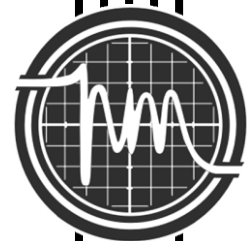


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ



ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Схемотехника аналоговых электронных устройств»
для студентов очной и заочной форм обучения
направлений 11.03.01 — «Радиотехника»,
11.03.02 — «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
и специальности 11.05.01 — «Радиоэлектронные системы
и комплексы»

Севастополь
СевГУ
2019

УДК 621.396.1
И88

Р е ц е н з е н т:

И.Л. Афонин - доктор технических наук, профессор

Ответственный за выпуск:

И.Л. Афонин - заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»,
доктор техн. наук, профессор

Составитель: А.В. Мельников

И88 **Исследование усилителя с обратной связью:** учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств» для студентов очной и заочной форм обучения направлений 11.03.01 — «Радиотехника», 11.03.02 — «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» / Сост. А.В. Мельников. — Севастополь: СевГУ, 2019. — 14 с.

Цель учебно-методического пособия — оказать помощь студентам в подготовке и выполнении лабораторной работы по дисциплине «Схемотехника аналоговых электронных устройств», а также в получении теоретических знаний по влиянию обратных связей на характеристики усилительных каскадов и экспериментальное исследование влияния параметров элементов схемы на основные характеристики усилительного каскада.

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 9 от 4 марта 2019 года.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании Ученого совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности, протокол № 7 от 13 марта 2019 года.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

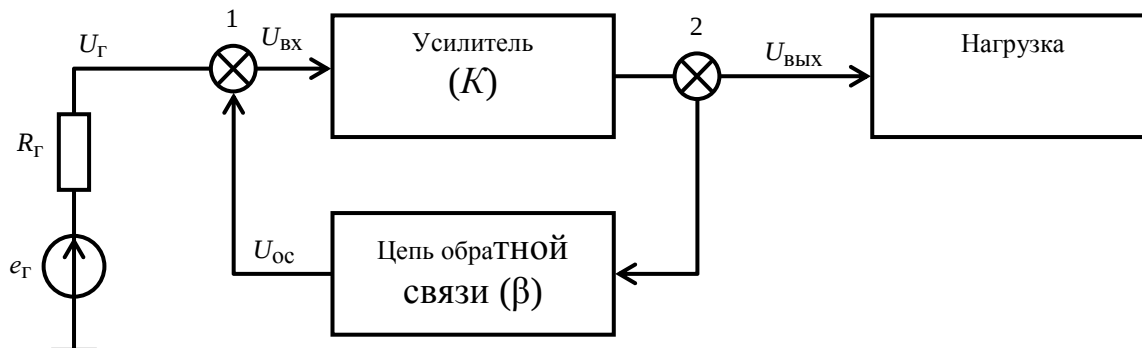
1. Цель работы

Определить основные показатели и изучить влияние элементов цепей обратной связи на амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада.

2. Краткие теоретические сведения

При необходимости расширить полосу пропускания усилителя, улучшить его переходную характеристику или получить амплитудно-частотную характеристику, отличающуюся от линейной, в усилитель вводят частотно-независимые или частотно-зависимые цепи обратной связи.

Обратной связью (ОС) называют такую связь между цепями усилителя, посредством которой энергия передается из последующих цепей или каскадов в предыдущие, т.е. в направлении обратном тому, которое имеет место в процессе усиления сигналов (рис. 1).



1 — устройство ввода сигнала обратной связи;

2 — устройство снятия сигнала обратной связи;

Рис. 1 — Усилитель, охваченный внешней цепью обратной связи

Обратная связь может сильно влиять на свойства и характеристики усилителя. Разработка усилителя с параметрами, удовлетворяющими современным требованиям, невозможна без использования обратной связи.

Различают:

1) внешнюю обратную связь, обусловленную введением специальных цепей, преднамеренно создающих по желанию разработчика в каскаде или усилителе обратную связь для изменения свойств в нужном направлении;

2) паразитную обратную связь, обусловленную неудачным расположением и монтажом усилительных каскадов или неидеальностью элементов, ко-

гда паразитные емкостные и индуктивные связи создают путь для передачи колебаний с выхода на вход.

Если при сложении колебаний источника сигнала (U_r) с колебаниями, поступающими с выхода через цепь обратной связи (U_{oc}), амплитуда результирующего колебания на входе усилителя ($U_{вх}$) возрастает, то такую ОС называют положительной обратной связью (ПОС), если амплитуда результирующего колебания уменьшается, то такую ОС называют отрицательной обратной связью (ООС).

При ПОС колебания на входе складываются в фазе, при ООС — в противофазе.

В усилителях положительная обратная связь обычно является вредной, так как может вызвать самовозбуждение усилителя. Присущие усилителям фазовые сдвиги изменяются с изменением частоты, поэтому обратная связь, отрицательная на одних частотах, может превратиться в положительную на других. Обычно изменение знака ОС происходит за пределами рабочего диапазона частот.

Если коэффициент передачи β цепи ОС остается постоянным в полосе рабочих частот, то такую ОС называют частотно-независимой, если не остается постоянным, то называют частотно-зависимой.

Обратная связь может быть: по постоянной и переменной составляющим, регулируемой (переменной).

По способу снятия различают обратную связь по току, напряжению и комбинированную. Способ снятия ОС необходимо учитывать при определении влияния ОС на выходное сопротивление усилителя.

По способу ввода обратной связи различают последовательную, параллельную и комбинированную. Способ ввода ОС необходимо учитывать при определении влияния ОС на входное сопротивление усилителя.

При всех способах снятия и ввода обратной связи коэффициент усиления устройства с отрицательной и положительной обратной связью определяют из соотношений

$$K_{оос}^* = \frac{K^*}{1 + \beta K^*} ,$$

$$K_{пос}^* = \frac{K^*}{1 - \beta K^*} .$$

где $K_{оос}^*$ и $K_{пос}^*$ — коэффициенты усиления при отрицательной и положительной обратной связи соответственно.

Видно, что ООС снижает коэффициент усиления устройства. Величину, показывающую во сколько раз изменяется коэффициент усиления при введении обратной связи, называют глубиной обратной связи.

При ООС глубину обратной связи рассчитывают из соотношения

$$F = 1 + \beta K^* ,$$

где F — глубина обратной связи;

β — коэффициент передачи цепи обратной связи;

K^* — сквозной коэффициент усиления усилителя.

Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления устройства. Если при этом $\beta K^* = 1$, то коэффициент усиления становится бесконечно большим, что физически соответствует самовозбуждению устройства.

При введении в усилитель частотно-независимой ООС коэффициент передачи цепи обратной связи β остается постоянным и не зависит от частоты, а глубина обратной связи F при неравномерной АЧХ зависит от величины коэффициента усиления усилителя без ОС на низких и высоких частотах. Так как на низких и высоких частотах коэффициент усиления уменьшается, по сравнению с областью средних частот, то в области средних частот, где коэффициент усиления наибольший, глубина ООС наибольшая и уменьшение коэффициента усиления после ввода ООС будет наибольшим. В области НЧ и ВЧ, где коэффициент усиления меньше чем в области средних частот, глубина ООС уменьшается, и вводимая ООС уменьшит K^* в меньшее количество раз. За счет этого полоса пропускания усилителя с ООС расширяется (рис. 2).

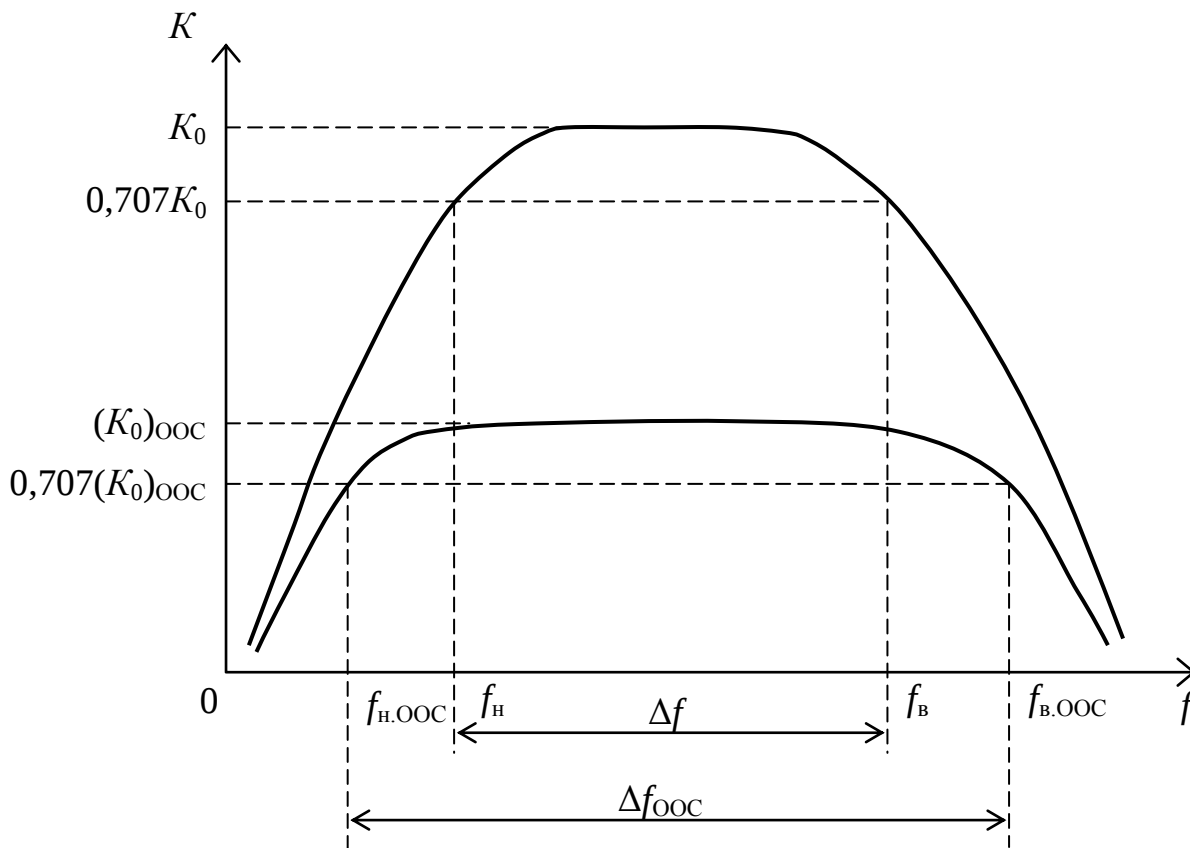


Рис. 2 — Влияние отрицательной обратной связи на АЧХ усилителя

Таким образом, частотно-независимая ООС, уменьшая усиление устройства, уменьшает его частотные искажения и расширяет полосу пропускания. Коэффициент частотных искажений с ООС находят из выражения:

$$M_{\text{оос}} = \frac{M-1}{1+\beta K^*} + 1 ,$$

где $M_{\text{оос}}$ — коэффициент частотных искажений усилителя, охваченного ООС;
 M — коэффициент частотных искажений усилителя без ОС.

При введении частотно-зависимой ОС коэффициент передачи цепи обратной связи β меняет свою величину в рабочей полосе частот. При этом АХЧ усилителя приобретает подъемы и спады. Частотно-зависимую ОС используют для корректирования характеристик в области нижних, средних и верхних частот, в блоках регулировки тембра, для конструирования частотно-избирательных усилителей и т.д.

Введение ООС в усилитель, обладающий нелинейной амплитудной характеристикой, линеаризует ее вид. Следствием этого является то, что при одном и том же уровне выходного напряжения коэффициент гармоник в усилителе, охваченном ООС, оказывается меньше, чем коэффициент гармоник усилителя без обратной связи

$$K_{\Gamma \text{оос}} = \frac{K_{\Gamma}}{1 + \beta K^*} ,$$

где $K_{\Gamma \text{оос}}$ — коэффициент гармоник усилителя, охваченного ООС;

K_{Γ} — коэффициент гармоник без ОС.

Коэффициент усиления усилительного каскада и положение его точки покоя изменяется от воздействия различных дестабилизирующих факторов. Введение ООС по переменной составляющей уменьшает нестабильность усиления усилителя во столько же раз, во сколько она снижает его сквозной коэффициент усиления. Это позволяет создавать высокостабильные усилители, находящие применение в измерительной технике, системах многоканальной связи и т.д.

Введение ООС по постоянной составляющей повышает стабильность положения точки покоя.

Нестабильность сквозного коэффициента усиления при обратной связи по переменному току или нестабильность положения точки покоя при обратной связи по постоянному току находят из выражения:

$$dq_{\text{оос}} = \frac{dq}{1 + \beta K^*} ,$$

где $dq_{\text{оос}}$ — нестабильность сквозного коэффициента усиления (положения точки покоя) усилителя охваченного ООС;

dq — нестабильность усилителя без ОС.

Введение обратной связи изменяет как входное, так и выходное сопротивления устройства, которое она охватывает. Характер изменения входного сопротивления определяется способом введения обратной связи во входную цепь и не зависит от способа ее снятия с цепи выхода. Характер изменения выходного сопротивления определяется способом снятия напряжения обратной связи с выходной цепи и не зависит от способа ее введения во входную цепь.

Входное сопротивление усилителя при последовательной по способу ввода положительной и отрицательной обратной связи определяют из выражений:

$$Z_{\text{вх.ПОС}} = Z_{\text{вх}}(1 - \beta K) ,$$

$$Z_{\text{вх.ООС}} = Z_{\text{вх}}(1 + \beta K) .$$

где $Z_{\text{вх.ПОС}}$, $Z_{\text{вх.ООС}}$ — входное сопротивление усилителя охваченного ПОС и ООС соответственно;

$Z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление усилителя без ОС.

Последовательная по способу ввода отрицательная обратная связь увеличивает входное сопротивление той части устройства, которую она охватывает. Если входное сопротивление имеет активную и емкостную составляющие, то последовательная ООС, увеличивая полное входное сопротивление, увеличивает активную составляющую входного сопротивления и уменьшает входную емкость

$$R_{\text{вх.ООС}} = R_{\text{вх}}(1 + \beta K), \quad C_{\text{вх.ООС}} = C_{\text{вх}} / (1 + \beta K) .$$

Входная проводимость усилителя, охваченного параллельной по способу ввода ООС, определяется следующим выражением:

$$Y_{\text{вх.ООС}} = Y_{\text{вх}} + Y_{\text{ОС}}(1 + K),$$

где $Y_{\text{ОС}}$ — проводимость цепи обратной связи.

Соответственно входное сопротивление

$$Z_{\text{вх.ООС}} = \frac{1}{Y_{\text{вх.ООС}}} = \frac{Z_{\text{вх}} Z_{\text{ОС}}}{Z_{\text{вх}}(1 + K) + Z_{\text{ОС}}} .$$

При параллельной отрицательной обратной связи входная цепь усилителя шунтируется уменьшенным в $(1 + K)$ раз сопротивлением обратной связи, что уменьшает входное сопротивление той части устройства, которая охвачена ОС.

При параллельной по способу ввода ПОС входная проводимость определяется из соотношения

$$Y_{\text{вх.ПОС}} = Y_{\text{вх}} + Y_{\text{ОС}}(1 - K) .$$

Откуда видно, что параллельная ПОС при $K > 1$ уменьшает входную проводимость и соответственно увеличивает входное сопротивление.

Способ снятия обратной связи влияет на выходное сопротивление усилителя. Отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает выходное сопротивление устройства

$$Z_{\text{вых.ООС}} = \frac{Z_{\text{вых}}}{1 + \beta K} .$$

где $Z_{\text{вых.ООС}}$ — выходное сопротивление усилителя охваченного ООС;

$Z_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление усилителя без ОС.

Отрицательная обратная связь по току увеличивает выходное сопротивление устройства

$$Z_{\text{вых.ООС}} = Z_{\text{вых.}} (1 + \beta K^*) .$$

3. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят: модули «Усилитель с обратной связью» (рис. 3), «Функциональный генератор» (рис. 4), а также двухлучевой цифровой осциллограф типа «KEYSIGHT DSOX 1102G» (рис. 5).

На лицевой панели модуля «Усилитель с обратной связью» находятся гнезда для подключения источников входного сигнала, нагрузки и измерительных приборов, гнезда для измерения напряжений и контроля формы сигналов в узлах исследуемой схемы.

Переключатель S1 предназначен для подключения к эмиттеру транзистора VT1 конденсатора C2, шунтирующего напряжение ООС по переменному току. Переключатели для ступенчатого изменения величины сопротивлений R5 и R10 расположены непосредственно под исследуемой схемой. В нижней части модуля размещен выключатель напряжения питания.

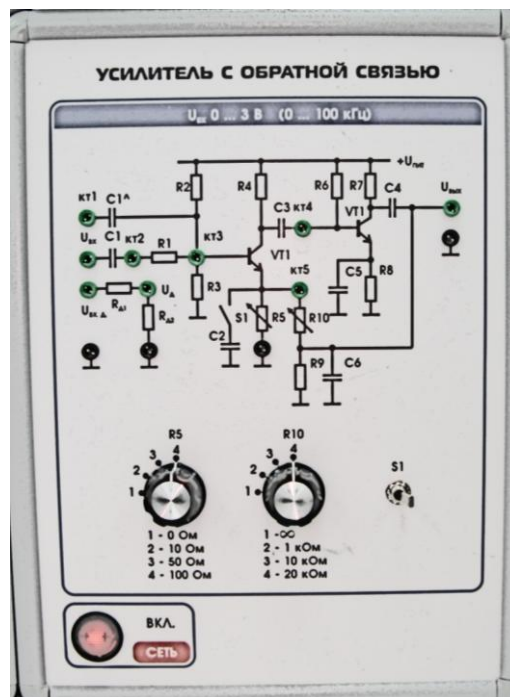


Рис. 3 — Внешний вид модуля «Усилитель с обратной связью»



Рис. 4 — Внешний вид модуля «Функциональный генератор»



Рис. 5 — Внешний вид лицевой панели осциллографа «KEYSIGHT DSOX 1102G»

Принципиальная схема исследуемого усилителя с обратной связью изображена на рис. 6. Конструктивно он собран в модуле «Усилитель с обратной связью». Усилитель содержит два каскада на транзисторах $VT1$ и $VT2$, включенных по схеме с общим эмиттером.

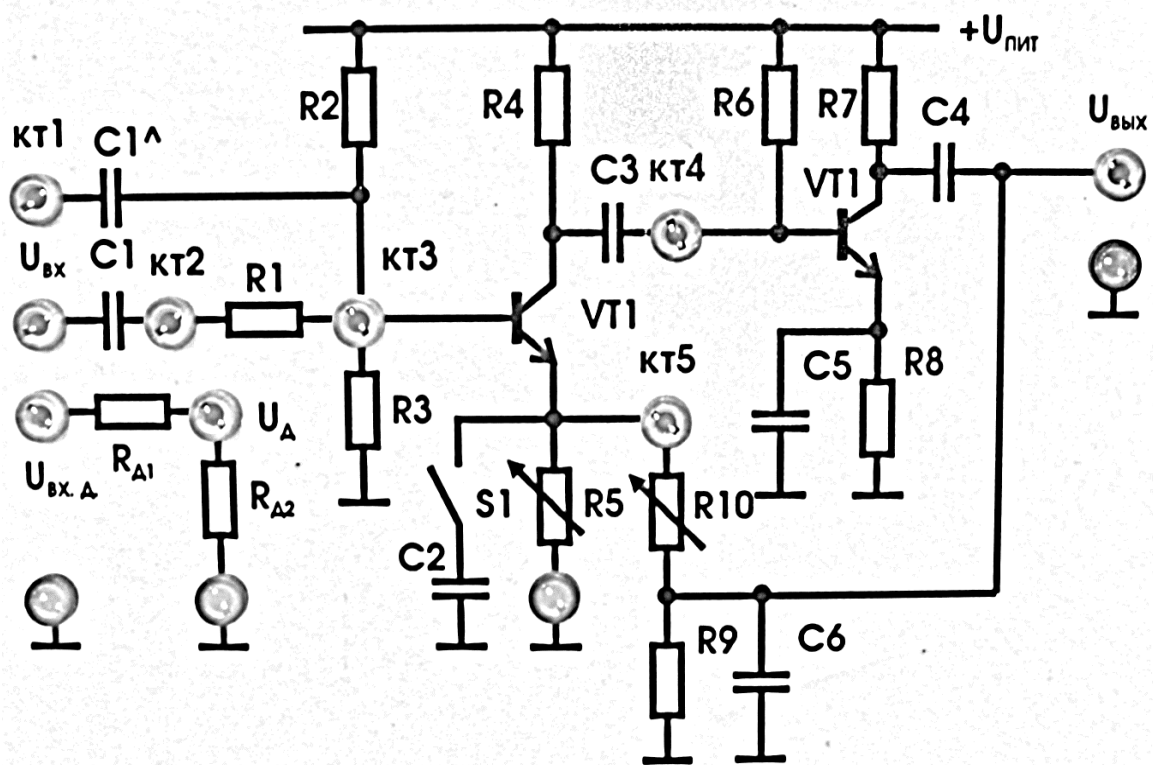


Рис. 6 — Принципиальная схема лабораторного макета

Входом исследуемой схемы служат гнезда « $KT1$ » и «Общий». Резистор $R1$ введен в схему для обеспечения возможности измерения входного сопротивления. При измерении входного сопротивления входное напряжение от источника сигнала подается на гнезда « $U_{вх}$ » и «Общий».

Выходом двухкаскадного усилителя являются гнезда « $U_{вых}$ » и «Общий».

Резисторы $R2$, $R3$ и $R6$ предназначены для обеспечения режима работы транзисторов по постоянному току.

В исследуемом усилителе имеется местная последовательная по току отрицательная обратная связь, снимаемая с резистора $R5$, а также последовательная по напряжению отрицательная обратная связь, охватывающая два усилительных каскада. Глубина этой обратной связи может ступенчато регулироваться с помощью переменного резистора $R10$.

Делитель напряжения $R_{д1}$ — $R_{д2}$ может быть использован для уменьшения амплитуды входного напряжения, при необходимости исследования схемы с малыми напряжениями на входе.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Переключатель $S1$ поставьте в левое положение («Отключено»). Резистор $R5$ — в положение 2 ($R5 = 10 \text{ Ом}$). Резистор $R10$ — в положение 1 ($R10 = \infty$).

4.2. Подсоедините выход модуля «Функциональный генератор» ко входу делителя (гнезда « $U_{\text{вх.д}}$ » и «Общий»). Выход делителя (гнезда « $U_{\text{д}}$ » и «Общий») подсоедините ко входу исследуемого усилителя (гнезда « $кт1$ » и «Общий»). Канал 1 цифрового осциллографа подсоедините ко входу схемы (гнезда « $кт1$ » и «Общий»), а канал 2 осциллографа к выходу схемы (гнезда « $U_{\text{вых}}$ » и «Общий»).

4.3. Включите модуль и «Функциональный генератор» и установите частоту 1 кГц, выходное напряжение — $U = 0 \text{ В}$, форма выходного напряжения — синусоидальная. Включите модуль «Усилитель с обратной связью».

Включите цифровой осциллограф и установите режим измерения напряжений. Для этого нажмите кнопку «Mess» и установите для входов 1 и 2 измерение напряжений «DC RMS-ПЭ». Измеренные напряжения будут отображаться в нижней части экрана.

4.4. Определите коэффициент усиления исследуемой схемы. Для этого:

- увеличивая напряжение на входе исследуемой схемы установите максимальное неискаженное напряжение сигнала на выходе;
- используя цифровой осциллограф, измерьте напряжения на входе и выходе;
- рассчитайте коэффициент усиления.

4.5. Установите переключатель « $R5$ » в положение 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$). При этом глубина отрицательной обратной связи увеличится.

Определите коэффициент усиления схемы для установленной ООС (повторите п. 4.4).

4.6. Установите переключатель « $R5$ » в положение 4 ($R5 = 100 \text{ Ом}$) и определите коэффициент усиления схемы для установленного значения резистора $R5$ (повторите п. 4.4).

4.7. Проанализируйте полученные результаты и определите зависимость коэффициента усиления от глубины последовательной по току отрицательной обратной связи.

4.8. Установите переключатель « $R5$ » в положение 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$), переключатель « $R10$ » в положение 1 ($R10 = \infty$).

Определите зависимость коэффициента усиления от глубины последовательной по напряжению ООС. Для этого:

- увеличивая напряжение на входе установите максимальное неискаженное напряжение сигнала на выходе;
- определите напряжения на входе и выходе схемы;
- рассчитайте коэффициент усиления.
- переключатель « $R10$ » установите в положение 2 ($R10 = 1 \text{ кОм}$), установите на выходе усилителя максимальное неискаженное напряжение и определите коэффициент усиления схемы;

— переключатель «R10» установите в положение 3 ($R_{10} = 10 \text{ кОм}$), установите на выходе усилителя максимальное неискаженное напряжение и определите коэффициент усиления схемы;

— переключатель «R10» установите в положение 4 ($R_{10} = 20 \text{ кОм}$), установите на выходе усилителя максимальное неискаженное напряжение и определите коэффициент усиления схемы.

Сделайте выводы о зависимости коэффициента усиления от глубины последовательной по напряжению ООС.

4.9. Исследуйте влияние обратной связи на амплитудно-частотную характеристику усилителя и полосу пропускания усилителя.

Подключите выход цифрового осциллографа «Gen Out» (см. рис. 5) ко входу усилителя (гнезда «кТ1» и «Общий»). К этим же гнездам лабораторного макета подключите канал 1 цифрового осциллографа. Канал 2 цифрового осциллографа подключите к выходу исследуемой схемы (гнезда « $U_{\text{ВЫХ}}$ » и «Общий»). Осциллограф переведите в режим «Анализ» (нажмите кнопку «Analyze»). Далее нажмите кнопку «Функции FRA» и выберите режим «Анализ частотной характеристики». Нажмите кнопку «Настройки» и установите минимальную частоту анализа — 20 Hz ; максимальную частоту анализа — 20 MHz ; амплитуду входного напряжения — 50 mVpp .

Установите переключатель «R5» в положение 4 ($R_5 = 100 \text{ Ом}$), переключатель «R10» в положение 2 ($R_{10} = 1 \text{ кОм}$).

4.10. Измерение амплитудно-частотной характеристики и определение нижней и верхней граничных частот полосы пропускания произведите в следующей последовательности:

— нажмите кнопку «Пуск». После этого на экране осциллографа через некоторое время (50—60 с) появится изображение АЧХ исследуемого усилителя;

— включите на осциллографе режим измерения с помощью курсора (нажмите кнопку «Cursors») (см. рис. 5);

— вращая ручку «Entry» и изменяя положение курсора, определите коэффициент усиления на частоте 1 кГц ;

— перемещая курсор в сторону нижних частот определите частоту f_n , на которой коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ;

— перемещая курсор в сторону верхних частот определите частоту f_v , на которой коэффициент усиления уменьшится на 3 дБ относительно коэффициента усиления на частоте 1 кГц .

— полученные частоты f_n и f_v являются граничными частотами полосы пропускания усилителя;

— изменяя положение курсора от 20 Гц до 20 МГц измерьте зависимость коэффициента усиления от частоты.

4.11. Установите переключатель «R5» в положение 3 ($R_5 = 50 \text{ Ом}$), переключатель «R10» остается в положении 2 ($R_{10} = 1 \text{ кОм}$). Измерьте АЧХ усилителя и определите полосу пропускания в соответствии с методикой, изложенной в п. 4.10.

4.12. Установите переключатель «R10» в положении 1 ($R_{10} = \infty$),

переключатель «R5» остается в положении 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$). Измерьте АЧХ усилителя и определите полосу пропускания в соответствии с методикой, изложенной в п. 4.10.

4.13. Сделайте выводы о влиянии обратной связи на полосу пропускания усилителя.

5. Содержание отчета

5.1. Цель работы.

5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

5.3. Результаты измерений, проведенных в п. 4.4—4.8 и рассчитанные коэффициенты усиления.

5.4. Результаты измерений, проведенных в п. 4.9—4.12, а также амплитудно-частотные характеристики, построенные по этим данным.

5.5. Экспериментально найденные (по п. 4.9—4.12) граничные частоты полосы пропускания усилителя при различной глубине ООС.

5.6. Таблица сравнения коэффициентов усиления на частоте 1 кГц, найденных при проведении измерений по п. 4.4—4.8 и по п. 4.9—4.12.

5.5. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

6.1. Что такое обратная связь?

6.2. Поясните способы снятия и ввода обратной связи.

6.3. Как влияют частотно-независимая и частотно-зависимая обратные связи на характеристики усилителя?

6.4. Найдите на принципиальной схеме лабораторного макета обратные связи и определите их знак (положительная или отрицательная). Поясните их принцип действия.

6.5. Какими методами можно осуществить коррекцию амплитудно-частотной и переходной характеристик усилителя?

6.6. Как изменяется АЧХ усилителя при введении частотно-зависимой обратной связи?

6.7. Как изменяется входное сопротивление усилителя при последовательной и параллельной по способу ввода отрицательной обратной связи?

6.8. Определите способ снятия и способ ввода обратных связей, используемых в лабораторном макете.

6.9. Поясните принцип действия низкочастотной коррекции.

7. Библиографический список

1. Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств / Б.Ф. Лаврентьев. — М.: Академия 2010. — 260 с.
2. Остапенко Г.С. Усилительные устройства / Г.С. Остапенко. — М.: Радио и связь, 2009. — 400 с.
3. Павлов В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. — М.: Радио и связь, 2002. — 320 с.
4. Конспект лекций.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы по дисциплине
«Схемотехника аналоговых электронных устройств»*

Составитель: **Мельников** Анатолий Викторович

В авторской редакции

Изд. № 118/19. Объем 1 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет"