

2. Исследование частотных свойств каскада и основных способов их улучшения (коррекции).

Цель работы: изучение основных факторов, влияющих на ход амплитудно-частотной характеристики каскада; знакомство со схемами частотной коррекции; исследование искажений импульсного сигнала.

2.1. Общие сведения.

Усилительные свойства каскада зависят от частоты. Эту зависимость обычно рассматривают в трёх областях: в области низких частот (НЧ), в области средних частот (СЧ) и в области высоких частот (ВЧ). Типичная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилительного устройства показана на рис.2.1.

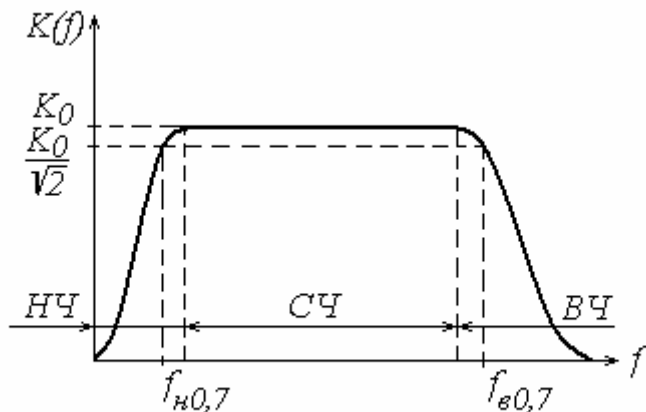


Рис.2.1

Область средних частот является основной рабочей областью. В ней пренебрегают частотной зависимостью коэффициента усиления, считают его равным K_0 . Протяжённость и положение областей НЧ, СЧ, ВЧ характеризуют с помощью граничных частот f_H и f_B , которые часто определяют по уровню $1/\sqrt{2} \approx 0,7$ от номинального значения K_0 и обозначают

$f_{H,0,7}, f_{B,0,7}$ соответственно.

Частотные свойства усилительного устройства также можно описать его нормированной амплитудно-частотной характеристикой (НАЧХ) $M(f) = K(f)/K_0$, представляющей относительные изменения коэффициента усиления $K(f)$ от частоты.

Область низких частот. В области НЧ непостоянство коэффициента усиления определяется тем, что в ней разделительные и шунтирующие (блокирующие) конденсаторы обладают заметным сопротивлением, в результате чего передаточные свойства каскада имеют заниженное по сравнению с K_0 значение. В исследуемом каскаде (см. схему макета) в качестве разделительного конденсатора для схем ОЭ и ОК используется $C2$ ($S2-1,2,3$) или последовательное соединение $C1$ и $C2$ ($S2-4$). Цепь с конденсатором C_P , разделяющим на постоянном токе участки цепи с сопротивлениями $R1$ и $R2$, можно представить в виде эквивалентной схемы, содержащей генератор сигнального тока I_C и последовательно включённые двухполюсники $C_P, R1$ и $R2$ (рис.2.2,а).

Коэффициент передачи такой разделительной цепи $K_P = U_{BX}' / U_{BX}$, его НАЧХ определяется соотношением

$$M_p = \frac{I}{\sqrt{1 + (I/\omega\tau_p)^2}}, \quad (2.1)$$

где $\tau_p = C_p(R1 + R2)$ – постоянная времени разделительной цепи.

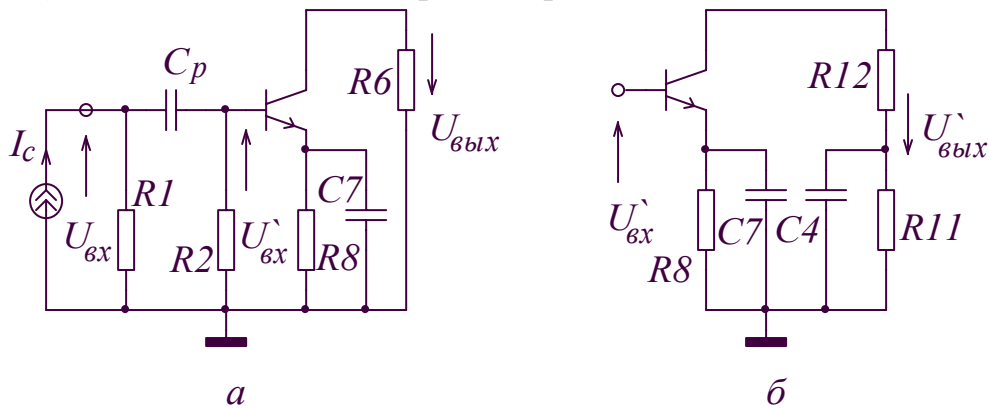


Рис.2.2

Дополнительным источником ухудшения усилительных свойств в области НЧ при схеме ОЭ являются элементы $R8$, $C7$ каскада, включённые в эмиттерную цепь транзистора (см.рис.2.2,а). Резистор $R8$ служит для создания отрицательной обратной связи на постоянном токе, благодаря которой в каскаде обеспечиваются хорошая стабильность и определённость положения исходной рабочей точки. Конденсатор $C7$ шунтирует на СЧ резистор $R8$, вследствие чего в этой частотной области отрицательная обратная связь не действует и каскад обладает требуемым высоким усилением K_0 . На низких частотах шунтирующее действие конденсатора $C7$ становится недостаточно эффективным, в результате этого в каскаде возникает отрицательная обратная связь глубиной $F_{OЭ} = 1 + S_э Z_э$, где $Z_э$ – сопротивление параллельно включённых элементов $R8$ и $C7$; $S_э = g_{21}$ – крутизна транзистора; $g_{21} \approx I_{K0}/0,026$.

Относительное уменьшение M_f усиления K_0 из-за действия указанной обратной связи определяется формулой

$$M_f = \frac{I}{F_{OЭ}} = \frac{I}{1 + S_э R8} \sqrt{\frac{1 + (\omega\tau_э)^2}{1 + [\omega\tau_э / (1 + S_э R8)]^2}}, \quad (2.2)$$

где $\tau_э = C7R8$ – постоянная времени нагрузки в цепи эмиттера.

Общее снижение усиления $M_{H\Sigma}$ на НЧ из-за разделительной и эмиттерной цепей

$$M_{H\Sigma} = M_p M_f. \quad (2.3)$$

Коррекция хода частотной характеристики в области НЧ может быть достигнута за счёт использования в нагрузке каскада цепи, имеющей повышенное по сравнению с СЧ сопротивление, например, дополнительного резистора $R11$, зашунтированного конденсатором $C4$ (см.рис.2.2,б).

Область высоких частот. В ВЧ-области снижение усиления обусловлено, с одной стороны, ухудшением усилительных свойств самого транзистора

(уменьшением модуля передаточной проводимости Y_{21}), а с другой – заметным шунтирующим влиянием паразитной ёмкости C_{Σ} (рис.2.3,а) на выход каскада.

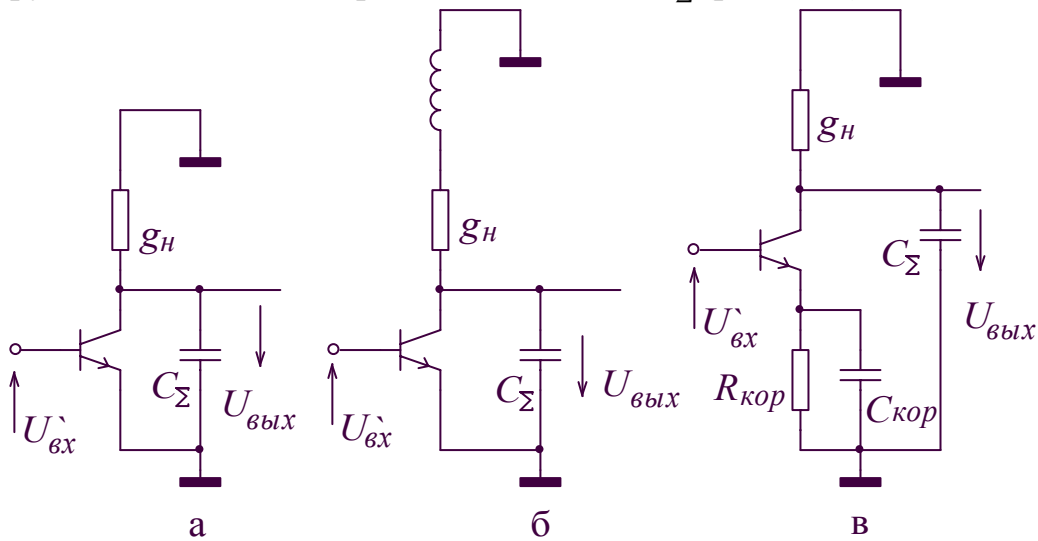


Рис.2.3

Относительное уменьшение усиления из-за частотной зависимости $|Y_{21}|$ для схем ОЭ и ОБ определяется соотношением

$$M_{|Y_{21}|} = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.4)$$

где τ – постоянная времени транзистора.

Шунтирующее действие C_{Σ} уменьшает усиление на ВЧ в соответствии со следующей формулой:

$$M_c = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau_c)^2} \quad (2.5)$$

где $\tau_c = C_{\Sigma} / g'_H$ (g'_H – полная активная проводимость на выходе каскада, включающая выходную проводимость g_{22} транзистора $g'_H = g_H + g_{22}$).

Общее относительное усиление на ВЧ

$$M_{в\Sigma} = M_{|Y_{21}|} M_c = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_c)^2}} \quad (2.6)$$

Коррекцию частотных искажений в области ВЧ, обусловленных уменьшением модуля проводимости Y_{21} , можно осуществить в схемах ОЭ и ОБ с помощью дополнительного резистора R_f , включённого в эмиттерную (ОЭ) или базовую (ОБ) цепь транзистора. Резистор R_f создаёт отрицательную обратную связь, в результате чего постоянная времени эквивалентного, включающего R_f транзистора уменьшается в глубину обратной связи раз. Для каскада ОЭ – в $F_{OЭ}$ раз, где $F_{OЭ} = 1 + S_{OЭ} R_f$, $\tau_f = \tau / F_{OЭ}$. Следует отметить, что введение в схему каскада резистора R_f сопровождается уменьшением коэффициента усиления K_0 в $F_{OЭ}$ раз, $K_{0f} = K_0 / F_{OЭ}$.

Искажения из-за паразитной ёмкости C_{Σ} могут быть уменьшены за счёт введения в нагрузку каскадов (см. рис.2.3,а) дополнительной индуктивности L (см. рис.2.3,б), а также с помощью частотно-зависимой отрицательной обратной связи, создаваемой дополнительной цепочкой $R_{кор} C_{кор}$ (см. рис.2.3,в). В ка-

честве корректирующей эмиттерной цепочки $R_{кор}C_{кор}$ в макете (см. схему макета) используются элементы $R15$, $C5$.

При эмиттерной коррекции в каскаде создаётся отрицательная обратная связь, которая из-за малого значения ёмкости конденсатора $C_{кор}$ ($C5$) создаёт заметное снижение усиления на СЧ. В области ВЧ конденсатор $C_{кор}$ начинает проявлять заметное шунтирующее влияние на резистор $R_{кор}$ ($R15$), уменьшающее глубину обратной связи. Благодаря этому происходит улучшение передаточных свойств эквивалентного транзистора по сравнению со средними частотами. Таким образом, эквивалентный, включающий цепочку $R_{кор}C_{кор}$, транзистор имеет подъём НАЧХ $M|_{\gamma 21}$ в области ВЧ.

При рассмотрении АЧХ каскада за начало корректирующего действия цепочки $R_{кор}C_{кор}$ можно принять частоту $f_{кор}$, на которой выполняется условие $R_{кор} = 1/2\pi f_{кор} C_{кор}$. Наилучшие по равномерности частотные характеристики получаются в каскаде, если элементы $R_{кор}$, $C_{кор}$ удовлетворяют условию $\tau_{кор} = \tau_c$, где $\tau_{кор} = R_{кор}C_{кор}$.

Дополнительным источником спада амплитудно-частотной характеристики каскада в области ВЧ может являться его входная ёмкость $C_{ВХ}$, которая совместно с сопротивлением R_c источника сигнала (рис.2.4) образует фильтр нижних частот с НАЧХ вида

$$M_{ВХ} = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau_{вх})^2}, \quad (2.7)$$

где $\tau_{вх}$ – постоянная времени указанного фильтра;

$$\tau_{ВХ} = C_{ВХ} / g_{ВХ \text{ экв}}; \quad g_{ВХ \text{ экв}} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5} + g_{ВХ}; \quad g_{ВХ} \approx g_{11}.$$

Для схемы ОЭ $C_{ВХ} \approx \tau / r_{\delta} + C_k K_0$; ОК – $C_{ВХ} \approx C_k + \tau(1 - K_0)r_{\delta}^{-1}$, где r_{δ} – сопротивление базовой области транзистора ($r_{\delta} \approx 100 \text{ Ом}$); C_k – ёмкость коллекторного перехода ($C_k \approx 1,5 \text{ пФ}$).

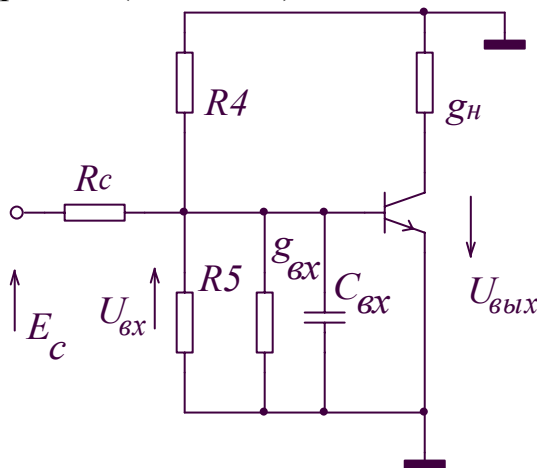


Рис.2.4

С точки зрения уменьшения спада НАЧХ $M_{ВХ}$ в области ВЧ, желательно использовать такие схемы включения, при которых $C_{ВХ}$ мало. Наименьшее значение $C_{ВХ}$ обеспечивает включение ОК. Снижению $C_{ВХ}$ может способствовать введение в каскад ОЭ сопротивления обратной связи R_f , уменьшающего постоянную времени транзистора и коэффициент K_0 в $F_{ОЭ} = 1 + S_{ОЭ}R_f$ раз. Малые частотные искажения во входной цепи имеют место также при работе от источника сигнала с малым значением сопротивления R_c , например, когда в качестве источника сигнала используется схема ОК.

Существенные частотные искажения во входной цепи наблюдаются в случаях использования включения ОЭ при больших значениях K_0 , а также схемы эмиттерной ВЧ коррекции. В последнем случае частотно-зависимый ха-

рактиер обратной связи вызывает уменьшение её глубины на высоких частотах, в результате чего на этих частотах происходит дополнительное повышение входной проводимости транзистора, приводящее к понижению коэффициента передачи входной цепи.

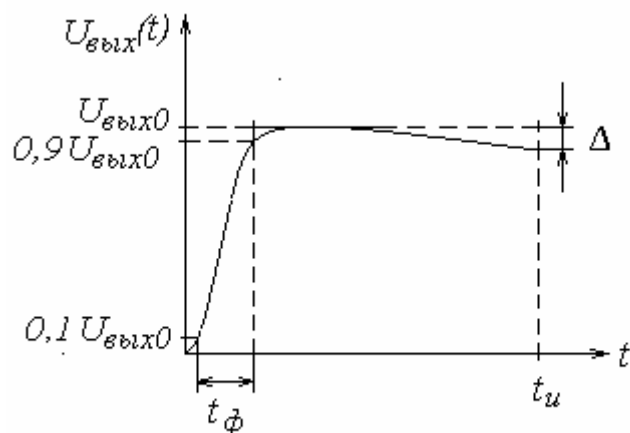


Рис.2.5

Об искажениях импульсных сигналов в усилительной схеме можно судить по её переходной характеристике и, в первую очередь, по длительности фронта t_ϕ и величине спада Δ вершины переходной характеристики за фиксированное время t_u (рис.2.5).

Параметры t_ϕ и Δ переходной характеристики связаны с параметрами $f_{B0,7}$ и $f_{H0,7}$ амплитудно-частотной характеристики соотношениями

$$t_\phi \approx 0,35 / f_{B0,7} ; \Delta = 2\pi f_{H0,7} t_u . \quad (2.8)$$

2.2. Порядок выполнения работы.

Основным содержанием экспериментальных исследований является измерение АЧХ каскада при различных вариантах его построения. Исследования ведутся в двух частотных областях: в области низких частот ($f \leq 1 \text{кГц}$) и в области высоких частот ($f \geq 1 \text{МГц}$). При проведении исследований в области высоких частот следует иметь ввиду, что в лабораторном макете инерционные свойства транзистора, а также значения всех паразитных емкостей искусственно увеличены в 1000 раз по сравнению с обычными, в результате чего частотные изменения усиления в ВЧ-области смещены в область частот, имеющих значения, в тысячу раз меньше реальных. Вследствие этого при построении АЧХ и других интерпретациях результатов измерений значения отсчитываемых по шкале генератора частот f при $f^* > 1 \text{кГц}$ следует увеличить в 1000 раз в соответствии с равенством $f = 10^3 f^*$, где f – частоты, соответствующие реальному транзистору и реальным значениям паразитных ёмкостей. Искусственное увеличение инерционных свойств каскада по сравнению с существующими в действительности позволяет проводить исследования АЧХ в ВЧ-области без

привлечения высокочастотного источника сигнала и высокочастотной измерительной аппаратуры.

1. С помощью переключателя $S3$ обеспечить номинальный режим работы транзистора $I_3 \approx 5 \text{ мА}$.

2. В области НЧ ($f \leq 1 \text{ кГц}$) исследовать зависимость от частоты f передаточных свойств разделительной цепи и транзистора в каскаде ОЭ ($S5-1$) в схеме (см. рис. 2.2, а), для этого, поддерживая постоянным уровень входного сигнала $U_{BX} = 10 \text{ мВ}$, измерить частотные зависимости напряжений $U_{BX}(f)$ и $U_{ВЫХ}(f)$. Исследования проводить при $R1 \approx 10 \text{ Ом}$ ($S1-1$), $C_P \approx 3 \text{ мкФ}$ ($S2-4$), $R2 \approx 1/g_{BX}$, где g_{BX} – входная проводимость каскада ОЭ.

По результатам измерений вычислить значения коэффициентов передачи $K_p(f) = U_{BX}(f)/U_{BX}$ разделительной цепи и $K_f = U_{ВЫХ}(f)/U_{BX}(f)$ и транзистора, а также значения НАЧХ $M_p(f) = K_p(f)/K_{p0}$ разделительной цепи и НАЧХ $M_f(f) = K_f(f)/K_{f0}$ эквивалентного транзистора, где K_{p0} , K_{f0} – значения коэффициентов передачи $K_p(f)$ и $K_f(f)$ на частоте 1 кГц . Сопоставить полученные результаты с теоретическими, определяемыми соотношениями (2.1)-(2.3); для этого представить в общих координатных осях графики теоретических и экспериментальных зависимостей.

3. В области низких частот ($f \leq 1 \text{ кГц}$) в схеме (рис. 2.2, б) исследовать корректирующее влияние на ход НАЧХ частотно-зависимой нагрузки; для этого при положении 4 переключателя $S4$ и неизменном уровне сигнала $U_{BX} = 10 \text{ мВ}$ измерить частотную зависимость выходного напряжения $U_{ВЫХ}(f)$. По результатам измерений вычислить и представить в виде графика зависимость $M_f(f) = U_{ВЫХ}(f)/U_{ВЫХ0}$, где $U_{ВЫХ0}$ – значение напряжения $U_{ВЫХ}(f)$ на частоте 1 кГц . Сопоставить ход измеренной зависимости с аналогичной, полученной в ходе выполнения исследований по п. 2.

4. Определить значения параметров τ и C_Σ , задающих ход НАЧХ $M_{B\Sigma}$ в области верхних частот; для этого в схеме ОЭ ($S5-1$) измерить относительные уменьшения $M_{B\Sigma 1}$ и $M_{B\Sigma 2}$ коэффициента усиления на частоте $f = 20 \text{ МГц}$ ($f^* = 20 \text{ кГц}$) при двух значениях нагрузки g_{H1} : при $g_{H1} = 1/R6 + 1/R17$ ($S4-1$, $S6-2$, $S7-3$) и $g_{H2} = 1/R13$ ($S4-5$, $S6-2$, $S7-1$), где $M_{B\Sigma 1}$ и $M_{B\Sigma 2}$ – значения $M_{B\Sigma}$, отвечающие g_{H1} и g_{H2} соответственно. Измерения проводить при $U_{BX} = 10 \text{ мВ}$ (Требуемое значение $U_{BX} = 10 \text{ мВ}$ установить при положении 1 переключателя $S7$). На основании измеренных $M_{B\Sigma 1}$ и $M_{B\Sigma 2}$ вычислить значения искомых параметров τ и C_Σ с помощью системы уравнений, вытекающей из формул (2.4), (2.5) и (2.6):

$$M_{B\Sigma 1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C_\Sigma / g'_{H1})^2}},$$

$$M_{B\Sigma 2} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C_\Sigma / g'_{H2})^2}}.$$

5. Исследовать ход АЧХ и НАЧХ в области верхних частот $f^* \geq 1\text{МГц}$ ($f^* \geq 1\text{кГц}$) при различных вариантах включения в нём транзистора (ОЭ, ОБ, ОК). Для этого в схемах рис.2.6 измерить частотную зависимость уровня выходного сигнала $U_{ВЫХ}(f)$ при неизменном входном $U_{ВХ}=10\text{мВ}$. Для схемы ОК исследования проводить при двух значениях ёмкости, шунтирующей нагрузку: при $C_{\Sigma}=150\text{пФ}$ (S5-8) и $C_{\Sigma}=2150\text{пФ}$ (S5-7).

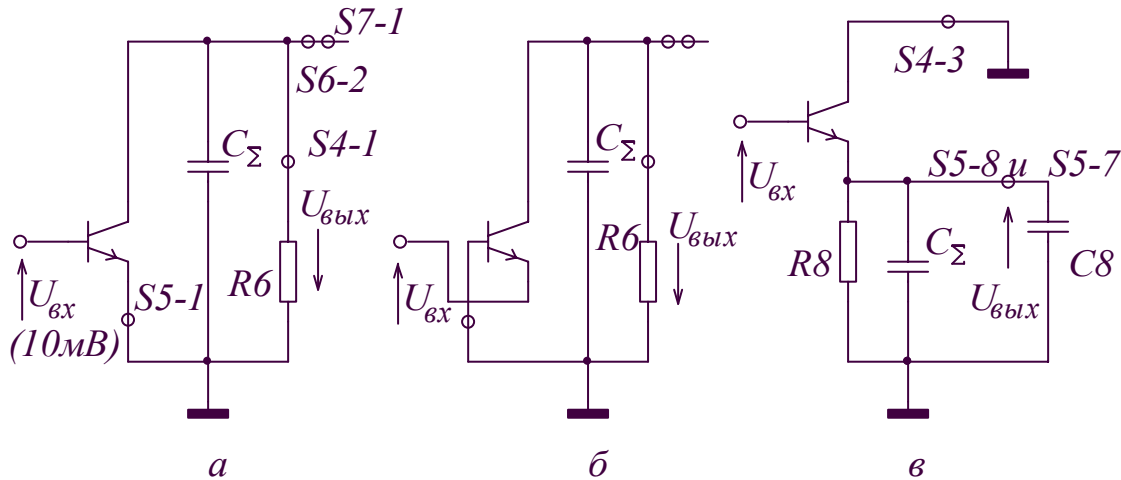


Рис.2.6

Результаты исследований представить в виде графиков $M_{B\Sigma}(f) = U_{ВЫХ}(f) / U_{ВЫХ0}$, где $U_{ВЫХ0}$ – значение напряжения $U_{ВЫХ}(f)$ при $f=1\text{кГц}$. Для схемы ОЭ сопоставить ход графика зависимости $M_{B\Sigma}(f)$ с теоретическим, определяемым соотношением (2.6).

6. Исследовать корректирующее действие схем высокочастотной коррекции. Для этого в схемах рис.2.7 макета провести исследования, аналогичные исследованиям предыдущего пункта.

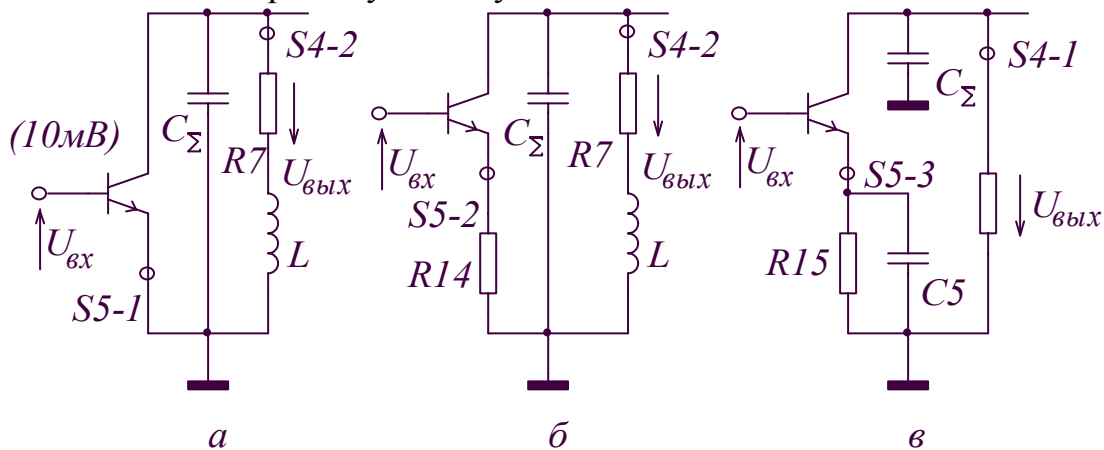


Рис.2.7

7. Исследовать частотные искажения в области ВЧ, возникающие во входной цепи. Для этого в схеме рис.2.8 измерить частотную зависимость уровня входного сигнала $U_{ВХ}(f)$. Исследования проводить при неизменном значении сигнала $E_C=10\text{мВ}$.

Результаты исследований представить в виде графиков зависимостей $K_{BX}(f)=U_{BX}(f)/E_c$ и $M_{BX}(f)=U_{BX}(f)/U_{BX0}$, где U_{BX0} – значение напряжения $U_{BX}(f)$ на частоте 1кГц. Сопоставить результаты экспериментальных исследований с теоретическими, определяемыми формулой (2.7).

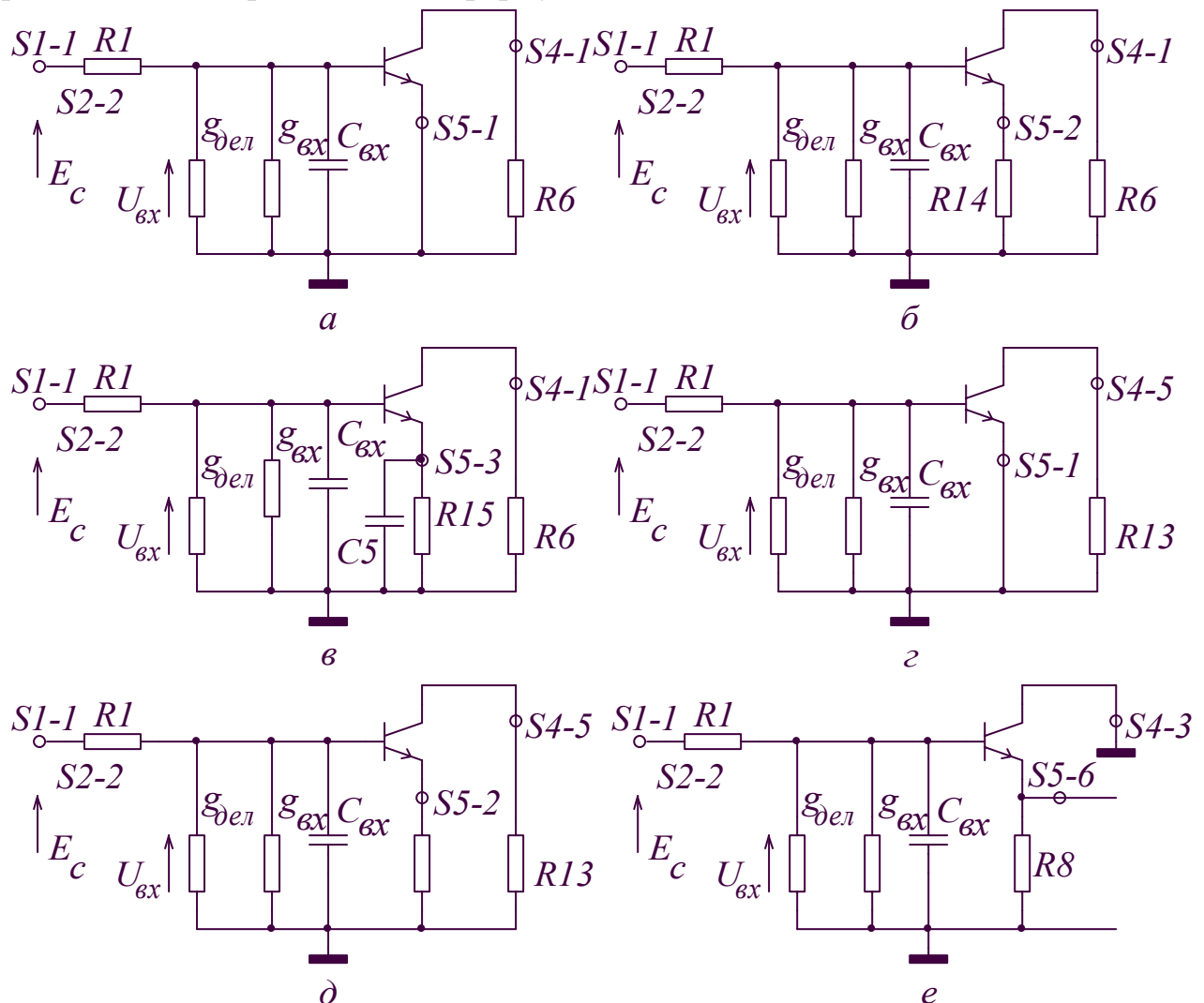


Рис.2.8

8. По графикам $M(f)$, полученным в ходе выполнения предыдущих пунктов, определить и сопоставить между собой значения граничных частот $f_{H0,7}$ и $f_{B0,7}$ при различных вариантах построения каскада. На основании сопоставления сделать выводы о влиянии на ход НАЧХ структуры усилительного каскада.

9. Исследовать искажения (см. рис.2.5) импульсного сигнала и их связь с граничными частотами $f_{H0,7}$ и $f_{B0,7}$, для этого в схеме (см.рис.2.2,а) измерить величину спада Δ вершины выходного импульса при заданной его длительности t_H . В схемах (см. рис.2.7) определить длительность t_ϕ фронта. Сопоставить полученные значения Δ и t_ϕ со значениями, определяемыми соотношением (2.8).

2.3. Содержание отчёта.

Отчёт должен содержать:

- таблицы с результатами измерений;
- упрощённые эквивалентные схемы всех исследованных вариантов построения каскадов;
- графики зависимостей $M_p(f)$, $M_f(f)$ и $M_{H\Sigma}(f)$, измеренных в п.2, а также вычисленных с помощью соотношений (2.1)-(2.3);
- графики зависимости $M_f(f)$, измеренной в ходе выполнения пп.2 и 3;
- вычисление параметров τ и C_Σ по результатам измерений в п.4;
- графики зависимостей $M_{B\Sigma}(f)$, полученных на основании проведённых в пп.5 и 6 измерений, а также рассчитанных по формуле (2.6);
- графики зависимостей $K_{BX}(f)$ и $M_{BX}(f)$ по п.7;
- таблицы по п.8 со значениями $f_{H0,7}$ и $f_{B0,7}$;
- анализ связи $f_{H0,7}$ и $f_{B0,7}$ с Δ и t_Φ ;
- анализ результатов исследования и выводы.

2.4. Контрольные вопросы.

1. Какие факторы обуславливают ухудшение усилительных свойств в области НЧ?
2. В области каких частот схема ОЭ ($S5-1$) становится схемой ОЭ_f и как это отражается на ходе АЧХ?
3. С помощью каких элементов и каким образом корректируют ход АЧХ в области НЧ?
4. Какие факторы обуславливают ухудшение усилительных свойств каскада в области ВЧ?
5. Частотные свойства какого элемента схемы характеризует параметр τ ? В чём состоит различие параметров τ и τ_f ?
6. Почему конденсатор C_Σ не изображён на схеме макета?
7. Почему при одних и тех же значениях ёмкости C_Σ и параметра τ частотные свойства каскада ОК в области ВЧ оказываются существенно лучше свойств каскадов ОЭ и ОБ?
8. Каково назначение индуктивности L и в области каких частот проявляется её наличие в схеме каскада? В чём состоит и чем объясняется различие хода АЧХ и НАЧХ в области ВЧ в схемах (см. рис.2.6,а и 2.7,а)?
9. Каковы функции цепочки $R15C5$? В чём состоит и чем объясняется различие хода АЧХ и НАЧХ в области ВЧ в схемах (см. рис.2.7,а,б,в)?
10. На каких частотах схема с корректирующей цепочкой $R_{кор}C_{кор}$ является схемой ОЭ, а на каких – ОЭ_f?
11. Чем обусловлены частотные искажения в области ВЧ во входной цепи усилителя? В чём состоит и чем объясняется различие хода АЧХ и НАЧХ в области ВЧ в схемах (см. рис.2.8)?
12. В каком случае использование корректирующей цепочки $R_{кор}C_{кор}$ может не привести к улучшению частотных свойств в области ВЧ?

13. Какой характер имеют и чем определяются искажения переходной характеристики усилителя?
14. Какой приём используется в лабораторном макете для моделирования хода частотной характеристики в области ВЧ? Что означает соотношение $f=10^3 f^*$?