

13. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В КАСКАДЕ

Цель работы. Изучение искажений сигнала, возникающих из-за нелинейности вольт-амперных характеристик транзистора; исследование стабилизирующего влияния отрицательной обратной связи (ООС) на характеристики и свойства каскада.

3.1. Общие сведения.

При больших уровнях сигналов в усилительных схемах, возникают искажения, называемые нелинейными. Интенсивность сигнала в транзисторном каскаде обычно оценивают величинами $\alpha_I = \Delta I_K / I_K$; $\alpha_u = \Delta U_{KЭ} / U_{KЭ}$, где ΔI_K , $\Delta U_{KЭ}$ – предельные сигнальные отклонения тока и напряжения от их средних значений I_K и $U_{KЭ}$. Параметры α_I и α_u называются коэффициентами использования транзистора по току и напряжению. При синусоидальном сигнале

$$\alpha_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}} \sqrt{2}}{I_K} ; \alpha_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}} \sqrt{2}}{U_{KЭ}} , \quad (3.1)$$

где $I_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ – эффективные значения сигнального тока и напряжения. Считается, что сигнал имеет большой уровень, если коэффициенты α_I и α_u приближаются к единице или превосходят её.

В отличие от частотных, величина и характер нелинейных искажений зависят от уровня сигнала, а их появление сопровождается возникновением дополнительных составляющих в спектре сигнала. Обычно с нелинейными искажениями приходится считаться, если α_I (α_u) $\geq 0,1$. Количественно нелинейные искажения оценивают коэффициентом гармоник K_Γ , который измеряется при синусоидальном сигнале в соответствии с соотношением

$$K_\Gamma = \sqrt{\frac{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + U_{m4}^2 + \dots}{U_{m1}^2}} ,$$

где U_{mi} – амплитуда i -ой гармоники сигнала на выходе усилителя.

В схеме ОЭ (рис. 3.1) при преобразовании входного сигнала $E_C(t)$ в выходной $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ существенную роль в возникновении нелинейных искажений может играть нелинейность характеристик двух участков цепи – это, во-первых, нелинейность вольт-амперной характеристики входной проводимости $g_{\text{ВХ}}$ каскада и, во-вторых, нелинейность передаточной характеристики транзистора – зависимости выходного тока I_K от входного тока I_B ($I_{\text{ВХ}}$) или от напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ ($U_{\text{ВХ}}$). Характеристика $I_K = f(I_B)$ имеет меньшую нелинейность, чем характеристика $I_K = f(U_{БЭ})$, поэтому часто биполярный транзистор относят к усилительным приборам, управляемым током базы. Величина нелинейных искажений зависит от сопротивления R_C источника сигнала. При $R_C \gg 1/g_{\text{ВХ}}$ форма сигнального тока $I_B(t)$ практически не зависит от $g_{\text{ВХ}}$, вследствие этого дополнительные искажения в каскаде из-за нелинейных свойств входной проводимости не возникают, а величина коэффициента гармоник определяется только нелинейностью зависимости $I_K = f(I_B)$. При $R_C < 1/g_{\text{ВХ}}$ основ-

ным элементом, определяющим характер изменений тока базы при данном $E_C(t)$, является нелинейная проводимость g_{BX} . Поэтому $I_B(t)$ представляет изменения сигнальной ЭДС $E_C(t)$ в искаженном виде, а величина K_T имеет повышенную величину. Следует отметить, что при больших R_C форма сигнала $U_{BX}(t)$ по сравнению с $E_C(t)$ оказывается искаженной в большей степени, но, в то же время, большим R_C отвечает меньший K_T .

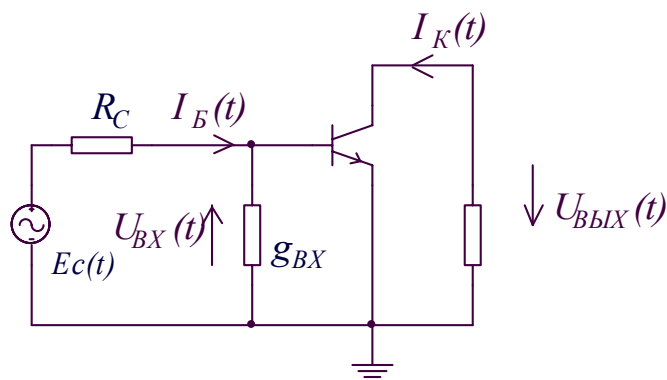


Рис.3.1.

При больших уровнях сигнала положение исходной рабочей точки должно быть согласовано с его полярностью и формой. Так, например, при синусоидальном сигнале наименьшие искажения имеют место в тех случаях, когда исходная рабочая точка находится в середине линейного участка передаточной характеристики каскада.

Снижение нелинейных искажений может быть достигнуто также за счёт отрицательной обратной связи, уменьшающей K_T в F раз, где F – глубина обратной связи. При организации ООС в каскаде следует иметь в виду, что она должна иметь отрицательный характер не только на частоте сигнала, но и на всех его основных гармониках, возникших в результате нелинейных преобразований сигнала в каскаде.

Эффективность мероприятий по снижению K_T с помощью ОС в высокочастотном участке диапазона снижается. Обусловлено это тем, что на ВЧ начинает сказываться влияние реактивностей, обуславливающее появление в петле обратной связи дополнительных фазовых сдвигов, приводящих к изменению характера и глубины обратной связи, а также к снижению напряжения обратной связи. Данные изменения в характере и глубине обратной связи могут возникнуть как из-за плохих частотных свойств транзистора, так и из-за частотно-зависимого характера сопротивлений элементов, входящих в петлю обратной связи, например, из-за наличия в схеме ОЭ эмиттерной коррекции (S5-3). По указанным причинам, каскад с эмиттерной коррекцией имеет повышенные значения K_T в высокочастотном участке диапазона.

Отрицательная обратная связь уменьшает чувствительность параметров усилителя к влиянию дестабилизирующих факторов, при этом

$$S_{B_f}^A = \frac{S_B^A}{F}; \quad S_B^A = \left| \frac{\Delta A}{A} \right| / \left| \frac{\Delta B}{B} \right|, \quad (3.2)$$

где S_B^A , $S_{B_f}^A$ – чувствительность параметра A к изменениям ΔB дестабилизирующего фактора B при отсутствии и наличии отрицательной обратной связи соответственно; ΔA – изменение параметра A , возникающее в ответ на изменение дестабилизирующего фактора B на величину ΔB .

В качестве дестабилизирующего фактора может служить, например, изменение ΔI_K коллекторного тока I_K , а в качестве параметра усилителя – его коэффициент усиления K . В этом случае соотношение (3.2) имеет вид

$$S_{I_K}^K = \left| \frac{\Delta K}{K} \right| / \left| \frac{\Delta I_K}{I_K} \right|, \quad (3.3)$$

где $S_{I_K}^K$ – чувствительность коэффициента усиления к изменениям коллекторного тока.

При большой глубине F в схемах с ООС возможно возникновение искажений, называемых динамическими. Эти искажения появляются при больших уровнях быстро изменяющихся сигналов. При таких сигналах существенные изменения в сигнальном напряжении происходят за время, меньшее, чем длительность распространения сигнала по петле обратной связи. Изложенное проиллюстрируем на примере каскада ОК, работающего на нагрузку с большой ёмкостной составляющей C_H (рис.3.2).

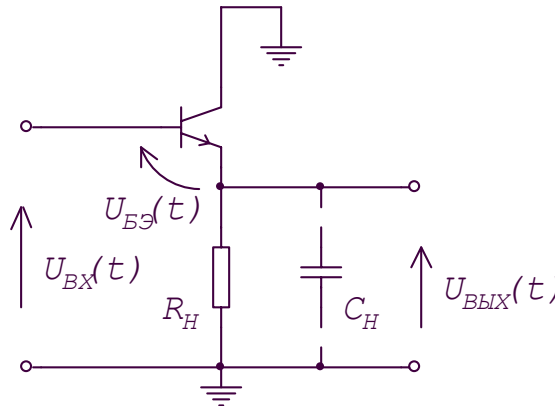


Рис.3.2

Схему ОК можно рассматривать как схему ОЭ_f, в которой в качестве напряжения U_f обратной связи выступает выходное напряжение $U_{ВЫХ}$, при этом

$$U_{БЭ}(t) = U_{ВХ}(t) - U_{ВЫХ}(t) = U_{ВХ}(t)[1 - K(t)], \quad (3.4)$$

где $U_{БЭ}(t)$ – текущая разность потенциалов на участке база-эмиттер; $K(t) = U_{ВЫХ}(t)/U_{ВХ}(t)$ – текущее значение коэффициента передачи в каскаде ОК. При медленных изменениях сигнала $U_{ВХ}(t)$ $K(t) = K_0 \approx 1$, в результате чего $U_{БЭ}$ мало, и заметных искажений в каскаде не возникает даже при относительно большом уровне входного сигнала. При больших скоростях изменения напряжения $U_{ВХ}(t)$ выходной сигнал $U_{ВЫХ}(t)$ из-за инерционных свойств транзистора и процесса перезаряда конденсатора C_H запаздывает относительно $U_{ВХ}(t)$. В результате этого наблюдается заметное возрастание напряжения $U_{БЭ}$, приводящее к нарушению линейного режима работы транзистора и возникновению

нелинейных искажений. Величина и характер динамических искажений в каскаде ОК зависят от направления изменения сигнала. Искажения особенно велики при изменениях $U_{БЭ}(t)$, направленных на уменьшение тока в транзисторе, когда большие уровни напряжения $U_{БЭ}$ приводят к закрыванию транзистора.

На рис.3.3 изображены временные диаграммы сигнальных потенциалов, отвечающих случаю воздействия на каскад большого импульсного сигнала длительностью t_H . Диаграмма на рис.3.3,а соответствует импульсному сигналу положительной полярности, а на рис.3.3,б – отрицательной. На участках $t_{\phi+}$ и $t_{\phi-}$ наблюдается существенное возрастание абсолютных величин напряжения $U_{БЭ}$. При этом на интервалах $t_{\phi+}$ напряжение $U_{БЭ}$ имеет такую полярность, что транзистор открыт, в результате чего процесс перезаряда ёмкости C_H до установившихся значений $U_{БЛХ0}$ происходит быстро с малой постоянной времени $\tau_+ = C_H R_H / (1 + S_{Э} R_H)$. На участках $t_{\phi-}$ изменение напряжения $U_{БЭ}$ вызывает закрывание транзистора, в результате чего он теряет свои передаточные свойства ($S_{Э} = 0$) и перезаряд ёмкости C_H происходит с большой постоянной времени $\tau_- = C_H R_H$.

Динамические искажения могут возникать не только при импульсных сигналах, но и при других имеющих большую скорость изменения, в том числе синусоидальных сигналах повышенной частоты и амплитуды (рис.3.4).

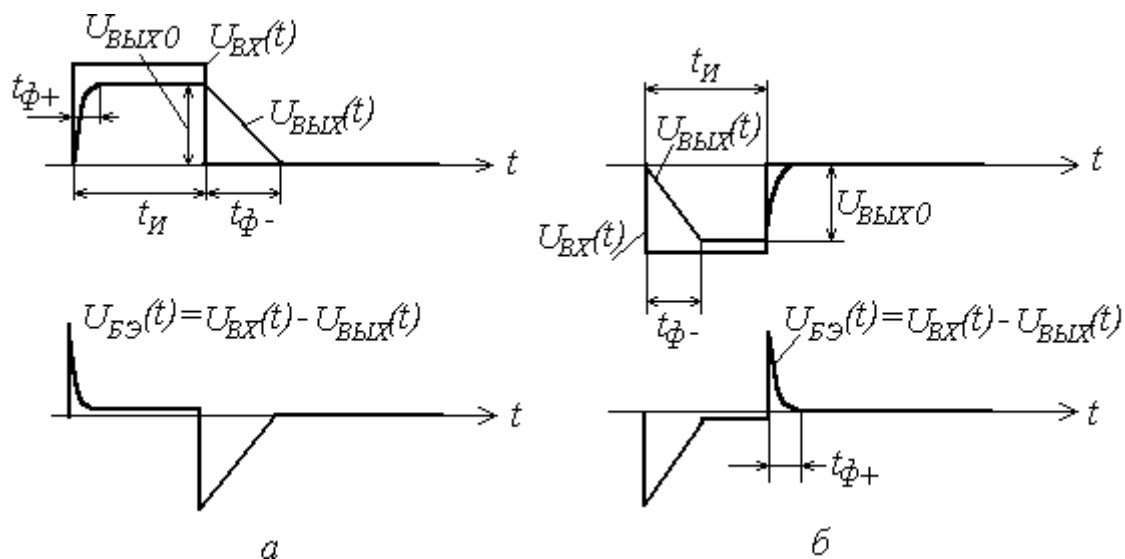


Рис.3.3

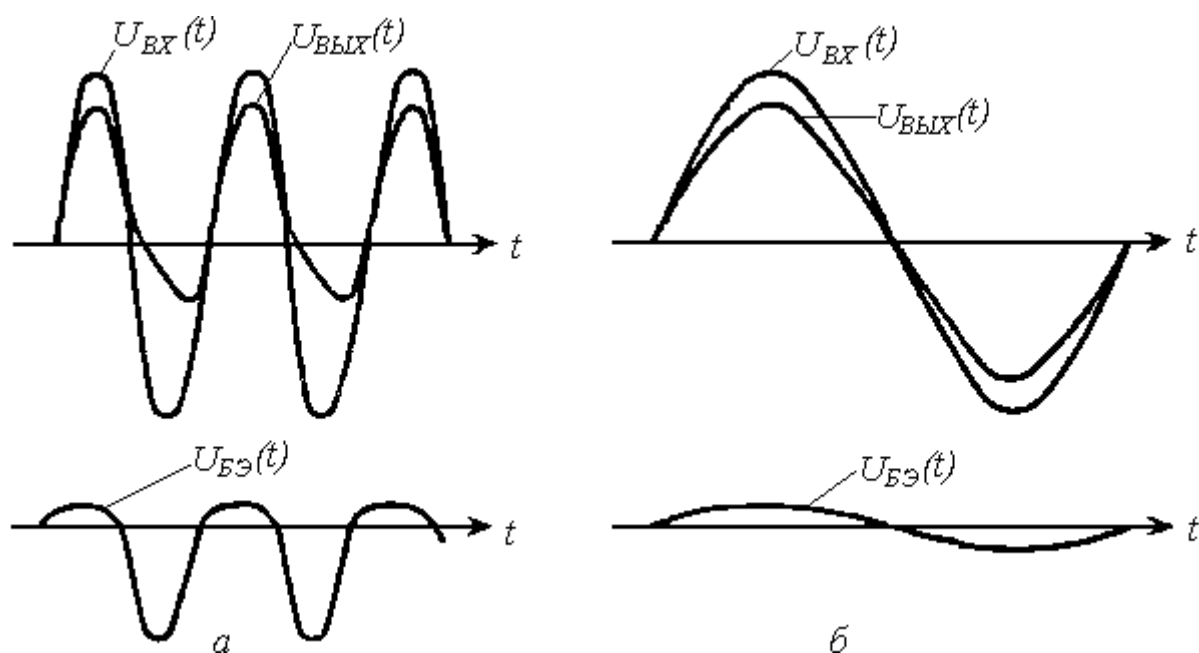


Рис.3.4

3.2. Порядок выполнения работы.

Основные исследования в работе проводятся при повышенных уровнях входного сигнала, вследствие чего при ее выполнении помимо положений 1 и 4 переключателя $S1$ также используются положения 2 и 5.

Измерение коэффициентов нелинейных искажений K_{Γ} следует осуществлять в приведенной ниже последовательности.

С помощью органов управления звуковым генератором установить требуемую частоту f и уровень сигнала. В блоке фильтров включить фильтр на частоту f .

Измеритель нелинейных искажений (ИНИ) С6-4/1 переключить в режим “калибровка” и с помощью ручки “калибровка” установить стрелку прибора на крайнюю (треугольную) риску. Положение переключателя диапазонов чувствительности прибора при этом может быть произвольным. При каждом изменении уровня исследуемого сигнала операцию калибровки следует производить заново.

Переключить ИНИ в режим измерения K_{Γ} . Переключением диапазонов чувствительности добиться положения стрелки прибора, удобного для снятия отсчета. В соответствии с ним и положением переключателя диапазонов отсчитать величину K_{Γ} в процентах.

3.2.1. С помощью переключателя $S3$ установить в схеме ОЭ ($S5-1$) значение постоянного эмиттерного тока $I_{Эopt}$, обеспечивающее наибольший уровень выходного синусоидального сигнала $U_{BBLX}(t)$ в условиях отсутствия его ограничения и отсечки. Измерить значение $I_{Эopt}$ в соответствии с соотношением $I_{Эopt} = U_{R8}/R8$, где U_{R8} – падение напряжения на резисторе $R8$ (см. схему макета).

Исследования производить на частоте сигнала $f = 400$ Гц. Рекомендуемые положения переключателей: $S1-2$, $S2-1$, $S4-5$, $S5-1$, $S7-1$.

3.2.2. Исследовать зависимость нелинейных искажений сигнала от его уровня и положения исходной рабочей точки. Для этого в схеме ОЭ при $f=400$ Гц измерить величины коэффициентов гармоник K_G , отвечающие ряду значений $U_{ВЫХ}$. Измерения производить при трёх смежных положениях переключателя $S3$, соответствующих $I_{\mathcal{E}}=I_{\mathcal{E}opt}$, $I_{\mathcal{E}}<I_{\mathcal{E}opt}$, $I_{\mathcal{E}}>I_{\mathcal{E}opt}$. При всех трёх положениях переключателя $S3$ определить при $U_{ВХ}=0$ величину постоянной разности потенциалов $U_{K\mathcal{E}}=U_K - U_{\mathcal{E}}$. Измерение потенциалов U_K и $U_{\mathcal{E}}$ производить на постоянном токе.

На основании полученных данных построить графики зависимостей $K_G=f(\alpha_u)$, где $\alpha_u=U_{ВЫХ}\sqrt{2}/U_{K\mathcal{E}}$.

3.2.3. Исследовать влияние отрицательной обратной связи на нелинейные искажения. Для этого при наличии обратной связи ($S5-2$) и $I_{\mathcal{E}}=I_{\mathcal{E}opt}$ измерить величины коэффициента гармоник K_G , отвечающие ряду значений $U_{ВЫХ}$. Определить также глубину F обратной связи по относительному уменьшению выходного сигнала, возникающего при переключении $S5$ из положения 1 в положение 2.

На основании полученных данных и результатов п.3.2.2 построить графики зависимостей $K_G=f(\alpha_u)$, отвечающих $I_{\mathcal{E}opt}$ и двум положениям переключателя $S5$ ($S5-1,2$).

3.2.4. Исследовать влияние внутреннего сопротивления R_C источника сигнала на нелинейные искажения. Для этого при $R_C=240$ Ом ($S2-2$) измерить величины K_G , отвечающие ряду значений $U_{ВЫХ}$. Измерение проводить при отсутствии обратной связи ($S5-1$) и $I_{\mathcal{E}}=I_{\mathcal{E}opt}$.

На основании полученных данных и результатов п.3.2.2 построить графики зависимостей $K_G=f(\alpha_u)$, соответствующих $R_C=0$ и $R_C=240$ Ом.

3.2.5. Исследовать зависимость модуля $|F|$ глубины обратной связи от частоты в схеме ОЭ_f. Для этого измерить на ряде частот относительные изменения коэффициента усиления, возникающие при введении в каскад ОЭ обратной связи (при переключении $S5$ из положения 1 в положения 2 и 3). Исследования проводить при $U_{ВХ}=10$ мВ ($S6-1$, $S7-1$) и $f \leq 20$ кГц. По результатам измерений построить графики частотной зависимости величины $|F|$ для случаев простой ($S5-2$) и частотно-зависимой ($S5-3$) цепи обратной связи.

3.2.6. Исследовать влияние частотно-зависимого характера обратной связи на нелинейные искажения. Для этого при $f=2000$ Гц и двух положениях переключателя $S5$ ($S5-2,3$) измерить величины K_G , отвечающие ряду значений $U_{ВЫХ}$. На основании результатов измерения построить графики зависимостей $K_G=f(\alpha_u)$ при наличии ($S5-3$) и отсутствии ($S5-2$) частотно-зависимого характера обратной связи.

3.2.7. Сравнить исследованные в пп. 3.2.2-3.2.4 и 3.2.6 варианты построения каскадов по номинальной выходной мощности $P_{ном}$, считая предельно допустимой величиной $K_G=5\%$. Для этого с помощью графиков $K_G=f(\alpha_u)$ определить значения $\alpha_u = \alpha_{uНОМ}$, отвечающие $K_G=5\%$. Вычисление

$P_{НОМ}$ производить по формуле $P_{НОМ} = \alpha_{uНОМ}^2 U_{КЭ}^2 / R13$, где $R13 = 900$ Ом. Данные о величинах $U_{КЭ}$ содержатся в результатах исследований по п.3.2.2.

3.2.8. Исследовать влияние отрицательной обратной связи на ход амплитудной характеристики $U_{БЫХ} = f(U_{БХ})$ каскада. Для этого измерить величины $U_{БЫХ}$, отвечающие ряду значений $U_{БХ}$ в случаях отсутствия (S5-1) и наличия (S5-2) обратной связи. Исследования проводить при $f = 400$ Гц, $I_{Э} = I_{Эopt}$, и $U_{БЫХ} \leq 1,5$ В.

Результаты измерений представить в виде графиков $U_{БЫХ} = f(U_{БХ})$.

3.2.9. Исследовать стабилизирующее влияние отрицательной обратной связи на коэффициент усиления. Для этого при отсутствии (S5-1) и наличии (S5-2) обратной связи измерить относительные уменьшения $\Delta K/K$ и $\Delta K_f/K_f$ коэффициентов усиления K и K_f , вызванные изменением эмиттерного тока со значения $I_{Эopt}$ на ближайшее меньшее $I_{Э} < I_{Эopt}$. Определить величины токов $I_{Э}$ эмиттера по падению постоянного напряжения на $R8$, считая, что $I_{Э} = U_{R8} / R8$ ($R8 = 510$ Ом).

По результатам измерений вычислить по формуле (3.3) значение параметра S_{Ik}^K при отсутствии обратной связи и при её наличии. Сопоставить относительные различия полученных результатов с измеренным в пп.3.2.3 и 3.2.5 значением глубины обратной связи.

По результатам проведённых в п.3.2.8 измерений вычислить значения коэффициентов усиления $K = U_{БЫХ} / U_{БХ}$, отвечающие различным значениям $U_{БЫХ}$. Результаты вычислений представить в виде графика $K = f(U_{БЫХ})$ и с его помощью определить наибольшие относительные изменения коэффициента усиления при наличии ($\Delta K_f / K_f$) и отсутствии ($\Delta K / K$) обратной связи, где $\Delta K / K = (K_{max} - K_{min}) / \sqrt{K_{max} K_{min}}$; K_{max}, K_{min} – наибольшее и наименьшее значения коэффициента усиления на интервале изменения $U_{БЫХ}$ от 0 до 1,5 В соответственно. Сопоставить величину отношения $(\Delta K / K) / (\Delta K_f / K_f)$ с определенной в пп.3.2.3 и 3.2.5 глубиной обратной связи F .

3.2.10. Исследовать ход амплитудной характеристики $U_{БЫХ} = f(U_{БХ})$ каскада ОК (S4-3, S2-1, S1-2, S5-8, S7-1), а также зависимость $K_{Г}$ от величины коэффициента использования транзистора по напряжению $\alpha_u = U_{БЫХ} \sqrt{2} / U_{КЭ}$. При вычислении α_u использовать данные об $U_{КЭ}$, полученные при выполнении измерений по п.3.2.2.

Сопоставить ход зависимостей $U_{БЫХ} = f(U_{БХ})$ и $K_{Г} = f(\alpha_u)$ с аналогичными для каскада ОЭ. Для этого представить графики указанных зависимостей совместно с аналогичными по пп.3.2.8 и 3.2.2.

3.2.11. Исследовать влияние запаздывающего характера обратной связи на ход амплитудной характеристики и нелинейные искажения $K_{Г}$. Для этого провести исследования аналогичные исследованиям п.3.2.10 при наличии в нагрузке каскада конденсатора большой ёмкости (S5-7).

3.2.12. Исследовать динамические искажения сигнала и зависимость их уровня и характера от интенсивности сигнала, его вида и полярности. Для этого пронаблюдать изменения формы выходного сигнала, вызываемые введением в нагрузку каскада ОК конденсатора большой ёмкости. В процессе выполнения исследований рекомендуется зафиксировать осциллограммы выход-

ного сигнала ($S6-3$) отвечающие двум положениям переключателя $S5$ ($S5-8,7$) при следующих условиях:

а) входной сигнал – синусоидальный, частотой 200 Гц и 2000 Гц, $U_{ВЫХ}=0,1В$ и $1,0В$;

б) входной сигнал – импульсы отрицательной и положительной полярностей, $U_{ВЫХ}=0,1В$ и $1,0В$.

Полярность импульсного входного сигнала в макете можно изменять с помощью переключателя $S8$, а его уровень – $S9$.

Сопоставить ход осциллограмм исследуемых сигналов с теоретическим, определяемым из рис.3.3 и 3.4.

3.3. Содержание отчёта.

Отчёт о работе должен содержать:

- таблицы с результатами экспериментальных исследований;
- графики зависимостей по пп. 3.2.2-3.2.6, 3.2.8, 3.2.10 и 3.2.11;
- результаты сравнительного анализа схем каскадов по значениям $P_{НОМ}$, полученным в ходе выполнения п.3.2.7;
- осциллограммы напряжений по п.3.2.12;
- анализ результатов исследований и выводы.

3.4. Контрольные вопросы.

1. Какие параметры используют при оценке интенсивности сигналов, действующих в каскаде?
2. Что такое коэффициент гармоник K_G , сигнал какой формы используется для измерения его значений и почему?
3. Какое положение исходной рабочей точки рекомендуется использовать с точки зрения обеспечения малых искажений при усилении синусоидального и импульсного сигналов большой интенсивности?
4. Почему эффективность действия отрицательной обратной связи на K_G уменьшается в ВЧ-области АЧХ?
5. Как влияет частотно-зависимый характер ООС на степень её воздействия на K_G на различных частотах? Ответ проиллюстрируйте результатами исследований по пп.3.2.5 и 3.2.6.
6. Что такое амплитудно-частотная и амплитудная характеристики каскада? В чём состоит влияние ООС на ход амплитудной характеристики каскада? Ответ проиллюстрируйте результатами исследований по п.3.2.7.
7. Как влияет сопротивление источника сигнала на величину K_G в каскаде ОЭ? Ответ проиллюстрируйте результатами исследований по пп.3.2.4 и 3.2.6.
8. Почему при данном уровне $U_{ВЫХ}$ и C_Σ каскад ОК обеспечивает меньшие искажения, чем каскад ОЭ?

9. Какова сущность параметра S_{jk}^K ? Объясните методологию его использования при проведении исследований по п.3.2.9.
10. Что такое динамические нелинейные искажения и каков механизм их возникновения в каскаде ОК?
11. Объясните ход осциллограмм измеренных в п.3.2.11.
12. Почему модуль $|F|$ глубины обратной связи в области ВЧ ($f \geq 1\text{ МГц}$) зависит от частоты даже при частотно- независимом характере цепи обратной связи (при S5-2)?