

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный технический университет – УПИ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина



В.В. Муханов, В.И. Паутов

РАСЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Учебное электронное текстовое издание
Подготовлено кафедрой «Автоматика и управление
в технических системах»
Научный редактор: доц., канд. техн. наук Ю.Н. Чесноков

Методические указания к курсовому проектированию по курсу «Общая электротехника и электроника» для студентов всех форм обучения специальности 200800 – Проектирование и технология РЭС.

Рассмотрены вопросы расчета предварительного усилителя переменного тока на транзисторе. Приведены справочные материалы, необходимые при расчете.

ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009

Екатеринбург
2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. Термостабилизация | 4 |
| 2. Расчет усилителя | 5 |
| 2.1. Исходные данные | 5 |
| 2.2. Выбор транзистора | 5 |
| 2.3. Расчет режима транзистора по постоянному току | 6 |
| 2.4. Расчет параметров, обеспечивающих режим работы транзистора по постоянному току | 7 |
| 2.5. Усилитель с эмиттерным повторителем на выходе | 9 |
| 2.6. Усилитель с эмиттерным повторителем на входе | 11 |
| 2.7. Расчет емкости конденсаторов | 12 |
| 2.8. Расчет амплитудно- и фазочастотных характеристик усилителя | 13 |
| 2.9. Влияние температуры | 15 |
| 3. ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ | 15 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 17 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 18 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 | 19 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4 | 19 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 21 |

ВВЕДЕНИЕ

Усилитель предварительного усиления предназначен для усиления малого напряжения переменного тока в различных диапазонах частот. Входное напряжение усилителя может иметь величину от единиц микровольт до десятков милливольт, выходное – не превышает одного-двух вольт. Коэффициент усиления таких усилителей обычно не более ста

На *рис. 1* приведена типовая схема усилителя.

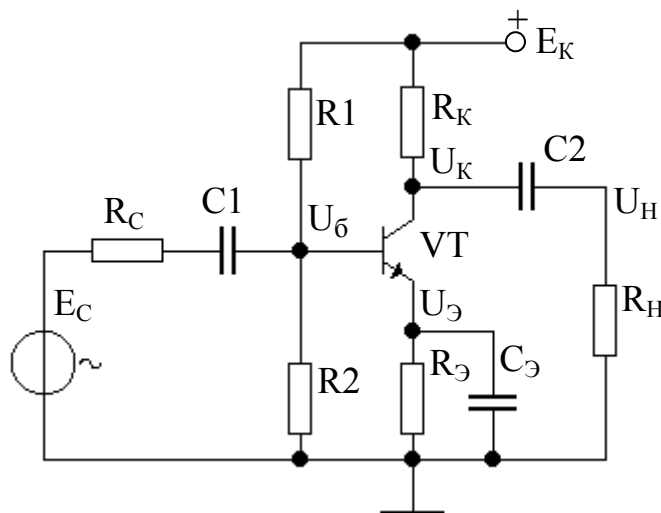


Рис. 1. Усилитель предварительного усиления с емкостными связями

Делитель, образованный резисторами R_1 и R_2 задает напряжение базы транзистора U_6 . Если ток делителя значительно больше тока базы, то напряжение базы U_6 будет слабо изменяться при малых изменениях тока базы (будет почти постоянным). Поэтому данную схему называют схемой с постоянным потенциалом базы.

В этой схеме резистор R_3 обеспечивает отрицательную обратную связь по току, необходимую для стабилизации режима работы усилителя по постоянному току. Емкость C_3 шунтирует резистор R_3 и исключает обратную связь на частоте усиливаемого сигнала.

Источники входного сигнала могут иметь внутреннее сопротивление R_C от десятков до сотен и тысяч Ом. Усилитель в схеме с общим эмиттером имеет сравнительно небольшое входное сопротивление $R_{ВХ}$. Сопротивление R_C создает делитель напряжения с сопротивлением $R_{ВХ}$ и при значительной величине

сопротивления источника сигнала на нем теряется значительная часть входного напряжения. В этом случае на входе усилителя следует включать эмиттерный повторитель, который, как известно, имеет высокое входное и малое выходное сопротивления.

Нагрузка усилителя является, как правило, активной и может иметь значение от десятков до сотен и более Ом. Так как усилитель в схеме с общим эмиттером имеет большое выходное сопротивление, а при его уменьшении снижается коэффициент усиления, то при малом сопротивлении нагрузки следует включать эмиттерный повторитель на выходе усилителя.

1. ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ

При изменении температуры окружающей среды изменяются параметры транзистора, что приводит к изменению токов и напряжений в схеме. Приращение тока коллектора определяется выражением

$$\Delta I_{\text{к}} = \Delta I_{\text{к0}} + \Delta B \cdot (I_{\text{б}} + I_{\text{к0}}) + B \cdot \Delta I_{\text{б}}, \quad (1)$$

где $\Delta I_{\text{к0}}$ – изменение обратного тока коллекторного перехода;

B – статический коэффициент усиления транзистора по току;

ΔB – изменение статического коэффициента усиления транзистора по току;

$\Delta I_{\text{б}}$ – изменение тока базы.

При включении в эмиттерную цепь резистора $R_{\text{э}}$

$$\Delta I_{\text{б}} = \frac{\Delta U_{\text{б}} - \Delta I_{\text{к}} \cdot R_{\text{э}}}{R_{\text{б}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{б}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 + R_2}$ – эквивалентное сопротивление делителя в цепи базы.

Подставляя (2) в (1) получим

$$\Delta I_{\text{к}} = \Delta I_{\text{к0}} + \Delta B \cdot (I_{\text{б}} + I_{\text{к0}}) + B \cdot \frac{\Delta U_{\text{б}}}{R_{\text{б}}} - B \cdot \frac{\Delta I_{\text{к}} \cdot R_{\text{э}}}{R_{\text{б}}}. \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что

$$\Delta I_{\text{к}} = \frac{B \cdot R_{\text{б}}}{R_{\text{б}} + B \cdot R_{\text{э}}} \cdot \left[\frac{\Delta I_{\text{к0}}}{B} + \frac{\Delta B}{B} \cdot (I_{\text{б}} + I_{\text{к0}}) + \frac{\Delta U_{\text{б}}}{R_{\text{б}}} \right]. \quad (4)$$

Выражение перед скобками называют коэффициентом температурной неустойчивости и записывают в форме

$$S = \frac{B}{1 + \gamma \cdot B}, \quad (5)$$

где $\gamma = \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{б}}}$.

При отсутствии сопротивления в цепи эмиттера (без термостабилизации) $S = B$. Термостабилизация считается удовлетворительной при $S = 5$, хорошей – при $S = 3$.

В приложении 1 приведены данные о зависимости параметров маломощных транзисторов от температуры.

2. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ

2.1. Исходные данные

Исходными данными для расчета предварительного усилителя являются:

- максимальное напряжение на выходе (U_{H}) и (или) входе (E_{C}) усилителя;
- коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{U}} = U_{\text{H}} / E_{\text{C}}$;
- сопротивление источника сигнала R_{C} ;
- сопротивление нагрузки R_{H} ;
- верхняя $f_{\text{В}}$ и нижняя $f_{\text{Н}}$ граничные частоты и коэффициенты частотных искажений $M_{\text{В}}$ и $M_{\text{Н}}$, обычно принимают $M_{\text{В}} = M_{\text{Н}} = 0,7$;
- диапазон температур окружающей среды (T_{max} и T_{min});
- требования по термостабилизации усилителя.

Могут задаваться и другие параметры, например, максимальная потребляемая мощность, требования по габаритам, весу и т.п.

2.2. Выбор транзистора

На этом этапе производится предварительный выбор транзистора. В дальнейшем он может быть изменен.

Допустимая рассеиваемая на коллекторе мощность выбирается из условия $P_{\text{к доп}} > 8 \cdot \xi \cdot P_{\text{H}}$, где $\xi = 1,2$ при $S \leq 3$ и $\xi = 1,5$ при $S \geq 5$. При U_{H} менее одного

вольта для каскадов предварительного усиления оценка рассеиваемой мощности обычно не производится.

Допустимый ток коллектора $I_{к доп} > 5I_H = 5U_H/R_H$;

Допустимое напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэдоп} > 10U_H$;

Статический коэффициент усиления по току выбирается в пределах $B = (0,5 \div 1,5)K_U$. При малом значении R_C и высокоомной нагрузке выбирается меньшее значение.

Частотные параметры транзистора выбираются в соответствии с заданным значением верхней граничной частоты f_B и коэффициента частотных искажений M_B (обычно $M_B = 0,7$). В этом случае параметр транзистора $f_\beta > (1,5 \div 2)f_B$. Если в справочнике приведено значение граничной частоты транзистора $f_{гр}$, то выбирается транзистор, у которого $f_{гр} > 10f_B$. Не следует выбирать транзисторы со слишком большим запасом по частоте, так как при этом возрастает уровень шумов на выходе усилителя, усложняется его монтаж. Если известно значение f_α , то можно принять $f_\beta = f_\alpha / (1+B)$.

2.3. Расчет режима транзистора по постоянному току

Выбор тока коллектора в рабочей точке I_K^0 . Для каскадов предварительного усиления принимают

$$I_K^0 = (1,5 \cdot I_{нм} + 0,4) = \left(1,5 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{R_H} + 0,4\right), \quad (6)$$

где $I_{нм}$ – амплитуда тока нагрузки в мА;

U_H – максимальное действующее значение напряжения нагрузки в В;

R_H – сопротивление нагрузки в кОм.

Если получают значение I_K^0 менее 1 мА, то принимают $I_K^0 = 1$ мА. После выбора тока коллектора следует скорректировать параметры транзистора. Их зависимость от тока коллектора приведена в приложении 1.

Ток базы в рабочей точке $I_B^0 = \frac{I_K^0}{B}$. Полученное значение тока базы должно

превышать амплитуду входного тока в $1,2 \div 1,5$ раза, т.е. $I_B^0 > 1,2 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_c}{R_c + R_{вх}}$,

где $R_{вх}$ – входное сопротивление усилителя, можно принять $R_{вх} = [r_б + r_э(1+B)] || R_б \approx 0,8 \cdot h_{11э}$. Если это условие не выполняется, то следует увеличить значение I_K^0 .

Напряжение между коллектором и эмиттером в рабочей точке $U_{кэ}^0 \geq 4 \cdot U_{нм} = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot U_H$. Если получают значение менее 2 В, то принимают $U_{кэ}^0 = 2$ В.

2.4. Расчет параметров, обеспечивающих режим работы транзистора по постоянному току

Для схемы рис. 1 выбирают $R_б = 8[r_б + r_э(1+B)] \approx 8 \cdot h_{11э}$.

Из (5) получим $\mu = \frac{R_э}{R_б} = \frac{B-S}{B \cdot S}$. Тогда $R_э = R_б \cdot \frac{B-S}{B \cdot S}$. Полученное значение сопротивления округляем до ближайшего номинального значения.

Определяем напряжение источника питания усилителя. Полагаем падение напряжения на резисторе $R_к$ в рабочей точке (ток коллектора равен I_K^0) равным напряжению $U_{кэ}^0$. С учетом падения напряжения на резисторе $R_э$ $E_к = 2 \cdot U_{кэ}^0 + I_K^0 \cdot R_э$. Округляем полученное значение до ближайшего большего номинального напряжения из ряда {5; 6,3; 9; 12; 15; 18; 24}. Не забудьте скорректировать значение $U_{кэ}^0$. Для выбранного значения $E_к$

$$U_{кэ}^0 = \frac{E_к - I_K^0 \cdot R_э}{2}$$

Определяем сопротивление в цепи коллектора $R_к = \frac{U_{кэ}^0}{I_K^0}$. Округляем по-

лученное значение до ближайшего номинального и корректируем для выбранного значения $R_к$ ток I_K^0 .

Определяем напряжение базы относительно общей шины $U_б = I_э^0 \cdot R_э + U_{бэ}^0 \approx I_K^0 \cdot R_э + U_{бэ}^0$,

где $U_{\text{бэ}}^0$ – напряжение между базой и эмиттером в рабочей точке, обычно для кремниевых транзисторов принимают $U_{\text{бэ}}^0 = 0,6 \div 0,7$ В, для германиевых $U_{\text{бэ}}^0 = 0,3 \div 0,4$ В.

Расчет делителя в цепи базы. Напряжение холостого хода делителя $U_{\text{дхх}} = U_{\text{б}}^0 + I_{\text{б}}^0 \cdot R_{\text{б}}$. Величины сопротивлений вычисляется по известным выражениям $R_1 = \frac{E_{\text{к}} \cdot R_{\text{б}}}{U_{\text{дхх}}}$, $R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{\text{б}}}{R_1 - R_{\text{б}}}$. Полученные значения сопротивлений округляют до ближайших номинальных значений. Величина тока делителя должна удовлетворять условию

$$I_{\text{д}} = \frac{E_{\text{к}}}{R_1 + R_2} > 4 \cdot I_{\text{б}}^0. \quad (7)$$

Если это условие не выполняется, то выбирают меньшее значение $R_{\text{б}}$ и повторяют расчет параметров $R_{\text{э}}$, $E_{\text{к}}$, $R_{\text{к}}$, R_1 и R_2 , после чего вновь проверяют выполнение условия (7).

После расчета параметров, обеспечивающих режим транзистора по постоянному току, необходимо проверить полученное значение коэффициента усиления

$$K_{\text{у0}} = \frac{R_{\text{вх}} \cdot \beta \cdot R_{\text{кн}}}{h_{11\text{э}} \cdot (R_{\text{с}} + R_{\text{вх}})}, \quad (8)$$

где $R_{\text{кн}} = R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}} = \frac{R_{\text{к}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}}$;

$$R_{\text{вх}} - \text{входное сопротивление усилителя, } R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{б}} \cdot h_{11\text{э}}}{R_{\text{б}} + h_{11\text{э}}}.$$

Если полученное значение $K_{\text{у0}}$ меньше заданного, то следует внести изменения в усилитель.

1. Если полученное значение меньше заданного на 10-15%, то можно увеличить значение $R_{\text{к}}$. Но при этом придется увеличить $E_{\text{к}}$, что нежелательно.
2. Выбрать транзистор с большим значением статического коэффициента усиления β .

3. Если $R_H < R_K$, то можно включить эмиттерный повторитель на выходе усилителя. В этом случае нагрузкой усилителя будет высокое входное сопротивление эмиттерного повторителя и ток I_{K1}^0 можно выбрать малым – обычно 1–2 мА. При этом возрастает значение R_{KH} (см. 8).

4. Если сопротивление источника сигнала $R_c \geq 0,5R_{вх}$, то можно включить эмиттерный повторитель на входе усилителя. В этом случае коэффициент деления делителя, образованного сопротивлением источника сигнала и входным сопротивлением эмиттерного повторителя $\frac{R_{вх\ эп}}{R_c + R_{вх\ эп}}$ будет близок к единице. Общий коэффициент усиления возрастет примерно в $0,9 \cdot \frac{R_c + R_{вх\ эп}}{R_c + R_{вх\ ус}}$ раз,

где $R_{вх\ ус}$ – входное сопротивление усилителя;

$R_{вх\ эп}$ – входное сопротивление эмиттерного повторителя.

Если предлагаемые в пп. 1-4 меры не позволяют получить требуемый коэффициент усиления, то необходим двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов K_1 и K_2 . Тогда общий коэффициент усиления $K = K_1 \cdot K_2$. Рекомендуется выбирать $K_1 > K_2$.

Если коэффициент усиления существенно больше необходимого (в 1,5 и более раз), то следует уменьшить его одним из следующих способов:

1. Выбрать транзистор с меньшим значением статического коэффициента усиления B ;

2. Уменьшить значение R_K . Но при этом придется увеличить ток коллектора, что нежелательно;

3. Включить делитель напряжения на входе или между каскадами.

2.5. Усилитель с эмиттерным повторителем на выходе

Схема усилителя с эмиттерным повторителем на выходе приведена на *рис. 2*. Для усилителя нагрузкой является высокое входное сопротивление эмиттерного повторителя $R_{вх\ эп} \approx R_{эH}(1+B)$, где $R_{эH} = R_{э2} \parallel R_H = \frac{R_{э2} \cdot R_H}{R_{э2} + R_H}$. Не-

обходимый ток коллектора транзистора VT1 в рабочей точке $I_{к1}^0 \approx 1,2 \cdot (1,5 \cdot I_{нм} + 0,4) = 1,2 \cdot (1,5 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{н}}{R_{вх\ \text{ЭП}}} + 0,4)$ будет значительно меньше 1 мА. При малых токах коллектора (менее 1 мА) снижается значение β , поэтому выбираем $I_{к1}^0$ в пределах 1–2 мА.

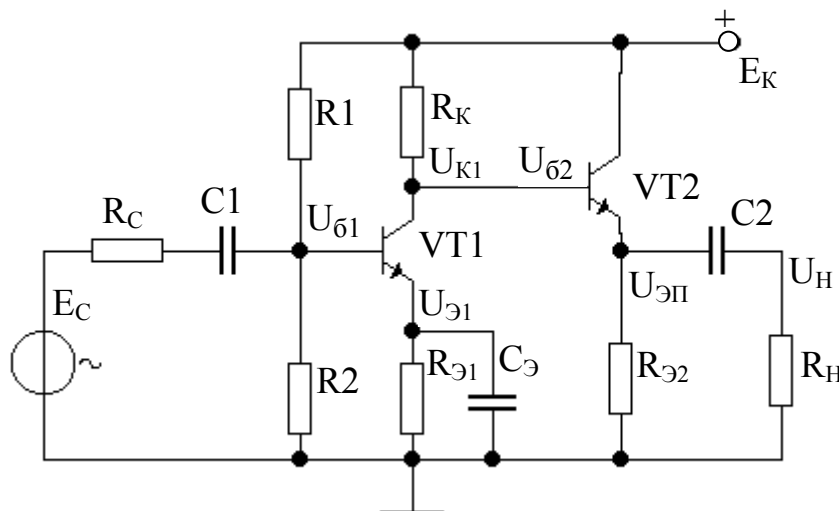


Рис. 2. Усилитель предварительного усиления с эмиттерным повторителем на выходе

После выбора тока $I_{к1}^0$ дальнейший расчет усилителя выполняется по методике, описанной в § 2.3 и 2.4.

Затем выполняем расчет эмиттерного повторителя. Его нагрузкой является сопротивление $R_{н}$ и ток эмиттера транзистора VT2 в рабочей точке $I_{эП}^0$ определяют по выражению аналогичному (6)

$$I_{эП}^0 = (1,5 \cdot I_{нм} + 0,4) = (1,5 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{н}}{R_{н}} + 0,4) . \quad (9)$$

Напряжение эмиттера в рабочей точке $U_{э2}^0 \approx (U_{к1} - 0,6)$. Сопротивление

$$R_{э2} = \frac{U_{э2}^0}{I_{эП}^0} . \text{ Коэффициент усиления эмиттерного повторителя}$$

$$K_{эП} = \frac{(1 + \beta) \cdot R_{эП}}{h_{11э} + (1 + \beta) \cdot R_{эП}} . \quad (10)$$

Тогда общий коэффициент усиления будет равен $K_U = K_{yc}K_{эп}$. Здесь коэффициент усиления усилителя K_{yc} определяется по выражению (8), но так как нагрузкой усилителя является входное сопротивление эмиттерного повторителя,

$$\text{то } R_{KH} = R_K \parallel R_{ВХЭП} = \frac{R_K \cdot R_{ВХЭП}}{R_K + R_{ВХЭП}}.$$

2.6. Усилитель с эмиттерным повторителем на входе

На рис. 3 показана схема усилителя с эмиттерным повторителем на входе.

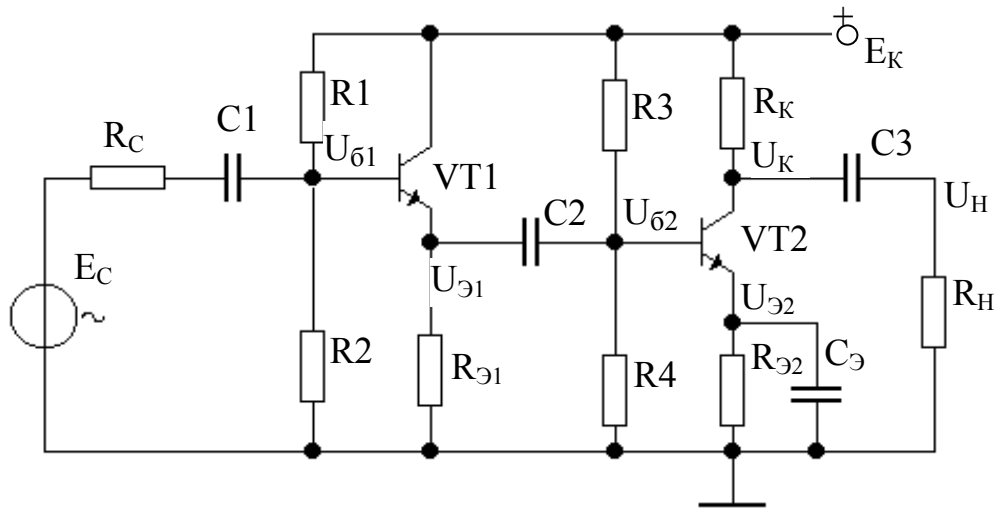


Рис. 3. Усилитель предварительного усиления с эмиттерным повторителем на входе

Ток эмиттера транзистора VT1 $I_{ЭП}^0$ может быть выбран равным 1-2мА. Напряжение эмиттера $U_{Э1} = \frac{E_K}{2}$, напряжение базы $U_{Б1} = U_{Э1} + 0,6$. Ток базы

$I_{Б1}^0 = \frac{I_{Э1}^0}{\beta + 1}$. При расчете делителя R_1, R_2 ток делителя принимается равным

$(4 \div 6) I_{Б1}^0$. Сопротивление $R_{Э1} = \frac{U_{Э1}}{I_{Э1}^0}$.

Расчет усилителя на транзисторе VT2 выполняется по методике, описанной в § 2.3 и 2.4. Источником сигнала для него является эмиттерный повторитель

тель с выходным сопротивлением $R_{\text{ВЫХ ЭП}} = \frac{R_{\text{бс}} + r_{\text{б}}}{1 + \beta} + r_{\text{э}}$, где

$$R_{\text{бс}} = \frac{R_{\text{б1}} \cdot R_{\text{с}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{с}}}, \quad R_{\text{б1}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Коэффициент усиления усилителя

$$K_{\text{u0}} = \frac{R_{\text{ВХ}}}{(R_{\text{ВЫХЭП}} + R_{\text{ВХ}})} \cdot \frac{\beta \cdot R_{\text{кн}}}{h_{11\text{э}}}. \quad (11)$$

Коэффициент усиления эмиттерного повторителя

$$K_{\text{ЭП}} = \frac{R_{\text{с}}}{R_{\text{с}} + R_{\text{ВХ ЭП}}} \cdot \frac{(1 + \beta) \cdot R_{\text{н ЭП}}}{h_{11\text{э}} + (1 + \beta) \cdot R_{\text{н ЭП}}}. \quad (12)$$

В этом выражении $R_{\text{нЭП}} = \frac{R_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{э1}}}{R_{\text{ВХ}} + R_{\text{э1}}}$, $R_{\text{ВХ}} = \frac{R_{\text{б2}} \cdot h_{11\text{э}}}{R_{\text{б2}} + h_{11\text{э}}}$ – входное со-

противление усилителя, $R_{\text{б2}} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$

Тогда общий коэффициент усиления будет равен $K_{\text{У}} = K_{\text{u0}} K_{\text{ЭП}}$.

2.7. Расчет емкости конденсаторов

При расчете усилителя коэффициент частотных искажений в области низких частот (на частоте $f_{\text{Н}}$) $M_{\text{Н}}$ принимают равным 0,707.

$M_{\text{Н}}$ для нескольких последовательно включенных RC-цепей равен произведению коэффициентов частотных искажений составляющих цепей. Так для схемы *рис. 1* $M_{\text{Н}} = M_{\text{Н1}} \cdot M_{\text{НЭ}} \cdot M_{\text{Н2}}$,

где – $M_{\text{Н1}}$ – коэффициент частотных искажений входной цепи (емкость $C1$);

$M_{\text{НЭ}}$ – цепи эмиттера (емкость $C\text{э}$);

$M_{\text{Н2}}$ – выходной цепи (емкость $C2$).

Важно учесть все постоянные времени для каждой конкретной схемы. Так, например, в двухкаскадном усилителе в эмиттерных цепях обоих транзисторов будут включены конденсаторы, и общее количество коэффициентов частотных искажений увеличится до четырех.

Рекомендуется $M_{HЭ}$ взять несколько меньше, чем M_{H1} и M_{H2} . Например,

$$M_{HЭ} = 0,85, \text{ а } M_{H1} = M_{H2} = \sqrt{\frac{0,707}{0,85}} = 0,91$$

Значения емкостей для рассматриваемого примера вычисляются по уравнениям

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot (R_C + R_{ВХ})} \cdot \frac{M_{H1}}{\sqrt{1 - M_{H1}^2}},$$

$$C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot (R_K + R_H)} \cdot \frac{M_{H2}}{\sqrt{1 - M_{H2}^2}}, \quad (13)$$

$$CЭ = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_{ЭКВ}} \cdot \frac{M_{HЭ}}{\sqrt{1 - M_{HЭ}^2}}, \text{ где } R_{ЭКВ} = \frac{R_C + r_{б}}{1 + B} + r_{Э}.$$

Полученные значения округляют до ближайших больших номинальных значений емкостей конденсаторов выбранного типа.

2.8. Расчет амплитудно- и фазочастотных характеристик усилителя

АЧХ и ФЧХ охватывают широкий диапазон частот. Если их графики выполнить в линейном масштабе по оси частот, то они будут сжаты в области низких частот и растянуты в высокочастотной области. Поэтому их изображают в логарифмическом масштабе по оси частот.

Частотные свойства усилителя описываются уравнением

$$K = K_0 \cdot \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega \tau_H}} \cdot \frac{1}{1 + j \omega \cdot \tau_B}. \quad (14)$$

где K_0 – коэффициент усиления в области средних частот, определяемый по (8). Для вариантов усилителей с эмиттерным повторителем на входе или выходе $K_0 = K_{u0} \cdot K_{Эп}$;

$$\omega - \text{частота } \omega = 2\pi \cdot f;$$

τ_H – постоянная времени усилителя в области низких частот. При последовательном включении отдельных звеньев $\frac{1}{\tau_H} \approx \sum_i \frac{1}{\tau_{Hi}}$. Для

схемы рис. 1 $\frac{1}{\tau_H} \approx \frac{1}{\tau_{H1}} + \frac{1}{\tau_{H2}} + \frac{1}{\tau_{HЭ}}$ и $\tau_{H1} = C_1 \cdot (R_c + R_{вх})$,

$$\tau_{H2} = C_2 \cdot (R_k + R_H), \quad \tau_{HЭ} = C_Э \cdot \left(\frac{R_c + r_б}{1 + B} + r_Э \right).$$

τ_B – постоянная времени усилителя в области высоких частот.

$\tau_B \approx (C_{кэ} + C_M) \cdot R_{кн} + \tau_\beta = (C_k(1+B) + C_M) R_{кн} + \tau_\beta$. В этом выражении

C_M – емкость монтажа, обычно принимают равной 10-15 пФ. Если значения τ_β нет в справочнике, то можно воспользоваться прибли-

женным значением $\tau_\beta \approx \frac{1}{2 \pi f_{гр}}$.

В соответствии с (14) АЧХ строится по уравнению

$$M = \frac{K}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \cdot \tau_H} - \omega \tau_B \right)^2}}, \quad (15)$$

ФЧХ вычисляется по уравнению

$$\varphi = \text{arctg} \left(\frac{1}{\omega \cdot \tau_H} - \omega \tau_B \right). \quad (16)$$

Не забывайте, что усилитель в схеме с ОЭ имеет собственный фазовый сдвиг 180° и общий фазовый сдвиг будет $(180 + \varphi)^\circ$.

Результаты вычислений рекомендуется представить в виде таблицы, по которой строятся графики. Ее вид приведен в табл. 1.

Для удобства построения графиков очередное значение частоты получают, умножая предыдущее значение на постоянный коэффициент, который рекомендуется выбирать в диапазоне от 1,5 до 2,0. В табл. 1 приведен пример для значения 1,5. Минимальное значение частоты должно быть меньше заданной нижней граничной частоты (примерно $0,8f_H$). Максимальное значение должно быть больше заданной верхней граничной частоты (примерно $1,2f_B$).

Результаты вычислений

| | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|--------|-----|-----|--------|
| $f, \text{кГц}$ | 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,14 | и т.д. | 180 | 270 | и т.д. |
| $\omega = 2\pi f$ | | | | | | | | |
| $\frac{1}{\omega \tau_H}$ | | | | | | | | |
| $\omega \tau_B$ | | | | | | | | |
| $\frac{1}{\omega \tau_H} - \omega \tau_B$ | | | | | | | | |
| $M = \frac{ \dot{K} }{ \dot{K}_0 }$ | | | | | | | | |
| φ° | | | | | | | | |

2.9. Влияние температуры

При изменении температуры окружающей среды изменяются параметры компонент схемы и ее общий коэффициент усиления. В наибольшей мере изменяются параметры транзисторов. В выражение для коэффициента усиления входят параметры h_{11} и h_{21} (В). Не забудьте, что h_{11} так же входит в выражение для $R_{вх}$.

Зависимость параметров транзистора от температуры приведена в прил. 1.

3. ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Пояснительная записка выполняется на стандартных листах формата А4 (210×297мм). Она должна включать следующие разделы:

- задание на проектирование;
- подробное изложение расчета в соответствии с настоящими методическими указаниями;
- принципиальная электрическая схема, выполненная в соответствии с требованиями ЕСКД;
- перечень элементов схемы;
- графики амплитудно- и фазочастотных характеристик.

Записка должна быть написана четко, понятно и аккуратно. Все пояснительные чертежи, графики и другие материалы должны выполняться в соответствии с требованиями ЕСКД.

Пояснительная записка может быть выполнена компьютерным (шрифт 12пт, форматирование по ширине, интервал 1,5) или рукописным способом. В последнем случае чернила должны быть одного цвета: синего, фиолетового или черного.

Все буквенные обозначения физических величин должны быть указаны на рисунке или пояснены в тексте.

Все рисунки и таблицы должны быть пронумерованы, рисунки, кроме того, должны иметь поясняющую подрисовочную надпись. Таблицы и рисунки помещаются в тексте после первой ссылки на них.

При всех вычислениях вначале записывается формула, затем подставляются численные значения и после этого, без промежуточных вычислений, записывается результат. Обязательно указание размерности вычисляемых величин.

$$\text{Например, } I_{\text{с}}^0 > 1,4 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_{\text{с}}}{R_{\text{с}} + R_{\text{вх}}} = 1,4 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{150 + 320} = 49,5 \text{ мкА}.$$

где $E_{\text{с}}$ – ЭДС источника сигнала, В;

$R_{\text{с}}$ – сопротивление источника сигнала, Ом;

$R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление усилителя, Ом.

В приближённых числах должно быть не более трёх значащих цифр.

Листы пояснительной записки должны быть пронумерованы и скреплены в двух-трёх точках на расстоянии 10 мм от левого края листа.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 2

Справочные данные транзисторов

| Транзи- стор | $U_{кэдоп}$ | $I_{кдоп}$ | $P_{кдоп}$ | $I_{к0}$ | $f_{гр}$ | C_k | $h_{11э}$ | $h_{12э}$ | $h_{21э}$ | $h_{22э}$ |
|-----------------|-------------|------------|------------|----------|----------|-------|-----------|------------------|-----------|-----------|
| | В | мА | мВт | мкА | МГц | пФ | Ом | $\times 10^{-3}$ | | мкСм |
| КТ201Г | 20 | 20 | 150 | 0,5 | 40 | 9 | 800 | 0,12 | 60 | 20 |
| КТ203Б | 30 | 10 | 150 | 1 | 5 | 10 | 980 | 0,12 | 30 | 12 |
| КТ208Б | 20 | 150 | 200 | 0,5 | 5 | 35 | 800 | 0,12 | 40 | 14 |
| КТ301Д | 30 | 10 | 42 | 5 | 80 | 10 | 450 | 0,11 | 20 | 10 |
| КТ312Б | 30 | 10 | 225 | 1 | 120 | 5 | 300 | 0,06 | 25 | 11 |
| КТ315Б | 20 | 100 | 150 | 1 | 120 | 7 | 600 | 0,08 | 20 | 9 |
| КТ315Г | 35 | 100 | 150 | 1 | 120 | 7 | 750 | 0,05 | 50 | 5 |
| КТ315Ж | 15 | 50 | 100 | 10 | 90 | 10 | 500 | 0,04 | 30 | 6 |
| КТ325Б | 15 | 60 | 225 | 0,5 | 800 | 2,5 | 400 | 0,1 | 70 | 34 |
| КТ326А | 20 | 50 | 250 | 0,5 | 60 | 5 | 420 | 0,07 | 20 | 18 |
| КТ339А | 25 | 25 | 260 | 0,5 | 50 | 2 | 360 | 0,05 | 25 | 11 |
| КТ340А | 15 | 50 | 250 | 1 | 300 | 1 | 800 | 0,12 | 100 | 27 |
| КТ368 | 15 | 30 | 225 | 0,5 | 900 | 1,2 | 300 | 0,03 | 50 | 8 |
| КТ601 | 100 | 30 | 350 | 100 | 40 | 15 | 360 | 0,08 | 16 | 15 |
| КТ602Б | 100 | 75 | 850 | 10 | 150 | 4 | 280 | 0,12 | 50 | 30 |

Вычисление собственных параметров транзистора через h-параметры для схемы с общим эмиттером:

$$r_{б} = h_{11э} - \frac{h_{12э}}{h_{22э}} \cdot (1 + h_{21э}), \quad r_{э} = \frac{h_{12э}}{h_{22э}}, \quad r_{к} = \frac{1}{h_{22э}}, \quad \alpha = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}.$$

Таблица 3

Зависимость параметров транзистора от температуры.

| T °C | -40 | -20 | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 |
|-----------------------------------|------|------|------|----|------|-----|-----|
| $h_{21}(T) / h_{21}(20^{\circ}C)$ | 0,55 | 0,63 | 0,77 | 1 | 1,3 | 1,6 | 1,9 |
| $h_{12}(T) / h_{12}(20^{\circ}C)$ | 0,22 | 0,37 | 0,58 | 1 | 1,95 | 3,7 | 6 |
| $h_{11}(T) / h_{11}(20^{\circ}C)$ | 0,4 | 0,52 | 0,66 | 1 | 1,7 | 2,4 | 2,3 |
| $h_{22}(T) / h_{22}(20^{\circ}C)$ | 0,59 | 0,6 | 0,68 | 1 | 1,5 | 2,2 | 3,3 |
| $I_{к0}(T) / I_{к0}(20^{\circ}C)$ | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1 | 4,5 | 16 | 60 |

Таблица 4

Зависимость параметров транзистора от тока коллектора

| | | | | | | | |
|------------------------------------|-----|---|------|------|------|------|------|
| I_K мА | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| $h_{21}(I_K) / h_{21}(1\text{мА})$ | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,35 | 1,4 |
| $h_{12}(I_K) / h_{12}(1\text{мА})$ | 1,2 | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,85 | 1,1 | 1,3 |
| $h_{11}(I_K) / h_{11}(1\text{мА})$ | 1,6 | 1 | 0,85 | 0,72 | 0,6 | 0,5 | 0,45 |
| $h_{22}(I_K) / h_{22}(1\text{мА})$ | 0,5 | 1 | 1,4 | 1,8 | 2,5 | 3,2 | 4,0 |

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 5

Номинальные сопротивления резисторов

| | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ±20% | 1 | | | | 1,5 | | | | 2,2 | | | |
| ±10% | 1 | | 1,2 | | 1,5 | | 1,8 | | 2,2 | | 2,7 | |
| ±5% | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 3,0 |
| ±20% | 3,3 | | | | 4,7 | | | | 6,8 | | | |
| ±10% | 3,3 | | 3,9 | | 4,7 | | 5,6 | | 6,8 | | 8,2 | |
| ±5% | 3,3 | 3,6 | 3,9 | 4,3 | 4,7 | 5,1 | 5,6 | 6,2 | 6,8 | 7,5 | 8,2 | 9,1 |

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Конденсаторы К50-6

В таблице 6 приведены номинальные значения емкости электролитических конденсаторов К50-6 в микрофарадах.

Таблица 6

Номинальные значения емкости конденсаторов

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|
| $U_{\text{доп}}=5\text{В}$ | | | | | | | | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| $U_{\text{доп}}=10\text{В}$ | | | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| $U_{\text{доп}}=15\text{В}$ | 1 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Выполнить расчет усилителя предварительного усиления в соответствии с заданным вариантом. Расчет выполнить для номинальной температуры 20°C. После выполнения основного расчета определить параметры усилителя при минимальной и максимальной температурах. Зависимость параметров транзисторов от температуры приведена в Приложении 1. При выборе параметров транзистора учитывать их зависимость от тока коллектора. Эта зависимость так же дана в Приложении 1. В справочных данных транзисторов приведены минимальные значения параметра $h_{21\beta}$. При выполнении расчета можно взять значение $h_{21\beta}$ на 15-20% больше приведенного в Приложении 1.

Таблица 7

Варианты заданий

| Вар | E_c , мВ | R_c , Ом | K_u | R_H , Ом | F_H , Гц | F_B , кГц | S | T_{min} , °C | T_{max} , °C |
|-----|------------|------------|-------|------------|------------|-------------|---|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 0,125 | 1000 | 90 | 400 | 60 | 75 | 3 | 15 | 45 |
| 2 | 0,75 | 1000 | 85 | 400 | 100 | 85 | 3 | 15 | 55 |
| 3 | 1,5 | 1000 | 80 | 400 | 70 | 100 | 3 | 10 | 65 |
| 4 | 2,0 | 500 | 75 | 300 | 35 | 70 | 4 | 5 | 75 |
| 5 | 2,2 | 500 | 90 | 300 | 40 | 50 | 4 | 5 | 70 |
| 6 | 2,6 | 500 | 90 | 600 | 80 | 40 | 4 | 15 | 50 |
| 7 | 3,3 | 200 | 85 | 250 | 90 | 30 | 5 | 10 | 60 |

Окончание табл. 7

| | | | | | | | | | |
|----|------|------|----|------|-----|-----|---|----|----|
| 8 | 7,0 | 200 | 75 | 200 | 50 | 20 | 5 | 10 | 70 |
| 9 | 6,75 | 300 | 80 | 200 | 25 | 10 | 5 | 15 | 80 |
| 10 | 6,5 | 100 | 70 | 150 | 60 | 75 | 6 | 10 | 45 |
| 11 | 6,25 | 100 | 75 | 150 | 100 | 85 | 6 | 10 | 55 |
| 12 | 5,75 | 200 | 80 | 150 | 70 | 100 | 6 | 5 | 65 |
| 13 | 8,0 | 200 | 85 | 200 | 35 | 70 | 5 | 15 | 75 |
| 14 | 8,5 | 2000 | 70 | 250 | 40 | 50 | 5 | 15 | 70 |
| 15 | 9,0 | 200 | 60 | 100 | 80 | 40 | 5 | 10 | 50 |
| 16 | 0,55 | 250 | 95 | 400 | 90 | 30 | 4 | 5 | 60 |
| 17 | 1,75 | 350 | 85 | 400 | 50 | 20 | 4 | 5 | 70 |
| 18 | 6,0 | 250 | 75 | 400 | 25 | 10 | 4 | 15 | 80 |
| 19 | 5,5 | 2400 | 80 | 500 | 40 | 50 | 3 | 10 | 60 |
| 20 | 5,0 | 1400 | 90 | 300 | 80 | 40 | 3 | 10 | 70 |
| 21 | 4,5 | 4000 | 65 | 600 | 90 | 30 | 3 | 15 | 80 |
| 22 | 4,0 | 600 | 75 | 600 | 50 | 20 | 4 | 10 | 45 |
| 23 | 2,5 | 600 | 85 | 800 | 25 | 10 | 4 | 10 | 55 |
| 24 | 1,8 | 600 | 95 | 1000 | 60 | 75 | 4 | 5 | 65 |
| 25 | 0,9 | 1000 | 75 | 1200 | 100 | 85 | 5 | 15 | 75 |
| 26 | 0,33 | 1000 | 95 | 800 | 70 | 100 | 5 | 15 | 70 |
| 27 | 0,1 | 2000 | 65 | 600 | 35 | 70 | 5 | 10 | 50 |
| 28 | 3,5 | 750 | 80 | 600 | 40 | 50 | 6 | 5 | 60 |
| 29 | 3,9 | 600 | 80 | 500 | 80 | 40 | 6 | 15 | 55 |
| 30 | 4,25 | 3000 | 55 | 300 | 90 | 30 | 6 | 10 | 65 |

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов. М. : Радио и связь, 1989. – 528 с.
2. Бычков Ю.А., Золотницкий В.М., Чернышев Э.П. Основы теории электрических цепей: Учебник для вузов. СПб.; Издательство «Лань», 2002. 464 с.
3. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств. М. : Высшая школа, 1989. 230 с.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М., Электроника. М. : Высшая школа, 1990. 495 с.
5. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: учеб. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2000.
6. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочное пособие / В.А. Аронов, П.В. Баюнов, А.А. Зайцев и др.; под общей редакцией Н.Е. Горюнова. М. : Энергоатомиздат, 1982. 904 с.
7. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. СПб. : Корона-принт, 1998.
8. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. 2-е изд. исп. и доп. СПб. : КОРОНА принт, 2000. 416 с.

Учебное электронное текстовое издание

Муханов Владислав Владимирович

Паутов Валентин Иванович

**РАСЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ
НА ТРАНЗИСТОРЕ**

**Редактор
Компьютерная верстка**

***О.В. Климова
В. В. Муханова***

**Рекомендовано РИС ГОУ ВПО УГТУ–УПИ
Разрешен к публикации 01.09.2009г.
Электронный формат – pdf
Объем 1,0 уч.-изд. л.**

**Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19**

**Информационный портал
ГОУ ВПО УГТУ–УПИ
<http://www.ustu.ru>**