

Министерство образования и науки Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.А. Самойличенко
А.М. Заболоцкий

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ
К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ: «ЭЛЕКТРОНИКА»
«Исследование характеристик биполярных транзисторов»

Томск
2023

УДК 621.3
ББК 31.85
С17

Рецензент:

Шалимов В.А., профессор кафедры телевидения и управления ТУСУР,
канд.техн.наук

Самойличенко, Мария Александровна

С17 «Исследование характеристик биполярных транзисторов»: Методические указания к лабораторной работе, студентов радиотехнических специальностей / Самойличенко М.А., Залоцкий А.М. Томск: Томск гос. унт-систем упр. и радиоэлектроники, 2023. -17 с.

Методические указания содержат описание лабораторной работы, выполняемой в ходе изучения дисциплины «Электроника». Методические указания содержат так же краткую вводную теоретическую часть, расчетное задание и контрольные вопросы.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол №5 от 20.09.2023

УДК 621.3
ББК 31.85

©Самойличенко М.А. 2023
©Заболоцкий А.М. 2023
© Томск гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023 г.

Введение

Транзистор (рисунок 1.1) представляет собой полупроводниковый триод, у которого тонкий **n**-проводящий слой помещен между двумя **p**-проводящими слоями (**p-n-p** транзистор) или **p**-проводящий слой помещен между двумя **n**-проводящими слоями (**n-p-n** транзистор).

p-n переходы между средним слоем (база) и двумя крайними слоями (эмиттер и коллектор) обладают выпрямительным свойством, которое можно исследовать как в случае любого выпрямительного диода.

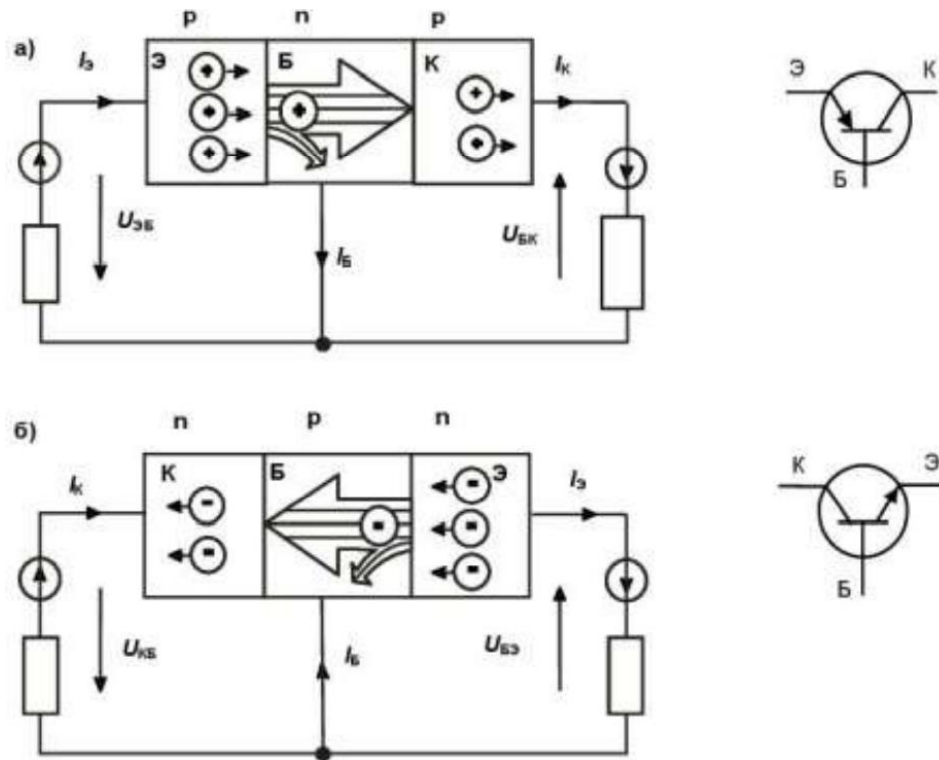


Рисунок 1.1

В транзисторе **p-n-p** типа (рисунок 1.1а) ток от эмиттера к коллектору через базу обусловлен неосновными для базы носителями заряда – дырками. При положительном направлении напряжения $U_{ЭБ}$ эмиттерный **p-n** переход открывается, и дырки из эмиттера проникают (инжектируются) в область базы. Часть из них уходит к источнику напряжения $U_{ЭБ}$, а другая часть достигает коллектора. Возникает так называемый транзитный ток от эмиттера к коллектору. Он резко возрастает с увеличением $U_{ЭБ}$ и тока базы.

В транзисторе **n-p-n** типа (рисунок 1.1 б) транзитный ток через базу обусловлен также неосновными для нее носителями заряда – электронами. Они инжектируются из эмиттера, если к эмиттерному **p-n** переходу прикладывается напряжение $U_{ЭБ}$.

Токи эмиттера, коллектора и базы связаны между собой уравнением первого закона Кирхгофа:

$$I_K = I_Э - I_Б.$$

Ток базы существенно меньше I_K и $I_Э$, но от него сильно зависит как I_K , так и $I_Э$. Отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы называется коэффициентом усиления по току:

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_Б.$$

Он может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен. Поэтому с помощью сравнительно малого тока базы можно регулировать относительно большие токи коллектора (и эмиттера).

Свойства транзисторов описываются следующими четырьмя семействами характеристик.

Входная характеристика показывает зависимость тока базы $I_Б$ от напряжения в цепи база/эмиттер $U_{БЭ}$ (при различных значениях $U_{КЭ} = \text{const}$).

Выходная характеристика показывает зависимость тока коллектора I_K от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

Характеристика управления представляет собой зависимость тока коллектора I_K от тока базы $I_Б$ (при различных значениях $U_{КЭ} = \text{const}$).

Характеристика обратной связи есть зависимость напряжения цепи база/эмиттер $U_{БЭ}$, от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

На рисунке 1.2 изображены простейшая схема транзисторного усилителя с общим эмиттером и поясняющая диаграмма. Резистор R_K является сопротивлением нагрузки, на резисторах R_1 и R_2 выполнен делитель напряжения, создающий постоянный ток в цепи база – эмиттер. Он поддерживает транзистор в открытом состоянии при отсутствии входного сигнала, благодаря чему через сопротивление R_K протекает постоянный ток. При этом напряжение на транзисторе $U_{КЭ}(I_{КЭ})=U_{пит}-R_K I_K$. Точки пересечения этой прямой с вольтамперными характеристиками $I_K(U_{КЭ})$ позволяют определить напряжение и ток в транзисторе при любом токе базы. В зависимости от начального положения точки покоя (при отсутствии входного сигнала) различают несколько классов усиления.

В класса A точка покоя выбирается в примерно в середине активной зоны от $I_{K \text{ макс}}$ до $I_{K \text{ мин}}$, в которой характеристики транзистора близки к линейным (точка A на поясняюще диаграмме). В этом случае при подаче на базу переменного сигнала (например, синусоидального) в токе базы появляется переменная составляющая, что вызывает соответствующие изменения тока I_K и напряжения $U_{КЭ}$. Рабочая точка при этом перемещается по прямой линии $U_{пит} - R_K I_K$ между зонами насыщения ($I_{K \text{ макс}}$) и отсечки ($I_{K \text{ мин}}$). Если входной сигнал не превышает допустимую величину, то происходит пропорциональное усиление всего сигнала. При превышении допустимого уровня наступает ограничение выходного сигнала на уровнях $I_{K \text{ макс}}$ и $I_{K \text{ мин}}$ по току и на уровнях $U_{КЭ \text{ мин}}$ и $U_{КЭ \text{ макс}}$ по напряжению.

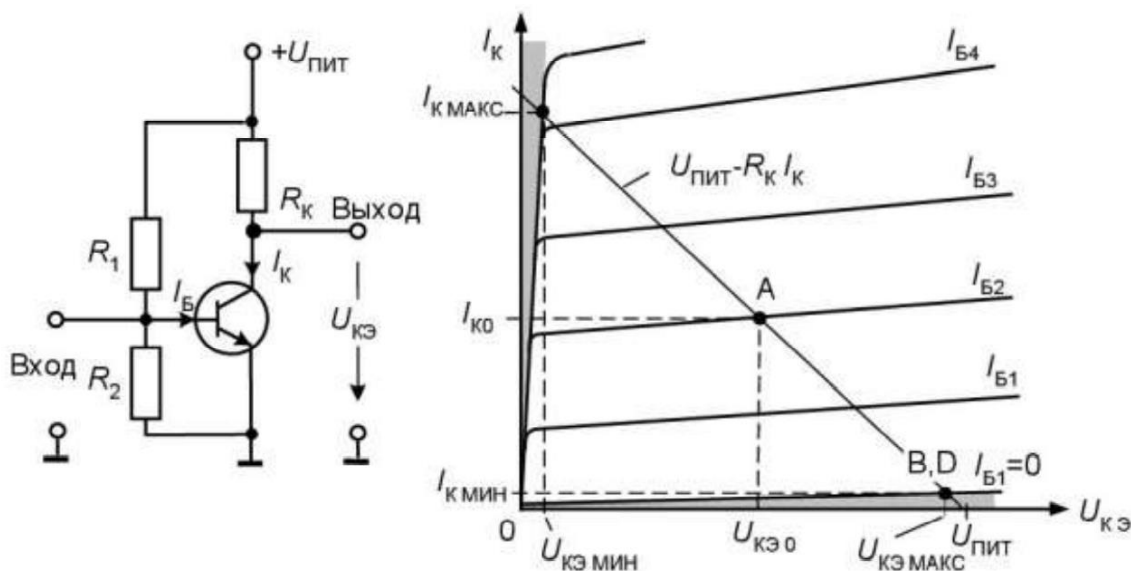


Рисунок 1.2

В классе *AB* точка покоя смещена в сторону зоны отсечки, поэтому часть синусоидального сигнала (меньше полупериода) при усилении «обрезается».

В классе *B* усиливается точно половина синусоидального сигнала. Для этого точка покоя должна выбираться на границе зоны отсечки (точка *B, D*). В действительности её выбирают несколько выше, чтобы избежать искажений, вызванных существенной нелинейностью начального участка входной характеристики транзистора.

В классе *D* транзистор работает в ключевом режиме. Для этого точка покоя выбирается также как и в классе *B* на границе зоны отсечки, но на вход подаётся большой сигнал, чтобы транзистор быстро переходил в режим насыщения. Ещё лучше в этом режиме на вход подавать сигнал прямоугольной формы. Тогда отпадает необходимость в его большой амплитуде. Становится ненужной и цепь, задающая начальное смещение (делитель из резисторов R_1 и R_2), так как при отсутствии входного сигнала транзистор должен быть надёжно закрыт.

Рассмотренные случаи иллюстрируются диаграммами входных и выходных сигналов на рисунке 1.3.

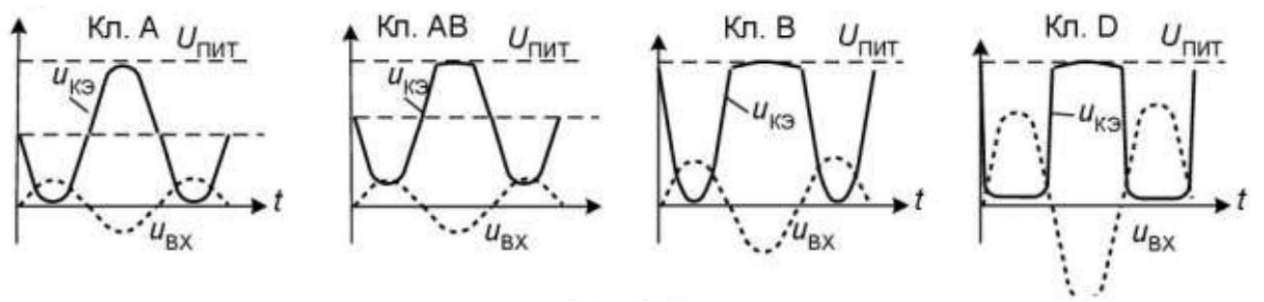


Рисунок 1.3

Экспериментальная часть

Задание

Протестировать **p-n** переходы **p-n-p** и **n-p-n** транзисторов мультиметром в режиме тестирования диодов. Исследовать влияние тока базы на вольтамперную характеристику $I_K(U_{КЭ})$ **p-n-p** транзистора с помощью осциллографа.

Порядок проведения эксперимента

1) Переключите мультиметр в режим тестирования диодов и измерьте падение напряжения на **p-n** переходах транзисторов по приведённым в таблице 1.1 схемам. *Примечание: в режиме тестирования диодов мультиметр измеряет падение напряжения на открытом **p-n** переходе при определённом токе (примерно 1 мА), создаваемом самим прибором. В обратном направлении он показывает обрыв цепи (1 в старшем разряде).*

Таблица 1.1

Схемы измерений								
$\Delta U, \text{ мВ}$								

2) Соберите цепь согласно схеме (рисунок 1.4). В этой цепи между эмиттером и коллектором действуют полуволны синусоидального напряжения, а между базой и эмиттером – регулируемое постоянное напряжение. Диод VD1 включён для защиты эмиттерного перехода транзистора от пробоя при «неправильной» полярности источника постоянного напряжения, а диод VD2 – для исключения обратного напряжения между эмиттером и коллектором.

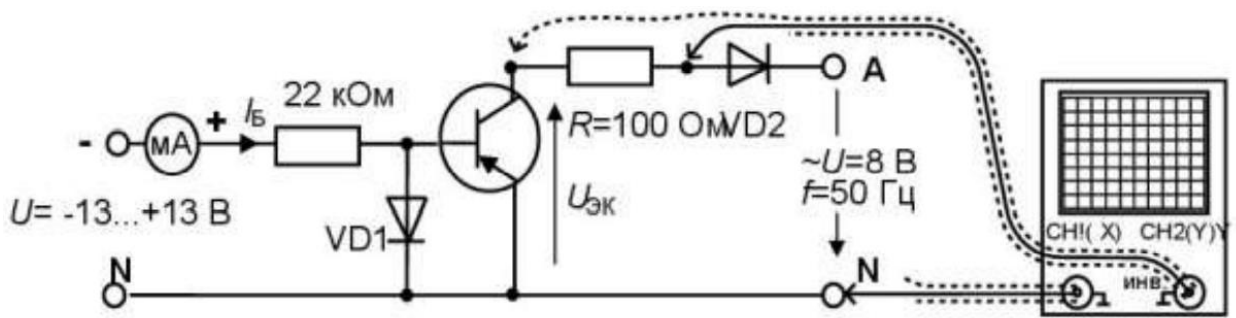
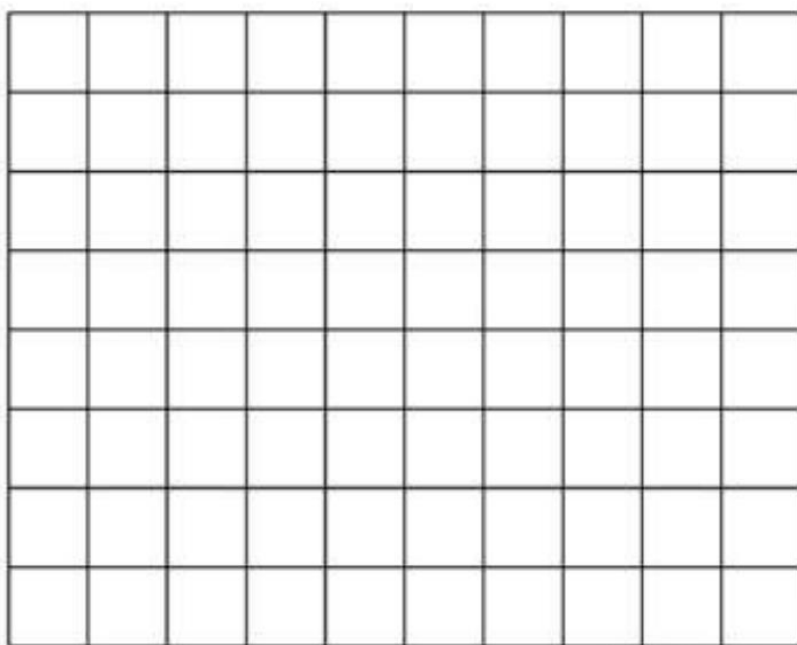


Рисунок 1.4

3) Включите осциллограф, запустите автонастройку, и установите режим XY. Включите инвертирование канала Y для правильного отображения полярности сигнала.

4) Регулируя тока базы от 0 до максимального значения и наоборот, наблюдайте за изменением кривой $I_K(U_{KЭ})$ на осциллографе. При нескольких значениях тока базы (включая нулевое и максимальное) перерисуйте кривую $I_K(U_{KЭ})$ с осциллографа на рисунке 1.5. Не забудьте указать масштабы по осям и токи базы для каждой кривой.

5) На семействе кривых $I_K(U_{KЭ})$ выберите какое-либо постоянное напряжение $U_{KЭ}$ (например, 5 В) и на рисунке 1.6 постройте зависимость $I_K(I_B)$ для этого значения напряжения $U_{KЭ}$. Рассчитайте и на этом же рисунке постройте график $\beta(I_B) = \Delta I_K / \Delta I_B$. Нанесите шкалы по осям.



Масштабы

По каналу X:

$m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По каналу Y:

$m_I = m_U / R \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

Рисунок 1.5

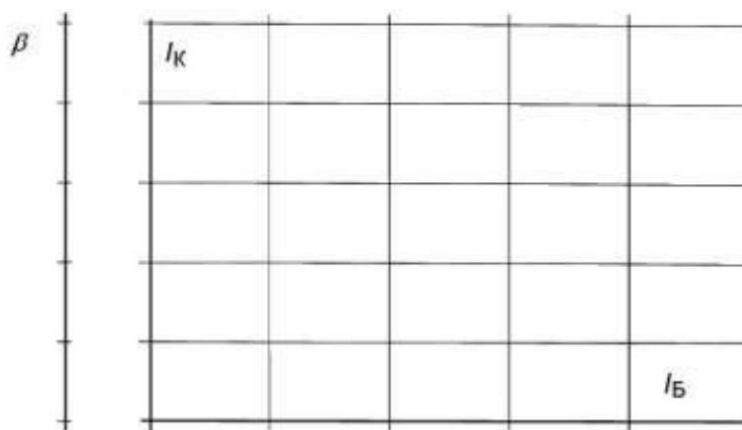


Рисунок 1.6

Задание

Снять экспериментально и построить графики четырех семейств характеристик биполярного транзистора **n-p-n** типа.

Порядок выполнения работы

1) Соберите цепь согласно схеме (рисунок 1.7 или 1.8). Потенциометр 1 кОм используется для регулирования тока базы, резисторы 100 и 47 кОм – для ограничения максимального тока базы. Регулирование напряжения $U_{КЭ}$ осуществляется регулятором источника постоянного напряжения. Для предотвращения подачи обратного напряжения на

транзистор в цепь коллектора включён диод. Переход эмиттер база также защищён шунтирующим диодом. Измерение тока базы I_B и напряжения $U_{БЭ}$ производятся мультиметрами на пределах 200 μ А и 2 В соответственно. Пределы измерения тока коллектора I_K и напряжения $U_{КЭ}$ изменяются в ходе работы по мере необходимости. При сборке схемы предусмотрите перемычки для переключения амперметра из одной ветви в другую.

2) Установите первое значение тока базы 20 А, переключите миллиамперметр в цепь коллектора и, изменяя напряжение $U_{КЭ}$ согласно значениям, указанным в таблице 1.2, снимите зависимости $I_K(U_{КЭ})$ и $U_{БЭ}(U_{КЭ})$. Повторите эти измерения при каждом значении I_B , указанном в таблице.

Примечание: характеристики транзистора изменяются в ходе работы из-за его нагрева. Поэтому для большей определенности рекомендуется установить нужные значения $I_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$, выключить на 30 с блок генераторов напряжений, затем включить его и быстро записать показания приборов V1 и V2.

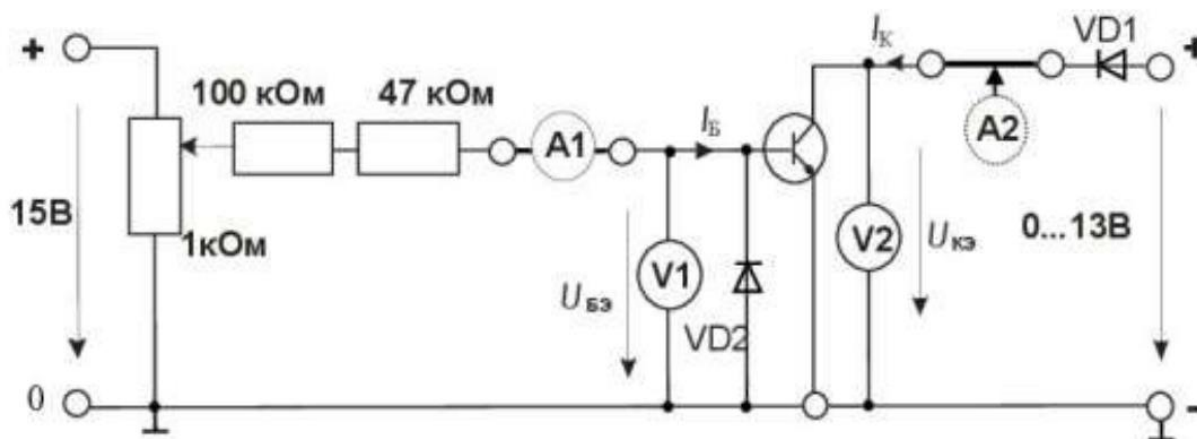


Рисунок 1.7

также и $I_K(I_B)$. Повторите этот опыт также при $U_{KЭ}=15$ В. (При проведении этих измерений также учитывайте примечание к предыдущему опыту).

5) На рисунке 1.10 постройте графики входных $I_B(U_{БЭ})$ и регулировочных $I_K(I_B)$ характеристик, указав для каждой кривой соответствующие значения $U_{KЭ}$.

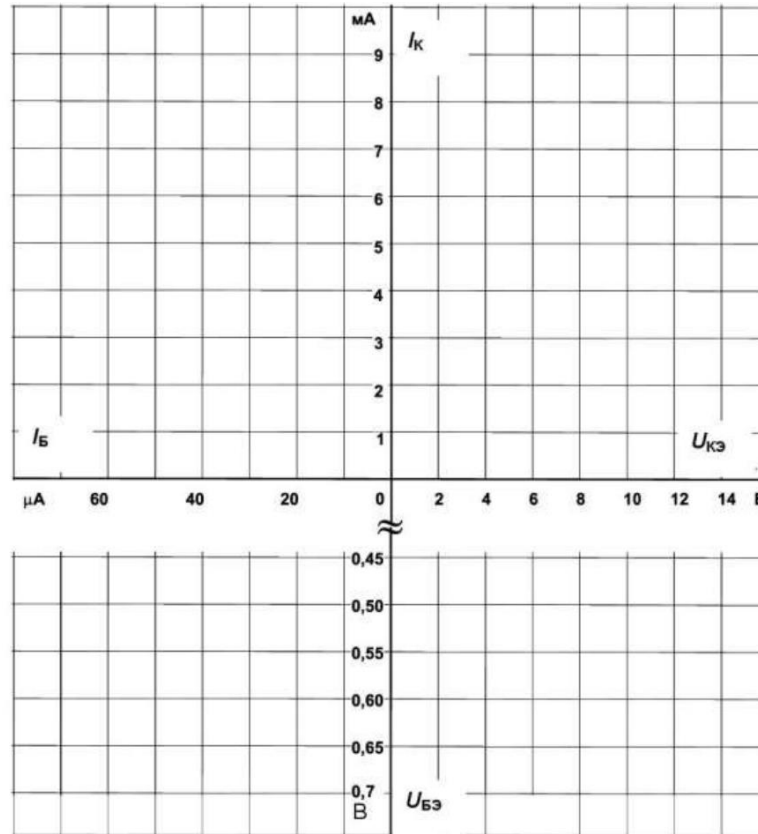


Рисунок 1.10

Задание

Протестировать работу усилителя с общим эмиттером в различных классах усиления. В классах *A* и *B* подобрать оптимально точку покоя и определить максимальную амплитуду неискажённого выходного сигнала и допустимую амплитуду входного сигнала. В классе *D* определить минимальную амплитуду прямоугольного входного напряжения, при которой транзистор надёжно переходит в режим насыщения.

Порядок выполнения работы

1) Соберите цепь согласно рисунку 1.11 и 1.12. В ней постоянный ток базы регулируется потенциометром 1 кОм и ограничивается постоянным сопротивлением тоже 1 кОм. Последовательно с источником переменного сигнала включен конденсатор 1 мкФ для предотвращения протекания через источник постоянного тока и токоограничивающее сопротивление 1 кОм. Диод включён для защиты эмиттерного перехода от обратного напряжения, а сопротивление 10 Ом для стабилизации характеристик транзистора. Измерение входного и выходного напряжений осуществляется осциллографом, а токов - двумя мультиметрами в режиме миллиамперметров.

2) Включите осциллограф для наблюдения по двум каналам одновременно (канал I – 0,5 В/дел., канал II – 5 В/дел). Включите мультиметры для измерения постоянных токов (пределы измерения: ток базы – 2 мА, ток коллектора – 200 мА).

3) Включите блок генераторов напряжений и установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц, а амплитуду сначала равной нулю. Настройте осциллограф, установите и запомните положение линий нулевого сигнала.

4) Изменяя напряжение смещения на базе поворотом ручки потенциометра вправо и влево, наблюдайте по осциллографу за изменением напряжения на коллекторе, а по мультиметрам за изменением токов базы и коллектора. Установите напряжение покоя $U_{кэ 0}$ примерно в середине диапазона его изменения.

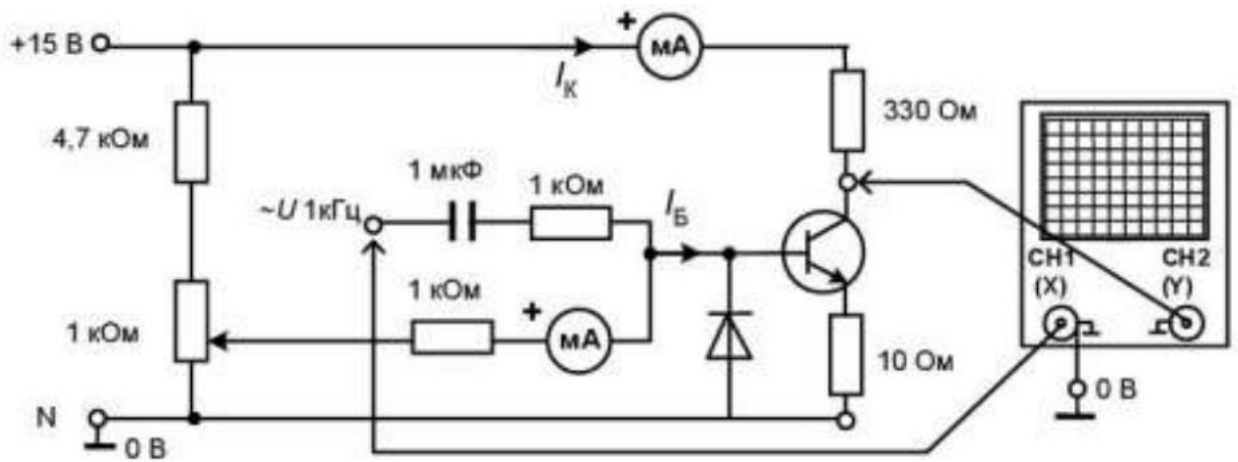


Рисунок 1.11

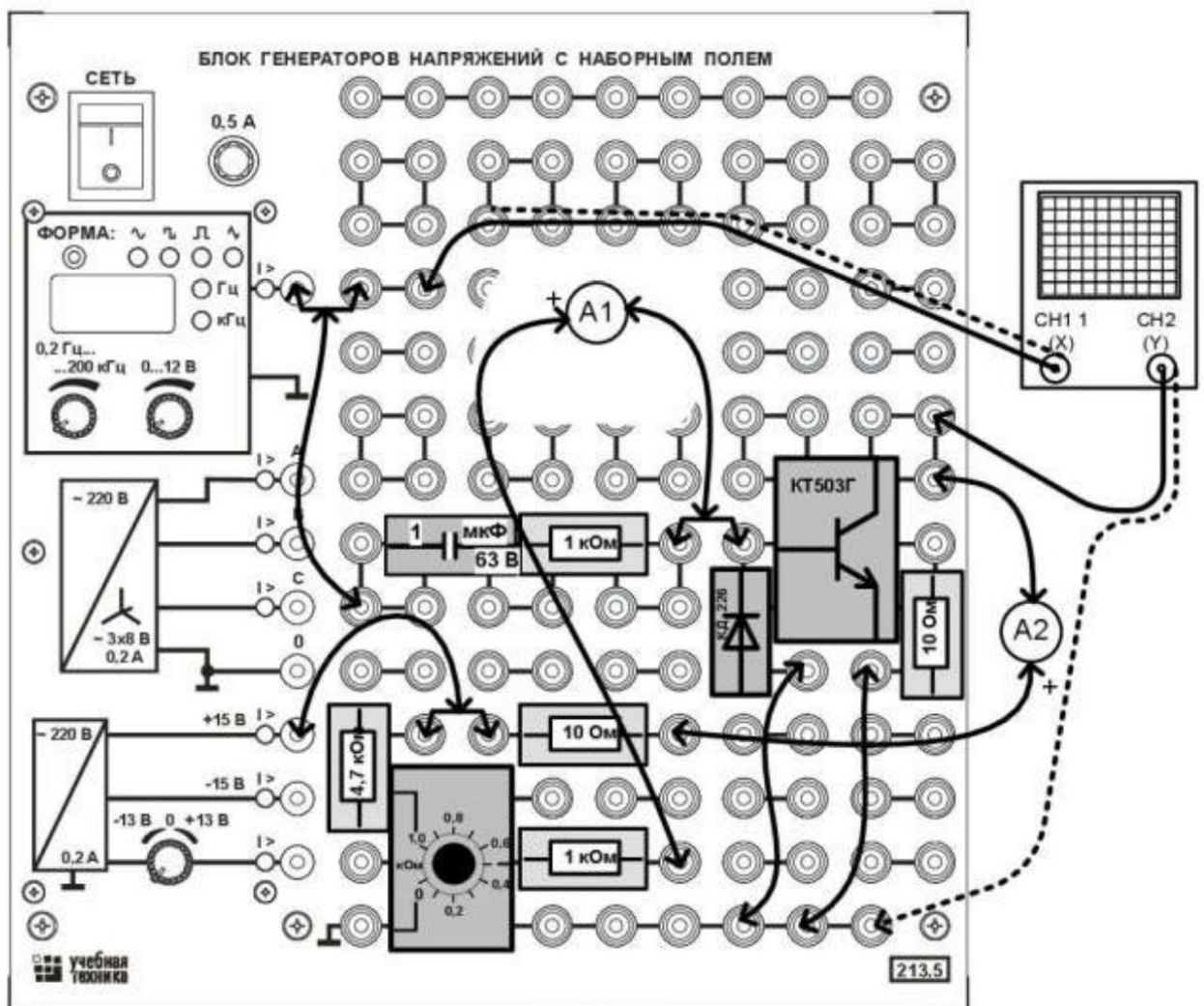


Рисунок 1.12

5) Увеличивая и уменьшая амплитуду синусоидального напряжения на входе усилителя, наблюдайте за изменением выходного сигнала. Уточните

положение точки покоя так, чтобы вершины выходного сигнала начинали уплощаться одновременно.

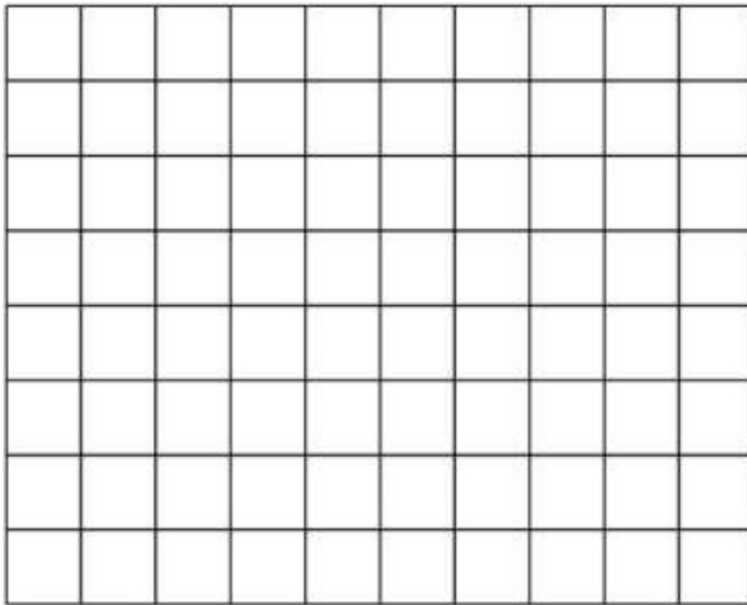
б) Установите на входе максимальный сигнал, соответствующий неискажённому напряжению на выходе, и запишите в таблицу 1.3 токи базы и коллектора и напряжение, амплитуды входного и выходного напряжений, перерисуйте осциллограммы на рисунок 1.13.

7) Регулируя смещение в сторону зоны отсечки (закрывания транзистора), добейтесь, чтобы усиливалась точно половина периода синусоиды. Увеличьте входное напряжения до максимального значения, при котором выходной сигнал не искажается, подкорректируйте ещё раз смещение и запишите в таблицу 1.3 параметры режима усиления в классе В. Перерисуйте кривую выходного напряжения также на рисунок 1.13.

Примечание: $I_{Б0}$, $I_{К0}$ и $U_{КЭ0}$ измеряйте при отключённом входном сигнале!

Таблица 1.3

Класс	$I_{Б0}$, μA	$I_{К0}$, μA	$U_{КЭ0}$, В	$U_{ВХ\text{ МАКС}}$, В	$U_{ВЫХ\text{ МАКС}}$, В
А					
В					
D (~U					



Масштабы:

По каналу I:

$m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По каналу II:

$m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По времени:

$m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$

Рисунок 1.13

8) Увеличивая входной сигнал, убедитесь, что выходной сигнал принимает форму трапеции. Переключите форму входного сигнала с синусоиды на прямоугольник и убедитесь, что выходной сигнал тоже стал прямоугольным. Отключите цель смещения и убедитесь, что выходной сигнал не изменился.

9) Подберите и запишите минимальную амплитуду входного прямоугольного сигнала, при которой транзистор надёжно переходит в режим насыщения.

$U_{\text{мин. прямоуг.}} = \dots\dots\dots \text{В.}$

Контрольные вопросы

- 1) В каких направлениях проводит ток **p-n-p** транзистор и в каких **n-p-n** транзистор?
- 2) Почему с увеличением $U_{кэ}$ ток $I_{к}$ вначале быстро растёт, а затем увеличивается медленно?
- 3) Как зависит коэффициент усиления β от тока базы?
- 4) Что такое область отсечки, область активного усиления и область насыщения на семействе выходных характеристик транзистора?
- 5) Какое явление в транзисторе отражает характеристика обратной связи?
- 6) Как можно построить характеристику управления по семейству выходных характеристик?
- 7) Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
- 8) Как выбирается точка покоя в классах усиления A, AB, B, D ?
- 9) Каковы достоинства и недостатки различных классов усиления?

Список используемых источников

1. Горбачёв Г. Н. Промышленная электроника: Учебник для ВУЗов. — М.: Энерго- атом издат, 1988. — 320 с.
2. Забродин Ю. С. Промышленная электроника: Учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 1982.
3. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и цифровых электронных устройств. — М.: - Издательский дом «Додека-XX1», 2005, - 528 с.
4. Гальперин М. В. Электронная техника: Учебник для среднего профессионально- го образования. — М.: Издательский дом «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2007. — 352 с.