



**Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры**

---

**А.П. КУЛИНИЧ**

**СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ. СХЕМОТЕХНИКА**

**ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛОГОВЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

**ТОМСК 2015**

## Содержание

Содержание	2
Условные обозначения	3
<b>Лабораторная работа: «Линейный аналоговый транзисторный усилитель».</b>	
1. Общие сведения об аналоговых усилителях	4
1.2. Нагрузочные характеристики схемы с ОЭ.	7
1.3. Эквивалентная схема усилителя	9
1.4. Частотная характеристика усилителя (АЧХ)	9
1.5. Резонансный линейный усилитель	
2. Выполнение лабораторной работы	11
2.1 Задание на предварительную подготовку к лабораторной работе	13
2.2. Описание схемы макета рис.9.	14
2.3. Измерение проходных характеристик по постоянному току.	15
2.4. Определение линейного режима с минимальными искажениями сигнала.	15
2.5. Измерение передаточной характеристики по переменному току в выбранной рабочей точке А	16
2.6. Измерение частотной характеристики усилителя	16
2.7. Линейный резонансный усилитель	17
3. Контрольные вопросы	19

## Условные обозначения

$I_c, I_b, I_e$	Токи коллектора, базы и эмиттера биполярного транзистора, соответственно
$U_c, U_b, U_e$	Напряжения на коллекторе, базе и эмиттере относительно общей шины (общего провода)
$I_{c0}, I_{b0}, I_{e0}$	Токи и напряжения коллектора, базы и эмиттера, при отсутствии сигнала ( $U_i=0$ )
$U_i, U_o$	Напряжение сигнала на входе выходе усилителя
$I_{mc}, I_{mb}, I_{me}, U_{mc}, U_{mb}, U_{me}, U_{mi}, U_{mo}$	Амплитуды переменных токов и напряжения на транзисторе, на входе и выходе усилителя
$R_c, R_b, R_e$	Сопротивления в цепи коллектора, базы и эмиттера
$E$	Напряжение постоянного тока источника питания
$I_b=f(U_b, U_c)$	Входная базовая ВАХ транзистора
$I_c=f(U_c, U_b)$	Коллекторная ВАХ
$I_c=f(U_b, U_e)$	Проходная (передаточная) ВАХ по постоянному току
$U_c=f(U_b, R_c)$	Проходная (передаточная) ВАХ по напряжению при заданном $R_c$ и $E$
$A_1, A_2, A_3, A_4$	Точки нагрузочной характеристики ( $E=U_c+I_cR_c$ ) при фиксированных токах базы $I_b$ ( $R_1-R_4$ )
$h_{11}, h_{21}, h_{12}, h_{22}$	Параметры линейной схемы замещения транзистора - входное сопротивление, коэффициентом обратной связи, $h_{21}$ - коэффициентом усиления по току, $h_{22}$ - выходная проводимость
$U_{mc}=f(U_{mi})$	Проходная амплитудная характеристика, в заданной рабочей точке $A_i$ на частоте $f$

## Лабораторная работа: «Линейный аналоговый транзисторный усилитель».

### 1. Общие сведения об аналоговых усилителях

1.1. Линейным или аналоговым усилителем называют такую схему транзисторного усилителя, который при определенных ограничениях имеет постоянный независимый от амплитуды коэффициент передачи (усиления), при котором выходной сигнал является аналогией входного сигнала, но имеет большую амплитуду (мощность).

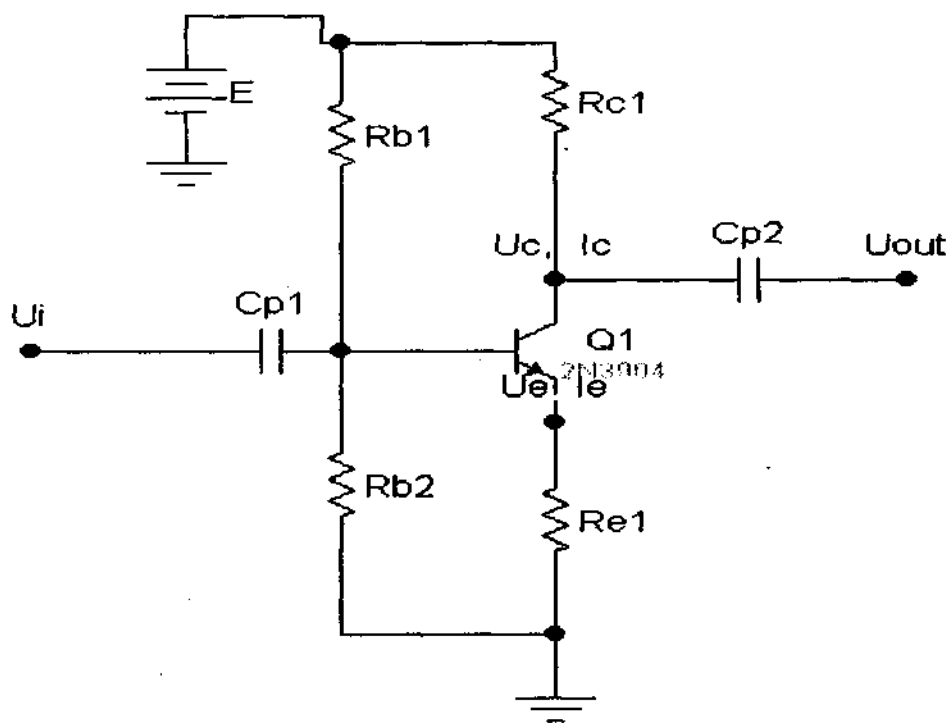


Рис.1. Основные элементы схемы транзисторного усилителя

Изображенная на рис.1 схема может выполнять различные функции как линейного усилителя, так и другие как то ограничителя, нелинейного преобразователя, транзисторного ключа, детектора амплитудно-модулированных сигналов. Её свойства зависят от выбора рабочей точки, т.е. от коллекторного тока  $I_{oc}$  и напряжения на коллекторе  $U_{oc}$  при отсутствии сигнала, её положения на нагрузочной характеристике и семействе вольтамперных характеристик (ВАХ).

На рис.2 приведены ВАХ транзистора для определения режима работы усилителя при конкретном напряжении питания  $E$  и нагрузочном сопротивлении  $R_c$ . Необходимо провести нагрузочную линию, описываемую уравнением

$$I_c * R + U_c = E$$

Точки пересечения этой прямой с коллекторными характеристиками

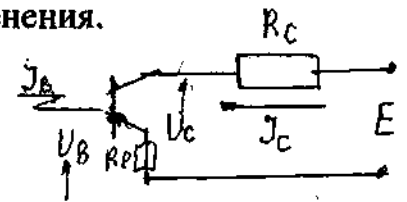
$$I_c = f(U_c, I_b)$$

при заданных токах базы определяют рабочую точку  $i_{oc}$  и  $U_{oc}$ , т.е. режим работы транзистора при отсутствии сигнала. Для линейного усилителя рабочую точку следует выбирать на участке с относительно малым изменением коэффициентом усиления тока  $h_{21}$ , т.е. на середине нагрузочной характеристики

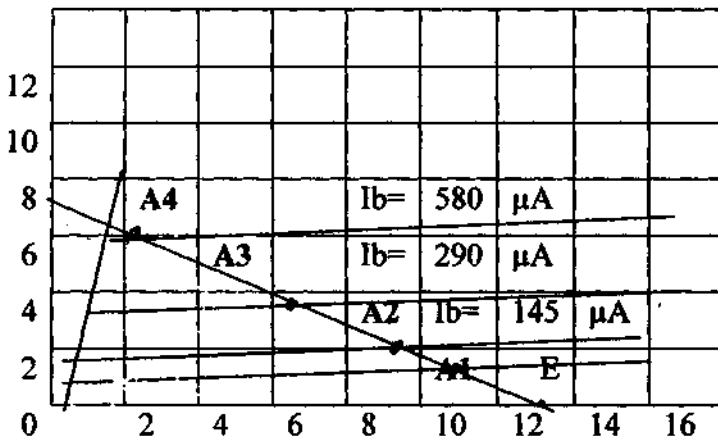
$$I_c = f(U_{cc})$$

при средних значения тока коллектора. Как при малых значения тока коллектора, близких к отсечке  $i_{co}$  так и больших – близких к току насыщения  $i_{cs}$ . коэффициент передачи испытывает наибольшее изменения.

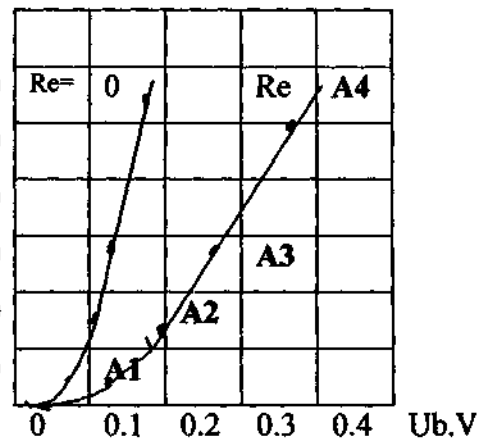
нагрузочная линия -  $E = I_c * R_c + U_c$



$I_c$ .mA



$I_b$ . $\mu A$



$$\frac{E}{R_c} = 7mA \quad E=14V \quad R_c=2k$$

Рис.2. Коллекторный и базовые ВАХ транзистора -

$$I_c = f(U_c, I_b) \quad I_b = f(U_b)$$

Для усиления синусоидальных колебаний это означает, что на положительный и отрицательный полупериоды приращения тока  $\Delta I_c$  от  $\Delta U_b$  будут не одинаковыми. Определенное улучшение линейности передаточной характеристики можно получить за счет применения отрицательной обратной связи, которая образуется в схеме с ОЭ за счет сопротивления  $R_e$ , которое одновременно увеличивает входное сопротивление и уменьшает влияние разброса параметров транзисторов и изменения температуры на характеристики усилителя.

Лучшую линейность передаточной характеристики имеют схемы с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК), рис.3. Режим работы этих схем по постоянному току может быть получен из соответствующих ВАХ. Усилители с ОБ имеют широкую полосу усиливаемых частот, полностью использующие частотные свойства транзистора, но имеют малое входное сопротивление. Схемы с ОК – эмиттерные повторители имеют большое входное сопротивление, малый коэффициентом усиления напряжения  $< 1$  и являются усилителями мощности.

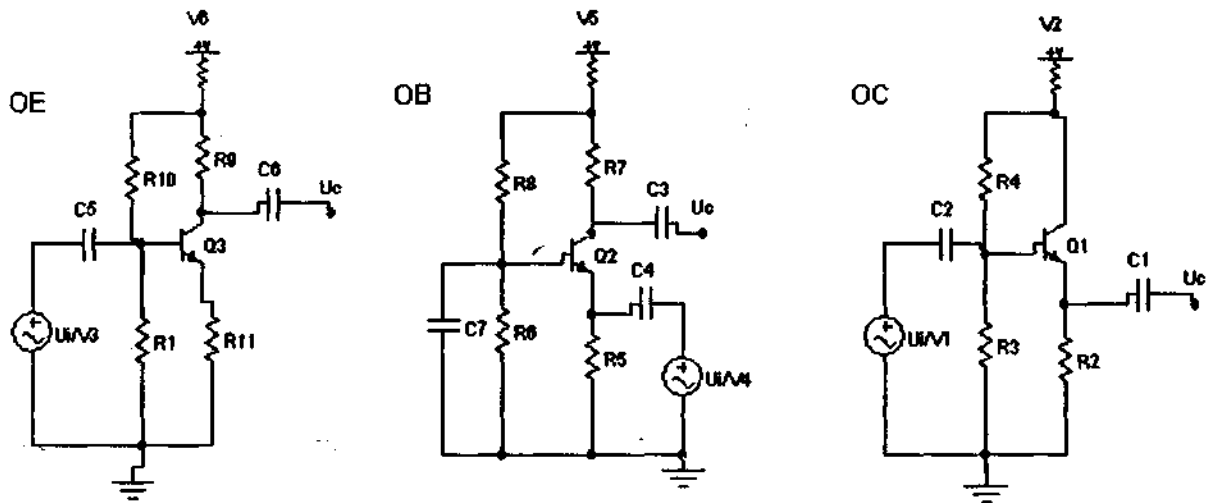


Рис.3. Включение транзистора по схемам: ОЭ- с общим эмиттером, ОК- с общим коллектором, ОБ- с общей базой.

## 1.2. Нагрузочные характеристики схемы с ОЭ.

Нагрузочной характеристикой называется зависимость

$$I_c = f(U_c, E, R_c),$$

полученная графическим построением линии

$$E = I_c * U_c + I_c * R_c$$

с пересечением выходных коллекторных характеристик:

$$I_c = f(U_c, I_b).$$

Нагрузочная характеристика должна проходить ниже кривой

$$I_c * U_c = P_{\max},$$

где  $P_{\max}$  – максимально допустимая мощность рассеивания на транзисторе.

Сопоставляя точки  $A1 \dots A4$  на нагрузочной характеристике с соответствующими точками по току  $I_c$  с базовой характеристикой

$$I_b = f(U_b)$$

получаем проходные характеристики, определяющие ток коллектора и напряжение на коллекторе, как функцию напряжения на базе, которые можно оценивать крутизной

$$S = \Delta I_c / \Delta U_b$$

и коэффициентом усиления по напряжению

$$K = \Delta U_c / \Delta U_b$$

Крутизна  $S$  может быть вычислена по параметрам  $H$  около выбранной рабочей точки  $A$

$$S = h_{21} / h_{11}$$

а коэффициент усиления равняется

$$K = S * R_c$$

Здесь необходимо отметить особое значение сопротивления  $R_c$  образующем обратную связь, увеличивающая входное сопротивление транзистора  $h_{11}$  и стабильность работы усилителя, но уменьшающая коэффициент усиления

$$K = \frac{-h_{21} * R_c}{h_{11} + (h_{21} + 1) * R_e}$$

Для повышения коэффициента усиления по переменному току сопротивление  $R_e$  шунтируют конденсатором, что устраняет обратную связь на высоких частотах.

Выбор рабочей точки **A** существенно влияет на передаточную характеристику и форму сигнала на выходе. Для линейного усилителя двуполярного сигнала рабочую точку следует выбирать на середине передаточной характеристики. При этом падение напряжения на сопротивлении  $R_c$  и на транзисторе примерно равны. Такой режим работы усилителя называется **режимом А**. В этом режиме искажения сигнала минимальные, однако его коэффициент полезного действия менее 0,5, но коэффициент усиления по напряжению – наибольший. Линейный режим характеризуется так же постоянством  $I_{c0}$ . Выбор рабочей точки **A** при малых токах  $I_{c0}$  (**режим В**) пригоден для усиления положительных импульсов и применяется также в двухтактных схемах. Выбор крайних точек  $I_{c0}=0$  и  $I_{c0} \text{ max}$  применяется при работе схемы в нелинейных режимах: детектирование амплитудномодулированных сигналов, в ключевых режимах. Изображение проходных характеристик, рис.4, можно наблюдать на экране осциллографа подавая на горизонтальную развертку «X» напряжения на базе, а на канал «Y» - напряжение на коллекторе.

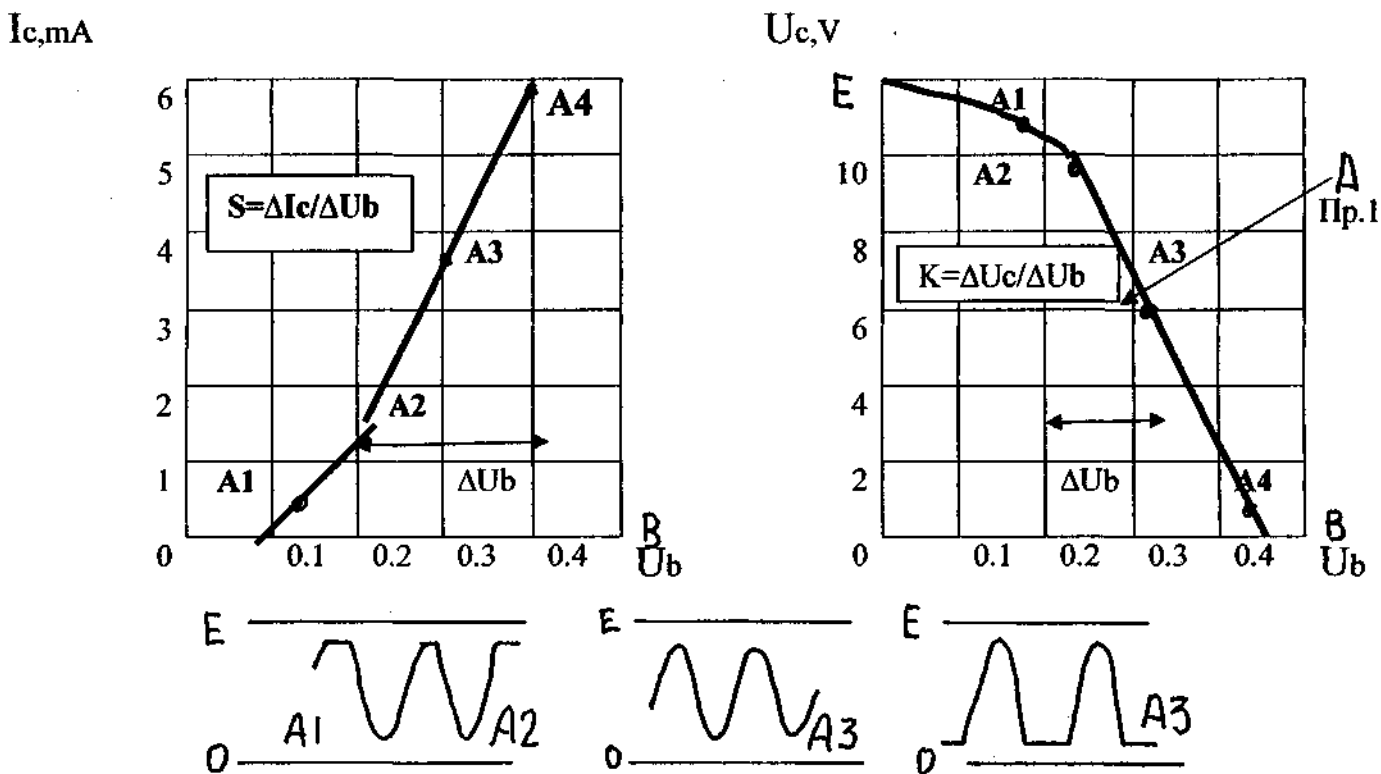


Рис.4. Проходные характеристики по току и напряжению. Изменение формы сигнала при выборе рабочей точки.  $\Delta \sigma$



### 1.3. Эквивалентная схема усилителя

При выборе рабочей точки на линейном участке и малой величине сигнала можно использовать эквивалентную схему транзистора рис.5.

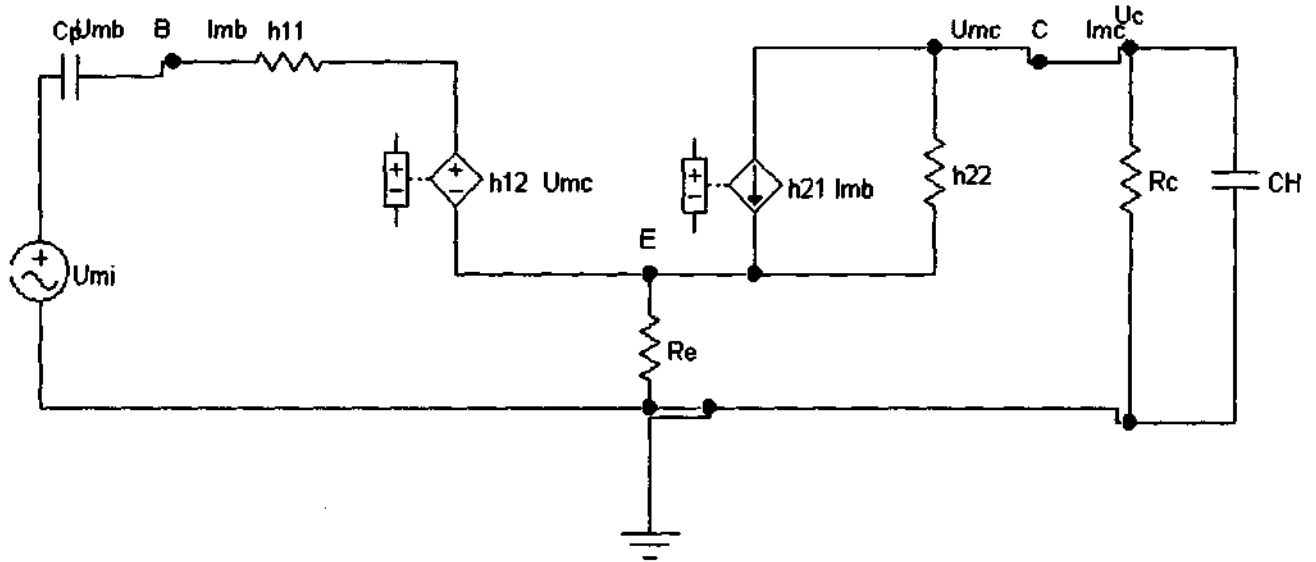


Рис5. Эквивалентная линейная схема транзисторного усилителя.

Параметры  $h$  зависят от рабочей точки  $I_{ос}$ ,  $U_{ос}$ .

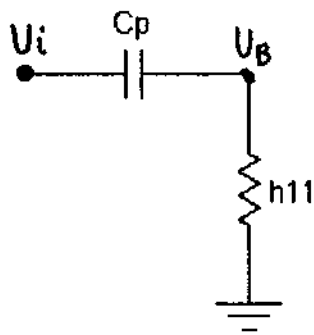
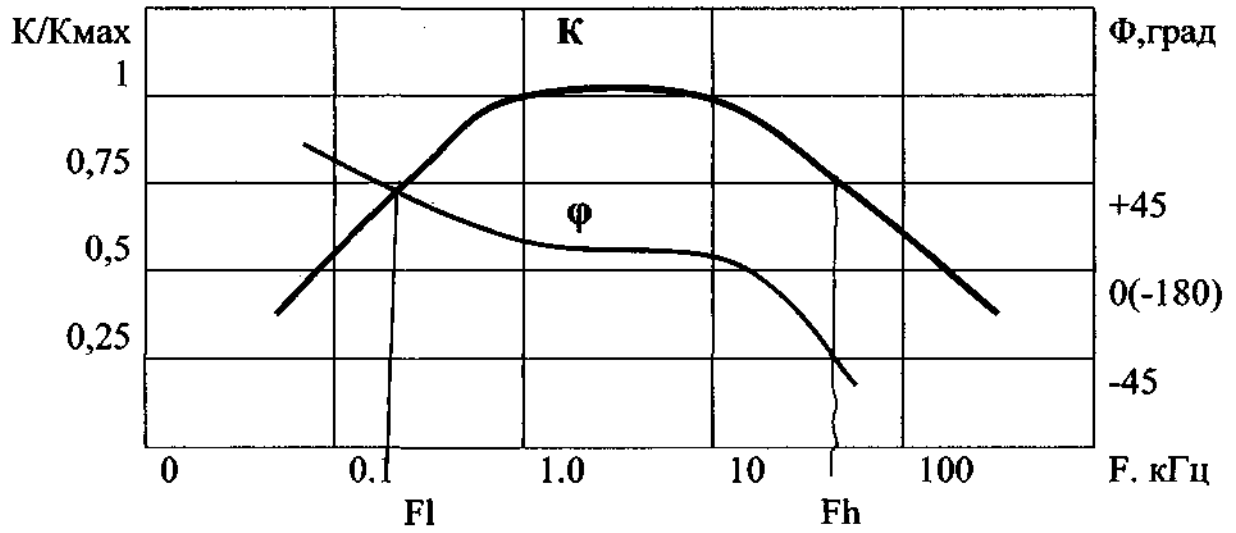
### 1.4. Частотная характеристика усилителя (АЧХ)

Частотная характеристика усилителя может быть рассчитана по эквивалентной схеме и определяется, если пренебречь влиянием параметров транзистора от частоты и определяется емкостью разделительного конденсатора  $C_p$  и емкостью шунтирующей нагрузки  $C_n$ , которые уменьшают коэффициент передачи в области низких и верхних частот. Рабочей частью АЧХ

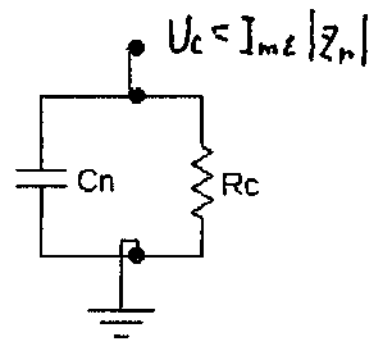
$$K=f(F)$$

Считают полосу частот на границах которой  $F_n$  и  $F_v$  усиление уменьшается до  $0,7$  от  $K_{max}$ , фазовый сдвиг составляет  $45$  град. Разделительный конденсатор  $C_p$  применяется для того, чтобы исключить влияние внешних цепей на режим транзистора по постоянному току. Емкость  $C_n$  нагрузки складывается из емкости монтажа, выходной емкости транзистора и емкости подсоединяемых проводников,

входной емкости последующих каскадов. В усилителях постоянного тока разделительные конденсаторы исключаются.



$$2\pi F C_p h_{11} = 1$$



$$2\pi F h C_n R_c = 1$$

Рис.6. Частотные и фазовые характеристики резистивного усилителя

## 1.5. Резонансный линейный усилитель

Для усиления модулированных АМ и ЧМ сигналов, как правило применяют резонансные усилители. Коллекторной нагрузкой резонансного усилителя служит параллельный колебательный контур, добротность которого и эквивалентное сопротивление определяют в зависимости от требования получения нужного коэффициента усиления и полосы пропускания. Коэффициент усиление  $K_{\max}$  на несущей частоте сигнала  $f_0$  равен

$$K = S * R_{oe} \quad \text{при} \quad f = f_0$$
$$R_{oe} = p^2 * Q * \rho \quad \rho = 2\pi f_0 * L = 1 / 2\pi f_0 C \quad p = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$$

где  $p$  - коэффициент включения,  $\rho$  - характеристическое сопротивление контура;

$n_1, n_2$  - число витков секций катушки индуктивности .

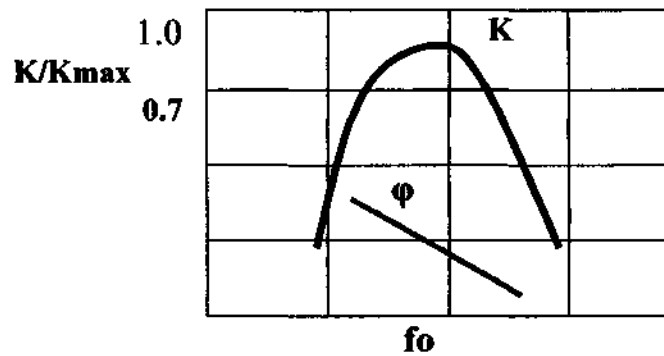
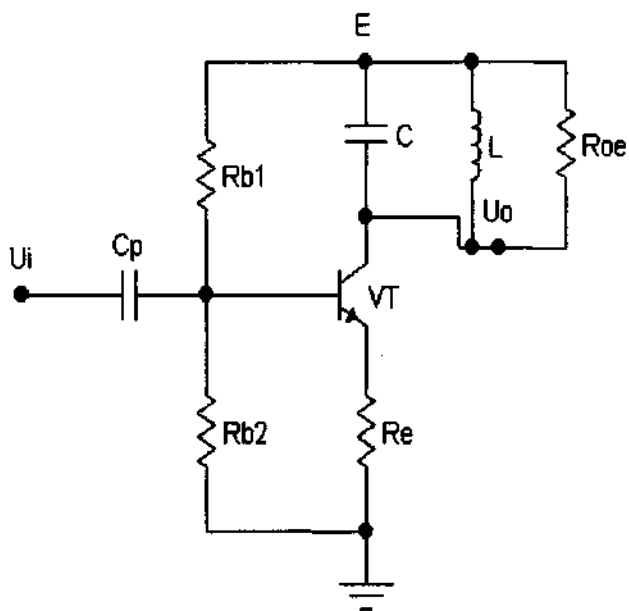
Зависимость модуля полного сопротивления контура от частоты определяет АЧХ усилителя.

$$|R| = \frac{R_{oe}}{\sqrt{1 + \left( \frac{2Q(f_0 - f_p)}{f_p} \right)^2}}$$

Фазовая характеристика:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2Q(f_0 - f_p)}{f_p}$$

Резонансный усилитель в линейном режиме используется для усиления слабых сигналов в приемных устройствах. Для усиления больших сигналов применяют режим В с отсечкой одного полупериода. Рабочая точка выбирается  $I_{co}=0$   $U_{oc}=E$ . Это повышает коэффициент полезного действия до 0,7 – 0,80 и применяется в передающих устройствах. Изучение нелинейных резонансных усилителей выполняется в другой лабораторной работе.



$$2\Delta f = \frac{f_p}{Q} \quad K_{\max} = SR_{oe}$$

Рис.7. Схема резонансного усилителя, его АЧХ и ФЧХ.

## 2. Выполнение лабораторной работы

### 2.1 Задание на предварительную подготовку к лабораторной работе

2.1.1. Изучить методику расчета линейного усилителя для малых сигналов при замене транзистора его эквивалентной схемой.

2.1.2. Изучить схему лабораторного макета. Определить  $R_c$  и  $E$ . Ознакомится с программой измерений.

2.1.3. По данным лабораторной работы «ВАХ полупроводниковых приборов» по измеренным коллекторным ВАХ транзисторов, находящихся на макете, построить нагрузочные характеристики для заданных  $E$  и  $R_c$ .

$$I_c = f(U_c, I_b)$$

$$U_c = f(U_b, R_c, E)$$

Определить рабочую точку для линейного режима усиления. Определить частоты спада частотной характеристики на уровне - 3 дБ. Возможно ориентировочный расчет усилителя произвести по ВАХ приведенной на рис.2.

## 2.2. Описание схемы макета рис.9.

На лицевой панели макета находятся резисторы R1, R2, R3, R4. При переключении резисторов к базе транзистора они задают постоянный ток база  $I_{b0}$  разной величины. Соответствующие рабочие точки транзисторов обозначаются соответственно: A1, A2, A3, A4. При необходимости уточнение величины тока базы  $I_{b0}$  он может быть измерен микроамперметром, расположенным на передней стенке макета справа. Выводы транзистора подключаются к соответствующим гнездам, обозначенным на схеме. Соединительные внешние проводники обозначены широкими линиями. Данные элементов схемы приведены в приложении.

В комплект измерительных приборов входит:

Г-3-118 – генератор синусоидального напряжения с частотой от 20Гц до 200 кГц и выходным напряжением от 1 мВ до 10В;

В-3-38 – милливольтметр с пределами измерения от 0,5 мВ до 100В действующего напряжения в диапазоне от 20Гц до 1 МГц;

В-7-26 – мультиметр для измерений постоянных напряжений;

С-4-72 (С-4-72, С1-65, С-1-68) – осциллограф.

Приборы В-3-38, Г-3-118, осциллограф подключаются к схеме макета при помощи экранированных коаксиальных кабелей, имеющих на конце одноконтактные штепсели. Провод с узелком – подключается первым к общему проводу на макете.

**Предупреждение: перед включением приборов в сеть переменного тока ~220В проверить надежность присоединения корпусов приборов с шиной заземления, находящейся на столе!**

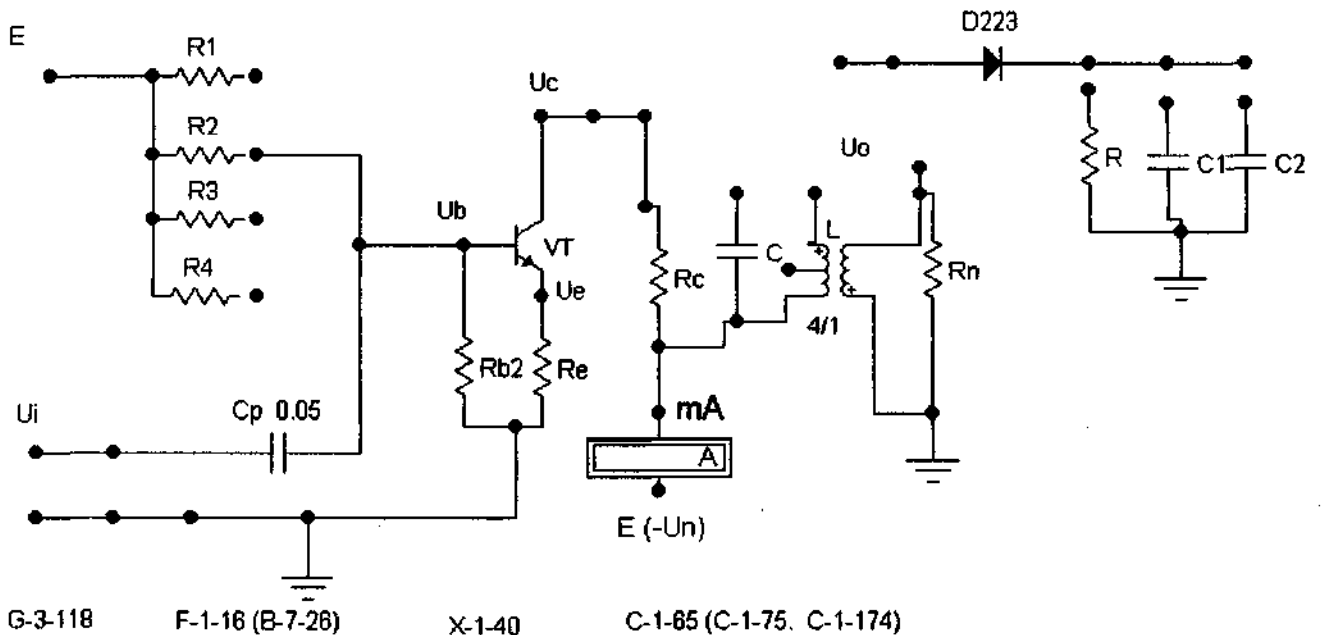


Рис.9. Схема лабораторного макета.

### 2.3. Измерение проходных характеристик по постоянному току.

Собрать схему усилителя на макете. Включая в цепь базы последовательно резисторы  $R1 \dots R4$  измерить  $U_{ob}$ ,  $U_{oc}$  и  $I_{oc}$  в точках  $A1 \dots A4$ . Сравнить результаты измерения с данными расчета нагрузочной характеристики, построенной по ВАХ. Определить крутизну характеристики  $S$  и коэффициент усиления  $K$  на отрезка  $A1 - A2$ ,  $A2 - A3$ ,  $A3 - A4$ , построить графики зависимости  $I_c$  и  $U_c$  от  $U_b$ .

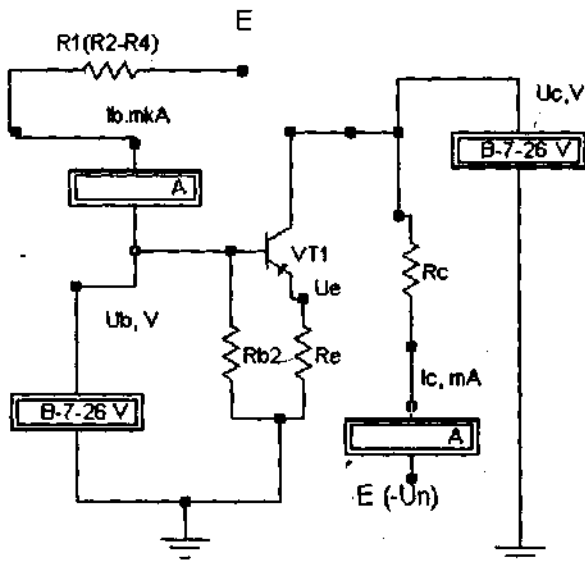


Рис.10. Схема включения приборов

R	R1/A1	R2/A2	R3/A3	R4/A4
$I_b, \text{mA}$				
$U_b, \text{V}$				
$I_c, \text{mA}$				
$U_c, \text{V}$				
$S, \text{k}$				
$U_{\beta}$				
$S =$				
$K_I$				
$K_U$				
$R_{н.}$				

### 2.4. Определение линейного режима с минимальными искажениями сигнала.

На вход усилителя подключить выход генератора Г-3-118 и вольтметр В-3-38. Частоту выходного напряжения установит  $2 - 5 \text{ кГц}$ , напряжение  $U_{mi} \ 100 - 200 \text{ мВ}$ . К базе и коллектору транзистора подключить входы осциллографа. Переключая сопротивления  $R1 \dots R4$  зарисовать форму сигналов и измерить их амплитуду. Сопоставляя формы сигналов на базе и на коллекторе усилителя сделать выбор рабочей точки  $A$  при которой форма синусоидального сигнала на выходе - коллекторе- имеет наименьшее искажение. При наличии осциллографа с открытым входом канала «У» подать на него сигнал с базы  $U_{mb}$ , на канал «Х» - напряжение с коллектора  $U_{mc}$ . Переключая резисторы  $R1 \dots R4$  - зарисовать изображение передаточной характеристики напряжения коллектора как функции напряжения на базе. Не трудно заметить, что характеристики при  $R1$  ( $A1$ ) и  $R4$  ( $A4$ ) имеют ограничение сверху или снизу. В рабочих точках при  $R2$  ( $A2$ ) и  $R3$  ( $A3$ ) наклонная часть имеет больший наклонный участок. Наклон этого участка определяет коэффициент усиления. Определить рабочую точку  $A2$  или  $A3$  - лучшую для линейного усиления.





## 2.6. Измерение частотной характеристики усилителя

Установить  $U_{mb} = 20-40$  мВ и изменяя частоту входного сигнала  $F$  от 100 Гц до 100 кГц измерять напряжение на коллекторе. Вычисляя коэффициент усиления определить полосу частот на границах которой коэффициент усиления уменьшается до 0,7  $K_{max}$ , т.е. на  $-3$  дБ. Фазометром Ф2-16 или посредством кривых Лиссажу измерить фазовый сдвиг между напряжениями на входе усилителя и напряжением на коллекторе на границах полосы усиления и середине АЧХ. На границах полосы пропускания усилителя запаздывание сигнала по фазе между входными и выходными сигналами составит  $\pm 45$  град. От сдвига по фазе на средних частотах – 180град. Для наблюдения кривых Лиссажу  $U_{mi}$  подать на вход «Х» осциллографа, а  $U_{mc}$  – на вход «У». Можно наблюдать фазовый сдвиг и на двухканальном осциллографе по относительному смещению изображения сигналов, используя внешнюю синхронизацию развертки от второго выхода генератора Г-3-118. Сделать выводы по результатам измерения.

## 2.7. Линейный резонансный усилитель

На макете включить вместо  $R_c$  колебательный контур, рис.9. Определить рабочую точку  $I_{ос}$  и  $U_{ос}$ . Настроить генератор Г3-118 на резонансную частоту  $f_0$  по максимальному напряжению  $U_{mc}$  на выходе усилителя при  $U_{mi}$  не более 15 мВ. Определить максимальный коэффициент усиления и полосу частот в которой усиление уменьшается на  $-3$ дБ, а фаза изменяется на  $\pm 45$ град. Измерение провести при полном и частичном включении контура в коллекторную цепь транзистора. Вычислить полное сопротивление контура путем деления коэффициента усиления на крутизну характеристики  $S$ , измеренную ранее. При частичном включении контура  $P=0.5$  сопротивление контура включенное в цепь коллектора уменьшается в 4 раза.

Измерить осциллографом напряжения на контуре  $U_{mc}$  при малом сигнале  $U_{mi}=50mV$  и большом сигнале  $U_{mi} = 500 mV$ . Сделать выводы о линейном режиме работы резисторного и резонансного усилителей. В резонансном усилителе напряжение на контуре всегда синусоидальное при  $U_{mc} < E$ . Напряжение на эмиттере в линейном режиме имеет синусоидальную форму, при большом сигнале – нелинейном режиме - имеет вид косинусоидальных импульсов.

$f, \text{кГц}/U, \text{В}$	$U_{mb},$	$U_{mc},$	$K$	$\varphi$
$f_p, \rho=1$				
$f_p-\Delta f$				
$f_p+\Delta f$				
$f_p, \rho=0.5$				

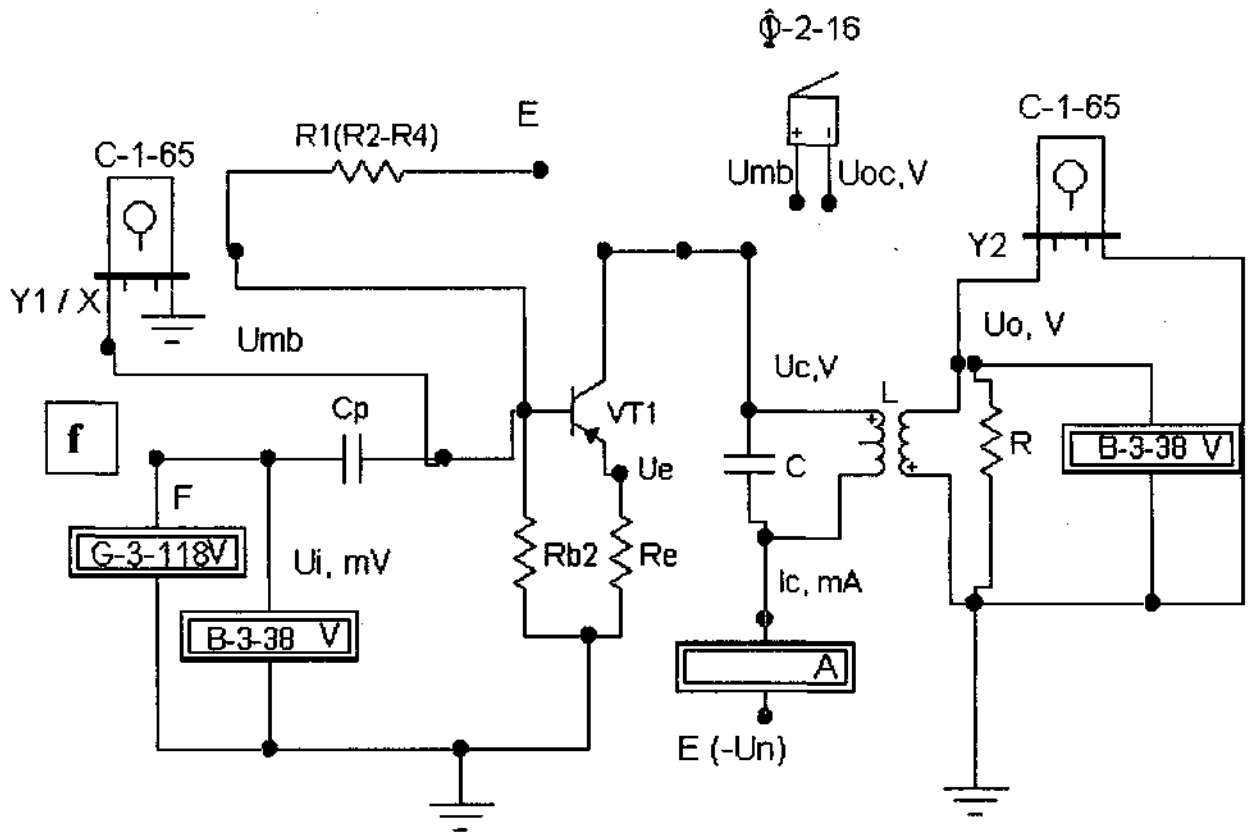


Рис.12. Схема для измерения характеристик резонансного усилителя