

Рыба для КР по электронике (КМ1)

Требования к оформлению отчета.

1. При оформлении отчета нужно нумеровать страницы (титульный лист также включают в общую нумерацию, но номер страницы на нем не проставляют), а также нумеровать пункты и писать их названия.
2. При проведении расчетов надо давать **пояснения**. Пояснения должны быть краткими и ёмкими, за обилие лишних слов оценка будет снижена (надо показать своё умение отделять главное от второстепенного и не увязать в мелких деталях). Не следует тупо копировать фрагменты данного руководства.
3. Если рисунок взят из программы DL, то должна быть видна нижняя часть графика (что отображается на графике: напряжение, ток или функция).
4. Во всех технических расчетах требуется оставлять 4 значащие цифры.
5. Требуется следующий порядок оформления расчетов: сначала пишут формулу, потом в нее подставляют все числа, и только потом пишут результат расчета (значение). Такой порядок надо соблюдать при всех расчетах.
6. Для результатов расчета у всех размерных величин должны быть указаны **единицы измерения** (А или мА, В, Ом и т.п.).
7. Надо использовать одни обозначения для одних и тех же величин на протяжении всего расчета.
8. Если некоторые расчеты выполнялись с помощью специальных программ, то надо **приложить к отчету распечатку с расчетами и пояснениями** (лучше всего их оформить в виде приложения со ссылкой в основном тексте отчета).

Общие замечания

В варианте технического задания на курсовую работу (далее ТЗ) содержится следующая информация:

- рекомендуемый тип транзистора (например, 2N696),
- максимальное напряжение на нагрузке $U_n = U_{\text{вых}} = U_{\text{нТЗ}}$,
- сопротивление R_n и емкость C_n нагрузки,
- сопротивление генератора R_r ,
- коэффициент усиления каскада $K_e = K_{e0 \text{ ТЗ}}$; для каскада ОЭ здесь задан модуль коэффициента усиления (для него необходимо обеспечить выполнение условия: $1.1 K_{e0 \text{ ТЗ}} \geq K_{e0} \geq 0.9 K_{e0 \text{ ТЗ}}$), для каскада ОК необходимо обеспечить $K_{e0} \geq K_{e0 \text{ ТЗ}}$),
- полоса пропускания каскада ($f_n \dots f_v$) (необходимо обеспечить полосу **не уже** заданной в ТЗ: $f_n \leq f_{\text{нТЗ}}$ и $f_v \geq f_{\text{вТЗ}}$),
- кроме того, необходимо обеспечить, чтобы усилитель работал **в линейном режиме**, и **форма выходного сигнала не искажалась**.

Перед началом собственно расчета необходимо:

- выписать из справочника по транзисторам (можно использовать электронный справочник с сайта кафедры (*Студентам-Сайты преподавателей-Электроника-Москатов Справочник*) или хороший справочник из интернета (рекомендую: <https://www.rlocman.ru/datasheet/data.html?di=55936>)) основные параметры заданного транзистора:
 - тип транзистора: n-p-n или p-n-p,

- технологический диапазон параметра β : $\beta_{\min} \dots \beta_{\max}$,
- предельные (максимальные) параметры $I_{\text{к доп}}$, $U_{\text{кэ доп}}$, $P_{\text{доп}}$,
- емкости коллекторного и эмиттерного переходов $C_{\text{кп}}$ и $C_{\text{эп}}$,
- частотные параметры транзистора: $f_{\text{т}}$ (частота единичного усиления) или $f_{\text{гр}}$ (граничная частота).

Расчет состоит из двух частей: синтеза и анализа.

1 часть – синтез схемы (пп. 1- 6 и 12). В процессе выполнения этой части надо выбрать конкретную схему каскада и рассчитать ее параметры:

- напряжение источника питания $E_{\text{п}}$ и сопротивления резисторов схемы, которые должны **обеспечить работу транзистора в нормальном активном режиме** (в режиме усиления) и заданный в ТЗ **коэффициент усиления**,
- емкости разделительных и шунтирующих конденсаторов, которые должны обеспечить **нижнюю граничную частоту $f_{\text{н}}$** , не более заданной.

Задача синтеза не является однозначной, т.е. существует множество ее решений, есть также **множество различных методов и подходов** к ее **решению** (здесь многое зависит от транзистора: его мощности, основных и допустимых параметров). Поскольку при решении **задачи синтеза** существует **множество различных вариантов ее решения**, то в некоторых пунктах предлагается **несколько способов расчета (надо выбрать один из них)**, в некоторых пунктах приведены **диапазоны изменения коэффициентов**, а не их точные значения (тоже есть возможность выбора). Поэтому надо быть готовым к тому, что синтезировать схему, удовлетворяющую **всем условиям ТЗ**, с первого раза не получится и **придется повторить расчет много раз**. В некоторых вариантах невозможно синтезировать схему, выполнив все требования ТЗ, и тогда приходится менять транзистор или даже данные ТЗ (в таких случаях в тексте «Рыбы», как правило, написано: «обратиться к преподавателю»). В некоторых случаях невозможность выполнения всех требований ТЗ может выявиться только на этапе анализа схемы во второй части расчета, в таких случаях также следует обратиться к преподавателю. **Студенту категорически запрещается менять данные ТЗ без согласования с преподавателем.** Для коррекции ТЗ студент **должен доказать преподавателю**, что без этого он работу выполнить не сможет: он должен предъявить преподавателю 4-5 вариантов расчета с доказательствами того, что заданное ему вариантом ТЗ реализовать невозможно.

Анализ включает ручной расчет и проверку работы (удовлетворяет ли она всем условиям ТЗ) синтезированной схемы с помощью программы DesignLab (OrCad).

Примечания.

1. В «Рыбе» пункты пронумерованы в соответствии с разделом «Содержание работы» задания.

2. Работу можно условно разделить на три части: предварительный расчет (решается **задача синтеза** каскада), основной расчет и проверку работы синтезированной схемы с помощью программы OrCad (осуществляется анализ синтезированной схемы).

3. На протяжении всего расчета в качестве β следует принимать значение $h_{21э}$, найденное при выполнении п. 4.

4. Для варианта с р-п-р транзистором есть некоторые особенности оформления расчетов: при выполнении синтеза следует использовать те же формулы, что и для

n-p-n транзистора, но напряжения $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$ писать со знаком модуля: $|U_{бэ}|$ и $|U_{кэ}|$. В части анализа модули писать не нужно, т.к. эти напряжения, вообще-то, должны получиться отрицательными.

Введем следующие сокращения и обозначения:

р.т. – рабочая точка, напряжение и ток в р.т. – $U_A=U_{кэА}$, $I_A=I_{кА}$.

Каскад	ОЭ	ОК
R_{\sim}	$R_K + R_э$	$R_э$
R_{\sim}	$R_K \parallel R_H$	$R_э \parallel R_H$

Синтез схемы

1. Получение входной и выходных характеристик каскада.

- Необходимо с помощью программы OrCad снять входную (считаем, что при $U_{кэ} \neq 0$ все кривые сливаются в одну) и выходные характеристики транзистора (методика изложена в файле «Алгоритм работы при снятии ВАХ транзистора», а также в методических указаниях к ЛР4).

- Далее следует нарисовать (в графическом редакторе) и обозначить на характеристиках оси, написать режимы измерений ($U_{кэ}$ и $I_б$), сохранить обработанные характеристики (они будут нужны при выполнении пп. 1, 3, 4, 9 задания; причем для каждого пункта лучше сделать отдельные характеристики).

- **На выходных характеристиках транзистора** (с осями и режимами) с помощью программы OrCad или вручную **построить гиперболу** $I_K = P_{доп} / U_{кэ}$ (название переменной для графика гиперболы написано непосредственно под характеристиками: например, V_V1) и две прямые $U_{кэ} = U_{кэ доп}$ и $I_K = I_{K доп}$. Ниже на рис. 1 показан пример такого построения. Если значения $U_{кэ доп}$ и/или $I_{K доп}$ выходят за границы рисунка, надо написать эти допустимые значения рядом с обозначениями соответствующих осей (например, $U_{кэ доп} = 50 В$).

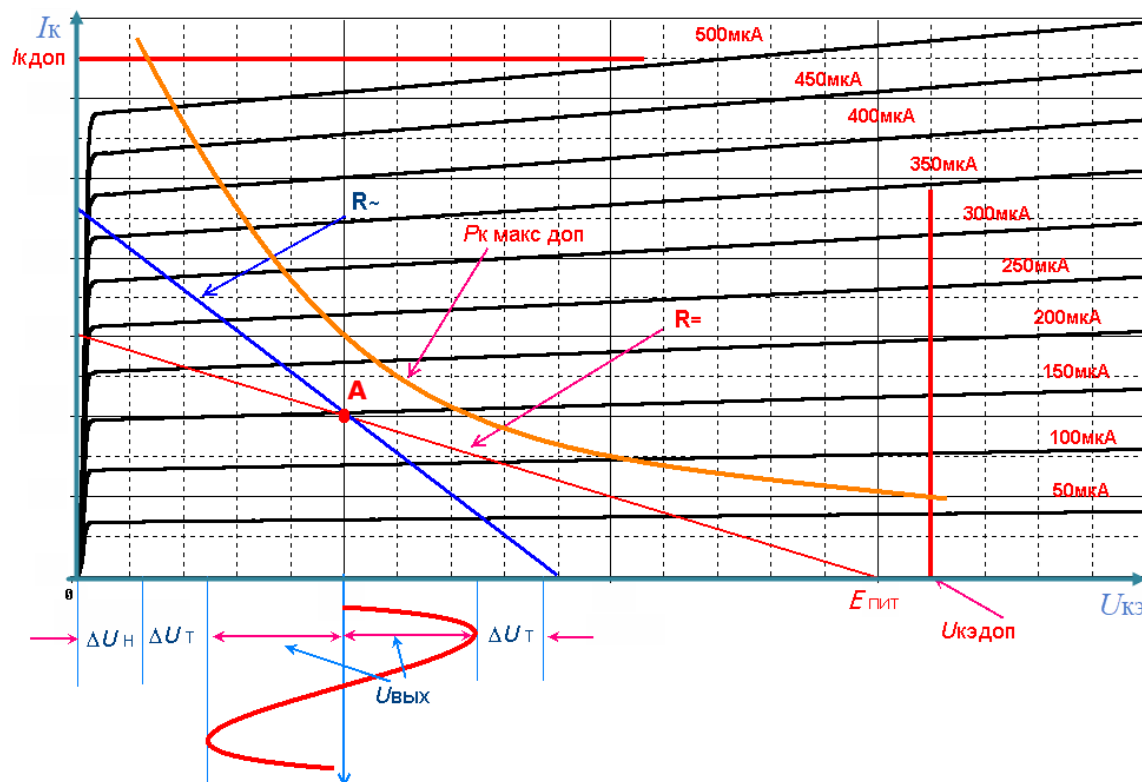


Рис. 1

Для варианта с р-п-р транзистором есть несколько особенностей получения и оформления характеристик (подробнее см. файл на сайте кафедры).

- Надо перевернуть оба источника в схеме получения входных и выходных ВАХ.
- Поскольку характеристики получатся не в 1 четверти, их надо инвертировать, добавив знак «-» перед названием графика (под характеристиками слева).
- На характеристиках р-п-р транзистора ось напряжений следует обозначать «- $U_{бэ}$ » или «- $U_{кэ}$ » в зависимости от вида характеристик.

2. Выбор схемы каскада определяется значением коэффициента усиления: если $K_{e0\ TЗ} < 1$ – выбирается схема эмиттерного повторителя (каскад ОК), если $K_{e0\ TЗ} > 1$, то выбирается классический каскад ОЭ с двумя резисторами в цепи эмиттера, один из которых зашунтирован конденсатором. При выборе вида каскада следует также учитывать тип транзистора: п-р-п или р-п-р.
3. Определение напряжения источника питания и рабочего режима транзистора (рабочей точки).

$$U_A \geq U_H + \Delta U_{\text{нел}} + \Delta U_T$$

$$E_{\text{п}} \geq U_A + \Delta U_T + U_H + \Delta U_E, \text{ где}$$

$\Delta U_{\text{нел}} = (1...2) \text{ В}$ – запас напряжения, связанный с нелинейностью выходных вольтамперных характеристик транзистора; $\Delta U_T = (1...2) \text{ В}$ – запас напряжения, связанный с уходом р.т. из-за изменения температуры и разброса параметров транзистора ($\Delta U_T = \Delta I_K R_{\sim}$), $\Delta U_E = (1...3) U_H$, U_H – амплитуда выходного напряжения из ТЗ. Для каскада ОК величину ΔU_T лучше брать побольше.

$E_{\text{п}}$ выбирается из **номинального ряда напряжений источников**:

$E_{\text{п}} = (6, 9, 10, 12, 15, 18, 20, 24, 27, 36, 40) \text{ В}$. Если $E_{\text{п}}$ получилось больше $U_{\text{кз доп}}$, следует уменьшить $\Delta U_{\text{нел}}$, $\Delta U_{\text{Т}}$ и/или $\Delta U_{\text{Е}}$, если и при минимальных значениях $E_{\text{п}} > U_{\text{кз доп}}$, то следует обратиться к преподавателю.

Можно ориентироваться на следующее примерное соотношение: $U_{\text{А}} \approx (0.4 - 0.6) E_{\text{п}}$.

$$I_{\text{А}} > I_{\sim} + I_{\text{к0}},$$

где $I_{\text{к0}} = (1 \dots 2) \text{ мА}$ – тепловой ток,

$$I_{\sim} = \frac{U_{\text{н}} + \Delta U_{\text{Т}}}{R_{\sim}} = k_i I_{\text{н}} = (3 \dots 5) \cdot \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} = (3 \dots 5) I_{\text{н}}.$$

После определения $E_{\text{п}}$ и рабочего режима ($U_{\text{А}}$, $I_{\text{А}}$) надо построить точки ($E_{\text{п}}$, 0) и ($U_{\text{А}}$, $I_{\text{А}}$) на выходных характеристиках транзистора (обозначить р.т. Аз, где 3 – номер пункта раздела «Содержание работы»), провести через эти точки предварительную нагрузочную прямую по постоянному току. При этом необходимо проследить, чтобы р.т. Аз лежала на пологом участке выходных характеристик **под гиперболой** $I_{\text{к}} = P_{\text{доп}} / U_{\text{кз}}$ и **вдалеке** от построенных перед началом расчета прямых ($U_{\text{кз}} = U_{\text{кз доп}}$ и $I_{\text{к}} = I_{\text{к доп}}$) и **от осей**. Если это сделать не получается, надо обратиться к преподавателю.

4. *Определение малосигнальных параметров схемы замещения транзистора.*

Необходимо с помощью программы OrCad снять выходные и входную характеристики транзистора (методика изложена в файле «Алгоритм работы при снятии ВАХ транзистора», а также в методических указаниях к ЛР4). Нанести на выходные характеристики р.т. и определить в ней $h_{21э}$. затем убедиться, что $h_{21э}$ **лежит внутри технологического диапазона параметра β** . Если это не так, обратиться к преподавателю. Полученное значение $h_{21э}$ надо использовать в качестве β во всех пп. расчета. Затем надо перенести р.т. на входную характеристику и определить $h_{11э}$ (см. ЛР4).

5.а. *Определение сопротивлений резисторов выходной цепи.*

Из построенной предварительной нагрузочной прямой можно определить:

$$R_{\sim} = \frac{E_{\text{п}} - U_{\text{А}}}{I_{\text{А}}} = R_{\text{э}} \quad \text{для каскада ОК} \quad (\underline{R_{\text{э}} \text{ округлить до числа из ряда Е24}}),$$

$$= R_{\text{э}} + R_{\text{к}} \quad \text{для каскада ОЭ}.$$

Для каскада ОК после определения сопротивления $R_{\text{э}}$ и округления его значения до ряда, надо рассчитать величину сопротивления R_{\sim} . Затем надо **на выходных характеристиках транзистора через р.т. построить нагрузочную прямую по переменному току** (как строить прямую см. ниже). Если на горизонтальной оси эта прямая отсечет напряжение меньшее, чем $U_{\text{н}} + \Delta U_{\text{Т}}$, то надо менять положение р.т., а если ничего не помогает, обращаться к преподавателю.

Для каскада ОЭ при определении сопротивлений $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{э}}$ можно воспользоваться **одним из трех способов** (рекомендую первый).

1) Отложить по оси $U_{\text{кз}}$ вправо от р.т. отрезок несколько больший (с запасом), чем $\Delta U_{\text{Т}} + U_{\text{н}}$, (т.е. задаться значением R_{\sim}), и, соединив эту точку с рабочей, построить нагрузочную прямую по переменному току (см. рис. 1). Из получившегося треугольника надо определить сопротивление R_{\sim} и затем найти сопротивление $R_{\text{к}}$:

$R_k = R_n R_{\sim} / (R_n - R_{\sim})$. Здесь также надо учитывать, что значение R_{\sim} обязательно должно быть меньше R_n . В противном случае надо сдвигать р.т. или увеличивать E_n , а если ничего не помогает, обращаться к преподавателю.

$$2) R_k = (3-4) R_3.$$

$$3) R_k = (0,6-0,8) R_{\sim}, R_3 = R_{\sim} - R_k.$$

Найденное любым способом сопротивление R_k надо округлить до числа из ряда Е24, потом нужно пересчитать R_3 по формуле $R_3 = R_{\sim} - R_k$, но округлять до ряда его не надо (т.к. далее его придется разбивать на два сопротивления: R_{31} и R_{32} – см. п. 11).

После определения сопротивлений R_k и R_3 для каскада ОЭ вторым или третьим способом, на выходных характеристиках транзистора через р.т. надо построить нагрузочную прямую по переменному току (см. рис.). Для этого надо посчитать величину R_{\sim} (см. раздел «Общие замечания») и найти значение $I_A R_{\sim}$. Если это значение меньше, чем $U_n + \Delta U_T$, то надо или менять положение р.т. или брать другие значения сопротивлений R_3 и R_k . Если больше, то надо отложить полученное значение по оси $U_{кз}$ вправо от р.т. и, соединив полученную точку с рабочей, построить нагрузочную прямую по переменному току (см. рис. 1).

5б. Проверка допусков транзистора.

Для n-p-n транзистора $E_n > 0$, а для p-n-p транзистора $E_n < 0$.

$$|E_n| < U_{кз \text{ доп}},$$

$$I_{k \text{ макс}} < I_{k \text{ доп}}, \text{ где } I_{k \text{ макс}} = I_A + U_A / R_{\sim},$$

$$P_A < P_{\text{доп}}, \text{ где } P_A = U_A \cdot I_A.$$

Если какое-нибудь из этих соотношений не выполняется, то следует начать расчет заново с п. 3, а если не выполняется первое или второе неравенство – обратиться к преподавателю.

6.б. Определение сопротивлений резисторов входной цепи.

Сопротивления делителя R_1 и R_2 для каскада ОЭ и для каскада ОК можно определить следующим универсальным способом.

Для обеспечения условия стабильности положения р.т. в п. 2 предварительного расчета была выбрана величина ΔU_T , тогда можно найти $\Delta I_{k \text{ доп}} = \Delta U_T / R_{\sim}$ (здесь желательно проверить выполнение неравенства: $\Delta I_{k \text{ доп}} < 0,1 I_A$).

Из условия стабильности положения р.т. (см. ниже вставку, отмеченную ***) можно вывести следующую формулу:

$$R_6 \leq \frac{\beta(\Delta I_{k \text{ доп}} \cdot R_3 - |\xi \Delta T|)}{\Delta \beta \cdot I_{6A} - \Delta I_{k \text{ доп}}} - R_3, \text{ где } I_{6A} = I_A / \beta.$$

*****Приложение.** Формула выведена из следующих соотношений:

$$\Delta I_{k \text{ доп}} = \Delta I_{k1} + \Delta I_{k2}, \text{ где}$$

$\Delta I_{k1} = |\xi \Delta T| \beta / (R_6 + R_3(1+\beta))$ – уход р.т. из-за влияния температуры; считается, что нормальная температура, для которой ведется расчет, равна 20°C, ΔT – наибольшее отличие температуры от нормальной в рамках заданного в ТЗ температурного диапазона, а ξ – температурный коэффициент, $\xi = (1,5 \dots 2) \text{ мВ/}^\circ\text{C}$,

$$\Delta I_{k2} = \frac{\Delta \beta / \beta}{1 + \beta \cdot \gamma_6} \cdot I_A - \text{уход р.т. из-за технологического разброса параметра } \beta, \text{ где в}$$

качестве $\Delta \beta$ выбирается большее из двух значений: $\Delta \beta = \beta_{\max} - \beta$ или $\Delta \beta = \beta - \beta_{\min}$,

$$\gamma_6 = \frac{R_3}{R_3 + R_6}, \text{ а } I_A - \text{значение рабочего тока коллектора.***}$$

Если величина R_6 оказалась < 0 , то обеспечить стабильность р.т. **НЕ удалось**. Тогда следует изменить положение рабочей точки A_3 : надо сместить р.т. A_3 вверх и вправо ($I_A \uparrow$ и $U_A \uparrow$), и начать расчет с начала (с п. 3).

После определения R_6 с помощью следующих уравнений находим величину R_1 .

$$\varphi_B = U_{63} + I_3 R_3 = 0.7 + (1 + \beta) I_{6A} R_3, \quad I_{6A} = I_A / \beta,$$

с другой стороны, с учетом $R_6 = R_1 \parallel R_2$, можно записать:

$$\varphi_B = E_{\Pi} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_{6A} R_6 = E_{\Pi} \frac{R_6}{R_1} - I_{6A} R_6, \text{ откуда получаем:}$$

$$E_{\Pi} \frac{R_6}{R_1} - I_{6A} R_6 = 0.7 + (1 + \beta) I_{6A} R_3, \text{ отсюда находим } R_1:$$

$$R_1 = \frac{E_{\Pi} R_6}{0.7 + I_{6A} R_{\text{см}}}, \text{ где } R_{\text{см}} = R_6 + (1 + \beta) R_3.$$

Потом через R_1 находим R_2 : $R_2 = R_6 R_1 / (R_1 - R_6)$.

Для **каскада ОК** сопротивления R_1 и R_2 лучше округлять **в большую сторону** (иначе могут возникнуть проблемы с обеспечением коэффициента усиления каскада). После расчета и округления сопротивлений всех резисторов для **каскада ОК** надо сразу проверить, получится ли обеспечить требуемый в ТЗ коэффициент усиления. Для этого рекомендуется найти коэффициент $\xi_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} / (R_{\text{вх}} + R_{\Gamma})$, где $R_{\text{вх}} = R_6 \parallel (h_{113} + (1 + h_{213})(R_3 \parallel R_{\Pi}))$. Коэффициент $\xi_{\text{вх}}$ должен быть несколько большим, чем K_{e0} . Если он окажется меньше или равен K_{e0} , то следует изменить положение р.т. Если это не поможет, обратиться к преподавателю.

Для **каскада ОЭ** в некоторых случаях сопротивление R_6 получается довольно большим (5-10 кОм). В этом случае для обеспечения лучшей термостабильности каскада желательно взять R_6 меньше рассчитанного значения. Ориентироваться можно на соотношение $R_6 \approx (5-10) R_{\Gamma}$ (R_6 порядка 1-2 кОм).

Полученные любым способом величины R_1 и R_2 надо округлить до чисел из ряда E24.

На этом синтез схемы практически закончен (остается только рассчитать емкости конденсаторов в п. 12). Поэтому далее надо нарисовать схему каскада с учетом типа транзистора и полярности источника питания и написать на этой схеме номиналы всех найденных сопротивлений и источника питания.