

## Лабораторная работа №2

### Исследование характеристик биполярного транзистора и расчёт усилительного каскада

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Получение входной характеристики и семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;
- Расчёт усилительного каскада с заданием рабочей точки транзистора с помощью отрицательной обратной связи по току.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полупроводниковый прибор, имеющий три электрода и два взаимодействующих  $p$ - $n$ -перехода, называется биполярным транзистором. В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают  $p$ - $n$ - $p$  транзисторы и  $n$ - $p$ - $n$  транзисторы. Их условные обозначения и устройство приведены на рисунке 1.

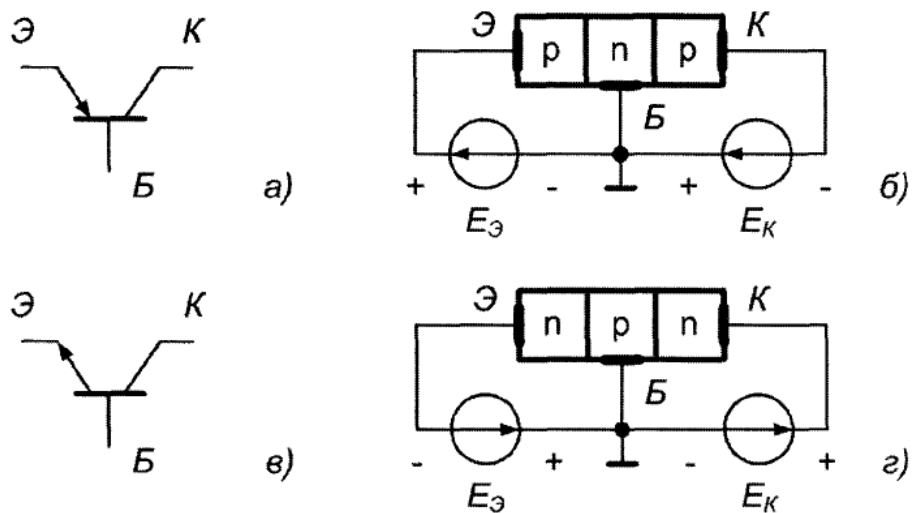


Рисунок 1 – Условные обозначения и устройство транзисторов  $p$ - $n$ - $p$  (а, б) и  $n$ - $p$ - $n$  (в, г) типов

Биполярные транзисторы, как правило, изготавливаются из кремния, германия или арсенида галлия. По технологии изготовления биполярные транзисторы делятся на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

В основном биполярные транзисторы применяются для построения схем усилителей, генераторов и преобразователей электрических сигналов в широком диапазоне частот (от постоянного тока до десятков гигагерц) и мощности (от десятков милливатт до сотен ватт). В соответствии с этим биполярные транзисторы делятся на группы по частоте (низкочастотные – не более 3 МГц; средней частоты – от 3 МГц до 30 МГц; высокочастотные – от 30 МГц до 300 МГц; сверхвысокочастотные – более 300 МГц) и по мощности (маломощные – не более 0,3 Вт; средней мощности – от 0,3 Вт до 1,5 Вт; большой мощности – более 1,5 Вт).

Разновидностью биполярных транзисторов являются лавинные транзисторы, предназначенные для формирования мощных импульсов наносекундного диапазона.

Другую разновидность биполярных транзисторов представляют двухэмиттерные модуляторные транзисторы, в которых конструктивно объединены две транзисторные структуры.

Широкое распространение в последние годы получили составные биполярные транзисторы (транзисторы Дарлингтона), обладающие очень высоким коэффициентом передачи тока.

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, различают следующие режимы его работы: линейный (усилительный), насыщения, отсечки и инверсный.

В линейном режиме работы биполярного транзистора эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, а в режиме отсечки – оба перехода в обратном направлении. В инверсном режиме коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в

обратном. Кроме рассмотренных режимов возможен ещё один режим – режим пробоя. Он является аварийным.

Принцип работы биполярного транзистора основан на возможности управления токами электродов путем изменения напряжений, приложенных к электронно-дырочным переходам. В линейном режиме, когда переход база-эмиттер открыт благодаря приложенному к нему напряжению  $U_{БЭ}$ , через него протекает ток базы  $I_B$ . Протекание тока базы приводит к инжекции зарядов из области коллектора в область базы, причем ток коллектора определяется выражением:

$$I_K = \beta_{DC} * I_B, \quad (1)$$

где  $\beta_{DC}$  – статический коэффициент передачи тока базы.

Прямое падение напряжения  $U_{БЭ}$  на эмиттерном переходе связано с током коллектора уравнением Эберса-Молла:

$$I_K = I_{КБО}(e^{I_{КЭ}/\varphi_T} - 1), \quad (2)$$

где  $I_{КБО}$  – обратный ток коллекторного перехода, а  $\varphi_T$  – температурный потенциал, который при температуре  $T=300$  К составляет для кремния примерно 25 мВ.

Из выражения (2) следует, что при прямом смещении эмиттерного перехода при условии  $\varphi_T < U_{БЭ} < \psi_K$  (где  $\psi_K$  – контактная разность потенциалов) ток коллектора возрастает с ростом напряжения  $U_{БЭ}$  по экспоненциальному закону:

$$I_K \approx I_{КБО} * e^{I_{КЭ}/\varphi_T}. \quad (3)$$

Важнейшими характеристиками транзистора являются его входные и выходные вольтамперные характеристики. Статические ВАХ биполярного транзистора приведены на рисунке 2. Кроме ВАХ для расчета и анализа транзисторных схем используют числовые характеристики: статический коэффициент передачи тока, коэффициент передачи тока, дифференциальное входное сопротивление. Значение этих характеристик зависят от схемы включения транзистора.

На рисунке 3 приведена схема включения биполярного транзистора  $n-p-n$ -типа с общим эмиттером. Для такой схемы справедливо следующее соотношение между токами:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}}, \quad (4)$$

где  $I_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Б}}$ ,  $I_{\text{К}}$  – сила тока в цепях эмиттера, базы и коллектора, соответственно.

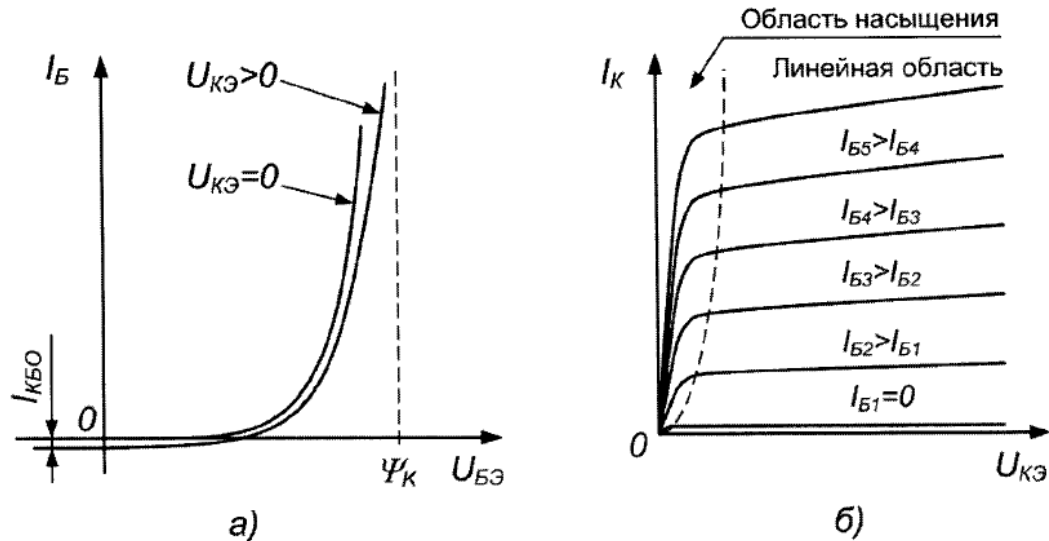


Рисунок 2 – Входные (а) и выходные (б) ВАХ биполярного транзистора

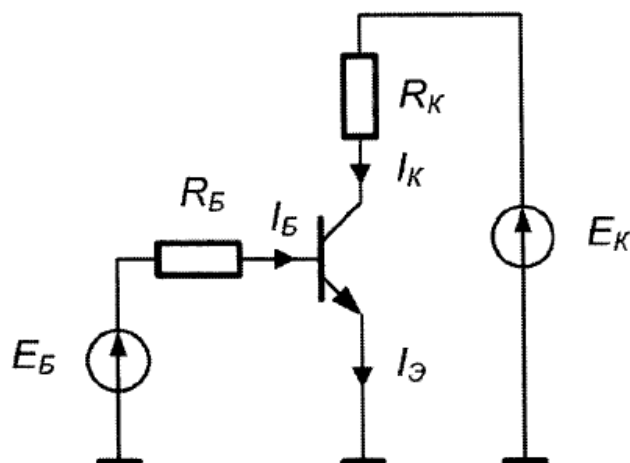


Рисунок 3 – Схема включения биполярного транзистора  $n-p-n$ -типа с общим эмиттером

Рассмотрим основные характеристики биполярного транзистора:

- Статический коэффициент передачи тока  $\beta_{\text{DC}}$  определяется как отношение тока коллектора  $I_{\text{К}}$  к току базы  $I_{\text{Б}}$ :

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B}. \quad (5)$$

- Коэффициент передачи тока  $\beta_{AC}$  определяется соотношением приращения коллекторного тока  $\Delta I_K$  к вызывающему его приращению тока базы  $\Delta I_B$ :

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (6)$$

- Дифференциальное входное сопротивление  $r_{BX}$  транзистора в схеме с общим эмиттером определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер  $\Delta U_{БЭ}$  к вызванному им приращению тока базы  $\Delta I_B$ :

$$r_{BX} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{Б2} - I_{Б1}}. \quad (7)$$

Дифференциальное входное сопротивление  $r_{BX}$  можно определить через параметры транзистора по формуле:

$$r_{BX} = r_B + \beta_{AC} * r_Э, \quad (8)$$

где  $r_B$  – распределенное сопротивление базовой области полупроводника,  $r_Э$  – дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер, определяемое из выражения  $r_Э = 25\text{мВ}/I_Э$ , а  $I_Э$  – постоянный ток эмиттера (в миллиамперах).

Первое слагаемое в выражении (8) много меньше второго, поэтому его можно упростить:

$$r_{BX} = \beta_{AC} * r_Э. \quad (9)$$

## ЗАДАНИЕ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ С ПОМОЩЬЮ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ

Для расчета транзистора по постоянному току необходимо определить номинальные значения резисторов, которые задают рабочую точку транзистора. Рассмотрим схему каскада на рисунке 4. Резисторы служат для задания рабочей точки, конденсатор большой емкости (примерно 1 мкФ)

выполняет роль гальванической развязки по постоянному току. В данном случае необходимо найти величины сопротивлений  $R_K$ ,  $R_L$ ,  $R_2$  и  $R_3$ .

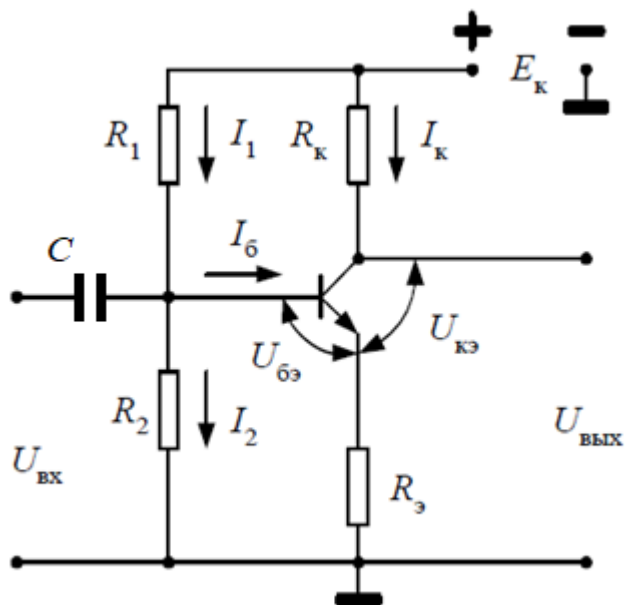


Рисунок 4 – Схема с ООС по току

Выберем рабочую точку «А» транзистора с параметрами  $U_{КЭА}$  и  $I_{КЭА}$ . Напряжение источника питания  $E_K$  считается известным. Проведем нагрузочную прямую на графике выходных характеристик через точку «А» и точку с координатам  $[E_K, 0]$  и продлим её до пересечения с осью тока, как показано на рисунке 5.

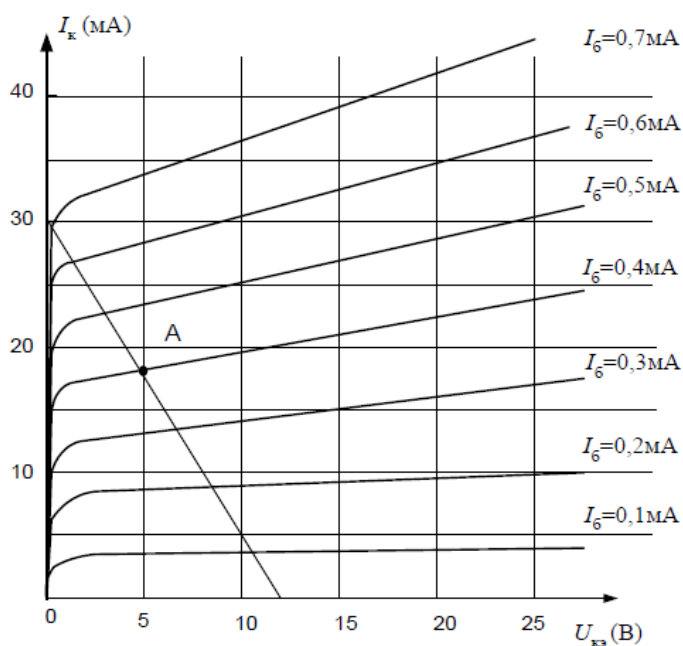


Рисунок 5 – Выходные характеристики транзистора

По нагрузочной характеристике находим максимальное значение тока насыщения транзистора  $I_{KH}$ . Это ток в точке пересечения нагрузочной прямой и оси тока. Зная ток насыщения, можно найти величину сопротивления резистора в цепи коллектора  $R_K$  следующим образом:

$$R_K = \frac{E_K}{I_{KH}}. \quad (10)$$

Необходимо выбрать из стандартного ряда сопротивлений номинал, ближайший к полученному значению.

Далее по выходной характеристике необходимо определить ток базы в точке «А»  $I_{\delta A}$ .

Зная ток базы в точке «А»  $I_{\delta A}$  можно определить положение точки на входной характеристике (рисунок 6), а затем получить падение напряжения на базе  $U_{\delta \Delta A}$ .

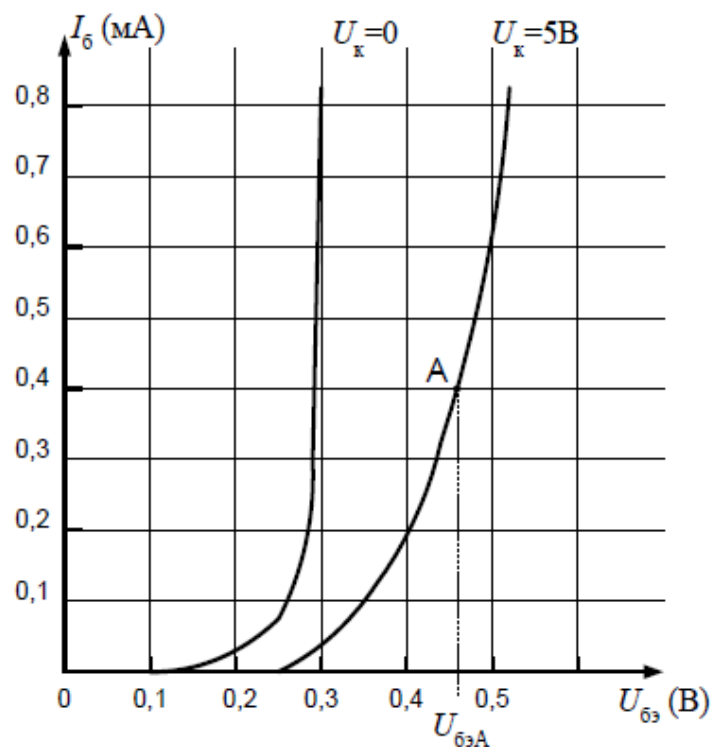


Рисунок 6 – Входные характеристики транзистора

Ток эмиттера является суммой токов коллектора и базы:

$$I_{\varepsilon} = I_B + I_K. \quad (11)$$

Уравнение равновесия напряжений по второму закону Кирхгофа для цепи эмиттер-коллектор имеет вид:

$$E_K = I_{кА} * R_K + U_{кэ} + I_{эА} * R_э. \quad (12)$$

Для входной цепи по второму закону Кирхгофа можно составить два уравнения равновесия напряжений:

$$E_K = I_1 * R_1 + I_2 * R_2. \quad (13)$$

$$E_K = I_1 * R_1 + U_{бэА} + U_{R_э} = I_1 * R_1 + U_{бэА} + I_{эА} * R_э. \quad (14)$$

Из уравнений (13) и (14) следует, что:

$$U_{R2} = I_2 * R_2 = U_{R_э} + U_{бэА} = I_{эА} * R_э + U_{бэА}. \quad (15)$$

Сопротивление  $R_э$  осуществляет отрицательную обратную связь по току. Падение напряжения на нём должно быть небольшим, поэтому обычно из практических соображений выбирают  $U_{R_э} \approx (0.1 \div 0.3)E_K$ . Учитывая это соотношение, можно найти значение сопротивления в цепи эмиттера:

$$R_э = \frac{U_{R_э}}{I_{эА}} = \frac{(0.1 \div 0.3)E_K}{I_{эА}}. \quad (16)$$

Аналогично  $R_K$ , для  $R_э$  необходимо выбрать номинал из стандартного ряда, ближайший к полученному значению.

Падение напряжения на эмиттерном сопротивлении будет равно:

$$U_{R_э} = I_{эА} * R_э. \quad (17)$$

Теперь  $U_{R2}$  может быть рассчитано из выражения (15) с учетом результата, полученного в выражении (17).

Для расчета сопротивления  $R_2$  необходимо знать величину тока  $I_2$ . Из практических соображений значение тока  $I_1$  равно:

$$I_1 = 5 * I_{бА}. \quad (18)$$

Тогда

$$I_2 = I_1 - I_{бА}. \quad (19)$$

Теперь можно рассчитать величину сопротивления резистора  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2}. \quad (20)$$

Номинал резистора выбираем из стандартного ряда.



Теперь по уравнению (13) может быть рассчитана величина сопротивления резистора  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{E_K - U_2}{I_1}. \quad (21)$$

Номинал резистора выбираем из стандартного ряда.

Таким образом в уравнениях (10), (16), (20) и (21) получены все необходимые величины сопротивлений резисторов в схеме.

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

### *1 Получение входной характеристики биполярного транзистора*

1.1 Соберите в LTspice схему включения биполярного транзистора в соответствии с рисунком 3, исключив из неё резисторы. Транзистор выберите из таблицы 1 в соответствии с вариантом. Напряжение  $E_K$  установите 5 В.

1.2 Снимите входную характеристику транзистора. Для этого запустите симуляцию в режиме DC sweep. В настройка симуляции в качестве источника укажите источник напряжения база-эмиттер, начальное значение, конечное значение и шаг измерения выберите так, чтобы ВАХ была удобна для наблюдения. Занесите ВАХ в отчёт.

1.3 Рассчитайте дифференциальное входное сопротивление транзистора по формуле (7).

### *2 Получение семейства выходных характеристик биполярного транзистора*

2.1 Для снятия выходных характеристик используется схема из п. 1.1. В настройках симуляции выберите режим DC sweep. В качестве первого источника укажите источник напряжения коллектора, начальное значение, конечное значение и шаг измерения выберите так, чтобы ВАХ была удобна для наблюдения. В качестве второго источника укажите источник напряжения

база-эмиттер. Начальное значение – 0.7, конечное значение – 1.5, шаг – 0.2. Выберите для наблюдения коллекторный ток. Таким образом вы получите семейство ВАХ при разных токах базы.

2.2 Следующим шагом необходимо определить какому току базы соответствует каждая из выходных характеристик. Для этого в меню Plot Settings выберите Add Plot Pane. В новом окне выберете для наблюдения ток базы. Соотнесите их с выходными характеристиками.

2.3 В отчёт занесите только семейство выходных характеристик. На графике отметьте какому току базы соответствует каждая из характеристик.

2.4 Для каждой полученной выходной характеристики определите значение тока коллектора, соответствующее напряжению коллектор-эмиттер 5 В. Полученные значения занесите в отчёт.

2.5 Используя полученные значения тока коллектора и значения тока базы, определите коэффициент передачи тока по формуле (6). Запишите полученное значение в отчёт.

### *3 Задание рабочей точки с помощью отрицательной обратной связи по току*

В данном подразделе необходимо выбрать рабочую точку и произвести расчёт в соответствии с разделом «Задание рабочей точки с помощью отрицательной обратной связи по току» данного руководства. Исходными данными являются марка транзистора и напряжение питания коллектора  $E_K$ .

3.1 Для выбора рабочей точки необходимо определить рабочий диапазон транзистора, учитывая его ограничения:  $I_{K\_max}$ ,  $U_{кэ\_max}$  и  $P_{max}$ . Для этого можно построить линию максимальной мощности на семействе выходных ВАХ, полученных в п. 1 и 2. Она будет задана уравнением  $I_K = \frac{P_{max}}{U_{кэ}}$  и ограничена  $I_{K\_max}$  и  $U_{кэ\_max}$ . Рабочий диапазон транзистора лежит под этой линией.

3.2 Рабочую точку для дальнейшего расчёта выберите самостоятельно. Для этого постройте нагрузочную линию, учитывая известное напряжение питания коллектора  $E_K$ . Затем выберите точку на этой линии. Целесообразно выбирать точку пересечения с одной из уже построенных ВАХ, так как при расчёте потребуется определить ток базы  $I_{бА}$ . Также рекомендуется выбирать рабочую точку в середине нагрузочной линии. График с изображением семейства ВАХ, линии мощности и нагрузочной линии, а также выбранной рабочей точки занесите в отчёт.

3.3 Получив координаты рабочей точки и используя исходные данные произведите расчёт в соответствии с разделом «Задание рабочей точки с помощью отрицательной обратной связи по току» данного руководства. Расчёт занесите в отчёт.

3.4 Соберите схему усилителя на биполярном транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером, представленную на рисунке 4 в LTspice. Используйте значения, полученные при расчёте из п. 3.3.

3.4 Произведите моделирование работы схемы при постоянном входном сигнале. Осциллограммы выходных тока и напряжения занесите в отчёт. Сравните полученные значения с выбранными вами параметрами рабочей точки, запишите выводы в отчёт.

3.5 Произведите моделирование работы схемы при гармоническом входном сигнале. Осциллограммы выходных тока и напряжения занесите в отчёт. Проанализируйте полученные результаты и запишите выводы в отчёт.

3.6 Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению как отношение амплитуды выходного напряжения к входному. Занесите полученный результат в отчёт.

3.7 Проведите частотный анализ схемы с помощью режима AC analysis. Полученную характеристику занесите в отчёт.

Таблица 1 – Исходные данные

Вариант	Транзистор	$E_K$ , В
1	BC848B	12
2	2N2369	15
3	2SC4081UB	10
4	SSTA06	18
5	2SD1898	20
6	BCW60C	12
7	2SCR553P	20
8	ZTX1048A	18
9	2SCR372P	16
10	2N5089	10