

В. А. КАНДАЕВ, К. В. АВДЕЕВА, Н. Н. БАЖЕНОВ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОНИКА»**

ЧАСТЬ 2

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР И УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

ОМСК 2014

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. Н. Баженов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОНИКА»

Часть 2

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР И УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Утверждено редакционно-издательским советом университета

Омск 2014

УДК 621.37:621.38:621.39(075.8)
ББК 39.217я73
К19

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электроника». Часть 2. Биполярный транзистор и усилитель низкой частоты / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. Н. Баженов; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 36 с.

Представлено описание трех лабораторных работ по исследованию биполярного транзистора, в которых описаны его входные и выходные характеристики, рассмотрено построение усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе, приведены порядок расчета параметров и элементов усилителя низкой частоты и проверки его в среде Electronics Workbench 5.0, краткие сведения из теории биполярного транзистора, усилительных каскадов и краткое описание программы Electronics Workbench 5.0.

Предназначены для студентов 2-го курса специализаций «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта», «Радиотехнические системы на железнодорожном транспорте» специальности «Системы обеспечения движения поездов» Института автоматики, телекоммуникаций и информационных технологий очной и заочной форм обучения.

Библиогр.: 5 назв. Табл. 7. Рис. 15.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент Ю. М. Елизарова;
канд. техн. наук, доцент С. Н. Чижма.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Лабораторная работа 1. Биполярный транзистор	6
1.1. Краткие сведения из теории	6
1.2. Схема исследования транзистора	15
1.3. Задания к лабораторной работе.....	15
1.4. Содержание отчета	18
1.5. Контрольные вопросы.....	18
Лабораторная работа 2. Усилитель низкой частоты на транзисторе.....	18
2.1. Краткие сведения из теории	18
2.2. Схема рассчитываемого усилителя	22
2.3. Задание к лабораторной работе.....	23
2.4. Содержание отчета	30
2.5. Контрольные вопросы.....	30
Лабораторная работа 3. Электронная лаборатория для проверки параметров и характеристик усилительного каскада в программе «Electronics Workbench 5.0».....	30
3.1. Краткие сведения об электронной лаборатории	30
3.2. Сведения об усилителе.....	32
3.3. Порядок выполнения лабораторной работы.....	33
3.4. Содержание отчета	35
Библиографический список.....	35

ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение электроники требует от современного специалиста прочных теоретических и практических знаний и умения применять эти знания для решения практических задач, стоящих перед железнодорожным транспортом.

В данных методических указаниях рассматриваются работа и принцип действия биполярного транзистора, который используется во многих схемах автоматики, телемеханики и связи, приводится методика расчета усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе.

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом, по которому экспериментальные исследования проводятся после изложения теоретического материала по изучаемой теме на лекционных занятиях.

Студент допускается к выполнению очередной лабораторной работы после предъявления преподавателю подготовленного отчета о предыдущей лабораторной работе, в котором должны быть представлены все материалы исследований и их анализ.

После настройки схемы и проверки соответствия ее выходных сигналов расчетным данным студент получает разрешение у преподавателя на проведение измерений, выполняет намеченные исследования, результаты которых предъявляет преподавателю, разбирает схему и приводит рабочее место в порядок.

Отчеты по лабораторным работам следует оформлять в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП ОмГУПС-1.2-2005.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Цель работы: ознакомиться с физическими основами работы биполярного транзистора, исследовать его характеристики и изучить статические параметры.

1.1. Краткие сведения из теории

Биполярным транзистором (БТ) называется полупроводниковый прибор с одним или несколькими электронно-дырочными переходами, имеющий три вывода или более. Термин «транзистор» происходит от сочетания английских слов «transfer resistor», что означает «преобразуемое, управляемое сопротивление». Термин «биполярный» определяет то, что работа прибора обеспечивается носителями электрических зарядов двух видов – электронами и дырками. БТ (рис. 1.1) содержит три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости (n-p-n и p-n-p). Эти области разделены между собой двумя взаимодействующими p-n-переходами – эмиттерным и коллекторным.

Средняя часть кристалла БТ предназначена для образования электронно-дырочных переходов и называется базой (основанием), его левая область p (n), инжектирующая (эмиттирующая) носители заряда, – эмиттером, а область n (p), собирающая инжектированные носители заряда, – коллектором.

Взаимодействие между p-n-переходами обеспечивается незначительной толщиной базы, много меньшей диффузионной длины неосновных носителей в базе. Направление тока транзистора из эмиттера (Э) сквозь базу (Б) в коллектор (К) определяется значительно большей концентрацией примесей в Э по сравнению с другими областями транзистора.

В зависимости от полярности напряжения на электродах БТ выделяют четыре основных режима работы:

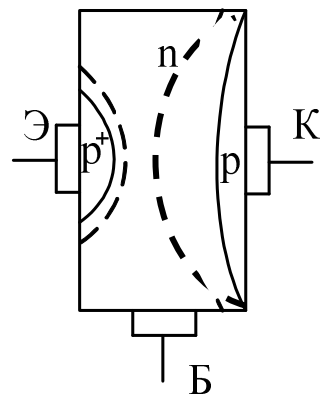


Рис. 1.1. Схема биполярного транзистора

1) активный (усилительный), когда эмиттерный переход открыт, а коллекторный закрыт;

2) насыщения, когда оба р-п-перехода открыты;

3) отсечки, когда оба перехода закрыты;

4) инверсный, когда эмиттерный переход закрыт, а коллекторный открыт.

Режимы 2 и 3 работы БТ используются совместно и называются ключевыми.

Транзистор – это трехполюсный элемент, но на практике обычно рассматривается как четырехполюсник. При этом один из выводов (Б, Э, К) транзистора является общим по переменному току для цепей входа и выхода. Следовательно, различают три основные схемы включения транзистора прямой (обратной) проводимости: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК) (рис. 1.2). При динамическом режиме в коллектор или эмиттер транзистора включено сопротивление (рис. 1.2, г, д, е).

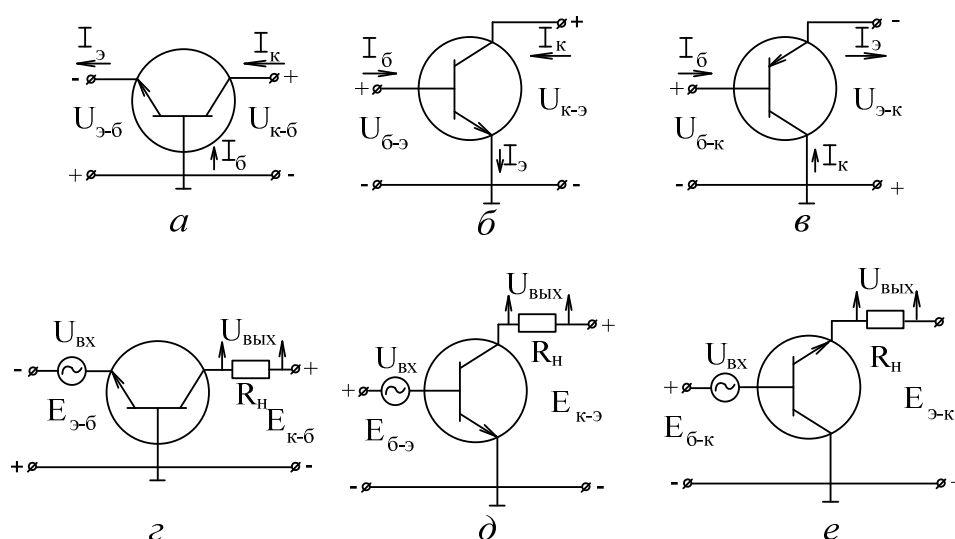


Рис. 1.2. Схемы включения БТ:
в статическом режиме с ОБ (а), ОЭ (б), ОК (в);
в динамическом режиме с ОБ (г), ОЭ (д), ОК (е)

Транзисторы типа n-p-n более распространены в сравнении с транзисторами типа p-n-p, так как основную роль в электрических процессах в транзисторах типа n-p-n играют электроны, подвижность которых в несколько раз больше подвижности дырок. Характеристики и схемы включения БТ обратной проводимости типа n-p-n аналогичны характеристикам и схемам БТ типа p-n-p, но при этом в схемах БТ типа n-p-n изменяется полярность включения источников питания. В приведенных схемах (см. рис. 1.2) входные и выходные токи и напряжения различны, поэтому значительно меняются характеристики и параметры транзистора.

Физические процессы, происходящие в БТ, а следовательно, и принцип его действия, не зависят от схемы включения. В активной области работы БТ к эмиттерному переходу приложено незначительное (0,1 – 1 В) прямое напряжение, а к коллекторному переходу – относительно большое (10 – 30 В) обратное (запирающее) напряжение. Для нормальной работы БТ база должна быть узкой (1 – 10 мкм), а концентрация примесей в Э на один – два порядка выше, чем в других областях. Для любой схемы включения сохраняется соотношение между токами БТ:

$$I_3 = I_6 + I_k. \quad (1.1)$$

Эмиттерный и коллекторный переходы несимметричны и имеют большую толщину в области базы.

Энергетические диаграммы БТ изображены на рис. 1.3. При отсутствии внешнего напряжения в области эмиттерного и коллекторного переходов возникают потенциальные барьеры такой величины, при которой дрейфовые и диффузионные составляющие токов уравниваются. Если сместить эмиттерный переход в прямом направлении, коллекторный – в обратном (рис. 1.3, б), то за счет понижения потенциального барьера эмиттерного перехода возникает инжекция дырок из Э в Б. Инжекцией электронов в обратном направлении пренебрегают, так как концентрация акцепторов в области Э намного больше, чем в базовой области доноров.

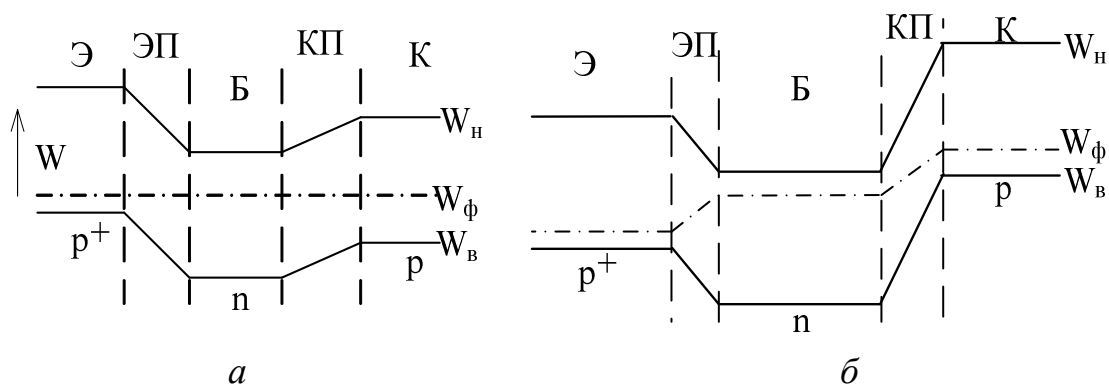


Рис. 1.3. Энергетическая диаграмма БТ:

а – при отсутствии внешнего напряжения; *б* – в активном режиме работы

Инжектированные в Б дырки в результате диффузии перемещаются к коллекторному переходу, и если ширина Б намного меньше средней длины свободного пробега дырок, то почти все они дойдут до коллекторного перехода

и полем запирающего слоя будут переброшены в р-область К, создавая ток I_K . Так как коллекторный переход смещен в обратном направлении, то последовательно с ним можно включить высокоомное сопротивление нагрузки без существенного изменения коллекторного тока. Незначительные изменения $U_{э-б}$ (десятичные доли вольта) могут вызвать относительно большие изменения напряжения на нагрузке (единицы – десятки вольт), т. е. в схеме с ОБ произойдет усиление по напряжению и мощности, так как соблюдается условие $I_э \approx I_K$.

К основным характеристикам, которые дают представление о свойствах БТ, относятся статические характеристики, отражающие зависимость между током и напряжением во входных и выходных цепях.

Статические характеристики используются при расчете транзисторных схем, по ним определяют параметры БТ при работе в различных режимах. Все токи в транзисторе находятся в зависимости друг от друга. Статические характеристики определяются не только свойствами транзистора, но и схемой включения.

Основными для БТ являются входные и выходные характеристики. Семейства входных и выходных характеристик для схем с ОБ и ОЭ изображены на рис. 1.4 и 1.5 соответственно.

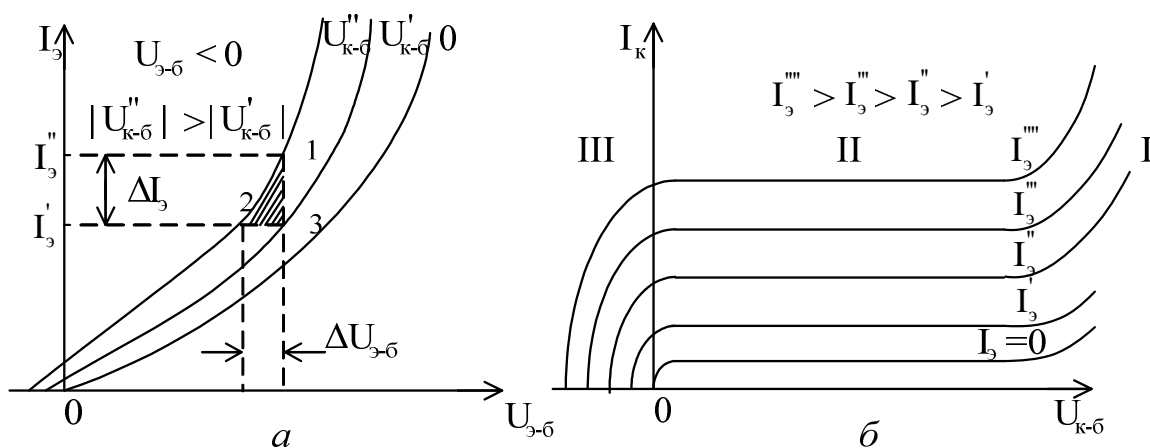


Рис.1.4. Статические характеристики БТ в схеме включения с ОБ:
а – входные (эмиттерные) характеристики; б – выходные

Из трех существующих схем включения БТ наибольшее распространение получили схемы с ОЭ и ОБ, поэтому ограничимся рассмотрением входных и выходных характеристик этих схем.

Входные (эмиттерные) характеристики представляют собой зависимость $I_3 = f(U_{3-6})$ при $U_{к-6} = \text{const}$ (рис. 1.4, а). При $U_{к-6} = 0$ входная характеристика аналогична вольт-амперной характеристике диода, так как коллекторный переход закорочен и не оказывает влияния на ток эмиттера, поэтому работает только один переход, к которому приложено прямое напряжение U_{3-6} . При увеличении напряжения снижается энергетический барьер в эмиттерном переходе и усиливается инжекция неосновных носителей через переход, способствуя увеличению тока I_3 . Если еще увеличивать отрицательное напряжение $U_{к-6}$ (например, до 20 В), то толщина коллекторного перехода расширяется, а толщина базы уменьшается, это способствует возрастанию тока I_3 , и в результате характеристика перемещается вверх.

Таким образом, в активном режиме ($U_{3-6} > 0$; $U_{к-6} < 0$ – для п-р-п-транзистора) сдвиг характеристик при изменении напряжения на коллекторе обусловлен эффектом модуляции ширины базы: с увеличением напряжения $U_{к-6}$ при постоянном токе I_3 прямое напряжение эмиттерного перехода уменьшается и характеристика сдвигается вверх и влево.

Выходная характеристика (рис. 1.4, б) представляет собой зависимость $I_к = f(U_{к-6})$ при $I_3 = \text{const}$. При $I_3 = 0$ выходная характеристика подобна вольт-амперной характеристике (ВАХ) одиночного р-п-перехода, смещенного в обратном направлении. При отключенном эмиттере ток $I_к$ называется обратным током коллекторного перехода ($I_{к0}$). В области характеристик, где $I_3 > 0$ и $U_{к-6} < 0$, значение тока коллектора можно определить по уравнению: $I_к = \alpha I_3 + I_{к0}$, где α – коэффициент передачи эмиттерного тока, $\alpha = I_к / I_{к0}$.

При увеличении отрицательного напряжения на К ширина Б уменьшается, следовательно, уменьшается вероятность рекомбинации дырок на пути от Э к К, это приводит к некоторому увеличению тока $I_к$ (при $I_3 = \text{const}$). На семействе выходных характеристик область I называется областью отсечки, в ней оба перехода транзистора смещены в обратном направлении. Область II является активной, в ней эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Область III называют областью насыщения (оба перехода смещены в прямом направлении).

Входные характеристики в схеме с ОЭ строятся исходя из зависимости между I_6 и U_{6-3} , т. е. $I_6 = f(U_{6-3})$ при $U_{к-3} = \text{const}$ (рис. 1.5, а). Эта характеристика при $U_{к-3} = 0$ проходит через начало координат и отличается от ВАХ одиночного р-п-перехода масштабом оси токов, так как I_6 меньше I_3 . При увеличении отрицательного напряжения на К и при уменьшении ширины базы

убывает общее число дырок, находящихся в Б (при $U_{б-э} = \text{const}$). Следовательно, число рекомбинаций электронов и дырок в Б также уменьшается. Так как электроны для рекомбинации проходят через базовый вывод, ток Б уменьшается и характеристики смещаются вправо.

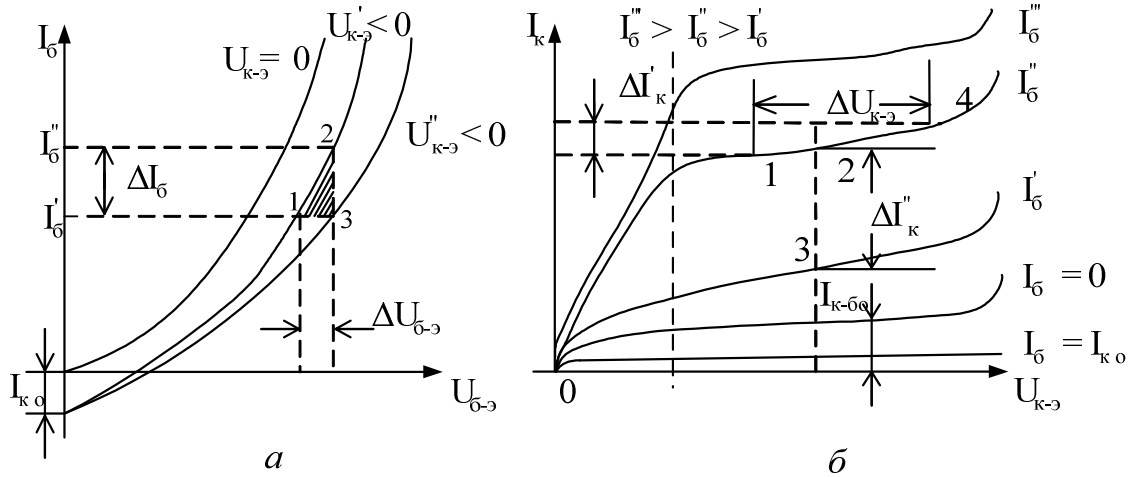


Рис. 1.5. Статические характеристики БТ типа n-p-n в схеме включения с ОЭ:
а – входные; б – выходные

При $U_{б-э}$, равном нулю, и отрицательном напряжении на К ток $I_э$ равен нулю, а ток $I_{к0}$, проходящий через коллекторный переход, обусловлен потоком неосновных носителей и равен току $I_б$ (при этом ток $I_б$ направлен в Б транзистора).

Выходные характеристики БТ для схемы с ОЭ представляют зависимость $I_к = f(U_{к-э})$ при $I_б = \text{const}$ (рис. 1.5, б). Сравнивая выходные характеристики БТ с аналогичными в схеме включения с ОБ, можно отметить два существенных различия.

1) Характеристики в схеме с ОЭ имеют большую зависимость от напряжения $U_{к-э}$.

Коллекторный ток в схеме с ОЭ определяется по формуле:

$$I_к = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_б + \frac{1}{1-\alpha} I_{к0} = \beta I_б + (1+\beta) I_{к0} = \beta I_б + I_{к-б0}, \quad (1.2)$$

где β – коэффициент передачи тока Б в схеме с ОЭ,

$$\beta = \frac{I_к}{I_б} = \frac{\alpha}{1-\alpha}. \quad (1.3)$$

При увеличении отрицательного напряжения $U_{к-э}$ коэффициент передачи тока эмиттера α увеличивается (из-за уменьшения ширины базы). Как видно из формулы (1.2), коэффициент передачи тока базы β в схеме с ОЭ увеличивается быстрее, поэтому при постоянном токе базы ток коллектора увеличивается сильнее, чем в схеме с ОБ.

2) Переход в режим насыщения для схемы с ОЭ (область III) происходит при отрицательном напряжении на коллекторе.

Насыщение транзистора, критерием которого является незначительное напряжение на коллекторном переходе, наступает тогда, когда напряжение $U_{к-э}$ становится равным напряжению $U_{б-э}$ (при этом $U_{к-б} = 0$). Так как $U_{б-э}$ отрицательное, то насыщение наступает и при отрицательном значении $U_{к-э}$.

Биполярный транзистор можно рассматривать как четырехполюсник (рис. 1.6), связь между токами и напряжениями в котором представляется двумя нелинейными функциями. В качестве независимых переменных в них можно выбрать любые две из четырех величин (I_1 , I_2 , U_1 , U_2). Для многих электронных схем, называемых линейными, токи и напряжения складываются из сравнительно больших постоянных составляющих (I_{\pm} ; U_{\pm}) и малых переменных составляющих, которые можно рассматривать как малые приращения (ΔI , ΔU). Переменные составляющие представляют в этих схемах основной интерес. Типичным примером таких схем являются усилители.

В пределах малых изменений напряжения и тока статические характеристики БТ близки к линейным, поэтому функциональные зависимости переменных составляющих также будут линейными. В такой области транзистор может быть использован в режиме линейного

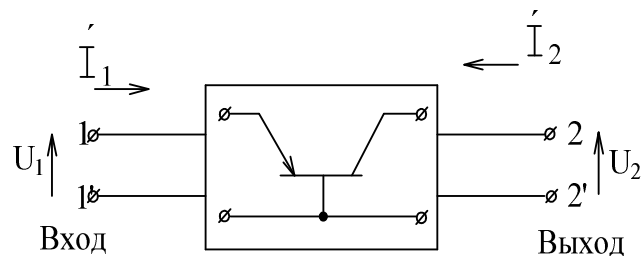


Рис. 1.6. Включение БТ в качестве четырехполюсника

усиления сигналов. Для оценки свойств БТ в этом случае используются характеристические (малосигнальные) параметры – величины, показывающие зависимость между незначительными изменениями тока и напряжения в БТ. Наибольшее распространение получила система h -параметров, в которой в качестве независимых переменных выбираются входной ток I_1 и выходное напряжение U_2 . Тогда функциональные зависимости имеют вид:

$$U_1 = f_1(I_1, U_2); \quad (1.4)$$

$$I_2 = f_2(I_1, U_2). \quad (1.5)$$

Для незначительных приращений тока и напряжения получим уравнения:

$$\Delta U_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \Delta U_2; \quad (1.6)$$

$$\Delta I_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \Delta U_2. \quad (1.7)$$

Пусть приращения ΔI_1 и ΔU_2 представляют собой незначительные гармонические колебания с комплексными амплитудами \dot{I}_1 и \dot{U}_2 , приращения зависимых переменных являются также гармоническими колебаниями с комплексными амплитудами \dot{U}_1 , \dot{I}_2 . В этом случае частные производные перед независимыми переменными в уравнениях (1.6) и (1.7) обозначают символами h'_{11} , h'_{12} , h'_{21} , h'_{22} , а уравнения четырехполосника записывают в виде:

$$\dot{U}_1 = h'_{11} \dot{I}_1 + h'_{12} \dot{U}_2; \quad (1.8)$$

$$\dot{I}_2 = h'_{21} \dot{I}_1 + h'_{22} \dot{U}_2. \quad (1.9)$$

Отсюда вытекает смысл h-параметров, являющихся комплексными величинами: $h'_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1$ при $\dot{U}_2 = 0$ – входное сопротивление при коротком замыкании на выходе для переменной составляющей тока (т. е. при $U_2 = U_{2\text{ср}} = \text{const}$); $h'_{12} = \dot{U}_1 / \dot{U}_2$ при $\dot{I}_1 = 0$ – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом входе для переменной составляющей (т. е. при $\dot{I}_1 = \dot{I}_{1\text{ср}} = \text{const}$); $h'_{21} = \dot{I}_2 / \dot{I}_1$ при $\dot{U}_2 = 0$ – коэффициент передачи тока при коротком замыкании выхода по переменному току (т. е. при $\dot{U}_2 = \text{const}$); $h'_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2$ при $\dot{I}_1 = 0$ – выходная проводимость при разомкнутом входе для переменной составляющей (т. е. при $\dot{I}_1 = \text{const}$).

Значения h-параметров зависят от постоянных составляющих входного тока \dot{I}_1 и выходного напряжения U_2 , от частоты и схемы включения, что отмечается третьим индексом Э, Б, К для схем с ОЭ, ОБ, ОК соответственно.

На низких частотах, когда емкостные составляющие токов пренебрежимо малы, h-параметры являются действительными величинами и представляют собой дифференциальные параметры, которые можно легко определить по статическим характеристикам следующим образом.

Для схемы с ОБ по входному семейству характеристик (см. рис.1.4, а)

определяются параметры h_{116} и h_{126} . Например, для точек 1 и 2 на графике $h_{116} = \Delta U_{3-6} / \Delta I_3$ при $U_{к-6} = \text{const}$, а для точек 2 и 3 $h_{126} = \Delta U_{3-6} / (U_{к-6}' - U_{к-6}'')$ при $I_3 = \text{const}$.

По выходным характеристикам (см. рис. 1.4, б) определяются параметры h_{216} и h_{226} :

для точек 2 и 3 –

$$h_{216} = \frac{\Delta I_{к'}}{I_3'' - I_3'} \quad \text{при } U_{к-6}' = \text{const}; \quad (1.10)$$

для точек 1 и 2 –

$$h_{226} = \frac{\Delta I_{к''}}{\Delta U_{к-6}} \quad \text{при } I_3' = \text{const}. \quad (1.11)$$

Для схемы с ОЭ параметры определяются аналогично по входным характеристикам (см. рис. 1.5, а):

для точек 1 и 2 –

$$h_{113} = \frac{\Delta U_{6-3}}{\Delta I_6} \quad \text{при } U_{к-3}' = \text{const}; \quad (1.12)$$

для точек 1 и 3 –

$$h_{123} = \frac{\Delta U_{6-3}}{U_{к-3}'' - U_{к-3}'} \quad \text{при } I_6' = \text{const}. \quad (1.13)$$

По выходным характеристикам (см. рис. 1.5, б):

для точек 2 и 3 –

$$h_{213} = \frac{\Delta I_{к''}}{I_6'' - I_6'} \quad \text{при } U_{к-3}' = \text{const}; \quad (1.14)$$

для точек 1 и 4 –

$$h_{223} = \frac{\Delta I_{к'}}{\Delta U_{к-3}} \quad \text{при } I_6'' = \text{const}. \quad (1.15)$$

Точность вычисления параметров h_{216} и h_{226} по выходным характеристикам БТ в схеме включения с ОБ низка, так как сопротивление коллекторного перехода большое и характеристики идут полого (см. рис. 1.5, б). В этом случае h -параметры БТ для схемы с ОБ определяют, пользуясь формулами пересчета:

$$h_{116} = \frac{h_{113}}{1 + h_{213}}; \quad (1.16)$$

$$h_{126} = \frac{h_{113}}{1 + h_{213}} h_{223} - h_{123}; \quad (1.17)$$

$$h_{126} = \frac{h_{223}}{1 + h_{213}}; \quad (1.18)$$

$$h_{216} = \frac{h_{213}}{1 + h_{213}}. \quad (1.19)$$

1.2. Схема исследования транзистора

Схема для снятия статических характеристик БТ с ОБ изображена на рис. 1.7, а, с ОЭ – на рис. 1.7, б.

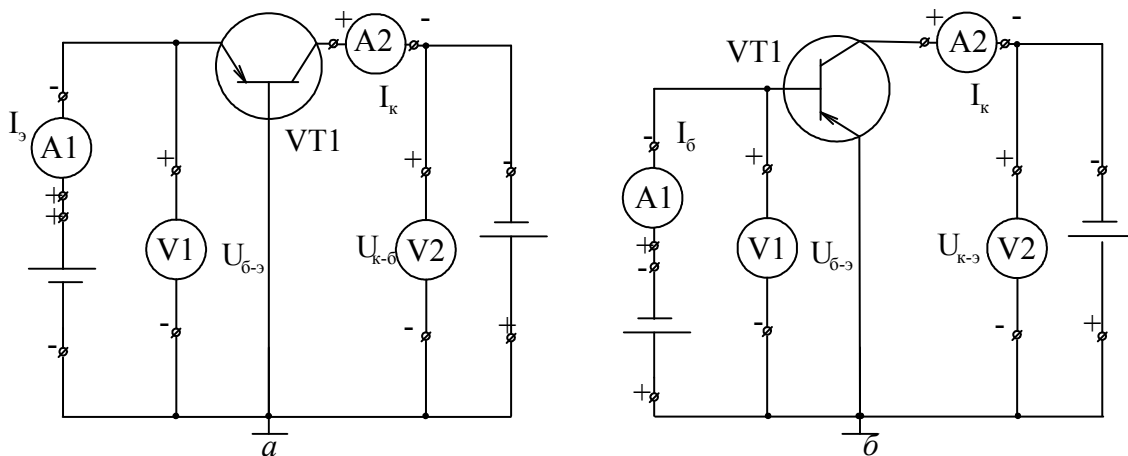


Рис. 1.7. Схемы исследования БТ типа р-п-р с ОБ (а) и с ОЭ (б)

1.3. Задания к лабораторной работе

Задание 1. Соберите схему для снятия ВАХ БТ с ОБ. Запишите паспортные данные БТ. Снимите входную характеристику $I_3 = f(U_{3-6})$ при $U_{к-6} = \text{const}$. Заполните табл. 1.1.

Таблица 1.1

Входные характеристики БТ в схеме включения с ОБ

Напряжение на коллекторе $U_{к-6}$, В	Ток эмиттера I_3 , мА								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Напряжение $U_{б-э}$, В								
– 3									
– 6									
– 8									

Табл. 1.1 заполняйте по горизонтали, т. е. при постоянном $U_{к-б}$ изменяйте ток $I_э$ и записывайте результаты измерения напряжения $U_{б-э}$.

Задание 2. Соберите схему для снятия выходной характеристики БТ (работает в активном режиме) в схеме включения с ОБ. Заполните табл. 1.2.

Таблица 1.2

Выходные характеристики БТ в схеме включения с ОБ
($I_к = f(U_{к-б})$ при $I_э = \text{const}$)

Напряжение на коллекторе $U_{к-б}$, В	Ток эмиттера $I_э$, мА								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Ток коллектора $I_к$, мА								
0,5									
0,2									
0									
– 0,5									
– 1									
– 3									
– 6									
– 8									

Табл. 1.2 заполняйте по вертикали, т. е. при заданном токе $I_э$, изменяя напряжение $U_{к-б}$, снимайте результаты измерения коллекторного тока.

Задание 3. Соберите схему для снятия входной характеристики БТ в схеме включения с ОЭ. Заполните табл. 1.3.

Таблица 1.3

Входные характеристики БТ в схеме включения с ОЭ

Напряжение на коллекторе $U_{к-э}$, В	Ток базы $I_б$, мкА									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Напряжение $U_{б-э}$, В									
– 2,5										
– 5										
– 7,5										

Если напряжение на базе не будет зависеть от напряжения $U_{к-э}$, то это означает, что у исследуемого БТ при заданном запирающем напряжении на коллекторном переходе база относительно широкая и отсутствует эффект Эрли.

Задание 4. Соберите схему для снятия выходных характеристик БТ в схеме включения с ОЭ. Заполните табл. 1.4.

Таблица 1.4

Выходные характеристики БТ в схеме включения с ОЭ

($I_k = f(U_{к-э})$ при $I_б = \text{const}$)

Напряжение на коллекторе $U_{к-э}$, В	Ток базы $I_б$, мкА									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Ток коллектора I_k , мА									
0										
– 0,2										
– 0,5										
– 1										
– 2,5										
– 5										
– 7,5										
– 10										

Задание 5. По результатам измерений (см. табл. 1.1 – 1.4) постройте графики ВАХ БТ для входных и выходных характеристик одной схемы включения и соответственно значениям величин возьмите масштабы тока и напряжения по осям координат. По этим характеристикам в рабочей точке (в соответствии с паспортными данными) на линейных участках определите дифференциальные (малосигнальные) параметры БТ: $h_{11б}$, $h_{12б}$ – по входным характеристикам БТ в схеме включения с ОБ; $h_{21б}$, $h_{22б}$ – по выходным характеристикам БТ в схеме включения с ОБ; ΔI_k – при большем значении $\Delta U_{к-б}$ на линейном участке; $h_{11э}$, $h_{12э}$ – по входным характеристикам БТ в схеме включения с ОЭ; $h_{21э}$, $h_{22э}$ – по выходным характеристикам БТ в схеме включения с ОЭ.

Рассчитайте h-параметры БТ в схеме с ОБ по значениям их в схеме включения БТ с ОЭ по пересчетным формулам.

По результатам расчета h-параметров сделайте выводы о характеристиках БТ.

1.4. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Схема цоколевки и паспортные данные БТ.
- 3) Схемы исследования БТ в схемах включения с ОБ и ОЭ.
- 4) Результаты измерений – таблицы и графики входных и выходных характеристик БТ в схеме включения с ОБ и ОЭ.
- 5) Расчет h -параметров БТ в схемах включения с ОБ и ОЭ и пересчет h_6 -параметров через h_3 -параметры.

1.5. Контрольные вопросы

- 1) Каков принцип действия плоскостного БТ?
- 2) Что такое эффект модуляции ширины базы?
- 3) Что изменится в схеме исследования, если вместо БТ прямой проводимости использовать транзистор обратной проводимости? По какому критерию выбирается БТ в схемах?
- 4) Чем объясняется форма статических характеристик транзистора при включении БТ по схеме с ОБ, ОЭ?
- 5) Почему в схеме включения транзистора с ОЭ коэффициент усиления по мощности больше, чем в схеме с ОБ?
- 6) Какова физическая сущность h -параметров?
- 7) Каковы принципы построения эквивалентных схем транзистора?
- 8) Какую схему включения транзистора используют для снятия ВАХ?

Лабораторная работа 2

УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы: изучить схемы усилителей, их особенности и методику расчета усилителя на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ; ознакомиться с параметрами усилительных каскадов и порядком их расчета.

2.1. Краткие сведения из теории

Усилителем называется электронное устройство, у которого коэффициент усиления по мощности больше единицы.

Параметры усилительного каскада: коэффициенты усиления по напряжению ($K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$), току ($K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$), мощности ($K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$); номинальная выходная мощность – наибольшая мощность, которую усилитель передает нагрузке без заметных искажений сигнала; входное ($R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$) и выходное ($R_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}/I_{\text{вых}}$) сопротивления; полоса пропускания; коэффициент полезного действия; коэффициенты частотных, фазовых, нелинейных искажений и др.

Усилительные каскады различаются между собой по способу включения транзистора. Различают три вида усилительных каскадов – ОЭ, ОБ и ОК (эмиттерный повторитель). Схемы каскадов и временные диаграммы их работы приведены на рис. 2.1: с ОЭ – а, б; с ОБ – в, г; с ОК – д, е.

Каскад с ОЭ. Источник усиливаемого входного переменного напряжения $U_{\text{вх}}$ подключается к входной базовой цепи транзистора. Конденсаторы C_1 , C_2 (разделительные) служат для разделения при постоянном токе цепи источника усиливаемого сигнала и входной цепи транзистора, а также коллекторной цепи транзистора и цепи нагрузки $R_{\text{н}}$.

Схема подачи смещения на базу осуществляется фиксированным током через резистор $R_{\text{б}}$ от источника $E_{\text{к}}$. С помощью резисторов $R_{\text{б}}$ и $R_{\text{к}}$ задается режим работы транзистора по постоянному току. При отсутствии $U_{\text{вх}}$ в базе транзистора протекает постоянный ток покоя $I_{0\text{б}}$ от источника $E_{\text{к}}$ через $R_{\text{б}}$. Напряжение $U_{\text{б-э}}$ незначительно (0,1 – 0,3 В – для германиевых транзисторов, 0,3 – 1 В – для кремниевых). Так как потенциал базы отрицателен по отношению к потенциалу эмиттера, то переход открыт и можно считать, что $I_{0\text{б}} \approx E_{\text{к}}/R_{\text{б}}$. Ток покоя в цепи коллектора определяется через коэффициент β по формуле: $I_{0\text{к}} = \beta I_{0\text{б}}$. Проходя через $R_{\text{н}}$, ток покоя создает на нагрузке падение напряжения $U_{\text{вых}}$. Тогда напряжение покоя на коллекторе транзистора $U_{0\text{к}} \approx E_{\text{к}} - I_{0\text{к}} R_{\text{н}}$.

При подаче на базу положительной полуволны переменного входного напряжения (см. рис. 2.1, б) ток $I_{\text{к}}$ уменьшается, так как приоткрывается эмиттерный переход, и, соответственно, отрицательное напряжение $U_{\text{к-э}}$ увеличивается по абсолютной величине.

При этом на резисторе $R_{\text{н}}$ формируется отрицательная полуволна напряжения значительно большей амплитуды, чем полуволна амплитуды $U_{\text{вх}}$. При поступлении отрицательной полуволны напряжения $U_{\text{вх}}$ транзистор приоткрывается, напряжение на нем по абсолютной величине снижается, а на $R_{\text{к}}$

формируется положительная полуволна. Таким образом, напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ находятся в противофазе, т. е. сдвинуты на 180° относительно друг друга.

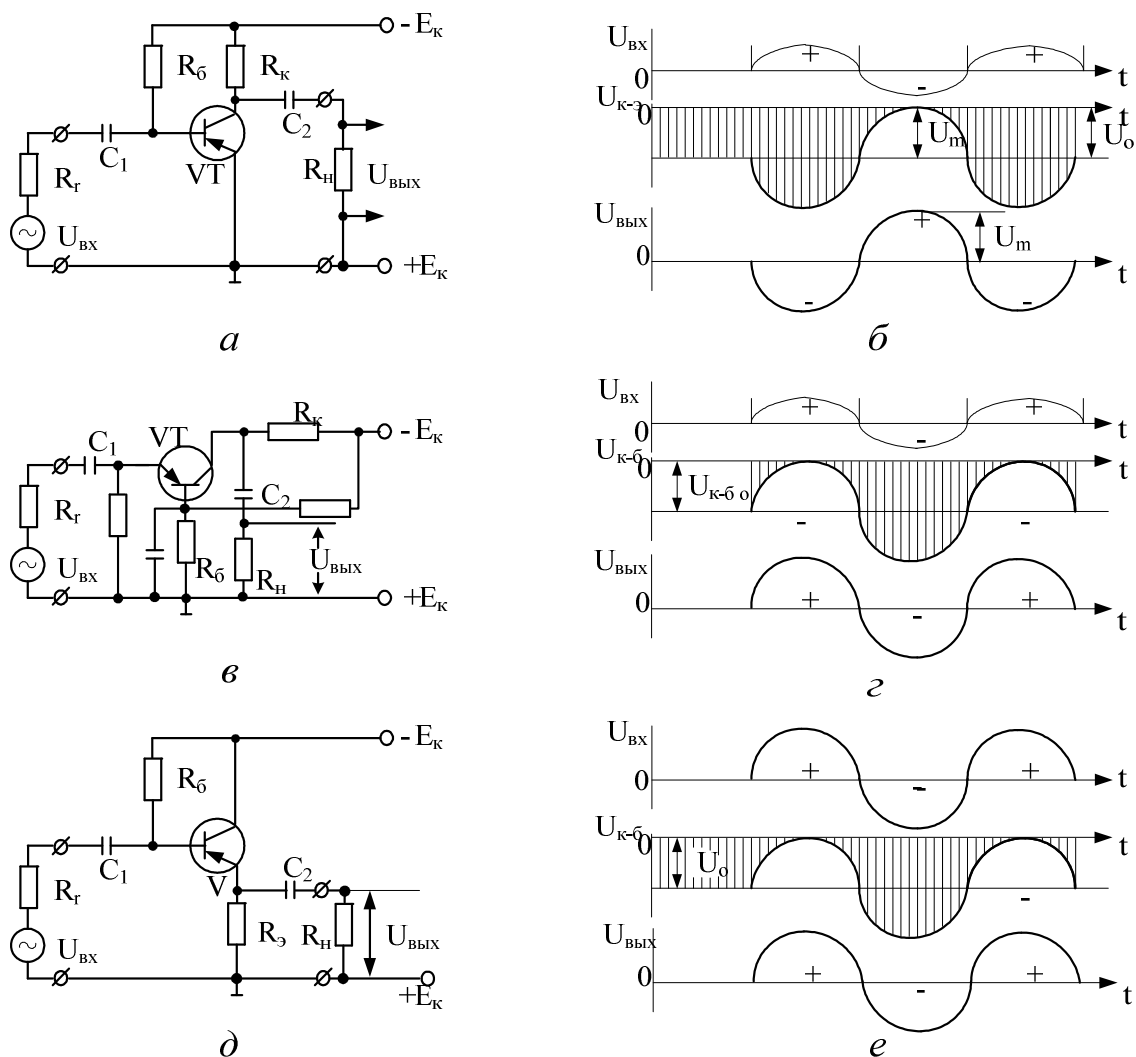


Рис. 2.1. Схемы усилительных каскадов и временные диаграммы их работы:
а, б – схема включения с ОЭ; в, г – с ОБ; д, е – с ОК

Каскад с ОЭ усиливает входной сигнал по току, напряжению и имеет максимальное среди всех каскадов усиление по мощности. Входное сопротивление мало, так как переход Б – Э во входной цепи смещен в прямом направлении ($R_{\text{вх}} \approx 200 - 2000 \text{ Ом}$). Выходное сопротивление определяется в основном сопротивлением в цепи коллектора R_K .

Каскад с ОБ. В этой схеме входной сигнал подается в эмиттерную цепь. Для создания тока покоя $I_{0\text{э}}$ (режима по постоянному току) использован дополнительный источник напряжения смещения ($E_{\text{см}} I_{0\text{э}} \approx E_{\text{см}} / R_{\text{см}} \cdot U_{\text{э-б}}$), которое мало, так как переход открыт, поэтому ток покоя коллектора определяется

по формуле: $I_{0к} = \alpha I_{0э} = \alpha E_{см} / R_{см}$, где α – коэффициент передачи эмиттерного тока. С приходом положительной полуволны $U_{вх}$ (см. рис. 2.1, з) суммарный (постоянный и переменный) ток $I_э$ увеличивается и, следовательно, транзистор открывается больше, увеличивается ток $I_к$, уменьшается по абсолютной величине напряжение $U_{б-э}$. На сопротивлении $R_н$ формируется положительная полуволна напряжения с амплитудой, большей, чем амплитуда напряжения $U_{вх}$. Входной ток $I_э$ протекает в цепи с незначительным сопротивлением $R_{вх}$, а выходной $I_к$ – в цепи со значительным сопротивлением резисторов $R_к$ и $R_н$. При поступлении отрицательной полуволны $U_{вх}$ на $R_н$ формируется также отрицательная полуволна $U_{вых}$ большей амплитуды. Таким образом, полярность и фаза напряжений $U_{вых}$ и $U_{вх}$ совпадают, т. е. каскад с ОБ не инвертирует фазу.

Каскад с ОБ усиливает входной сигнал по напряжению и мощности. Усиления по току нет, так как $(\alpha = I_{вых} / I_{вх}) < 1$. Эффект усиления по напряжению и мощности тем выше, чем больше α , $R_к$ и $R_н$. Входное сопротивление каскада с ОБ меньше, чем входное сопротивление каскада с ОЭ, а выходное примерно равно сопротивлению $R_к$.

Каскад с ОК. Основное отличие каскада с ОК от каскадов с ОЭ и ОБ в том, что нагрузка включена в цепь эмиттера транзистора (этим вводится отрицательная обратная связь по току, которая существенно сказывается на параметрах каскада). Начальное смещение (выбор точки покоя транзистора) задается током от источника $E_к$ через резистор $R_б$. В усилительном каскаде с ОК все напряжение $U_{вых}$ введено последовательно во входную цепь, т. е. имеется стопроцентная отрицательная обратная связь. При положительной полуволне напряжения $U_{вх}$ уменьшаются суммарный ток базы, ток $I_э$ (закрывается эмиттерный р-п-переход), снижается по абсолютной величине $U_э$ относительно общей точки. На нагрузке формируется положительная полуволна напряжения (см. рис. 2.1, е), причем $|U_{вых}| \approx |U_{вх}|$. Каскад с ОК сохраняет фазу входного сигнала, усиливает его по току ($K_i \approx \beta + 1$) и мощности. Усиления по напряжению нет, так как изменение $U_{вх}$ почти полностью передается на выход через переход Б – Э, имеющий незначительное сопротивление, – он открыт по сравнению с сопротивлениями $R_э$ и $R_н$. Усиление по мощности достигается за счет усиления тока. Входное сопротивление каскада по переменному току значительно (десятки – сотни килоом), а выходное составляет всего единицы – десятки ом.

Эмиттерный повторитель используют для согласования каскадов, имеющих незначительное $R_{вх}$ и существенное $R_{вых}$ сопротивления (например, схема с ОБ), и в качестве конечного (выходного) каскада усилителей, работающих на низкоомную нагрузку.

2.2. Схема рассчитываемого усилителя

Усилители с ОЭ обеспечивают наибольшее усиление по мощности, однако схема такого усилителя отличается существенной температурной нестабильностью, т. е. изменением начального положения рабочей точки усилительного каскада (в режиме покоя при отсутствии переменного входного сигнала) с изменением температуры окружающей среды. На стабильность работы каскада с изменением температуры основное влияние оказывают

изменение обратного коллекторного тока $\Delta I_{кo}$, которое наиболее значительно;

смещение входной характеристики (напряжения $\Delta U_{б-э}$);

изменение коэффициента передачи тока эмиттера $\Delta \alpha$.

Для оценки дестабилизирующего действия вводится параметр – коэффициент нестабильности: $S = \Delta I_{кo} / I_{кo}$, где $\Delta I_{кo}$ – конечное приращение коллекторного тока при изменении температуры:

$$\Delta I_{кo} = I_{кo}(e^{0,077\Delta t} - 1), \quad (2.1)$$

где $\Delta I_{кo}$ – температурное изменение обратного коллекторного тока;

Δt – заданный диапазон изменения температуры;

$I_{кo}$ – обратный ток коллектора при $t = 20^\circ\text{C}$ (измеряется или принимается по справочным данным).

Расчетная схема усилительного каскада с ОЭ приведена на рис. 2.2, в нее для стабилизации рабочей точки транзистора включена цепь эмиттерной стабилизации, состоящая из резисторов R_6 , R_3 и шунтирующего конденсатора C_3 . В схеме уменьшается смещение на базу фиксированным напряжением между базой и эмиттером с помощью делителя напряжения на резисторах R_1 , R_6 . Совокупность элементов R_3 и C_3 называется цепочкой автоматического регулирования смещения. Шунтирующий конденсатор C_3 исключает возникновение отрицательной обратной связи по переменному току, снижает потери $U_{вых}$, увеличивает коэффициент усиления по напряжению K_u и КПД усилителя.

2.3. Задание к лабораторной работе

Исходные данные:

- 23

2.3.1. Порядок расчета параметров усилителя

Существует несколько методов расчета основных параметров, характеризующих работу усилителя. Наиболее простым является графоаналитический метод, при котором выбор рабочей точки производится графически, а расчет других параметров – аналитически.

Расчет состоит из трех основных этапов.

Этап 1 – выбор местоположения рабочей точки в режиме покоя с учетом требований ее температурной стабильности.

Выбор местоположения рабочей точки выполняется на выходных и входных характеристиках транзистора:

1) рассчитывается минимальный ток базы в режиме покоя, обеспечивающий отсутствие амплитудных искажений, т. е. режим класса А работы УНЧ:

$$I_{б\min} \approx \frac{U_{вх\text{ ампл}}}{h_{11э}}, \quad (2.2)$$

где $U_{вх\text{ ампл}}$ – задается преподавателем;

$h_{11э}$ – берется из результатов расчета лабораторной работы 1;

2) выбирается рабочий ток смещения базы. Принимается кривая из семейства выходных характеристик по значению ближайшая, но большая по отношению к $I_{б\min}$, т. е. определяется рабочая кривая в системе выходных характеристик (рис. 2.4).

Рабочий ток смещения необходимо ограничивать линейностью входной динамической характеристики на выбранном рабочем участке;

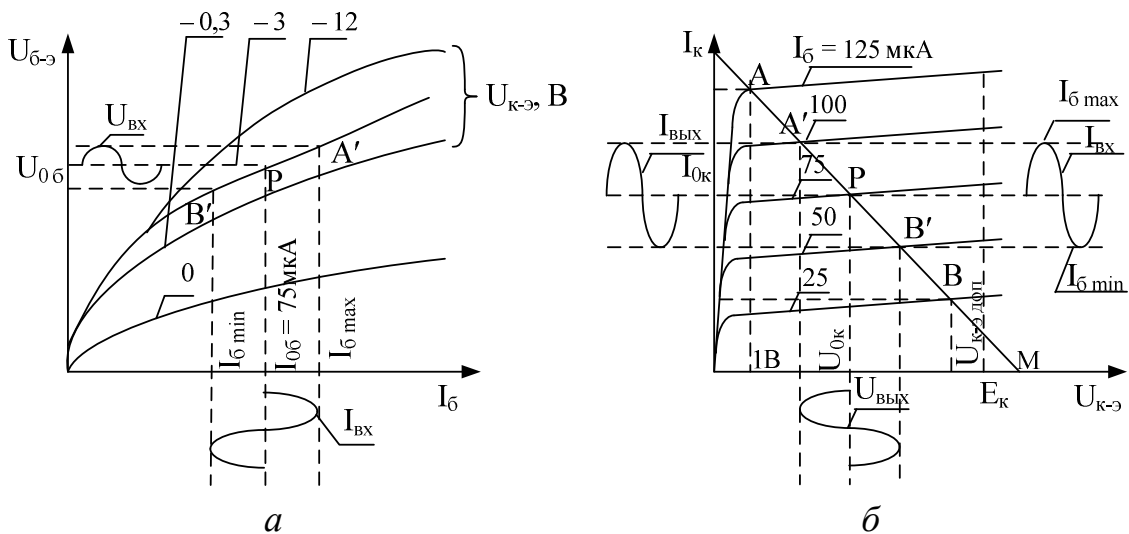


Рис. 2.4. Система входных (а) и выходных (б) характеристик транзистора

3) определяется рабочий участок на характеристиках: слева – ограничение по нелинейности ($U_{к-э} \approx (0,5 - 1) \text{ В}$), справа – по допустимому напряжению пробоя коллекторного р-п-перехода ($U_{к-э} \approx 12 \text{ В}$);

4) рабочая точка $P(I_{0к}, U_{0к})$ (рис. 2.4, б) располагается на середине выбранного участка, по этой точке определяются ток и напряжение в выходной цепи транзистора в режиме покоя;

5) согласно уравнению $U_k = E_k - I_k R_k$ в системе выходных характеристик проводится линия нагрузки через рабочие точки Р и М на оси абсцисс с координатами (О, E_k). Определяется рабочий участок АВ – граница активного режима работы транзистора, в пределах которого возможно перемещение рабочей точки при подаче переменного входного сигнала;

6) строится динамическая входная характеристика путем переноса точек пересечения нагрузочной прямой со статическими выходными характеристиками. Если $h_{12э} = 0$, т. е. входные характеристики слились при различных значениях $U_{к-э}$, то динамическая входная характеристика совпадает со статической;

7) определяется положение рабочей точки во входных характеристиках $P(I_{0б}, U_{0б})$, по этой точке определяются значения тока и напряжения во входной цепи транзистора в режиме покоя;

8) в системе входных характеристик относительно $U_{0б}$ строится синусоида $U_{вх}(t)$ с амплитудой $U_{вх \text{ ампл}}$ с любым, но одинаковым для всех синусоид периодом, определяются значения токов $I_{б \text{ min}}$ и $I_{б \text{ max}}$. Синусоида входного тока в масштабе I_b переносится в систему выходных характеристик (ось абсцисс совпадает с рабочей статической характеристикой, а не проводится по горизонтали). Определяется участок А'В' на нагрузочной прямой, в пределах которого перемещается рабочая точка при подаче входного сигнала заданной амплитуды $U_{вх \text{ ампл}}$. Отрезок А'В' должен находиться в пределах допустимого отрезка АВ;

9) проекция отрезков АА' и ВВ' на ось ординат – запас по прямому току I_k . На эту величину допустимо перемещение рабочей точки при изменении температуры окружающей среды на заданный диапазон Δt . Наименьшее значение $\Delta I'_{0к}$ или $\Delta I''_{0к}$ (наиболее узкое место) подставляется в числитель формулы для определения допустимого (предельного) коэффициента неустойчивости при заданных исходных данных работы усилителя:

$$S_{\text{доп}} = \frac{\Delta I_{0к \text{ min}}}{\Delta I_{к о}}. \quad (2.3)$$

Значение $\Delta I_{кo}$ определяется по формуле (2.3) либо по упрощенной:
 $\Delta I_{кo} = I_{кo} \Psi(\Delta t)$.

Значение $\Psi(\Delta t)$ выбирается из данных табл. 2.1, ток $I_{кo}$ измеряется специальным прибором для исследуемого типа транзистора или принимается по справочным данным.

Т а б л и ц а 2.1

Зависимость температурного коэффициента Δt от функции $\Psi(\Delta t)$

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50
$\Psi(\Delta t)$	1,16	3,66	9,07	20,76	46

Если в результате расчета по уравнению (2.2) получится $S_{доп} > 10$ (облегченный температурный режим работы транзистора), то в дальнейшем необходимо принять $S_{доп}$ равным 5 – 8 (среднее значение коэффициента, которое обеспечивает выбранная схема температурной стабилизации) или использовать упрощенную схему стабилизации.

При $S_{доп} < 10$ в расчетные формулы подставляется рассчитанное значение требуемого коэффициента неустойчивости.

Э т а п 2 – расчет усилителя по постоянному току – определение числовых значений элементов схемы, реального коэффициента неустойчивости, и сравнение последнего с допустимым (заданным):

1) рассчитывается падение напряжения на резисторе R_3 :

$$E_3 = (0,1 - 0,3) | E_k | ; \quad (2.4)$$

2) вычисляется сопротивление:

$$R_3 = \frac{E_3}{I_{0к} + I_{0б}}, \quad (2.5)$$

где $I_{0к}$ и $I_{0б}$ – выходной и входной ток транзистора в режиме покоя (координаты рабочей точки Р в системе входных и выходных характеристик), $R_3 \approx (1 - 5) \text{ кОм}$.

Значения $I_{0к}$ и $I_{0б}$ принимаются из графика и подставляются в выражение (2.5) в основных единицах измерения тока;

3) определяется входное сопротивление усилителя по переменному току:

$$R_c = \frac{R_6 R_1}{R_6 + R_1} = \frac{R_3 (S_{доп} - 1)}{1 - S_{доп} (1 - \alpha)}, \quad (2.6)$$

где α – коэффициент усиления по току при включении по схеме с ОБ, $\alpha = -h_{216}$ (принимается из данных лабораторной работы 1 или из справочника), $R_c \gg h_{119}$;

4) рассчитывается реальный коэффициент неустойчивости, обеспеченный выбранными значениями сопротивлений элементов стабилизации R_c и R_3 :

$$S_{\text{реал}} = \frac{1 + \frac{R_3}{R_c}}{1 - \alpha + R_3/R_c}. \quad (2.7)$$

Полученное значение сравнивается с допустимым значением коэффициента неустойчивости:

$$S_{\text{реал}} \leq S_{\text{доп}}; \quad (2.8)$$

5) рассчитывается сопротивление цепи делителя:

$$R_6 = R_c \frac{|E_k|}{|E_k| - U_{06} - E_3 - R_c I_{06}}; \quad (2.9)$$

6) вычисляется сопротивление цепи делителя:

$$R_1 = \frac{R_6 R_c}{R_6 - R_c}; \quad (2.10)$$

7) определяется ток делителя:

$$I_d = \frac{U_{06} + E_3}{R_6}. \quad (2.11)$$

Если условие $I_d \ll I_{0k}$ не соблюдено, то расчет следует повторить, изменяя значения ΔI_{0k} и E_3 ;

8) рассчитывается сопротивление резистора:

$$R_k = \frac{|E_k| - U_{06} - E_3}{I_{0k}}; \quad (2.12)$$

9) вычисляется емкость конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 , должны соблюдаться условия:

$$\frac{1}{\omega_n C_1} \leq 0,1 h_{119}; \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{\omega_n C_2} \leq 0,1 R_n; \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{\omega_H C_3} \leq (0,1 - 0,05) R_3, \quad (2.15)$$

где $\omega_H = 2\pi f_H$.

Этап 3 – расчет усилительного каскада по переменному току – определение параметров коэффициентов усиления K_i , K_u , K_p , $R_{вх}$, $R_{вых}$.

Для расчета параметров усилителя по переменному току необходимо определить h_3 -параметры транзистора вблизи рабочей точки по семействам входных ($h_{11э}$, $h_{12э}$) и выходных ($h_{21э}$, $h_{22э}$) характеристик.

Реальную схему усилителя (см. рис. 2.2) можно заменить схемой, эквивалентной ей по переменному току (рис. 2.5) (при этом следует учитывать, что источник постоянного напряжения – короткое замыкание по переменному току и что соблюдаются соотношения (2.13) – (2.15), емкостными сопротивлениями в этом случае пренебрегают. В схеме, приведенной на рис. 2.5, R_c – входное сопротивление усилителя по переменному току,

$R_c = \frac{R_1 R_6}{R_1 + R_6}$; R'_H – сопротивление нагрузки по переменному току.

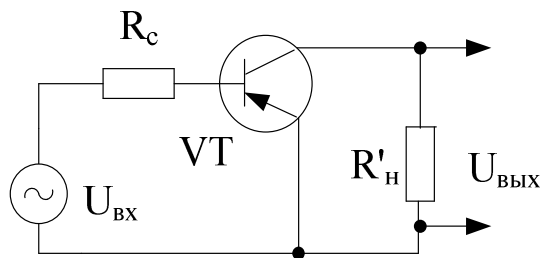


Рис. 2.5. Эквивалентная схема усилителя по переменному току

Параметры усилителя рассчитываются по формулам в следующем порядке:

1) сопротивление нагрузки –

$$R'_H = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}, \quad (2.16)$$

величина проводимости –

$$Y'_H = \frac{1}{R'_H}; \quad (2.17)$$

2) значения h -параметров транзистора вблизи рабочей точки P усилителя вычисляются по формулам лабораторной работы 1;

3) значение Δh :

$$\Delta h_{\text{э}} = h_{11\text{э}} h_{22\text{э}} - h_{12\text{э}} h_{21\text{э}} ; \quad (2.18)$$

4) входное сопротивление усилителя –

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta h_{\text{э}} + h_{11\text{э}} Y'_{\text{н}}}{h_{22\text{э}} + Y'_{\text{н}}} \quad \text{при} \quad R_{\text{вх}} \leq h_{11\text{э}} ; \quad (2.19)$$

5) выходное сопротивление усилительного каскада –

$$R_{\text{вых}} = \frac{h_{11\text{э}} + R_{\text{с}}}{\Delta h_{\text{э}} + h_{22\text{э}} R_{\text{с}}} ; \quad (2.20)$$

6) коэффициент усиления по току на низкой частоте –

$$K_{\text{i}} = \frac{h_{21\text{э}} Y'_{\text{н}}}{h_{22\text{э}} + Y'_{\text{н}}} ; \quad (2.21)$$

7) коэффициент усиления по напряжению на низких частотах –

$$K_{\text{u}} = \frac{h_{21\text{э}} R'_{\text{н}}}{h_{11\text{э}} + \Delta h_{\text{э}} R'_{\text{н}}} ; \quad (2.22)$$

8) коэффициент усиления по мощности для схемы включения транзистора с ОЭ –

$$K_{\text{p}} = K_{\text{i}} K_{\text{u}} ; \quad (2.23)$$

9) коэффициент частотных искажений на верхней частоте $f_{\text{в}}$ –

$$M_{\text{в}} = \sqrt{1 + (2\pi f_{\text{в}} R'_{\text{н}} C'_{\text{к-э}})^2} , \quad (2.24)$$

где $C'_{\text{к-э}}$ – эквивалентная выходная емкость каскада, пФ, $C'_{\text{к-э}} = C_{\text{к-э}} + C_{\text{вх}} + C_{\text{м}} \approx C_{\text{к-э}} + 50$.

Для расчета принять: $f_{\text{в}} = 200$ кГц; $C_{\text{к-э}} = 60$ пФ;

10) коэффициент частотных искажений на нижней частоте $f_{\text{н}}$ –

$$M_{\text{н}} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f_{\text{н}} \tau_{\delta}} \right)^2} ; \quad (2.25)$$

$$\text{где } \tau_{\delta} = C_2 \left(\frac{R_{\text{к}} R_{\text{вых}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{вых}}} + R_{\text{н}} \right).$$

2.4. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Графики входных и выходных характеристик с необходимыми построениями на них (допускается использовать графики из отчета к лабораторной работе 1).
- 3) Расчетная схема усилителя и схема, эквивалентная ей по переменному току, с указанием буквенных и числовых значений элементов.
- 4) Расчетные формулы и расчет по ним с пояснениями.

2.5. Контрольные вопросы

- 1) В чем состоит сущность графоаналитического метода расчета параметров усилительного каскада?
- 2) Какие характеристики имеют усилительные каскады с различными схемами включения транзистора?
- 3) Каково назначение элементов усилителя?
- 4) В каком каскаде (с ОБ, ОЭ или ОК) меняется на нагрузке полярность входного напряжения?
- 5) Каков порядок численных значений параметров усилителя по переменному току?

Лабораторная работа 3

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА В ПРОГРАММЕ «ELECTRONICS WORKBENCH 5.0»

Цель работы: ознакомиться со схемой усилителя, назначением ее элементов; снять характеристики усилителя и выяснить их зависимость от параметров схемы.

3.1. Краткие сведения об электронной лаборатории

Исследование усилителя производится в электронной лаборатории, созданной на основе программы Electronics Workbench 5.0 или Multisim.

В работе используются вольтметры, осциллограф (Oscilloscope), функциональный генератор (Function Generator), измеритель амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) (Bode Plotter).

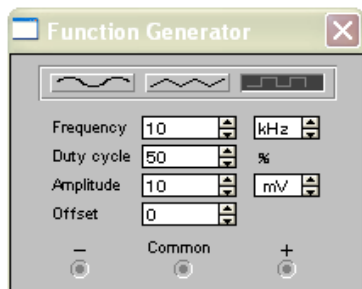


Рис. 3.1. Вид лицевой панели функционального генератора

Вольтметр. Если дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению вольтметра на схеме, то откроется окно настройки. При выборе меню DC (постоянное напряжение) или AC (переменное напряжение) задается режим работы.

Функциональный генератор. Если дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению функционального генератора на схеме,

то откроется лицевая панель с кнопками настройки (рис. 3.1), с помощью которых можно установить частоту, амплитуду и выбрать вид сигнала.

Измеритель АЧХ. Если дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению измерителя АЧХ на схеме, откроется лицевая панель с органами настройки (рис. 3.2), а на экране будет построен график «коэффициент передачи сигнала – частота».

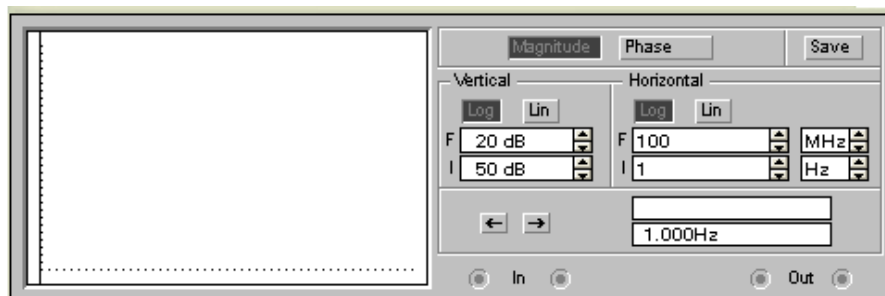


Рис. 3.2. Вид лицевой панели измерителя АЧХ (боде-плоттер)

На панели измерителя АЧХ устанавливаются:

по вертикали и горизонтали – масштаб Log;

режим magnitude (амплитудно-частотная характеристика);

по вертикали и горизонтали: I – наименьшие значения частоты и коэффициента передачи; F – наибольшие их значения, эти пределы задаются пользователем.

На экране измерителя АЧХ имеется визирная линейка (вертикальная линия на экране), ее можно перемещать с помощью мыши. Показатели

положения визирной линейки приводятся в правом нижнем углу лицевой панели, это позволяет снять данные в отдельных точках графика.

Осциллограф. Если дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению осциллографа на схеме, то откроется лицевая панель с органами его настройки. Особых комментариев этот виртуальный прибор не требует, так как его панель соответствует панели реально существующего осциллографа.

При работе необходимо корректировать номиналы конденсаторов и сопротивлений. Для этого необходимо щелкнуть два раза левой кнопкой мыши по выбранному элементу, после открытия окна редактирования внести необходимые изменения и закрыть окно.

Для соединения элементов в схеме необходимо подвести курсор к выводу элемента, после появления точки «зацепить» ее мышью и, не отпуская левой кнопки, «тянуть» к точке соединения. После появления точки соединения нужно отпустить кнопку мыши.

3.2. Сведения об усилителе

Схема усилителя с приборами для его исследования приведена на рис. 3.3.

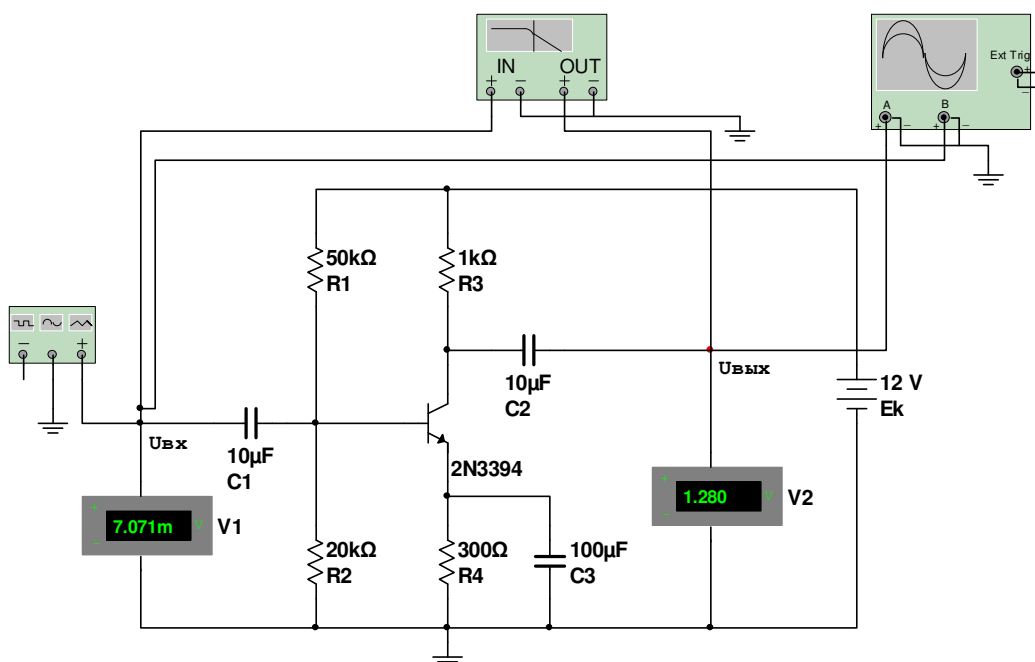


Рис. 3.3. Схема усилителя с приборами для его исследования

В схему усилителя включен транзистор малой мощности 2N3394, его параметры: $U_{к-э \text{ доп}} = 25 \text{ В}$; $I_{к \text{ max}} = 100 \text{ мА}$; $P_{\text{кол доп}} = 200 \text{ мВт}$; $f_{\text{гр}} = 12 \text{ МГц}$.

Элементы, входящие в схему исследования усилителя (см. рис. 3.3):

$R1$, $R2$ – сопротивления, образующие делитель, которые определяют напряжение на базе и ток базы в рабочей точке. Эти сопротивления задают рабочий режим;

$R3$ – нагрузка транзистора, обеспечивающая динамический усилительный режим;

$R4$ – сопротивление, предназначенное для температурной стабилизации режима;

$C1$, $C2$ – разделительные конденсаторы, которые отделяют переменный сигнал от постоянного (благодаря конденсатору $C2$ на выходе усилителя будет только переменное напряжение, а постоянное напряжение на коллекторе отсутствует);

$C3$ – конденсатор, который шунтирует сопротивление $R4$ на частоте сигнала и ликвидирует отрицательную обратную связь в усилителе;

$V1$, $V2$ – вольтметры, позволяющие измерить входное и выходное напряжение на частоте сигнала. Этими же приборами при подключении к коллектору и базе можно измерить постоянное напряжение на электродах транзистора и убедиться в правильности режима;

генератор сигналов, осциллограф, измеритель АЧХ.

3.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1) Включите режим симуляции. Вольтметром $V2$ измерьте напряжение источника питания E_K , на коллекторе U_K и эмиттере U_E . Если напряжение $U_{K-E} < 1В$, то транзистор находится в режиме насыщения; если $U_{K-E} > 0,8 E_K$, значение U_{K-E} близко к значению E_K , то транзистор близок к отсечке. Убедитесь в том, что транзистор находится в рабочем режиме. Только после этого можно продолжать работу.

2) Снимите амплитудную характеристику усилителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$.

На генераторе установите синусоидальный режим, частоту 10 кГц и амплитуду 10 мВ (соответствует действующему значению напряжения 7,09 мВ).

Вольтметры должны быть установлены на измерение переменного напряжения (режим AC): $V1$ измеряет $U_{\text{вх}}$, $V2$ – $U_{\text{вых}}$.

Включите режим симуляции, измерьте амплитудную характеристику усилителя. Заполните табл. 3.1.

Таблица 3.1

Амплитудная характеристика усилителя

$U_{\text{вх действ, мВ, по V1}}$					
$U_{\text{вых действ, мВ, по V2}}$					

Приведите осциллограммы выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ при начальном (7,09 мВ) и конечном (70,9 мВ) входном напряжении.

3) Исследуйте АЧХ – подключите измеритель АЧХ к схеме, In – ко входу, Out – к выходу усилителя. Многофункциональный генератор не нужно отключать от входа, вольтметры V1 и V2 тоже можно не отключать.

На АЧХ установите по вертикали линейную шкалу Lin, по горизонтали – логарифмическую шкалу Log.

Установите диапазон просматриваемых частот: I – 10 Гц, F – 100 МГц.

Установите диапазон просматриваемых коэффициентов передачи: I – 0, F – 500.

Включите режим симуляции. Наблюдайте АЧХ на экране измерителя. Определите коэффициенты передачи при значениях частоты, записанных в табл. 3.2.

Таблица 3.2

АЧХ усилителя

Значение выходного напряжения	Частота, Гц							
	10	100	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
Напряжение, В								
Напряжение, В, при $C3 = 1 \text{ мкФ}$								
Напряжение, В, при $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$								

Начинайте измерения с исходной схемы, повторите измерения при уменьшенной емкости C3, затем восстановите схему и снимите показания при уменьшенной разделительной емкости C1. Объясните причину изменений АЧХ.

4) Исследуйте работу усилителя при импульсном сигнале – установите на функциональном генераторе импульсный режим работы: $U_{\text{ампл}} = 10 \text{ мВ}$, частота – 1 кГц.

Приведите осциллограммы сигналов на входе и выходе. Объясните причину искажения сигналов.

Измените емкость C_3 до 1 мкФ, приведите осциллограмму сигнала на выходе, объясните ее вид.

3.4. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Схема установки с указанием значения напряжения на электродах транзистора. Вывод о режиме работы транзистора.
- 3) Амплитудная характеристика усилителя. Таблица с результатами измерения (см. табл. 3.1), график, осциллограммы напряжения на выходе усилителя. Объяснение результатов измерения амплитудной характеристики.
- 4) АЧХ усилителя. Таблица с результатами измерения (см. табл. 3.2), графики в одной системе координат. Выводы о влиянии параметров усилителя на АЧХ.
- 5) Описание импульсного режима работы усилителя. Осциллограмма выходного напряжения, выводы.

Библиографический список

1. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. СПб: Лань, 2001. 479 с.
2. Лачин В. И. Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. 704 с.
3. Ткаченко Ф. А. Электронные приборы и устройства: Учебник / Ф. А. Ткаченко. Минск: Новое знание; М.: Инфра-М, 2011. 681 с.
4. Баженов Н. Н. Полупроводниковые приборы: Конспект лекций / Н. Н. Баженов / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. 78 с.
5. Ямпурин Н. П. Электроника: Учебное пособие / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. М.: Академия, 2011. 237 с.

Учебное издание

КАНДАЕВ Василий Андреевич,
АВДЕЕВА Ксения Васильевна,
БАЖЕНОВ Николай Николаевич

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОНИКА»

Часть 2

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР И УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Редактор Н. А. Майорова
Корректор И. А. Сенеджук

Подписано в печать .05.2014. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,3. Уч.-изд. л. 2,5.
Тираж 150 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35