

№ 14

К.В. Дмитриев, С.Н. Сергеев

Работа 3.4. Изучение работы транзисторного усилителя.

Цель работы: Изучить различные режимы работы транзисторного усилителя, освоить базовые навыки технологии National Instruments автоматизации физического эксперимента.

Оборудование: Монтажная плата с собранным транзисторным усилителем на базе транзистора КТ315; комплекс автоматизации измерений NI Elvis; компьютер, звуковые колонки.



Рис. 1. Комплекс автоматизации измерений NI Elvis

Немного истории

Первые патенты на принцип работы транзисторов были зарегистрированы в Германии 1928 на имя Юлий Эдгар Лилиенфельд. В 1934 немецкий физик Оскар Хейл запатентовал полевой транзистор. В 1947 Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор, продемонстрированный 16 декабря. 23 декабря состоялось официальное представление изобретения и именно этот день считается днем открытия транзистора. В 1956 году они были награждены Нобелевской премией по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». Позднее транзисторы заменили вакуумные лампы в большинстве электронных устройств, свершив революцию в создании интегральных схем и компьютеров.

Bell нуждались в названии устройства. Предлагались названия «полупроводниковый триод» (semiconductor triode), «твердотельный триод» (solid triode), «триод на поверхностных состояниях» (surface states triode), «кристаллический триод» (crystal triode) и «lotatron», но слово «транзистор» (transistor), предложенное Джоном Пирсом (John R. Pierce), победило во внутреннем голосовании.

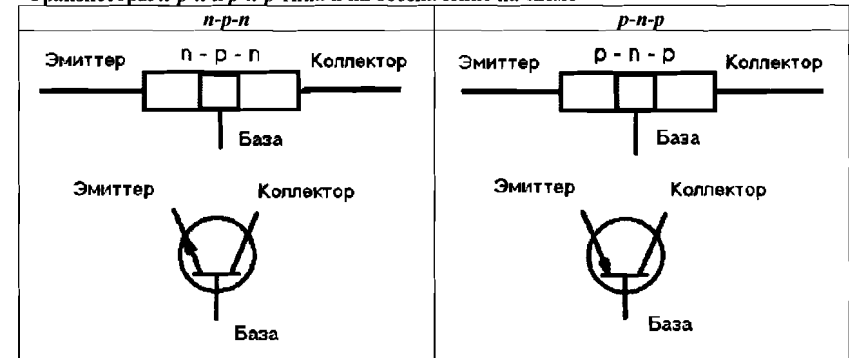
Первоначально название «транзистор» относилось к резисторам, управляемым напряжением. Поскольку транзистор можно представить как некое сопротивление, регулируемое напряжением на одном электроде (в биполярных транзисторах — напряжением на базе или током базы).

Краткая теория.

Транзистор — полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ переходами, лежащий в основе любой современной радиотехники. Можно выделить два принципиально различных классов устройств, в которых используются транзисторы. Первый класс — это цифровые устройства (например, процессоры компьютеров), в которых обрабатываемое напряжение принимать одно из двух строго определенных значений, одно из которых условно принято считать цифрой «0», другое — цифрой «1». Другой класс — это аналоговые устройства, в которых транзисторной схеме приходится преобразовывать любое напряжение в пределах заданного диапазона. Примером такого устройства являются усилители, входящие в любую аудиоаппаратуру, в том числе MP3 плееры. От качества их работы зависит качество звука, который Вы слушаете. В данной работе Вы познакомитесь с работой такого аналогового усилителя и выясните, какие режимы его работы позволяют надеяться получить качественный звук и почему могут появиться искажения.

В зависимости от «направления» включения $p-n$ переходов существуют два типа транзисторов: $n-p-n$ и $p-n-p$. Контакты, подсоединенные к соответствующим областям транзистора, называются «эмиттер», «база» и «коллектор». Названия соответствуют назначению каждой области: эмиттер испускает (по-английски: to emit) носители тока (электроны, если область n -типа или дырки, если область p -типа), коллектор их собирает (по-английски: to collect). Назначение базы — управлять процессом прохождения носителей через транзистор.

Транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$ типа и их обозначение на схеме

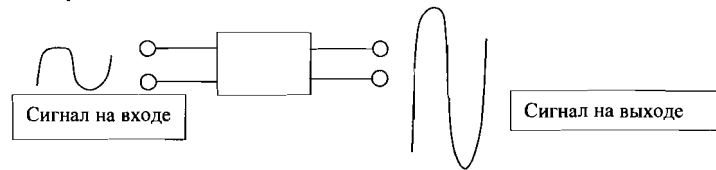


Важно! В нашей работе мы будем использовать транзистор $n-p-n$ типа и формулировать правила работы для него. В случае использования транзистора $p-n-p$ типа содержание правил нужно поменять на противоположное им.

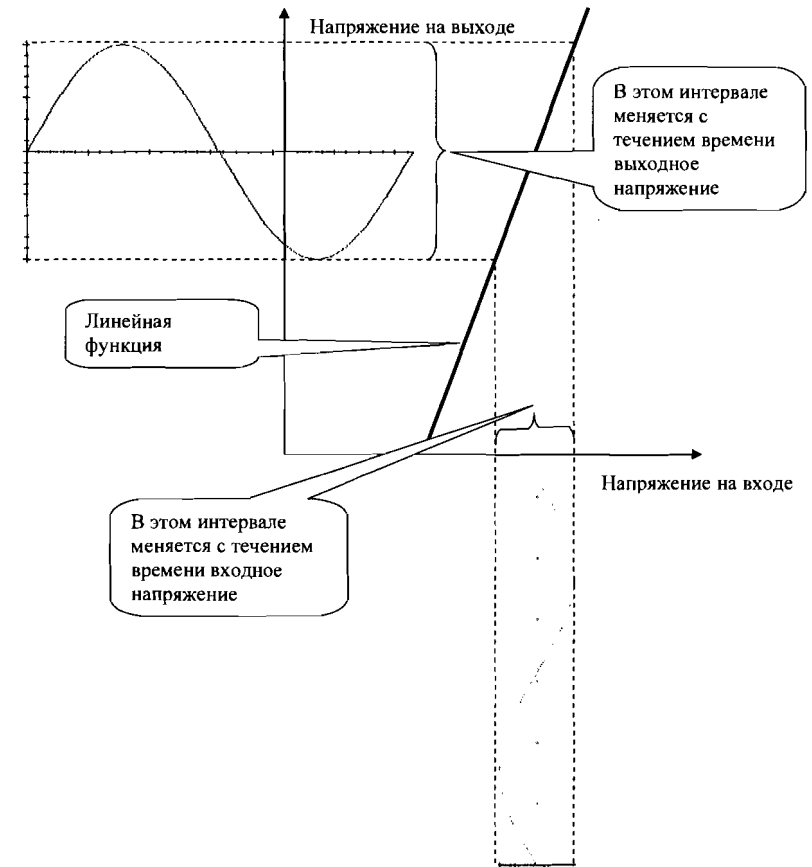
Используемые обозначения. Мы будем обозначать, как это и принято в радиотехнике, ток буквой I , напряжение буквой U . Индекс у буквы обозначает точку, через которую проходит ток: I_E — ток через эмиттер, I_B — ток через базу, I_C — ток через коллектор. Двойной индекс у буквы U означает напряжение между соответствующими точками, например, $U_{КЭ}$ — напряжение между выводами коллектора и эмиттера. Если у буквы U стоит только один индекс, то он обозначает напряжение на соответствующем выводе по отношению к точке в схеме, потенциал которой принят равной нулю. Такая точка называется «землей» и обозначается на схемах символом \perp .

Назначение транзисторного усилителя – за счёт энергии, получаемой от источника питания, увеличивать (усиливать) напряжение на входе схемы в заданное число раз. Для того, чтобы усилитель не вносил искажений, необходимо, чтобы он удовлетворял простому требованию: любое значение входного напряжения в пределах заданного диапазона должно усиливаться в одно и то же число раз. Иными словами, выходное напряжение как функция времени должно быть подобно входному напряжению, где коэффициент подобия называется **коэффициентом усиления транзисторного усилителя**. Если усилитель удовлетворяет этому правилу, то говорят, что он работает в **линейном режиме**.

Принципы функционирования транзисторного усилителя очень просты. Транзистор можно представить себе в виде устройства с двумя входами и двумя выходами (не считая входов питания). Сигнал на выходе должен быть в k раз больше сигнала на входе, величина k называется коэффициентом усиления транзисторного усилителя. В качестве «сигнала» в нашей работе мы будем использовать напряжение, изменяющееся с течением времени.



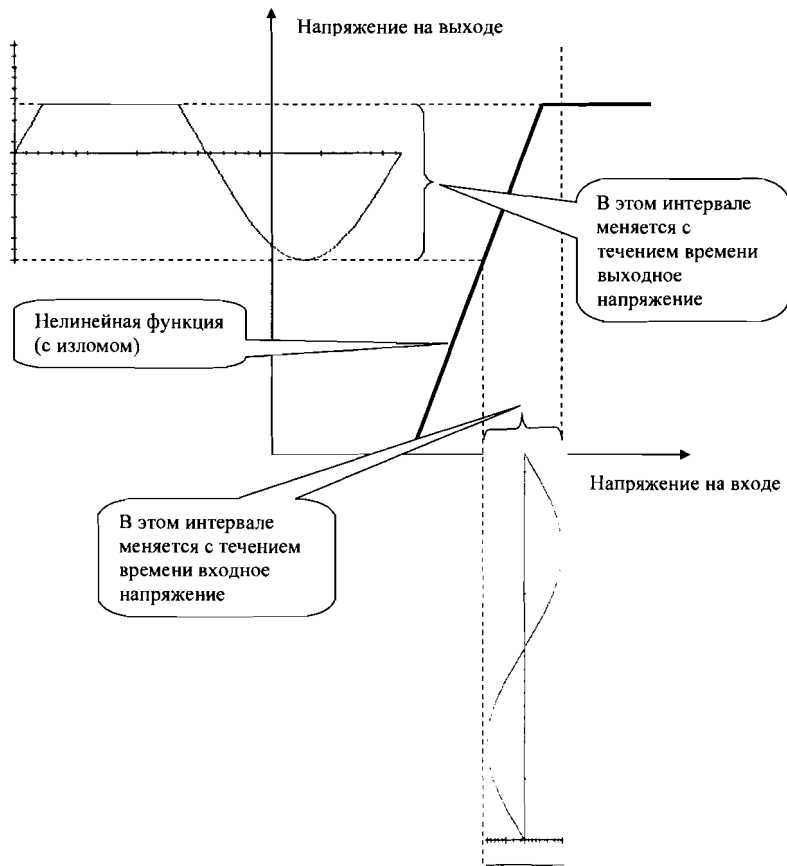
Очень важно, чтобы усилитель не искажил форму сигнала. Режим, в котором форма сигнала не искажается, называется **линейным режимом работы усилителя**. Почему



линейным? Дело в том, что только линейная функция (в частном случае – прямая пропорциональность) обеспечивает сохранение формы сигнала. Проиллюстрируем сказанное следующим рисунком. Пусть у нас напряжение на входе меняется с течением времени по синусоидальному закону. Если его преобразует линейная функция, то выходное напряжение тоже будет меняться по синусоидальному закону, его амплитуда в k раз больше амплитуды входного синуса. Чисто математически величина k определяется наклоном прямой, физически – тем, как собрана схема усилителя.

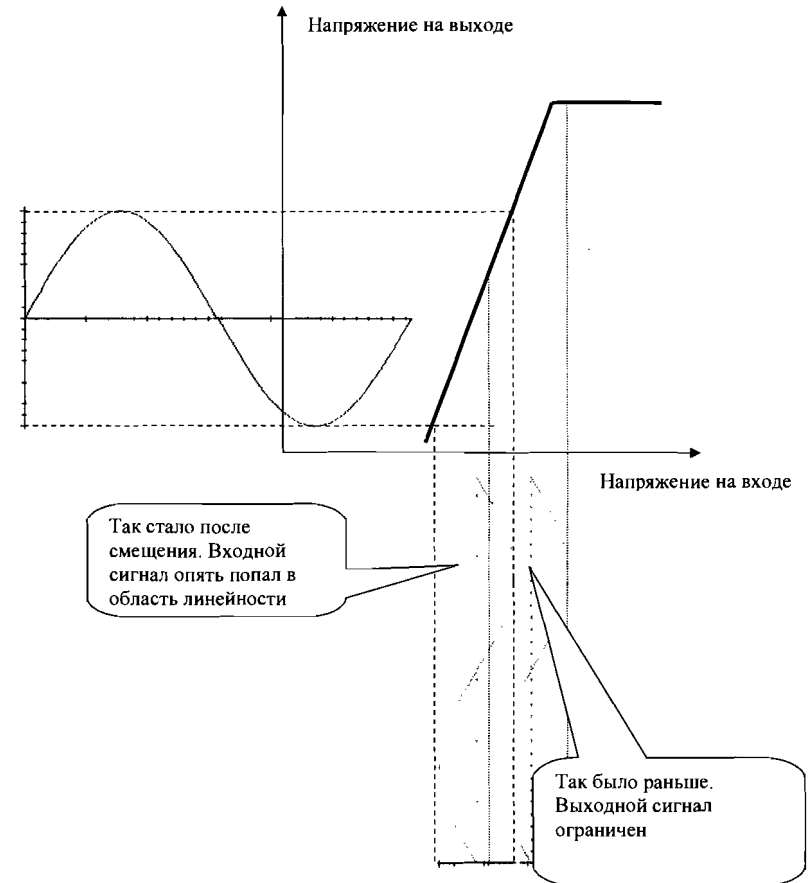
К сожалению, транзистор может обеспечить линейность преобразования только для некоторого диапазона напряжений. Действительно, при приложении к $p-n$ переходу прямого (так, чтобы он был переход был открыт) напряжения, мы получим ток, который обеспечивается носителями заряда – электронами и дырками. При увеличении приложенного напряжения ток возрастает, но лишь до той поры, пока все имеющиеся дырки и электроны не придут в движение. После этого увеличение напряжения не

приведёт к увеличению тока: новым носителям заряда просто неоткуда взяться. Модель такой зависимости тока от приложенного напряжения рассматривается на следующем рисунке.



Рассмотрим, что произойдёт, если входной сигнал выйдет за область линейности. На рисунке верхняя часть входного синуса попала на излом функции. В результате выходной синус получился искажённым. Про такую ситуацию говорят, что возникло ограничение сигнала.

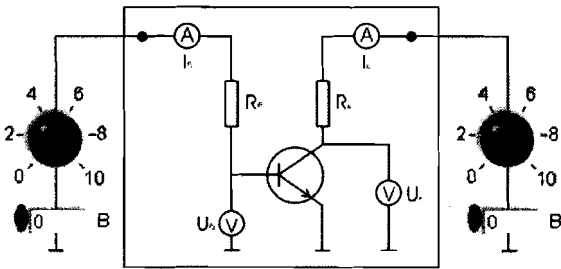
Можно ли бороться с такими искажениями? В приведённом примере – можно. Обратим внимание на то, что если сместить весь входной синус вдоль координатной оси влево, то он попадёт в область линейности (см. следующий рисунок).



Поскольку $p-n$ переход в обратную сторону ток не пропускает, то функция зависимости тока от напряжения в нижней части тоже испытывает излом, поэтому, если бы мы сместили входной сигнал слишком далеко, то опять возникло бы ограничение синуса, только уже с другой стороны. Значит, лучше всего будет, если входной синус расположится так, что его ноль попадёт точно в середину области линейности. Это достигается подачей на вход соответствующего постоянного напряжения. Процедура установки такого напряжения называется **ВЫБОРОМ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ**.

Рассмотрим схему усилителя, используемую в данной работе. В ней входной сигнал (напряжение) подаётся на базу транзистора через базовый резистор R_b . Постоянное напряжение можно менять, вращая ручку потенциометра или щёлкая «мышкой» расположенный под ним цифровой индикатор (и то и то вызывает одинаковое действие – пользуйтесь, чем удобнее). В тех случаях, когда понадобится использовать другой входной сигнал, его можно будет подключить последовательно с этим постоянным напряжением. Ещё раз обратим внимание, что выражение «подаём напряжение на...»

означает, что напряжение подаётся относительно «земли». Все «земли» на реальной схеме



соединены проводником,

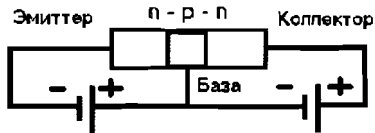
например, «земля» входного сигнала и «земля» эмиттера.

Выходной сигнал снимается с коллектора транзистора (на нашей схеме к этой точке подсоединён вольтметр, снимающий напряжение U_k). Второй контакт вольтметра подключён к «земле» и через неё сообщается с эмиттером транзистора. Таким образом, эмиттер в нашей схеме подключён через «землю» и к входному и выходному сигналу. Такая схема транзисторного усилителя называется **схемой с общим эмиттером**, это самая распространённая схема транзисторного усилителя.

Правильный выбор рабочей точки состоит в том, чтобы напряжение на коллекторе было равно ПОЛОВИНЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ, в этом случае выходной сигнал не исказится, если его амплитуда будет достигать $\frac{1}{2}$ напряжения питания. Само напряжение питание устанавливается с помощью второго потенциометра. Таким образом, **ВЫ МОЖЕТЕ УПРАВЛЯТЬ РАБОТОЙ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ, РЕГУЛИРУЮ НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ И НАПРЯЖЕНИЕ НА БАЗЕ.**

Изменение с помощью регулировок напряжения между электродами транзистора (база-эмиттер и база-коллектор) приводит к тому, что соответствующие *p-n* переходы могут быть открыты или закрыты (пропускать или не пропускать ток). *p-n* переход открыт, если к области *p* приложен потенциал больший, чем к области *n*. В зависимости от того, какой из двух переходов транзистора открыт, а какой закрыт, выделяют три основных режима работы транзистора.

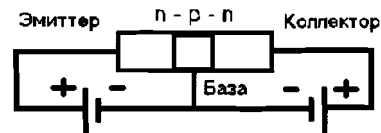
1. Линейный режим.



В этом режиме напряжения подбираются таким образом, что переход «база-эмиттер» оказывается открытым, а переход «база-коллектор» - закрытым. В таком режиме небольшой ток базы управляет большим током коллектора: $I_k = \beta I_b$, $\beta \gg 1$, что приводит к основному свойству транзистора - усиливать сигналы. Помимо полярности приложенного напряжения необходимо следить за выбором рабочей точки с тем, чтобы подаваемое на вход (то есть между базой и эмиттером) уже изменяющееся напряжение сигнала, подлежащего усилению, не переключило соответствующий переход в «неправильное» направление.

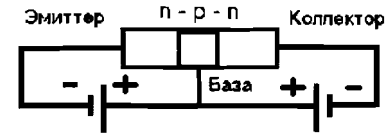
2. Режим отсечки.

Если закрыт не только переход база-коллектор, но и база-эмиттер (который должен быть открыт в



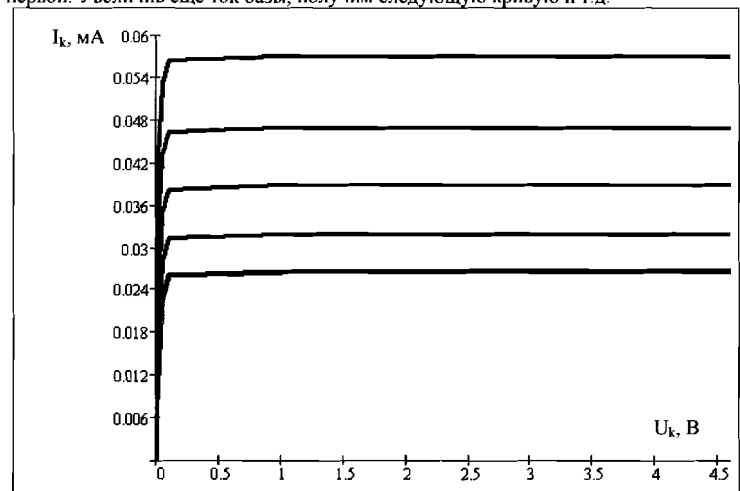
линейном режиме), то транзистор находится в режиме отсечки. Ток через него практически не идёт, и схема неспособна усилить сигнал. Во время выполнения работы Вы сразу поймёте, когда транзистор оказался в режиме отсечки по тому, что пропадёт выходной сигнал, например, исчезнет звук из подсоединённых к усилителю колонок.

3. Режим насыщения.



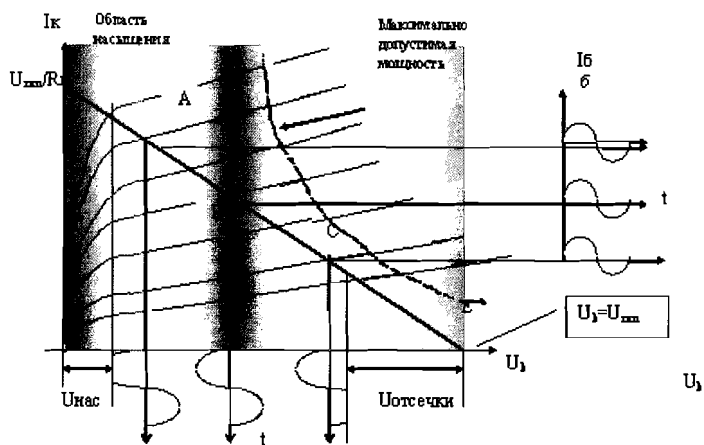
Если, наоборот, оба перехода оказались открытыми, то транзистор оказался в режиме насыщения. В этом режиме все свободные носители заряда (дырки и электроны), формирующие ток в области «база-коллектор», уже «задействованы», а значит, если входной сигнал увеличится, то выходной уже не сможет - для этого просто не будет «дополнительных» носителей тока.

Всё сказанное иллюстрируют выходные вольтамперные характеристики транзистора - зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе при различных величинах токов базы. Получаются они так. Задаётся некоторый ток через базу, а напряжение на коллекторе меняется от нуля до некоего значения. Получается линия, показанная на графике. Теперь немного изменим ток базы, например, увеличим его. Новому значению тока базы соответствует другая кривая на графике, расположенная выше первой. Увеличив ещё ток базы, получим следующую кривую и т.д.



Теперь вспомним, как работает усилитель: изменение тока через базу должно приводить к изменению тока через коллектор: $I_k = \beta I_b$. Изменяя ток базы, мы как бы переходим с одной кривой на графике на другую, ведь каждая из них построена для определённого тока базы. Как изменяется коллекторное напряжение? Изменение тока базы I_b приводит к изменению коллекторного тока I_k . Для заданной величины напряжения питания $U_{пит}$ коллекторное напряжение равно разности напряжения питания и напряжения, падающего на коллекторном резисторе: $U_k = U_{пит} - R I_k$. Это уравнение можно записать «наоборот»: как зависимость коллекторного тока от напряжения на коллекторе: $I_k = (U_{пит} - U_k) / R$. Это - уравнение прямой, которая нарисована на графике выходных характеристик синим

цветом. Меняя ток коллектора (он, напомним, управляется током базы), мы меняем величину коллекторного напряжения. В каких пределах? Если коллекторный ток равен нулю, ток через коллектор, а следовательно, и коллекторный резистор не течёт, тогда напряжение на коллекторе равно напряжению питания (точка Е на графике). Но почему нет тока через транзистор? Потому что оба *p-n* - перехода оказались закрыты, то есть транзистор оказался в **режиме отсечки** (красная область на графике). Наоборот, можно сделать коллекторный ток максимальным (он для заданного напряжения питания ограничивается величиной коллекторного резистора), тогда всё напряжение упадёт на резисторе, потенциал коллектора будет не сильно отличаться от потенциала «земли». Это в *n-p-n* транзисторе приводит к открытию коллекторного перехода, транзистор оказался в **режиме насыщения** (синяя область на графике).



Важно, чтобы в процессе работы транзистор не попал в такие режимы. Для этого выберем рабочую точку так, как это предлагалось ранее: чтобы напряжение на коллекторе равнялось половине напряжения питания. На рисунке это соответствует точке В. Изменения тока базы (график справа от основного графика) через изменение коллекторного тока приводят к изменению напряжения на коллекторе (график снизу от основного графика). Существенно здесь то, что в некоторой области (условно говоря, между точками А и С на графике) выходные характеристики транзистора находятся на равном расстоянии друг от друга, если соответствующие им токи базы отличаются на одну и ту же величину. Иными словами, увеличение базового тока на какую-то величину приводит к такому же (с точностью до знака) изменению коллекторного напряжения, что и уменьшение базового тока на ту же величину. Это – **линейный режим** работы транзистора (зелёная область на рисунке).

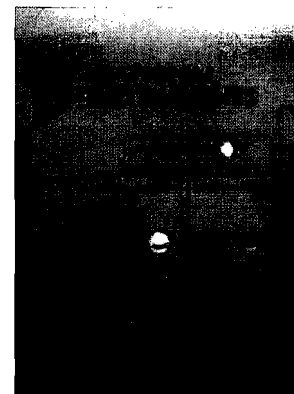
Сдвиг рабочей точки в область А или С на графике приведёт к тому, что линейность нарушится, и коллекторное напряжение будет искажено.

Другой важной характеристикой транзисторного усилителя является его **входная характеристика** – зависимость тока базы от напряжения на базе. Если эта характеристика линейна, то можно говорить о входном сопротивлении каскада – отношении базового напряжения к току. Величина входного сопротивления определяет возможность

подключения усилителя к источнику сигнала, который всегда характеризуется своим выходным сопротивлением (аналог внутреннего сопротивления источника, если рассматривать источник сигнала как батарейку – источник ЭДС). Выходное сопротивление источника и входное сопротивление усилителя оказываются соединены последовательно и «делают» между собой напряжение выдаваемое источником. Если сопротивление усилителя окажется меньше выходного сопротивления источника, то ему достанется небольшая часть напряжения источника – всё упадёт на выходном сопротивлении источника.

Правила работы транзистора *n-p-n* типа в линейном режиме.

1. Потенциал коллектора выше потенциала эмиттера: $U_K > U_E$. Фактически это означает, что, подсоединяя схему к источнику питания, нужно следить, чтобы «плюс» источника подходил к коллектору (возможно, через какие-то элементы схемы), а «минус» - к эмиттеру.
2. Переход «база-коллектор» - закрыт, а переход «база-эмиттер» - открыт. Достиж этого можно, естественно, только подбором знака напряжения между соответствующими выводами, для чего используются резисторы.
3. Нужно помнить, что каждый транзистор имеет свои предельные значения I_K , I_B , $U_{KЭ}$ и рассеиваемой мощности $I_K \cdot U_{KЭ}$. За превышение этих значений приходится расплачиваться новым транзистором.
4. Основное правило работы транзисторного усилителя. Если выполнены правила 1-3, то ток коллектора связан с током базы соотношением $I_K = \beta I_B$. Величина β называется коэффициентом усиления транзистора по току (не путать с коэффициентом усиления транзисторного усилителя, который характеризует усиление напряжения). Коэффициент усиления по току определяется самим транзистором и указывается в справочниках, коэффициент усиления транзисторного усилителя определяется схемой, в которую включён транзистор (номиналом используемых резисторов) и рассчитывается на этапе проектирования схемы исходя из задач, которые должен решать конкретный усилитель.
Поскольку величина β у транзистора велика (порядка 100-300), то основное правило работы определяет и основное свойство усилителя: небольшой ток базы управляет большим током коллектора.
5. Известно, что на открытом *p-n* переходе у германиевого транзистора падает примерно 0,7 В, у кремниевого (используемого в нашей установке) 0,6 В. Такое напряжение в нашей схеме должно падать на открытом переходе «база»-«эмиттер».



Практическая часть.

Включите компьютер, модуль Элвис. Для включения Элвиса необходимо включить тумблер на задней панели прибора и на передней панели, при этом загораются индикаторы на передней панели.

Внимательно изучите схему усилителя, с которым Вам предстоит работать. Найдите на монтажной плате все элементы, обозначенные на схеме.

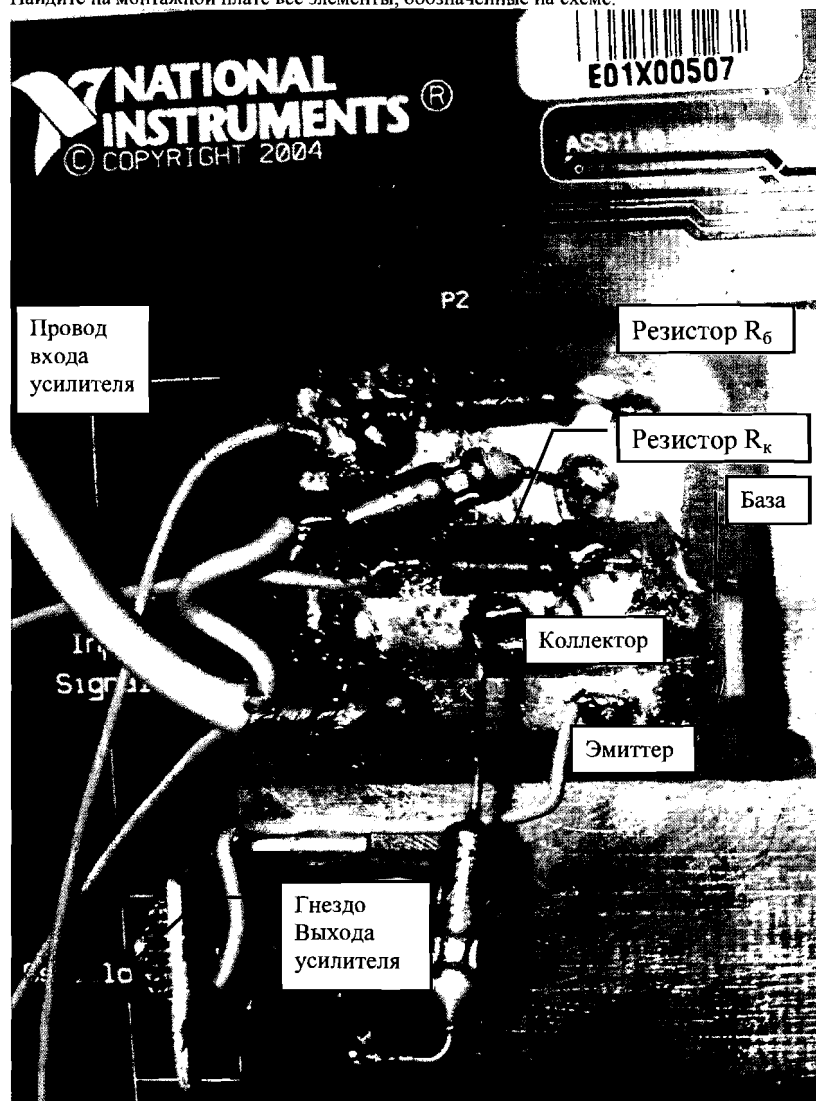
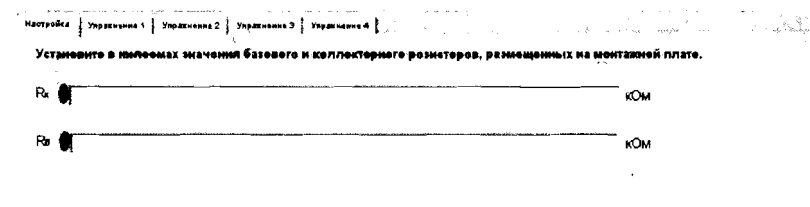


Рисунок 2. Расположение элементов на монтажной плате

Запустите программу. Набор упражнений отображается в виде меню с закладками, на которой выписан номер упражнения.

Выберите закладку «Настройка». Посмотрите номиналы резисторов, расположенных на монтажной плате, и введите их в соответствующие позиции, а также запишите значения в тетрадь. Все величины надо вводить в кОм.



Только после этого переходите к упражнениям.

Упражнение 1. Измерение коэффициента усиления транзистора по току и изучение работы транзистора в разных режимах.

№	Напряжение питания, В	Ток базы, мА	Ток коллектора, мА	Коэффициент усиления по току

Радиотехническая схема упражнения 1 позволяет Вам менять напряжение питания $U_{пит}$, а также напряжение U_b , подаваемое на резистор базы, в пределах от 0 до +10 В. Подготовьте следующую таблицу.

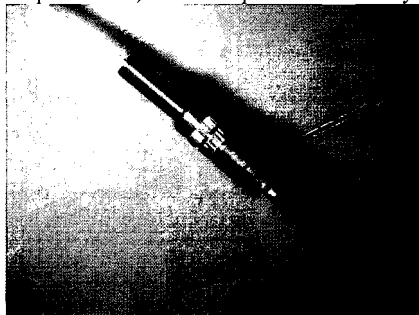
№	Напряжение питания, В	Ток базы, мА	Ток коллектора, мА	Коэффициент усиления по току β

Перед началом измерений убедитесь, что к транзисторному усилителю не подключены никакие внешние устройства.

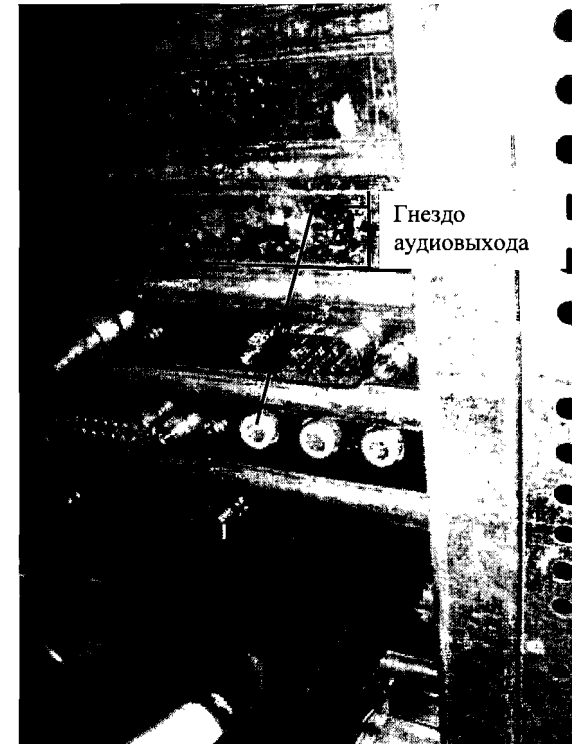
1. Установите максимальное значение напряжения $U_{пт}$. Изменяя напряжение U_6 , добейтесь оптимального режима работы транзистора, при котором коллекторное напряжение U_k будет примерно равно $\frac{1}{2} U_{пт}$. Нажатием кнопки «Добавить» зафиксируйте полученный результат в таблице на мониторе компьютера и перепишите полученные значения в тетрадь. Если Вам понадобится удалить какое-то значение из компьютерной таблицы (здесь и в последующих упражнениях), то сперва удалите, используя клавиатуру компьютера, из этой таблицы номер измерения, потом нажмите кнопку «Удалить».
2. Повторите измерение два раза при других значениях $U_{пт}$.

Пояснение к работе компьютерного измерительного комплекса. Включённые в схему амперметры измеряют токи I_k и I_6 , после чего программа находит их отношение – коэффициент усиления по току β . Каждое измерение программа проводит 100 раз и выводит в таблицу среднее значение с рассчитанной среднеквадратичной погрешностью (но без округления до соответствующей значащей цифры – это Вы сделаете сами, переписывая результаты в тетрадь).

3. Убедитесь, что в линейном режиме работы транзистора β практически не зависит от значения $U_{пт}$. Для этого оцените по данным Ваших измерений, среднее значение β и его относительную погрешность.
4. «Загоните» транзистор в режимы насыщения и отсечки, меняя напряжение U_6 (при этом не уменьшайте это напряжение до нуля: в установке всё равно будут протекать шумовые токи, поэтому результат расчёта в этом случае будет неправильным). Измерьте величину β в этих режимах.

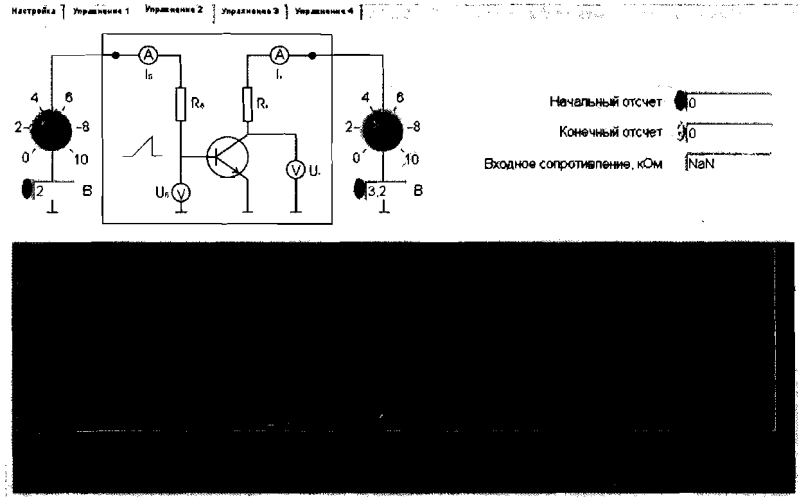


Штекер для подключения источника звука (втыкается в собственный плеер или в аудиовыход на звуковой плате компьютера для



5. Если у Вас есть MP3-плеер, используйте его в качестве источника звука, при отсутствии – используйте плеер компьютера. Подключите звуковые колонки к выбранному источнику звука. Послушайте небольшое музыкальное произведение. Теперь используйте усилитель, предварительно установив $U_{пт}$ на максимальное значение. Подключите источник звука к входу усилителя, колонки – к выходу. Изменяя величину U_6 , добейтесь наиболее чистого звучания на слух. Сравните выставленное при этом значение U_6 с тем, которое Вы получали для оптимального режима работы транзистора в пункте 1. Объясните результат сравнения и запишите его в тетрадь. Запишите значение U_k . Сравните на слух громкость звучания музыки при непосредственном подключении колонок к источнику звука и при подключении через усилитель. Запишите результат сравнения (как Вы его воспринимаете) в тетрадь.
6. Не отключая колонки и источник звука, «загоните» транзистор в режимы насыщения и отсечки. Оцените на слух качество звучания, опишите свои ощущения в тетрадь. Объясните причину появившихся искажений. Обратите внимание, вводя транзистор в отсечку, что когда U_6 уменьшается до примерно 0,6 В, звучание музыки прекращается. Объясните этот эффект (Объяснение запишите в тетрадь).

Упражнение 2. Измерение входной характеристики транзисторного усилителя



Радиотехническая схема упражнения 2 позволяет Вам менять амплитуду пилообразного (то есть изменяющегося от 0 до амплитудного значения линейно с течением времени) напряжения U_b в пределах от 0 до +10 В.

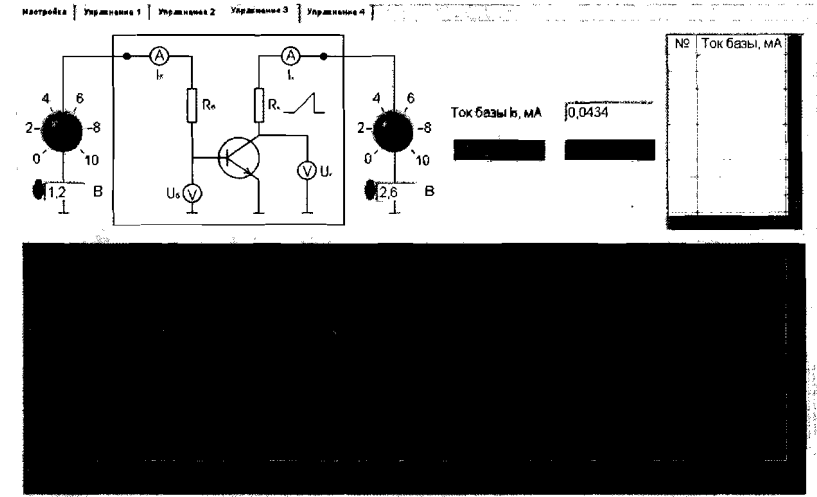
Перед началом измерений убедитесь, что к транзисторному усилителю не подключены никакие внешние устройства.

1. Установите максимальное значение напряжения U_b . Программа автоматически подаст на схему напряжение U_b в 100 точках при изменении от 0 до выставленного значения с равным шагом и измерит протекающий базовый ток I_b . По полученным значениям будет построен график $I_b(U_b)$ – входная характеристика транзисторного усилителя. Внимательно изучите полученный график. Обратите внимание, что при напряжении $U_b \approx 0,6$ В на графике наблюдается излом. Объясните полученный результат. Перерисуйте получившийся график в тетрадь.
2. Измерьте входное сопротивление усилителя. Используйте следующий метод измерения. Замените каждый из участков графика отрезком прямой. Для этого в окне программы «Начало линии» и «Конец линии» введите значения номеров начальной и конечной точек выбранного участка, ориентируясь на имеющийся график. Программа построит отрезок прямой, рассчитывая его методом наименьших квадратов (о методе наименьших квадратов можно прочитать в пособии С.Н.Сергеева «Обработка результатов физического эксперимента в лаборатории физического практикума»). Наклон полученной прямой определяется входным сопротивлением: $R_{вх} = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b}$, которое рассчитывается программой.

Запишите полученное значение в тетрадь. Из-за наличия излома на графике Вы определите два входных сопротивления. Какое из них, по Вашему мнению, имеет практическое значение?

3. Повторите измерения при другом значении U_b .

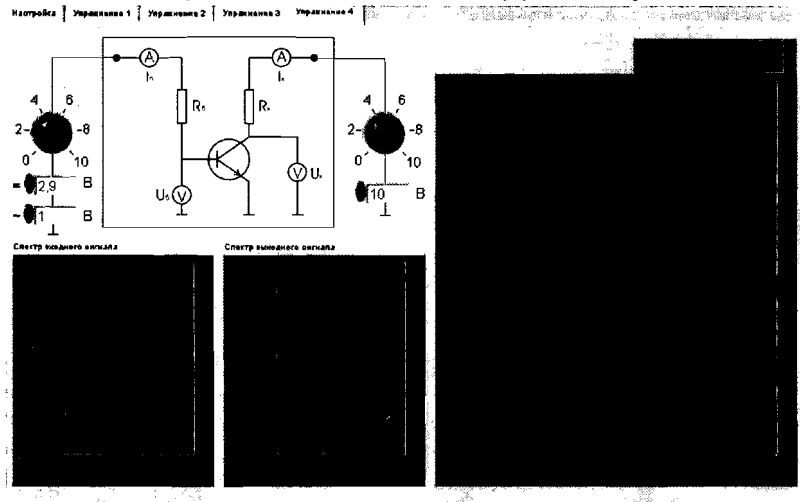
Упражнение 3. Измерение выходной характеристики транзисторного усилителя



Радиотехническая схема упражнения 3 позволяет Вам менять амплитуду пилообразного напряжения $U_{пит}$ в пределах от 0 до +10 В.

1. Установите максимальное значение напряжения $U_{пит}$. Установите какое-либо значение $U_b > 0,6$ В. Программа автоматически подаст на схему напряжение $U_{пит}$ в 100 точках при изменении от 0 до выставленного значения с равным шагом, построит график зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе и измерит протекающий базовый ток I_b . Нажмите кнопку «Добавить». Построенный график будет запомнен программой, в таблицу занесён измеренный ток базы. Изменяя значение U_b , постройте семейство из 5 графиков. Как и в предыдущих упражнениях, удаление ненужных графиков производится путём стирания номера ненужного графика в таблице и нажатием кнопки «Удалить». Зарисуйте полученные характеристики в тетрадь, указав для каждой из них значения базового тока. Проведите на графике нагрузочную прямую и определите приблизительно область работы транзистора в линейном режиме, режимах насыщения и отсечки.
2. Удалите все графики, кроме одного. Нагрейте транзистор, освещая его лампочкой. Убедитесь, что выходная характеристика «поползла». Подумайте, к каким последствиям это может привести. Объясните, каким образом можно избежать изменения характеристик усилителя в процессе работы.

Упражнение 4. Наблюдение прохождения сигнала через транзисторный усилитель и измерения коэффициента усиления



1. Установите значение $U_{\text{пит}}$ таким же, каким оно было в упражнении 1.
2. Подайте на усилитель синусоидальный сигнал, его форму Вы можете видеть на нижней осциллограмме.
3. Рассмотрите неискажённый сигнал на верхней осциллограмме. Измерьте амплитуды обоих сигналов и найдите коэффициент усиления Вашей установки. Результаты запишите. Что можно сказать о фазе выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала? Убедитесь, что неискажённый сигнал появляется при том же значении $U_{\text{б}}$, что и в упражнении 1.
4. Измените значение $U_{\text{б}}$ до тех пор, пока не появятся искажения. Посмотрите форму искажённого сигнала.