

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

Кафедра схемотехники
электронных устройств

Методические указания
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
по курсу
“Схемотехника аналоговых электронных устройств”
210400

Санкт-Петербург

2012г

УДК 621.

Методические указания к лабораторным работам по курсу
“Схемотехника аналоговых электронных устройств”

Составители: проф. А.Г. Алексеев, доц. П.В. Климова

План УМД 2012 г.

Одобрено редакционно-издательским советом университета. Протокол
от __.__.12.

В методических указаниях излагаются вопросы общих методов измерения различных характеристик и параметров аналоговых устройств, выполненных на дискретных элементах и на интегральных микросхемах. Методические указания предназначены для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 210400 при выполнении ими лабораторных работ по курсу “Схемотехника аналоговых электронных устройств”.

Ответственный редактор: доц. П.В. Климова

Рецензент:

СОДЕРЖАНИЕ:

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ХАРАКТЕРИСТИК

УСИЛИТЕЛЯ.....	4
1.1. Порядок проведения занятий в лаборатории.....	4
1.2. Краткое описание лабораторного оборудования.....	4
1.3. Порядок подготовки к работе и включение стойки.....	5
1.4 Общие сведения о методике проведения эксперимента и измерений.....	8

2. ОПИСАНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ «СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ»

.....	14
РАБОТА 1. Измерение основных параметров исследуемого устройства	14
РАБОТА 2. Исследование резисторного каскада на биполярном Транзисторе.....	18
РАБОТА 3. Исследование резисторного каскада на полевом транзисторе	20
РАБОТА 4. Исследование транзисторного бестрансформаторного усилителя мощности с обратной связью	24
РАБОТА 5. Исследование схем с ОУ на ИС.....	28
ЛИТЕРАТУРА.....	32

I. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ

1.1.Порядок проведения занятий в лаборатории.

1.1.1.Подготовка к работе

Подготовка к выполнению работы включает:

1. Ознакомление с описанием лабораторного оборудования и методическими указаниями к лабораторной работе, а также с бланками отчета.
2. Изучение рекомендованной литературы.
3. Выполнение расчетов по заданию преподавателя.
4. Перед выполнением первой работы студент должен ознакомиться с инструкцией по технике безопасности (приложение) и расписаться в журнале регистрации инструктажа.

1.1.2.Порядок проведения занятий в лаборатории

1. Лабораторные работы выполняются фронтально всей группой в часы, предусмотренные расписанием, бригадами не более трех человек.
2. Каждый студент перед началом лабораторной работы представляет предусмотренные бланком отчета расчеты к данной лабораторной работе.
3. Каждый студент должен знать правила техники безопасности, которые проверяются перед первым занятием.
4. После окончания работы студентом выключается стойка и приборы, рабочее место приводится в порядок, а результаты эксперимента представляются для визирования преподавателю

1.1.3. Оформление отчета

По каждой лабораторной работе составляется отчет, в который включаются результаты предварительных расчетов и экспериментальных исследований в виде таблиц, графиков, осциллограмм, а также проводятся объяснения полученных результатов, как указано в специальном бланке, соответствующем данной лабораторной работе.

1.2 Краткое описание лабораторного оборудования

Учебно-лабораторное оборудование содержит: настольный стенд со сменными панелями для исследования схем; блок источников питания; контрольные измерительные приборы и органы общего управления (рис.1.1).

Блок источников питания расположен в задней части стенда на отдельном выдвижном шасси с доступом через заднюю крышку стенда; содержит трансформатор, выпрямители, сглаживающие фильтры, стабилизатор напряжения $\pm 15 \text{ В}/0,5 \text{ А}$ и стабилизатор напряжения $-15\text{В}/2$

А; подключается к общей схеме соединений лабораторного стенда и к схеме исследуемого усилителя с помощью двух выходных разъемов, расположенных на передней боковой стенке шасси.

Блоки выпрямителей, фильтров и стабилизаторов выполнены на отдельных печатных платах, вставляемых вертикально по направляющим в разъемы, установленные на общем шасси. Монтаж межблочных соединений между разъемами расположен под шасси.



Рис. 1.1. Структурная схема лабораторного оборудования

На задней стенке шасси расположены клеммы корпуса, держатель предохранителя сети на 2А и разъем для подключения сетевого шнура.

Панель содержит измерительные приборы для контроля напряжении источников питания, напряжений в различных точках исследуемых схем и рабочих токов, а также для контроля установки нуля в исследуемых интегральных схемах, выключатель «СЕТЬ», обеспечивающий подачу напряжения сети 220 В на лабораторный стенд, и индикаторную лампочку.

Панель управления содержит разъемы "ВХОД 1" и "ВЫХОД" для подключения к лабораторному стенду соответственно генератора стандартных сигналов и двухканального осциллографа; входные "ВХОД 2" и выходные "ВЫХОД", спаренные разъемы и клеммы для подключения соответственно ко входу и выходу исследуемого усилителя милливольтметров, измеряющих синусоидальное напряжение переменного тока, и других дополнительных измерительных приборов; клеммы корпусные "⊥" для подключения заземляющего штекера соединительных кабелей и измерительных приборов. Органы общего управления и регулирования снабжены соответствующими надписями.








Панель исследования сменная. Она располагается в центре панели управления лабораторного стенда, содержит исследуемый усилитель и органы коммутации его схемы соответственно методике проведения лабораторной работы. На лицевой панели содержится рисунок принципиальной или структурной схемы соответствующего усилителя.

1.3. Порядок подготовки к работе и включение стойки

1.3.1. Перед началом работы на генераторе ГЗ-112 установить регулировки выходного напряжения в положение слабого уровня. С этой целью аттенюатор дискретного ослабления выходного уровня "ОСЛАБЛЕНИЕ, дБ" должен находиться в положении "30-70", а ручка плавной регулировки выходного напряжения "↔" - в крайнем левом положении. На милливольтметрах ВЗ-56 переключатель поддиапазонов

"mV-V" следует установить в положение 30 В; на осциллографе CI-93 органы управления ставятся в исходные положения, указанные в табл.1.1.

Табл.1.1

Органы управления и регулирования	Обозначение	Исходное положение
Кнопка	"СЕТЬ"	На себя
Ручка яркости		Среднее
Ручка четкости		Среднее
Переключатели коэффициентов отклонения	"V/ДЕЛ."	" 0,5 "
Малая ручка рег. усиления		Крайнее правое
Ручка верт. перемещения	" \updownarrow "	Среднее
Переключатели режима работы входов	" \sim , \perp , \approx "	" \sim "
Переключатель каналов	" I , $\rightarrow\rightarrow$, II "	" $\rightarrow\rightarrow$ "
Переключатель полярности	"  ,  "	"  "
Переключатель вида синхронизации	" ВНУТР. , ВНЕШН. "	" ВНУТР. II "
Переключатель режима запуска развертки	" АВТ. , ЖДУЩ. "	" АВТ. "
Переключатель коэффициента развертки	" ВРЕМЯ/ДЕЛ. "	" 1 mS "
Ручка гориз. перемещения	" \leftrightarrow "	Среднее
Множитель времени развертки	$\times 1$ $\times 0.2$	 

Включить "СЕТЬ" на измерительных приборах. Приборы готовы к проведению измерений через 5 мин.

1.3.2. Источником сигнала для исследуемых усилителей является генератор сигналов ГЗ-112, который может быть использован в режиме генерирования сигналов синусоидальной и прямоугольной формы в зависимости от положения тумблера переключения режимов работы генератора « \sim » или « \square ». Необходимая частота выходного сигнала генератора устанавливается переключателем поддиапазонов частот "МНОЖИТЕЛЬ" и ручкой плавной перестройки частоты "ЧАСТОТА Hz ". Выходное напряжение генератора (входное напряжение для исследуемого усилителя) увеличивать постепенно, используя ручки дискретной и

плавной регулировок и контролируя его величину по осциллографу или милливольтметру.

1.3.3. Для измерения напряжения на входе и выходе исследуемого усилителя используются милливольтметры переменного тока ВЗ-56.

Выбор шкалы (пределов измерения) милливольтметра в соответствии с диапазоном измеряемых напряжений осуществляется с помощью переключателя поддиапазонов " mV-V". Рекомендуется для обеспечения точности измерения устанавливать такой предел шкалы при котором стрелка прибора располагается в правой её половине.

1.3.4. Для наблюдения формы входного и выходного сигналов используется двухканальный осциллограф СИ-93.

В одноканальном режиме наблюдается исследуемый сигнал одного из каналов, при этом переключатель работы устанавливается в положение "I" или "II". В двухканальном режиме исследуемый сигнал наблюдается "I" и "II" каналом, при этом переключатель режима работы устанавливается в положение "..." при скоростях развертки ниже 0,5mS, и в положение " $\rightarrow \rightarrow$ " - при скоростях развертки выше 0,5 mS .

В режиме внутренней синхронизации развертки (положение "ВНУТР.I" или "ВНУТР.II) сигнал синхронизации снимается с выхода I или II каналов. При этом режим запуска схемы синхронизации выбирается автоматический (полож."АВТ"), независимый от запускающего сигнала. Выбор полярности запуска схемы синхронизации осуществляется переключателем « \perp , \lceil ». Устойчивости синхронизации можно добиться ручкой "УРОВЕНЬ" и ручкой «СТАБ. ВЧ» на частотах выше 5 МГц. Размер изображения по горизонтали определяется длительностью развертки, которую устанавливают, исходя из частоты подаваемого сигнала (длительность периода которого $T = 1/f$): дискретно переключателем «ВРЕМЯ/ДЕЛ.» устанавливается коэффициент развертки и плавно центральной ручкой "ПЛАВНО" этого же переключателя. Размер изображения по вертикали определяется амплитудой подаваемого сигнала: дискретно переключателем " V /ДЕЛ." устанавливается коэффициент отклонения и плавно центральной ручкой этого же переключателя.

1.3.5. После разрешения преподавателя включить "СЕТЬ" на контрольной панели лабораторного стенда. При этом на исследуемый усилитель подаются необходимые напряжения питания от блока источников питания и на контрольной панели стенда загорается индикаторная лампочка.

1.3.6. Дальнейшая коммутация проводится согласно методике проведения соответствующей лабораторной работы.

1.4. Общие сведения о методике проведения эксперимента и измерений:

1) Перед проведением любой экспериментальной работы необходимо ознакомиться с задачей эксперимента, с последовательностью его проведения.

2) Еще до включения аппаратуры рекомендуется оценить, каковы ожидаемые результаты исследования и установить на приборах требуемые пределы измерения.

3) Перед проведением эксперимента обратить внимание на методику измерения исходных параметров, используемых для построения соответствующих характеристик.

4) При измерении коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений, снятии АЧХ и ПХ уровень входного сигнала U_1 max или E_1 max не должен превышать значения, при котором становятся заметными нелинейные искажения сигнала на выходе [1,2]. Практически рекомендуется выбирать $U_1 \leq 0,3U_1\text{max}$ или $E_1 \leq 0,3E_1\text{max}$.

5) Расчетная часть выполняется по заданию преподавателя.

1.4.1. Измерение коэффициента усиления

На рис 1.2 показана функциональная схема установки для измерения коэффициента усиления усилителя А1, содержащая лабораторный генератор PG1 и два вольтметра PV1 и PV2. Для контроля формы кривой входного и выходного напряжений используется осциллограф PS1.

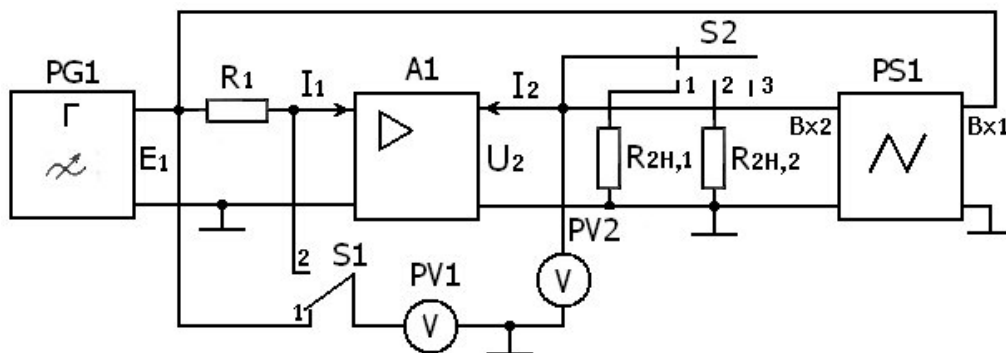


Рис.1.2. Функциональная схема, используемая для измерения коэффициентов усиления, входного и выходного сопротивлений усилителя, а также для снятия его АХ, АЧХ и ПХ

Измерению подлежат коэффициент усиления по напряжению $K = U_2/U_1$, по ЭДС $K_E = U_2/E_1$, по току $K_I = I_2/I_1$ и по мощности $K_p = P_2/P_1$.

$$K_E = K \cdot R_{BX} / (R_{1Г} + R_{BX}), K_I = K \cdot R_{BX} / R_{2Н},$$

$$K_p = K \cdot K_I = K^2 \cdot R_{BX} / R_{2Н}, (1.1)$$

где $R_{1Г}$ - внутреннее сопротивление источника сигнала, равное сопротивлению резистора R_1 , а $R_{BX} = U_1/I_1$ - входное сопротивление усилителя, методика измерения которого изложена ниже.

Перед непосредственным измерением следует проверить соединения схемы (рис. 1.2), установить переключатель (тумблер) S1 в положение I,

включить питание приборов и лабораторного макета. Плавно увеличивая входное напряжение U_1 средней частоты ($f_0 = 1$ кГц), наблюдать форму выходного сигнала. При появлении сколько-нибудь заметных искажений синусоидального сигнала (притупление-ограничение вершины или впадины) зафиксировать полученные предельные значения E_{1max} , U_{2max} и, переведя переключатель S_1 в положение 2, определить U_{1max} ,

При измерении коэффициентов усиления K , K_E , K_I и снятии характеристик: амплитудной (АХ), амплитудно-частотной (АЧХ) и переходной (ПХ) - в целях снижения погрешности измерений, напряжения входного сигнала E_1 и U_1 устанавливаются с таким расчетом, чтобы выходное напряжение не превышало $0,5U_{2max}$ с удобным округленным значением, например, $U_2 = 1$ В

1.4.1.1. Измерение коэффициента усиления ОУ без ОС заслуживает дополнительного пояснения. В связи с тем, что K_{OY} достигает нескольких порядков, в номинальном режиме входное напряжение на его входе составляет доли мВ, что соизмеримо с уровнем шумов в исследуемом макете.

Первоначально подготавливаем проведение эксперимента. При выключенном генераторе сигнала в режиме УПТ ручку уровня сигнала на генераторе устанавливаем в положение 30 дБ, ручку плавной регулировки уровня до упора влево. На входном вольтметре установлена шкала 1 мВ, на выходном 1 В. При развёртке 5-10 мС на экране осциллографа видим шумы и наводки от сети переменного тока.

Приступаем к измерениям. Включаем генератор, подаём на вход усилителя сигнал с частотой 30-40 Гц. Плавно, аккуратно увеличиваем уровень сигнала. Некоторое время стрелка входного вольтметра не двигается. Это говорит о том, что уровень сигнала меньше уровня шумов. На выходе ОУ осциллограф покажет гармонический сигнал раньше, чем на входе. Увеличиваем сигнал на входе ОУ до тех пор, пока выходной сигнал U_2 не достигнет величины 1 В. В этой позиции следует зафиксировать величину входного сигнала U_1 . Изменяя в какую-либо сторону подаваемый от генератора сигнал, получаем новые значения напряжений U_1' и U_2' . Отношение приращений $\Delta U_2 / \Delta U_1$ даёт искомый ответ.

1.4.2. Измерение входного сопротивления усилителя.

Для измерения $R_{вх}$ на частоте f_0 независимо от вида усилителя используется косвенный метод, обладающий достаточной точностью, с помощью схемы на рис.1.2, из которой следует, что $R_{вх} = U_1 / I_1$. Учитывая, что

$$I_1 = (E - U_1) / R_1, \text{ получим } R_{вх} = U_1 R_1 / (E - U_1), (1.2)$$

1.4.3. Измерение выходного сопротивления усилителя

Метод измерения $R_{вых}$ основан на том, что эквивалентная схема усилителя в форме четырехполосника содержит зависимый источник ЭДС,

равной E_2 , с внутренним (выходным) сопротивлением $R_{\text{вых}}$, которые остаются на частоте f_0 неизменными при $E_1 = \text{const}$ (или $U_1 = \text{const}$). Само измерение ведется по схеме рис.1.2, в которой предусмотрено изменение сопротивления нагрузки R_{2H} с помощью переключателя S_2 .

В положении 1 измеряется выходное напряжение $U_{2,1} = R_{2H1} E_2 / (R_{\text{вых}} + R_{2H1})$, в положении 2 измеряется выходное напряжение $U_{2,2} = R_{2H2} E_2 / (R_{\text{вых}} + R_{2H2})$ при неизменном E_1 (или U_1). Из этих уравнений получаем $R_{\text{вых}} = R_{2H1} R_{2H2} (U_{2,2} - U_{2,1}) / (U_{2,1} R_{2H2} - U_{2,2} R_{2H1})$. (1.3)

Естественно, что в настоящем исследовании необходимо вести наблюдение формы выходного сигнала, и не допускать его заметного искажения.

1.4.4. Снятие амплитудной характеристики

Для измерения напряжений, определяющих амплитудную характеристику (АХ), используется схема рис. 1.2 в положении 2 переключателя S_1 при $f = f_0$.

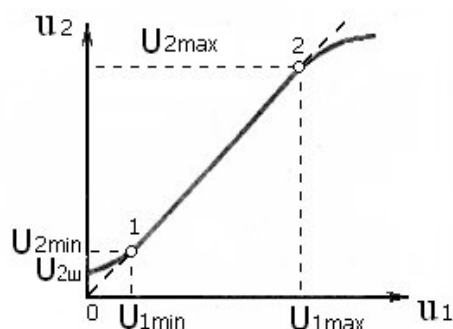


Рис. 1.3. Амплитудная характеристика усилителя

На рис.1.3 показан вид ожидаемой характеристики, имеющей (до $U_{2\text{max}}$) линейную часть, а выше - нелинейную. Нелинейность начального участка АХ объясняется наличием внутренних помех $U_{2\text{ш}}$ (ШУМ, фон), измеряемых на выходе усилителя при отсутствии входного сигнала.

Измерение $U_2 = f(U_1)$ можно начинать с $U_1 = 0$ и производить через равные значения приращения ΔU_1 . Однако в этом случае трудно предугадать удобное

число отсчетных точек. Практически рекомендуется начинать отсчеты с точки $U_1 = U_{1\text{max}}$ и $U_2 = U_{2\text{max}}$, методика нахождения которых изложена в п. 1.4.1.

Интервал от $U_{1\text{max}}$ до 0 целесообразно разбить на 4...5 частей, для которых отсчитывать U_2 . При этом интерес представляет форма АХ и для значений U_1 , несколько (на 30....50%) превышающих $U_{1\text{max}}$.

1.4.5. Снятие амплитудно-частотной характеристики

График зависимости модуля коэффициента передачи от частоты $K_E(f)$ называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). При построении АЧХ величина коэффициента передачи, выраженная в децибелах, откладывается по оси ординат в линейном масштабе, а частота f (когда граничные частоты $f_v \gg f_n$) по оси абсцисс - в логарифмическом.

На практике бывает удобно пользоваться нормированными характеристиками коэффициента передачи (усиления) в децибелах. Оба способа изображения АЧХ представлены на рис 1.4.

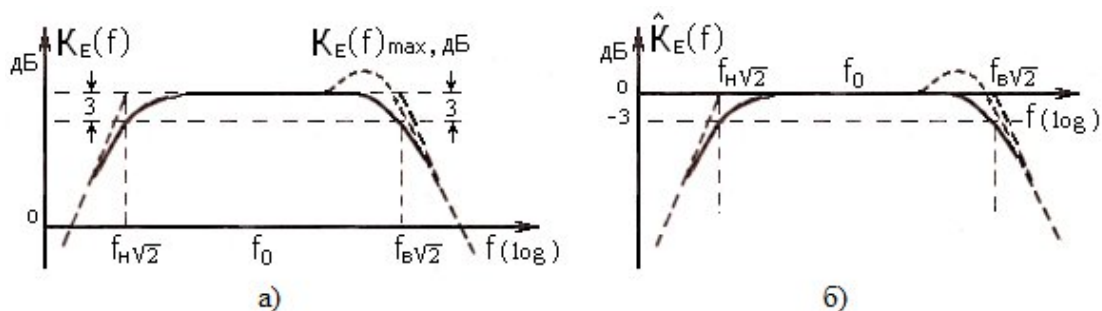


Рис 1.4. Амплитудно-частотная характеристика усилителя (а) и её нормированное изображение (б);

Частоты $f_{H\sqrt{2}}$ и $f_{B\sqrt{2}}$, отсчитываемые на уровне 3дБ, определяют полосу пропускания усилителя.

Необходимо отметить, что напряжение на выходе генератора может несколько меняться при изменении частоты сигнала, поэтому важно следить за постоянством выбранного уровня $E_1 = \text{const}$ (или $U_1 = \text{const}$).

В области средних частот у исследуемых усилителей (кроме дифференцирующего и интегрирующего), $K_E(f)$ изменяется слабо вблизи f_0 , что позволяет в этой области измерение выполнить на одной частоте. На крайних частотах U_1 изменяется более заметно, поэтому здесь целесообразно вести измерения при большем числе точек отсчета, вплоть до 0,1...0,25 от значения U_{02} , относящегося к средней частоте. Практически здесь достаточно получить 5...6 отсчетов в областях $f < f_0$ и $f > f_0$.

Результаты измерения и расчета нормированных значений коэффициента усиления по формуле $K_E(f), \text{дБ} = 20 \lg U_2(f)/U_2(f_0), (1.4)$ заносятся в табл.1.2. Здесь $U_2(f_0) = U_{02}$

Табл.1.2.

№ АЧХ	$E_1, \text{мВ}$	$f, \text{Гц}$	10	20	40	10^2	$2 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	10^3	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	10^6
		$U_2, \text{В}$																
		$K, \text{дБ}$																

1.4.6. Снятие переходной характеристики усилителя

Измерение параметров переходной характеристика (ПХ) ведется при подаче на вход усилителя напряжения прямоугольной формы, получаемого от того же генератора.

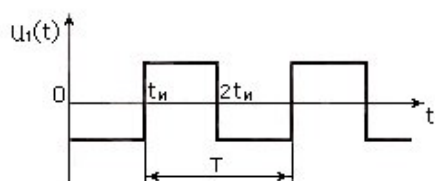


Рис. 1.5. Временная диаграмма входного напряжения при измерении параметров переходной характеристики

При симметричной прямоугольной форме входного напряжения (или ЭДС) (рис.1.5) период $T = 1/f = 2t_n$, откуда следует, что при частоте следования импульсов f длительность прямоугольного импульса $t_n = T/2 = 1/2f$.

На рис.1.6 показан вид ожидаемых осциллограмм в области малых времен (ОМВ) и в области больших времен (ОБВ) со значительно большей длительностью импульсов, чем для ОМВ.

В усилителях с корректирующими элементами, влияющими в области верхних частот, возможно возникновение выброса δ в ОМВ (штриховая линия на рис.1.6а). В ОБВ за счет присутствия в усилителе разделительных конденсаторов возникает неравномерность плоской вершины прямоугольного импульса Δ (рис.1.6, б).

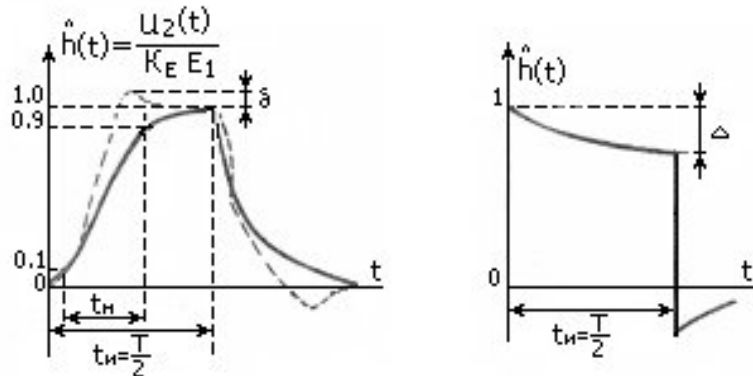


Рис.1.6. Осциллограммы выходного напряжения усилителя:

t_n - длительность прямоугольного импульса, T - период повторения импульсов, t_n - время нарастания, δ - выброс, Δ - спад вершины импульса

На рис 1.7 показан вид ПХ для интегрирующего и дифференцирующего усилителей на ОУ.

Для одновременного наблюдения за формой входного и выходного сигналов в лабораторной стойке используется двухканальный осциллограф. В соответствии со схемой рис. 1.2 с помощью соединительных шлангов на верхний луч (канал I) подается входной, а на нижний луч (канал II) - выходной сигнал.

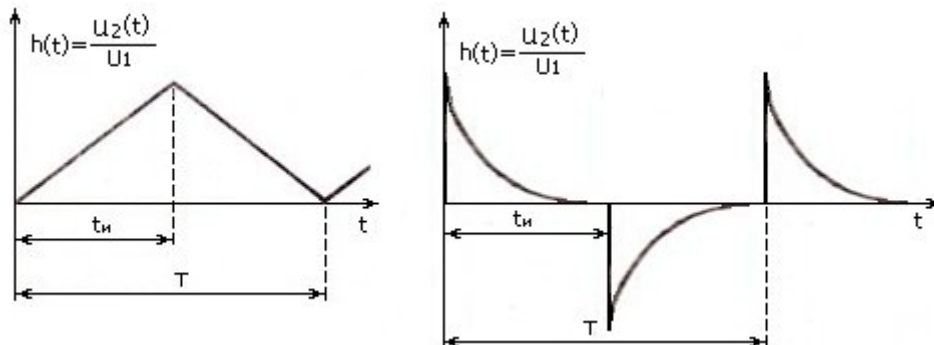


Рис 1.7. Осциллограммы выходного напряжения интегрирующего (а) и дифференцирующего (б) усилителей на ИС.

1.4.7. Измерение параметров, определяющих диаграмму мощностей

Основным параметром усилителей мощности (каскада усиления мощности) является номинальная выходная мощность [1]

$$P_2 = U_2^2 / R_{2H}, (1.5),$$

где R_{2H} - сопротивление внешней нагрузки (рис. 1.2); P_H - мощность, создаваемая выходным транзистором (транзисторами); P_{OK} - мощность, потребляемая от источника питания, и P_K - мощность, рассеиваемая на коллекторе [2].

У однотактного трансформаторного каскада, транзистор которого работает в режиме А, потребляемая мощность

$$P_{OK} = P_H + P_K = U_{кз} I_k, (1.6)$$

не зависит от уровня сигнала. При этом выходная мощность с учетом потерь в трансформаторе, КПД которого равен η_T будет равна

$$P_2 = \eta_T P_H, (1.7)$$

Если выходной каскад исследуемого усилителя является двухтактным бестрансформаторным, то соотношение между мощностями зависят от вида источника питания и от наличия или отсутствия дополнительного резистора, не входящего в состав внешней нагрузки R_{2H} , например R_Σ .

При питании от однополярного источника с напряжением E_O потребляемая мощность равна

$$P_{OK} = E_O I_{Kcp}, (1.8)$$

а в случае двухполярного источника с напряжениями $\pm E_O$ --

$$P_{OK} = 2E_O I_{Kcp}, (1.9)$$

где I_{Kcp} - среднее значение пульсирующего коллекторного тока (одного плеча) при работе в режиме В с углом отсечки $\theta = \pi/2$, равного

$$I_{Kcp} = \sqrt{2} U_2 / \pi R_{2H}, (1.10)$$

Независимо от вида источника питания

$$P_{OK} = P_H + 2 P_K, (1.11)$$

При наличии резисторов R_Σ в эмиттерных цепях выходных транзисторов, работающих на внешнюю нагрузку с сопротивлением R_{2H} , соблюдаются соотношения:

$$P_2 = U_2^2 / R_{2H}, (1.12)$$

$$P_2 = (R_{2H} + R_\Sigma) U_2^2 / R_{2H}^2, (1.13)$$

$$P_{OK} = (P_{OK} - P_H) / 2, (1.14)$$

При этом КПД выходных транзисторов (их коллекторной цепи)

$$\eta_K = P_H / P_{OK}, (1.15)$$

а усилителя (с учетом влияния резистора R_Σ)

$$\eta = P_2 / P_{OK}, (1.16)$$

Зависимости мощностей и КПД от уровня входного сигнала и сопротивления нагрузки приведены в [2].

II. ОПИСАНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ по курсу «Схемотехника аналоговых электронных устройств»

Работа 1 Измерение основных параметров усилителя

1. Цель работы

Представляя усилитель в виде активного четырехполюсника, экспериментально определить его основные параметры: коэффициенты усиления по напряжению K , по току K_I , по мощности K_P , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления, а также снять амплитудную характеристику.

2. Задание на лабораторную работу

2.1. Подготовка к работе. Изучить гл.1 в [1] и гл.2 в [2]

3. Экспериментальная часть

3.1. Снять амплитудную характеристику исследуемого усилителя.

3.2. Измерить входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.

3.3. Измерить коэффициент усиления по напряжению K , по току K_I и определить коэффициент усиления K_P по мощности.

4. Методические указания к выполнению экспериментальной части

4.1. Измерения по 3.1.-3.3. производить на макете лабораторной работы 2 «Исследование резистивного каскада на биполярном транзисторе» (рис.2.1.) в соответствии с разд. 1.4. настоящих методических указаний, на частоте f_0 по согласованию с преподавателем.

4.2. Результаты измерений по п.3.1 занести в таблицу.

Амплитудная характеристика.

Амплитудная характеристика (АХ) усилителя отображает зависимость амплитудного (или действующего) значения выходного напряжения от амплитуды (или действующего) значения синусоидального напряжения, снятую на некоторой постоянной частоте. Обычно рекомендуется частота $f=1\text{кГц}$. Графики идеальной и реальной АХ показаны на рис. 1.3.

Так как коэффициент усиления идеального усилителя представляет собой постоянную величину, не зависящую от входного сигнала, его амплитудная характеристика имеет вид прямой, проходящей через начало координат под углом, определяемым усилением усилителя (штриховая линия).

Реальная АХ совпадает с идеальной лишь в области средних значений напряжений (участок 1-2). При больших напряжениях изгиб АХ обусловлен и нелинейностью характеристик элементов усилителя и ограничением выходных колебаний вследствие перегрузки усилительных каскадов.

Изгиб АХ при малых напряжениях сигнала связан с наличием в усилителе собственных шумов и помех, которые действуют на выходе и при отсутствии сигнала.

Отношение $U_{2\max}/U_{2\min}=D$ называется динамическим диапазоном и обычно оценивается в децибелах.

Нелинейность АХ указывает на наличие нелинейных искажений, которые определяются нелинейностью характеристик транзисторов. Однако с помощью АХ не удаётся определить ни характер, ни вид, ни уровень этих искажений. Несмотря на это, она обладает хорошей наглядностью и позволяет качественно, что существенно для практики, оценить такие показатели усилителя, как коэффициент усиления, динамический диапазон, минимальные и максимальные допустимые значения входного сигнала, уровень собственных шумов.

Измерение АХ.

Плавное увеличение входного напряжения, следует наблюдать форму выходного сигнала на экране осциллографа. При появлении сколь угодно заметных искажений синусоидального сигнала зафиксировать полученные предельные значения $U_{2\max}$ и $U_{1\max}$.

Измерение $U_2 = f(U_1)$ можно начинать с $U_1=0$ и производить их через равные промежутки ΔU_1 . Практически удобно начинать отсчет с напряжения на 30.. 50% выше $U_{2\max}$, разбить известный интервал на ряд равных отрезков и двигаться в сторону уменьшения сигнала вплоть до $U_1=0$.

Коэффициент усиления.

Усилением называется частный случай управления энергией, при котором путем затраты небольшого ее количества можно управлять энергией, во много раз большей. Необходимо при этом, чтобы процесс управления являлся непрерывным, плавным и однозначным.

Устройство, осуществляющее такое управление, называется усилителем. Как преобразуется сигнал в зависимости от параметров усилителя, определяется коэффициентом передачи. Он характеризует отношение выходного сигнала к входному. В том случае, когда входное и выходное значения сигнала являются однородными, коэффициент передачи называют коэффициентом усиления.

Коэффициент усиления относится к важнейшим техническим показателям усилителей. Этот параметр представляет собой отношение напряжения или тока (мощности) на выходе усилителя к напряжению или току (мощности) на его входе численно показывает увеличение выходного сигнала по сравнению с входным. Обычно интересуются коэффициентом усиления по напряжению $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = U_{2H}/U_1$, который представляет собой отношение напряжения сигнала на выходе усилителя к напряжению сигнала на его входе.

Коэффициенты по току $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$ и по мощности $K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}$ определяются соответствующими величинами на входе и выходе. Связь, между коэффициентами следующая:

Коэффициент усиления напряжения $K = \frac{U_{2Н}}{U_1} = \frac{I_{2Н} R_H}{I_1 R_{ВХ}} = K_I \frac{R_H}{R_{ВХ}},$

откуда коэффициент усиления тока $K_I = K \frac{R_{ВХ}}{R_H}$

и коэффициент усиления мощности $K_P = \frac{U_{2Н} I_{2Н}}{U_1 I_1} = K \cdot K_I$

В общем случае коэффициенты усиления по напряжению и току величины комплексные, характеризующиеся как модулем, так и фазой, и только на средних частотах они являются действительными величинами, удобными для использования в практических целях.

Большинство параметров усилителей определяется в режиме малого сигнала.*). К таковым относится коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление. Уровень входного сигнала не должен превышать значения, при котором становятся заметными нелинейные искажения. Практически

$U_1 \leq 0,3U_{1\text{max}}$, U_1 устанавливается с таким расчетом, чтобы выходное напряжение не превышало $0,5U_{2\text{max}}$ с удобным округлением значения, например $U_2=1\text{В}$.

Входное сопротивление.

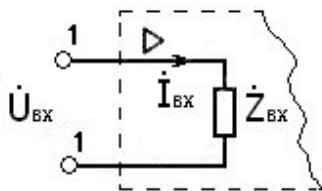


Рис. 3. Схема с парой входных зажимов, иллюстрирующая понятие входного импеданса

Входное сопротивление имеется у любого электрического устройства, для работы которого требуется сигнал. Оно есть мера тока, текущего во входной цепи, когда к входу приложено определенное напряжение.

Любую входную цепь, какой бы сложной она не была, можно представить в виде простого импеданса, как сделано на рис 3.

Если $U_{ВХ}$ - напряжение переменного входного сигнала, а $I_{ВХ}$ - переменный ток, текущий по входной цепи, то входной импеданс равен:

$$Z_{ВХ} = U_{ВХ} / I_{ВХ} \text{ Ом.}$$

У большинства схем входной импеданс, имеет резистивный (омический) характер в широком диапазоне частот, в пределах которого сдвиг по фазе между $U_{ВХ}$ и $I_{ВХ}$ пренебрежимо мал.

Измерение входного сопротивления.

Напряжение на входе усилителя легко измерить с помощью вольтметра переменного напряжения или осциллографа. Входной переменный ток так

же легко измерить нельзя. Подходящий способ измерения входного сопротивления показан на рис. 4.

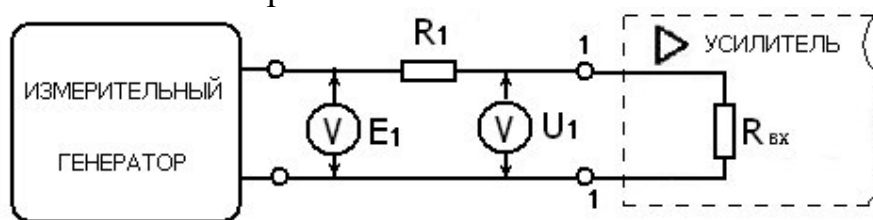


Рис. 4. Измерение входного сопротивления.

Резистор с известным сопротивлением R_1 Ом включают между измерительным генератором ^{*)} и входом исследуемой схемы. Затем с помощью вольтметра переменного напряжения с высокоомным входом (или осциллографа) измеряются напряжения E_1 и U_1 по обе стороны от R_1 . В макете $R_1 = 1$ кОм.

Согласно закону Ома входной ток $I_{вх} = (E_1 - U_1) / R_1$,
 входное сопротивление $Z_{вх} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_1 \cdot R_1}{E_1 - U_1} = \frac{R_1}{E_1 / U_1 - 1}$ Ом

Выходное сопротивление.

Любую сложную цепь, имеющую две выходные клеммы согласно теореме Тевенина, можно заменить эквивалентной с одним идеальным источником и одним импедансом. Понятие эквивалентный, указывает на то, что в них необязательно отражены реальные компоненты и соединения в рассматриваемых устройствах. Эти схемы являются удобным способом представления, который полезен для понимания того, как ведет себя то или иное устройство. Эквивалентные схемы - инструмент анализа и расчета линейных цепей. Описание выходной цепи на основании теоремы Тевенина показано на рис. 5, где $Z_{вых}$ - выходной импеданс, а I - выходной ток короткого замыкания.

Обычно выходной импеданс схем имеет резистивный характер в широком диапазоне частот.

В случае, когда к выходным клеммам подключается внешняя нагрузка $Z_{2н}$ ток I распределяется между $Z_{вых}$ и $Z_{2н}$.

Измерение выходного сопротивления.

Простой метод измерения выходного сопротивления (рис. 6) следует из схемы на рис.5.

Здесь выходное напряжение холостого хода $U_{хх} = I R_{вых}$ измеряется

^{*)} Режим усиления малых сигналов характеризуется тем, что постоянные составляющие токов и напряжений усилительных приборов существенно превосходят аналогичные переменные составляющие, и параметры усилительных приборов не изменяются с изменением мгновенных значений.



Рис. 5, Эквивалентная схема выходной цепи усилителя а) с зависимым источником тока ($I = S U_1$); измерение выходного сопротивления б).

вольтметром (или осциллографом) с высокоомным входом, затем выходные клеммы шунтируются нагрузкой с известным сопротивлением $R_{2Н}$ Ом.

Уменьшившееся выходное напряжение при подключенной нагрузке определяется тем же измерительным прибором

$$U_2 = I \cdot \frac{R_{ВЫХ} \cdot R_{2Н}}{R_{ВЫХ} + R_{2Н}} = U_{ХХ} \frac{R_{2Н}}{R_{2Н} + R_{ВЫХ}}$$

Значение $R_{ВЫХ}$ можно вычислить по величине, на которую снизилось выходное напряжение

$$R_{ВЫХ} = R_{2Н} \left(\frac{U_{ХХ}}{U_2} - 1 \right) \quad \text{или} \quad R_{ВЫХ} = R_{2Н} (U_{ХХ} - U_2) / U_2.$$

Работа 2

Исследование резисторного каскада на биполярном транзисторе

1. Цель работы

Исследовать влияние элементов схемы каскада на транзисторе с общим эмиттером (рис. 2.1.) на его показатели: коэффициент усиления, входное сопротивление, частотные и переходные характеристики.

2. Задание на лабораторную работу

2.1. Подготовка к лабораторной работе.

2.1.1. Изучить гл.4 и 10 в [1], гл.4 в [2], обращая внимание на показатели резисторного каскада, три схемы включения транзистора и их свойства, режим работы транзистора с показом нагрузочных линий для постоянного и переменного токов в системе координат $i_K = f(U_{КЭ})$, цепи питания транзисторных каскадов, назначение элементов принципиальной схемы резисторного каскада, АЧХ, ФЧХ и ПХ резисторного каскада, принцип действия высокочастотной эмиттерной коррекции, АЧХ и ПХ резисторного каскада с эмиттерной коррекцией, действия высокочастотной эмиттерной коррекции, АЧХ и ПХ резисторного каскада с эмиттерной коррекцией.

2.1.2. Ознакомиться с описанием схемы исследуемого усилителя (п.3.).

2.2. Задание по экспериментальной части.

**) Измерительные генераторы представляют собой маломощные источники переменных напряжений с регулируемой амплитудой и частотой.

2.2.1. Измерить максимально возможное неискаженное выходное напряжение, коэффициенты усиления каскада в области средних частот ($f_0 = 1$ кГц) без ОС (K , K_E) и с частотно-независимой ОС (K_F , K_{EF}), а также входное сопротивление $R_{ВХ}$ в отсутствии ОС.

2.2.2. Снять АЧХ каскада без ОС, с частотно-независимой ОС, с частотно-зависимой ОС (эмиттерной коррекцией). Для выполнения исследований переключатели $S1$, $S2$, $S3$ и $S4$ установить в соответствующие положения.

2.2.3. Исследовать осциллограммы и определить переходные искажения выходного импульсного сигнала в области малых времен без ОС, с частотно-независимой ОС, с эмиттерной коррекцией;

2.2.4. По данным измерений п.2.2.2 определить $f_{Н\sqrt{2}}$ и $f_{В\sqrt{2}}$, а также наклоны асимптот, рассчитать t_H и Δ и сравнить последние со значениями t_H и Δ , измеренными по п. 2.2.3.

3. Описание схемы исследуемого усилителя

В исследуемом каскаде (рис.2.1) транзистор $V1$ включен по схеме с ОЭ. Режим работы и стабилизация его обеспечиваются эмиттерной стабилизацией, к элементам которой относятся $R2$, $R3$ и $R5$. Резистор $R4$ представляет собой элемент связи коллекторной цепи транзистора с внешней нагрузкой каскада, т.е. с резисторами $R6$ или $R7$. Конденсаторы $C1$ и $C4$ выполняют функции разделительных элементов во входной и выходной цепях каскада. Резистор $R5$ используется в качестве элемента обратной связи (ОС), гальванической и для сигнала. Конденсатор $C2$ большой емкости, подключаемый параллельно резистору $R5$ выключателем $S2$, позволяет устранить снижение усиления сигнала из-за ОС. При подключении параллельно резистору $R5$ конденсатора $C3$ малой емкости создается эмиттерная ВЧ коррекция. Резистор $R1$ введен в схему для измерения входного сопротивления. С помощью переключателя $S4$ подключается внешняя нагрузка $R6$, или $R7$.

4. Методические указания к выполнению экспериментальной части.

4.1. По п. 2.2.1. измерения проводить в соответствии с разд.1.4.1 и 1.4.2 настоящих методических указаний.

4.2. По п. 2.2.2. при снятии АЧХ коэффициента усиления $K_E = (U_2/U_1)$ руководствоваться рекомендациями п.1.4.5. Результаты измерений занести в таблицу 1.3.

4.3. По п.2.2.3. при определении переходных искажений руководствоваться п.1.4.6.

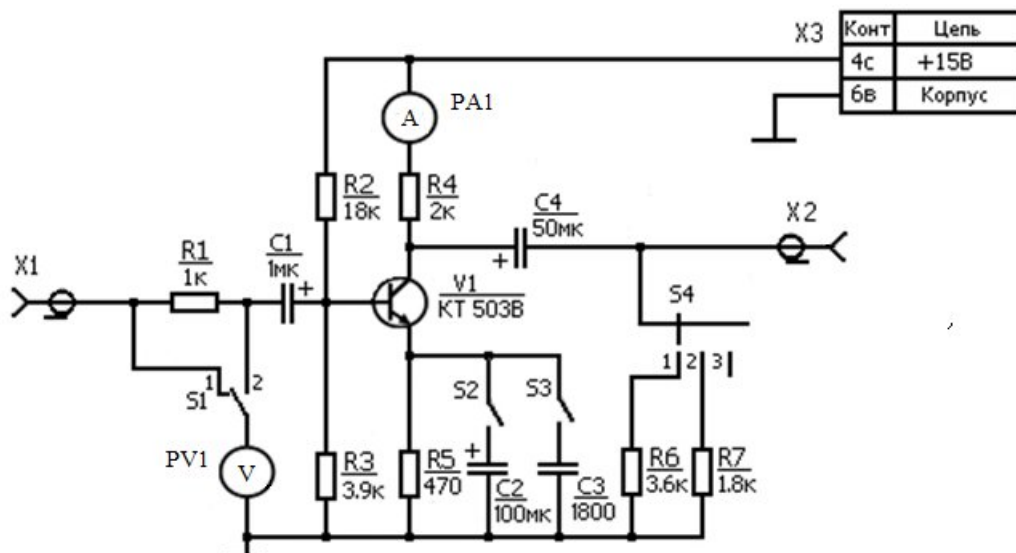


Рис.2.1. Принципиальная схема макета работы 2
 “Исследование резисторного каскада на биполярном транзисторе”

Работа 3

Исследование резисторного каскада на полевом транзисторе

1. Цель работы

Изучение типовых схем подачи напряжения смещения на полевой транзистор с р-п переходом. Экспериментальное исследование влияния различных элементов схемы каскада с общим истоком на АЧХ и ПХ.

2. Задание на лабораторную работу:

2.1. Подготовка к работе.

2.1.1. Изучить гл.10 в [1], гл.4 в [2], обращая внимание на цепи питания полевого транзистора, назначение элементов принципиальной схемы резисторного каскада, а также принцип действия ВЧ индуктивной коррекции и НЧ коррекции.

2.1.2. Ознакомиться с описанием схемы исследуемого усилителя (п.3).

2.2. Задание по экспериментальной части.

2.2.1. Измерять постоянные напряжения в схеме, определяющие координаты точки покоя $U_{зи}$, $U_{си}$, I_c .

2.2.2. Снять АЧХ исследуемого каскада при максимально возможном коэффициенте усиления на средней частоте.

2.2.3. Исследовать влияние элементов схемы на АЧХ каскада.

2.2.4. Исследовать влияние элементов схемы на ПХ.

Варианты схем в п.2.2.3 и 2.2.4 задаются преподавателем.

3. Описание схемы исследуемого усилителя

Исследуется резисторный каскад с общим истоком (рис.2.2). Он выполнен на полевом транзисторе с р-п переходом и n-каналом типа

КП303Б. Управление током стока I_c производится изменением напряжения затвор-исток $U_{зи}$. При n-канале на затвор транзистора подается отрицательное (относительно истока) напряжение смещения. В этом случае р-n переход закрыт и постоянный ток в цепи затвора I_z практически отсутствует ($I_z \leq 10^{-9}$ А).

В макете предусмотрена возможность изменения способа подачи напряжения смещения на затвор транзистора.

В простейшей схеме истоковой стабилизации для получения напряжения смещения служит резистор в цепи истока R7. В связи с тем, что резистор R4 (при S2 в положении 2) присоединяется к общему проводу, а падение напряжения на нем практически равно нулю, смещение полностью определяется падением напряжения на R7. При питании от двухполярного источника постоянного напряжения роль R7 выполняет резистор R8 при S7 в положении 2. Это приводит к увеличению напряжения смещения и к снижению крутизны передаточной характеристики транзистора в точке покоя. Уменьшить напряжение смещения можно с помощью делителя напряжения в цепи затвора. Необходимое компенсирующее напряжение подается с делителя R2 и R3 на затвор транзистора через резистор R4 при S2 в положении 1. При отрицательном напряжении смещения, как и ранее, можно считать, что падение напряжения на резисторе R4 равно нулю. Резистор R4 необходим для сохранения высокоомного входного сопротивления.

Резистор R7 является элементом гальванической ОС, стабилизирующей работу транзистора по постоянному току. В схеме истоковой стабилизации с делителем напряжения в цепи затвора может быть достигнута большая стабильность. Вместе с тем резистор в цепи истока создает последовательную ОС по сигналу, за счет которой уменьшается коэффициент усиления. Для устранения ОС в полосе пропускания параллельно этому резистору с помощью тумблера S8 подключается блокировочный конденсатор большой емкости C4. Подключение же при помощи тумблера S9 конденсатора малой емкости C5 устраняет ОС только на верхних частотах, что приводит к соответствующему увеличению коэффициента усиления, т.е. ВЧ-коррекции. Однако на практике такой вид коррекции не нашел применения, так как ее эффективность заметно уступает эффективности (высокочастотной) эмиттерной коррекции.

Усиленный сигнал снимается с резисторов R5 и R6. На средних частотах при разомкнутых тумблерах S3 и S4 и замкнутом S6 сопротивление внешней нагрузки R9 соединяется параллельно с R5+R6. Поскольку (R5+R6) «R9, нагрузкой каскада, определяющей коэффициент усиления, в этом случае можно считать последовательное соединение резисторов R5 и R6. Такое включение в работе названо высокоомной нагрузкой.

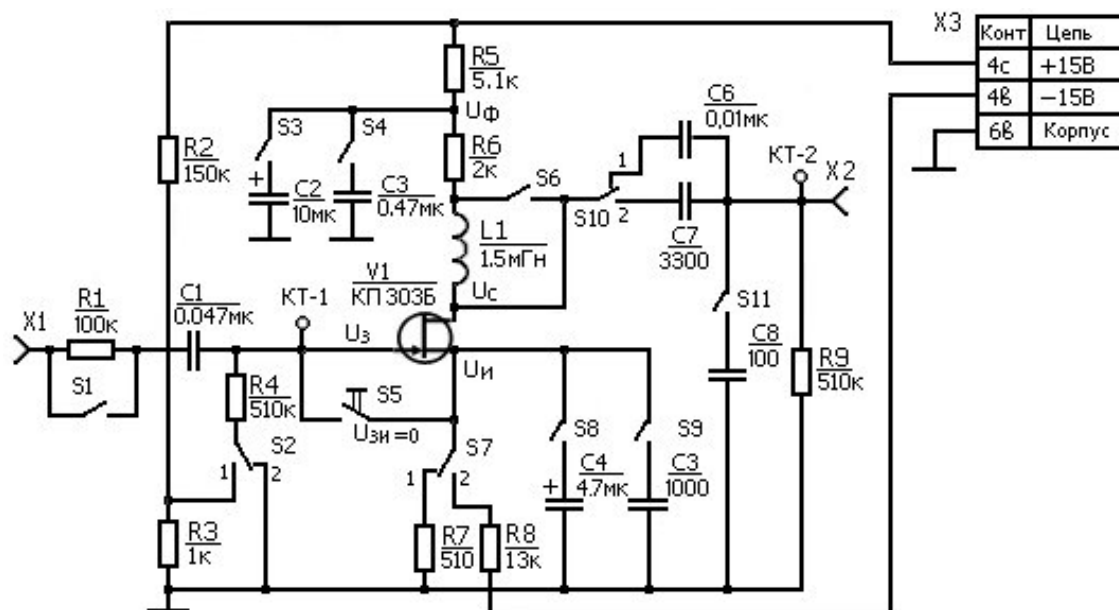


Рис.2.2. Принципиальная схема макета работы 3 “ Исследование резисторного каскада на полевом транзисторе ”

При замыкании тумблера S3 резистор R5 и конденсатор C2 используются как элементы фильтра в цепи питания. В полосе пропускания конденсатор C2 шунтирует резистор R5 и нагрузкой каскада становится резистор R6. Такое включение названо низкоомной нагрузкой.

Включение конденсатора C3 вместо C2 (S4 включен, а S3 выключен) приводит к уменьшению постоянной времени фильтра (C3R5), что увеличивает сопротивление нагрузки в области нижних частот. Так осуществляется НЧ коррекция.

При размыкании тумблера S6 последовательно с R6 включается катушка индуктивности L1, что приводит к увеличению сопротивления нагрузки на верхних частотах, так осуществляется ВЧ коррекция.

Разделительные, конденсаторы C1 на входе и C6 (C7 при S10 в положении 2) на выходе усилительного каскада исключают влияние внешних цепей на режим работы полевого транзистора. Резистор R1 является эквивалентом внутреннего сопротивления источника сигнала. Тумблером S1 это сопротивление может быть приведено к нулю.

Переключатель S12 позволяет измерять постоянные напряжения в четырех точках схемы с помощью вольтметра "Режим работы", расположенного на контрольной панели лабораторного стенда. С помощью переключателя S13 измерительные приборы (вольтметр, осциллограф) присоединяются к контрольным точкам схемы на переменном токе КТ-1 или КТ-2. Это позволяет отдельно измерять характеристики входной и выходной цепей усиления. При $R1 = 0$ в контрольной точке КТ-2 измеряется характеристика только выходной цепи. При $R1 \neq 0$ можно измерить характеристики входной цепи с помощью контрольной точки КТ-1 и характеристики всего каскада с помощью контрольной точки КТ-2.

4. Методические указания к выполнению экспериментальной части

4.1. Включение макета и измерительных приборов осуществляется согласно рекомендациям (Разд. 1.3) настоящих методических указаний.

4.2. Измерение постоянных напряжений в схеме выполняется с помощью вольтметра "Режим работы", расположенного на контрольной панели лабораторного макета. В положении "ВЫКЛ." переключателя S12 вольтметр отключен от схемы. Переводя S12 последовательно в положения "Уф", "Ус", "Ui", "Uз" можно измерить напряжение после фильтра, напряжение на стоке транзистора, напряжение на истоке, напряжение на затворе. Рекомендуется данные измерений занести в таблицу.

Трех-пяти кратный разброс основных параметров полевого транзистора, таких как $I_{с\ нач}$, $U_{зи\ отс}$, S_o -явление обычное. В этих условиях задача построения нагрузочных линий без статических характеристик для каждого экземпляра транзистора становится неопределенной.

В работе предусматривается экспериментальное нормирование идеализированных статических характеристик. С этой целью определяется максимальный ток стока $I_{с\ нач}$ и рассчитывается напряжение отсечки $U_{зи\ отс}$. Значения этих параметров определяются при напряжении смещения $U_{зи}=0$.

Определить ток $I_{с\ нач}$ можно, измерив постоянное напряжение на R6. С этой целью измеряется напряжение $U_{ф0}$ и напряжение $U_{с0}$. Индекс "0" обозначает смещение $U_{зи} = 0$, что соответствует нажатой кнопке S5 (переключатель S12 соответственно в положениях "Уф" и "Ус"). Значение тока $I_{с\ нач} = (U_{ф0} - U_{с0}) / R6$ создает масштаб по оси ординат на статических характеристиках транзистора.

Аналогично определяется ток покоя $I_{с} = (U_{ф} - U_{с}) / R6$. Измерения напряжений выполняются при отпущенной кнопке S5. По разности показаний $U_{з} - U_{и}$ определяется смещение на затворе $U_{зи}$. Точка покоя на проходной статической характеристике имеет координаты ($I_{с}$, $U_{зи}$). Напряжение отсечки удобно определять непосредственно по характеристике, так как значение $U_{зи}$ задает масштаб по оси абсцисс.

Масштаб напряжений на выходных статических характеристиках позволяет установить пунктирная линия $U_{зи\ отс} - U_{зи}$.

Через точку покоя с координатами ($I_{с}$, $U_{с} - U_{и}$) проводятся нагрузочные линии для постоянного и переменного токов.

Измеренные и расчетные значения рекомендуется свести в таблицу. Необходимая коммутация в п.4.2 осуществляется переключателями S2, S7, S12.

4.3. Измерение коэффициента усиления на средней частоте, производится согласно рекомендациям разд. 1.4.1. Соответствующая коммутация осуществляется переключателями S1, S2, S3, S7, S8, S10.

4.4. Исследование АЧХ производится согласно рекомендациям разд. 1.4.5. Соответствующая коммутация осуществляется переключателями S1, S3, S4, S5, S8, S9, S10, S11, S13.

4.5. Исследование ПХ производится согласно рекомендациям разд. 1.4.6. Соответствующая коммутация осуществляется переключателями, указанными в п.4.4.

Работа 4

Исследование транзисторного бестрансформаторного усилителя мощности с обратной связью.

1.Цель работы

Исследовать зависимость основных параметров (выходной, потребляемой и рассеиваемой на коллекторе мощности и КПД) усилителя с бестрансформаторным выходным каскадом на составных комплементарных транзисторах, работающих в режиме В, от ЭДС сигнала E1, сопротивления нагрузки R2н, а также влияние ОС на ряд его параметров.

2. Задание на лабораторную работу

2.1. Подготовка к работе.

2.1.1. Изучить гл.5 и 8 в [1], гл.6 в [2], а также разд.1.4.1, 1.4.2, 1.4.7 настоящих методических указаний, обращая внимание на особенности построения схем бестрансформаторного усилителя мощности с ОС, влияние ОС на его основные параметры, на методики измерений этих параметров в данной лабораторной работе.

2.1.2. Ознакомиться с описанием принципиальной схемы исследуемого усилителя (п. 3).

2.2. Расчетная часть работы выполняется по указанию преподавателя.

2.3. Задание по экспериментальной части.

2.3.1. Снять зависимость мощностей: создаваемой выходными транзисторами P_n , потребляемой от источника питания $P_{ок}$ и рассеиваемой на коллекторах этих транзисторов $2P_K$, а также КПД - от уровня ЭДС входного сигнала E1 при $R_{2н} = 3,9 \text{ Ом}$ и отсутствии ОС.

2.3.2. Снять зависимость выходной мощности P_2 от сопротивления внешней нагрузки R2н при отсутствии и наличии общей ОС. Кроме того, оценить влияние вида элемента связи в предвыходном каскаде при $R_{2н}=3.9 \text{ Ом}$ и отсутствии ОС.

2.3.3. Исследовать влияние ОС на выходное сопротивление усилителя на средней частоте.

2.3.4. Исследовать зависимость коэффициента усиления по ЭДС K_{EF} при ОС и коэффициента петлевого усиления $K_{П}$ от особенностей построения усилителя и цепи ОС.

2.3.5. Исследовать возможность самовозбуждения усилителя при наибольшем значении коэффициента петлевого усиления.

3. Описание принципиальной схемы исследуемого усилителя

Исследуемое усилительное устройство с ОС состоит из пяти каскадов, из которых четыре входят в состав собственно усилителя, а один относится к цепи ОС.

Усилитель содержит два резисторных каскада предварительного усиления на транзисторах VI и V4 (рис. 2.3), включенных по схеме с ОЭ, из которых первый является входным, а второй - предвыходным каскадом. В качестве элемента связи у входного каскада используется резистор R5, а у предвыходного каскада в зависимости от положения тумблера S6 - резистор R14 или генератор стабильного тока (ГСТ), состоящий из транзистора V3 и находящегося в его эмиттерной цепи резистора R12.

С помощью тумблера S5 осуществляется шунтирование резистора эмиттерной стабилизации R15 блокировочным конденсатором C5 в целях увеличения коэффициента усиления предварительного каскада вследствие исключения местной последовательной по току ОС.

Транзисторы VI, V2, V4 (а также V3) работают в режиме А, поскольку они входят в состав однотактных каскадов.

Последующая часть усилителя представляет собой группу из двух составных, попарно комплементарных транзисторов V6,V8 и V7,V9 включенных по схеме с ОЭ [1, рис.4.19,б и 6.27]. Эти пары образуют двухтактную схему, транзисторы которой работают в режиме В. В качестве элементов связи между транзисторами первой и второй пары используются резисторы R16 и R19. При этом транзисторы верхнего (V6) и нижнего (V7) плеч охвачены местной ОС, последовательной по току, через резисторы R17 и R18. Кроме того, находящиеся в эмиттерных цепях транзисторов V8, V9 резисторы R20, R21 также создают местную ОС, последовательную по току.

Резисторы R17,R18,R20,R21 способствуют симметричности плеч каскада, а R20, R21 -защите от влияния перегрузки при избыточно сильном сигнале. Диод V5 предназначен для получения напряжения смещения на базах выходных транзисторов и стабилизации их коллекторного тока покоя.

Ввиду того, что питание усилителя ведется от однополярного источника в выходной цепи расположен разделительный конденсатор C6, через который выходной сигнал передается внешней нагрузке R2н, в качестве которой в зависимости от положения переключателя S7 используется один из резисторов R23, R24, R25.

Для измерения постоянной составляющей (среднего значения) коллекторного тока, потребляемого транзистором V8 (также и V9), используется прибор PAI (рис.2.3).

В исследуемом устройстве цепь общей ОС (последовательная по напряжению) охватывает все каскады усилителя, причем она действует как по сигналу, так и по стабилизации постоянного напряжения (рис.2.4).

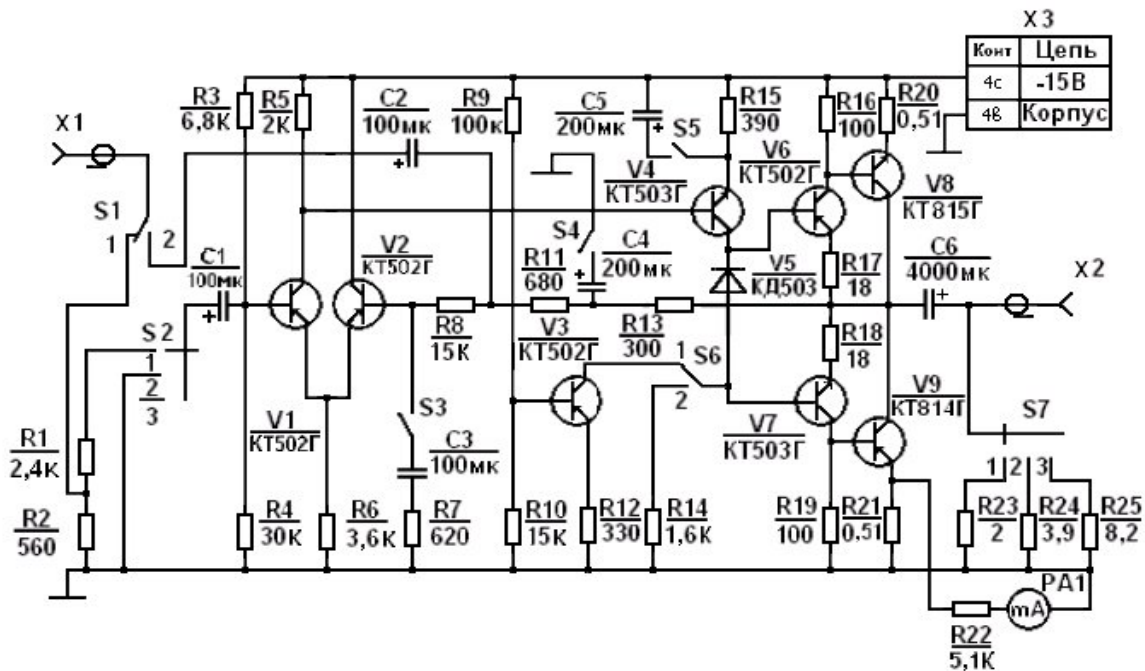


Рис.2.3 Принципиальная схема макета работы 4 “Исследование транзисторного бестрансформаторного усилителя мощности с обратной связью”

Цепь ОС по сигналу при замкнутом тумблере S3 состоит из делителя напряжения R13 R11 R8 R7 (при $R7 \gg 1/2\pi f C3$) и буферного каскада с ОК на транзисторе V2 с резистором связи R6, который одновременно является элементом местной ОС, последовательной по току, для транзистора V1^{*}. При этом цепь ОС по дрейфу (и одновременно по сигналу при разомкнутом тумблере S3) образована резисторами R13, R11, R8, транзистором V2 и резистором R6; глубина общей ОС по сигналу в этом положении больше, чем при замкнутом S3. Естественно, что глубина гальванической ОС не зависит от положения тумблера S3.

Использование буферного эмиттерного повторителя на транзисторе V2 облегчает получение более глубокой общей ОС за счет снижения мощности, потребляемой цепью ОС от выходного каскада.

При замкнутом положении тумблера S4 общая ОС по сигналу не действует.

С помощью разделительных конденсаторов C1 и C2 исключается влияние изменения положений переключателей S1, S2 на режимы работы по постоянному току всех транзисторов, кроме V3.

Переключатель S1 предназначен для присоединения источника сигнала (лабораторного генератора) ко входу усилительного устройства (положение I) для измерения коэффициента усиления по ЭДС $K_E = U_2 / E_1$ при отсутствии ОС, заблокированной конденсатором C4 при замкнутом

положении тумблера S4, а также параметры $K_{EF} = U_{2F} / E_1$ при действующей ОС, когда разомкнут тумблер S4. Эти два положения тумблеров S1, S4 используются при измерении выходных сопротивлений без ОС и с ОС, т.е. $R_{ВЫХ}$ и $R_{ВЫХ F}$.

Для измерения коэффициента петлевого усиления $K_{П}$ напряжение входного сигнала подается через переключатель S1 (положение 2) в цепь ОС через разделительный конденсатор C2 и резистор R8 (рис.2.4) на базу транзистора V2 и далее через входной (V1), предвыходной (V4) и выходные (V6-V9) транзисторы поступает на выход усилителя X2. Переключатель S2 при всех исследованиях находится в положении I.

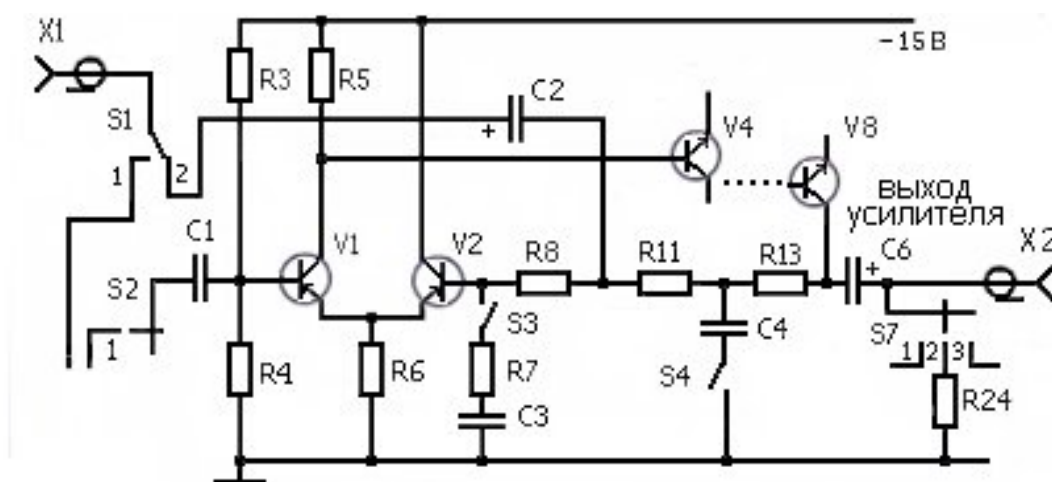


Рис.2.4. Схема части усилителя, используемая для измерения параметра $K_{П}$

4. Методические указания к выполнению экспериментальной части

4.1. По п.2.3.1. Измерения проводить в соответствии с содержанием разд. 1.4.4 настоящих методических указаний при $R_{24} = 3,9$ Ом. Результаты занести в табл.1. [5].

4.2. По п.2.3.2. Измерения проводить в соответствии с содержанием разд. 1.4.7 настоящих методических указаний для всех трех значений R_{24} . Измерения повторить для этих же значений при включении общей ОС; затем только для $R_{24} = 3,9$ Ом. При этом у предвыходного каскада следует заменить источник тока R12 V3 (используемый в качестве элемента связи) на резистор R14 и отключить общую ОС с помощью тумблеров S6 и S2 соответственно. Результаты измерений занести в таблицу 4 [5].

4.3. По п.2.3.3. Измерения проводить в соответствии с разд. 1.4.3 настоящих методических указаний при $R_{24} = 2$ Ом и $R_{24} = 8,2$ Ом (рис.2.3). Результаты измерений занести в табл.3. [5].

4.4. По п.2.3.4. Измерение коэффициента усиления по ЭДС без общей ОС K_E и в случае ее действия K_{EF} проводить в соответствии с содержанием разд. 1.4.1 настоящих методических указаний и п.3 описания данной работы. Измерения провести для двух видов элементов связи, а также в

отсутствии и при наличии местной ОС в предвыходном каскаде (табл.4. [5]).

Измерение коэффициента петлевого усиления K_{Π} проводить в соответствии с методикой, изложенной в п.3 данного описания принципиальной схемы и рис.2.4 для тех же вариантов схемы предвыходного каскада, что и при измерении коэффициентов K_E и K_{EF} (табл. 5. [5]).

4.5. По п.2.3.5. Измерить частоту, на которой возникает самовозбуждение усилителя при включении его по схеме, обеспечивающей максимально возможный коэффициент петлевого усиления (см.п.4.4). Если усилитель не возбудился, то следует увеличить глубину общей ОС, отключив цепь СЗ R7.

Работа 5

Исследование схем с ОУ на ИС

1.Цель работы

Исследовать свойства и характеристики операционного усилителя (ОУ) на ИМС в различных функциональных схемах его включения.

2.Задание на лабораторную работу

2.1. Подготовка к работе.

2.1.1. Изучить гл.11 в [1] и [3,4], а также разд. 1 настоящих методических указаний, обращая внимание на свойства, характеристики и построение схем усилителей постоянного тока (УПТ); функциональные схемы и характеристики решающих ОУ; схемотехнику ИС ОУ.

2.1.2. Ознакомиться с описанием принципиальной схемы исследуемого усилителя (п. 3).

2.2. Задание к экспериментальной части

2.2.1. Исследование ОУ в режиме УПТ при синусоидальном сигнале (п.4.1). Выполнить балансировку ОУ (п.4.1 и 4.2). Измерить коэффициент усиления ОУ на частоте порядка 30...40 Гц методом приращений выходного напряжения U_2 , не выходя за пределы линейного режима ($V_{2\max} \leq 6,5 \text{ В}$).

2.2.2. Исследование решающего ОУ в режиме масштабного усилителя (МУ). Снять АЧХ для $K=100$ (при $U_1 = 10 \text{ мВ}$) и для $K=10$ (при $U_1 = 100 \text{ мВ}$) в диапазоне частот 20 Гц ... 1 МГц. По данным измерений определить K_{F1} и K_{F2} .

2.2.3. Исследование решающего ОУ в режиме интегрирования (ИУ). Снять АЧХ в диапазоне частот 20 Гц...500 кГц при $U_1 = 50 \text{ мВ}$.

2.2.4. Исследование решающего ОУ в режиме дифференцирования (ДУ). Снять АЧХ в диапазоне частот 200 Гц...500 кГц при $U_1 = 50 \text{ мВ}$.

2.2.5. Исследование решающего ОУ в режиме операционного повторителя (ОП). Снять АЧХ ОП при $U_1 = 150$ мВ. Измерить коэффициент передачи ОП на частоте 1 кГц. На частоте 30...40 Гц определить $U_{2\max}$. Наблюдать искажение формы выходного сигнала в гармоническом режиме при $U_{2\max}$, с увеличением частоты. Измерить скорость нарастания выходного напряжения в гармоническом режиме (п.4.5.1). Измерить скорость нарастания выходного напряжения в импульсном режиме (п.4.5.2).

2.2.6. Исследование ОУ в режиме импульсного сигнала. Снять осциллограммы входного и выходного напряжений при подаче на вход прямоугольных импульсов длительностью 25 мкс в режимах: МУ ($K=10$), ОП, и длительностью 500 мкс в ДУ, ИУ, используя оба луча осциллографа.

В режиме ИУ увеличивать длительность входного импульса до максимальной, при которой линейный закон интегрирования переходит в экспоненциальный.

3. Описание принципиальной схемы исследуемого усилителя

Макет лабораторной установки с ОУ выполнен на ИС К140УД7 (рис.2.5). Переключатель схем S1 позволяет образовать схему УПТ без ОС и четыре функциональные схемы решающего ОУ. В положении 1 цепь внешней ОС отключается, сигнал подается на инверсный вход ОУ - 2. В положении 2 переключателя S1 образуется схема МУ, когда на входе включается резистор R5, а в цепь ОС, соединяющую выход ОУ-6 с инверсным входом 2, - резисторы R11 или R12.

Переключатель S2 позволяет получить коэффициент усиления МУ, равный 100 или 10, посредством включения резисторов с соответствующими сопротивлениями в цепь ОС.

В положении 3 переключателя S1 в цепь ОС включается емкость C2, а во входную цепь - резистор R5, образуя схему ИУ. Резистор R13 включен в цепь ОС для стабилизации работы усилителя по постоянному току.

В положении 4 в цепь ОС вводится резистор R14, а во входную цепь - конденсатор C1 для образования схемы ДУ. Дополнительный резистор R6 включен во входную цепь ДУ для обеспечения устойчивости при работе на верхних частотах.

В положении 5 операционный усилитель выполняет функцию операционного повторителя напряжения. Входной сигнал в этом случае поступает на прямой вход 3, а цепь ОС, элементом которой является резистор R14, подключается к инверсному входу ОУ-2.

Схема балансировки включает в себя потенциометр R8 ("Уст.0") с дополнительными резисторами R15, R16.

В макете используется ОУ К140УД7 с внутренними цепями частотно-фазовой коррекции, а также цепями защиты по входу и по выходу.

4.Методические указания к выполнению экспериментальной части

4.1. При выполнении эксперимента следует руководствоваться соответствующими разделами первой части настоящих методических указаний.

4.2. Установку нуля (балансировку) на выходе ОУ удобно выполнять с помощью осциллографа. Эта операция выполняется при выключенном генераторе сигнала, а ОУ - в режиме УПТ. Осциллограф включается в двухканальный режим, а переключатели входа каналов устанавливаются в положение "1". Ручками вертикального перемещения " \updownarrow " совместить линию развертки обоих каналов со средней линией экрана.

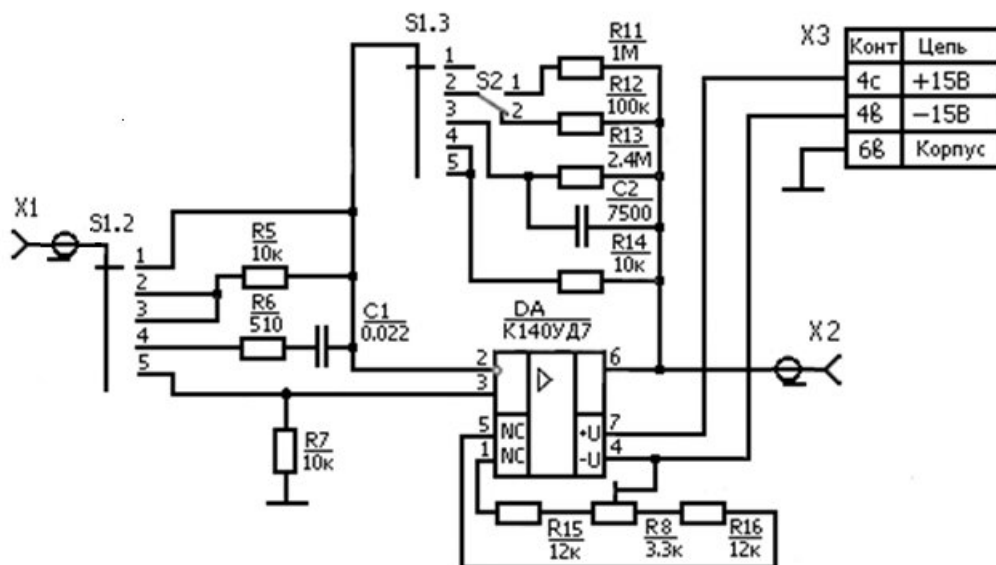
Затем переключатель входа канала II перевести в положение " \sim " (открытый вход), в этом случае сигнал с выхода исследуемого ОУ поступает с постоянной составляющей. В положении малого усиления (5...0,2 В/дел) канала II ручкой "Уст.0" на панели исследуемого макета снова совместить линию развертки канала II со средней линией экрана осциллографа. После этого можно увеличить чувствительность ручкой "В/дел" и установить нуль более точно. Однако при очень высокой чувствительности II канала

осциллографа луч на экране будет рисовать колебания, соответствующие наводкам с частотой сети.

После установки нуля следует уменьшить чувствительность канала II ручкой "В/дел". Включить генератор сигналов и подать низкочастотный синусоидальный сигнал. Наблюдая форму выходного сигнала при увеличении входного, можно убедиться, что операция установки нуля позволяет получить максимальный неискаженный сигнал на выходе, о чем будет свидетельствовать одновременное начало искажений обеих полувольт синусоиды.

4.3. Измерить коэффициент усиления ОУ (также в режиме УПТ) используя метод приращений п.1.4.1.1.

4.4. Расчет и построение АЧХ следует выполнять в ненормированном виде, используя выражение $K(f), \text{ дБ} = 20 \lg U_2(f) / U_1$.



.Рис.2.5. Принципиальная схема макета работы 5
«Исследование операционного усилителя на интегральной схеме»

4.5. Измерение скорости нарастания выходного напряжения.

4.5.1. Измерение скорости нарастания выходного напряжения в режиме синусоидального сигнала. В режиме УПТ на частоте 30-40Гц получить максимальное неискажённое напряжение на выходе. Для определения амплитуды выходного сигнала U_{2max} показания вольтметра умножаем на $\sqrt{2}$. Изменяя ступенчато частоту генератора, определяем диапазон частот, где сигнал становится заметно искажённым. Плавным изменением частоты генератора находим значение частоты "максимальной мощности" f_{Umax} , на которой появляются искажения. Расчёт скорости нарастания V_{max} (В/мкс) выполняем по формуле $f_{Umax} = V_{max} / 2\pi U_{2max}$.

4.5.2. Измерение скорости нарастания в импульсном режиме. На частоте $f \geq f_{pmax}$ (порядка 100 кГц) переключить генератор в режим прямоугольных импульсов. Рассчитать скорость нарастания выходного напряжения V_{max} (В/мкс) по наклону фронта выходного импульса $V_{max} = \Delta U_2 / \Delta t$, пользуясь для измерений шкалами осциллографа.

Литература

1. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Учебник для вузов.-2-е издание, исправл.-М.:Горячая линия-Телеком 2001.

2. Войшвилло Г. В. Усилительные устройства: Учебник для вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Радио и связь, 1983.- 264 с.

3. Алексеев А. Г. и др. Усилительные устройства. Сборник задач и упражнений. Учеб. пособие для вузов/А. Г. Алексеев, Г. В. Войшвилло, И. А. Трискало; Под. ред. Г. В. Войшвилло.- М.: Радио и связь, 1986.- 160с.

4. Алексеев А. Г. и др. Усилительные устройства на ИМС/ ЛЭИС. -Л., 1983.