

Отчет по лабораторной работе №5
Апериодический усилитель

Выполнили студенты 430 группы
Сарафанов Ф.Г., Платонова М.В.

Нижний Новгород, 2018

Содержание

Введение	2
1 Каскад с общим эмиттером	3
1.1 Описание каскада	3
1.2 Статические характеристики и процессы в усилителе	4
1.3 Эквивалентная схема и коэффициент передачи	5
1.4 Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики каскада	9
1.5 Нелинейные искажения сигнала	11
2 Каскад с общим коллектором	11
2.1 Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики каскада	12
2.2 Потенциалы электродов транзистора	13
3 Двухкаскадный усилитель	13
Вывод	14

Введение

Цель работы – исследование транзисторных апериодических усилителей с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

Основным назначением усилителя является увеличение мощности электрических колебаний без изменения их формы. Кроме того, усилитель часто используется для развязки каскадов или их согласования.

Усилители электрических колебаний имеют широкое и разнообразное применение: в радиосвязи и радиовещании, телевидении, звуковом кино, устройствах записи и воспроизведения звука, дальней проводной связи, измерительной аппаратуре, а также в телемеханике, автоматике, электронно-вычислительных машинах, аппаратуре исследования космического пространства и т.д.

Качественные показатели усилителя во многом определяются режимом его работы. Под режимом работы понимается совокупность токов и напряжений в схеме, определяющих положение «точки покоя», т.е. состояние схемы до подачи на ее вход управляющего (входного) колебания.

При работе с сильными сигналами выбирают ту область статических характеристик транзистора, которая обеспечивает получение заданной максимальной амплитуды тока, напряжения или мощности при допустимой величине нелинейных искажений и, по возможности, небольшом расходе энергии источника питания. Этим требованиям и должен подчиняться выбор режима работы. Выбор несколько различается в зависимости от того, какой эффект на выходе усилителя желательно получить, и в зависимости от типа усиливаемых сигналов.

Если необходимо обеспечить заданную амплитуду выходного тока I_m в низкоомной нагрузке, то режим выбирают следующим образом. Тип используемого транзистора выбирается с таким расчетом, чтобы его максимально допустимая величина коллекторного тока удовлетворяла условию $i_{km} \geq 2I_m$ при симметричных биполярных сигналах и $i_{km} > I_m$ при однополярных сигналах.

В данной работе выбран транзистор МП41А (германиевый сплавной р-п-р транзистор).

1. Каскад с общим эмиттером

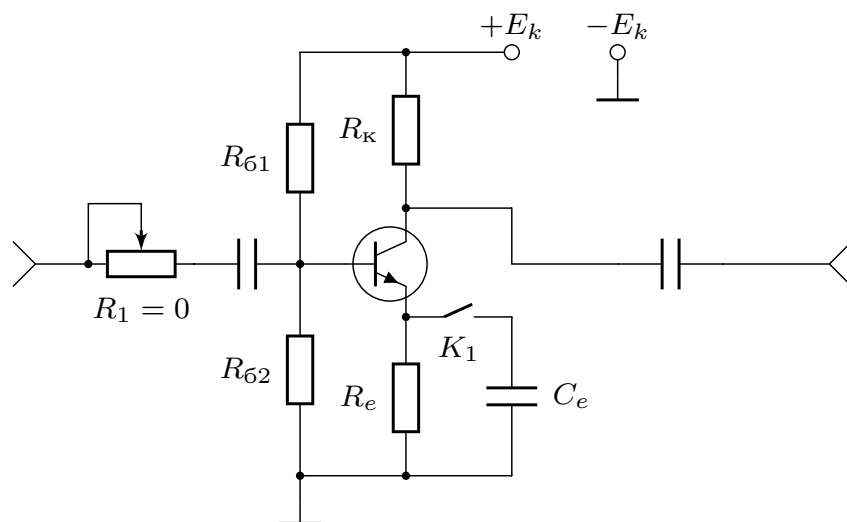


Рис. 1: Схема каскада с общим эмиттером. При отключенном входе каскада на электродах транзистора относительно земли потенциал: $\varphi_6 = 239$ мВ, $\varphi_э = 91.5$ мВ, $\varphi_к = 4.5$ В

1.1. Описание каскада

Часто в усилительных устройствах используется усилитель, в котором транзистор включен по схеме с общим эмиттером.

Входным током такого усилителя является ток базы, выходным – ток коллектора.

Постоянная составляющая входного сигнала подавляется разделительным конденсатором перед базой. Разделительный конденсатор с входным сопротивлением каскада образует ФВЧ на входе каскада, а разделительный конденсатор на выходе каскада вместе с сопротивлением нагрузки образует ФВЧ на выходе каскада.

Разделительные конденсаторы, с одной стороны, не позволяют источнику сигнала влиять на режим работы каскада, но в это же время они уменьшают коэффициент усиления на низких частотах.

Необходимое постоянное смещение до рабочей точки задается источником питания E_k через делитель напряжения R_{61} , R_{62} .

При этом надо учесть, что смещение изменяется за счет отрицательной обратной связи по цепочке R_e , C_e (пусть их суммарный импеданс Z_e). Эта цепочка обеспечивает возврат в рабочую точку при тепловом сдвиге ВАХ транзистора:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_b = i_{b0} \\ i_k = i_{k0} \\ U_b = U_{b0} \end{array} \right. \xrightarrow[\text{Рост температуры}]{i_k = i_{k0} + \Delta i_k} U_b = U_{b0} - Z_e \cdot \Delta i_k \longrightarrow i_k \downarrow$$

При этом если импеданс чисто активный ($Z_e = R_e$), то отрицательная обратная связь приведет к снижению усиления каскада.

Однако, если включить параллельно конденсатор C_e , то при росте частоты он будет шунтировать R_e , что позволит избежать падения усиления.

1.2. Статические характеристики и процессы в усилителе

На рис.2 приведены осциллограммы действующих в усилителе токов и напряжений, иллюстрирующие процессы, происходящие в схеме. Там же представлено, взятое из справочника по транзисторам, семейство выходных статических характеристик.

На этом же рисунке изображена нагрузочная прямая, исходящая из точки (0,-10) под углом α ; $tg\alpha = \frac{1}{R_K}$.

Напряжение на базе $U_{БЭ} = -225$ мВ и ток базы $I_{БП} = 0.2$ мА определяют режим транзистора по постоянному току («точка покоя» на нагрузочной прямой: $I_{Км} = 0.2$ мА, $U_{КЭм} = 4.5$ В).

Изменение входного напряжения (под действием сигнала) вызывает изменение тока базы. При изменении тока базы изменяется ток коллектора и в коллекторной цепи выделяется усиленный сигнал, который через разделительный конденсатор поступает на выход усилителя. Для данной схемы входное сопротивление $R_{вх} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{БЭ}} = \frac{0.035}{0.1 \cdot 10^{-3}} = 350$ Ом, коэффициент передачи по току $K_i = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{6.5}{0.1} = 65$, по напряжению $K_U = \frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta U_{БЭ}} = \frac{2.5}{0.035} = 71.5$ и по мощности $K_P = K_i K_U = 6.5 \cdot 71.5 = 4650$.

Таким образом, мощность, выделяемая на сопротивлении нагрузки R_K переменной составляющей коллекторного тока, значительно больше мощности входного сигнала, затрачиваемой во входной цепи усилителя.

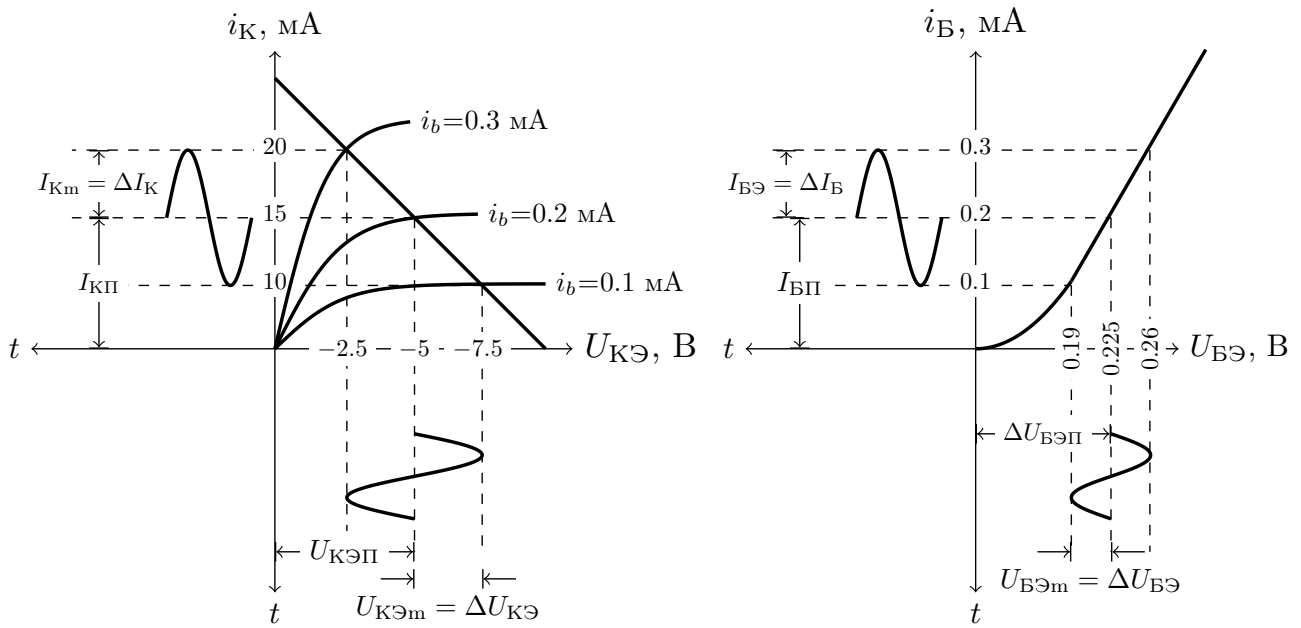


Рис. 2

1.3. Эквивалентная схема и коэффициент передачи

Найдем коэффициент передачи усилительного каскада с ОЭ. Для этого составим эквивалентную схему каскада по переменному току.

Эквивалентная схема - это модель усилителя, которая включает лишь существенные для процесса усиления компоненты. Конкретный вид эквивалентной схемы зависит от многих факторов. Среди них, в частности, уровень входного сигнала, питающие транзистор постоянные токи и напряжения, рабочий диапазон частот и требуемая выходная мощность.

Рассматриваемый нами усилитель является усилителем напряжения. В этом случае применимо малосигнальное приближение, при котором допускается, что вызываемые входным сигналом приращения токов и напряжений не изменяют дифференциальных параметров транзистора - коэффициента усиления тока базы β , входного сопротивления $R_{вх-тр}$ и внутреннего сопротивления R_i (сопротивления между коллектором и эмиттером). Их можно считать постоянными и не зависящими от входного сигнала.

В таком случае транзистор работает как управляемый током базы источник тока с внутренним сопротивлением R_i :

$$\Delta i_k = \beta \cdot \Delta i_b.$$

Здесь i_k и i_b - соответственно приращения токов коллектора и базы транзистора. Эле-

менты цепей питания в явном виде в эквивалентную схему могут не войти. Это зависит от того, являются ли эти элементы значимыми для переменных, обусловленных входным сигналом токов или нет. К таким элементам относятся резисторы R_{61} , R_{62} и R_e . Как уже отмечалось, резисторы R_{61} и R_{62} задают напряжение смещения на базу транзистора, а R_e обеспечивает температурную стабилизацию его параметров за счет отрицательной обратной связи по постоянному току. Цепи питания определяют конкретные, ими задаваемые значения дифференциальных параметров транзистора β , $R_{\text{вх-тр}}$ и R_i .

Если ко входу усилительной секции подключен источник напряжения U_s , у которого внутреннее сопротивление (сопротивление генератора $R_{\text{ген}}$) много меньше входного сопротивления $R_{\text{вх}}$, допустимо представление транзистора источником тока, управляемым напряжением. В этом случае

$$\Delta i_k = S \cdot \Delta u_{63},$$

u_{63} - приращение разности потенциалов между базой и эмиттером, а $S = \beta/R_{\text{вх}} \approx \beta/r_b$ - крутизна транзистора. Если сигнал на входе синусоидален, то все напряжения u и токи i можно представить комплексными амплитудами $U = |U| \cdot \exp(j\varphi_u)$ и $I = |I| \cdot \exp(j\varphi_i)$, где $|U|$ и $|I|$ - амплитуды, а φ_u и φ_i - фазы соответствующих напряжений и токов.

Переменная составляющая управляющего напряжения (напряжения на базе U_B) отличается от напряжения сигнала U_s . Однако при $R_{\text{ген}} \ll R_{\text{вх}}$, $\frac{1}{\omega C_1} \ll R_{\text{вх}}$ и $\frac{1}{\omega C_e} \ll R_e$ $U_B \approx U_s$, то есть переменная составляющая управляющего напряжения равна входному сигналу, который, в свою очередь, равен напряжению источника сигнала.

В общем случае эквивалентная схема усилителя содержит входную (базовую) и выходную (коллекторную) цепи, а также элементы их взаимосвязи. Связь между входной и выходной цепями, называемая обратной, возникает из-за емкости коллектор-база $C_{\text{КБ}}$ и из-за конечной величины сопротивления R_e эмиттерного перехода транзистора. Первая является обратной связью по напряжению, вторая - по току. Обратная связь через $C_{\text{КБ}}$ не существенна в области низких частот, то есть в той частотной области, на которую рассчитан рассматриваемый усилитель. Обратную связь через R_e можно не учитывать, если величина импеданса в цепи эмиттера $|Z_{\text{Э}}| = |(R_e || C_e)| \gg R_e$. При выполнении перечисленных выше условий входную и выходную цепи усилительной секции можно рассматривать независимо. Будем полагать также, что во входной цепи выполнены условия согласования по напряжению с источником сигнала, то есть $R_{\text{ген}} \ll R_{\text{вх}}$, а разделительная емкость C_1 такова, что ее импеданс $\frac{1}{\omega C_1} \ll R_{\text{вх}}$. В таком случае управляющее напряжение U_B равно входному U_1 .

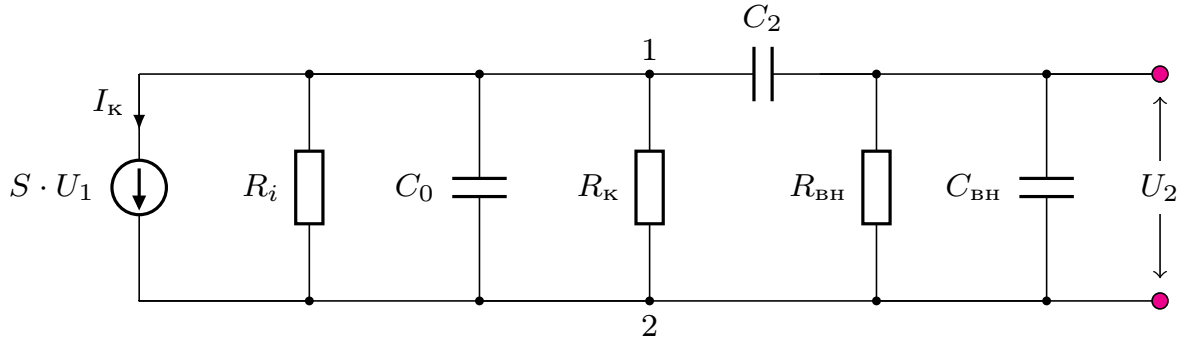


Рис. 3: Эквивалентная схема

Эквивалентная схема выходной цепи усилителя приведена на рис. 3.

В ней транзистор Т представлен источником тока $S \cdot U_1$ с внутренним сопротивлением R_i и выходной емкостью C_0 . Последняя в значительной степени зависит от барьерной емкости коллекторного перехода транзистора. В эквивалентную схему вошли также выходная разделительная емкость C_2 , коллекторная нагрузка транзистора R_K и элементы, характеризующие внешнюю нагрузку усилителя $Z_{вн}$. Будем полагать, что внешняя нагрузка имеет емкостной характер и состоит из активного сопротивления $R_{вн}$ и емкости $C_{вн}$ ($Z_{вн} = (R_{вн} || C_{вн})$). Для начала положим $C_{вн} = 0$. Тогда коэффициент передачи усилителя

$$K(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{12}}{U_1} \cdot \frac{U_2}{U_{12}}$$

где U_{12} - разность потенциалов между точками 1 и 2 в схеме на рис. 3. Выражая U_2 и U_{12} через действующие в схеме токи, получим:

$$K(j\omega) = - \frac{SU_1}{\left\{ \frac{1}{R_i} + j\omega C_0 + \frac{1}{R_K} + \left(R_{вн} + \frac{1}{j\omega C_2} \right)^{-1} \right\} U_1} \cdot \frac{U_{12} R_{вн}}{\left(R_{вн} + \frac{1}{j\omega C_2} \right) U_{12}}$$

Обозначим через $R_\Sigma = (R_i || R_K || R_{вн})$ результирующее сопротивление параллельно включенных резисторов R_i , R_K и $R_{вн}$. Среди них R_i имеет наибольшую величину (\sim нескольких сотен кОм) и поэтому $R_\Sigma \approx (R_K || R_{вн})$. Введем также постоянные времени $\tau_1 = C_2 R_{вн}$ и $\tau_2 = C_0 R_\Sigma$ и коэффициент $\gamma = (R_K || R_i) \geq 1$. Кроме того, учтем то, что в реальных усилителях обычно $C_0 \ll C_1, C_2$.

В итоге получим для коэффициента передачи выражение

$$K(j\omega) \approx \frac{-SR_\Sigma}{1 - j\left(\frac{1}{\gamma\omega\tau_1} - \omega\tau_2\right)} = |K(j\omega)| \cdot \exp(j\varphi(\omega)) \quad (1)$$

По смыслу τ_1 - это постоянная времени цепи, образованной разделительным конденсатором C_2 и сопротивлением внешней нагрузки, а τ_2 - постоянная времени цепи, состоящей

из выходной емкости транзистора C_0 и включенных параллельно ей резисторов R_i , R_K и R_{BH} .

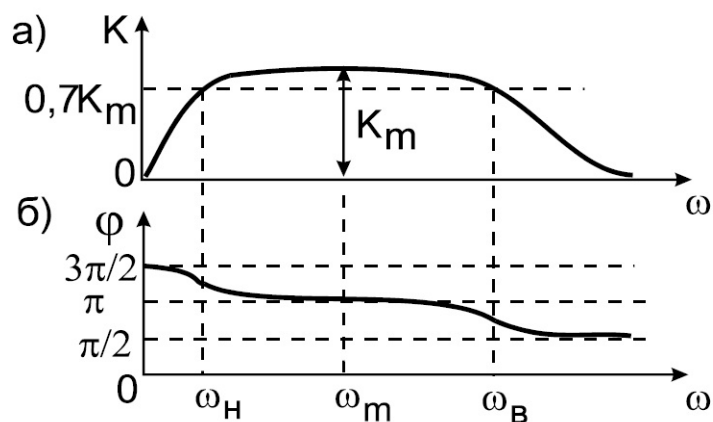


Рис. 4

Полученный вид амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик качественно изображен на рис.4.

В заключение заметим следующее. При повышении частоты входного сигнала на какой-то частоте (граничная частота) время перемещения носителей от эмиттера к коллектору, время заряда и разряда емкостей эмиттерного и коллекторного переходов становится соизмеримым с периодом изменения входного сигнала, т.е. транзистор просто не успевает реагировать на изменения входного сигнала и усилительные свойства транзистора падают. Это свойство отразилось в математически полученном ранее выражении за счет учета емкости коллекторного перехода C_0 .

Таким образом, нужно ожидать следующего поведения АЧХ каскада с ОЭ:

1. При низких частотах коэффициент усиления мал, и включение/отключение C_e на это не влияет или влияет мало.
2. При частотах, когда $Z_{C_e} \ll Z_{R_e}$, коэффициент усиления при включенном C_e выше, чем при отключенном.
3. При частотах выше граничной должно наблюдаться падение коэффициента усиления.

1.4. Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики каскада

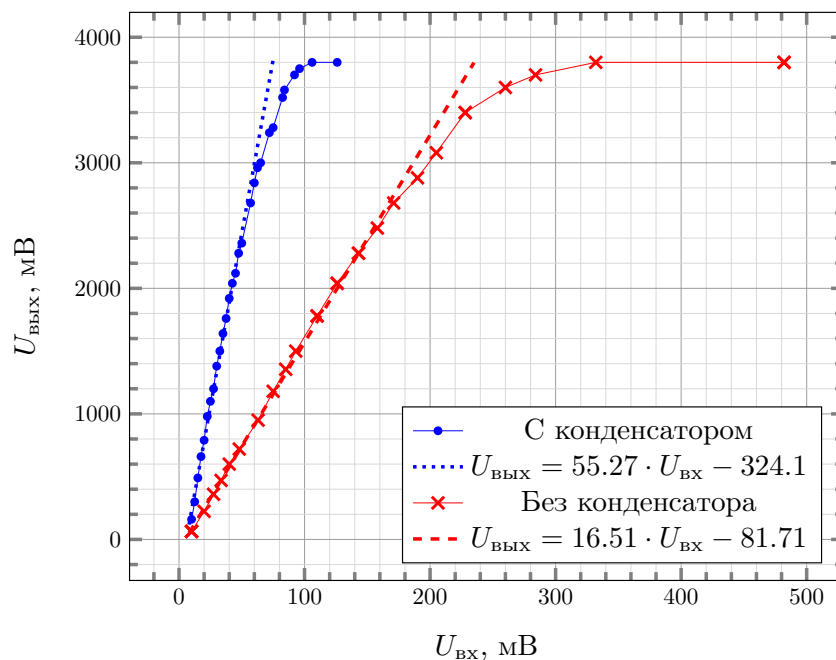


Рис. 5: Амплитудные характеристики каскада с общим эмиттером на частоте 1 кГц при включенном и отключенном конденсаторе C_e

Для каскада с ОЭ найден динамический диапазон как отношение максимальной амплитуды входного сигнала без искажения к минимальной (чувствительности усилителя), в дБ и раз:

$$D_{C_e} = 8.75 \text{ дБ} = 7.5 \text{ раз}$$

$$D_{\text{без } C_e} = 12.43 \text{ дБ} = 17.5 \text{ раз}$$

Так как C_e шунтирует ООС усилителя, можно сделать вывод: **введение ООС расширяет динамический диапазон усилителя.**

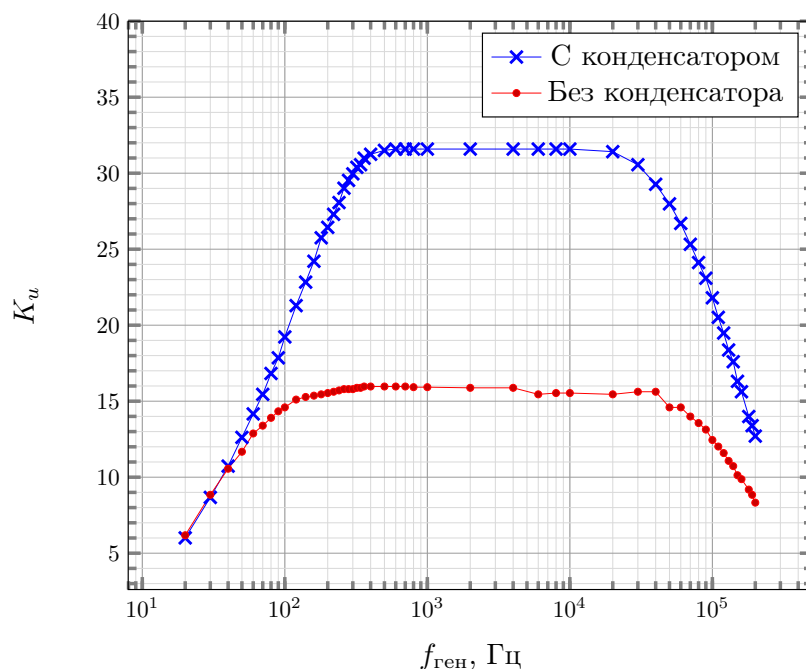


Рис. 6: АЧХ при включенном и отключенном конденсаторе C_e и амплитуде входного сигнала $U_{\text{вх}} = 96 \text{ мВ}$

Снятые характеристики соответствуют предположениям из конца предыдущего параграфа. Из аппроксимации линейного участка амплитудной характеристики каскада найдены:

Коэффициент усиления по напряжению при включенном C_e : $K_u = 55.27$

Коэффициент усиления по напряжению при отключенном C_e : $K_u = 16.51$

Также в полосе пропускания по графику АЧХ найдены те же коэффициенты:

Коэффициент усиления по напряжению при включенном C_e : $K_u = 31.5$

Коэффициент усиления по напряжению при отключенном C_e : $K_u = 16.5$

Расхождение вызвано ошибкой выбора амплитуды входного сигнала: она была выбрана на линейном участке для схемы без конденсатора, но на нелинейном для схемы с конденсатором. Так как коэффициент усиления после линейного участка стремится к нулю, наблюдается заниженное значение коэффициента усиления.

1.5. Нелинейные искажения сигнала

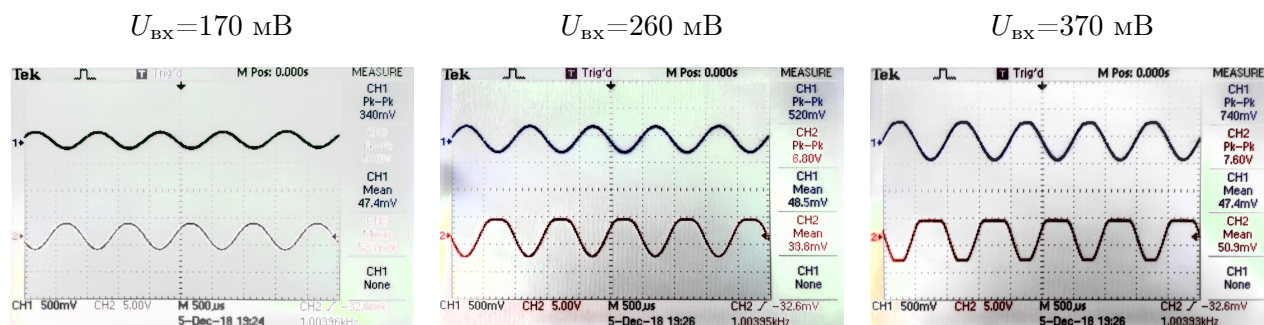


Рис. 7: Характерные осциллограммы появления искажений при выходе с линейного участка

2. Каскад с общим коллектором

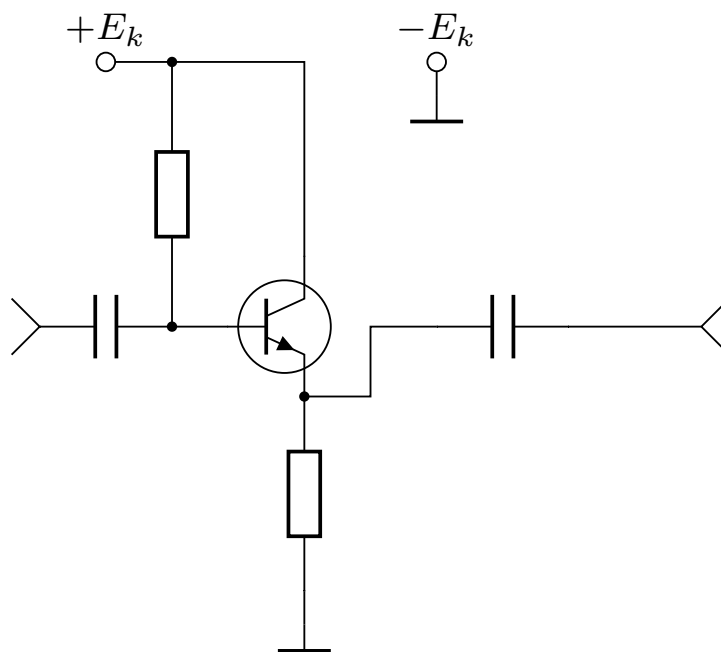


Рис. 8: Схема каскада с общим коллектором

2.1. Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики каскада

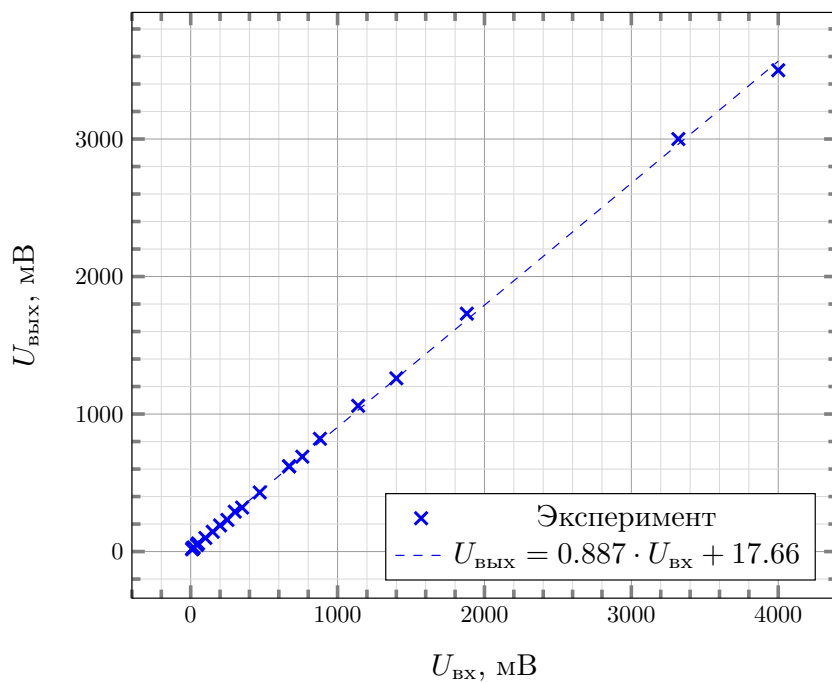


Рис. 9: Амплитудная характеристика каскада с общим коллектором на частоте 1 кГц

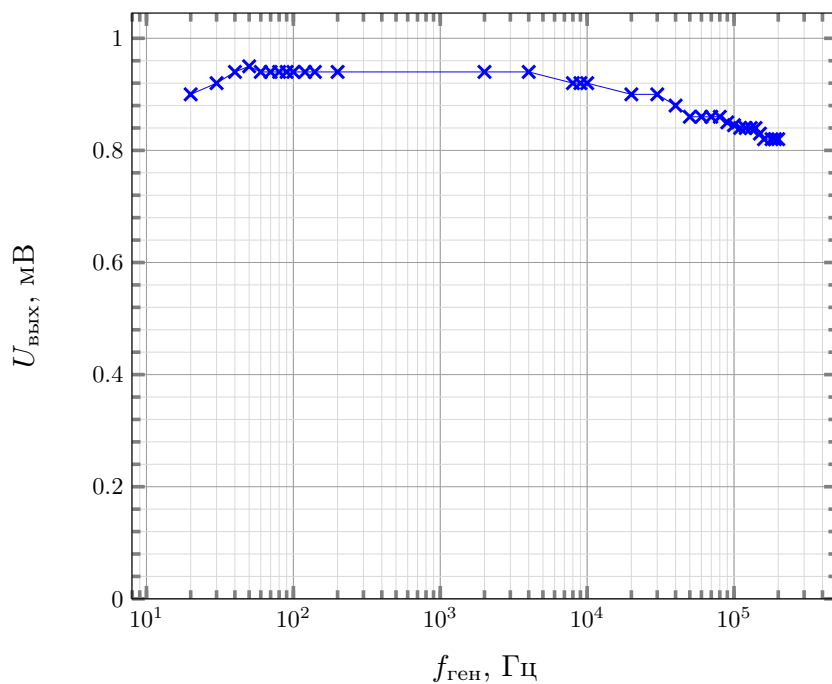


Рис. 10: АЧХ каскада с общим коллектором при $U_{\text{ВХ}} = 244$ мВ

Экспериментальные точки (рис. 11) аппроксимируются прямой $U_{\text{вых}} = K_u \cdot U_{\text{вх}} + U_0$, откуда найден коэффициент усиления по напряжению на линейном участке: $K_u|_{f_{\text{ген}}=1 \text{ кГц}} = 0.887$.

Из графика АЧХ также найден коэффициент усиления в полосе пропускания $K_u|_{f_{\text{ген}}=1 \text{ кГц}} = 0.87$. Найденные коэффициенты хорошо совпадают.

2.2. Потенциалы электродов транзистора

При отключенном входе каскада ($U_{\text{вх}} = 0 \text{ В}$) замеры постоянные напряжения относительно земли на электродах транзистора:

$$\varphi_6 = 4.51 \text{ В}, \quad \varphi_3 = 4.57 \text{ В}, \quad \varphi_к = 8.22 \text{ В}$$

3. Двухкаскадный усилитель

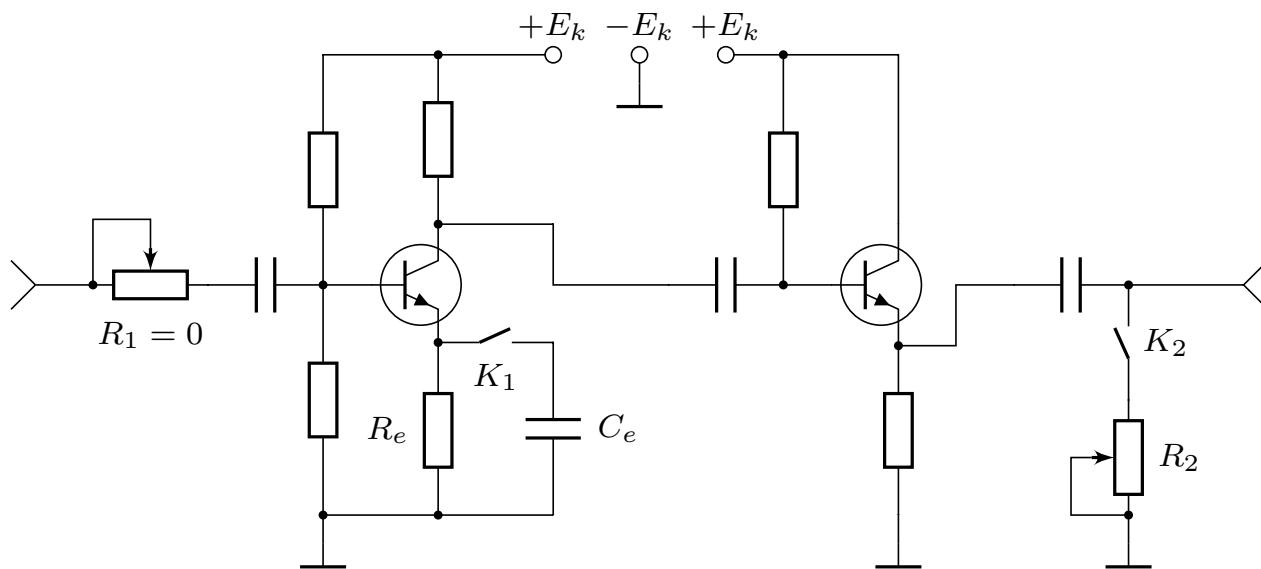


Рис. 11

Включена схема каскада с общим эмиттером. $R_1 = 0 \text{ Ом}$, на выходе подключен R_2 . Частота 1000 Гц , $U_{\text{вх}} = 172 \text{ мВ}$. Значение $U_{\text{вых}} = 1 \text{ В}$. Коэффициент усиления $K = 5.81$.

R_2 подключен к выходу каскада через эмиттерный повторитель. Частота 1000 Гц , $U_{\text{вх}} = 172 \text{ мВ}$. Значение $U_{\text{вых}} = 1.68 \text{ В}$. $K = 9.77$.

Вывод

Был рассмотрен транзисторный апериодический усилитель в разных схемах включения: транзистора с общим эмиттером, общим коллектором и последовательно каскад ОЭ + каскад ОК.