|  |  |
| --- | --- |
| Курс: | Основы электроники |
| Модуль 4: | Основы биполярных транзисторов |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Авторы | Сапунов Арсений Русланович  Иванов Константин Александрович, к.т.н. | |
|  |  | |
| Рецензенты |  | |
|  |  | |
|  |  | |
| Длительность  (рекомендуемая) | | 4 часа |
|  | |  |
| Главная цель | | По окончании изучения темы обучаемый будет иметь основные сведения о работе биполярных транзисторах, а также знать три базовые схемы включения |
|  | |  |
| Промежуточные цели | | * Знать о видах транзисторов в современной электронике * Знать и уметь владеть аппаратом описания усилителей транзисторов и нелинейных приборов * Знать основные параметры, характеризующие транзисторы * Уметь рассчитывать главные параметры для типовых схем включения биполярных транзисторов, а также знать особенности для каждой из них (общий эмиттер, общий коллектор, общая база) * Уметь устанавливать транзистор в ключевой режим |

1 Основные виды транзисторов в современной электронике

Существует две больших группы транзисторов, разделяющихся по внутренней структуре:

* **Биполярные**
  + PNP, так называемой «прямой проводимости»;
  + NPN, так называемой «обратной проводимости»;
* **Полевые**

На основе этих двух групп разработаны и другие разновидности транзисторов: **многоэмиттерные**, **IGBT** (БТИЗ), **составные**, **однопереходные** и др.

Полевые транзисторы и их разновидности будут рассмотрены в следующих лекциях.

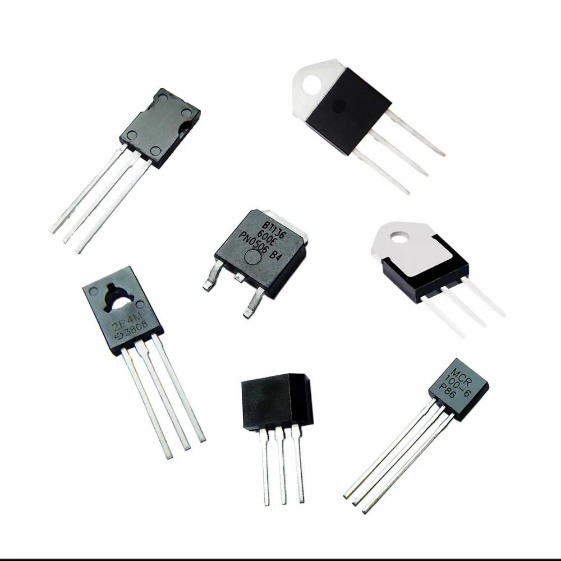


Рисунок 1 – Внешний вид дискретных транзисторов

Уникальность транзисторов в том, что они **способны усиливать сигнал по мощности**.

**Вопрос**: является ли трансформатор усилительным элементом?

**Вопрос**: чем и каким пределом ограничены усилительные возможности транзистора?

Ответьте на них, используя материалы предыдущих лекций.

2 Структура биполярного транзистора

**Биполярный транзистор** — это трёхэлектродный полупроводниковый прибор, состоящий из двух PN-переходов. Он используется для усиления или генерации электрических колебаний, а также в качестве коммутирующего элемента в электронных устройствах. *Би*полярным транзистор назван потому, что перенос тока в нем осуществляется двумя типами носителей заряда – электронами и дырками.

В настоящее время **транзистор является основой схемотехники абсолютного большинства электронных устройств и интегральных микросхем**.

Среднюю область транзистора называют **базой** (Б), а крайние – **эмиттером** (Э) и **коллектором** (К).

Эмиттер (от лат. emittere — испускать, излучать) – источник основных носителей заряда; коллектор (от лат. collector — собиратель) – приемник основных носителей заряда.

PN-переход между Б и К называется **коллекторным переходом** (П2 на рисунке 1а), а между Э и Б – **эмиттерным** (П1 на рисунке 2а).

На рисунке 2б показано **распределение концентрации** **носителей заряда** на примере PNP транзистора.

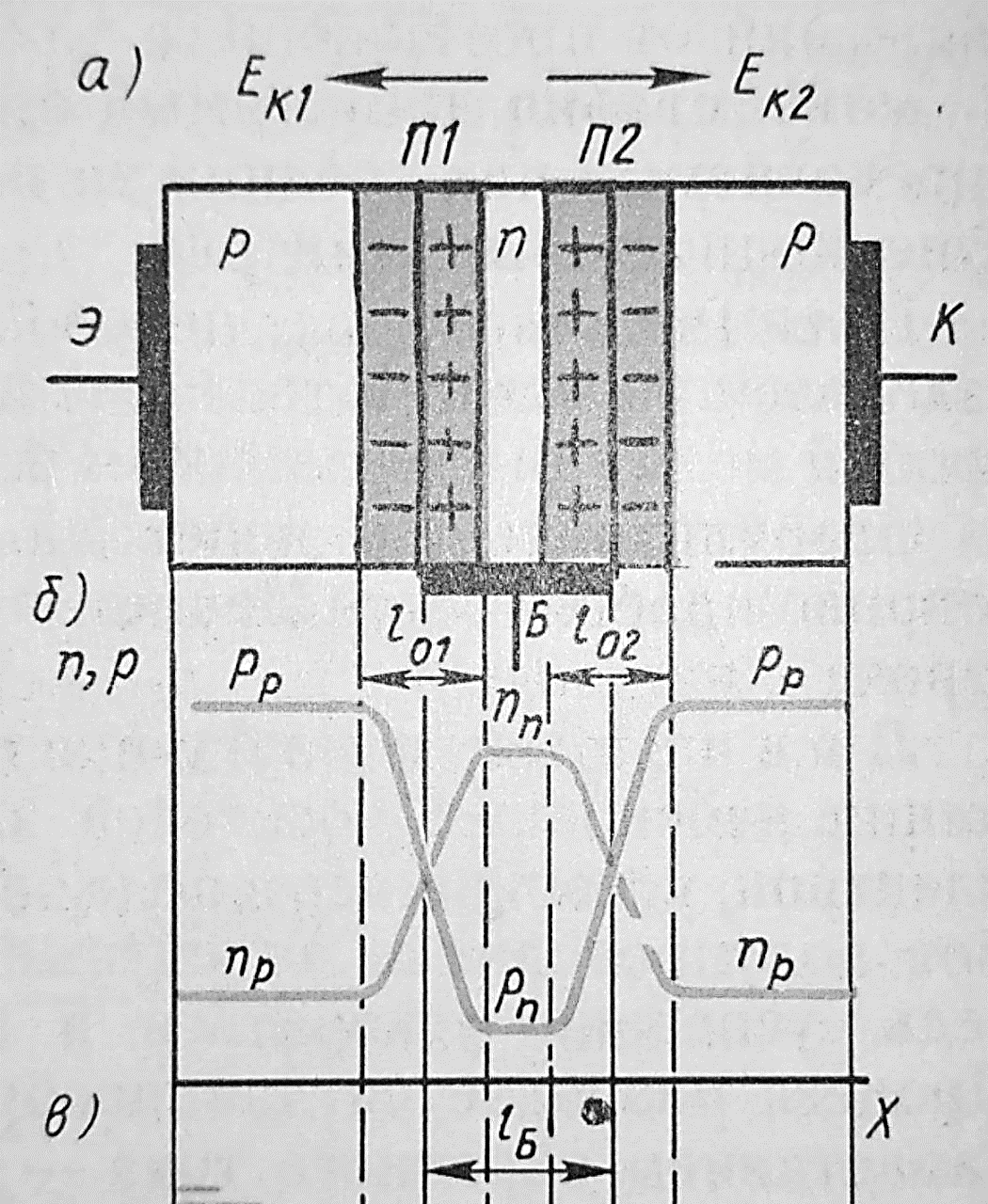


Рисунок 2 – структура транзистора

**Структура NPN и PNP транзисторов** и соответствующие им **УГО** показаны на рисунке 3.

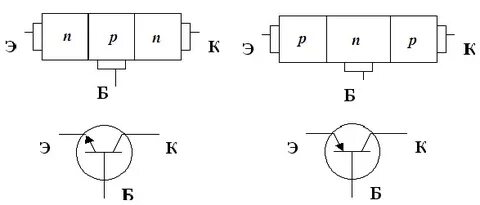


Рисунок 3 – УГО и соответствие структуры для них

**Стрелка** **на эмиттере указывает направление тока через транзистор** в активном режиме (ток всегда течет от большего потенциала к меньшему).

3 Физические процессы в биполярном транзисторе

В биполярном транзисторе носители заряда движутся от эмиттера через тонкую базу к коллектору. База отделена от эмиттера и коллектора PN-переходами. Коллекторный («основной») ток протекает через транзистор лишь тогда, когда носители заряда инжектируются («впрыскиваются») из эмиттера в базу через PN-переход. В базе они являются неосновными носителями заряда и легко захватываются другим PN-переходом между базой и коллектором, ускоряясь при этом, и образуя коллекторный ток.

Управление током между эмиттером и коллектором осуществляется изменением напряжения между базой и эмиттером, от которого зависят условия инжекции носителей заряда в базу и ток базы.

Существует два типа БТ в зависимости от механизма передачи тока через базу: **дрейфовые** и **бездрейфовые**.

В базовом слое носители заряда распространяются за счёт диффузионного механизма, при котором нет градиента легирующей примеси в слое базы – так работают бездрейфовые БТ. Также носители заряда могут распространяться под действием электрического поля при неравномерном легировании базы у дрейфовых БТ. Дрейфовые являются более высокочастотными, чем бездрейфовые.

Для повышения быстродействия прибора толщина базового слоя должна быть как можно тоньше, но **чрезмерное снижение толщины базы вызывает снижение предельно допустимых , .**

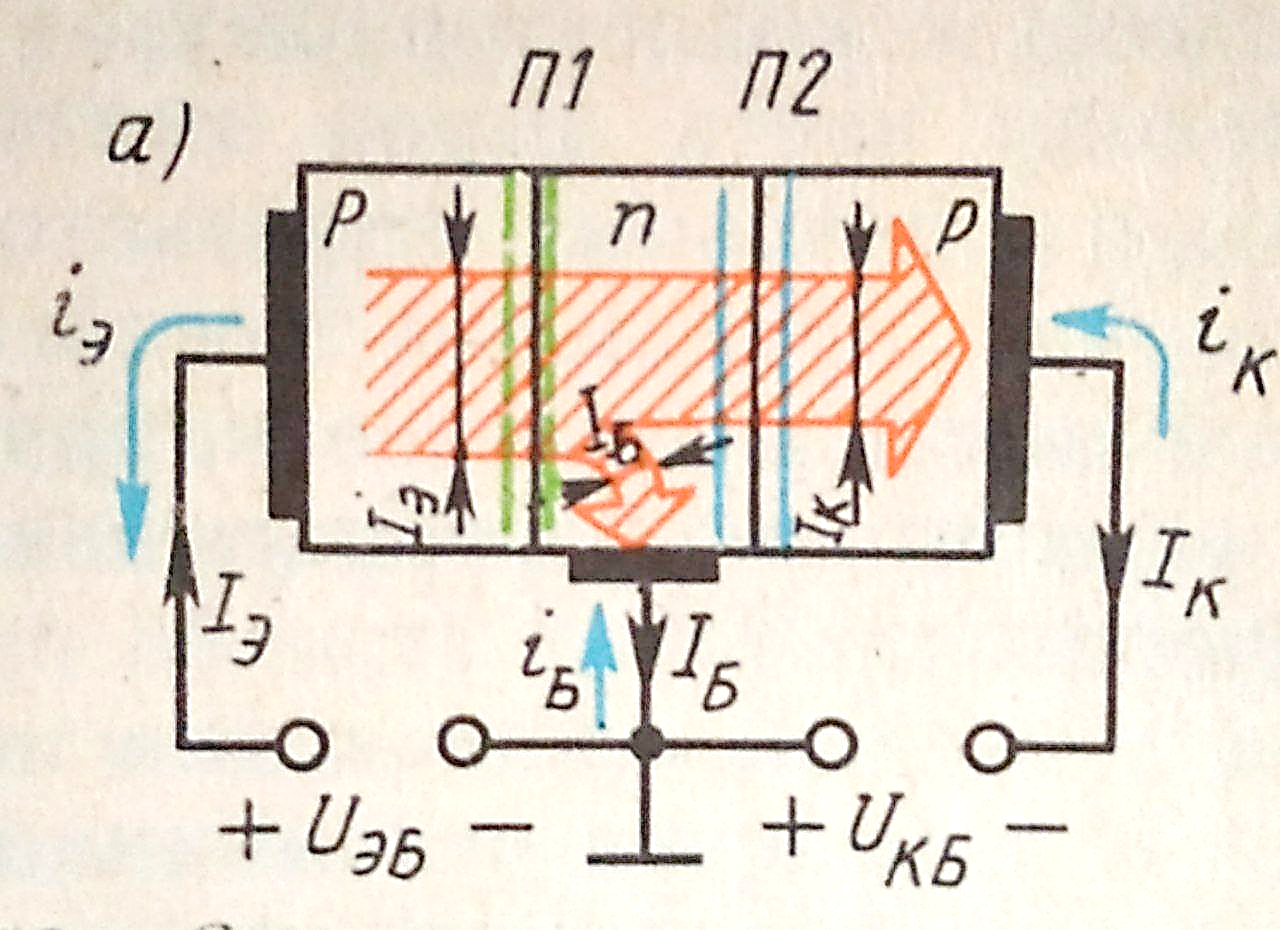


Рисунок 4 – Физические процессы   
в биполярном транзисторе

Физику БТ можно приближенно понять по **гидравлической аналогии**, приведенной на рисунке 5. Здесь мощный поток (коллекторный ток) управляется с помощью заслонки, для активации которой за счет большого рычага требуется малый поток (ток базы). При этом, малый поток (ток базы) также направляется в эмиттер.

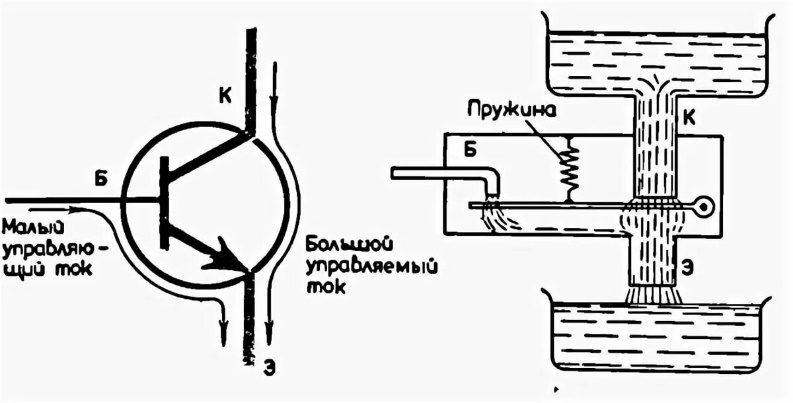


Рисунок 5 – Гидравлическая аналогия работы

4 Простейшая модель работы транзистора

Существуют **прямое** и **инверсное** включения транзистора. Современные модели транзисторов, как правило, способны усиливать сигналы только в прямом включении, и инверсное не рассматривать нет необходимости. **Для прямого включения** на примере NPN типа **можно выделить правила**:

1. Коллектор имеет более положительный потенциал, чем эмиттер;
2. Цепи база - эмиттер и база - коллектор работают как диоды (рис. 7). При этом, эмиттерный переход открыт, а коллекторный смещен в обратном направлении, т.е. приложенное напряжение препятствует протеканию тока через него.
3. Каждый транзистор характеризуется максимальными значениями , , , , рассеиваемой мощности P= . Они не должны быть превышены.

Если правила 1 - 3 соблюдены, **то ток прямо пропорционален току**  и можно записать следующее соотношение:

Где , – коэффициент усиления по току (для маломощных транзисторов типично , для мощных – порядка ).

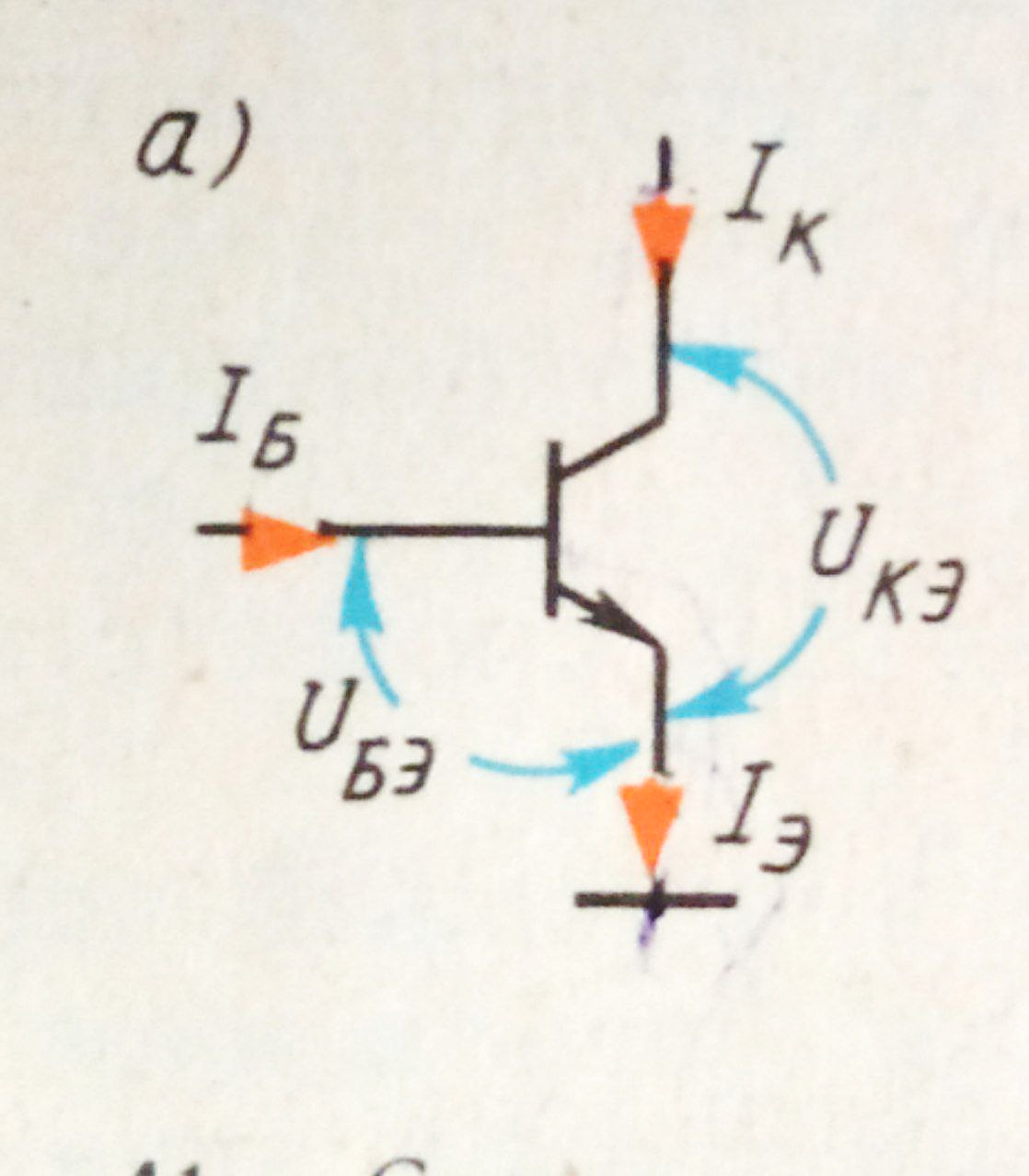


Рисунок 6 – напряжения на транзисторе

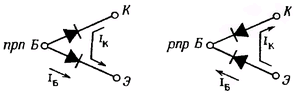


Рисунок 7 – представление в рамках   
модели Эберса-Молла

**Замечание**: коллекторный ток не связан с прямой проводимостью диода база-коллектор; этот диод смещен в обратном направлении. Будем просто считать, что «транзистор так работает».

**Вывод**: небольшой ток базы управляет большим током коллектора.

Для PNP транзистора полярность напряжений меняется на противоположную.

Из правила 2 следует, что **напряжение между базой и эмиттером нельзя увеличивать неограниченно**, так как если потенциал базы будет превышать потенциал эмиттера более чем на 0.5 – 0.7 В (прямое напряжение диода), то возникнет очень большой ток базы и коллектора. Следовательно, в работающем транзисторе напряжения на базе и эмиттере связаны следующим соотношением (для NPN транзистора):

На рисунке 8 приведена аналогия принципа работы транзистора. В ней человек, изменяя сопротивление переменного резистора, старается выполнить условие . **В реальности нельзя считать транзистор реостатом**.

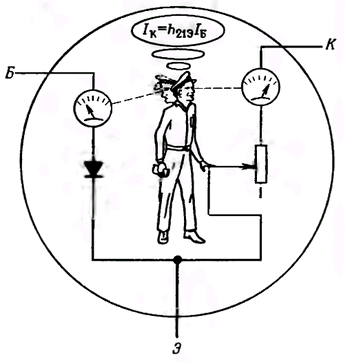


Рисунок 8 – аналогия работы   
биполярного транзистора

Выше была рассмотрена простейшая концепция функционирования транзистора. Подробно и всесторонне БТ описан **Эберсом и Моллом** в модели, названной в честь них. Она описывается в книгах: Титце и Шенк «Полупроводниковая схемотехника», Степаненко И.П. «Основы теории транзисторов и транзисторных схем», Хоровиц и Хилл «Искусство схемотехники» и отводится на самостоятельное изучение.

5 Режимы работы транзистора

В зависимости от выполняемых в схеме функций транзисторы могут находиться в одном из трех режимов: **активном**, **насыщения** и **отсечки**.

**В активном режиме** транзисторы используют для усиления электрических сигналов с минимальными искажениями их формы. При этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.

Токи транзистора, работающего в активном режиме, связаны условиями:

При изменении тока эмиттера на изменятся и ток базы на и коллектора на . Так, если на эмиттерный переход подать кроме постоянного напряжения небольшое переменное напряжение сигнала в базовой цепи появится ток Соответственно, в коллекторном токе также появится переменная составляющая, большая в раз:

Если теперь в цепь протекания коллекторного тока включить нагрузочный резистор , на нем образуется падение напряжения причем переменная составляющая . Таким образом, переменная составляющая напряжения будет усиленным сигналом.

**Активный режим работы свойственен аналоговым схемам**.

Ранее мы рассматривали транзистор, находящийся в активном режиме.

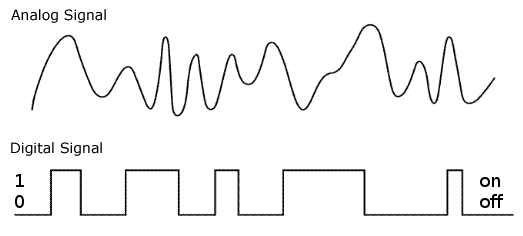


Рисунок 9 – Аналоговый и цифровой сигналы

**В режиме насыщения** прямое напряжение подают на оба перехода транзистора, и его **сопротивление уменьшается практически до нуля**. Напряжения на нем описываются как

где или – напряжение насыщения (паспортный параметр).

В этом режиме **транзистор эквивалентен замкнутому контакту реле** и используется для подключения нагрузки к источнику питания.

**В режиме отсечки** на оба перехода подают обратные напряжения, при этом транзистор закрывается, **обладает высоким сопротивлением** и эквивалентен разомкнутому контакту реле. Напряжения на нем описываются как

Чередуя режимы отсечки и насыщения, можно **коммутировать** различные электрические сигналы.

Чередование режимов отсечки и насыщения является **основным признаком цифровых и импульсных схем**.

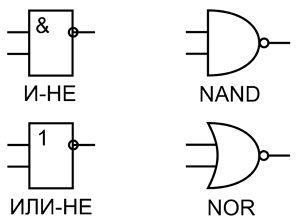


Рисунок 10 – Логические вентили

6 Вольт-амперные характеристики транзистора

При работе с транзисторными схемами используют два семейства **ВАХ** – **входные** и **выходные**. Как будет известно далее, существует три различные схемы включения транзистора, однако общий вид ВАХ для них отличается мало.

На примере схемы с общим эмиттером (ОЭ) рассмотрим входную ВАХ. Она представляет зависимость тока от напряжения при постоянном напряжении на транзисторе

Входная ВАХ схематично показана на рис. 11.

Выходная ВАХ для схемы ОЭ представляет зависимость тока от напряжения при постоянном токе :

Несколько функций ВАХ, построенных на одном графике, называются **семейством** **ВАХ**. Семейство выходных ВАХ показано на рис. 12.

На ВАХ удобно выделять области активного режима, отсечки и насыщения (см. рис. 12).

Прямая линия на выходной ВАХ, проведенная между точками А и Б, называется **нагрузочной кривой** и строится между точкой на Ох, равной и точкой на Оу, равной .

Любая точка на нагрузочной кривой между А и Б называется **рабочей точкой транзистора.**

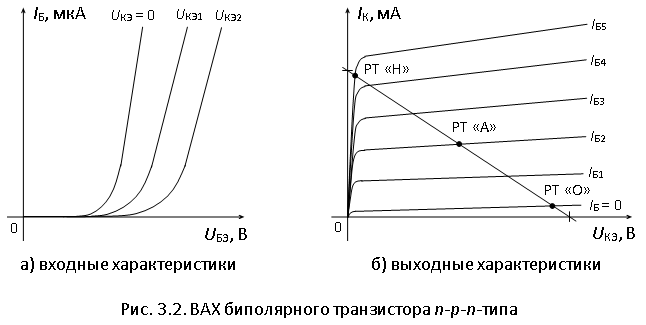


Рисунок 11 – семейство входных ВАХ

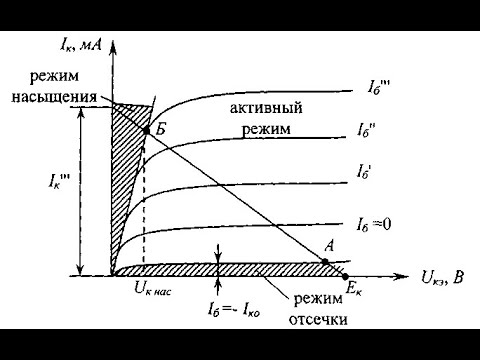


Рисунок 12 – семейство выходных ВАХ

7 Сплавная технология производства

Одной из самых старых технологий производства БТ является **сплавная**. Данная технология производства транзисторов была предложена Холлом и Данлопом в 1950 году. Первые практические серийные сплавные транзисторы были выпущены компанией General Electric в 1952 году в Пенсильвании.

В основе сплавного транзистора лежит тонкая пластина германия N-типа, которая служит базой. Пластина с боков сплавляется с индиевыми или мышьяковыми бусинами (акцепторными примесями) и затем **отжигается** в печи при температуре около 600 °C. **Толщина базы задаётся временем отжига.**

После монтажа сформированной пластины на несущую арматуру корпуса и его герметичной запайки, транзисторы становятся готовыми к использованию.

Существуют также **диффузионно-сплавная**, **мезатехнология**, **эпитаксиальная** и другие технологии производства транзисторов. Однако на сегодня главной является, безусловно, **планарная**, созданная в американской компании Fairchild Semiconductor в 1959 г..

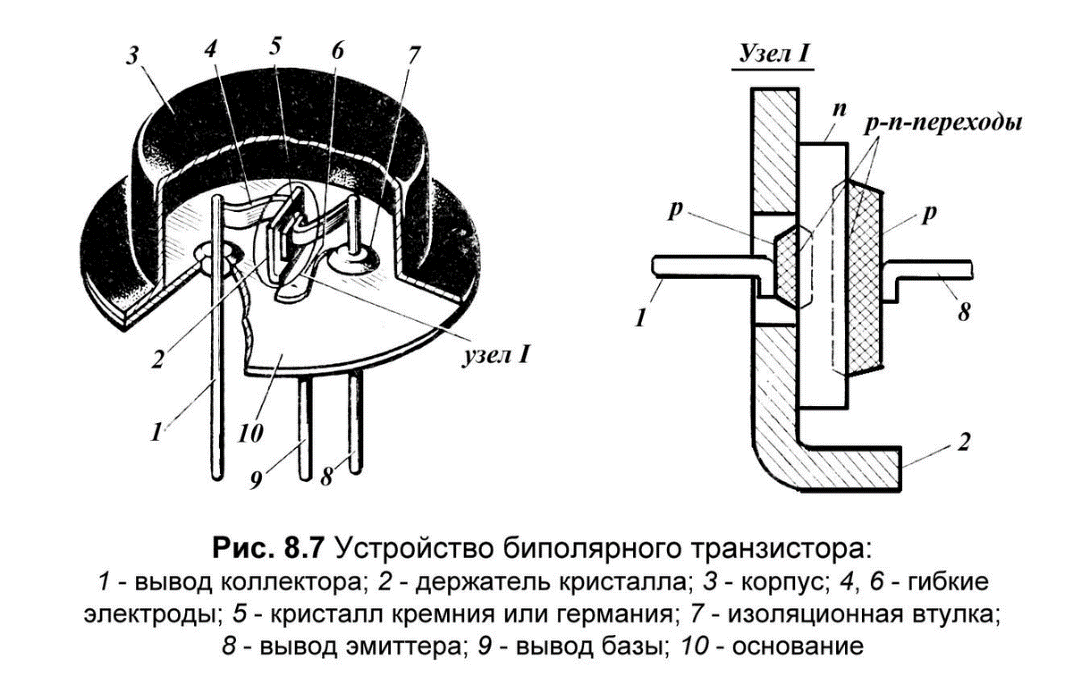


Рисунок 13 – устройство сплавного транзистора: 1 – вывод коллектора, 2 – держатель кристалла, 3 – корпус, 4,6 – гибкие электроды, 5 – кристалл полупроводника, 7 – изоляционная втулка, 8 – вывод эмиттера, 9 – вывод базы, 10 – основание

Более подробно о технологиях: Степаненко И.П. «Основы микроэлектроники»; Степаненко И.П. «Основы теории транзисторов и транзисторных схем».

Ярким примером отечественных сплавных транзисторов являются модели МПхх, например, МП26, МП27, МП41 и др. Внешний вид таких транзисторов приведен на рис. 14, а внутреннее исполнение представлено на рис. 15.



Рисунок 14 – исполнение сплавного транзистора МП26Б



Рисунок 15 – сплавной транзистор со снятой крышкой

8 Планарная технология производства

**Планарная** технология на сегодня является **базовой для производства ИМС и дискретных транзисторов**. Ее техпроцесс упрощенно можно представить следующими стадиями:

1. На чистый кристалл сильно легированного N-кремния (рис. 16.1) наносится слегка легированный кремний N-типа, образуя двухслойный коллектор (рис. 16.2);
2. С помощью фотолитографии некоторая зона кремния защищается от воздействия кислоты, затем незащищенная часть коллекторного слоя вытравляется, образуя углубление для базового слоя типа P (рис. 16.3);
3. После этого с помощью диффузии на вытравленную часть напыляется базовый слой типа P (рис. 16.4). Далее часть базового слоя вытравляется, остается очень тонкий базовый слой (рис. 16.5);
4. Наконец, напыляется сильно легированный эмиттерный слой N-типа (рис. 16.6);
5. К областям базы, эмиттера и коллектора добавляются омические контакты, позволяющие закреплять электрические выводы для подключения к кристаллу.

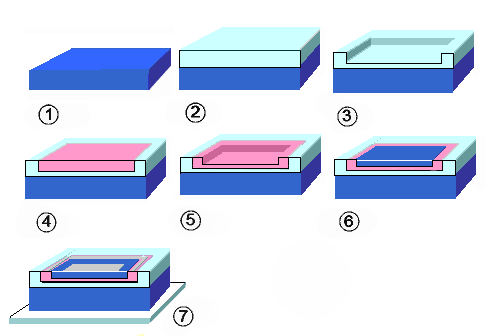


Рисунок 16 – технологические этапы планарной технологии

На рис. 17 представлен сформированный кристалл БТ. **Коллектор имеет наибольший размер и, как правило, связан с корпусом для отвода тепла**.

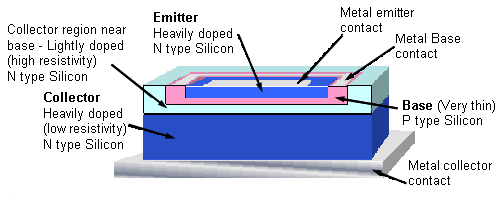


Рисунок 17 – сформированный кристалл планарного транзистора

Ярким примером отечественных планарных транзисторов являются модели КТххх, например, КТ315, КТ361, КТ3102, КТ815, КТ817 и др. Внешний вид таких транзисторов приведен на рис. 18, а внутреннее исполнение представлено на рис. 19.

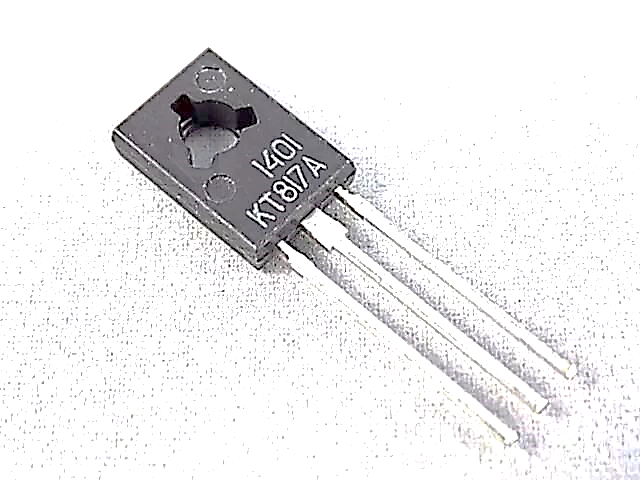
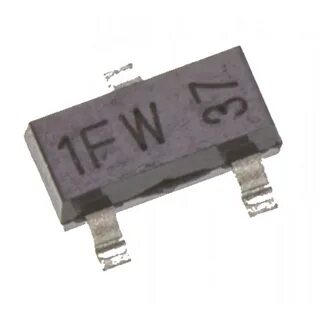
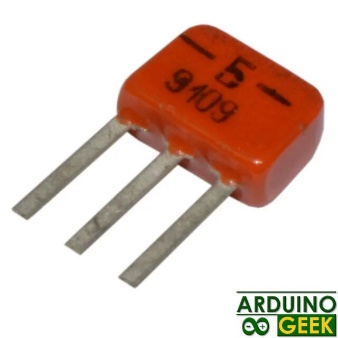


Рисунок 18 – исполнение планарных транзисторов КТ315, BC847 и КТ817



Рисунок 19 – планарный транзистор со снятой крышкой

9 Краткая классификация биполярных транзисторов

Биполярные транзисторы условно можно разделить по следующим **признакам**:

1. **По типу полупроводникового материала**:
   1. Кремниевые (Si);
   2. Германиевые (Ge);
   3. Кремний на германии (SiGe);
   4. Арсенид-галлиевые (GaAs) и др.
2. **По типу проводимости**:
   1. PNP структуры (прямой проводимости);
   2. NPN структуры (обратной проводимости).
3. **По частотным свойствам**:
   1. Низкочастотные ( до 3 МГц);
   2. Среднечастотные ( от 3 до 30 МГц);
   3. Высокочастотные ( от 30 до 300 МГц);
   4. Сверхвысокочастотные ( выше 300 МГц).
4. **По номинальной мощности**:
   1. Малой мощности (< 0.3 Вт);
   2. Средней мощности (от 0.3 до 1.5 Вт);
   3. Большой мощности (свыше 1.5 Вт).

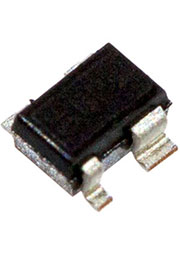


Рисунок 20 – сверхвысокочастотные транзисторы

10 Основные параметры биполярных транзисторов

**По постоянному току транзистор имеет следующие важнейшие параметры**:

* Максимальный ток коллектора ;
* Максимальное напряжение коллектор-эмиттер ;
* Максимальное напряжение база-эмиттер
* Максимальный ток базы
* Максимальная рассеиваемая мощность ;
* Напряжение насыщения (сатурации) ;
* Обратный ток коллектора ;
* – статический коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ;
* граничная частота коэффициента передачи тока биполярного транзистора, при которой , т.е. при подаче сигнала более высокой частоты транзистор не может быть использован в качестве усилительного элемента и перестает усиливать ток;
* Типичные значения при заданном напряжении(приводится в виде семейства входной ВАХ);
* Семейство выходных ВАХ;

Существуют и другие параметры, однако эти являются важнейшими.

Частотные параметры будут рассмотрены позднее после введения малосигнальной модели БТ.

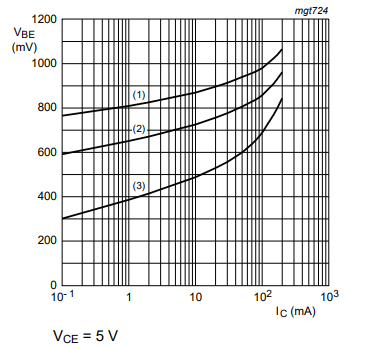
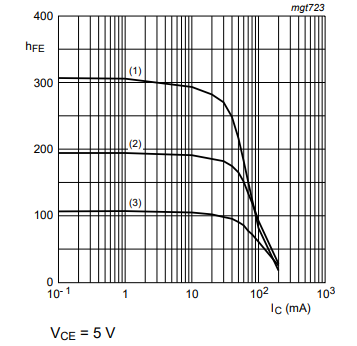


Рисунок 21 – графики для и для транзистора модели BC847

Подробнее: ссылка на Datasheet (паспорт) транзистора BC847 от NXP.

Аналогичные даташиты есть на любой транзистор.



11 Электронный ключ на биполярных транзисторах

Транзисторные ключи используют в электронных схемах для коммутации сигналов и цепей различного напряжения (подключения нагрузок к питанию, формирования логических «0» и «1» и др.). В отличие от обычных реле, транзистор в ключевом режиме имеет следующие **достоинства**:

* Крайне высокое быстродействие (процесс переключения может занимать десятки пс для ВЧ цифровых сигналов);
* Большая надежность и практически неограниченный ресурс работы;
* Малые потери мощности во время коммутации;
* Возможность управления с помощью малых по мощности сигналов и др.

На схеме **на рис. 22 представлен вариант ключа** для коммутации нагрузки (лампы на 10 В при токе 100 мА). Когда контакт переключателя разомкнут,   
 отсутствует. Значит, отсутствует и . Лампа не горит.

Как только ключ замыкается, устанавливается , а на резисторе выделяется напряжение , соответственно, базовый ток равен току через резистор и равен . Ток коллектора составит, однако, не а лишь 100 мА, т.к. лампа при 10В пропускает только такой ток. Аналогично, ток коллектора в любом случае будет определятся не по правилу , а по сопротивлению нагрузки, на котором выделяется

Т.О., для ключевого режима (т.е. чередования режимов насыщения и отсечки) правило нарушается.

**Индуктивная нагрузка подключается с использованием диода**, см. рис. 23.

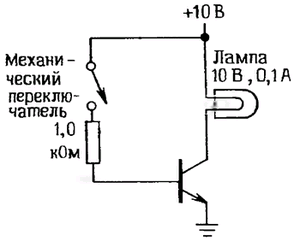


Рисунок 22 – схема простейшего ключа на БТ

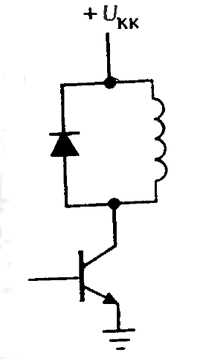


Рисунок 23 – подключение   
индуктивной нагрузки

12 Активный режим: схема с общим коллектором

**Схема с общим коллектором** является одной из трех фундаментальных схем включения транзисторов. Входной сигнал для нее подается между базой и коллектором, а снимается между эмиттером и коллектором. В данном случае **общим для входа и выхода** является коллектор, поэтому схема носит его название. Пояснение на примере БТ PNP проводимости на рис. 24.

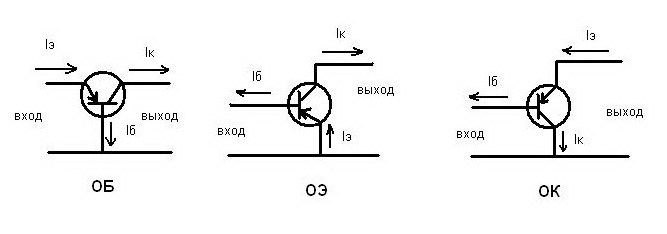


Рисунок 24 – концепция схемы с ОК

Главным свойством схемы с ОК является **способность преобразовывать импедансы** (полные сопротивления):

где: дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода,

- выходное сопротивление источника сигнала,

и - входное и выходное сопротивления эмиттерного повторителя.

При комнатной температуре **дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода** равно:

Эмиттерный повторитель усиливает входной сигнал по мощности, а по напряжению его .

Частотные свойства каскада с ОК в области ВЧ высокие, примерно на уровне ОБ, и намного лучше, чем у ОЭ.

Эмиттерный повторитель (как и две другие схемы) может работать в двух режимах: для малого и для большого сигнала.

**Вариант 1. Усиление больших по амплитуде переменных сигналов**

Как ранее было сказано, транзистор в активном режиме имеет постоянные токи коллектора и базы , а также их приращения . Постоянные токи обеспечиваются с помощью напряжений (напряжение на базовом переходе) и (напряжение на транзисторе).

Постоянное напряжение на базе в называется смещением.

Если смещение (прямое напряжение на переходе), то в схеме эмиттерного повторителя с эмиттера можно будет снимать напряжение , повторяющее по форме входное, при этом

т.е. на эмиттерном резисторе (нагрузке) будет выделяться тот же сигнал, что подан на базу, с меньшей на постоянной составляющей. Именно поэтому схема получила название повторителя.

Вариант простейшего ЭП на NPN транзисторе приведен на рис. 25.

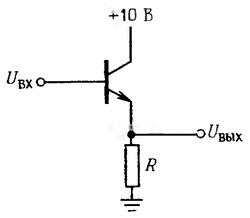


Рисунок 25 – схемотехническое   
исполнение каскада с ОК (упрощенно)

**Вариант 2. Усиление малых по амплитуде переменных сигналов**

В случае, если на входе к постоянному напряжению на базе «подмешивается» переменное напряжение , то такой же по форме сигнал будет присутствовать на эмиттере (на выходе каскада). Т.е. , но при этом выполняется . Это значит, что ОК способен, потребляя малый ток от источника, отдавать в нагрузку в раз больший ток, обеспечивая коэффициент усиления по току .

Таким образом, с эмиттера можно снимать то же переменное напряжение, что приложено к базе и преобразовывать импеданс источника.

Один из возможных вариантов каскада с ОК для работы с малыми сигналами приведен на рис. 26. Здесь входной переменный сигнал подается через конденсатор. Емкость не пропускает постоянное напряжение на базе, формируемое делителем от источника. Если на базе есть сигнал вида

То на эмиттере будет наблюдаться сигнал вида

Важно, что на эмиттере постоянная составляющая («большой сигнал») меньше на величину падения напряжения на переходе. При этом, поскольку дифференциальное сопротивление перехода в активном режиме, переменный малый сигнал проходит неизменным.

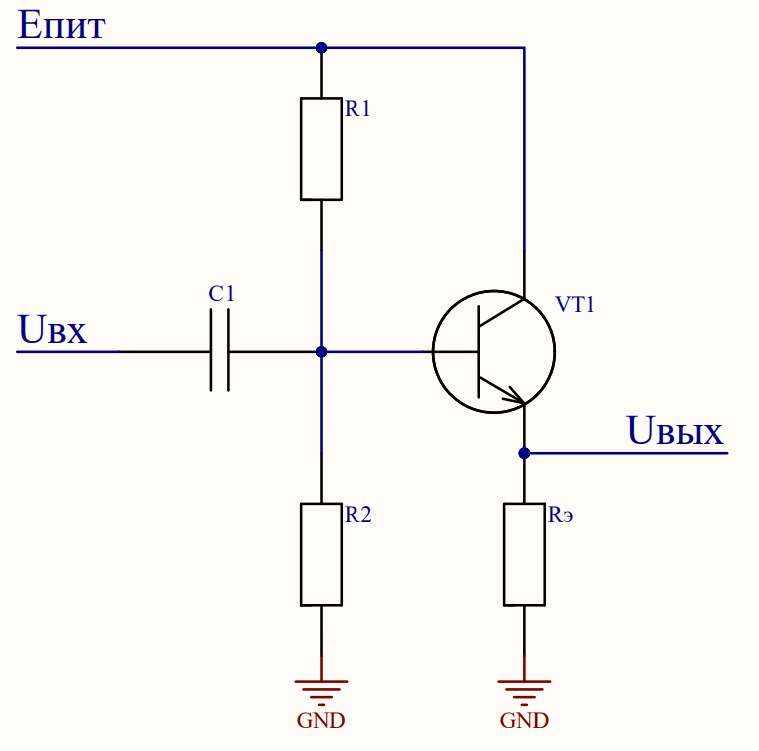


Рисунок 26 – вариант схемотехнического  
исполнения каскада с ОК

Как видно, фактически, режим работы ЭП для большого сигнала является частным случаем режима для малых сигналов.

На рис. 27 представлена схема включения ЭП в режиме для малых сигналов. Генератор V1 является источником переменного сигнала 1 В частотой 1 кГц, а постоянное смещение 2.5 В на базе сформировано делителем. На рис. 28 осциллограмма сигнала на базе отмечена зеленым лучом, а выходного на эмиттере – красным.

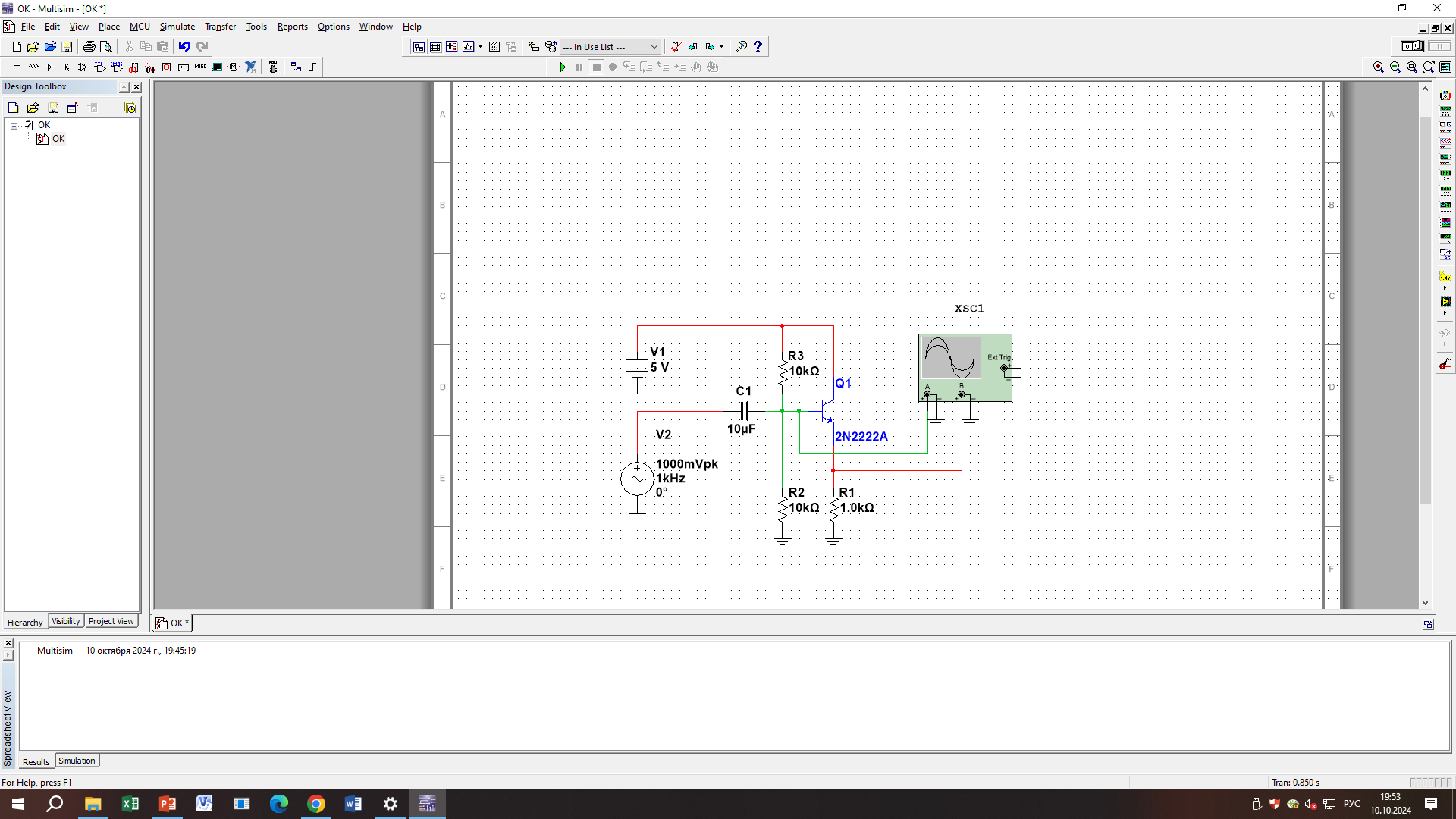


Рисунок 27 – схема повторителя для симуляции

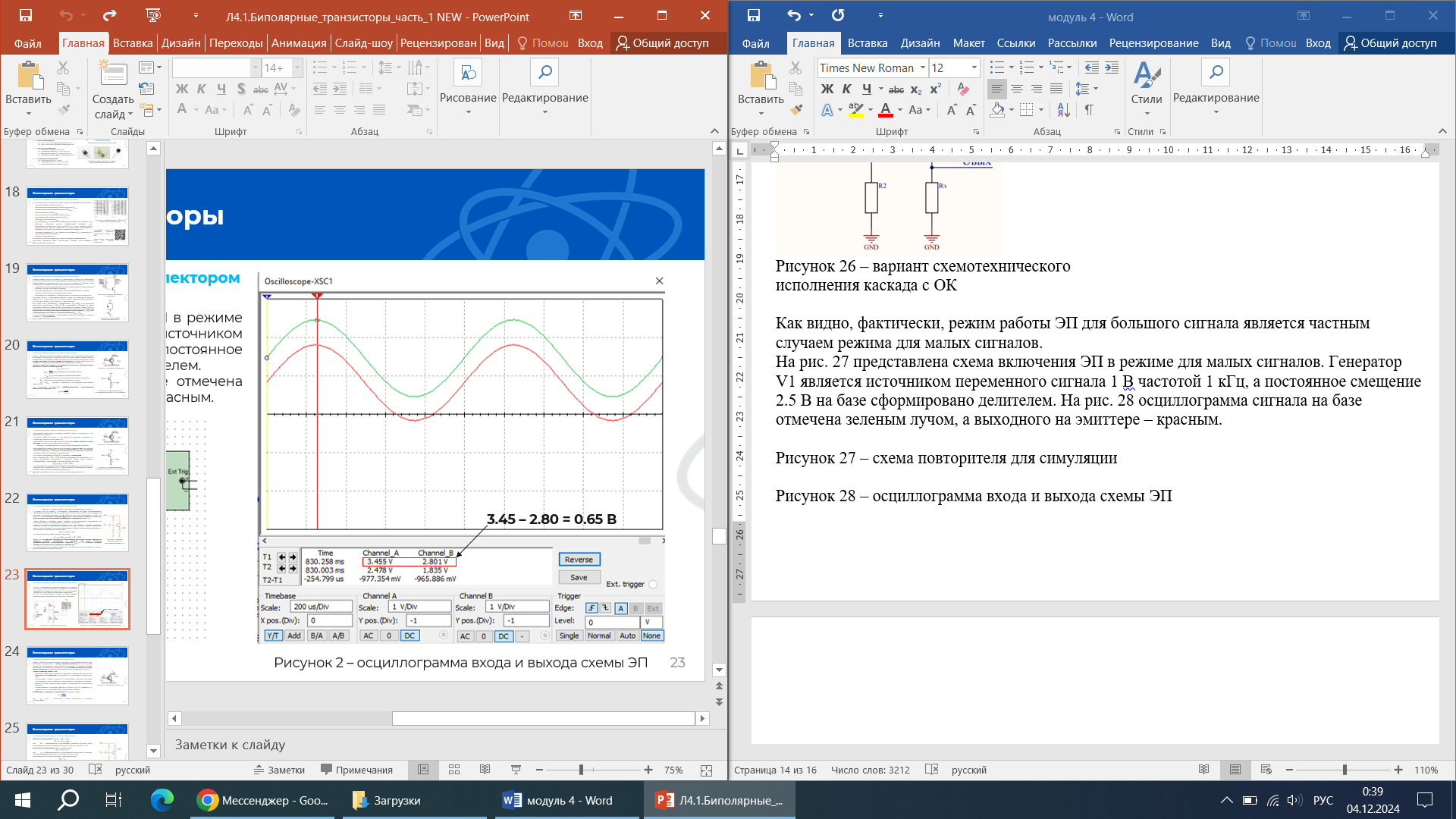


Рисунок 28 – осциллограмма входа и выхода схемы ЭП

13 Активный режим: схема с общим эмиттером

**Схема с общим эмиттером** является одной из трех фундаментальных схем включения транзисторов и **самой распространённой из них.** Входной сигнал для нее подается между базой и эмиттером, а снимается между эмиттером и коллектором. В данном случае **общим для входа и выхода является эмиттер**. Пояснение на примере БТ PNP проводимости на рис. 29.

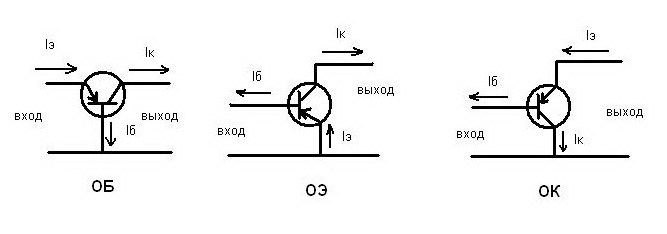


Рисунок 29 – концепция схемы с ОЭ

**Главные свойства схемы с ОЭ**:

* Высокий коэффициент усиления по мощности (главным образом за счет усиления по напряжению): типичный Ку по напряжению равен 10-100 раз;
* Относительно низкое входное и относительно высокое выходное сопротивления (часто требуются согласование с соседними каскадами);
* Выходной сигнал инвертирован (сдвинут по фазе на 180°) относительно входного;
* Посредственные частотные свойства в области ВЧ по сравнению со схемами ОБ и ОК (подробно будет рассмотрено позднее).

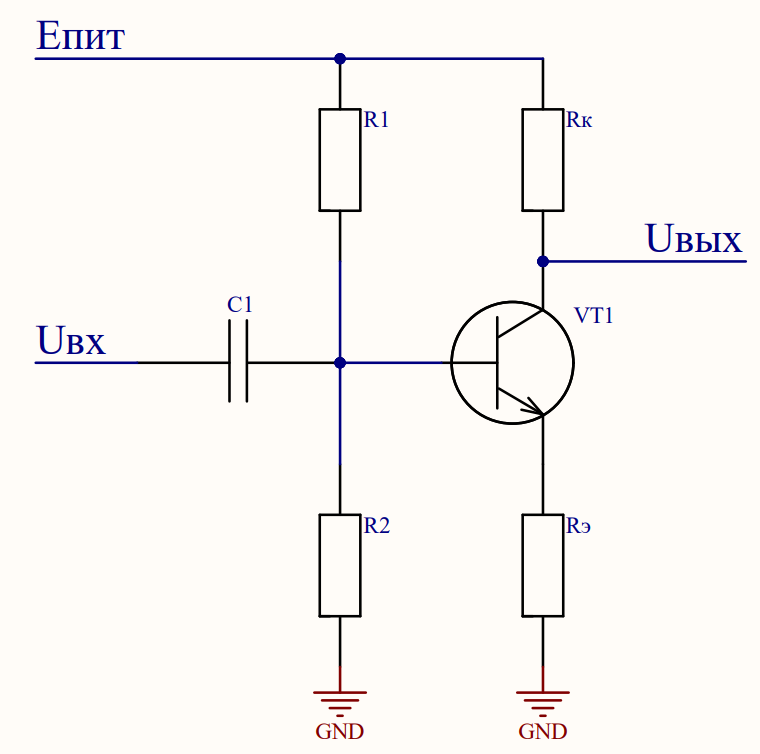


Рисунок 30 – вариант схемотехнического  
исполнения каскада с ОЭ

Коэффициент усиления по напряжению (в разах) равен

где: и резисторы в цепях коллектора и эмиттера соответственно.

Входное сопротивление схемы с ОЭ равно

Где: эквивалентное сопротивление делителя на входе (либо сопротивление одного токозадающего резистора), , см. рис. 30.

Выходное сопротивление схемы с ОЭ равно

где: дифференциальное сопротивление коллекторного перехода (типичное значение для схемы с ОЭ порядка 100-1000 кОм).

Для большей части схем достаточно приближения вида

Существуют различные варианты схемотехники каскада с ОЭ, которые будут рассмотрены в лекции, посвященной усилителям.

Основная сфера применения схемы с общим эмиттером – как правило, усиление сигнала по амплитуде (по напряжению), поэтому часто ее называют усилителем с ОЭ.

14 Активный режим: схема с общей базой

Третьей из основных схем включения транзисторов является **схема с общей базой**. Концептуально она представлена на рис. 31. Вариант схемотехнической реализации приведен на рис. 32.

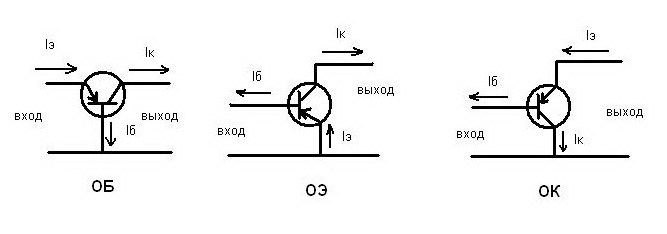


Рисунок 31 – концепция схемы с ОБ

**Главные свойства схемы с ОБ:**

* Низкое входное (порядка десятков-сотен Ом) и высокое выходное (десятки-сотни кОм) сопротивления;
* Отсутствие усиления по току;
* Высокое усиление по напряжению;
* База по переменному току заземлена либо подключена к земле через низкоомный резистор (либо напрямую при двухполярном питании, либо через конденсатор большой емкости при однополярном питании);
* Самые лучшие частотные свойства в области ВЧ и СВЧ (намного лучше, чем для ОЭ и чуть лучше, чем для ОК);
* Отсутствие инверсии сигнала на выходе.

Схема с ОБ в основном используется в СВЧ трактах, где источник сигнала имеет низкое сопротивление (это, например, антенны приемников и передатчиков).

Коэффициент усиления по напряжению (в разах) равен

Коэффициент усиления по току равен

Можно считать, что , пока нет приближения к предельной частоте (порядка сотен МГц – ГГц для ВЧ и СВЧ транзисторов).

Входное сопротивление составляет

Выходное сопротивление равно

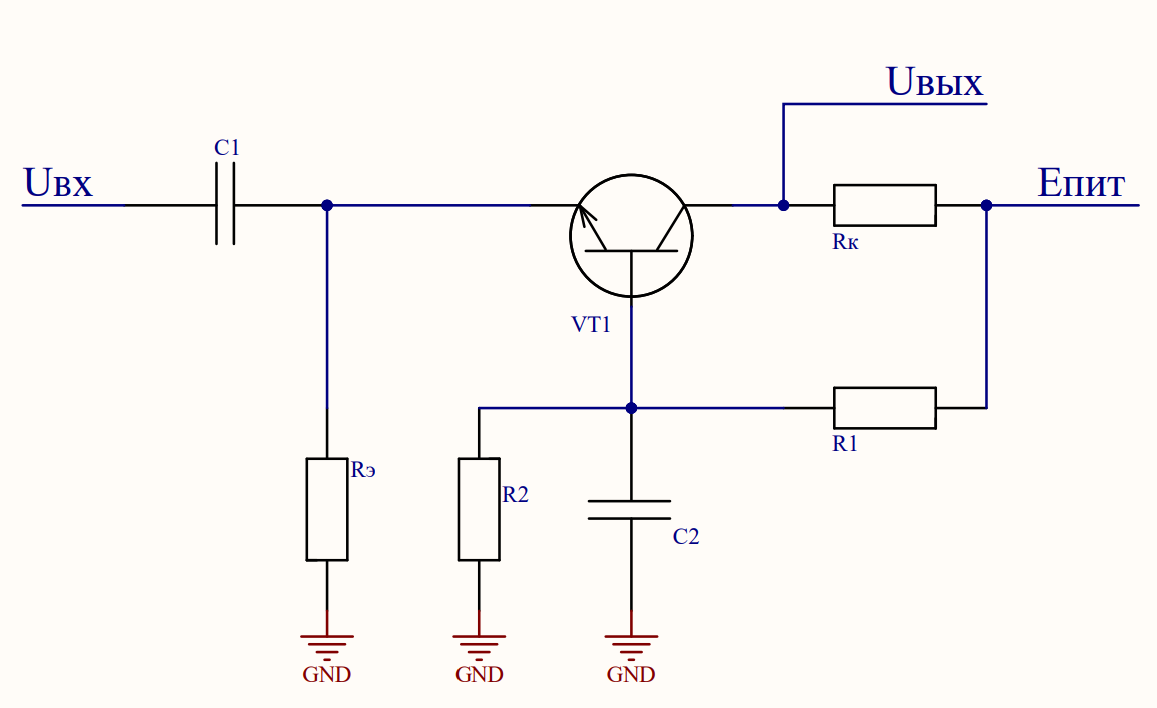


Рисунок 32 – вариант схемотехнического  
исполнения каскада с ОБ

Схема с ОБ используется для усиления сигналов там, где схемы на ОЭ уже не работают. **При использовании одинаковых транзисторов рабочие частоты ОБ намного выше, чем у ОЭ.**

Существует схемотехническое решение комбинации ОЭ и ОБ, сочетающее в себе преимущества ОЭ (большое усиление по напряжению и току, достаточно большое входное сопротивление) и ОБ (высокие рабочие частоты), называемое **каскодом**.

15 Основные параметры транзисторов при трех схемах включения

Для схем усилительных каскадов можно выделить примерные значения основных параметров. Однако такие значения дают лишь общее представление о порядках величин и, конечно, могут отличаться и выходить за указанные пределы.

Ниже на рисунке 33 представлены параметры входного и выходного сопротивлений, а также Ку по мощности, напряжению и току в разах.

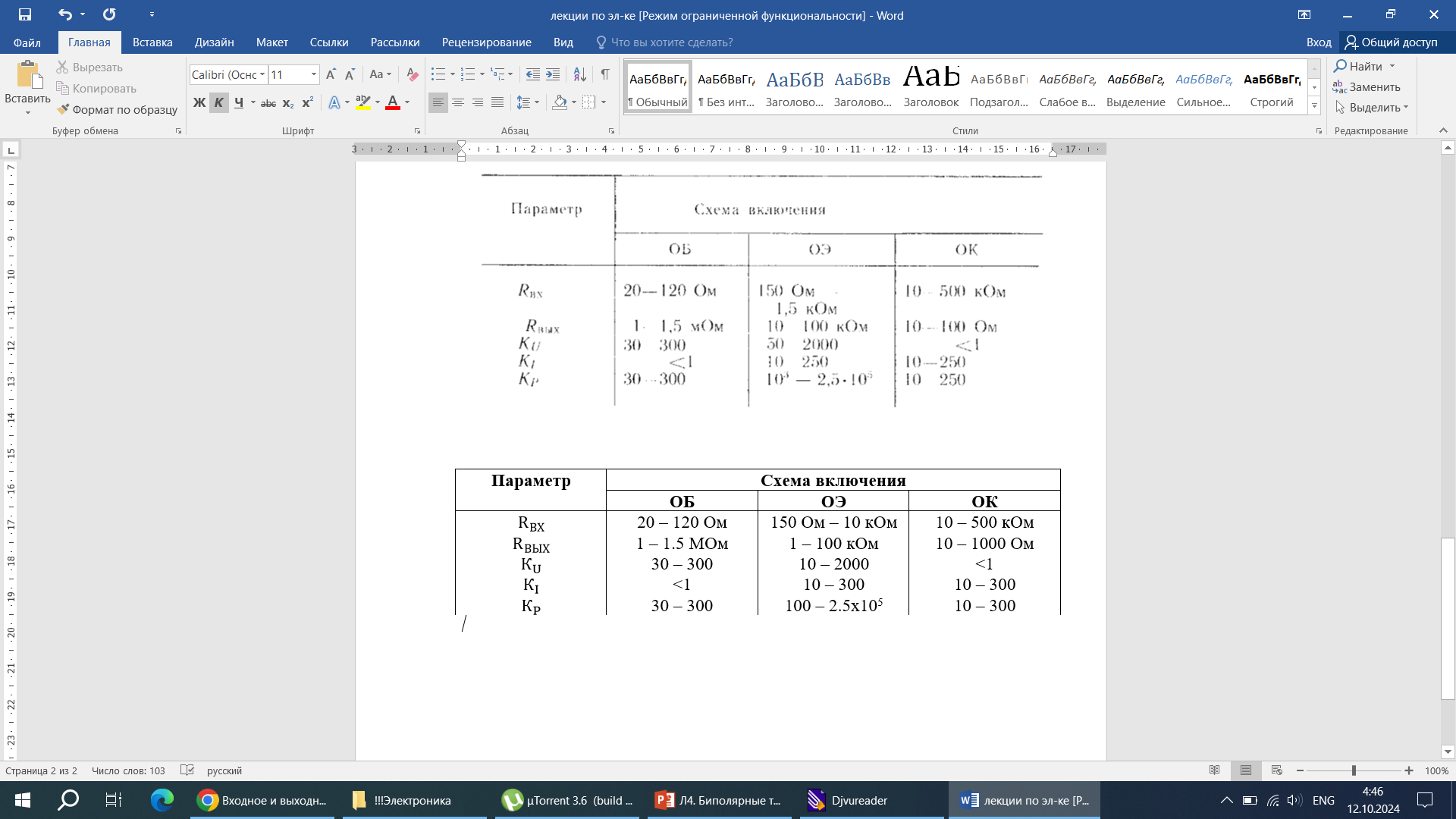


Рисунок 33 – сравнение схем ОК, ОЭ, ОБ

Спасибо за внимание!