

[КАК СТАТЬ АВТОРОМ](#)**3353.13**

Рейтинг

RUVDS.comVDS/VPS-хостинг. Скидка 15% по коду **HABR15**[Подписаться](#)**engine9**

1 авг 2024 в 16:00

Эмиттерный повторитель — ключ к пониманию работы транзисторных каскадов

Средний

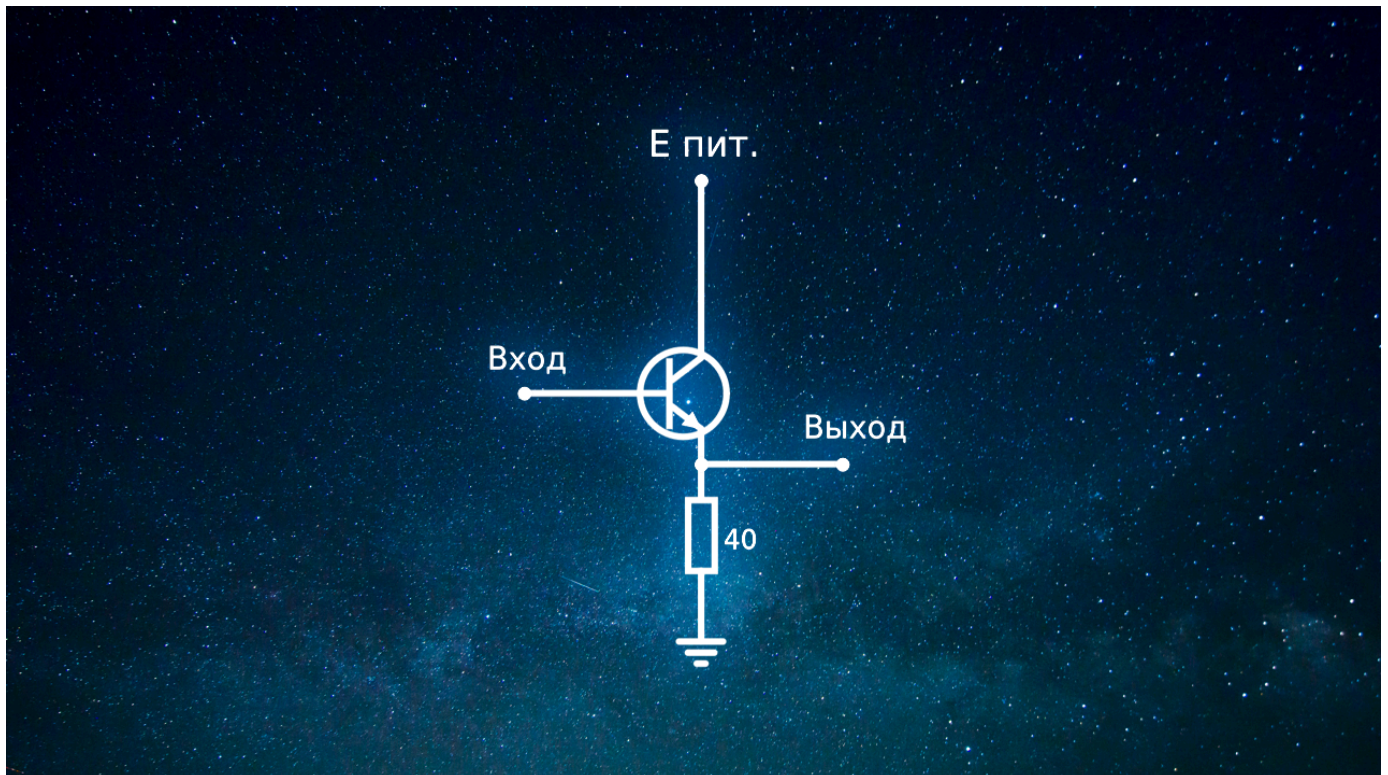
9 мин

53K

Блог компании RUVDS.com, Производство и разработка электроники*, Схемотехника*, Электроника для начин.

[Обзор](#)

Технотекст 7



Привет, эту публикацию я хочу посвятить людям, кто, как и я, любил в детстве читать журнал «Радио» и книги по электронике, но не смог сам разобраться в принципах работы усилителей на биполярных транзисторах. Тема полупроводников не проста и требует понимания многих чуждых для нашей повседневной интуиции физических процессов. Я

помню момент озарения, когда я понял принцип схемотехнического решения эмиттерного повторителя, и именно с него пошло постепенное понимание, как функционируют и другие типы транзисторных каскадов. И я предполагаю, что эта тема может стать точкой входа в аналоговую электронику не только для меня.

■ Предыстория

При чтении форумов я замечал, что некоторые люди жалуются на непонимание принципов работы транзисторов. Видел множество неправильных объяснений и заблуждений. Чем больше я изучаю тему аналоговой электроники, тем больше нахожу подтверждений тому, что человеческому разуму очень непросто даётся понимание физических явлений микромира. А полупроводниковые устройства буквально работают на законах взаимодействия атомов и элементарных частиц. Эти маленькие корпусированные кристаллики кремния дают возможность в домашних условиях косвенно «пощупать» квантовые эффекты!



Запас кремниевых и германиевых транзисторов

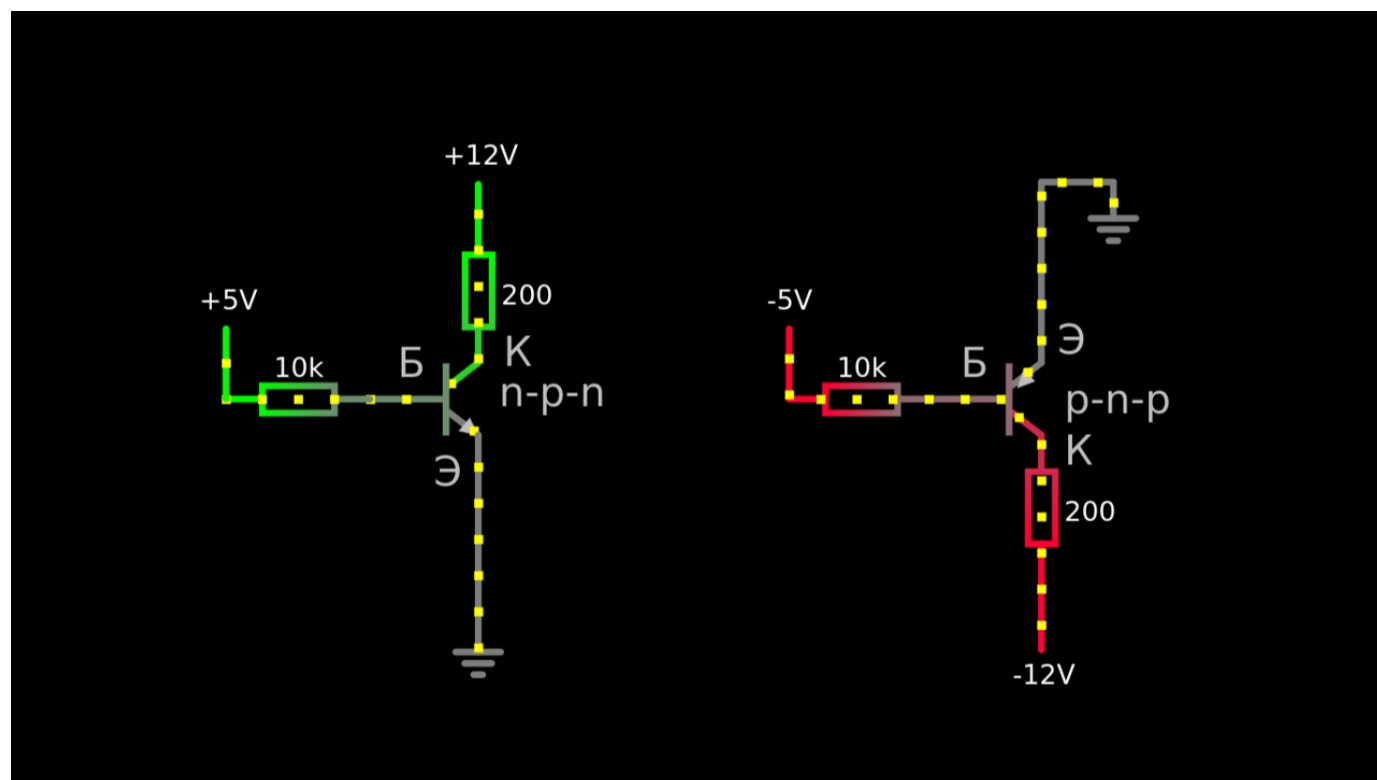
Так как у меня нет профильного образования инженера-электроника, моя картина знаний о полупроводниках формировалась с детства стихийно, фрагментарно и часто с грубыми заблуждениями. К тому же сказался недостаток информации, в моём подростковом окружении была лишь одна книга об основах электроники — «Юный радиолюбитель»

Виктора Гавриловича Борисова, в которой, к большому сожалению, теме объяснения работы транзисторных каскадов уделено мало внимания. А глава, поясняющая работу каскада эмиттерного повторителя, написана весьма запутанно. Мне кажется, что это главный недостаток замечательной книги.

Во взрослом возрасте я сделал второй заход и решил разобраться самостоятельно.

■ Базовые электрические принципы работы биполярного транзистора

Важно помнить, что учёные не создавали транзисторы нарочно с такими странными характеристиками. Схемотехника транзисторных устройств — это история про то, как инженеры пытаются использовать свойства хитроумно выращенных полупроводниковых структур для решения технических задач: усиление и запись сигналов, управление приборами, преобразование энергии и многое другое.



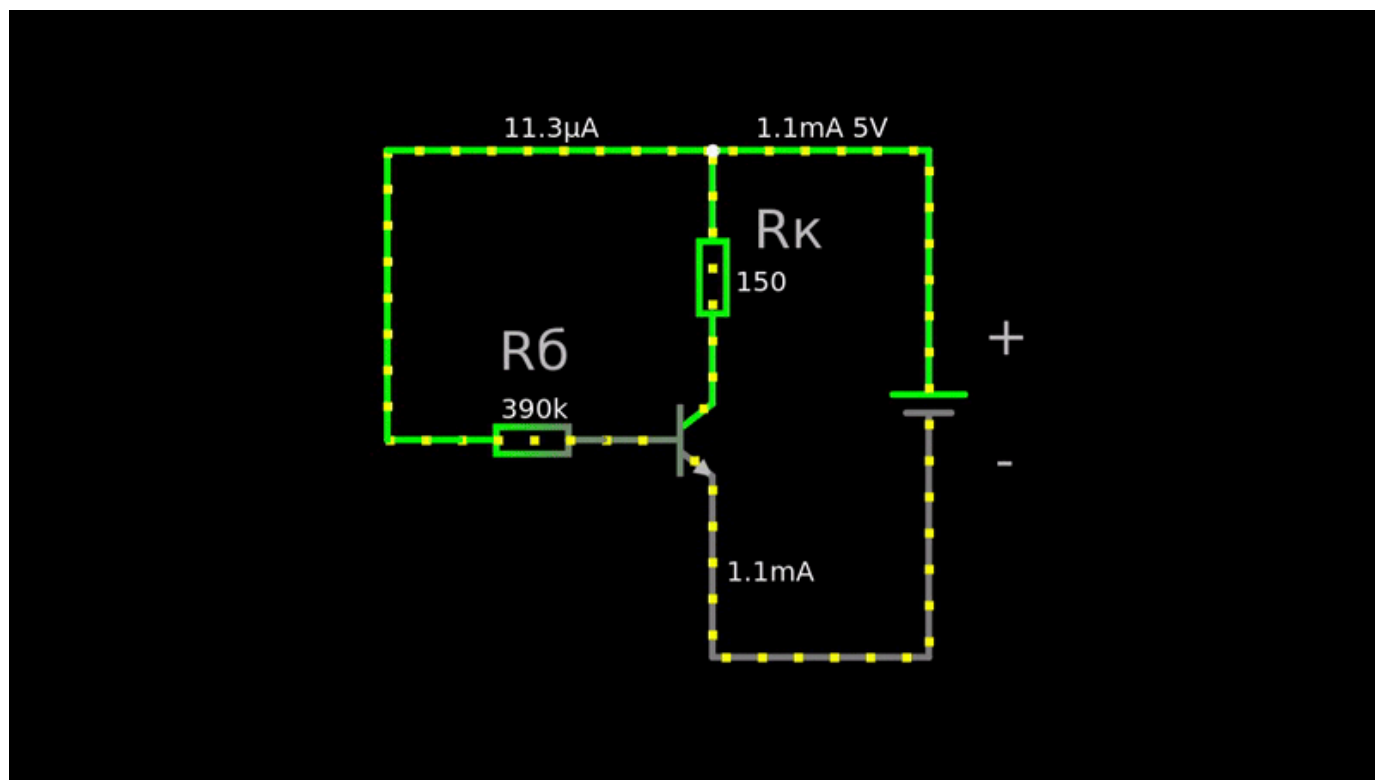
У транзистора на правой схеме эмиттер вверху, каскад выглядит как зеркально отраженный левый

Три условия функционирования транзистора (здесь и далее на примере n-p-n):

1. Коллектор должен иметь более высокий потенциал, чем эмиттер. Это нужно для того, чтобы ток протекал через транзистор по направлению от коллектора к эмиттеру. Напомню, в электронике принято считать условное направление течения тока от «+» к «-».

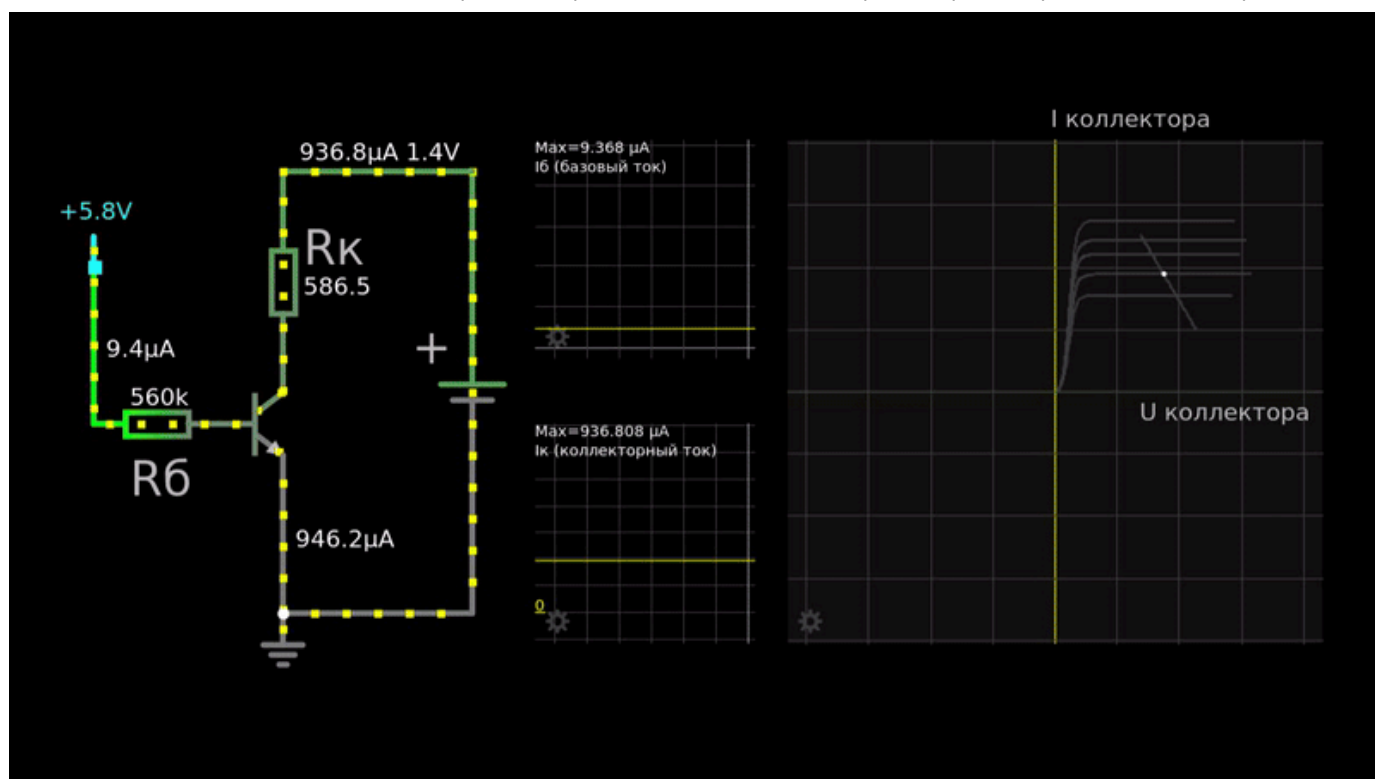
2. Переход база-эмиттер открыт, а база-коллектор смещён в обратном, закрывающем направлении.
3. Токи, протекающие через переходы, и напряжения, прикладываемые к выводам, не превышают допустимые эксплуатационные значения.

Взглянем на схему.



Батарейка подключена к коллектору положительным полюсом через R_k (нагрузка каскада). Эмиттер «сидит» на минусовой шине питания, можно считать этот полюс батарейки за «землю» схемы. Через большое базовое сопротивление R_b на базу поступает малый ток в 11 микроампер, который открывает переход база-эмиттер, из-за чего в тело базы транзистора поступают электроны из эмиттера и перехватываются электрическим полем коллектора.

NB! Важный момент. Транзистор в рабочем режиме не является управляемым резистором, как ошибочно принято считать. **Транзистор в нормальном режиме работает как источник тока.** Это значит, что проходящий через него ток задаётся током базы. То есть в некоторых практических пределах не зависит от R_k и напряжения питания батарейки. Вот здесь вы можете интерактивно взаимодействовать с моделью каскада, изменять подаваемые токи, нагрузку. Ползунки находятся справа.



Перемещая ползунки можно нарисовать семейство выходных кривых транзистора. О этих графиках обязательно поговорим следующей статье.

Из представленной схемы очевидно, через транзисторный каскад проходит три тока: малый базовый, втекающий коллекторный и их сумма, протекающая по выводу эмиттера.

Идея работы биполярного транзистора грубо может быть выражена так: перехватывать неосновные носители заряда, затягивать их полем коллектора из базы.

По этой причине база должна быть тонкой. Полупроводниковая промышленность прошла множество этапов и выработала разные способы добиться желаемого, например, существовала методика истончения базовой пластины полупроводника при помощи направленных друг на друга струй жидкости.

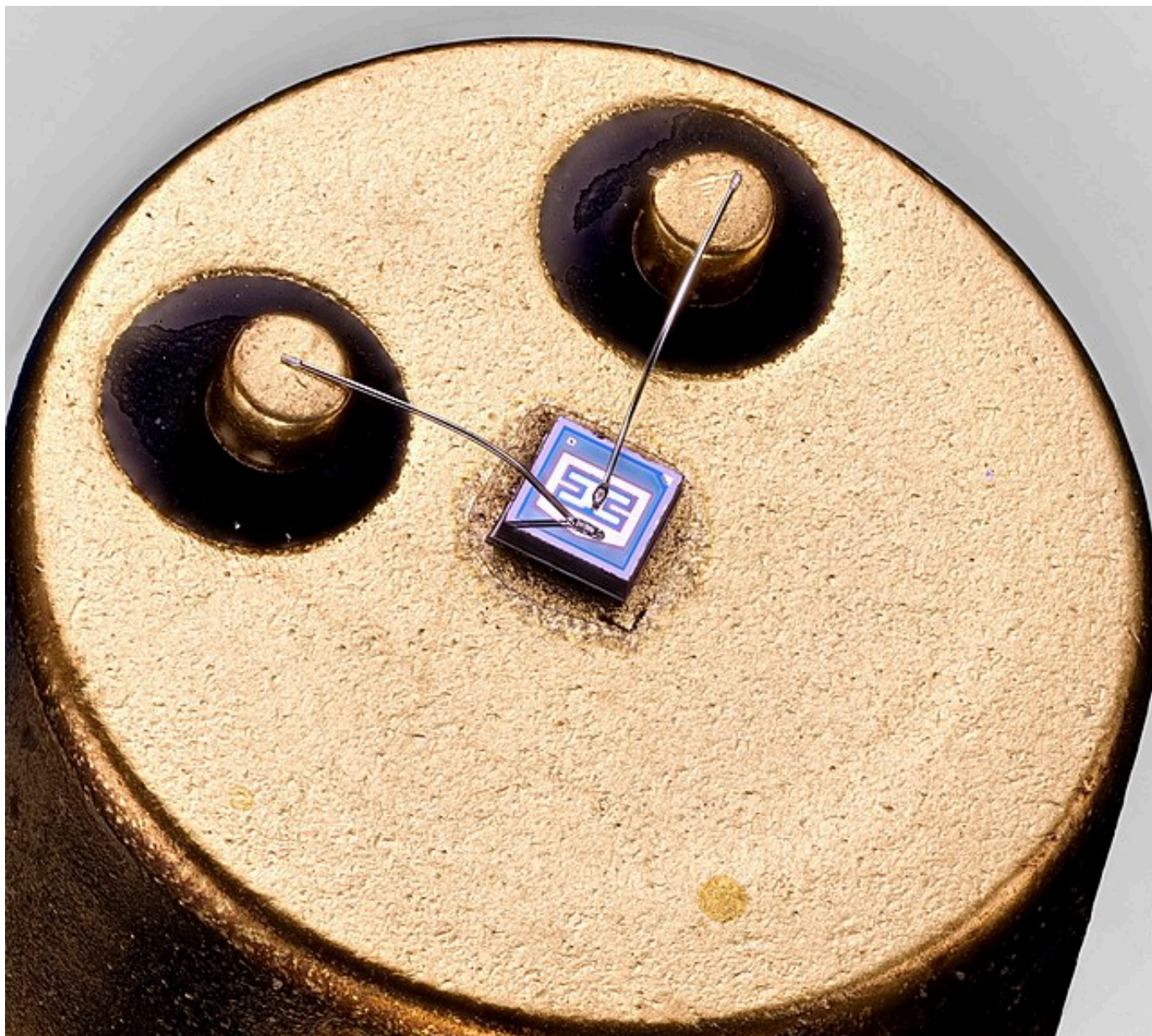


Вскрытый МП41, виден вертикально стоящий кристаллодержатель, соединённый с базой, по бокам отходят выводы эмиттера и коллектора. Фото: Mister rf



Кристалл П210, фото: Mister rf

Мощный германиевый транзистор устроен иначе, р-п переходы располагаются в виде бутерброда.



Кристалл 2N2222, фото: Mister rf

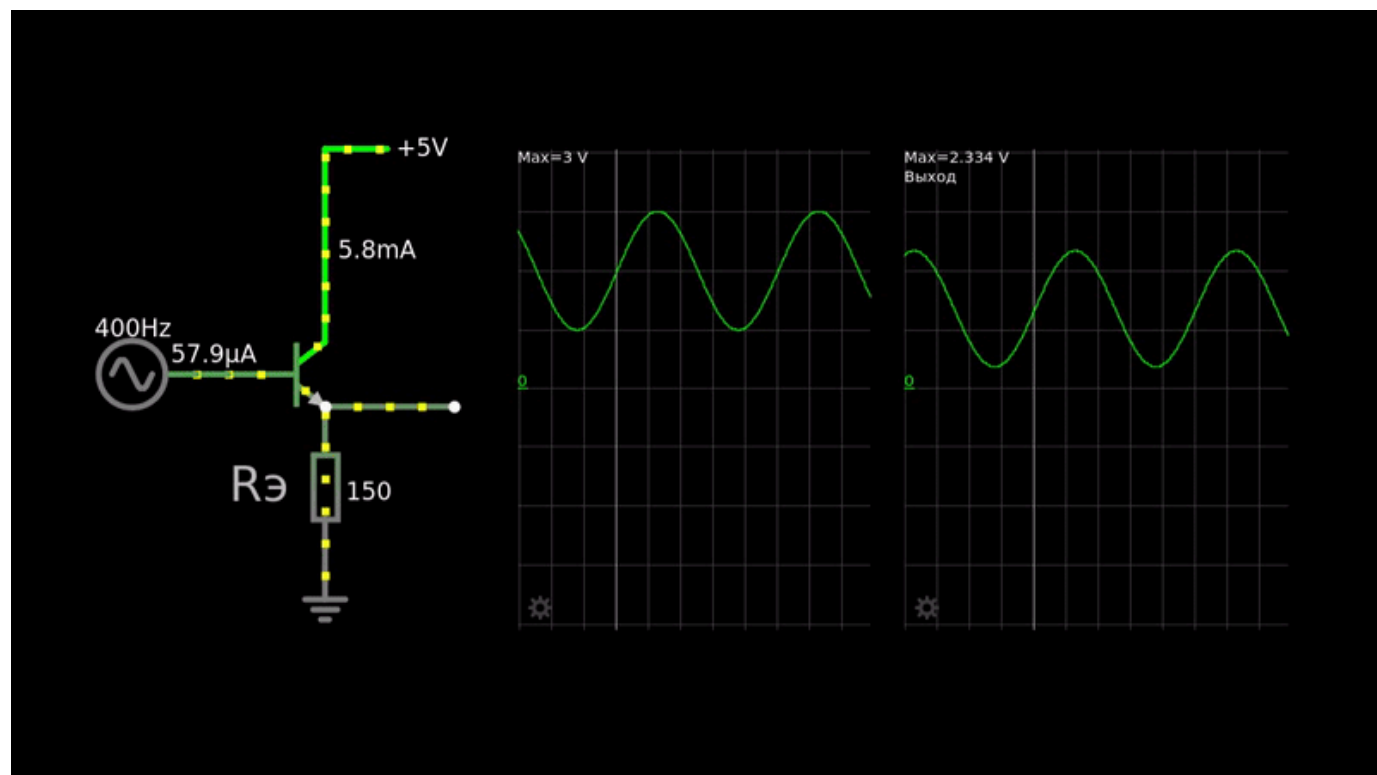
Современные методы изготовления транзисторов позволяют создать необходимые структуры путём многостадийного производства, включающего в себя процессы ионного напыления, травления по шаблону и т. п.

Наверное, вам известен параметр биполярного транзистора, называющийся коэффициентом передачи тока. Он выражается через соотношения базового и коллекторного токов. Для большинства маломощных транзисторов β находится в пределах 70-300, но существуют и отдельные типы маломощных транзисторов, у которых коэффициент доходит до тысяч.

NB! Большой проблемой для схемотехники является то, что этот параметр плохо контролируется технологически и может значительно колебаться у транзисторов из одной партии. Пока нужно запомнить, что β — величина ненадёжная и может меняться в том числе у одного и того же транзистора в зависимости от режима работы. Я обязательно вернусь к теме проектирования схем, усилительные свойства которых

определяются значением «обвязки», а не характеристиками конкретного экземпляра транзистора.

■ Эмиттерный повторитель



Посмотрите на схему. Из неё пропал базовый резистор, а коллекторная нагрузка переехала и встала под эмиттер.

Казалось бы, какая разница, где расположена нагрузка, если ток во всех участках последовательной цепи одинаков. Самое время вспомнить первый принцип работы транзистора: потенциал коллектора должен быть выше потенциала эмиттера. Сейчас вы поймёте, почему этот принцип стал основой работы каскада.

Представьте транзистор и R_E как делитель напряжения, имеющий широкий диапазон регулировки верхнего плеча. Приоткрывая транзистор, мы уменьшаем его сопротивление, и начинает протекать ток от плюса питания, сквозь переходы, потом на R_E . При протекании тока в узле, куда подсоединён эмиттер, начинает повышаться напряжение. (Вы ведь помните, что чем выше ток через резистор, тем выше на его выводах напряжение, и эта зависимость линейна?).

В результате того, что точка потенциала эмиттера «стоит» на резисторе, получается, что она имеет возможность «плавать» в диапазоне почти от нуля до напряжения питания схемы в зависимости от тока через базу. И вот тут мы подбираемся к самому важному. При подаче на базу некоего напряжения ток коллектора будет усиливаться и поднимать потенциал эмиттера. Это увеличение будет

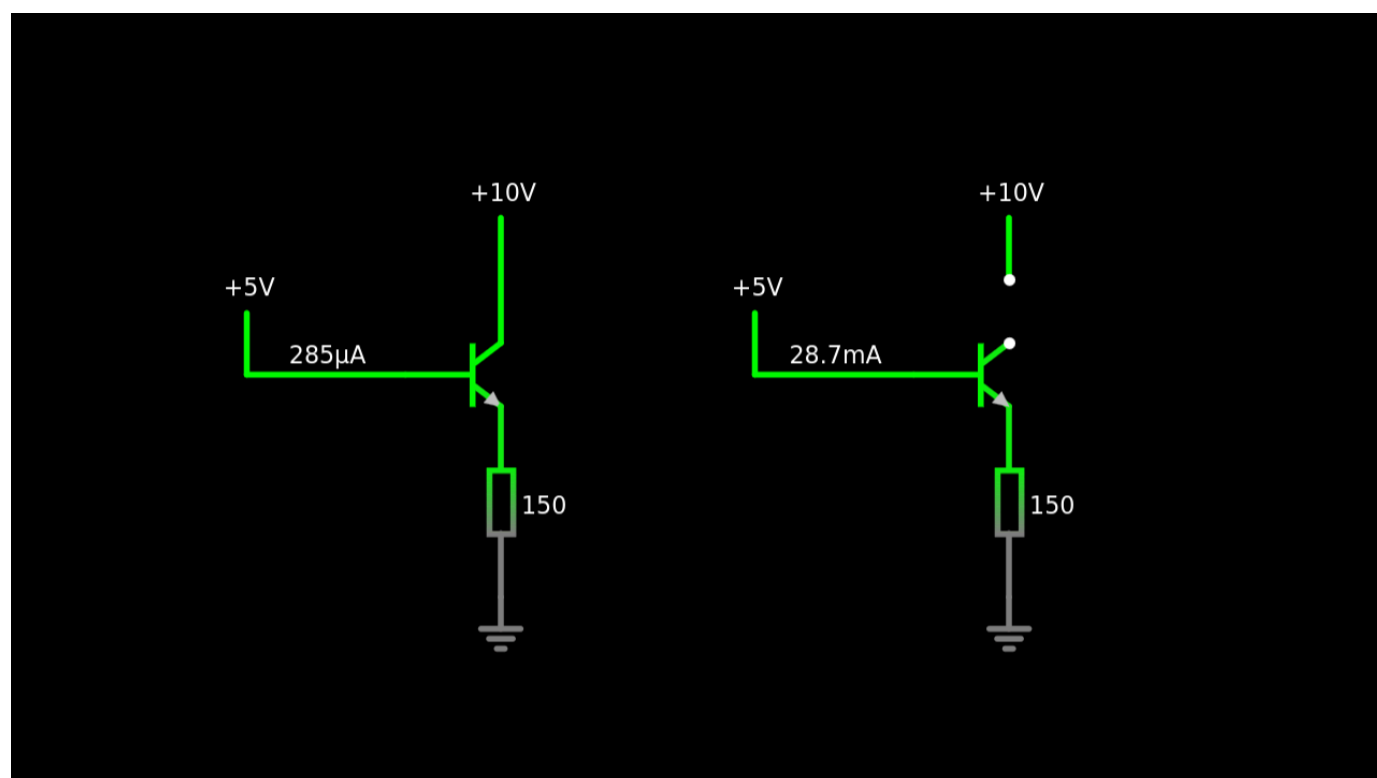
происходить до уровня, необходимого для открытия перехода база-эмиттер (примерно 0.65 вольт для кремниевых транзисторов), но не больше. Ведь тогда в базу не сможет течь ток.

Это называют отрицательной обратной связью: изменение потенциала базы тут же компенсируется изменением коллекторного тока таким образом, что потенциал эмиттера замирает на точке, когда он хоть сколько-то способен открываться и принимать ток в базу. Транзистор в полуоткрытом состоянии следит за сигналом на базе, усиливая ток таким образом, чтобы разницы напряжений хватало только на приоткрытие перехода база-эмиттер.

Это чем-то напоминает управление слабой человеческой рукой могучим манипулятором экзоскелета. Он движется вслед за движением руки, которой приходится преодолевать некоторое усилие, многократно умножаемое гидравликой механизма.

В книгах упоминается, что у эмиттерного повторителя высокое входное сопротивление. Я никак не мог понять, по какой причине оно является высоким, ведь на входе сигнала открытый диод перехода база-эмиттер и относительно небольшой эмиттерный резистор. Но отгадка была именно в том, что на эмиттерный резистор сверху льётся ток коллектора, поднимая потенциал на верхнем выводе резистора.

Взгляните на два примера. Если мы отключаем питание от коллектора, в базу устремляется значительно больший ток.



Высокое входное сопротивление создаётся усилительными свойствами транзистора. И

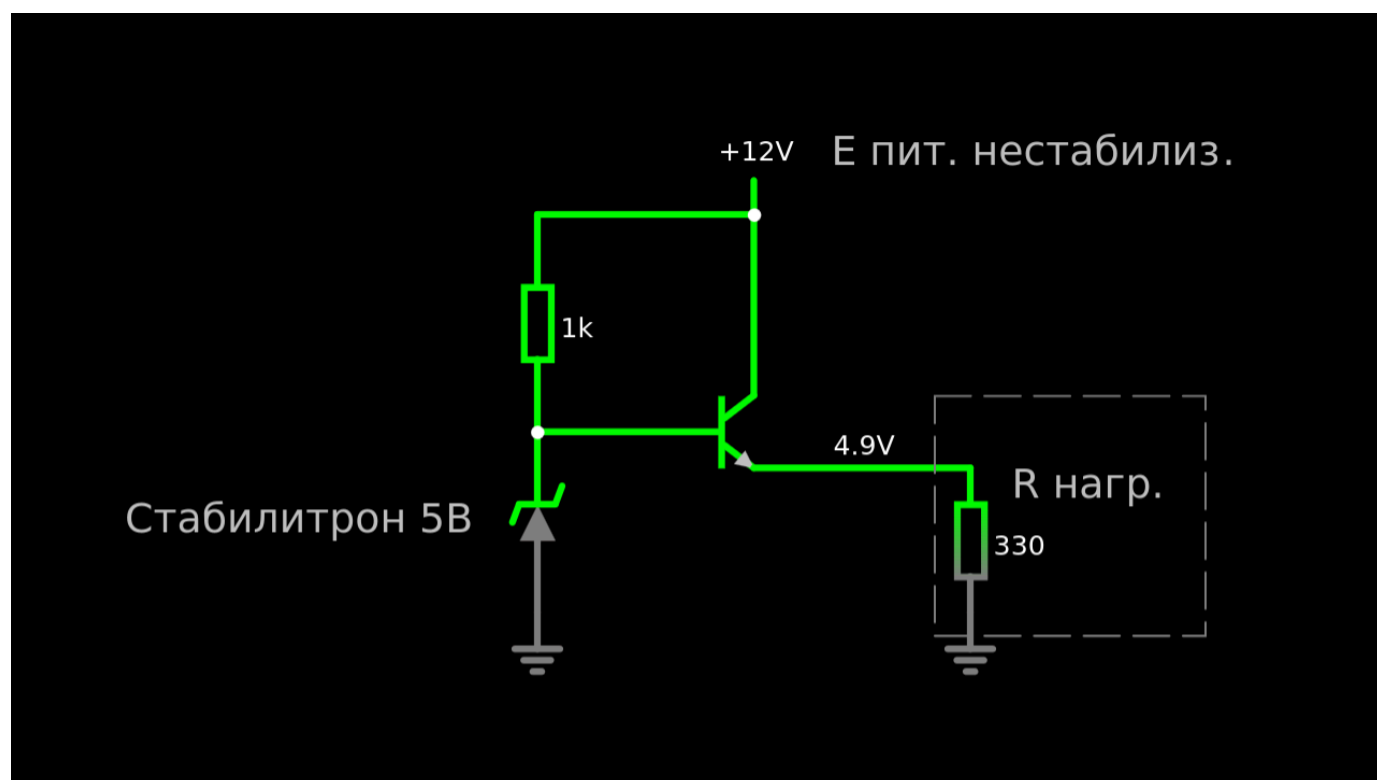
такое сопротивление называется *эквивалентным*. Сигналу со стороны базы «трудно» втекать в точку, потенциал которой синхронно изменяется, отстоя всего лишь на 650 милливольт, необходимых для открытия транзистора.

Если вы разберётесь со схемой, то сразу узнаете некоторые смутные черты того, как работают каскады на операционных усилителях, охваченные ООС.

■ Роли эмиттерного повторителя

Как уже сказал выше, основным свойством ЭП является высокое входное сопротивление и низкое выходное, позволяющее создавать умощнители выходов, так называемые токовые буферы. Позволяющие, например, микроконтроллеру своей слабой лапкой воротить мощными нагрузками без опасения перетрудиться и сгореть.

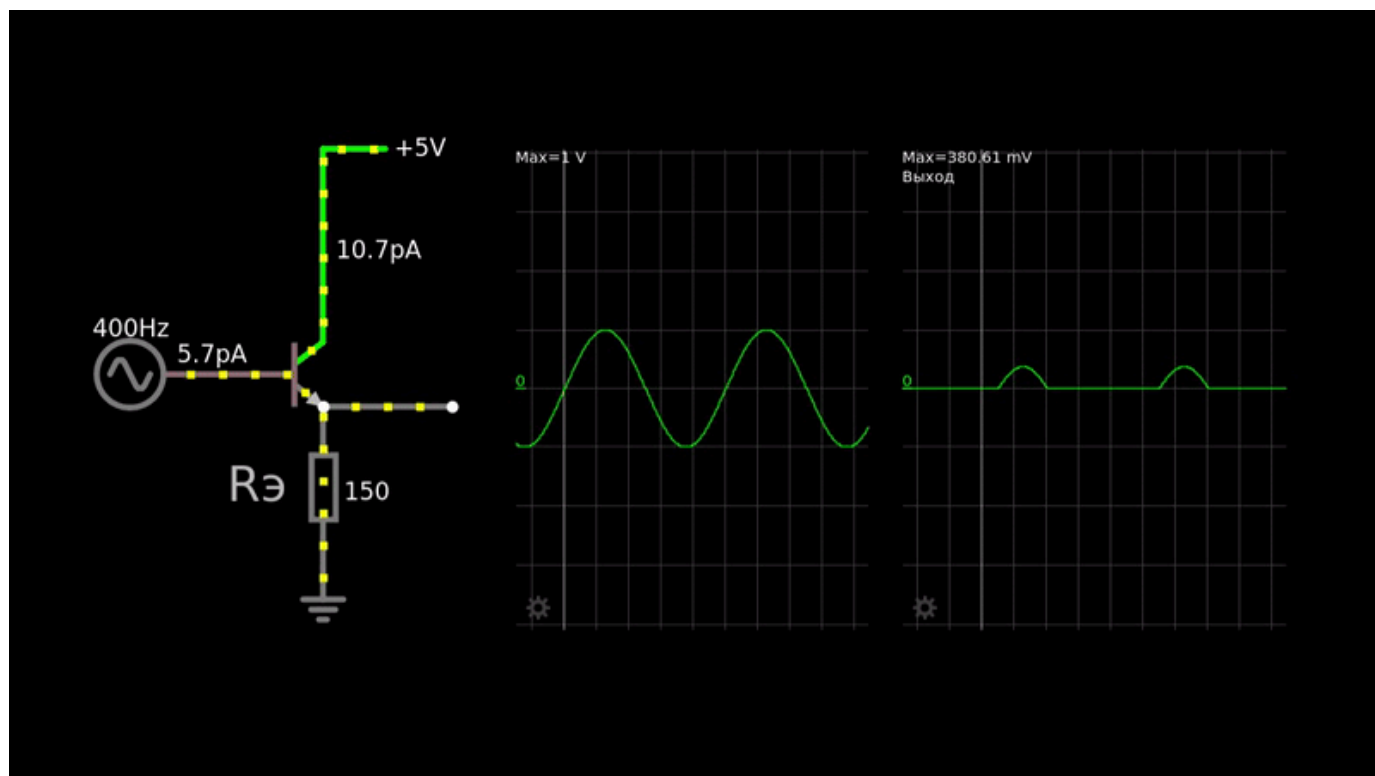
Очень часто эта схема применяется как выходной каскад стабилизированных блоков питания, когда нагрузка подключается к эмиттеру и становится на роль R_z .



Минусом подобных (как ещё называют, линейных) схем является рассеивание энергии питания в виде тепла. Но плюсами являются минимальный уровень помех в выходном сигнале, надёжность и простота.

■ Свойства ЭП

- К достоинствам каскада относятся уже упомянутые высокое входное и малое выходное сопротивления. Это позволяет создавать буферные усилители, устраняющие влияния последующих каскадов на источники сигнала с высоким внутренним сопротивлением.
- Например, внутри большинства электретных микрофонных капсулей с двумя выводами прямо внутри корпуса стоит повторитель. Правда, на полевом транзисторе, до которых мы ещё доберёмся. Он позволяет согласовать источник сигнала с внушительным внутренним сопротивлением, которым является мембрана, с последующим каскадом.
- Из-за 100% ООС минимизируются нелинейные искажения. Линеаризация каскада — это однозначно добро, т. к. позволяет осуществлять передачу формы сигнала без существенных искажений. Что хорошо при измерении, записи и обработке аналоговых сигналов.
- Не инвертирует фазу сигнала. Если вспомнить, как работает более распространённый транзисторный каскад, именуемый схемой включения с общим эмиттером, то там сигнал снимается с коллектора. Когда транзистор открывается, потенциал коллектора стремится к нулю (верхнее плечо в виде нагрузочного резистора R_k ведь не изменяется). Следовательно, каскад с общим эмиттером, сидящем на земле, инвертирует фазу сигнала.
- Схема имеет широкий частотный диапазон, потому что позволяет компенсировать эффект Миллера — паразитную ёмкость между базой и коллектором, которая шунтирует входной сигнал на шину питания, уменьшая усиление.
- К недостаткам эмиттерного повторителя можно отнести коэффициент усиления по напряжению меньше единицы. То есть наш сигнал должен иметь необходимую амплитуду до попадания в каскад, который 650 милливольт потребует себе для работы и срежет их из выходного значения.
- Каскад потребляет ток, сжигая мощность источника питания на эмиттерном резисторе.
- Невозможность передачи отрицательных значений амплитуды сигнала. Вот, посмотрите на [схему](#).

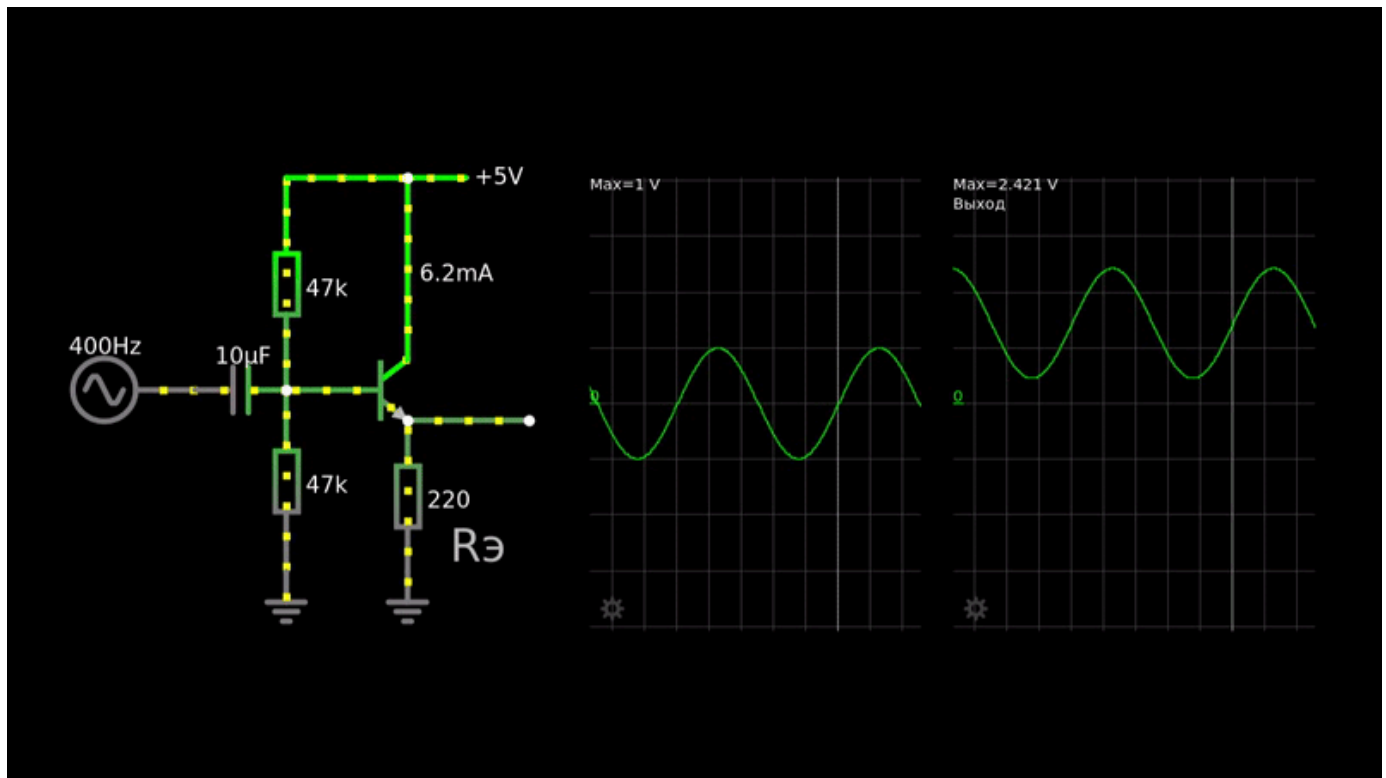


Очевидно, что сигнал на выходе сильно искажён, срезается часть положительных полувольт и не передаются отрицательные полувольты. Для устранения этого ограничения есть два метода.

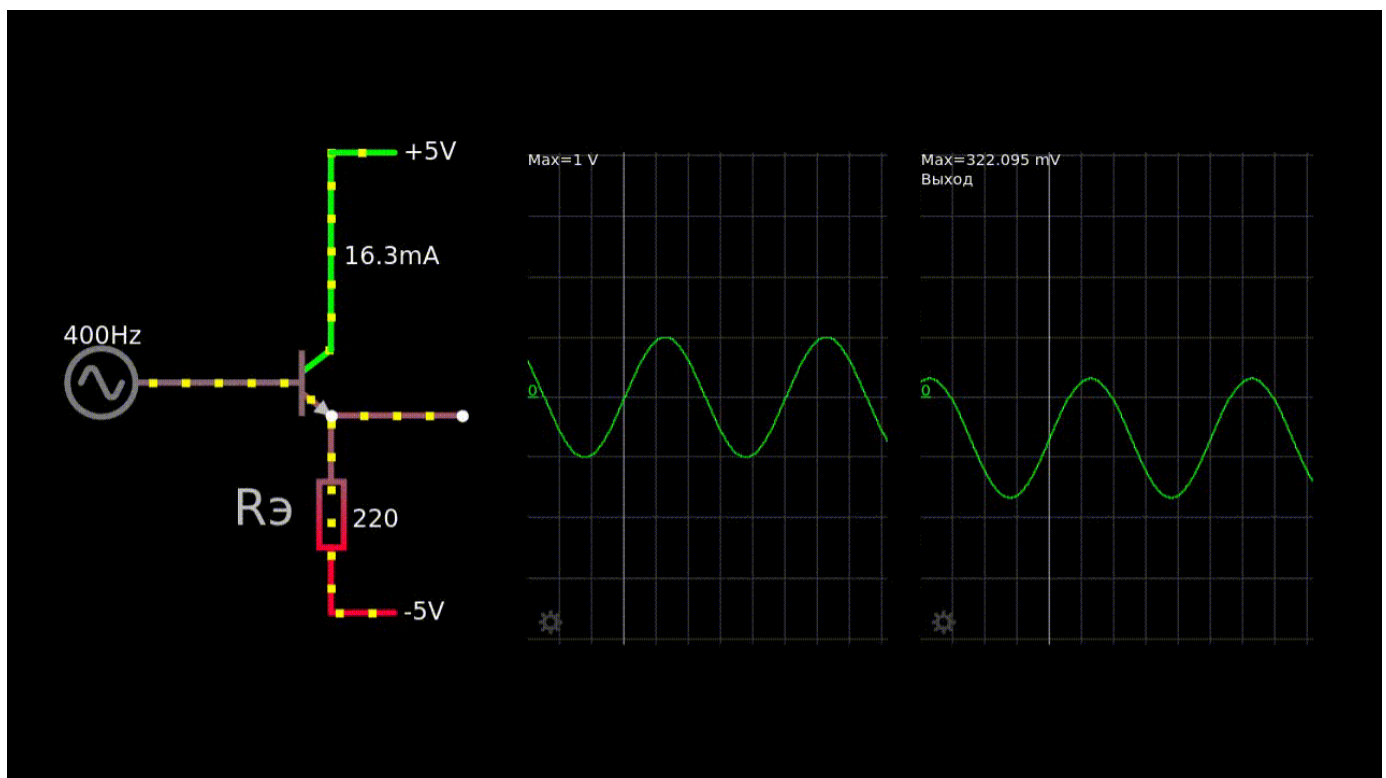
■ Необходимость смещения

Для того чтобы сигнал передавался без искажений, можно искусственно «поднять» потенциал базы до уровня, равного диапазону от нуля до напряжения питания. В нашем примере эта точка будет находиться в районе 2,5 вольт. Чтобы зафиксировать потенциал базы, воспользуемся простым, но очень надёжным схемотехническим решением. Оно называется делитель напряжения пополам. В простейшем виде это два резистора, соединённых последовательно и имеющих одинаковое сопротивление.

Для того чтобы вход не закорачивался через источник ЭДС на землю, поставим конденсатор в точку, где соединяются два резистора базового делителя.



Как видно из осциллограм, сигнал передаётся по форме верно, но имеет постоянное смещение, переносящее все значения сигнала в область положительных напряжений. Схема в симуляторе.



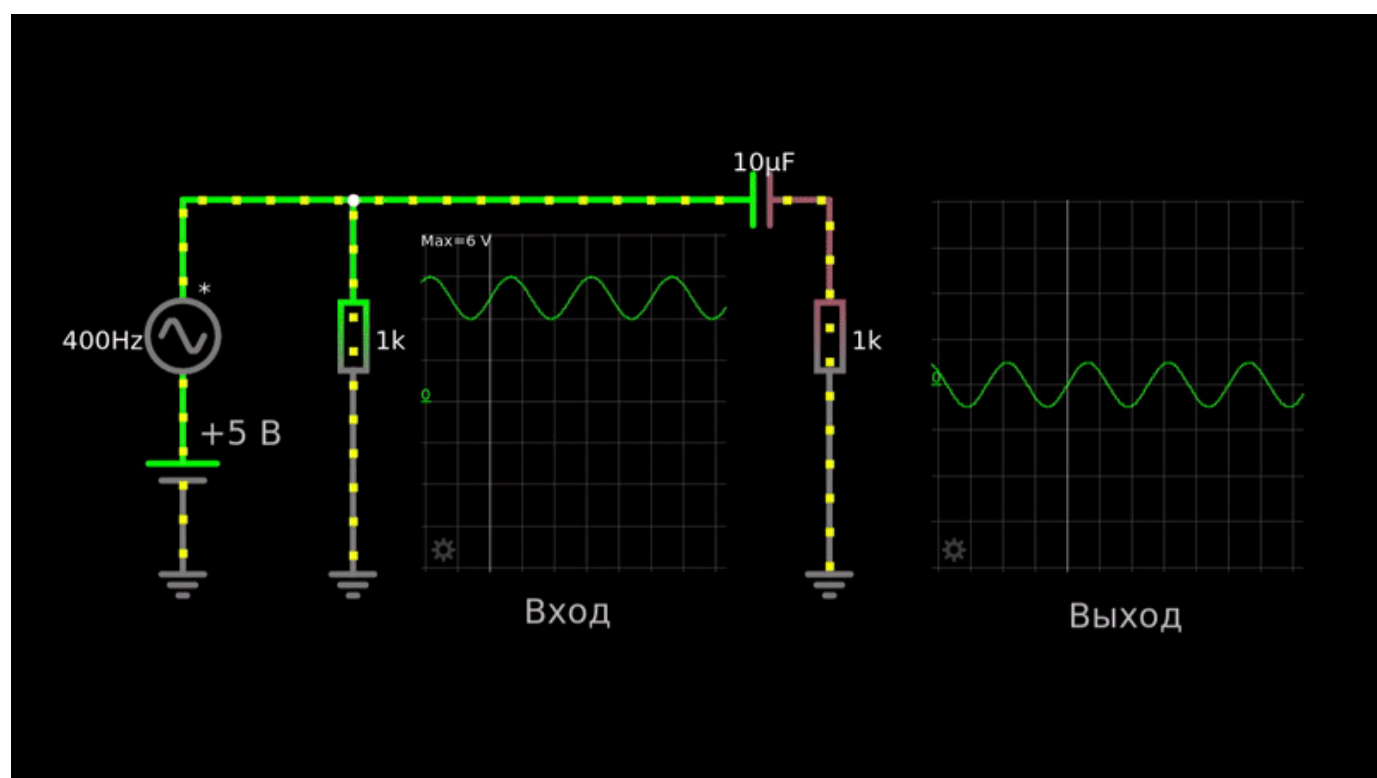
Второй путь создания ЭП, способного передавать неискажённый переменный сигнал — использование двухполярного (расщеплённого) питания. Схема в симуляторе.

Обратите внимание, что выходной сигнал смещён в область отрицательных значений на некоторую величину. Этот сдвиг образуется именно по той причине, что

транзистору нужно иметь на базе потенциал выше, чем на эмиттере на 650 милливольт.

Отделение постоянной составляющей

В этой части рассмотрим кратко как работает разделительный конденсатор, препятствующий прохождению постоянного тока через себя. Конденсатор с электрической точки зрения является разрывом цепи, т. к. в его материальной основе лежит диэлектрик, покрытый двумя токопроводящими обкладками. Но конденсатор способен вбирать в себя ток и передавать сигнал благодаря электрическому полю.




Наглядно это видно на модели. Постоянное положительное смещение создано путём включения во входную цепь батарейки, последовательно с генератором сигнала. На первом резисторе выделяется полезный сигнал вместе с постоянной частью (смещение в положительную сторону графика). После конденсатора мы видим сигнал с амплитудой обеих полярностей.


Р. S. Так как мне очень нравится тема аналоговой электроники и усилительных устройств «на рассыпхе», я планирую сделать цикл публикаций на тему усилительных каскадов, биполярных и полевых транзисторов. Самое большое опасение — невольно ввести читателя в заблуждение, объяснив что-то неправильно. Если у вас будут исправления и дополнения, смело присылайте в комментарии.

Также советую прочитать публикацию, посвящённую основам электродинамики и браузерного симулятора circuitjs.

Telegram-канал со скидками, розыгрышами призов и новостями IT 



Скидки на VPS с NVMe до 50%
Habrahabr15 - промокод для скидки 15% на виртуальные серверы



Теги: электроника, транзистор, схемотехника для начинающих, полупроводниковые приборы, ruvds_статьи

Хабы: Блог компании RUVDS.com, Производство и разработка электроники, Схемотехника, Электроника для начинающих

 +187

 370

 124



RUVDS.com

VDS/VPS-хостинг. Скидка 15% по коду **HABR15**

[Telegram](#) [ВКонтакте](#) [X](#)



317

74.6

Карма Рейтинг

Андрей Ларин @engine9

Дизайнер, энтузиаст 3Д графики, влюблен в LINUX.

[Подписаться](#)



 Комментарии 124

Публикации

ЛУЧШИЕ ЗА СУТКИ

ПОХОЖИЕ



Maximov_psy

12 часов назад

Что я узнал, проконсультировав 100 айтишников



12 мин



8.4K

 +44 49 53**ru_vds**

14 часов назад

Как защищают фильмы и доставляют их в кинотеатры



Средний



12 мин



3.2K

Обзор

Перевод

 +36 30 6**MrSotnik**

17 часов назад

Новый язык от 1С: Зачем? Кому? Стоит ли лезть?



5 мин



21K

 +36 34 76**RationalAnswer**

22 часа назад

Тотальный блэкаут на юге Европы, а также чудеса нейро-лизоблюдия от ChatGPT



11 мин



13K

Дайджест

 +34 17 70**alizar**

18 часов назад

Ян Лекун, создатель LeNet, формата DjVu и адвокат опенсорса



Средний



7 мин



1.8K

Обзор

 +28 13 6**EI_Gato_Grande**

18 часов назад

Как ИИ-контент проклял интернет и почему это закономерно



8 мин



4.3K