максимальным значением коэффициента усиления в области средних частот. Заключительным этапом исследования АЧХ является определение полосы пропускания усилителя  $\Delta f = f_{в} - f_{н}$ .

**Измерение входного и выходного сопротивлений** усилителя проводятся на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) при уровне входного сигнала, соответствующем линейному участку АХ. Измерительная установка собирается согласно структурной схеме, представленной на Рис. 6.

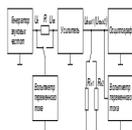


Рис. 6.

Входное сопротивление  $R_{ВХ}$  измеряется косвенным методом. Добавочный резистор  $R$  на входе усилителя и входное сопротивление усилительного каскада  $R_{ВХ}$  образуют делитель напряжения, для которого можно записать

$$\frac{U_{Г}}{U_{ВХ}} = \frac{R + R_{ВХ}}{R_{ВХ}},$$

где  $U_{Г}$  – напряжение на выходе генератора низких частот (до резистора  $R$ );  $U_{ВХ}$  – напряжение непосредственно на входе усилителя. Необходимо измерить напряжения  $U_{Г}$  и  $U_{ВХ}$ , а входное сопротивление рассчитать по формуле

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ} R}{U_{Г} - U_{ВХ}}.$$

Если  $R_{ВХ}$  усилителя велико и соизмеримо со входным сопротивлением вольтметра, измеряют выходное напряжение  $U_{ВЫХR}$  при наличии  $R$  и при его отсутствии –  $U_{ВЫХ0}$ . В этом случае входное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВЫХR} R}{U_{ВЫХ0} - U_{ВЫХR}}.$$

Выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$  также измеряется косвенным методом, согласно которому проводятся измерения выходных напряжений  $U_{ВЫХ1}$  и  $U_{ВЫХ2}$  при двух известных сопротивлениях нагрузки  $R_{Н1}$  и  $R_{Н2}$  соответственно. Значение выходного сопротивления рассчитывается по формуле

$$R_{ВЫХ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta I_{ВЫХ}} = \frac{U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2}}{\frac{U_{ВЫХ2}}{R_{Н2}} - \frac{U_{ВЫХ1}}{R_{Н1}}}.$$

Если  $R_{Н1} = \infty$  (нагрузка отсутствует), то

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_{Н2}(U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2})}{U_{ВЫХ2}} = R_{Н2} \left( \frac{U_{ВЫХ1}}{U_{ВЫХ2}} - 1 \right).$$

## Порядок выполнения работы

1. Исследовать основные характеристики и параметры эмиттерного повторителя.

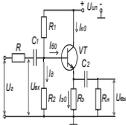


Рис. 7

1.1. Собрать эмиттерный повторитель по схеме, приведенной на рис. 7. Установить номинальное напряжение питания  $U_{ип} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

1.2. При отключенном источнике входного сигнала измерить с помощью вольтметра постоянные напряжения  $U_{э0}$  и  $U_{бэ0}$ . Рассчитать постоянные составляющие тока эмиттера  $I_{э0} = U_{э0}/R_э$ , тока делителя  $I_д = (U_{бэ0} + U_{э0})/R_2$ .

1.3. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

1.4. Исследовать АХ эмиттерного повторителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц при сопротивлении генератора  $R_Г = 300$  Ом и сопротивлении нагрузки  $R_Н = 300$  Ом. Величину  $U_{вх макс}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{вых}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон эмиттерного повторителя.

1.5. Исследовать АЧХ эмиттерного повторителя при сопротивлении генератора  $R_Г = 300$  Ом для трех значений сопротивления нагрузки:  $R_Н = 300$  Ом;  $R_Н = 1$  кОм;  $R_Н = 300$  Ом и  $C_Н = 1$  нФ при напряжении входного сигнала  $U_{вх}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{вх}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания эмиттерного повторителя.

1.6. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 6.

1.7. Измерить входное сопротивление  $R_{вх}$  эмиттерного повторителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений внешней нагрузки  $R_Н = 300$  Ом и  $R_Н = 1$  кОм, установив амплитуду входного сигнала  $U_{вх}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

1.8. Измерить выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$  эмиттерного повторителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления генератора  $R_{\Gamma} = 300$  Ом и  $R_{\Gamma} = 1$  кОм, установив амплитуду входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

2. Исследовать основные характеристики и параметры эмиттерного повторителя со следящей связью.

2.1. Собрать эмиттерный повторитель по схеме, приведенной на рис. 8. Установить номинальное напряжение питания  $U_{\text{ИП}} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

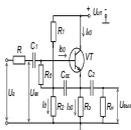


Рис. 8

2.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

2.3. Исследовать АХ эмиттерного повторителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц при сопротивлении генератора  $R_{\Gamma} = 300$  Ом и сопротивлении нагрузки  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом. Величину  $U_{\text{ВХ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон эмиттерного повторителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.4.

2.4. Исследовать АЧХ эмиттерного повторителя при сопротивлении генератора  $R_{\Gamma} = 300$  Ом для трех значений сопротивления нагрузки:  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом;  $R_{\text{Н}} = 1$  кОм;  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом и  $C_{\text{Н}} = 1$  нФ при напряжении входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{ВХ}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания эмиттерного повторителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.5.

2.5. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 6.

2.6. Измерить входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  эмиттерного повторителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений внешней нагрузки  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом и  $R_{\text{Н}} = 1$  кОм, установив амплитуду входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соот-

ветствующую линейному участку  $AХ$ , измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.7.

2.7. Измерить выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$  эмиттерного повторителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления генератора  $R_{\Gamma} = 300$  Ом и  $R_{\Gamma} = 1$  кОм, установив амплитуду входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующую линейному участку  $AХ$ , измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.8.

3. Исследовать основные характеристики и параметры истокового повторителя.

3.1. Собрать истоковый повторитель по схеме, приведенной на рис. 9. Установить номинальное напряжение питания  $U_{\text{ИП}} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

3.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

3.3. Исследовать  $AХ$  истокового повторителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц при сопротивлении генератора  $R_{\Gamma} = 300$  Ом и сопротивлении нагрузки  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом. Величину  $U_{\text{ВХ}}$  макс определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка  $AХ$  и определить динамический диапазон истокового повторителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.4.

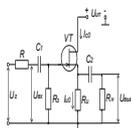


Рис. 9

3.4. Исследовать АЧХ истокового повторителя при сопротивлении генератора  $R_{\Gamma} = 300$  Ом для трех значений сопротивления нагрузки:  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом;  $R_{\text{Н}} = 1$  кОм;  $R_{\text{Н}} = 300$  Ом и  $C_{\text{Н}} = 1$  нФ при напряжении входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующем линейному участку  $AХ$ , измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{ВХ}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания эмиттерного повторителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.5.

3.5. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 6.

3.6. Измерить входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  истокового повторителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений внешней нагрузки

$R_H = 300 \text{ Ом}$  и  $R_H = 1 \text{ кОм}$ , установив амплитуду входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.7.

3.7. Измерить выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$  истокового повторителя на частоте входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$  для двух значений сопротивления генератора  $R_G = 300 \text{ Ом}$  и  $R_G = 1 \text{ кОм}$ , установив амплитуду входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующую линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.8.

#### Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Принципиальные схемы исследуемых каскадов.
3. Табличные и графические результаты исследования АХ каскадов.
4. Табличные и графические результаты исследования АЧХ каскадов.
5. Сводная таблица с результатами измерений входных и выходных сопротивлений каскадов.
6. Анализ полученных результатов.

#### Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схемы эмиттерного и истокового повторителей. Покажите пути протекания постоянных составляющих токов.
2. Сравните входное и выходное сопротивление, коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя с аналогичными параметрами схемы с общим эмиттером.
3. Сравните входное и выходное сопротивление, коэффициент усиления по напряжению истокового повторителя с параметрами схемы с общим истоком.
4. Каким образом можно ослабить шунтирующее действие делителя напряжения в эмиттерном повторителе?

#### Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Полупроводниковые усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1997.
3. Ногин В.М. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1992.

4. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7  
ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ  
С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

Цель работы

1. Теоретически изучить виды обратных связей (ОС) и их влияние на основные параметры и характеристики усилителей.
2. Экспериментально определить влияние отрицательной обратной связи (ООС) на устойчивость многокаскадного усилителя, а также частотно-зависимой ОС на частотные характеристики усилителей.

Краткие теоретические сведения

Для обеспечения требуемого коэффициента усиления используются многокаскадные усилители, представляющие собой преимущественно последовательное соединение одиночных каскадов. Для обеспечения возможности изменять в широких пределах параметры и характеристики усилителя используются обратные связи. **Обратной связью** в усилителях называют передачу всего или части выходного сигнала во входную цепь усилителя. Цепь, по которой осуществляется передача сигнала ОС, называется цепью обратной связи. Петлей ОС называют замкнутый контур, включающий в себя цепь ОС и часть усилителя между точками ее подключения. Местной петлей ОС (местной ОС) называют ОС, охватывающую отдельные каскады или часть усилителя. Общая ОС охватывает весь усилитель.

Влияние обратной связи на параметры усилителя определяется видом обратной связи, величиной напряжения ОС, наличием или отсутствием в цепи обратной связи частотно-зависимых элементов (в полосе пропускания усилителя без ОС).

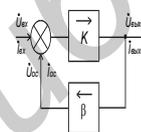


Рис. 1

Упрощенная структурная схема усилителя с обратной связью показана на рис. 1. Усилитель имеет в направлении, указанном стрелкой, коэффициент усиления  $\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}$ . Другим прямоугольником обо-

значена цепь ОС, имеющая коэффициент передачи  $\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_{\text{ос}}}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}$ ,  $\dot{U}_{\text{ос}}$  – напряжение ОС, передаваемое с выхода усилителя на вход. Коэффициент  $\dot{\beta}$  показывает, какая часть выходного напряжения передается обратно на

вход, поэтому его называют коэффициентом обратной связи. Обычно  $|\dot{\beta}| \leq 1$ , поэтому вместо нижнего усилителя можно применять пассивный линейный четырехполюсник.

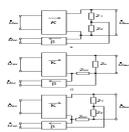


Рис. 2

Коэффициент усиления усилителя  $K$  и коэффициент передачи цепи ОС  $\dot{\beta}$  в общем случае являются величинами комплексными, учитывающими возможный фазовый сдвиг на низких и высоких частотах за счет наличия в схемах реактивных элементов. При работе в диапазоне средних частот, если в цепи ОС отсутствуют реактивные элементы, параметры  $K$  и  $\dot{\beta}$  являются вещественными величинами.

Если напряжение  $\dot{U}_{ос}$  совпадает по фазе со входным напряжением  $\dot{U}_{вх}$ , то в точке сравнения происходит сложение сигналов, и ОС называют **положительной** (ПОС). Если  $\dot{U}_{ос}$  и  $\dot{U}_{вх}$  противофазны ( $\varphi = \pi$ ), то в точке сравнения происходит их вычитание и ОС называют **отрицательной**.

**По способу получения сигнала** обратной связи различают: обратную связь по напряжению (рис. 2,а), когда сигнал обратной связи пропорционален выходному напряжению  $\dot{U}_{вых}$ ; ОС по току (рис. 2,б), когда сигнал обратной связи пропорционален току выходной цепи  $\dot{I}_{вых}$ ; комбинированную обратную связь (рис. 2,в), когда снимаемый сигнал ОС пропорционален как напряжению, так и току выходной цепи.

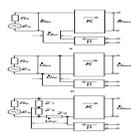


Рис. 3

**По способу подачи сигнала ОС** на вход усилителя различают: последовательную (рис. 3,а) – напряжение ОС  $\dot{U}_{ос}$  поступает последовательно с напряжением источника входного сигнала; параллельную (рис. 3,б) – напряжение ОС  $\dot{U}_{ос}$  поступает параллельно с напряжением источника входного сигнала; смешанную (рис. 3,в).

Для определения вида обратной связи можно воспользоваться следующим правилом: если при коротком замыкании нагрузки напряжение обратной связи сохраняется, то осуществляется обратная связь по току; если же оно стремится к нулю, то осуществляется обратная связь по напряжению.

Поскольку в усилителях обычно используются каскады ОЭ, ОК, ОИ, ОС, то можно просто определить вид ООС по способу подачи ее сигналов

во входную цепь. Если сигнал обратной связи поступает на эмиттер (или исток) транзистора, то связь последовательная, а если на базу (или затвор), то параллельная. Для определения вида обратной связи (ОСС, ПОС) необходимо проследить за прохождением полуволны входного сигнала во всех точках схемы усилителя.

Отрицательная обратная связь позволяет улучшить некоторые параметры усилителя, поэтому она нашла на практике преимущественное применение. Оценка влияния обратной связи на показатели усилителя рассмотрим на примере схемы с последовательной обратной связью по напряжению (рис. 3,а).

**Последовательная обратная связь по напряжению.** На входе усилителя действует алгебраическое суммарное напряжение входного сигнала и напряжение ОС

$$\dot{U}'_{\text{ВХ}} = \dot{U}_{\text{ВХ}} + \dot{U}_{\text{ОС}} = \dot{U}_{\text{ВХ}} + \beta \dot{U}_{\text{ВЫХ}}. \quad (1)$$

Напряжение на выходе усилителя, охваченного обратной связью, равно

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = \dot{K} \dot{U}'_{\text{ВХ}} = \dot{K} (\dot{U}_{\text{ВХ}} + \beta \dot{U}_{\text{ВЫХ}}). \quad (2)$$

Разделив обе части уравнения (2) на  $\dot{U}_{\text{ВХ}}$ , получим

$$\dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{\dot{K}}{1 - \beta \dot{K}}. \quad (3)$$

Это соотношение, связывающее коэффициент усиления усилителя  $\dot{K}_{\text{ОС}}$ , охваченного обратной связью, и усилителя без обратной связи, является основным соотношением в теории усилителей с обратной связью. Величина  $\beta \dot{K}$  – характеризует усиление и характер петли обратной связи. Величину  $(1 - \beta \dot{K})$  называют глубиной обратной связи. Глубина ОС показывает, во сколько раз изменяется коэффициент усиления при введении в усилитель обратной связи.

Поскольку в общем случае  $\dot{K} = K e^{j\varphi_K}$  и  $\beta = \beta e^{j\varphi_\beta}$ , где  $\varphi_K$  и  $\varphi_\beta$  фазовые сдвиги напряжения сигнала, вносимые соответственно усилителем и звеном обратной связи, выражение (3) можно записать в виде

$$\dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{K e^{j\varphi_K}}{1 - \beta K e^{j(\varphi_K + \varphi_\beta)}}. \quad (4)$$

При  $\varphi_K + \varphi_\beta = \pi$ ,  $\beta \dot{K} = -\beta K$ , т.е. коэффициент обратной связи есть величина вещественная и отрицательная:

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + \beta K}. \quad (5)$$

Таким образом, если сигнал обратной связи поступает на вход усилителя в противофазе со входным сигналом, то коэффициент усиления усилителя уменьшается в  $1 + \beta K$  раз. Такую обратную связь называют отрицательной обратной связью.

ООС ослабляет влияние всех изменений коэффициента усиления  $K$ , в том числе, связанных с неравномерностью частотной характеристики; расширяет полосу пропускания как в сторону низких, так и в сторону высоких частот; уменьшает частотные искажения. ООС уменьшает возникающие в усилителе нелинейные искажения. Если при ООС  $|\beta K| \gg 1$ , то говорят, что усилитель охвачен глубокой отрицательной обратной связью:

$$K = \frac{K}{1 + \beta K} \approx \frac{1}{\beta}. \quad (6)$$

В этом случае коэффициент усиления усилителя определяется только коэффициентом передачи цепи обратной связи и не зависит от собственного коэффициента усиления усилителя  $K$ .

Если величина  $\beta K$  вещественная и положительная, то сигнал обратной связи совпадает по фазе со входным сигналом, усилитель охвачен положительной обратной связью. Коэффициент усиления усилителя при этом возрастает в  $1 - \beta K$  раз. При  $\beta K = 1$  в усилителе возникают условия для самовозбуждения усилителя, охваченного положительной обратной связью. Такой режим работы нашел применение в генераторах напряжения.

Сущность самовозбуждения заключается в следующем: любой малый входной сигнал, вызванный наводками или колебаниями параметров активных элементов, усиливается и возвращается обратно на вход усилителя. Суммируясь со входным сигналом, он вызывает появление большого входного сигнала. В реальных усилителях наступает ограничение выходного сигнала, и появляются незатухающие колебания.

Положительная обратная связь, увеличивающая коэффициент усиления, в электронных усилителях практически не применяется, так как при этом стабильность коэффициента усиления значительно ухудшается.

Для качественной оценки действия цепи обратной связи определим стабильность коэффициента усиления усилителя с обратной связью. Для этой цели продифференцируем выражение (6):

$$\frac{dK_{oc}}{dK} \Delta K = \frac{d\left(\frac{K}{1+\beta K}\right)}{dK} \Delta K = \frac{\Delta K}{(1+\beta K)^2},$$

тогда относительное изменение коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью определяется как

$$\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} = \frac{\Delta K/K}{1+\beta K}.$$

Откуда следует, что относительное изменение коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью в  $(1+\beta K)$  раз меньше относительного изменения коэффициента усиления усилителя без обратной связи. При этом стабильность коэффициента усиления повышается с увеличением глубины обратной связи.

Физический смысл повышения стабильности коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью заключается в том, что при изменении коэффициента усиления усилителя  $K$  изменяется напряжение обратной связи  $U_{oc}$ . Это приводит к изменению входного напряжения усилителя и препятствует изменению выходного напряжения. Стабильность коэффициента усиления усилителя при введении ООС широко используется для улучшения амплитудно-частотной характеристики усилителей переменного сигнала (рис. 4), при этом полоса пропускания усилителя  $\Delta f$  расширяется.

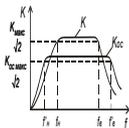


Рис. 4

Входное сопротивление усилителя с обратной связью определяется как

$$R_{вх\ oc} = \frac{U'_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U'_{вх} R_{вх}}{U_{вх}}.$$

Используя соотношение  $U'_{вх} = U_{вх} - U_{oc}$ , получим  $R_{вх\ oc} = R_{вх} (1 + \beta K)$ , т.е. входное сопротивление каскада при последовательной обратной связи по напряжению возрастает в  $1 + \beta K$  раз, а положительная обратная связь уменьшает его в  $1 - \beta K$  раз.

Выходное сопротивление усилителя, охваченного обратной связью, определяется выражением

$$R_{вых\ oc} = \frac{U_{вых}}{I_{вых}} = \frac{R_{вых}}{1 - \beta K R_{вых} / (R_{г} + R_{вх})},$$

из которого видно, что выходное сопротивление усилителя, охваченного ООС, уменьшается. Увеличение входного и уменьшение выходного сопротивлений усилителя с ООС — очень ценные свойства для конечных каска-

дов усилителя; обеспечивается меньшая зависимость выходного напряжения усилителя при изменении сопротивления нагрузки, усилитель приближается к идеальному источнику напряжения.

Итак, последовательная ООС по входу увеличивает  $R_{вх}$ , а параллельная – уменьшает. ООС по напряжению уменьшает выходное сопротивление, а ООС по току – увеличивает.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

**Исследование амплитудной характеристики** усилителя проводится на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 5. При измерении напряжений входного и выходного сигналов необходимо помнить, что вольтметры переменного напряжения показывают действующее значение, а при использовании осциллографа можно изме-

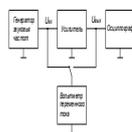


Рис. 5

рять амплитудное значение переменного напряжения.

**Исследование амплитудно-частотной характеристики** проводится при фиксированном уровне входного сигнала, выбранном на линейном участке АХ  $U_{вх} \cong (0,1 \dots 0,3)U_{вх \text{ макс}}$  с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 5. Для упрощения вычислений коэффициента усиления по напряжению желательно выбрать круглое значение амплитуды напряжения входного сигнала. Например: 1 мВ, 5 мВ, 10 мВ. Исследуемые усилительные каскады имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – изменение чего-либо в десять раз, в данном случае частоты). Поэтому при построении графиков АЧХ необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб. При снятии АЧХ в области средних частот, где коэффициент усиления практически не изменяется, измерения необходимо проводить в трех...пяти точках на каждую декаду. Например: 100, 300, 500, 700 Гц; 1, 2, 3, 5, 7 кГц и т.д. Значения нижней и верхней граничных частот ( $f_H$  и  $f_B$ ) необходимо определять по уменьшению коэффициента усиления в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с максимальным значением коэффициента усиления в области средних частот. Заключительным этапом исследования АЧХ является определение полосы пропускания усилителя  $\Delta f = f_B - f_H$ .

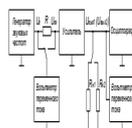


Рис. 6

**Измерение входного и выходного сопротивлений** усилителя проводятся на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) при уровне входного сигнала, соответствующем линейному участку АХ. Измерительная установка собирается согласно структурной схеме, представленной на рис. 6.

Входное сопротивление  $R_{ВХ}$  измеряется косвенным методом. Дополнительный резистор  $R$  на входе усилителя и входное сопротивление усилительного каскада  $R_{ВХ}$  образуют делитель напряжения, для которого можно записать

$$\frac{U_{Г}}{U_{ВХ}} = \frac{R + R_{ВХ}}{R_{ВХ}},$$

где  $U_{Г}$  – напряжение на выходе генератора низких частот (до резистора  $R$ );  $U_{ВХ}$  – напряжение непосредственно на входе усилителя. Необходимо измерить напряжения  $U_{Г}$  и  $U_{ВХ}$ , а входное сопротивление рассчитать по формуле

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ} R}{U_{Г} - U_{ВХ}}.$$

Если  $R_{ВХ}$  усилителя велико и соизмеримо со входным сопротивлением вольтметра, измеряют выходное напряжение  $U_{ВЫХR}$  при наличии  $R$  и при его отсутствии  $U_{ВЫХ0}$ . В этом случае входное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВЫХR} R}{U_{ВЫХ0} - U_{ВЫХR}}.$$

Выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$  также измеряется косвенным методом, согласно которому проводятся измерения выходных напряжений  $U_{ВЫХ1}$  и  $U_{ВЫХ2}$  при двух известных сопротивлениях нагрузки  $R_{Н1}$  и  $R_{Н2}$  соответственно. Значение выходного сопротивления рассчитывается по формуле

$$R_{ВЫХ} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta I_{ВЫХ}} = \frac{U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2}}{\frac{U_{ВЫХ2}}{R_{Н2}} - \frac{U_{ВЫХ1}}{R_{Н1}}}.$$

Если  $R_{Н1} = \infty$  (нагрузка отсутствует), то

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{Н2}}(U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}})}{U_{\text{ВЫХ2}}} = R_{\text{Н2}} \left( \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{U_{\text{ВЫХ2}}} - 1 \right).$$

### Порядок выполнения работы

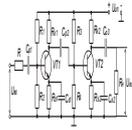


Рис. 7

1. Исследовать влияние местной последовательной отрицательной обратной связи по току на основные характеристики и параметры двухкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с ОЭ.

1.1. Собрать двухкаскадный усилитель по схеме, приведенной на рис. 7. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{\text{ИП}} = 10 \text{ В}$ . Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

1.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

1.3. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$  для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$ . Величину  $U_{\text{ВХ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя.

1.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н}}$  при напряжении входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{ВХ}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

1.5. Измерить входное  $R_{\text{ВХ}}$  и выходное  $R_{\text{ВЫХ}}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ , установив напряжение входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

1.6. В первый усилительный каскад ввести местную последовательную отрицательную обратную связь по току. Для этого из схемы необходимо исключить конденсатор  $C_{31}$ , шунтирующий резистор  $R_{31}$ .

1.7. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$ . Величину  $U_{ВХ\text{ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.3.

1.8. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$  при напряжении входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.4.

1.9. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.5.

2. Исследовать влияние общей последовательной отрицательной обратной связи по напряжению на основные характеристики и параметры двухкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с ОЭ.

2.1. Собрать двухкаскадный усилитель с общей последовательной отрицательной обратной связью по напряжению по схеме, приведенной на рис. 8. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{ИП} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

2.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

2.3. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$ . Величину  $U_{ВХ\text{ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.7.

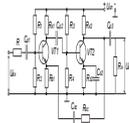


Рис. 8

2.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$  при напряжении входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.8.

2.5. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.1.9.

3. Исследовать влияние местной последовательной отрицательной обратной связи по току на основные характеристики и параметры трехкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с ОЭ.

3.1. Собрать двухкаскадный усилитель по схеме, приведенной на рис. 9. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{ИП} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

3.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

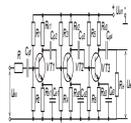


Рис. 9

3.3. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$ . Величину  $U_{ВХ \text{ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя.

3.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$  при напряжении входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

3.5. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот.

3.6. В первый и третий усилительный каскады ввести местную последовательную отрицательную обратную связь по току. Для этого из схемы необходимо исключить конденсаторы  $C_{Э1}$  и  $C_{Э3}$ , шунтирующие резисторы  $R_{Э1}$  и  $R_{Э3}$ .

3.7. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$ . Величину  $U_{ВХ \text{ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.3.

3.8. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$  при напряжении входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.4.

3.9. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.5.

4. Исследовать влияние общей параллельной отрицательной обратной связи по напряжению на основные характеристики и параметры трехкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с ОЭ.

4.1. Собрать трехкаскадный усилитель с общей параллельной отрицательной обратной связью по напряжению по схеме, приведенной на рис. 10. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{ИП} = 10$  В. Напря-

жение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

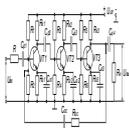


Рис. 10

4.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

4.3. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$ . Величину  $U_{ВХ\text{ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{ВЫХ}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.3.

4.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$  при напряжении входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{ВХ}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.4.

4.5. Измерить входное  $R_{ВХ}$  и выходное  $R_{ВЫХ}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{ВХ}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.5.

5. Исследовать влияние общей последовательной отрицательной обратной связи по току на основные характеристики и параметры трехкаскадного усилителя на биполярных транзисторах с ОЭ.

5.1. Собрать трехкаскадный усилитель с общей последовательной отрицательной обратной связью по току по схеме, приведенной на рис. 11. Установить номинальное напряжение питания усилителя  $U_{ИП} = 10$  В. Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

5.2. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 5.

5.3. Снять АХ усилителя на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1$  кГц для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$ . Величину

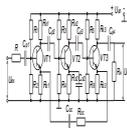


Рис. 11

$U_{\text{ВХ МАКС}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа. Рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для линейного участка АХ и определить динамический диапазон усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.7.

5.4. Снять АЧХ усилителя для двух значений сопротивления нагрузки  $R_H$  при напряжении входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующем линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{ВХ}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.8.

5.5. Измерить входное  $R_{\text{ВХ}}$  и выходное  $R_{\text{ВЫХ}}$  сопротивления усилителя на частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц, установив напряжение входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующее линейному участку АХ, измеренной в области средних частот. Сравнить полученные результаты с результатами п.3.9.

#### Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Принципиальные схемы исследуемых усилителей.
3. Табличные и графические результаты исследования АХ каскадов.
4. Табличные и графические результаты исследования АЧХ каскадов.
5. Сводная таблица с результатами измерений входных и выходных сопротивлений каскадов.
6. Анализ полученных результатов: влияние сопротивления нагрузки, наличия местной и общей ОС на параметры и характеристики усилителей; сравнение входных и выходных сопротивлений исследованных каскадов.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое обратная связь, и как она влияет на характеристики и параметры усилителя?

2. Что такое петля ОС, усиление петли связи (петлевое усиление), глубина ОС?

3. Чем отличаются местная и общая ОС, параллельная и последовательная ОС, отрицательная и положительная ОС, ОС по току и напряжению?

4. Как определить в практической схеме усилителя обратную связь по току и напряжению, параллельную и последовательную ОС?

5. Как влияет параллельная ООС по напряжению на полосу пропускания,  $R_{ВХ}$  и  $R_{ВЫХ}$ ? Как это согласуется с экспериментальными результатами?

6. Как влияет последовательная ООС по напряжению на полосу пропускания,  $R_{ВХ}$  и  $R_{ВЫХ}$ ? Как это согласуется с экспериментальными результатами?

7. Как влияет местная последовательная ООС по току на полосу пропускания,  $R_{ВХ}$  и  $R_{ВЫХ}$ ? Как это согласуется с экспериментальными результатами?

#### Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Полупроводниковые усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1997.
3. Ногин В.М. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1992.
4. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОНЕЧНЫХ (ВЫХОДНЫХ) УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

### Цель работы

1. Теоретически изучить режимы работы активных элементов и схемотехнику построения выходных усилительных каскадов.
2. Экспериментально исследовать основные параметры и характеристики выходных усилительных каскадов различных типов.

### Краткие теоретические сведения

**Оконечные каскады** предназначены для обеспечения на выходе усилителя (на нагрузке) необходимой мощности или напряжения сигнала при допустимом уровне частотных и нелинейных искажений. **Предоконечные каскады** обеспечивают необходимую мощность или напряжение на входе окончного каскада, обеспечивая его нормальное функционирование.

Оконечные каскады могут строиться по одноконтурной и двухконтурной схемам с трансформаторным или бестрансформаторным выходом в зависимости от предъявляемых к усилителю требований. Активные элементы в оконечных каскадах работают в режиме А, В или АВ. Двухконтурная схема по сравнению с одноконтурной обладает следующими преимуществами: удвоенной выходной мощностью; меньшей величиной нелинейных искажений за счет полной или частичной компенсации четных гармоник.

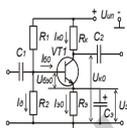


Рис. 1

В современной усилительной технике используются бестрансформаторные схемы усилителей мощности, обладающие широкой полосой пропускания, малыми нелинейными искажениями сигналов, малыми габаритами и массой. Принцип построения бестрансформаторных усилителей соответствует требованиям интегральной технологии и используется для создания аналоговых интегральных микросхем.

В одноконтурных усилителях мощности транзистор работает в режиме класса А, рабочая точка выбирается на середине линейного участка входной и выходной характеристик. Электрическая схема одноконтурного каскада представлена на рис. 1, а выбор рабочей точки на рис. 2.

Недостатком одноконтурной схемы является низкий коэффициент полезного действия (КПД). Двухконтурные усилители мощности позволяют получить

существенно большие значения выходной мощности и более высокий КПД.

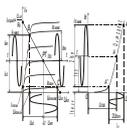


Рис. 2

Бестрансформаторный усилитель мощности содержит оконечный и предоконечный каскады, а также часто и входной усилительный каскад, охваченные общей отрицательной обратной связью как по постоянному, так и по переменному току.

Оконечный каскад выполняется обычно по двухтактной схеме, обеспечивающей работу транзистора в режиме В либо близком к нему режиме АВ с высоким КПД. Наиболее широко применяется каскад с параллельным возбуждением однофазным напряжением на комплементарной паре транзисторов n-p-n- и p-n-p-типа, включенных по схеме с общим коллектором. Вариант с двухполярным питанием (рис. 3) позволяет подключить нагрузку к выходу каскада непосредственно.

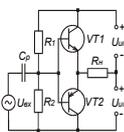
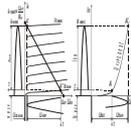


Рис. 3

При положительных полупериодах входного сигнала транзистор VT1 работает как эмиттерный повторитель, транзистор VT2 закрыт. При отрицательных полупериодах входного сигнала ситуация меняется на противоположную. Поэтому транзисторы работают попеременно, каждый в течение одного полупериода входного сигнала. При  $U_{ВХ} = 0$  оба транзистора находятся в режиме отсечки. Резисторы R1 и R2 одинаковы, при  $U_{ВХ} = 0$  фиксируют потенциал баз транзисторов, равный потенциалу корпуса. Величины сопротивлений резисторов R1 и R2 должны обеспечивать ток делителя не меньше  $I_{б \text{ макс.}}$ . При  $U_{ВХ} = 0$  оба транзистора закрыты. Следовательно, схема имеет ток покоя коллектора  $I_{к0}$ , близкий к нулю, что характерно для режима В. Расчет режима работы транзисторов двухтактного каскада производится по нагрузочным характеристикам графоаналитическим методом.

При анализе двухтактного каскада в режиме В (АВ) удобно рассматривать только работающее плечо усилителя и расчет каскада вести для половины периода по семейству статических характеристик усилительного прибора одного плеча, получая результат, справедливый для всего каскада за период сигнала. Для транзисторных оконечных каскадов строят выходную и входную нагрузочные характеристики. Для построения выходной нагрузочной характеристики на выходных статических характеристиках транзистора слева отделяется участок с нелинейной зависимостью  $I_{к} = f(U_{кэ})$ , определяющий величину  $U_{кэ \text{ мин.}}$ , как показано на рис. 4,а.



а б  
Рис. 4

Если такой участок не имеет резкой границы в сторону увеличения  $U_{кэ}$ , то величину  $U_{кэ \text{ мин}}$  для транзисторов малой мощности принимают равной 1...2 В, а для транзисторов средней и большой мощности при напряжении питания больше 9В – в пределах

3...5 В. Рабочая точка  $A'$  нагрузочной характеристики должна соответствовать напряжению  $U_{кэ \text{ мин}}$  и коллекторному току  $I_{к \text{ макс}}$ , рассчитываемому по формуле

$$I_{к \text{ макс}} \geq \frac{2P_{\text{ВЫХ}}}{(U_{\text{ИП}} - U_{кэ \text{ мин}})\eta_{\Gamma}},$$

где  $P_{\text{ВЫХ}}$  – заданная выходная мощность;  $U_{\text{ИП}}$  – напряжение источника питания. Значение  $I_{к \text{ макс}}$  не должно превышать допустимого тока коллектора в импульсном режиме  $I_{к \text{ макс и}}$ . Точка  $A$  нагрузочной характеристики должна соответствовать заданному значению  $U_{\text{ИП}}$  и минимальному коллекторному току  $I_{к \text{ мин}}$ , значение которого определяют по соотношениями:

для транзисторов средней мощности  $I_{к \text{ мин}} = (0,02...0,04)I_{к \text{ макс}}$ ;

для транзисторов большой мощности  $I_{к \text{ мин}} = (0,05...0,1)I_{к \text{ макс}}$ .

На характеристике (рис. 4,а) этому току соответствует ток базы  $I_{б \text{ мин}}$ . По нагрузочной характеристике находят следующие параметры:

изменения амплитуд коллекторного тока и напряжения  $\Delta I_{к}$ ,  $\Delta U_{кэ}$  и

$I_{к \text{ макс}}$ :

сопротивление коллекторной нагрузки для одного плеча схемы

$$R_{к \sim} = U_{кэ \text{ м}} / I_{к \text{ м}};$$

выходную мощность сигнала для одного плеча

$$P_{\text{ВЫХ Г}} = \frac{I_{к \text{ макс}} U_{кэ \text{ м}}}{2}.$$

Максимальная мощность, рассеиваемая на транзисторах,

$$P_{\text{Т рас}} = 0,203 I_{к \text{ макс}} U_{\text{ИП}} - 0,101 I_{к \text{ макс}}^2 R_{к \sim}.$$

При этом должно выполняться условие  $P_{\text{Т рас}} \leq P_{к \text{ макс}}$ ,

где  $P_{к \text{ макс}}$  – допустимая мощность, рассеиваемая на транзисторе.

Мощность, потребляемая окончательным каскадом от источника тока,

$$P_0 = (I_{к \text{ ср}} + I_{к \text{ мин}} + I_{д}) U_{\text{ИП}},$$

где  $I_{к ср}$  – среднее значение коллекторного тока за период

$$I_{к ср} = \frac{2}{\pi} I_{к макс} \approx 0,636 I_{к макс} .$$

Для построения входной нагрузочной характеристики с выходной нагрузочной характеристикой на входную статическую переносят точки А и А' (рис. 4,б). Входная нагрузочная характеристика практически сливается со входной статической характеристикой. По входной нагрузочной характеристике определяют следующие параметры:

изменение амплитуды базового тока и напряжения ( $I_{бм}$ ,  $I_{б макс}$  и  $U_{бэм}$ );

среднее значение входного сопротивления транзистора для переменного тока (для одного плеча)

$$R_{вх Т} = U_{бэм} / I_{бм} ;$$

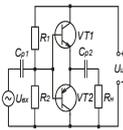


Рис. 5

входную мощность сигнала

$$P_{вх} = \frac{I_{бм} U_{бэм}}{2} .$$

При однополярном питании (рис. 5) нагрузка подключается через разделительный конденсатор  $C_{р2}$ . При положительных полупериодах входного сигнала открывается транзистор  $VT1$ , и ток коллектора  $VT1$ , протекающий через нагрузку  $R_{н}$ , заряжает конденсатор  $C_{р2}$  до величины  $U_{ип} / 2$ . При отрицательных полупериодах транзистор  $VT1$  закрывается, источник питания  $U_{ип}$  отключается от эмиттера транзистора  $VT2$ , а конденсатор  $C_{р2}$  служит источником питания для транзистора  $VT2$ , работающего как эмиттерный повторитель.

Для уменьшения нелинейных искажений в двухтактных каскадах используют работу транзисторов в режиме класса АВ. Для возбуждения оконечного каскада используется обычный резистивный каскад на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ и работающем в режиме А (рис. 6). С целью уменьшения нелинейных искажений сигнала на базы транзисторов оконечного каскада подается напряжение смещения  $U_{см}$ , задающее положение рабочей точки на изгибе входной характеристики транзисторов, что соответствует реальному режиму В либо режиму АВ.

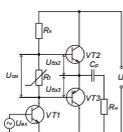


Рис. 6

Напряжение смещения образуется на резисторе  $R_T$  при прохождении по нему постоянной составляющей коллекторного тока  $VT1$ :

$U_{см} = U_{бэ2} + U_{бэ3} = I_{к1} \cdot R_T$ . Для обеспечения стабильности положения рабочей точки при изменении температурного режима транзисторов оконечного каскада в качестве  $R_T$  применяют терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, причем размещают его на радиаторах этих транзисторов. Лучшие результаты дает использование в качестве элемента термокомпенсации полупроводниковых приборов (рис. 7). В основе лежит температурная зависимость прямой ветви ВАХ р-п-перехода, которая характеризуется отрицательным температурным коэффициентом (около  $-2,2 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$  для кремниевых приборов) и позволяет в идеальном случае осуществить полную компенсацию температурного дрейфа тока покоя оконечных транзисторов.

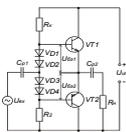


Рис. 7

Кроме того, малое динамическое сопротивление открытого р-п-перехода обеспечивает одинаковые условия возбуждения транзисторов. Нужную величину  $U_{см}$  получают, используя последовательное соединение нескольких диодов (рис. 7).

Методические указания по выполнению лабораторной работы

**Исследование амплитудной характеристики** усилителя проводится на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1 \text{ кГц}$ ) с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 8. При измерении напряжений входного и выходного сигналов необходимо помнить, что вольтметры переменного напряжения показывают действующее значение, а при использовании осциллографа можно измерять амплитудное значение переменного напряжения.

**Исследование амплитудно-частотной характеристики** проводится при фиксированном уровне входного сигнала, выбранном на линейном участке АХ  $U_{вх} \cong (0,1 \dots 0,3) U_{вх \text{ макс}}$  с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 8. Для упрощения вычислений коэффициента усиления по напряжению желательно выбрать круглое значение амплитуды напряжения входного сигнала. Например: 1 мВ, 5 мВ, 10 мВ. Исследуемые усилительные каскады имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – изменение чего-либо в десять раз, в данном случае частоты). Поэтому при построении графиков АЧХ необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб. При снятии АЧХ в области средних частот, где коэффициент усиления практически не

изменяется, измерения необходимо проводить в трех...пяти точках на каждую декаду. Например: 100, 300, 500, 700 Гц; 1, 2, 3, 5, 7 кГц и т.д. Значения нижней и верхней граничных частот ( $f_H$  и  $f_B$ ) необходимо определять по уменьшению коэффициента усиления в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с максимальным значением коэффициента усиления в области средних частот. Заключительным этапом исследования АЧХ является определение полосы

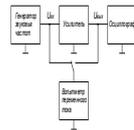


Рис. 8

пропускания усилителя  $\Delta f = f_B - f_H$ .

**Графоаналитический расчет** усилительного каскада на биполярном транзисторе, работающем в режиме класса А (см. рис. 1), проводится в следующей последовательности. На семействе выходных характеристик транзистора, как показано на рис. 2, через точки с координатами ( $I_K = 0$ ,  $U_{KЭ} = U_{ИП}$ ) и ( $I_K = I_{K \text{ пред}} = U_{ИП}/R_K$ ,  $U_{KЭ} = 0$ ) проводится нагрузочная прямая. Пересечение нагрузочной прямой с линией насыщения позволяет определить точку В ( $I_{K \text{ макс}}$ ,  $U_{KЭ \text{ мин}}$ ,  $I_B \text{ макс}$ ), а с кривой семейства, соответствующей  $I_B = I_{B \text{ мин}} = 0$ , точку С ( $I_{K \text{ мин}}$ ,  $U_{KЭ \text{ макс}}$ ,  $I_{B \text{ мин}}$ ). Коллекторный ток покоя в рабочей точке задается согласно выражению  $I_{K0} = (I_{K \text{ мин}} + I_{K \text{ макс}})/2$ . Пересечение нагрузочной прямой с прямой  $I_K = I_{K0}$  дает положение рабочей точки (РТ) и позволяет найти  $U_{K0}$ , а также  $I_{B0}$ . Амплитудные значения переменных токов и напряжений транзистора определяются согласно выражениям:

$$I_{Kм} = I_{K \text{ макс}} - I_{K0}; I_{Bм} = I_{B \text{ макс}} - I_{B0}; U_{Kм} = U_{KЭ \text{ макс}} - U_{KЭ \text{ мин}}.$$

Основные параметры усилителя определяются выражениями

$$R_{вх} = r_b + \left( \frac{26 \text{ мВ}}{I_{K0} + I_{B0}} + R_э \right) (1 + h_{21Э}) - \text{входное сопротивление, где}$$

$r_b$  – объемное сопротивление базы транзистора,  $h_{21Э}$  – статический коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ;

$$U_{бэм} = I_{Bм} R_{вх} - \text{амплитуда входного сигнала;}$$

$$K_i = I_{Kм}/I_{Bм} - \text{коэффициент передачи по току;}$$

$$K_u = U_{Kм}/U_{бэм} - \text{коэффициент передачи по напряжению;}$$

$$P_{вх} = 0,5 U_{бэм} I_{Bм} - \text{входная мощность;}$$

$P_{\text{ВЫХ}} = 0,5U_{\text{км}}I_{\text{км}}$  – выходная мощность;

$K_p = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$  – коэффициент передачи по мощности;

$P_0 = I_{\text{к0}}U_{\text{ИП}}$  – мощность, потребляемая от источника питания;

$\eta = P_{\text{ВЫХ}}/P_0$  – КПД.

**Расчет элементов схемы** (см. рис. 1), задающих рабочую точку транзистора, проводится согласно выражениям:

$R_{\text{к}} = U_{\text{ИП}}/I_{\text{к пред}}$ ;

$R_{\text{э}} = \frac{2[\text{мВ}/^\circ\text{C}]\Delta T}{(I_{\text{к0}} + I_{\text{б0}})S}$ , где  $S = \Delta I_{\text{к0}}/I_{\text{к0}}$  – нестабильность коллекторного

тока;

$R_2 = 8R_{\text{ВХ}}$ ;

$R_1 = \frac{U_{\text{ИП}} - (U_{\text{бэ0}} + (I_{\text{к0}} + I_{\text{б0}})R_{\text{э}})}{I_{\text{д}} + I_{\text{б0}}}$ , где  $I_{\text{д}}$  – ток делителя определяет-

ся выражением  $I_{\text{д}} = \frac{U_{\text{бэ0}} + (I_{\text{к0}} + I_{\text{б0}})R_{\text{э}}}{R_2}$ .

### Порядок выполнения работы

1. Исследовать основные характеристики и параметры выходного каскада на биполярном транзисторе, работающем в режиме А.

1.1. Провести расчет элементов схемы (см. рис. 1)  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{э}}$ , задающих рабочую точку транзистора типа КТ 815 А. Исходные данные для расчета:  $U_{\text{ИП}} = 10$  В; диапазон изменения температуры  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ; нестабильность коллекторного тока транзистора, обусловленная изменением температуры  $S = 0,11$ ; предельное значение тока коллектора  $I_{\text{к пред}} = 120$  мА (см. рис. 2). Паспортные данные транзистора КТ 815 А: статический коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ  $h_{21Э} = 40$ ; объемное сопротивление базы  $r_{\text{б}} = 2$  Ом; максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер  $U_{\text{кэ доп}} = 25$  В; максимально допустимый ток коллектора  $I_{\text{к доп}} = 1,5$  А.

1.2. Провести графоаналитический расчет усилительного каскада, рассчитать значения параметров  $I_{\text{км}}$ ,  $I_{\text{бм}}$ ,  $U_{\text{км}}$ ,  $U_{\text{бэм}}$ ,  $R_{\text{ВХ}}$ ,  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_p$ ,  $P_{\text{ВХ}}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}}$ ,  $P_0$ ,  $\eta$ .

1.3. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 9, используя элементы схемы, близкие к расчетным. Установить номинальное

напряжение питания усилителя  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ . Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

1.4. Измерить токи и напряжения покоя транзистора  $I_{\text{к0}}$ ,  $U_{\text{бэ0}}$ ,  $U_{\text{э0}}$ ,  $U_{\text{к0}}$ .

1.5. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 8.

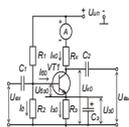


Рис. 9

1.6. На частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$  при амплитуде входного сигнала, соответствующей максимальной выходной мощности при неискаженном выходном сигнале (контролировать с помощью осциллографа), определить амплитуды входного и выходного сигналов  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ .

1.7. По полученным экспериментальным данным рассчитать

$P_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{2R_{\Gamma}}$ , где  $R_{\Gamma}$  – выходное сопротивление генератора звуковых частот;

$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{2R_{\text{к}}}$ ,  $K_{\text{ц}}$ ,  $K_{\text{р}}$ ,  $K_{\text{и}} = K_{\text{р}}/K_{\text{ц}}$ ,  $P_0$ ,  $\eta$ . Сравнить полученные экспериментальные данные с результатами теоретических расчетов п.1.2.

2. Исследовать основные характеристики и параметры двухтактного выходного каскада на биполярных транзисторах, работающих в режиме В, с двухполярным источником питания.

2.1. Провести расчет элементов схемы (см. рис. 3)  $R_1$ ,  $R_2$ , задающих рабочую точку транзистора типа КТ 815 А, и сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$ . Исходные данные для расчета:  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ ; предельное значение тока коллектора  $I_{\text{к пред}} = 120 \text{ мА}$  (рис. 4). Паспортные данные транзистора КТ 815 А: статический коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ  $h_{21\text{Э}} = 40$ ; объемное сопротивление базы  $r_{\text{б}} = 2 \text{ Ом}$ ; максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер  $U_{\text{кэ доп}} = 25 \text{ В}$ ; максимально допустимый ток коллектора  $I_{\text{к доп}} = 1,5 \text{ А}$ . Расчет проводить согласно следующим выражениям

$$R_1 = R_2 = U_{\text{ип}}/I_{\text{д}}; \quad I_{\text{д}} = (5 \dots 10)I_{\text{бм}}; \quad I_{\text{бм}} = I_{\text{км}}/h_{21\text{Э}}.$$

Амплитудное значение коллекторного тока необходимо принять равным удвоенному значению  $I_{\text{км}}$ , полученному в п.1.2. Сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  необходимо принять равным  $R_{\text{к}}$ , рассчитанному в п.1.1.

2.2. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 10, используя элементы схемы, близкие к расчетным. Установить номинальные напряжения источников питания усилителя  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ . Напряжения контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

2.3. Измерить токи и напряжения покоя транзисторов  $I_{\text{к0}}$ ,  $U_{\text{бэ0}}$ ,  $U_{\text{э0}}$ ,  $U_{\text{к0}}$ .

2.4. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 8.

2.5. Снять АХ усилителя  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  и зависимость  $I_{\text{к0}} = f(U_{\text{вх}})$  на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ . Величину  $U_{\text{вх макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа.

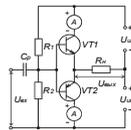


Рис. 10

2.6. По результатам экспериментальных исследований рассчитать следующие зависимости  $P_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ ,  $P_0 = f(U_{\text{вх}})$ ,  $K_{\text{ц}} = f(U_{\text{вх}})$ ,  $\eta = f(U_{\text{вх}})$ . Определить динамический диапазон усилителя. При расчетах пользоваться формулами из п.1.7.

2.7. Снять АЧХ усилителя при амплитуде входного сигнала  $U_{\text{вх}}$ , соответствующей линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{вх}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

3. Исследовать основные характеристики и параметры двухтактного выходного каскада на биполярных транзисторах, работающих в режиме В, с однополярным источником питания.

3.1. Провести расчет элементов схемы (см. рис. 5)  $R_1$ ,  $R_2$ , задающих рабочую точку транзистора типа КТ 815 А, и сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$ . Исходные данные для расчета:  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ ; предельное значение тока коллектора  $I_{\text{к пред}} = 120 \text{ мА}$  (см. рис. 4). Паспортные данные транзистора КТ 815 А: статический коэффициент передачи по току в схеме с ОЭ  $h_{21Э} = 40$ ; объемное сопротивление базы  $r_{\text{б}} = 2 \text{ Ом}$ ; максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер  $U_{\text{кэ доп}} = 25 \text{ В}$ ; максимально допусти-

мый ток коллектора  $I_{к доп} = 1,5 \text{ А}$ . Расчет проводить согласно следующим выражениям

$$R_1 = R_2 = U_{ип}/I_d; \quad I_d = (5 \dots 10)I_{бм}; \quad I_{бм} = I_{км}/h_{21Э}.$$

Амплитудное значение коллекторного тока необходимо принять равным значению  $I_{км}$ , полученному в п.1.2. Сопротивление нагрузки  $R_n$  необходимо принять равным  $R_k$ , рассчитанному в п.1.1.

3.2. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 11, используя элементы схемы близкие к расчетным. Установить номинальное напряжение источника питания усилителя  $U_{ип} = 10 \text{ В}$ . Напряжение контролировать вольтметром постоянного тока, установленным на панели стенда.

3.3. Измерить токи и напряжения покоя транзисторов  $I_{к0}$ ,  $U_{бэ0}$ ,  $U_{э0}$ ,  $U_{к0}$ .

3.4. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 8.

3.5. Снять АХ усилителя  $U_{вых} = f(U_{вх})$  и зависимость  $I_{к0} = f(U_{вх})$  на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ . Величину  $U_{вх макс}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{вых}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа.

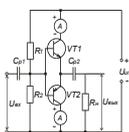


Рис. 11

3.6. По результатам экспериментальных исследований рассчитать следующие зависимости:  $P_{вых} = f(U_{вх})$ ,  $P_0 = f(U_{вх})$ ,  $K_u = f(U_{вх})$ ,  $\eta = f(U_{вх})$ . Определить динамический диапазон усилителя. При расчетах пользоваться формулами из п.1.7.

3.7. Снять АЧХ усилителя при амплитуде входного сигнала  $U_{вх}$ , соответствующей линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{вх}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

4. Исследовать основные характеристики и параметры двухтактного выходного каскада на биполярных транзисторах, работающих в режиме АВ, смещение на базах которых задается с помощью диодов.

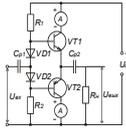


Рис. 12

4.1. Собрать усилительный каскад по схеме, приведенной на рис. 12, используя элементы схемы, близкие к расчетным, полученным в п.3.1. Установить номинальное напряжение источника питания усилителя  $U_{\text{ИП}} = 10 \text{ В}$ . Напряжение контролировать вольтметром

постоянного тока, установленным на панели стенда.

4.2. Измерить токи и напряжения покоя транзисторов  $I_{\text{к0}}$ ,  $U_{\text{бэ0}}$ ,  $U_{\text{э0}}$ ,  $U_{\text{к0}}$ .

4.3. Подключить измерительные приборы (генератор звуковых частот, осциллограф, вольтметр переменного тока) согласно схеме на рис. 8.

4.4. Снять АХ усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  и зависимость  $I_{\text{к0}} = f(U_{\text{ВХ}})$  на частоте синусоидального входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ . Величину  $U_{\text{ВХ макс}}$  определять по началу видимых искажений (ограничению синусоиды) выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$ , что легко контролируется визуально с помощью осциллографа.

4.5. По результатам экспериментальных исследований рассчитать следующие зависимости:  $P_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ ,  $P_0 = f(U_{\text{ВХ}})$ ,  $K_{\text{u}} = f(U_{\text{ВХ}})$ ,  $\eta = f(U_{\text{ВХ}})$ . Определить динамический диапазон усилителя. При расчетах пользоваться формулами из п.1.7.

4.6. Снять АЧХ усилителя при амплитуде входного сигнала  $U_{\text{ВХ}}$ , соответствующей линейному участку АХ, измеренной в области средних частот (воспользоваться для определения значения  $U_{\text{ВХ}}$  результатами выполнения предыдущего пункта). Определить полосу пропускания усилителя.

### Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Принципиальные схемы исследуемых усилительных каскадов.
3. Результаты теоретических расчетов.
4. Результаты исследования каскадов по постоянному току.
5. Табличные и графические результаты исследования АХ каскадов.
6. Табличные и графические результаты исследования АЧХ каскадов.

## Контрольные вопросы

1. Назвать основные параметры выходных усилителей. Сравнить между собой по результатам экспериментальных исследований режимы работы выходных усилительных каскадов.
2. Назвать причины нелинейности выходных каскадов, объяснить природу искажений типа "ступенька".
3. Какие элементы схемы определяют АЧХ выходного усилителя мощности? Каковы требования к АЧХ в зависимости от назначения усилителя?
4. Объяснить назначение элементов схем исследованных выходных усилительных каскадов.

## Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Полупроводниковые усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1997.
3. Ногин В.М. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1992.
4. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

### Цель работы

1. Изучить принцип действия, характеристики и параметры операционных усилителей (ОУ).
2. Изучить область применения, основные схемы включения, классификацию и условные графические обозначения ОУ.
3. Экспериментально исследовать характеристики ОУ по постоянному и переменному току.

### Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель – это универсальное усилительное устройство, предназначенное для выполнения линейных математических операций в аналоговых вычислительных машинах. ОУ – усилитель с непосредственными связями, высоким коэффициентом усиления, малым выходным и высоким входным сопротивлением.

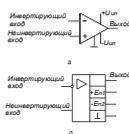


Рис. 1

ОУ обозначается символом, имеющим треугольную или прямоугольную конфигурацию (рис. 1,а,б). ОУ имеет два входа: неинвертирующий или прямой (+), так как сигнал на этом входе находится в фазе с сигналом на выходе; инвертирующий вход (–) и общий выход. ОУ может иметь и большее число выводов, предназначенных для частотной коррекции, установки нуля сдвига, регулировки

напряжения питания и другие.

Согласно ГОСТ 2.759-82 ОУ в схемах обозначается прямоугольником (рис. 1,б), в верхней части которого изображается равносторонний треугольник, указывающий направление передачи сигнала. Инвертирующий вход обозначается кружком. Прямоугольник часто разбивается на одно или несколько полей. Одно поле является основным, другие поля – дополнительными. На дополнительных полях указывают назначение выводов: для подключения источников питания, балансировки нуля, коррекции и заземления корпуса интегральной схемы. Для получения нулевого уровня на выходе при отсутствии сигналов на входе используют два источника питания противоположной полярности и осуществляют балансировку схемы. В своей внутренней структуре ОУ содержит несколько усилительных каскадов. Важным свойством ОУ является сильная чувствительность к разности и сумме входных сигналов.

На начальном этапе создания и разработок ОУ строились по четырехкаскадной схеме: первый каскад – симметричный дифференциальный,

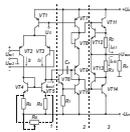


Рис. 2

второй – дифференциальный, но несимметричный, третий – согласующий, а четвертый – мощный выходной каскад. По такой схеме построены например усилители К1УТ401(А,Б), К140УД1А,Б и ряд других. Последующим этапом совершенствования операционных усилителей явилось создание трехкаскадных схем, в которых используются транзисторы р-п-р- и п-р-п-структуры.

Принципиальная схема такого ОУ приведена на рис. 2. Здесь первый каскад – дифференциальный, второй – промежуточный усилительный, на входе которого стоит эмиттерный повторитель на VT6. Транзистор VT10 включен по схеме ОЭ с динамической нагрузкой на VT7. Транзисторы VT8 и VT9 обеспечивают задание рабочей точки выходного каскада. Выходной каскад выполнен на транзисторах VT11 и VT14 по двухтактной схеме с защитой от короткого замыкания нагрузки на транзисторах VT12 и VT13. Коррекция частотной характеристики осуществляется конденсатором  $C_K$ .

В третьем поколении ОУ во входных каскадах используются супер-бета транзисторы ( $\beta = 3000 \dots 5000$ ). В ряде случаев для повышения входного сопротивления используются полевые транзисторы.

ОУ характеризуются следующими параметрами: смещение или напряжение сдвига нуля, входные токи смещения, разность входных токов, входное сопротивление, коэффициент ослабления синфазного сигнала, коэффициент шума, выходное напряжение и выходной ток, коэффициент усиления, полоса пропускания, скорость нарастания выходного напряжения, время установления выходного напряжения, время восстановления.

В отличие от обычных усилителей ОУ характеризуется рядом специфических параметров. **Коэффициент усиления дифференциального сигнала** определяется выражением

$$K_d = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ Д}}}$$

**Дифференциальным сигналом** является напряжение между одним из входов и общей точкой схемы.

**Коэффициент ослабления синфазного сигнала**

$$K_{\text{осл сф}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}}$$

показывает, во сколько раз коэффициент передачи дифференциального сигнала больше коэффициента передачи синфазных сигналов, и лежит в пределах от 60 до 120 дБ.

**Дифференциальное входное сопротивление**  $R_{\text{вх д}}$  – это сопротивление со стороны любого входа при подключении другого к общей точке схемы. Оно изменяется в пределах от нескольких килоом до нескольких мегаом.

**Синфазное входное сопротивление**  $R_{\text{вх сф}}$  – это сопротивление между общей точкой схемы и замкнутыми друг с другом входами, имеет величину порядка десятков мегаом.

**Время установления**  $t_{\text{уст}}$  – это время, за которое выходное напряжение нарастает от 0,1 до 0,9 от установившегося значения.

**Скорость нарастания выходного напряжения** определяется выражением

$$V_u = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t}$$

и измеряется в вольтах в микросекунду (В/мкс).

**Время восстановления**  $t_{\text{вос}}$  – это время, необходимое для возвращения усилителя из режима насыщения по выходу в линейный режим.

В связи с тем, что ОУ имеет очень большой коэффициент усиления, он практически всегда используется с цепью отрицательной обратной связи для устранения самовозбуждения. Схема такого усилителя приведена на рис. 3. Если пренебречь входными токами ОУ, то можно записать  $I_R = I_{\text{ос}}$

или

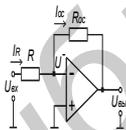


Рис. 3

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - U^-}{R} = \frac{U^- - U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ос}}} \quad (1)$$

Учитывая, что при большом коэффициенте усиления  $U^-$  очень мало, получим  $K^- = -R_{\text{ос}}/R$ ,

$$(2)$$

т.е. коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется отношением сопротивления в цепи обратной связи к сопротивлению в цепи источника сигнала.

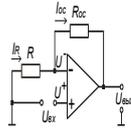


Рис. 4

Еще одной схемой усилительного каскада на ОУ является неинвертирующий усилитель (рис. 4). В этой схеме входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а сигнал обратной

связи на инвертирующий вход.

Так как входным каскадом ОУ является дифференциальный усилитель, то можно записать  $U^+ \approx U^- = U_{ВХ}$  или

$$U_{ВХ} = \frac{U_{ВЫХ}}{R + R_{oc}} \cdot R,$$

откуда  $K^+ = 1 + \frac{R_{oc}}{R}$ . (3)

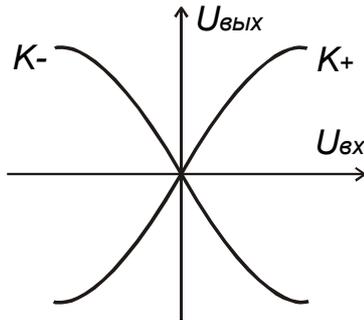


Рис. 5

Амплитудная характеристика ОУ приведена на рис. 5, где  $K^+$  – характеристика неинвертирующего усилителя,  $K^-$  – характеристика инвертирующего усилителя.

На начальном участке амплитудная характеристика носит линейный характер, а при больших входных сигналах имеет место ограничение выходного сигнала.

Поскольку в операционном усилителе используются непосредственные связи, то амплитудно-частотная характеристика в области низких частот не имеет спада вплоть до нулевой частоты. В области высоких частот имеет место спад АЧХ (рис. 6), обусловленный наличием верхней границы усиливаемых частот активных элементов, паразитными емкостными связями между близко расположенными проводниками, а также между проводниками и подложкой.

Все паразитные емкости можно объединить в общую емкость, шунтирующую нагрузку, поэтому

$$K(f) = \frac{K_0}{(1 + j(f/f_c))},$$

где  $f_c$  – частота среза, а модуль коэффициента усиления

$$|K(f)| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}.$$

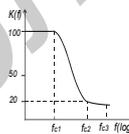


Рис. 6

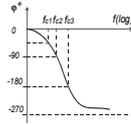


Рис. 7

Выходной сигнал ОУ отстает по фазе от входного, поэтому фазовый сдвиг будет отрицательным (рис. 7):  
 $\varphi = -\arctg(f/f_c)$ .

При введении в усилитель обратной связи произведение  $K \cdot \Delta f$  сохраняется.

С помощью ОУ можно выполнять не только усиление, но и различные математические операции: сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование, логарифмирование и другие функции.

Схема дифференциатора приведена на рис. 8. Так как  $I_c = I_{oc}$ , то можно записать

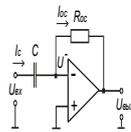


Рис. 8

$$C \frac{d(U_{\text{ВХ}} - U^-)}{dt} = \frac{U^- - U_{\text{ВЫХ}}}{R_{oc}} \quad (4)$$

Учитывая, что  $U^-$  очень мало, получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{oc} C \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} \quad (5)$$

Операция интегрирования выполняется схемой, показанной на рис. 9. При равенстве токов  $I_R = I_c$  запишем уравнение

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - U^-}{R} = C \frac{d(U^- - U_{\text{ВЫХ}})}{dt} \quad (6)$$

Так как для усилителя выполняется условие  $U^- \ll U_{\text{ВХ}}$  и  $U^- \ll U_{\text{ВЫХ}}$ , выше-приведенное равенство будет иметь вид

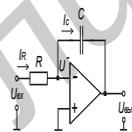


Рис. 9

$$\frac{U_{\text{ВХ}}}{R} = -C \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} \quad (7)$$

Откуда находим

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

Операции дифференцирования и интегрирования выполняются более точно, если коэффициент усиления ОУ велик.

Для выполнения операции логарифмирования можно использовать схему, представленную на рис. 10. В этой схеме в цепь обратной связи

включен нелинейный элемент – транзистор в диодном включении, для прямой ветви ВАХ которого справедливо выражение

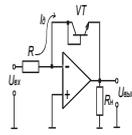


Рис. 10

$$I_{\text{д}} = I_{\text{обр}} e^{\frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{T}}}} \quad (9)$$

Логарифмируя (9), получим

$$U_{\text{д}} = U_{\text{T}} \ln(I_{\text{д}}/I_{\text{обр}}) \quad (10)$$

Тогда сигнал на выходе ОУ

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{д}} = -U_{\text{T}} \ln\left(\frac{U_{\text{вх}}}{R \cdot I_{\text{обр}}}\right), \quad (11)$$

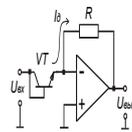


Рис. 11

где  $U_{\text{T}} = kT/q$  – тепловой потенциал.

Обратную операцию – антилогарифмирования – можно выполнить, используя схему, изображенную на рис. 11, для которой справедливо выражение

нужно на рис. 11, для которой справедливо выражение

$$U_{\text{вых}} = -I_{\text{д}} \cdot R \approx -R \cdot I_{\text{обр}} e^{\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{T}}}}$$

Точность операций логарифмирования и антилогарифмирования определяется степенью приближения реальной характеристики нелинейного элемента к теоретической.

### Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Перед проведением измерений осуществляется балансировка усилителя. Для балансировки ОУ на стенде имеется специальный резистор, с помощью которого необходимо добиться нулевого показания на выходе (или наименее возможного: десятые...сотые доли вольта) при отсутствии сигнала на входе, например, при закороченных входах. Схема балансировки

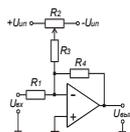


Рис. 12

приведена на рис. 12.

2. Контроль напряжения на выходе ОУ при его балансировке и исследовании характеристик проводится с помощью цифрового вольтметра или осциллографа.

3. Для снятия характеристик по по-

стоянному току в качестве источника входного сигнала используется калиброванный делитель либо специальный источник постоянного тока.

4. При снятии амплитудных характеристик входное напряжение увеличивают до тех пор, пока коэффициент усиления усилителя не уменьшится в два раза. Если характеристика снимается по переменному току частота входного сигнала устанавливается равной 1000 Гц.

5. При исследовании АЧХ на вход усилителя подается сигнал по амплитуде намного меньший (в 5...10 раз), чем это требуется для насыщения усилителя. Частота изменяется в пределах всего диапазона генератора: от 20 Гц до 200 кГц. При построении АЧХ частота откладывается в логарифмическом масштабе, а коэффициент усиления – в линейном.

6. Питание ОУ осуществляется от двух разнополярных источников напряжения одинаковой величины.

#### Порядок выполнения работы

1. Измерить входное напряжение сдвига по схеме, приведенной на рис. 13.

Выбрать сопротивление резисторов  $R_1$  и  $R_2$  такими, чтобы коэффициент усиления усилителя был равным 100. Так как вход схемы закорочен на землю, то на входе действует только напряжение сдвига. Измерив выходное напряжение, легко определить напряжение сдвига. Сопротивление резистора  $R_3$  определяется как  $R_3 = R_1 \parallel R_2$ .

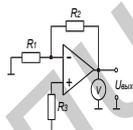


Рис. 13

Измерить  $U_{сдв}$  для следующих напряжений питания:

- а)  $U_{ип1} = +7$  В;  $U_{ип2} = -7$  В;
- б)  $U_{ип1} = +5$  В;  $U_{ип2} = -5$  В;
- в)  $U_{ип1} = 6$  В;  $U_{ип2} = -5$  В;

г)  $U_{ип1} = +5$  В;  $U_{ип2} = -6$  В.

2. Снять АЧХ операционного усилителя  $K_u = F(f)$  по схеме, приведенной на рис. 14. Выбрать  $R = 1$  кОм,  $U_{ип1} = +5$  В;  $U_{ип2} = -5$  В.

2.1. Подключить цепь коррекции к операционному усилителю. На вход усилителя от генератора подать напряжение  $U_{вх} = 0,5$  мВ. Изменяя частоту генератора в заданных пределах, измерять  $U_{вых}$ . Для каждой частоты определять коэффициент усиления.

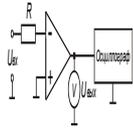


Рис. 14

коррекции.

3. Исследовать инвертирующий усилитель по схеме, приведенной на рис. 15. Сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  должны быть такими, чтобы коэффициент усиления был равен 10. Коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется выражением  $K_u = -R_2/R_1$ . Напряжения

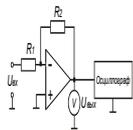


Рис. 15

источников питания:  $U_{ип1} = +5\text{ В}$ ;  $U_{ип2} = -5\text{ В}$ .  
3.1. Снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . В качестве источника сигнала постоянного тока использовать выход 1:10 калиброванного делителя или специальный источник питания. Входное напряжение изменять в пределах, при которых выходное напряжение достигает напряжения насыщения.

3.2. Снять амплитудную характеристику усилителя на переменном токе. В качестве источника входного сигнала использовать генератор низкой частоты. Амплитуду входного сигнала изменять в пределах от 0 В до напряжения, при котором в форме выходного сигнала проявляется насыщение (искажение синусоиды). Измерения проводить на частоте 1 кГц.

3.3. Снять АЧХ усилителя при  $U_{вх} = 10\text{ мВ}$  при отключенной и подключенной цепи коррекции.

3.4. Определить экспериментальное значение коэффициента усиления инвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе.

4. Исследовать неинвертирующий усилитель по схеме, приведенной на рис. 16. Сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  должны быть такими, чтобы коэффициент усиления был равен 11. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя определяется выражением  $K_u = 1 + R_2/R_1$ . Напряжения

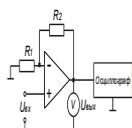


Рис. 16

2.2. Повторить п. 2.1, отключив корректирующую цепь.

2.3. Определить частоты среза операционного усилителя при наличии и отсутствии цепи

источников питания:

$U_{ип1} = +5\text{ В}$ ;  $U_{ип2} = -5\text{ В}$ .

3.1. Снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . В качестве источника сигнала

постоянного тока использовать выход 1:10 калиброванного делителя или специальный источник питания.

3.2. Снять амплитудную характеристику усилителя на переменном токе. В качестве источника входного сигнала использовать генератор низкой частоты. Амплитуду входного сигнала изменять в пределах от 0 В до напряжения, при котором в форме выходного сигнала проявляется насыщение (искажение синусоиды). Измерения проводить на частоте 1 кГц.

3.3. Снять АЧХ усилителя при  $U_{вх} = 10\text{ мВ}$  при отключенной и подключенной цепи коррекции.

3.4. Определить экспериментальное значение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе.

4. Исследовать неинвертирующий усилитель по схеме, приведенной на рис. 16. Сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  должны быть такими, чтобы коэффициент усиления был равен 11. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя определяется выражением  $K_u = 1 + R_2/R_1$ . Напряжения

источников питания:  $U_{ип1} = +5\text{ В}$ ;  $U_{ип2} = -5\text{ В}$ .

4.1. Снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . В

качестве источника сигнала постоянного тока использовать выход 1:10 калиброванного делителя или специальный источник питания.

4.2. Снять амплитудную характеристику усилителя на переменном токе. В качестве источника входного сигнала использовать генератор низкой частоты. Амплитуду входного сигнала изменять в пределах от 0 В до напряжения, при котором в форме выходного сигнала проявляется насыщение (искажение синусоиды). Измерения проводить на частоте 1 кГц.

4.3. Снять АЧХ усилителя при  $U_{вх} = 10\text{ мВ}$  при отключенной и подключенной цепи коррекции.

4.4. Определить экспериментальное значение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя на постоянном и переменном токе.

качестве источника сигнала постоянного тока использовать выход 1:10 калиброванного делителя или специальный источник. Входное напряжение изменять в пределах, при которых выходное напряжение достигает напряжения насыщения.

4.2. Снять амплитудную характеристику усилителя на переменном токе. В качестве источника входного сигнала использовать генератор низкой частоты. Входной сигнал изменять в пределах от 0 В до напряжения, при котором в форме выходного сигнала проявляется насыщение (искажение синусоиды). Измерения проводить на частоте 1 кГц.

4.3. Снять амплитудно-частотную характеристику при  $U_{вх} = 10$  мВ при наличии и отсутствии цепи коррекции.

4.4. Определить экспериментальное значение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя.

#### Содержание отчета

1. Схемы для проведения измерений.
2. Таблицы с результатами экспериментальных исследований.
3. Графики исследованных зависимостей.
4. Результаты расчетов.
5. Основные выводы по лабораторной работе.

#### Контрольные вопросы

1. Определение, основные характеристики и параметры ОУ.
2. Схемы включения операционных усилителей, их свойства.
3. Схемы балансировки и коррекции, их назначение.
4. Разновидности ОУ, их применение, условные графические обозначения.
5. Покажите, что коэффициент усиления инвертирующего усилителя на ОУ определяется выражением (2).
6. Покажите, что коэффициент усиления неинвертирующего усилителя на ОУ определяется выражением (3).

#### Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1983.

3. Остапенко Г.Е. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.

4. Головин О.В., Кубицкий А.А. Электронные усилители. – М.: Радио и связь, 1983.

5. Миловзоров В.П. Элементы информационных систем. – М.: Высш. шк., 1983.

6. Аналоговые интегральные схемы: Справочник / А.Л. Булычев и др. – Мн.: Беларусь, 1993.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КЛЮЧЕЙ

Цель работы

1. Теоретически изучить схемотехнику, основные характеристики и параметры электронных ключей на биполярных и полевых транзисторах.
2. Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры электронных ключей на биполярных и полевых транзисторах.

Краткие теоретические сведения

Электронными ключами называют схемы, предназначенные для замыкания или размыкания электрических цепей под действием внешних управляющих сигналов. В бесконтактных электронных ключах используются нелинейные активные элементы: полупроводниковые диоды, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры. В отличие от механических переключателей электронные ключи обладают большим быстродействием и надежностью. В зависимости от назначения ключевые схемы бывают: цифровые и аналоговые. Цифровые ключи используются в устройствах вычислительной техники, цифровой связи, дискретной автоматики. Аналоговые ключи используются в аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователях, в устройствах измерения и управления, в многоканальных коммутаторах.

Электронные ключи описываются **передаточной характеристикой**, определяющей зависимость выходного напряжения от входного

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}}).$$

На рис. 1 представлена передаточная характеристика для инвертирующей схемы ключа. В транзисторном ключе два его устойчивых состояния (разомкнутое и замкнутое) соответствуют пологим участкам, ограниченными точками A и B. На пологом участке, соответствующем малым значениям  $U_{\text{ВХ}}^0$

(точка A), ключ разомкнут (транзистор закрыт), и на нем падает большое напряжение – напряжение логической единицы  $U_{\text{ВЫХ}}^1$ . При относительно большом входном сигнале  $U_{\text{ВХ}}^1$ , соответствующем пологому участку (точка

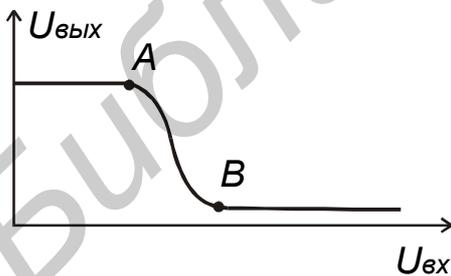
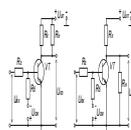


Рис. 1

В), ключ замкнут, транзистор открыт и насыщен, выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}^0$  мало. Небольшие изменения входного сигнала на пологих участках характеристики практически не вызывают изменения напряжения на выходе ключа. Это значит, что цифровые схемы мало чувствительны к разбросу параметров транзистора, к их температурной зависимости, к изменению параметров во времени, к внешним помехам и собственным шумам.

Принципиальная схема электронного ключа на биполярном транзисторе показана на рис. 2. Исходное состояние транзисторного ключа – закрыто. Для уменьшения остаточного тока коллектора до значения  $I_{\text{КБ0}}$  закрытого транзистора на базу транзистора через резистор  $R_{\text{Б}}$  подается запи-



а б

Рис. 2

рающее напряжение, которое выбирается из условия  $|U_{\text{см}}| > R_{\text{Б}} \cdot I_{\text{КБ0}}$  при  $R_{\text{Б}} \gg R_{\text{Г}}$ .

При использовании кремниевых транзисторов, у которых  $I_{\text{КБ0}}$  мал и при непосредственном соединении входа ключа с выходом предыдущей схемы (схемы запуска),  $U_{\text{см}}$  можно не использовать.

Сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н}}$  может быть подключено к транзисторному ключу кондуктивно (непосредственно) и через разделительный конденсатор. При кондуктивном подключении нагрузки резистор  $R_{\text{Н}}$  подключается параллельно коллекторному резистору  $R_{\text{К}}$  (рис. 2,а) или параллельно транзистору (рис. 2,б). Если резистор  $R_{\text{Н}}$  подключен параллельно резистору  $R_{\text{К}}$ , ток коллектора  $I_{\text{К нас}}$  в режиме насыщения увеличивается. При малом сопротивлении резистора  $R_{\text{Н}}$ , транзистор вообще может не войти в режим насыщения. Чтобы исключить это неблагоприятное явление, необходимо увеличить ток базы  $I_{\text{Б}} = U_{\text{см}}/R_{\text{Б}}$  за счет увеличения  $U_{\text{см}}$  или уменьшения  $R_{\text{Б}}$ .

При подключении резистора  $R_{\text{Н}}$  параллельно транзистору ток коллектора  $I_{\text{К нас}}$  и степень насыщения транзистора не изменяется. Потенциал

коллектора  $U_{кэ}$  транзистора в режиме отсечки будет равен не  $+U_{ип}$ , а  $+U_{ип экв}$ :

$$U_{ип экв} = \frac{U_{ип} \cdot R_{н}}{R_{н} + R_{к}}; \quad R_{к экв} = \frac{R_{к} \cdot R_{н}}{R_{к} + R_{н}}.$$

Рассмотрим влияние сопротивления нагрузки при подключении  $R_{н}$  через разделительный конденсатор  $C_p$  (рис. 3). При открывании ключа через транзистор будут протекать два тока: ток источника питания  $U_{ип}$  и ток разряда конденсатора  $C_p$ . Величина тока насыщения транзистора будет равна

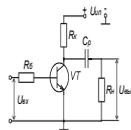


Рис. 3

$$I_{к нас} = \frac{U_{ип}}{R_{к}} + \frac{U_{Cp}}{R_{н}},$$

где  $U_{Cp}$  — напряжение на разделительном конденсаторе. Ток

$I_{к нас}$  увеличивается, а степень насыщения транзистора уменьшается. При малом сопротивлении  $R_{н}$ , транзистор при открывании может не войти в насыщение. В этом случае схема аналогична схеме ключа при подключении нагрузки  $R_{н}$  параллельно резистору  $R_{к}$ . При закрывании транзистора начинается заряд разделительного конденсатора  $C_p$ . Амплитуда выходного напряжения равна

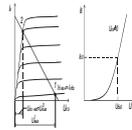
$$U_{вых макс} = U_{ип} \frac{R_{н}}{R_{к} + R_{н}}.$$

Чем меньше сопротивление резистора  $R_{н}$ , тем меньше амплитуда выходного сигнала.

Нагрузочная прямая на статических выходных характеристиках транзистора строится по уравнению Кирхгофа для выходной цепи  $U_{ип экв} = I_{к} R_{к экв} + U_{кэ}$ . Транзистор в ключевом режиме характеризуется двумя устойчивыми состояниями: режимом отсечки и режимом насыщения. Режим отсечки транзистора обеспечивается при отрицательных потенциалах базы  $U_{вх} < 0$ . Под действием входного напряжения эмиттерный переход закрывается, ток базы  $I_{б} = -I_{кб0}$ , в коллекторной цепи протекает небольшой обратный (тепловой) ток коллекторного перехода  $I_{кб0}$ . Этому состоянию соответствует рабочая точка 1 на рис. 4,а. Напряжение на выходе ключа максимально и соответствует логической единице  $U_{вых}^1$ . На

входной характеристике (рис. 4,б) по соответствующему току базы определяем  $U_{бэ}$ , а  $U_{вх} = U_{бэ} + I_{б}R_{г}$ .

При подаче на вход ключа положительного напряжения ток базы возрастает, и при соответствующем его значении транзистор из режима отсечки переходит в режим насыщения (точка 2, рис. 4,а). Падение напряжения  $U_{ост}$  на открытом транзисторе невелико (порядка 0,05...1 В) и соответствует логическому нулю  $U_{вых}^0$ . По соответствующим парам значений  $U_{вых}$  и  $U_{вх}$  (рис. 4) строится передаточная характеристика  $U_{вых} = f(U_{вх})$



а б  
Рис. 4

(см. рис. 1).

Основными статическими параметрами ключа являются: напряжение управления, необходимое для надежного запираания транзистора; минимальный перепад управляющего напряжения, необходимый для надежного отпираания транзистора. Среднее между этими напряжениями называют пороговым  $U_{пор}^0$ . Пороговое напряжение нуля – это напряжение на входе ключа, при котором транзистор переходит в активный режим:

$$U_{пор}^0 = \frac{U_{бэ} \cdot (R_{г} + R_{б}) + U_{см} \cdot R_{г}}{R_{б}}$$

При некотором напряжении на входе  $U_{пор}^1$  ключ открыт, а транзистор насыщен  $U_{вых} = U_{вых\text{ нас}} = U_{вых}^0$ ,  $U_{пор}^1$  – пороговое напряжение единицы, т.е. напряжение на входе, при котором транзистор входит в режим насыщения.

Ток в цепи базы равен:  $I_{бн} = \frac{U_{ип\text{ экв}}}{h_{21э} \cdot R_{к\text{ экв}}}$ . Выходная цепь ключа ха-

рактеризуется следующими статистическими параметрами:

$U_{вых}^0$ ,  $I_{к\text{ макс}}$  – ключ насыщен;  $U_{вых}^1$ ,  $I_{кб0}$  – ключ закрыт.

Для кремниевых транзисторов  $U_{вых}^1$  практически равно  $U_{ип}$ .

Для некоторого граничного значения тока базы  $I_{б\text{ гр}}$  сохраняется соотношение между токами электродов транзистора, характерное для активного режима:

$$I_k = h_{21Э} \cdot I_b + (1 + h_{21Э}) \cdot I_{к60} \approx h_{21Э} \cdot I_b, \quad (1)$$

где  $h_{21Э}$  – статический (усредненный) коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ, а не дифференциальный коэффициент  $h_{21Э}$  при малом входном сигнале. При  $I_b > I_{б гр}$  транзистор переходит в режим насыщения,  $U_{ост}$  почти не изменяется, поскольку все выходные характеристики проходят через точку 2, и соотношение между токами (1) нарушается. Для оценки глубины насыщения транзистора вводят параметр, называемый коэффициентом насыщения:

$$S = \frac{I_b}{I_{б гр}} \gg 1.$$

К динамическим параметрам ключа относится быстродействие, определяющее скорость переходных процессов, возникающих в схеме при подаче на вход прямоугольного входного импульса (рис. 5).

Быстродействие зависит от параметров используемого активного элемента – транзистора, номинальных значений элементов схемы, характера и параметров нагрузки. На временных диаграммах можно выделить следующие временные интервалы:

время задержки  $t_{зд}$  – интервал времени от момента подачи входного сигнала до момента, когда ток коллектора достигнет значения  $0,1I_{к нас}$ ;

время нарастания  $t_{нр}$  – интервал времени, в течение которого фронт выходного импульса нарастает от уровня  $0,1I_{к нас}$  до уровня  $0,9I_{к нас}$ ;

$$\text{время включения} - t_{вкл} = t_{зд} + t_{нр} = \tau_v \ln \frac{S}{S-1},$$

где  $\tau_v = \tau_\beta \tau_k$ ;  $\tau_k = C_k R_{к экв}$ ;  $\tau_\beta = \frac{1}{2\pi f_{h21Э}}$ ;  $C_k$  – емкость коллекторного

перехода;  $f_{h21Э}$  – предельная частота передачи тока базы;



Рис. 5

время рассасывания  $t_{рас}$  – время от момента подачи на базу транзистора запирающего импульса до момента, когда ток коллектора уменьшается до  $0,9I_{к\text{ нас}}$ ,  $t_{рас}$  часто называют временем задержки выключения;

$t_{сп}$  – время, в течении которого тока коллектора уменьшается от уровня  $0,9I_{к\text{ нас}}$  до уровня  $0,1I_{к\text{ нас}}$ .

Для повышения быстродействия ключа необходимо уменьшать коэффициент насыщения транзистора, одновременно обеспечив большой отпирающий ток в момент его отпираания и увеличить ток запирания. Это достигается использованием следующих схем ключа: ключ с форсирующей емкостью (рис. 6) и ключ с диодом на барьере Шотки (ДБШ) (рис. 7).

В схеме с форсирующей емкостью (см. рис. 6) при подаче входного открывающего сигнала сопротивление емкости значительно меньше сопротивления резистора  $R_{ф}$ , в связи с этим ток заряда емкости приводит к возрастанию тока базы и быстрейшему открыванию транзистора. Если емкость зарядилась (транзистор открыт), ток базы уменьшится, поскольку увеличится сопротивление последовательной цепи  $R_{г} + R_{ф}$ , транзистор переходит на границу режима насыщения, время рассасывания носителей уменьшается.

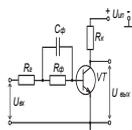


Рис. 6

Наиболее перспективным способом увеличения быстродействия ключа является применение нелинейной отрицательной обратной связи (рис. 7). При открывании тран-

зистора ДБШ закрыт, поскольку потенциал коллектора выше потенциала базы. С возрастанием коллекторного тока потенциал коллектора уменьшается, и на границе перехода транзистора в режим насыщения потенциал коллектора становится ниже потенциала базы, диод открывается. Поэтому

транзистор вообще не переходит в режим насыщения.

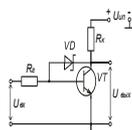


Рис. 7

Ключи на полевых транзисторах, схемы которых представлены на рис. 8, бывают с резистивной нагрузкой (рис. 8,а,б); динамической

нагрузкой (рис. 8,в), когда транзистор выполняет роль резистора; на комплиментарных парах (рис. 8,г), т.е. на транзисторах с разными типами проводимости каналов.

В ключах с резистивной нагрузкой (см. рис. 8,а,б), когда транзистор закрыт, выходное напряжение стремится к напряжению источника питания (уровень логической единицы  $U^1$ ). Если транзистор открыт входным сигналом, то на открытом транзисторе остаточное напряжение порядка 0,02...0,04 В. Для уменьшения остаточного напряжения вместо резистора  $R_c$  используют транзистор (см. рис. 8,в), затвор которого может соединяться с истоком или стоком. Если бы в открытом состоянии нагрузочный транзистор был закрыт, то выходное напряжение стремилось бы к нулю, и ключ не потреблял бы энергии в статических состояниях. Это достигается на ключах на комплементарных транзисторах (см. рис. 8,г). Транзистор VT2 – ключевой, а транзистор VT1 – нагрузочный. Затворы обоих транзисторов объединены и являются входом ключа. При нулевом потенциале на затворах транзистор VT2 закрыт, а транзистор VT1 открыт и работает в линейной области. Напряжение на выходе ключа практически равно  $U_{ип}$ . При подаче на затворы напряжения близкого к  $U_{ип}$  транзистор VT1 закрывается, а транзистор VT2 открывается. На выходе формируется уровень напряжения, близкий к потенциалу земли.

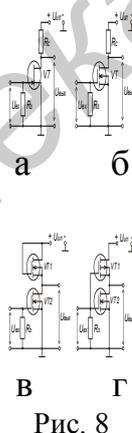


Рис. 8

#### Методические указания по выполнению лабораторной работы

**Исследование передаточной характеристики** электронного ключа проводится с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 9.

**Параметры быстродействия** электронного ключа измеряются с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 10.

На вход исследуемого электронного ключа с выхода генератора импульсов подается прямоугольный импульс. С помощью осциллографа наблюдают и зарисовывают сигнал на входе, а затем на выходе логического

элемента и проводят измерение параметров быстродействия:  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$ . Осциллограф работает в ждущем режиме, внешний синхронизирующий сигнал снимается с синхронизирующего выхода генератора импульсов.

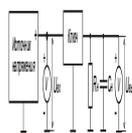


Рис. 9

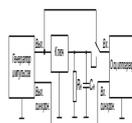


Рис. 10

### Порядок выполнения работы

1. Исследовать влияние параметров элементов схемы и нагрузки на передаточную характеристику и параметры быстродействия насыщенного транзисторного ключа.

1.1. Собрать насыщенный транзисторный ключ по схеме, приведенной на рис. 2,б. Установить номинальное напряжение питания  $U_{ип} = 10$  В.

1.2. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики электронного ключа (рис. 9).

1.3. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений параметров элементов, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_n$  и  $C_n$  в схему не включаются).

1.4. Снять передаточные характеристики ключа для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях напряжения смещения  $U_{см}$ , при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_n$  и  $C_n$  в схему не включаются).

1.5. Снять передаточные характеристики ключа для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях напряжения питания  $U_{ип}$ , при заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

1.6. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора заданы в карточке задания.

1.7. Определить параметры быстродействия насыщенного ключа  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_{\text{н}}$  и  $C_{\text{н}}$  в схему не включаются).

1.8. Определить параметры быстродействия насыщенного ключа  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях сопротивления и емкости нагрузки.

2. Исследовать влияние параметров элементов схемы и нагрузки на параметры быстродействия транзисторного ключа с форсирующей емкостью.

2.1. Собрать транзисторный ключ с форсирующей емкостью по схеме, приведенной на рис. 11. Установить номинальное напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ .

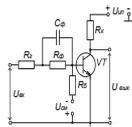


Рис. 11

2.2. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора

указаны в карточке задания.

2.3. Определить параметры быстродействия ключа с форсирующей емкостью  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_{\text{н}}$  и  $C_{\text{н}}$  в схему не включаются).

2.4. Определить параметры быстродействия ключа с форсирующей емкостью  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях сопротивления и емкости нагрузки.

3. Исследовать влияние параметров элементов схемы и нагрузки на параметры быстродействия транзисторного ключа с нелинейной обратной связью.

3.1. Собрать транзисторный ключ с нелинейной обратной связью по схеме, приведенной на рис. 12. Установить номинальное напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ .

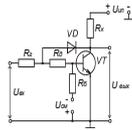


Рис. 12

3.2. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора указаны в карточке задания.

3.3. Определить параметры быстродействия транзисторного ключа с нелинейной обратной связью  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_n$  и  $C_n$  в схему не включаются).

3.4. Определить параметры быстродействия транзисторного ключа с нелинейной обратной связью  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях сопротивления и емкости нагрузки.

4. Исследовать влияние параметров элементов схемы и нагрузки на передаточную характеристику и параметры быстродействия ключа на полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом.

4.1. Собрать электронный ключ на полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом по схеме, приведенной на рис. 8,а. Установить номинальное напряжение питания  $U_{ип} = 10$  В.

4.2. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики электронного ключа (см. рис. 9).

4.3. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений сопротивления в цепи стока, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_n$  и  $C_n$  в схему не включаются).

4.4. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений сопротивления и емкости нагрузки, указанных в карточке задания, и заданных значениях параметров элементов.

4.5. Снять передаточные характеристики ключа для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях напряжения питания  $U_{ип}$ , при заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

4.6. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (см. рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора указаны в карточке задания.

4.7. Определить параметры быстродействия ключа на полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_H$  и  $C_H$  в схему не включаются).

4.8. Определить параметры быстродействия ключа на полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях сопротивления и емкости нагрузки.

5. Исследовать влияние параметров элементов схемы и нагрузки на передаточную характеристику и параметры быстродействия ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом.

5.1. Собрать электронный ключ на МДП-транзисторе с индуцированным каналом по схеме, приведенной на рис. 8,б. Установить номинальное напряжение питания  $U_{ип} = 10$  В.

5.2. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики электронного ключа (см. рис. 9).

5.3. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений сопротивления в цепи стока, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_H$  и  $C_H$  в схему не включаются).

5.4. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений сопротивления и емкости нагрузки, указанных в карточке задания, и заданных значениях параметров элементов.

5.5. Снять передаточные характеристики ключа для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях напряжения питания  $U_{ип}$ , при заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

5.6. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (см. рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора указаны в карточке задания.

5.7. Определить параметры быстродействия ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$  для значений параметров элементов, указанных в карточке задания, при бесконечно большом сопротивлении нагрузки и нулевой емкости нагрузки (элементы  $R_H$  и  $C_H$  в схему не включаются).

5.8. Определить параметры быстродействия ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом  $t_{нр}$ ,  $t_{сп}$ ,  $t_{зд}$ ,  $t_{рас}$  для значений пара-

метров элементов, указанных в карточке задания, и различных значениях сопротивления и емкости нагрузки.

6. Исследовать влияние напряжения питания и нагрузки на передаточную характеристику и параметры быстродействия ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом и нелинейной нагрузкой.

6.1. Собрать электронный ключ на МДП-транзисторе с индуцированным каналом и нелинейной нагрузкой по схеме, приведенной на рис. 8,в. Установить номинальное напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ .

6.2. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики электронного ключа (см. рис. 9).

6.3. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений сопротивления и емкости нагрузки, указанных в карточке задания.

6.4. Снять передаточные характеристики ключа при различных значениях напряжения питания  $U_{\text{ип}}$  и заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

6.5. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (см. рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора указаны в карточке задания.

6.6. Определить параметры быстродействия ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом и нелинейной нагрузкой  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  для различных значений сопротивления и емкости нагрузки, указанных в карточке задания.

6.7. Определить параметры быстродействия ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  при различных значениях напряжения питания  $U_{\text{ип}}$  и заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

7. Исследовать влияние напряжения питания и нагрузки на передаточную характеристику и параметры быстродействия ключа на комплиментарной паре МДП-транзисторов с индуцированным каналом.

7.1. Собрать электронный ключ на комплиментарной паре МДП-транзисторов с индуцированным каналом по схеме, приведенной на рис. 8,г. Установить номинальное напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 10 \text{ В}$ .

7.2. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики электронного ключа (см. рис. 9).

7.3. Снять передаточные характеристики ключа для различных значений сопротивления и емкости нагрузки, указанных в карточке задания.

7.4. Снять передаточные характеристики ключа при различных значениях напряжения питания  $U_{\text{ип}}$  и заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

7.5. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия электронного ключа (см. рис. 10). Параметры импульсов на выходе импульсного генератора указаны в карточке задания.

7.6. Определить параметры быстродействия ключа на комплементарной паре МДП-транзисторов с индуцированным каналом  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  для различных значений сопротивления и емкости нагрузки, указанных в карточке задания.

7.7. Определить параметры быстродействия ключа на комплементарной паре МДП-транзисторов с индуцированным каналом  $t_{\text{нр}}$ ,  $t_{\text{сп}}$ ,  $t_{\text{зд}}$ ,  $t_{\text{рас}}$  при различных значениях напряжения питания  $U_{\text{ип}}$  и заданных сопротивлении и емкости нагрузки.

#### Содержание отчета

1. Схемы исследованных электронных ключей.
2. Структурные схемы лабораторных установок для исследования передаточных характеристик и параметров быстродействия электронных ключей.
3. Табличные и графические результаты исследования передаточных характеристик электронных ключей.
4. Параметры быстродействия исследованных электронных ключей, сведенные в таблицы.
5. Анализ полученных экспериментальных данных.

#### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы насыщенного ключа на биполярном транзисторе.
2. Что такое передаточная характеристика электронного ключа? Нарисуйте ее.
3. Что такое параметры быстродействия электронного ключа?
4. Какие схемные решения используются для повышения быстродействия электронного ключа на биполярном транзисторе?
5. Как влияют элементы схемы электронного ключа на его параметры?

#### Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.

2. Фролкин В.Т., Попов Д.И. Импульсные цифровые устройства. – М.: Радио и связь, 1992.

3. Ерофеев Ю.М. Импульсная техника: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984.

Библиотека БГУИР

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ БАЗОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

#### Цель работы

1. Изучить принцип действия и электрические схемы цифровых базовых логических элементов транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) и логики на основе комплементарных МОП-транзисторов (КМОП).

2. Экспериментально определить статические характеристики и параметры, параметры быстродействия цифровых базовых логических элементов.

#### Краткие теоретические сведения

Номенклатура микросхем ТТЛ и КМОП весьма разнообразна: от простых логических элементов до готовых функциональных узлов – счетчиков, регистров, запоминающих и арифметико-логических устройств. Элементы ТТЛ являются усовершенствованием диодно-транзисторной логики (ДТЛ), заменой диодной сборки многоэмиттерным транзистором (МЭТ). Многоэмиттерный транзистор представляет собой транзисторную структуру, имеющую до восьми эмиттеров, общую базу и общий коллектор, и непосредственно взаимодействующих друг с другом только за счет движения основных носителей.

Эмиттерные переходы МЭТ выполняют функции входных диодов в схемах ДТЛ, а коллекторный переход – роль смещающего диода. Характерной особенностью элементов ТТЛ является высокая помехоустойчивость, большое быстродействие, хорошая нагрузочная способность, малая потребляемая мощность, высокая надежность, малая стоимость.

Принципиальная электрическая схема, условное обозначение и временные диаграммы базового логического элемента ТТЛ, выполняющего операцию И-НЕ (элемент Шеффера), приведены на рис. 1.

Схема базового элемента ТТЛ состоит из двух частей. Входная часть реализует логическую функцию И с помощью VT1 и резистора R1. Выходная цепь реализует функцию НЕ и содержит сложный инвертор на транзисторах VT2...VT4. Сложный инвертор включает в свой состав простой инвертор (VT2, R2) и эмиттерный повторитель (VT3) с динамической нагрузкой (VT4), которая управляется эмиттерным током транзистора VT2. Простой инвертор в этой схеме (VT2) является фазоинверсным каскадом. Если транзистор VT2 открыт, то через него протекает большой эмиттерный ток,

который является базовым током транзистора VT4. Транзистор VT4 открывается и переходит в режим насыщения, а транзистор VT3 закрывается низким коллекторным потенциалом транзистора VT2. Выходное напряжение близко к нулю. Если транзистор VT2 закрыт, то транзистор VT3 открыт, поскольку потенциал базы транзистора VT3 близок к  $U_{ип}$ , а транзистор VT4 закрыт. Выходное напряжение имеет высокий уровень и соответствует логической единице. При запираии транзистора VT4 ток рассасывания избыточных носителей из базы транзистора VT4 протекает через резистор R3 на землю. Резистор R4 ограничивает ток выходного каскада во время перехода схемы из открытого состояния в закрытое, когда транзистор VT3 уже открылся, а транзистор VT4 находится в режиме насыщения. Диод VD обеспечивает надежное запираие транзистора VT3 при напряжении на входе схемы равном нулю.

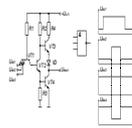


Рис. 1

Рассмотрим принцип работы схемы. Если хотя бы на один из входов подано напряжение логического нуля, то соответствующий эмиттерный переход многоэмиттерного транзистора VT1 открывается. Ток базы  $I_{б1} \approx \frac{U_{ип}}{R_1}$  транзистора VT1 потечет во входную цепь, при этом ток коллектора VT1 уменьшается, коллекторный переход открывается и транзистор VT1 насыщается по коллекторной цепи. Напряжение на базе транзистора VT2 равно сумме входного напряжения и остаточного напряжения на насыщенном транзисторе VT1:

$$U_{б2} = U_{вх}^0 + U_{ост1}.$$

Поэтому транзистор VT2 запирается, а транзистор VT3 и диод VD открываются высоким потенциалом коллектора транзистора VT2. Транзистор VT4 закрыт. Напряжение на выходе имеет высокий уровень и соответствует логической единице ("1").

Если на всех логических входах действуют высокие уровни напряжения, то эмиттерные переходы транзистора VT1 закрываются, VT1 работает в инверсном активном режиме. Ток от источника  $U_{ип}$  через R1 и открытый коллекторный переход транзистора VT1 поступает в базу транзистора VT2. Транзисторы VT2, VT4 открываются, и на выходе схемы имеется уровень

напряжения, соответствующий логическому нулю ("0"). Транзистор VT3 и диод VD закрыты.

Базовые элементы различных серий ТТЛ различаются только инверторами, которые должны улучшать переходные характеристики, повышать помехоустойчивость и нагрузочную способность.

Наибольшее распространение получили две разновидности логических схем на полевых транзисторах:

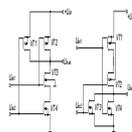
МДП-логика с нагрузочным транзистором;

логика на комплементарных транзисторах (КМОП).

Перспективными являются логические схемы, выполненные на комплементарных МОП транзисторах (КМОП-логика). Комбинируя различные включения этих транзисторов, можно получить заданную логическую функцию. Если транзистор с каналом n-типа непосредственно подключен к шине "земля", а транзистор с каналом p-типа – к источнику питания, то логическая схема работает в режиме положительной логики. На рис. 2,а и рис. 2,б представлены схемы КМОП-логики, реализующие логические операции И-НЕ и ИЛИ-НЕ.

Реализация логической функции И-НЕ получается последовательным соединением МОП-транзисторов с каналом n-типа и параллельным соединением МОП-транзисторов с каналом p-типа, которые открыты при напряжениях затворов, близких к нулю. Если на вход 1 (см. рис. 2,а) подать сигнал логического нуля, то транзистор VT3 закрыт, а транзистор VT2 открыт и выходное напряжение близко к напряжению источника питания. Если на все входы подать сигнал логической единицы, то транзисторы VT3 и VT4 открыты, а транзисторы VT1 и VT2 закрыты, и выходное напряжение стремится к потенциалу земли, т.е. на выходе схемы – логический нуль.

Для построения схемы ИЛИ-НЕ требуется последовательное включение МОП-транзисторов с каналом p-типа и параллельное включение транзисторов с каналом n-типа (положительная логика) (см. рис. 2,б). Схема работает так же, как и предыдущая. Когда на всех входах действует высокий потенциал (логическая единица), транзисторы VT3 и VT4 открываются, а p-канальные транзисторы закрываются. Выходное напряжение определяется падением напряжения на открытых транзисторах и соответствует логическому нулю. Если на один из входов подается сигнал логической единицы, то этот n-канальный транзистор открывается и выходное напряжение определяется падением напряжения на этом открытом транзисторе.



а

б

Рис. 2

Микросхемы на КМОП-транзисторах потребляют очень малую мощность при сравнительно высоком быстродействии.

Основные параметры являются общими для всех существующих и возможных логических ИМС и позволяют сравнивать между собой микросхемы различных типов.

Основными параметрами являются:

реализуемая логическая функция;

быстродействие;

коэффициент объединения по выходу (нагрузочная способность);

помехоустойчивость;

потребляемая мощность;

устойчивость против внешних воздействий;

степень интеграции, надежность.

Быстродействие ИС определяется средним временем задержки сигнала. **Среднее время задержки** определяется временем прохождения сигнала через одну микросхему в устройстве. При определении средней задержки в качестве границ временных интервалов обычно берут точки на фронтах, соответствующие половине перепада напряжения, или точки, соответствующие уровням 0,1 и 0,9 этого перепада (рис. 3).

По среднему времени задержки ИС делятся на:

сверхбыстродействующие  $t_{\text{зад ср}} < 5$  нс;

быстродействующие  $5 \text{ нс} < t_{\text{зад ср}} < 10$  нс.

среднего быстродействия  $10 \text{ нс} < t_{\text{зад ср}} < 100$  нс;

низкого быстродействия  $t_{\text{зад ср}} > 100$  нс.

**Коэффициент объединения по входу** – это максимальное число входов, которое может иметь логический элемент. С увеличением коэффициента объединения по входу расширяются логические возможности микросхемы за счет выполнения функции с большим числом элементов на одном типовом элементе. Увеличение коэффициента объединения по входу ухудшает другие параметры микросхемы: быстродействие, помехоустойчивость, нагрузочную способность. Чаще всего коэффициент объединения

по входу не превышает 8, что определяется ограниченным числом выводов ИС.

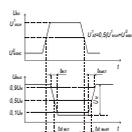


Рис. 3

**Коэффициент разветвления по выходу "n"** (нагрузочная способность) определяется числом схем этой же серии, входы которых могут быть подключены к выходу данной схемы без нарушения ее работоспособности. Чем выше "n", тем шире логические возможности микросхемы и тем меньше число микросхем необходимо для построения сложного вычислительного устройства. Однако увеличение "n", т.е. увеличение числа нагрузок, ухудшает помехоустойчивость и быстродействие.

**Помехоустойчивость  $U_{п макс}$**  – наибольшее значение напряжения на входе микросхемы, при котором еще не происходит изменения уровней выходного напряжения. Помехоустойчивость определяется работоспособностью логического элемента при наличии различных помех, действующих на входе ИМС наряду с полезным сигналом. Помехи могут возникать как в самих логических схемах, так и наводиться от посторонних устройств.

Помехи бывают статические и динамические. Под статическими понимают помехи, длительность которых значительно превышает длительность переходных процессов в логических элементах. К импульсной (динамической) помехе относятся кратковременные импульсы, длительность которых соизмерима с длительностью переходных процессов в логических элементах.

По статической помехоустойчивости логические элементы условно можно разделить на элементы:

с низкой помехоустойчивостью  $U_{п ст} = 0,2 \dots 0,4 \text{ В}$ ;

со средней помехоустойчивостью  $U_{п ст} = 0,4 \dots 0,8 \text{ В}$ ;

с высокой помехоустойчивостью  $U_{п ст} > 0,8 \text{ В}$ .

Импульсная помехоустойчивость всегда выше статической. Это вызвано тем, что при коротком импульсе помехи паразитные емкости в логическом элементе не успевают перезарядиться до пороговых уровней переключения микросхемы.

По потребляемой мощности ИМС делятся на:

мощные  $25 \leq P_{ср} \leq 250 \text{ мВт}$  (ЭСЛ-схемы);

средней мощности  $3 \leq P_{\text{ср}} \leq 25$  мВт (ТТЛ-схемы);

маломощные  $0,3 \leq P_{\text{ср}} \leq 3$  мВт;

микромощные  $1 \leq P_{\text{ср}} \leq 300$  мкВт (КМОП-схемы);

нановаттные  $P_{\text{ср}} < 1$  мкВт (интегральная инжекционная логика).

Потребляемая мощность зависит от напряжения источника питания  $U_{\text{ип}}$ . Напряжение  $U_{\text{ип}}$  должно соответствовать одному из значений стандартного ряда напряжений питания: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,3; 9,0; 12,6 В. Для цифровых микросхем на биполярных транзисторах типовые значения  $U_{\text{ип}}$  составляют 2...5 В, для схем на МДП-транзисторах 5...9 В.

Логические элементы описываются следующими статическими характеристиками:

1. Передаточная характеристика – зависимость выходного напряжения от входного  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ , подаваемого на один из входов (рис. 4). Она определяется при заданном количестве нагрузок на выходе логического элемента при подаче напряжения на один из входов, на остальные подаются уровни "1" или "0".

2. Входная характеристика – зависимость входного тока от входного напряжения  $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$  (рис. 5). Снимается для одного из входов, при заданном количестве нагрузок на выходе, на остальные входы подаются уровни логического "0" или "1" в зависимости от логической функции выполняемой элементом.

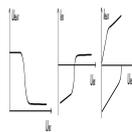


Рис. 4 Рис. 5 Рис. 6

3. Выходная характеристика – зависимость выходного тока от выходного напряжения  $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$  (рис. 6). Может быть определена: при низком выходном уровне  $U_{\text{вых}}^0$  и при высоком выходном уровне  $U_{\text{вых}}^1$ .

Методические указания по выполнению лабораторной работы

**Исследование входной характеристики** логического элемента проводится с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 7. При малых входных напряжениях входной ток вытекает из схемы, а при больших – втекает. Поэтому при исследова-

нии входной характеристики необходимо изменять полярность подключения миллиамперметра.

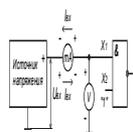


Рис. 7

Исследование выходной характеристики логического элемента проводится с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 8. Характеристика исследуется при отключенной внешней нагрузке для двух состояний элемента, которые определяются уровнем напряжений, подаваемых на его входы: "элемент выключен" и "элемент включен". Причем в состоянии "элемент выключен" выходной ток вытекает из схемы, а в состоянии "элемент включен" – втекает в схему. Поэтому при исследовании выходных характеристик для различных состояний элемента необходимо изменять полярность

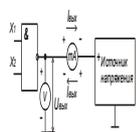


Рис. 8

подключения миллиамперметра.

Исследование передаточной характеристики логического элемента проводится с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 9.

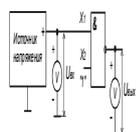


Рис. 9

Исследование передаточной характеристики логического элемента проводится с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 9.

Параметры быстродействия логического элемента измеряются с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рис. 10.



Рис. 10

На вход исследуемой микросхемы с выхода генератора импульсов подается прямоугольный

импульс. С помощью осциллографа наблюдают и зарисовывают сигнал на входе, а затем на выходе логического элемента и проводят измерение параметров быстродействия:  $t_{вкл}$ ,  $t_{выкл}$ ,  $t_{зд\ вкл}$ ,  $t_{зд\ выкл}$ . Осциллограф работает в ждущем режиме, внешний синхронизирующий сигнал снимается с синхронизирующего выхода генератора импульсов.

## Порядок выполнения работы

1. Исследовать характеристики и параметры ТТЛ-элемента 2-И-НЕ.

1.1. Задать напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 5 \text{ В}$ . Подавая на входы логического элемента уровни сигнала, эквивалентные логическим "1" и "0", составить таблицу истинности элемента.

1.2. Собрать измерительную установку для исследования входной характеристики (см. рис. 7).

1.3. Снять входную характеристику элемента  $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$  по одному из входов.

1.4. Собрать измерительную установку для исследования выходной характеристики (см. рис. 8).

1.5. Снять выходную характеристику элемента  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$ .

1.6. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики (см. рис. 9).

1.7. Снять передаточную характеристику элемента  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  по одному из входов.

1.8. По передаточной характеристике рассчитать граничные напряжения зон логической единицы и логического нуля.

1.9. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия (рис. 10).

1.10. Для заданных нагрузок зарисовать сигнал на входе и выходе логического элемента и провести измерение параметров быстродействия:

$t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{выкл}}$ ,  $t_{\text{зд вкл}}$ ,  $t_{\text{зд выкл}}$ .

2. Исследовать характеристики и параметры КМОП-элемента 2-И-НЕ.

2.1. Задать напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 5 \text{ В}$ . Подавая на входы логического элемента уровни сигнала, эквивалентные логическим "1" и "0", составить таблицу истинности элемента.

2.2. Собрать измерительную установку для исследования выходной характеристики (см. рис. 8).

2.3. Снять выходную характеристику элемента  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$ .

2.4. Собрать измерительную установку для исследования передаточной характеристики (см. рис. 9).

2.5. Снять передаточную характеристику элемента  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  по одному из входов.

2.6. По передаточной характеристике рассчитать граничные напряжения зон логической единицы и логического нуля.

2.7. Собрать измерительную установку для исследования параметров быстродействия (см. рис. 10).

2.8. Для заданных нагрузок зарисовать сигнал на входе и выходе логического элемента и провести измерение параметров быстродействия:  $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{выкл}}$ ,  $t_{\text{зд вкл}}$ ,  $t_{\text{зд выкл}}$ .

2.9. Задать напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 7 \text{ В}$ .

2.10. Для заданной нагрузки логического элемента провести измерение параметров быстродействия:  $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{выкл}}$ ,  $t_{\text{зд вкл}}$ ,  $t_{\text{зд выкл}}$ .

### Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Таблица истинности логического элемента.
3. Табличные и графические результаты исследования характеристик и параметров логических элементов.
4. Анализ полученных результатов: сравнение параметров быстродействия логических элементов ТТЛ и КМОП; сравнение параметров быстродействия логического элемента КМОП при различных напряжениях питания.

### Контрольные вопросы

1. Основные статические параметры логических элементов.
2. Динамические параметры логических элементов.
3. Статические характеристики элемента ТТЛ (ТТЛШ).
4. Передаточная характеристика КМОП-элемента.
5. Сравнить по общим эксплуатационным параметрам различные семейства логических элементов.
6. Объяснить взаимосвязь между напряжением питания КМОП-элемента и его быстродействием.
7. Конструкция многоэмиттерного транзистора.

### Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Ерофеев Ю.М. Импульсная техника: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1984.

4. Цифровые интегральные микросхемы: Справочник /  
М.И. Богданович, И.Н. Грель, В.А. Прохоренко, В.В. Шалимо. –  
Мн.: Беларусь, 1991.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12  
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ УСТРОЙСТВ НА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
МИКРОСХЕМАХ

Цель работы

1. Изучить разновидности, схемотехнические решения и логику работы триггерных устройств; их основные параметры, элементы анализа и синтеза, особенности расчета.
2. Экспериментально исследовать параметры и характеристики триггерных устройств в дискретном и интегральном исполнении.

Краткие теоретические сведения

Триггерные устройства (триггеры) – бистабильные элементы, выполняющие функцию хранения информации, представленной в двоичном коде. Соответственно триггер как элемент схемы может находиться в одном из двух устойчивых состояний. Состояние определяется не только комбинацией сигналов на входах, но и предыдущим значением сигнала на его выходе. Это позволяет выбрать необходимый закон функционирования триггера.

Наряду с законом функционирования триггерные устройства различаются и по способу записи информации – синхронные и асинхронные. Синхронные, в свою очередь, могут управляться уровнем или фронтом синхросигнала – триггеры со статическим и динамическим управлением. Быстродействие триггера определяется быстродействием используемых электронных приборов и логических элементов.

Триггеры на биполярных транзисторах

Принципиальная схема триггера на биполярных транзисторах представлена на рис. 1,а. Основной узел триггера называется бистабильной ячейкой и состоит из двух транзисторных ключей с перекрестными резистивными обратными связями. Эти обратные связи являются положительными и задают одно из двух устойчивых состояний схемы (транзистор VT1 открыт, VT2 закрыт или наоборот). При переключении триггера режимы работы транзисторов меняются на противоположные.

Режим отсечки для закрытого транзистора обеспечивается параметрами элементов схемы и напряжением питания. При этом необходимо, чтобы

$$U_{бэ\text{ отс}} = U_{см\text{ экв}} + R_{б\text{ экв}} I_{кб0} < 0, \quad (1)$$

где  $U_{бэ\text{ отс}}$  – напряжение на базе транзистора, находящегося в режиме отсечки;  $I_{кб0}$  – обратный ток коллектора,

$$U_{см\text{ экв}} = U_{см} R_{св} / (U_{см\text{ экв}} + R_{св}), \quad (2)$$

$$R_{б\text{ экв}} = R_{св} || R_{в} = R_{св} R_{в} / (R_{св} + R_{в}). \quad (3)$$

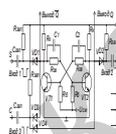
Транзистор, который находится в открытом состоянии, обычно вводят в режим насыщения, для которого справедливо неравенство

$$I_{б} > I_{бн} = I_{кн} / h_{21э}, \quad (4)$$

где  $I_{бн}$  – ток базы насыщения транзистора.

Базовый ток транзистора задается элементами схемы

$$I_{б} = U_{ип} / (R_{к} + R_{св}), \quad (5)$$



а б

Рис. 1

а ток коллектора насыщения  $I_{кн} = U_{ип} / R_{к}$ .

Степень насыщения транзистора оценивается коэффициентом насыщения  $S$ , значение которого обычно выбирается в пределах 1...3:

$$S = I_{б} / I_{бн}. \quad (6)$$

Быстродействие триггера, построенного на бистабильной ячейке, определяется быстродействием транзисторных ключей, из которых состоит триггер. Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  выполняют функцию форсирующих емкостей и служат для повышения быстродействия ключей. Величина емкости этих конденсаторов определяется соотношением

$$CR_{к} = 1,3\tau_{h21б}, \quad (7)$$

где  $\tau_{h21б} = 1/\omega_{h21б}$  – постоянная времени коэффициента передачи по току в схеме с ОБ используемого транзистора.

Предельная частота переключения бистабильной ячейки с форсирующими емкостями определяется выражением

$$f_{макс} = 2\pi f_{h21б} / (S + 6) = \omega_{h21б} / (S + 6). \quad (8)$$

Закон функционирования триггера определяется цепями запуска. Для триггера, схема которого изображена на рис. 1,а, переключение определяется схемой, подключенной к коллекторам транзисторов (запуск на коллекторе).

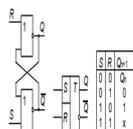
В соответствии с принятыми на схеме обозначениями триггер находится в состоянии "1", если транзистор VT2 закрыт. В этом случае падение напряжения на диоде VD2 (VD4) равно  $(U_{\text{ипп}} - U_{\text{к Т2}})$ , что намного меньше, чем на диоде VD1 (VD3) –  $(U_{\text{ипп}} - U_{\text{к Т1нас}})$ . Триггер управляется импульсами отрицательной полярности с амплитудой  $U_{\text{зап}} > |U_{\text{ипп}} - U_{\text{к Т2}}|$ , но меньшей, чем  $|U_{\text{ипп}} - U_{\text{к Т1нас}}|$ . Подача импульсов управления на вход 2 приводит к тому, что импульс через диод VD2 и конденсатор С2 уменьшит ток базы транзистора VT1 и закроет его. При этом транзистор VT2 переходит в режим насыщения, и на его коллекторе сформируется уровень "0". Аналогично, если триггер находится в состоянии "0", то подача управляющего сигнала переведет его в состояние "1".

При подаче управляющих импульсов на вход 3 триггер каждый раз будет переходить в противоположное состояние, так как этот импульс всегда попадает на базу открытого транзистора через один из диодов (VD4 или VD3). В данном случае триггер имеет возможность как отдельной установки по каждому из входов (1 или 2), так и возможность срабатывания по тактовому импульсу (вход 3). Входы 1 и 2 по общепринятым определениям называются соответственно входами R и S, а вход 3 является синхровходом (тактовым входом) и обозначается С. Рассмотренный триггер является триггером типа RST, его обозначение приведено на рис. 1,б. Существуют и другие схемы запуска – как диодные, так и транзисторные.

### Триггеры на интегральных логических элементах

Триггеры в общем случае могут быть нескольких типов. Название триггера зависит от того, какие сигналы необходимо подать на его вход, чтобы обеспечить то или иное состояние триггера. Это определяет закон функционирования триггера. Кроме рассмотренного выше RST-триггера наиболее часто используют схемы триггеров RS-, T-, D- и JK-типов.

**Асинхронный RS-триггер с прямыми входами** имеет два входа R и S и два выхода Q (прямой) и  $\bar{Q}$  (инверсный). Если  $Q=1$ , то триггер находится в состоянии логической "1". Состояние, при котором  $Q = \bar{Q}$ , называется неправильным и должно быть исключено при использовании триггера.



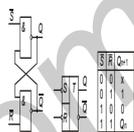
а б в

Рис. 2

Простейший RS-триггер с прямыми входами может быть построен на элементах ИЛИ-НЕ (рис. 2,а). Его условное обозначение представлено на рис. 2,б. Логика работы триггера представлена его таблицей истинности (рис. 2,в). В таблице показаны предыдущие и последующие состояния триггера. Состояние триггера не меняется, если  $S=R=0$ . Если  $S=1$ , а  $R=0$ , то независимо от исходного состояния, триггер устанавливается в единичное состояние. Поэтому вход  $S$  (set – установка) называется входом установки "1". Если  $R=1$ , а  $S=0$ , то триггер устанавливается в состояние "0". Вход  $R$  (reset – сброс) называется входом установки "0".

При  $S=R=1$  и  $Q = \bar{Q} = 0$  – триггер находится в неправильном состоянии. Такая комбинация входных сигналов должна быть исключена, поскольку после окончания их действия ( $S=R=0$ ) состояние триггера не определено вследствие его зависимости от быстродействия логических элементов. Запись информации в триггер осуществляется единичными сигналами,

поэтому триггер носит название триггера с прямыми входами.



а б в

Рис. 3

**Асинхронный RS-триггер с инверсными входами**

может быть построен на элементах И-НЕ (рис. 3,а). Его условное обозначение представлено на рис. 3,б. Логика работы триггера представлена его таблицей истинности (рис. 3,в). В таблице показаны предыдущие и последующие состояния триггера. Состояние триггера не меняется, если  $\bar{S} = \bar{R} = 1$ . Если  $\bar{S} = 0$ , а  $\bar{R} = 1$ , то независимо от исходного состояния, триггер устанавливается в единичное состояние. Если  $\bar{R} = 0$ , а  $\bar{S} = 1$ , то триггер устанавливается в состояние "0".

Запрещенное состояние триггера соответствует комбинации входных сигналов  $\bar{S} = \bar{R} = 0$ , при которой  $Q = \bar{Q} = 1$ . Запись информации в триггер осуществляется нулевыми сигналами, поэтому триггер носит название триггера с инверсными входами.

**Синхронный RS-триггер со статическим управлением** содержит дополнительный вход С – вход синхронизации. Он функционирует как обычный RS-триггер в том случае, если  $C=1$ . При  $C=0$  триггер сохраняет свое состояние, которое он принял в момент времени, предшествующий переходу сигнала С из "1" в "0". На рис. 4 показаны структура синхронного RS-триггера (а), его условное графическое обозначение (б) и таблица истинности (в). Основным достоинством синхронного режима является ис-

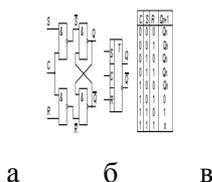


Рис. 4

ключение запрещенных состояний, когда сигнал на выходе не определен.

**Статический синхронный D-триггер.** Схема статического синхронного D-триггера, построенного на базе статического синхронного RS-триггера, приведена на рис. 5,а, его условное графическое изображение и таблица истинности показаны на рис. 5,б,в.

Как и в синхронном RS-триггере, вход С разрешает (при  $C=1$ ), либо запрещает (при  $C=0$ ) запись информации в триггер по входу D, то есть на выходе появляется информация, имеющаяся на входе D, если  $C=1$ .

**Триггер JK-типа** – логическое устройство с двумя устойчивыми положениями и двумя входами J и K, переключаемое в противоположное предыдущему состояние, если  $J=K=1$ , и функционирующее в соответствии с логикой работы RS-триггера при всех остальных комбинациях сигналов на входах. Причем вход J соответствует входу S, а вход K – входу R. Если  $J=K=1$  и  $Q=1$ , то сигнал, подаваемый на вход K, переключит триггер в нулевое (противоположное предыдущему) состояние –  $Q=0$ . Последующая за этим комбинация сигналов  $J=K=1$  опять переводит триггер в единичное состояние ( $Q=1$ ). На практике JK-триггер наиболее часто строится на основе

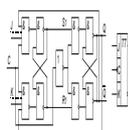
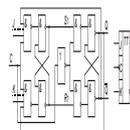


Рис.5

двухтактного триггера MS-типа (рис. 6).



а б в

Рис.6

Для нормальной работы на входы триггера с его выходов подаются сигналы, один из которых всегда блокирует соответствующий входной элемент. Незаблокированный входной сигнал переключает ведущий триггер. Ведомый триггер может переключаться только при условии  $C=0$ . Входной сигнал проходит на выход устройства с задержкой, равной длительности импульса синхронизации. За время действия синхроимпульса ведомый триггер может переключаться только один раз (либо вообще не переключаться) и не может вернуться в исходное состояние, пока состояние его выхода (блокирующий сигнал) не изменится.

JK-триггер MS-типа является универсальным триггером, на его осно-



а

б

Рис. 7

ве можно создать D- и T-триггеры (рис. 7,а,б).

#### Порядок выполнения работы

1. Исследовать симметричный триггер на биполярных транзисторах.

1.1. Для указанных в карточке задания схемы симметричного триггера, степени насыщения транзисторов  $S$ , напряжения источника питания  $U_{ип}$ , напряжения смещения  $U_{см}$  и  $h_{21Э}$  рассчитать его параметры и значения его элементов по выражениям (1)–(8).

1.2. Собрать схему триггера (см. рис. 1) в соответствии с результатами расчета. Подать на вход триггера управляющий сигнал и определить основные параметры триггера – быстродействие и минимальное выходное напряжение.

- 1.3. Построить с помощью осциллографа временные диаграммы его работы.
2. Исследовать асинхронный RS-триггер.
  - 2.1. Собрать схему асинхронного RS-триггера (см. рис. 2), указанного в карточке задания.
  - 2.2. Исследовать логику его работы согласно таблице истинности.
  - 2.3. По результатам проведенных исследований построить временные диаграммы работы RS-триггера.
3. Исследовать синхронный RS-триггер.
  - 3.1. Собрать схему синхронного RS-триггера (см. рис. 4), указанного в карточке задания.
  - 3.2. Исследовать логику его работы согласно таблицы истинности.
  - 3.3. По результатам проведенных исследований построить временные диаграммы работы синхронного RS-триггера.
4. Исследовать статический синхронный D-триггер.
  - 4.1. Собрать схему статического синхронного D-триггера (см. рис. 5), указанного в карточке задания.
  - 4.2. Исследовать логику его работы согласно таблицы истинности (на вход С триггера сигнала подается с выхода формирователя перепада напряжения).
  - 4.3. По результатам проведенных исследований построить временные диаграммы работы статического синхронного D-триггера.
5. Исследовать JK-триггер.
  - 5.1. Собрать схему JK-триггера (см. рис. 6), указанного в карточке задания.
  - 5.2. Исследовать логику его работы согласно таблицы истинности (на счетный вход триггера подайте импульсы с выхода генератора импульсов.).
  - 5.3. По результатам проведенных исследований построить временные диаграммы работы JK-триггера.

#### Содержание отчета

1. Электрические схемы, таблицы истинности и временные диаграммы исследованных устройств.
2. Расчетные выражения и результаты теоретических расчетов параметров и элементов триггера на биполярных транзисторах.

## Контрольные вопросы

1. Назовите типы триггерных устройств, исследуемых в работе, составьте их таблицы истинности.
2. Нарисуйте схемы и объясните физику работы триггеров по заданию преподавателя.
3. От каких факторов зависит быстродействие триггеров? Как рассчитать их быстродействие?
4. В каких устройствах цифровой техники применяются триггеры?

## Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Ерофеев Ю.М. Импульсная техника: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1984.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

## ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ

### Цель работы

1. Изучить характеристики и параметры, принцип действия, схемотехнику и методы улучшения параметров мультивибраторов на дискретных приборах и элементах логических интегральных схем.

2. Экспериментально исследовать влияние элементов схем на параметры мультивибраторов на дискретных приборах и элементах логических интегральных схем.

### Краткие теоретические сведения

Мультивибраторами называются импульсные устройства, которые находятся в состоянии квазиравновесия или имеют не более одного состояния устойчивого равновесия. Мультивибраторы являются генераторами релаксационного типа, в которых происходит заряд или разряд конденсаторов в цепях связи. В мультивибраторах энергия источника питания преобразуется в энергию электрических колебаний, резко несинусоидальной формы, называемых релаксационными. Мультивибраторы могут работать в трех режимах: автоколебательном, ждущем и в режиме синхронизации.

В автоколебательном режиме мультивибратором после самовозбуждения генерируется последовательность импульсов, параметры которых (амплитуда, частота повторения, длительность, скважность) определяются только параметрами элементов схемы.

В ждущем режиме – генерируются импульсы, период повторения которых определяется периодом повторения запускающего импульса, а параметры каждого импульса (амплитуда, длительность, форма) определяются только параметрами элементов схемы.

В режиме синхронизации генератор вырабатывает импульсы, частота которых равна или кратна частоте синхронизирующего сигнала. Часто такие генераторы используются в качестве делителя частоты.

Рассмотрим работу мультивибратора, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Временные диаграммы напряжений на электродах транзисторов приведены на рис. 2. Схема мультивибратора представляет собой двухкаскадный усилитель охваченный 100 %-ной положительной обратной связью. В момент времени  $t_1$  транзистор VT1 открыт, а VT2 –

закрывает. Конденсатор  $C_1$  заряжен до напряжения  $U_{\text{ип}}$  ("плюс" на левой обкладке, "минус" на правой) и поддерживает транзистор  $VT_2$  в закрытом состоянии. Конденсатор  $C_2$  разряжен. В течении каждого периода колебаний такое состояние обязательно имеет место. В схеме начнутся следующие процессы: перезаряд конденсатора  $C_1$  и заряд конденсатора  $C_2$ .

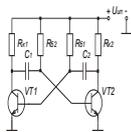


Рис. 1

Конденсатор  $C_1$  перезаряжается от источника питания  $U_{\text{ип}}$  через резистор  $R_{б2}$  и открытый транзистор  $VT_1$ . В это же время происходит заряд конденсатора  $C_2$  от источника питания  $U_{\text{ип}}$  через коллекторный резистор  $R_{к2}$  и открытый эмиттерный переход транзистора  $VT_1$ . Заряд конденсатора  $C_2$  происходит много быстрее, чем  $C_1$ , так как  $R_{к2} < R_{б2}$ . Как только напряжение на  $C_1$  превысит нулевой уровень (в момент времени  $t_3$ ), транзистор  $VT_2$  откроется. К базе транзистора  $VT_1$  с левой обкладки конденсатора  $C_2$  будет приложено напряжение  $-U_{\text{ип}}$ , которое и закрывает его. Теперь начнет перезаряжаться ранее заряженный конденсатор  $C_2$ , а конденсатор  $C_1$  с нулевым в момент переключения напряжением начнет заряжаться. В схеме устанавливаются колебания. Обычно используется симметричная схема, в которой  $R_{к1} = R_{к2} = R_{к}$ ,  $R_{б1} = R_{б2} = R_{б}$ , а  $C_1 = C_2 = C$ .

Для работы схемы необходимо выполнение условия  $R_{к} > R_{б}/h_{21Э}$ . Длительность импульса в такой схеме будет определяться  $t_{\text{и}} = R_{б}C \ln 2$ , а период в два раза больше. Существует жесткая взаимосвязь между элементами схемы и длительностью фронта импульса, которая определяется выражением  $t_{\text{ф}} = 3R_{к}C$ .

Недостатком схемы простейшего мультивибратора является завал импульсов коллекторного напряжения. Это устраняется в схеме мультивибратора, изображенной на рис. 3. После запирающего транзистора  $VT_1$  диод  $VD_1$  также запирается и отключает коллектор транзистора от конденсатора  $C_1$ . Восстановление заряда конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  происходит не через резисторы  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$ , а через сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Диоды  $VD_1$  и  $VD_2$  не влияют на работу времязадающих цепей  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$ , но препятствуют протеканию зарядного тока в процессе восстановления напряжения на конденсаторах через резисторы  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$ .

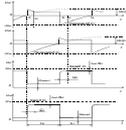


Рис. 2

Схема автоколебательного мультивибратора с использованием логических элементов И-НЕ приведена на рис. 4,а. Логические элементы D1 и D2 выполняют роль инверторов. Резисторы R1 и R2 и конденсаторы C1 и C2 выполняют роль времязадающих цепей мультивибратора. Диоды VD1, VD2, шунтирующие резисторы, защищают входы схемы от больших выбросов напряжений, возникающих на резисторах при разряде конденсаторов через насыщенные выходные транзисторы

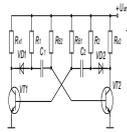


Рис. 3

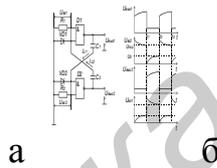


Рис. 4

элементов D1 и D2.

Мультивибратор работает следующим образом. Предположим, что на промежутке времени  $0 \leq t \leq t_1$  логический элемент D1 закрыт, а D2 – открыт. На выходе D1 действует высокий уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^1$ , которым заряжается конденсатор C1 по цепи: выход D1, C1, R2, корпус. На резисторе R2 создается падение напряжения, которое во времени уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 4,б) и, поступая на вход элемента D2, удерживает его в открытом состоянии. Постоянная времени заряда конденсатора C1 равна  $t_3 = C1R2$ . За время заряда конденсатора C1 идет разряд конденсатора C2 по цепи: нижняя обкладка конденсатора C2, насыщенный транзистор инвертора элемента D2, корпус, диод VD1, верхняя обкладка конденсатора C2. Время разряда конденсатора C2 определяется выражением

$$t_{\text{раз}} = 3C2(r_{\text{прVD1}} + R_{\text{выхD2}}).$$

Как только напряжение на входе элемента D2 станет меньше порогового  $U_{\text{пор}}$ , он начинает закрываться. Увеличение напряжения  $U_{\text{вых2}}$  через

конденсатор  $C_2$  передается на вход элемента  $D_1$ , который начинает открываться. Уменьшение  $U_{\text{ВЫХ}1}$  через конденсатор  $C_1$  передается на вход элемента  $D_2$ , схема начинает переходить во второе квазиравновесное состояние. После этого конденсатор  $C_2$  начинает заряжаться, а  $C_1$  – разряжаться.

Длительность импульса и паузы определяется по формулам:

$$t_{и1} = C_1 R_2 \ln \frac{U_{\text{ВЫХ}}^1 - U_{\text{VD0}}}{U_{\text{пор}}};$$

$$t_{и2} = C_2 R_1 \ln \frac{U_{\text{ВЫХ}}^1 - U_{\text{VD0}}}{U_{\text{пор}}}.$$

Жесткий режим возбуждения колебаний в симметричном мультивибраторе может привести к срыву автоколебаний в результате одновременного насыщения или запираания транзисторов в инверторах, обоих элементов  $D_1$  и  $D_2$ .

Для вывода из этого состояния на входы элементов  $D_1$  и  $D_2$  необходимо подать положительное напряжение смещения, когда элементы закрыты, и снять напряжение, когда элементы  $D_1$  и  $D_2$  открыты.

Рассмотренные схемы мультивибраторов имеют относительно низкую стабильность частоты, что объясняется зависимостью их параметров от температуры окружающей среды и напряжения источника питания. Для повышения стабильности колебаний в цепь обратной связи мультивибратора вводится элемент, времязадающие параметры которого мало зависят от возмущающих факторов. Эту роль выполняет линия задержки или кварцевый резонатор. На рис. 5 представлена принципиальная схема мультивибратора на логических элементах с кварцевым резонатором.

Кварцевый резонатор является высокочастотным резонатором (фильтром), частотные свойства которого определяются геометрическими размерами. Под воздействием внешнего напряжения в кварцевой пластине возникают механические колебания, частота которых определяется геометрическими размерами пластин. Практически период автоколебаний мультивибратора не зависит от параметров логических элементов и определяется только параметрами кварца:

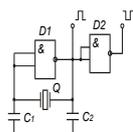


Рис. 5

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{L_{\text{КВ}} C_{\text{КВ}}}},$$

где  $L_{\text{КВ}}$  и  $C_{\text{КВ}}$  – эквивалентные индуктивность и емкость кварца.

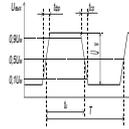


Рис. 6

Добротность идеального резонатора стремится к бесконечности и форма колебаний должна быть синусоидальной. Однако реальная добротность кварцевого резонатора имеет конечное значение, поэтому форма колебаний в мультивибраторе существенно отличается от синусоидальной.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Поскольку мультивибратор представляет собой генератор прямоугольных импульсов, то его параметры это параметры вырабатываемой им последовательности импульсов. Основными параметрами импульсного сигнала являются (рис. 6):

**амплитуда импульса**  $U_M$  – это максимальное изменение мгновенного напряжения;

**длительность фронта импульса**  $t_{фр}$  – это интервал времени, в течение которого выходное напряжение нарастает от  $0,1U_M$  до  $0,9U_M$ ;

**длительность среза импульса**  $t_{ср}$  – это интервал времени, в течение которого выходное напряжение убывает от  $0,9U_M$  до  $0,1U_M$ ;

**длительность импульса**  $t_{и}$  – это интервал времени от момента появления импульса до его окончания, измеренный по уровню  $0,5U_M$ ;

**период следования**  $T$  – промежуток времени, через который повторяется импульс;

**скважность** –  $Q = T/t_{и}$  или **коэффициент заполнения**  $K_з = t_{и}/T$ .

Измерение параметров импульсов производится с помощью двухлучевого осциллографа или однолучевого в режиме синхронизации от одного из выводов мультивибратора. Перед измерениями параметров импульсов убедитесь, что ручки плавного изменения длительности развертки и усиления по вертикали находятся в крайнем правом положении. После этого можно использовать масштабную сетку, нанесенную на экран осциллографа. Масштаб изображения по вертикали определяется положением переключателя усиления по вертикали, и по горизонтали – переключателем скорости развертки.

## Порядок выполнения работы

1. Исследовать влияние элементов схемы на параметры мультивибратора на биполярных транзисторах.

1.1. Согласно варианту карточки задания собрать схему мультивибратора, изображенного на рис. 1. Подать напряжение питания 10 В, подключить осциллограф к выходу мультивибратора и получить изображение импульсов.

1.2. Измерить амплитуду выходных импульсов  $U_M$ , их длительности  $t_{и1}$  и  $t_{и2}$ , период повторения  $T$ , длительности фронтов  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$ . Данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Тип схемы, значения элементов схемы	$U_M$ , В	$t_{и1}$ , мкс	$t_{и2}$ , мкс	$T$ , мкс	$t_{фр1}$ , мкс	$t_{фр2}$ , мкс

1.3. Зарисовать форму напряжений на коллекторах и базах транзисторов. Полученные осциллограммы необходимо совместить во времени, т.е. графики должны располагаться друг под другом и начинаться в один и тот же момент времени.

1.4. Увеличить напряжение питания до 12 В.

1.5. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$ ,  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$  и занести данные в табл. 1.

1.6. Установить напряжение питания 10 В. Согласно варианту карточки задания изменить сопротивление резистора  $R_{к1}$ .

1.7. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$ ,  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$  и занести данные в табл. 1.

1.8. Установить прежнее значение сопротивления резистора  $R_{к1}$  и согласно варианту карточки задания изменить сопротивление резистора  $R_{б1}$ .

1.9. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$ ,  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$  и занести данные в табл. 1.

1.10. Установить прежнее значение сопротивления резистора  $R_{б1}$  и согласно варианту карточки задания изменить емкость конденсатора  $C1$ .

1.11. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$ ,  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$  и занести данные в табл. 1.

2. Исследовать влияние элементов схемы на параметры мультивибратора на биполярных транзисторах с зарядными диодами.

2.1. Согласно варианту карточки задания собрать схему мультивибратора, изображенного на рис. 3. Подать напряжение питания 10 В, подключить осциллограф к выходу мультивибратора и получить изображение импульсов.

2.2. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$ ,  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$  и занести данные в табл. 1.

2.3. Увеличить напряжение питания до 12 В.

2.4. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$ ,  $t_{фр1}$ ,  $t_{фр2}$  и занести данные в табл. 1.

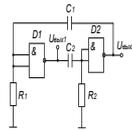


Рис. 7

3. Исследовать влияние элементов схемы на параметры мультивибратора на логических элементах (рис. 7).

3.1. Согласно варианту карточки задания собрать схему мультивибратора, изображенного на рис. 7. Подать напряжение питания 5 В, подключить осциллограф к выходу мультивибратора и получить изображение импульсов.

3.2. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

Таблица 2

Тип схемы, значения элементов схемы	$U_M$ , В	$t_{и1}$ , мкс	$t_{и2}$ , мкс	$T$ , мкс

3.3. Зарисовать форму напряжений на выходах схемы. Полученные осциллограммы необходимо совместить во времени, т.е. графики должны располагаться друг под другом и начинаться в один и тот же момент времени.

3.4. Уменьшить напряжение питания до 4 В.

3.5. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

3.6. Установить напряжение питания 5 В. Согласно карточки задания изменить сопротивление резистора  $R1$ .

3.7. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

3.8. Установить прежнее значение сопротивления резистора  $R1$  и согласно карточки задания изменить емкость конденсатора  $C1$ .

3.9. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

4. Исследовать влияние элементов схемы на параметры мультивибратора на логических элементах (рис. 8).

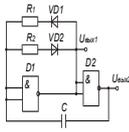


Рис. 8

4.1. Согласно варианту карточки задания собрать схему мультивибратора, изображенного на рис. 8. Подать напряжение питания 5 В, подключить осциллограф к выходу мультивибратора и получить изображение импульсов.

4.2. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

4.3. Зарисовать форму напряжений на выходах схемы. Полученные осциллограммы необходимо совместить во времени, т.е. графики должны располагаться друг под другом и начинаться в один и тот же момент времени.

4.4. Уменьшить напряжение питания до 4 В.

4.5. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

4.6. Установить напряжение питания 5 В. Согласно варианту карточки задания изменить сопротивление резистора R1.

4.7. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

4.8. Установить прежнее значение сопротивления резистора R1 и согласно варианту карточки задания изменить сопротивление резистора R2.

4.9. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

5. Исследовать влияние элементов схемы на параметры стабилизированного мультивибратора на логических элементах.

5.1. Согласно варианту карточки задания собрать схему мультивибратора, изображенного на рис. 5. Подать напряжение питания 5 В, подключить осциллограф к выходу мультивибратора и получить изображение импульсов.

5.2. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

5.3. Зарисовать форму напряжений на выходах схемы. Полученные осциллограммы необходимо совместить во времени, т.е. графики должны располагаться друг под другом и начинаться в один и тот же момент времени.

5.4. Уменьшить напряжение питания до 4 В.

5.5. Измерить параметры импульсов:  $U_M$ ,  $t_{и1}$ ,  $t_{и2}$ ,  $T$  и занести данные в табл. 2.

### Содержание отчета

1. Схемы исследованных мультивибраторов.
2. Параметры исследованных мультивибраторов, сведенные в таблицы.
3. Временные диаграммы напряжений на выходах мультивибраторов.
4. Анализ полученных экспериментальных данных.

## Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы мультивибратора на биполярных транзисторах.
2. Объясните особенности работы мультивибратора на логических элементах.
3. Объясните временные диаграммы напряжений в мультивибраторе.
4. Как влияют элементы схемы мультивибраторов на его параметры?
5. Какие схемные решения используются для улучшения характеристик мультивибраторов?

## Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Ерофеев Ю.М. Импульсная техника: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1984.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания . . . . .	3
Лабораторная работа № 5. Исследование одиночных усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах . . . . .	4
Лабораторная работа № 6. Исследование эмиттерного и истокового повторителей . . . . .	19
Лабораторная работа № 7. Исследование многокаскадных усилителей с обратными связями . . . . .	30
Лабораторная работа № 8. Исследование оконечных (выходных) усилительных каскадов . . . . .	45
Лабораторная работа № 9. Исследование операционных усилителей . . . . .	58
Лабораторная работа № 10. Исследование электронных ключей . . . . .	68
Лабораторная работа № 11. Исследование цифровых базовых логических элементов . . . . .	82
Лабораторная работа № 12. Исследование триггерных устройств на полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах . . . . .	92
Лабораторная работа № 13. Исследование мультивибраторов . . . . .	100

Авторы: Бельский Алексей Якимович,  
Березовский Валентин Константинович,  
Валенко Валентин Стефанович,  
Дробот Сергей Викторович,  
Дунаева Галина Павловна,  
Мельников Владимир Александрович,  
Путилин Владимир Николаевич,  
Русакович Владимир Николаевич,  
Ткаченко Федор Алексеевич,  
Хандогин Михаил Степанович

Лабораторный практикум  
по курсу  
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ  
для студентов всех специальностей БГУИР  
В 2-х частях

Часть 2  
Аналоговые и импульсные устройства

Редактор Е.Н. Батурчик

---

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16

Бумага

Печать офсетная

Усл.–печ.л.

Уч.–изд.л.

Тираж 600 экз.

Заказ

---

Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники

Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП № 156. 220027, Минск, П.Бровки, 6