

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Московский технический университет связи и информатики"



Методические указания
к практическим занятиям

СХЕМОТЕХНИКА

Направление подготовки:

09.03.01 Информатика и вычислительная техника

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Профиль:

Многоканальные телекоммуникационные системы

Сети связи и системы коммутации

Защищенные системы и сети связи

Системы радиосвязи и радиодоступа

Вычислительные машины, комплексы, системы и сети

Программное обеспечение и интеллектуальные системы

Ростов-на-Дону
2019

УДК 681.3.06 (076)

ББК 32.07

Львов В.Л., Чикалов А.Н. Схемотехника. Методические указания к практическим занятиям. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2019. - 59 с.

В пособии изложены методические рекомендации, содержательные материалы и контрольные задания для проведения практических занятий по освоению основ аналоговой схемотехники, использованию аналоговых устройств в различных системах. Пособие содержит необходимые справочные материалы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника и 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профилей Многоканальные телекоммуникационные системы, Сети связи и системы коммутации, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Вычислительные машины, комплексы, системы и сети, Программное обеспечение и интеллектуальные системы.

Пособие предназначено для использования при изучении дисциплин Схемотехника, Схемотехника телекоммуникационных устройств, а также может быть использовано преподавателями и студентами при изучении родственных дисциплин и в процессе самостоятельной работы.

Учебное пособие обсуждено и одобрено на заседании кафедры ИВТ.
Протокол №1 от 26.08.2019

Рецензент Зав. кафедрой ИВТ д.т.н. профессор Соколов С.В.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Аналитический расчет каскада предварительного усиления	4
1.1. Составление схемы транзисторного усилителя по схеме с ОЭ .	8
1.2. Расчет транзисторного усилителя по схеме с ОЭ.	9
2. Компьютерное моделирование электронных устройств	15
2.1. Исследование типовых возможностей интерфейса пользователя программного комплекса	24
2.2. Исследование возможностей основных средств измерений . . .	25
2.3. Технология моделирования электронных схем	30
3. Анализ влияния обратной связи в усилителях	33
3.1. Исследование усилителя с отрицательной ОС последовательной по напряжению.. . . .	41
3.2. Исследование усилителя с отрицательной ОС параллельной по напряжению	43
3.3. Исследование усилителя с отрицательной ОС последовательной по току.	44
3.4. Исследование усилителя с отрицательной ОС параллельной по току	45
4. Анализ частотных и переходных характеристик усилительных каскадов	48
4.1. Расчет передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и ПХ для усилителя с емкостной нагрузкой	57
4.2. Анализ характеристик усилителя с емкостной нагрузкой на основе моделирования.	58
4.3. Расчет передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и ПХ для усилителя с индуктивной нагрузкой	58
4.4. Анализ характеристик усилителя с индуктивной нагрузкой на основе моделирования	59

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАСКАДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ

Цель

1. Углубить и закрепить теоретические знания по принципам построения усилителей, назначению элементов типовых схем, основным характеристикам усилителей сигналов;
2. Получить практические навыки расчета параметров элементной базы схемы транзисторного усилителя с заданными характеристиками.

Учебные вопросы

- 1.1. Составление схемы транзисторного усилителя по схеме с ОЭ;
- 1.2. Расчет транзисторного усилителя по схеме с ОЭ;

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Павлов В. Н., Ногин В. Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. Для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320с.
3. Алиев И. И., Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике. М.: РадиоСофт, 2003. – 240с.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.
3. Краткие ответы на те контрольные вопросы для самопроверки, которые ещё не нашли своего отражения в отчете, но вызывают затруднения для понимания.

Актуальность занятия

Усилитель является базовым узлом для построения абсолютного большинства схем аналоговых и цифровых устройств. Поэтому понимание работы схемы и назначения основных элементов схемы является обязательным для специалиста. Расчет схемы уточняет влияние ее элементов на параметры и характеристики усилителя.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Какие вы знаете типы усилителей?
2. Какие бывают виды транзисторов?
3. За счет чего происходит усиление выходного сигнала?
4. Какие основные характеристики имеет усилитель на транзисторе?

5. Какими причинами вызван завал частотной характеристики усилителя в области низких и высоких частот?

Краткие сведения из теории

Усилитель является одним из самых распространенных электронных устройств, применяемых в аналоговых системах телекоммуникаций. Усилители подразделяются на усилители предварительные (усилители напряжения) и усилители мощности. При этом все каскады усилителя обладают общими свойствами, различие между ними может быть только количественное: разные токи, напряжения, различные значения резисторов, конденсаторов и т. п.

Для каскадов предварительного усилителя наиболее распространены резистивные схемы, в которых нагрузкой усилителя служит резистор. В зависимости от способа включения транзистора схемы усилителей подразделяются на:

1) схемы с общей базой - ОБ (рис.1.1);

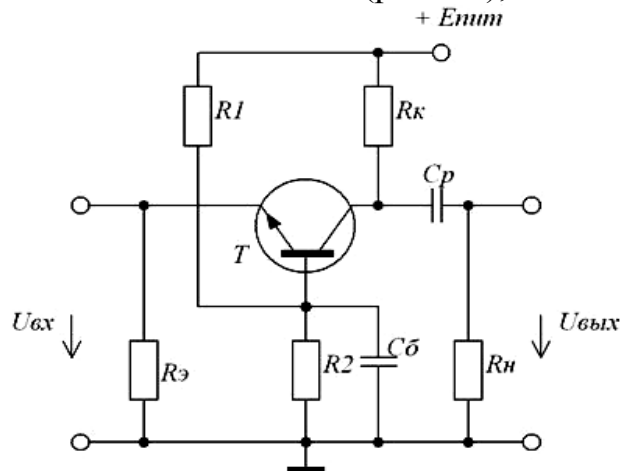


Рис.1.1. Схема транзисторного усилителя с общей базой

2) схемы с общим коллектором - ОК (эмиттерный повторитель) (рис.1.2);

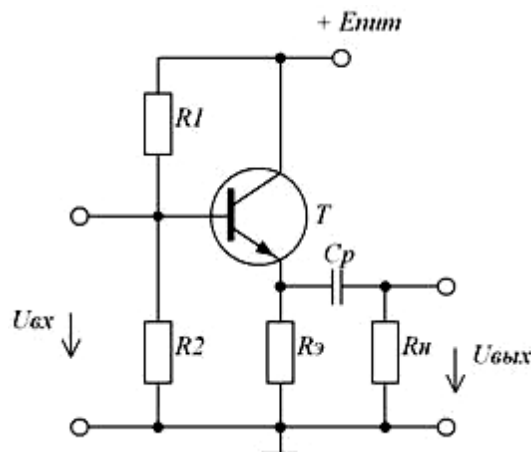


Рис.1.2. Схема транзисторного усилителя с общим коллектором

3) схемы с общим эмиттером - ОЭ (рис.1.3).

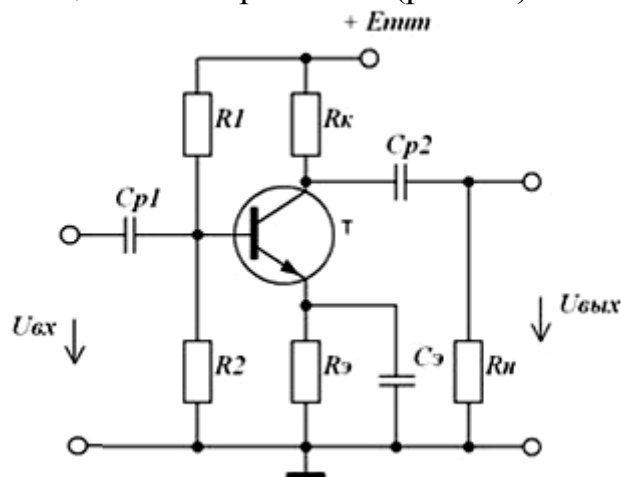


Рис.1.3. Схема транзисторного усилителя с общим эмиттером

Наиболее распространенной является схема с ОЭ. Схема с ОБ в предварительных усилителях встречается редко. Эмиттерный повторитель обладает наибольшим из всех трех схем входным и наименьший выходным сопротивлениями, поэтому его применяют для согласования источника сигнала, имеющего большое выходное сопротивление с низкоомным входом каскада предварительного усиления.

Название схемы "с общим эмиттером" означает, что вывод эмиттера транзистора по переменному току является общим для входной и выходной цепей каскада.

Существует множество вариантов выполнения схемы усилительного каскада на транзисторе с ОЭ. Это обусловлено главным образом особенностями задания режима покоя каскада. Рассмотрим усилительный каскад на примере типовой схемы (рис.1.4), получившей наибольшее применение при реализации каскада на биполярном транзисторе. На этой схеме указаны все необходимые токи и напряжения.

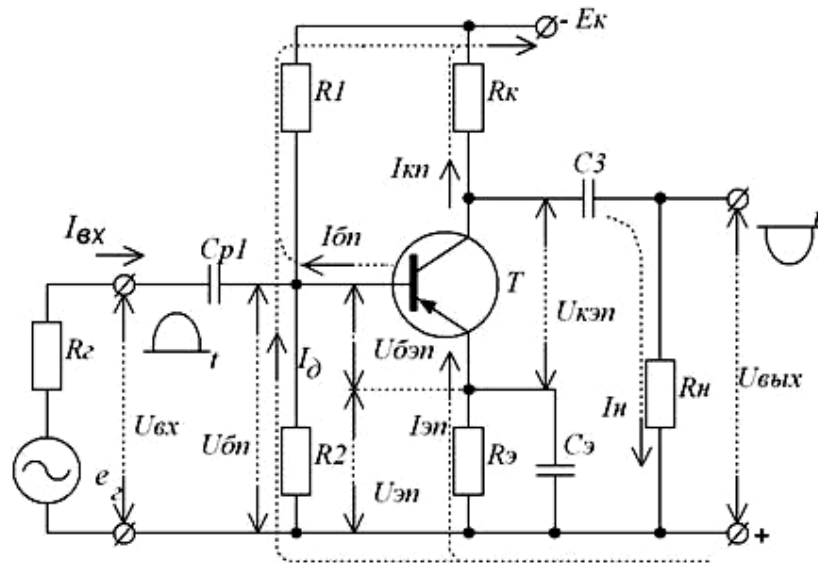


Рис.1.4. Типовая схема усилителя с ОЭ

Основными элементами схемы являются источник питания E_K , управляемый элемент - транзистор T и резистор R_K . Эти элементы образуют главную цепь усилительного каскада, в которой за счет протекания управляемого по цепи базы коллекторного тока создается усиленное переменное напряжение на выходе схемы. Остальные элементы каскада выполняют вспомогательную роль. Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} являются разделительными. Конденсатор C_{p1} исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника входного сигнала по постоянному току, конденсатор C_{p2} пропускает в цепь нагрузки только переменную составляющую выходного напряжения.

Резисторы R_1 и R_2 используются для задания режима покоя каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, ток покоя управляемого элемента (в данном случае ток $I_{ЭП}$) создается заданием соответствующей величины тока базы покоя $I_{БП}$. Резистор R_1 совместно с R_2 обеспечивают напряжение покоя на базе $U_{ЭП}$ относительно зажима "+" источника питания, которое определяет величину смещения $I_{ЭП}$.

Резистор R_3 является элементом отрицательной обратной связи, предназначенным для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры. Температурная зависимость параметров режима покоя обуславливается зависимостью коллекторного тока покоя $I_{КП}$ от температуры. При отсутствии мер по стабилизации тока $I_{КП}$, его температурные изменения вызывают изменение режима покоя каскада, что может привести к работе каскада в нелинейной области характеристик транзистора и искажению формы выходного сигнала. Вероятность появления искажений повышается с увеличением амплитуды выходного сигнала.

Проявление отрицательной обратной связи и ее стабилизирующего действия на ток $I_{КП}$ нетрудно показать непосредственно на схеме (см.

рис.1.4). Предположим, что под влиянием температуры ток $I_{кп}$ увеличился. Это отражается на увеличении тока $I_{эп}$, повышении напряжения $U_{эп} = I_{эп} \cdot R_э$ и соответственно снижении напряжения $U_{бэп}$. Ток базы $I_{бп}$ уменьшается, вызывая уменьшение тока $I_{эп}$, чем создается препятствие наметившемуся увеличению тока $I_{кп}$. Иными словами, стабилизирующее действие отрицательной обратной связи, создаваемой резистором $R_э$, проявляется в том, что температурные изменения параметров режима покоя передаются цепью обратной связи в противофазе на вход каскада, препятствуя тем самым изменению тока $I_{кп}$, а, следовательно, и напряжения $U_{вых}$.

Конденсатор $C_э$ шунтирует резистор $R_э$ по переменному току, исключая тем самым проявление отрицательной обратной связи в каскаде по переменным составляющим.

Принцип действия каскада с ОЭ заключается в следующем. При наличии постоянных составляющих токов и напряжений в схеме подача на вход каскада переменного напряжения приводит к появлению переменной составляющей тока базы транзистора, а, следовательно, переменной составляющей тока в выходной цепи каскада (в коллекторном токе транзистора). За счет падения напряжения на резисторе $R_к$ создается переменная составляющая напряжения на коллекторе, которая через конденсатор $C_{р2}$ передается на выход каскада - в цепь нагрузки.

Задание 1.1. Составление схемы транзисторного усилителя по схеме с ОЭ

Начертить принципиальную схему резисторного каскада предварительного усиления гармонических сигналов на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

Тип транзистора выбрать по последней цифре номера зачетной книжки из вариантов по таблице 1.1.

Схема должна соответствовать требованиям ЕСКД:

- ГОСТ 2.710-81 Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах;
- ГОСТ 2.702-75920000 Правила выполнения электрических схем;
- ГОСТ 2.701-2008 Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению;
- ГОСТ 2.728-74(2002) Обозначения условные графические в схемах. Регистры, конденсаторы;
- ГОСТ 2.730-73(2002) Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые.

В отчете представить:

- схему электрическую принципиальную усилителя.

Задание 1.2. Расчет транзисторного усилителя по схеме с ОЭ

Рассчитать параметры элементов схемы, режим работы каскада по постоянному току, коэффициент усиления в области средних частот, входные параметры каскада и амплитуду выходного сигнала. Исходные данные для расчета приведены в табл.1.1. Номер варианта - последняя цифра номера зачетной книжки.

Перед расчетом рекомендуется проанализировать цепи протекания постоянных и переменных токов. Такие задачи приходится решать при анализе и расчете любой усилительной схемы. В частности, знание цепей прохождения постоянных токов нужно для расчета цепей питания электрических схем. Цепи протекания тока источника сигнала определяют входное сопротивление каскада, а цепи, по которым протекает постоянная или переменная составляющая выходного тока, определяют нагрузку каскада соответственно по постоянному и переменному току.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета

Технические данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Марка транзистора	КТ 361А	КТ 351Б	КТ 315А	КТ 357Б	КТ 352А	КТ 361А	КТ 351Б	КТ 315Б	КТ 357Б	КТ 352А
Амплитуда сигнала на нагрузке U_H , В	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3
Верхняя граничная частота $f_{B\sqrt{2}}$, МГц	3,6	1,8	2,0	4,0	3,6	2,0	7,0	6,0	4,5	2,4
Нижняя граничная частота $f_{H\sqrt{2}}$, Гц	200	300	400	500	100	250	400	300	150	350
Емкость нагрузки C_H , пФ	160	180	200	190	170	160	100	150	190	120
Сопротивление нагрузки R_H , кОм	10	15	12	20	16	14	10	15	12	17
Внутр. сопрот. ист. сигнала R_G , Ом	500	400	700	200	300	450	600	650	550	350
Напряжение ист. питания U_0 , В	12	14	10	12	15	10	12	15	14	14

Для расчета целесообразно использовать схему, на которой показаны не только реальные физические дискретные компоненты, но и отдельные элементы, которые несут на себе свойства этих физических компонентов (рис.1.5). Такие дополнительные элементы конкретизируют важные свойства физических элементов схемы, характер их влияния на параметры усилителя и

используются для выполнения расчетов. В частности, на рисунке показаны обобщенная входная емкость C_0 , внутренне сопротивление источника сигнала R_{Γ} , емкость нагрузки C_H .

Выписать исходные данные для расчета по своему варианту, а также параметры транзистора (табл.1.2).

Расчет каскадов предварительного усиления ведется аналитическим методом. Это возможно при допущении, что в таких усилителях присутствуют незначительные амплитуды входного сигнала. Это в свою очередь позволяет считать, что при подаче на вход периодического сигнала параметры усилителя остаются неизменными за период сигнала.

Формулы, по которым ведется расчет, обязательно должны быть приведены в отчете. Подставляемые в формулы числовые значения необходимо указывать в основных единицах (вольт, ампер, фарада, генри и т.д.). Окончательный результат должен быть вычислен с точностью до трех значащих цифр, округлен до двух значащих цифр и снабжён знаком основной или производной размерности (миллиампер - мА, килоом - кОм и т.д.).

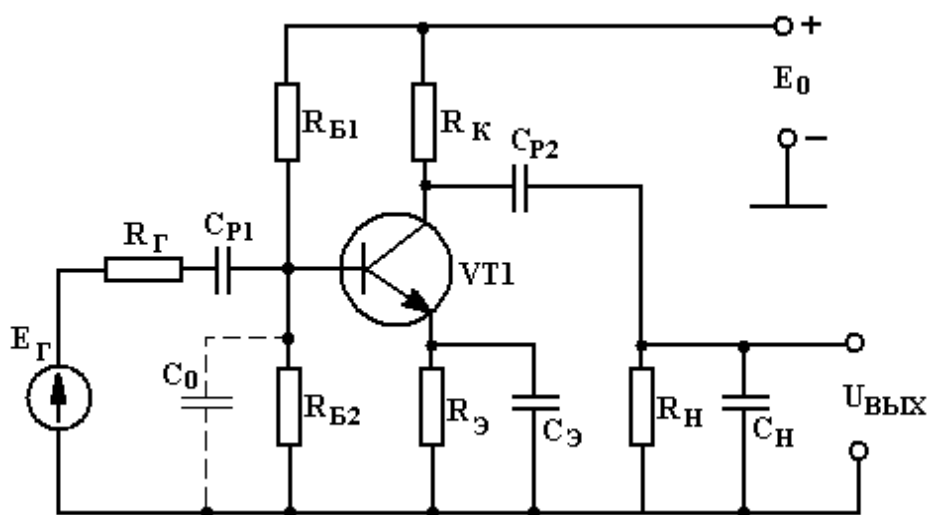


Рис.1.5. Схема усилителя с ОЭ и дополнительными элементами для расчета

После вычисления сопротивления какого-либо резистора или емкости конденсатора необходимо сразу же выбрать ближайший номинал в соответствии с рядом номинальных значений (табл.1.3) и в дальнейших расчетах использовать только эту величину.

Номиналы сопротивлений и емкостей больше 100 получают умножением этой шкалы на 10, 100, 1000 и т.д.

Для резисторов применяются коэффициенты $10^{-1} - 10^6$, для конденсаторов применяются коэффициенты $10^{-12} - 10^{-5}$.

Текстовые пояснения к расчетам должны быть предельно кратки.

В процессе защиты отчета автору предстоит обосновать принятые решения и прокомментировать этапы выполненных расчетов.

Таблица 1.2

Параметры транзисторов

Тип транзистора	Параметры						Структура транзистора
	$h_{21Эmin}$	$h_{21Эmax}$	$R_{Б, Ом}$	$U_{КЭmax, В}$	$C_{БЭ, пФ}$	$C_{К, пФ}$	
КТ315А	30	120	140	20	80	7	n-p-n
КТ315Б	50	350	130	15	85	7	n-p-n
КТ361А	20	90	150	20	90	9	p-n-p
КТ357Б	20	100	200	20	70	5	p-n-p
КТ351Б	50	200	150	15	90	15	p-n-p
КТ352А	25	120	200	15	80	15	p-n-p

Таблица 1.3

Ряды номинальных сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов

Точн. +5%	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
Точн. +10%	10		12		15		18		22		27		33		39		47		56		68		82	
Точн. +20%	10				15				22				33				47				68			

Расчет элементов принципиальной схемы производится по допустимой величине спада АЧХ на граничных частотах полосы пропускания каскада. С целью упрощения расчетов в инженерной практике полосу пропускания усилителя Δf определяют в пределах границ, где коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с максимальной величиной в области средних частот. Нижняя граничная частота обозначается $f_{H\sqrt{2}}$, верхняя $f_{B\sqrt{2}}$.

Рекомендуется следующий примерный порядок решения задачи:

1. Приводится принципиальная схема каскада (рис.1.5).

2. С целью достижения максимального коэффициента усиления согласно [2] рассчитывается наибольшая допустимая величина эквивалентного сопротивления нагрузки в области верхних частот:

$$R_{ЭКВ} \leq \frac{1}{2\pi \cdot f_{B\sqrt{2}} \cdot C_0} [\text{Ом}],$$

где $C_0 = C_H + C_M + C_{ВЫХ}$;

C_H – емкость нагрузки;

C_M – емкость монтажа; $C_M \approx 3 \dots 6$ пФ;

$C_{ВЫХ}$ – выходная емкость усилительного прибора ($C_{ВЫХ} \approx C_K$).

3. Рассчитывается сопротивление резистора в цепи коллектора

$$R_K = \frac{R_H \cdot R_{ЭКВ}}{R_H - R_{ЭКВ}} [\text{Ом}].$$

4. Коллекторный ток покоя транзистора должен быть несколько больше амплитуды переменной составляющей тока

$$I_K = (1,5 \dots 3) \frac{U_H}{R_{ЭКВ}} [\text{А}].$$

Если расчетный ток покоя получится меньше 2...3 мА, то его следует увеличить до указанной величины. Иначе ухудшатся частотные свойства транзистора.

5. Рассчитывается резистор в цепи эмиттера

$$R_Э = \frac{E_0 - U_{ЭК} - I_K \cdot R_K}{I_K} [\text{Ом}],$$

где $U_{ЭК}$ – напряжение покоя. Обычно $U_{ЭК} \approx 3 \dots 5$ В.

6. Рассчитывается емкость разделительного конденсатора

$$C_{P2} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{H\sqrt{2}} \cdot (R_K + R_H)} [\text{Ф}].$$

7. Рассчитывается ток базы

$$I_B = \frac{I_K}{h_{21Э}} [\text{А}],$$

где $h_{21Э} = \sqrt{h_{21Э\text{МИН}} \cdot h_{21Э\text{МАКС}}}$ – расчетный статический коэффициент передачи тока.

8. Удовлетворительная стабилизация тока покоя достигается, если выбрать ток делителя $I_D \approx 10 \cdot I_B$. Тогда

$$R_{Б2} = \frac{I_Э \cdot R_Э + U_{БЭ}}{I_D} [\text{Ом}] \quad \text{и} \quad R_{Б1} = \frac{E_0}{I_D} - R_{Б2} [\text{Ом}],$$

где $U_{БЭ} \approx 0,6$ В – падение напряжения на переходе база – эмиттер (для кремниевых транзисторов). Кроме того, $I_э = I_к + I_б$.

9. Рассчитывается входное сопротивление транзистора

$$R_{BXVT} = r_B + \frac{0,026}{I_K} \cdot (1 + h_{21э}) [\text{Ом}],$$

где r_B – сопротивление базы транзистора.

10. Рассчитывается крутизна тока эмиттера

$$S_э = \frac{h_{21э} + 1}{R_{BXVT} + R_{ГЭКБ}} [1/\text{Ом}],$$

где $R_{ГЭКБ} = \left(\frac{1}{R_Г} + \frac{1}{R_{Б1}} + \frac{1}{R_{Б2}} \right)^{-1}$ – эквивалентное сопротивление генератора сигнала.

11. Рассчитывается емкость блокировочного конденсатора в цепи эмиттера

$$C_э = \frac{1,1 \cdot S_э}{f_H \sqrt{2}} [\Phi].$$

12. Рассчитывается коэффициент усиления по напряжению

$$K = \frac{h_{21э}}{R_{BXVT}} \cdot R_{ЭКБ}.$$

13. Для обеспечения возможности расчета предыдущего каскада рассчитываются амплитуда входного сигнала U_{BX} , входное сопротивление каскада R_{BX} и входная емкость C_{BX}

$$U_{BX} = \frac{U_H}{K} [\text{В}];$$

$$R_{BX} = \left(\frac{1}{R_{Б1}} + \frac{1}{R_{Б2}} + \frac{1}{R_{BXVT}} \right)^{-1} [\text{Ом}];$$

$$C_{BX} = C_{БЭ} + C_K \cdot (1 + K) [\Phi].$$

В отчете представить:

- дополненную расчетными элементами схему электрическую принципиальную усилителя из задания 1.1;
- исходные данные для расчета по своему варианту;
- формулы и расчеты по приведенным требованиям оформления;

- значения параметров элементов схемы, нанесенные в соответствии с требованиями ЕСКД. Номер статьи и ГОСТ, в которой излагаются эти требования.

Вопросы для самоконтроля

1. Дать сравнительную оценку каскадов при различных способах включения.
2. Как различаются усилительные каскады по режимам работы?
3. Способы подачи смещения в усилителях на полевых транзисторах.
4. Что такое полоса пропускания усилителя?
5. Как оцениваются нелинейные искажения в усилителе?
6. Что сказывается на нестабильности усилителя?
7. Какие способы термостабилизации существуют?
8. Какие способы стабилизации рабочей точки вы знаете?
9. Каково назначение разделительных конденсаторов?
10. Нарисуйте временную диаграмму сигнала до разделительного конденсатора и после него.
11. Объясните физику протекания или непротекания тока через конденсатор.
12. С какой целью создают предварительный усилитель?
13. В каком ГОСТ (из приведенного списка) и какие положения и излагаются?

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель

1. Получить представление о возможностях средств компьютерного моделирования электронных устройств;
2. Приобрести первичные навыки использования среды моделирования для анализа работы и оценки характеристик электронных устройств.

Учебные вопросы

- 2.1. Исследование типовых возможностей интерфейса пользователя программного комплекса;
- 2.2. Исследование возможностей основных средств измерений;
- 2.3. Технология моделирования электронных схем

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Алиев И. И., Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике. М.: РадиоСофт, 2003. – 240с.
3. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
5. Львов В.Л. Методическое пособие по применению программы Electronics Workbench для проведения лабораторных работ по дисциплинам кафедры систем передачи и обработки информации. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2012. – 54 с.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Актуальность занятия

В настоящее время средства электронного моделирования приобрели широкую популярность. Они обеспечивают оперативность, высокую техническую и экономическую эффективность процесса проектирования электронных устройств. Без них не обходится ни одно современное образовательное учреждение. Освоение одного из образцов подобных программных продуктов позволит успешно освоить все последующие новые образцы пакетов компьютерного моделирования.

Вопросы для подготовки к занятию

1. В чем преимущества и недостатки систем электронного моделирования?

2. Какие параметры схемы усилителя подлежат моделированию?
3. Какие типовые приемы должна реализовывать система моделирования?
4. Какие системы моделирования вам известны?
5. Какими причинами вызван завал частотной характеристики усилителя в области низких и высоких частот?

Компьютерное моделирование усилителя

В настоящее время набор средств моделирования электронных схем достаточно широк. Они существуют самостоятельно либо в составе систем комплексного проектирования электронных устройств аналогового или цифрового характера. Таким системами являются, например, PSpice, CircuitMaker, Multisim, Micro-Cap, Or CAD и т.д.

В данном разделе моделирование схем будет рассмотрено в программной среде Electronics Workbench (EWB). Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой выбор широко распространенных электронных компонентов и элементов.

Electronics Workbench позволяет строить аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы различной степени сложности. Исследуемая схема собирается на рабочем поле при одновременном использовании мыши и клавиатуры. Применение в работе только клавиатуры невозможно.

Это мощный программный пакет с интуитивно понятным интерфейсом и эффективным инструментом описания схем. Пакет предусматривает средства редактирования, удобного соединения и всестороннюю базу данных, разбитую на логические группы прямо на рабочем столе. Одинаковые последовательности действий выполняются автоматически, не требуя времени на проверку. Все это позволяет анализ и разработку схем осуществлять с минимальным временем.

Пакет включает многое средства и функции анализа, а также мощные средства просмотра и анализа данных моделирования.

Задание 2.1. Исследование типовых возможностей интерфейса пользователя программного комплекса

Необходимо просмотреть все указанные элементы интерфейса, найти и выполнить открытие иерархических вкладок, выполнить предлагаемые операции.

В отчете представить состав панели элементов схем и приборов.

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, иконок меню, панели набора элементов схем и приборов и рабочей области (рис.2.1).

Полоса меню состоит из следующих типовых компонентов: меню работы с файлами (File), меню редактирования (Edit), меню работы со

схемами (Circuit), меню анализа схем (Analysis), меню работы с окнами (Window), меню работы с файлами справоч (Help).

Назначение этих меню в основном аналогично типовым стандартным пакетам. Необходимые пояснения будут даны по ходу описания процесса моделирования. Более детальные сведения о пакете можно найти в источниках в приведенном списке литературы для подготовки к занятию.

Набор схемы осуществляется в рабочей области из элементов библиотек, в которых имеются активные и пассивные элементы, средства измерения, генерации и питания электронных схем. Для каждого элемента осуществляется настройка параметров, что позволяет подобрать параметры практически для любой электронной схемы.

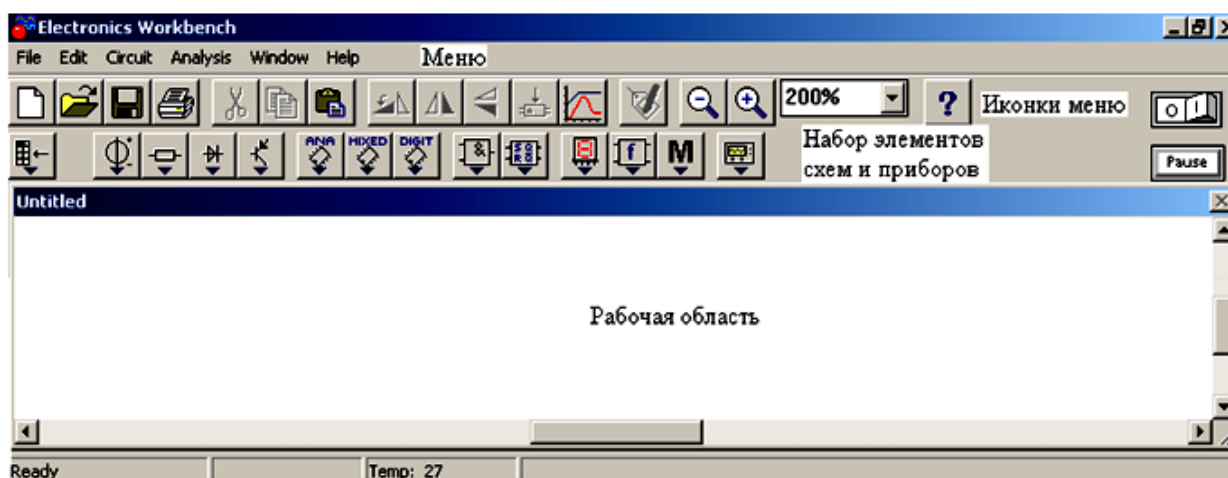


Рис.2.1. Интерфейс пользователя

Для выполнения моделирования устройства необходимо последовательно выполнить следующие этапы.

Выбор и установка компонентов схемы

В качестве объекта для моделирования будет рассмотрен усилитель, схема которого рассчитана в разделе 1. Сначала на рабочее поле EWB переносятся компоненты из библиотек программы в соответствии со схемой. Одиннадцать разделов библиотеки программы EWB поочередно могут быть вызваны с помощью иконок. Для открытия каталога нужной библиотеки необходимо подвести курсор мыши к соответствующей иконке и нажать один раз ее левую кнопку, после чего открывается каталог данного раздела библиотеки. Необходимый для создания схемы значок (символ) компонента переносится из каталога на рабочее поле программы движением мыши при нажатой левой кнопке, после чего кнопка отпускается.

Под полосой меню и иконками меню размещена **панель элементов схем и приборов**, которая содержит в данной версии программы 14 кнопок (рис.2.2). Каждая кнопка панели элементов представляет собой библиотеку

компонентов (элементов) схем, контрольно-измерительных приборов, инструментов и т.д.



Рис.2.2. Панель элементов схем и приборов

Для решения задачи интерес представляют следующие кнопки:

1. Sources - источники тока и напряжения;
2. Basic - основные пассивные элементы;
3. Diodes - диоды;
4. Transistors - транзисторы;
5. Analog ICs - аналоговые микросхемы;
6. Mixed ICs - микросхемы смешанного типа;
7. Digital ICs - цифровые микросхемы;
8. Logic Gates - логические цифровые микросхемы;
9. Digital - цифровые микросхемы;
10. Indicator - индикаторные устройства;
11. Controls - аналоговые вычислительные устройства;
12. Miscellaneous - компоненты смешанного типа;
13. Instruments - контрольно-измерительные приборы

Библиотека **Sources** представлена следующими источниками (рис.2.3), среди которых наиболее широко применяются следующие:

1. Ground – заземление;
2. Battery – источник постоянного напряжения;
3. DC Current Source – источник постоянного тока;
4. AC Voltage Source – источник переменного напряжения;
5. AC Current Source – источник переменного тока.



Рис.2.3 Библиотека **Soures** – источников тока и напряжения

Среди пассивных элементов **Basic** потребуются резисторы и конденсаторы (рис2.4.):

- 1) Connector – соединяющий узел;
- 2) Resistor – резистор;
- 3) Capacitor – конденсатор.



Рис.2.4. Библиотека **Basic** – пассивных элементов

Среди транзисторов могут быть использованы биполярные транзисторы различной проводимости (рис.2.5):

- 1) npn - transistor – биполярный n-p-n транзистор;
- 2) pnp - transistor – биполярный p-n-p транзистор.

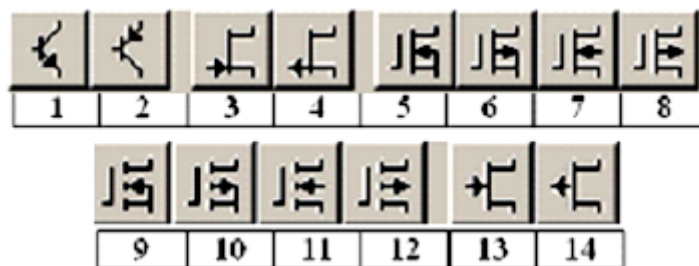





Рис.2.5. Библиотека **Transistor** – транзисторов

Выделение и перемещение компонентов

Выделение объекта осуществляется при помощи мыши (под объектом подразумевается как один компонент, так и группа компонентов). При выборе компонента нужно установить указатель мыши на нужный компонент (при этом изображение указателя изменится на ) и щелкнуть левой кнопкой мыши. Для выбора группы компонентов нужно установить указатель мыши в один из углов прямоугольной области, содержащей группу, и, нажав левую кнопку мыши, растянуть рамку до необходимых размеров, после чего отпустить кнопку. Выбранный объект изменяет свой цвет на красный. Снять выделение можно щелчком мыши в любой точке рабочего поля.

Перемещение объекта производится при помощи мыши. Для перемещения объект нужно предварительно выделить, а затем установить указатель мыши на объект (при этом изображение указателя изменится на ) и, нажав левую кнопку мыши, перетащить объект.

Объект можно поворачивать на угол, кратный 90° . Для этого объект нужно предварительно выделить, а затем выбрать команду **Rotate** из меню

Circuit или нажать **Ctrl+R** или нажать на кнопку  на панели инструментов. При этом объект повернется на 90° против часовой стрелки. При повороте группы компонентов на 90° поворачивается каждый компонент, а не вся группа целиком.

Копирование и удаление компонентов

Копирование объектов осуществляется при помощи команды **Copy** из меню **Edit** или нажатием **Ctrl+C**. Перед копированием объект нужно выделить. После выполнения команды выделенный объект копируется в буфер. Для вставки содержимого буфера на рабочее поле нужно выбрать команду **Paste** из меню **Edit** или нажать **Ctrl+V**. После выполнения команды содержимое буфера появится на рабочем поле и будет выделено цветом. Удаление объекта осуществляется командами **Cut** и **Delete**. Отличие состоит в том, что при выполнении команды **Cut** объект удаляется в буфер и может быть затем вставлен обратно на рабочее поле, а при выполнении команды **Delete** объект удаляется совсем. Перед удалением объект также должен быть выделен.

Соединение компонентов схемы

Для соединения компонентов проводниками нужно подвести курсор к выводу элемента; появится черная точка (рис.2.6,а), нажать ЛКМ и провести проводник до вывода другого элемента. У вывода второго элемента также появится черная точка (рис.2.6,б), после чего кнопку отпустить. Следует отметить, что прокладка соединительных проводников производится автоматически, причем препятствия — компоненты и другие проводники — огибаются по ортогональным направлениям (рис.2.6,в).

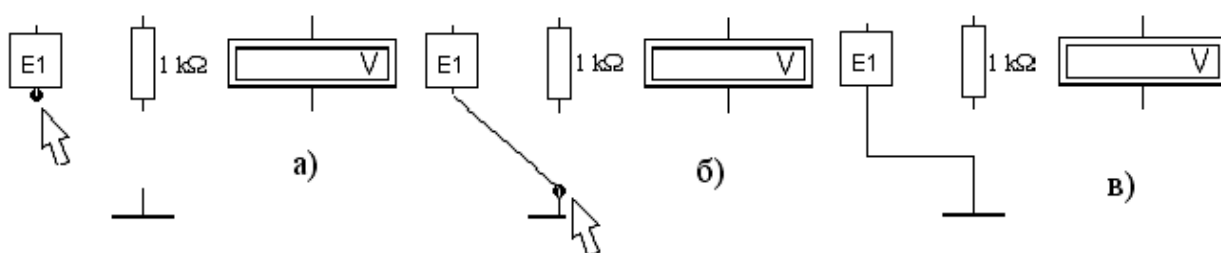


Рис.2.6. Последовательность соединения элементов схемы

Если соединение нужно разорвать, курсор подводится к одному из выводов компонентов или точке соединения и при появлении черной точки нажимается левая кнопка, проводник отводится на свободное место рабочего поля, после чего кнопка отпускается. Если необходимо подключить вывод к имеющемуся на схеме проводнику, то проводник от вывода компонента

курсором подводится к указанному проводнику и после появления точки соединения кнопка мыши отпускается.

Все проводники в Electronics Workbench по умолчанию черного цвета, но цвет проводника можно изменить. Для этого нужно двойным щелчком на изображении проводника открыть окно, приведенное на рис.2.7 и в окне мышью выбрать требуемый цвет. Если проводник подключен к осциллографу, то график на экране осциллографа будет иметь тот же цвет, что и проводник. Это значительно повышает наглядность изображения.

Проводник можно перемещать по рабочему полю. Для этого курсор подводится к проводнику и нажимается ЛКМ. Курсор принимает вид, показанный на рис.2.8. Не отпуская ЛКМ переместить проводник в требуемое место.

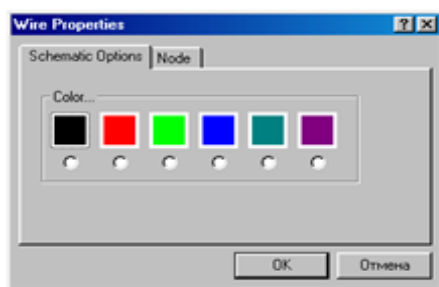


Рис.2.7. Изменение цвета проводника

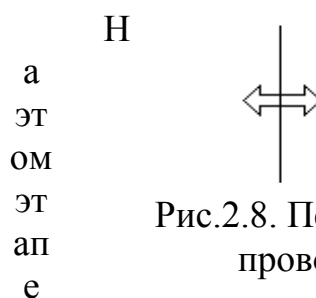


Рис.2.8. Перемещение проводника

необходимо предусмотреть место для размещения контрольно-измерительных приборов.

Установка параметров компонентов

Установка значений параметров выделенных компонентов производится в диалоговом окне свойств компонента, которое открывается двойным щелчком мыши по изображению компонента или командой **Component Properties** из меню **Circuit**.

В окне свойств компонента возможны следующие типы закладок:

Label (Закладку также можно вызвать одновременным нажатием клавиш **CTRL+L**). Используя эту закладку, можно установить или заменить метку компонента и идентификатор (позиционное обозначение). Компоненты типа соединителей, заземлений, индикаторов не имеют идентификаторов. Метку можно сдвинуть, добавляя несколько пробелов перед меткой.

Идентификаторы назначаются системой, уникально идентифицируя компонент. При изменении их в случае необходимости они должны оставаться уникальными. Идентификаторы не могут быть удалены;

Value (Закладку также можно вызвать одновременным нажатием клавиш **CTRL+U**). Поля на этой закладке различаются в зависимости от компонента. На этой закладке задаются основные параметры компонента;

Models (Закладку также можно вызвать одновременным нажатием клавиш **CTRL+M**). Используя эту закладку, можно выбрать модель, реализуемую для компонента, редактировать, добавить или удалить модель

или библиотек. Компоненты по умолчанию “идеальны”, что для большинства схемотехнических моделирований может быть достаточным. Однако если вы хотите увеличить точность результатов теста, используйте “реальную” модель;

Schematic Options - используется, чтобы установить цвет провода.

Некоторые компоненты отображают дополнительные параметры на этой закладке, для использования вместе с параметрами, описанными в техническом справочнике Electronics Workbench.

Примеры меню установки параметров резистора и генератора переменного напряжения приведены на рис.2.9 и 2.10 соответственно.

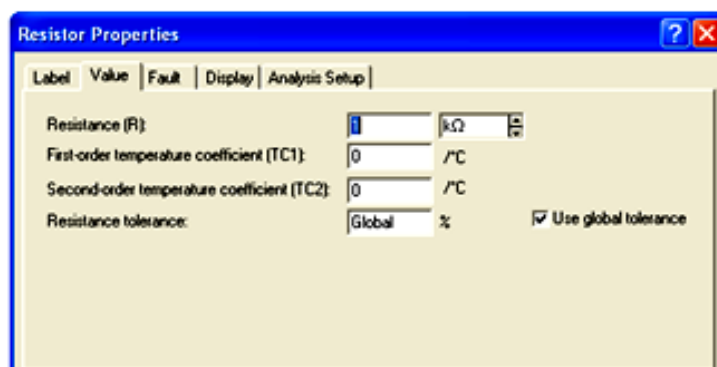


Рис.2.9. Меню установки параметров резистора

В диалоговом окне на вкладке **Value** при помощи клавиатуры и мыши нужно ввести требуемые значения параметров компонента и нажать **Ok** (на клавиатуре **Enter**) для подтверждения установки значения.

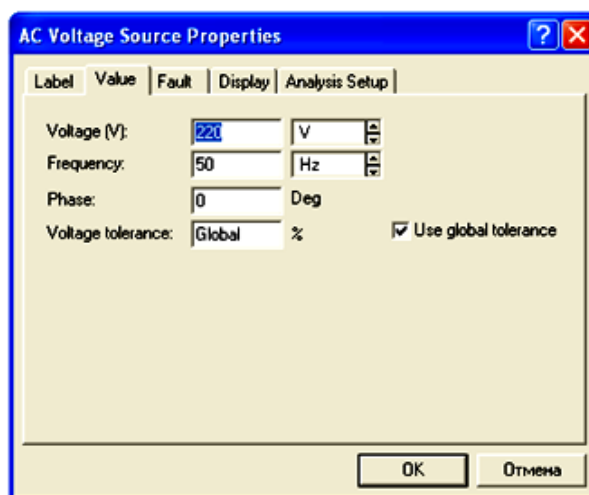


Рис.2.10. Меню установки параметров генератора переменного напряжения

Выбор модели компонента для таких элементов, как диод, транзистор, операционный усилитель, микросхема и т. п. осуществляется в диалоговом окне свойств компонента на вкладке **Model** (рис.2.11).

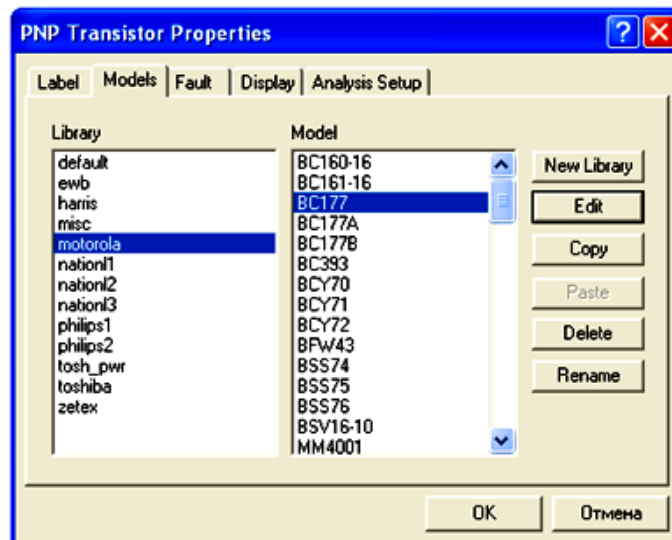


Рис.2.11. Меню выбора модели биполярного p-n-p транзистора

В диалоговом окне можно выбрать модель компонента и отредактировать значения её параметров. Для редактирования значений параметров модели нужно нажать кнопку **Edit**. При этом откроется окно свойств модели (рис.2.12), в котором при помощи мыши и клавиатуры можно изменять значения её параметров. Сохранить введенные значения параметров можно нажатием кнопки **OK**. После этого происходит возврат к предыдущему окну.

Если в схеме используются компоненты одинакового номинала (например, резисторы с одинаковым сопротивлением), то номинал такого компонента рекомендуется задать один раз и затем этот компонент копировать и вставлять в нужном количестве на рабочее поле.

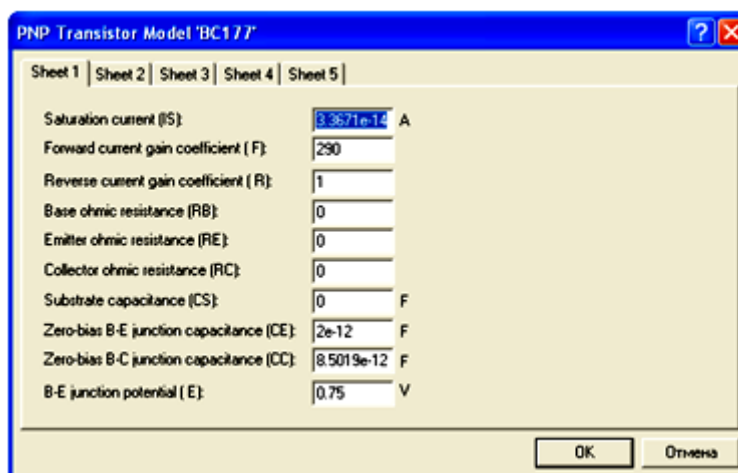


Рис.2.12. Подменю установки параметров выбранной модели биполярного p-n-p транзистора

Выбор типа транзистора в моделирующей программе не всегда является задачей тривиальной. Проблема заключается в том, что

моделирующая программа имеет библиотеку только зарубежных транзисторов. С другой стороны не все версии моделирующей программы допускают свободное редактирование параметров отдельных компонентов, в частности, полупроводниковых приборов. Поэтому необходимо воспользоваться одним из двух способов.

Сначала необходимо попытаться осуществить поиск зарубежных аналогов. Для этого можно воспользоваться имеющейся печатной продукцией или воспользоваться Интернетом. Поиск необходимо осуществлять, например, по ключевым фразам "аналоги отечественных транзисторов", или "аналоги транзистора XXXXX" и т.д. Следует иметь в виду, что разные источники дают разные аналоги и различное их количество. Поэтому при первой неудаче не следует заканчивать поиск. Желательно получить максимальное количество вариантов, чтобы гарантированно найти прототип в имеющейся библиотеке компонентов. Кроме того, аналоги бывают полные (совпадение до расположения выводов на корпусе) и аналоги электрических параметров (совпадающие или близкие числовые значения электрических параметров). Естественно, что вас должны интересовать только электрические характеристики.

Если поиск прототипа не дал попадания в библиотеку компонентов моделирующей программы, то в этом случае следует подыскать транзистор, совпадающий, хотя бы по коэффициенту усиления. Совпадение прочих параметров только приветствуется. Даже в случае несовпадения типа проводимости возможно изменение полярности источника питания схемы с сохранение всех рассчитанных характеристик. Моделирование работы схемы все равно должно состояться, даже с отклонением от ожидаемых результатов.

Задание 2.2. Исследование возможностей основных средств измерений

Необходимо изучить свойства всех указанных приборов, способы включения и настройки, выполнить предлагаемые операции.

В отчете представить состав средств измерений с перечислением возможностей фиксации электрических параметров схемы.

Амперметры и вольтметры

Для наблюдения за параметрами цепей требуются приборы различного назначения. К простейшим индикаторным приборам программы EWB относятся вольтметр и амперметр. Они расположенные в поле индикаторных устройств (*Indicators*) и показаны на рис.2.13:

1. *Voltmeter* – вольтметр;
2. *Ammeter* – амперметр;

Вольтметры и амперметры обеспечивают отсчет измеряемой величины с точностью до третьего знака. Они не требуют настройки, автоматически изменяя диапазон измерений. В одной схеме можно применять несколько

таких приборов одновременно, наблюдая токи в различных ветвях и напряжения на различных элементах.



Рис.2.13. Меню *Indicators* - индикаторных устройств

Вольтметры и амперметры используются для измерения переменного и постоянного напряжения и тока. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающего вольтметр и амперметр, соответствует отрицательной клемме и может быть размещена на любой грани иконки при вращении изображения компоненты (вращение выполняется нажатием комбинации клавиш **Ctrl+R**).

Параметры вольтметра и амперметра:

- вид измеряемого напряжения;
- величина внутреннего сопротивления.

Они задаются в диалоговом окне, которое открывается двойным щелчком мыши на изображении вольтметра, в позиции *Value*. Величина внутреннего сопротивления вводится с клавиатуры в строке *Resistance*, а вид измеряемого напряжения (опция *Mode*) выбирается из списка - измерения постоянного (DC) или переменного (AC) тока (рис.2.14).



Рис.2.14. Диалоговое окно вольтметра

При измерении переменного синусоидального напряжения (AC) вольтметр будет показывать действующее значение напряжения U , определяемое по формуле:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

где U_m - амплитудное значение напряжения.

Аналогично измеряется переменный синусоидальный ток. По умолчанию внутреннее сопротивление вольтметра 1 Мом, а амперметра - 1 Ом. Эти значения можно изменить, однако, слишком большое изменение может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы.

Мультиметр

Кроме описанных амперметра и вольтметра, в Electronics Workbench имеется семь приборов, с многочисленными режимами работы, каждый из которых можно использовать в схеме только один раз. Эти приборы

расположены в библиотеке контрольно-измерительных приборов *Instruments* (рис.2.15). При моделировании могут использоваться:

- 1) *Multimeter* – мультиметр;
- 2) *Function Generator* – функциональный генератор;
- 3) *Oscilloscope* – осциллограф;
- 4) *Bode Plotter* – измеритель АЧХ-ФЧХ.



Рис.2.15. Меню *Instruments* -
контрольно-измерительные приборы

Мультиметр используется для измерения: постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления и уровня напряжения в децибелах.

Для настройки мультиметра нужно двойным щелчком мыши на его изображении открыть его увеличенное изображение (рис.2.16)

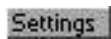
На увеличенном изображении нажатием левой кнопки мыши выбирается:



- измеряемая величина по единицам измерения: А, V, Ω или dB;



- вид измеряемого сигнала: переменный или постоянный;



Settings - режим установки параметров мультиметра. При нажатии кнопки **Settings**, открывается диалоговое окно, в котором можно установить сопротивление амперметра (по умолчанию 1 нОм), сопротивление вольтметра (по умолчанию 1 ГОм), ток омметра (по умолчанию 0,01 мкА) и стандарт нулевого уровня по напряжению (по умолчанию 1 В).

Показания мультиметра можно наблюдать только на увеличенном изображении прибора.

Функциональный генератор

Генератор является идеальным источником напряжения, вырабатывающим сигналы синусоидальной, прямоугольной или треугольной формы. Сигналы синусоидальной формы можно использовать для исследования схемы.

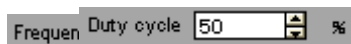
Для настройки функционального генератора (*Function Generator*) нужно двойным щелчком мыши на его изображении открыть его увеличенное изображение (рис.2.17).

Управление генератором осуществляется следующими органами управления:

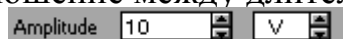



- выбор формы выходного сигнала: синусоидальной (по умолчанию) треугольной и прямоугольной;

- установка частоты выходного сигнала;



- установка коэффициента заполнения в %: Для импульсных сигналов это отношение длительности импульса к периоду повторения - величина, обратная скважности, для треугольных сигналов - соотношение между длительностями переднего и заднего фронта;



- установка амплитуды выходного сигнала;
 - установка смещения (постоянной составляющей) выходного сигнала. Она может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это позволяет получить, например, последовательность однополярных импульсов;


 - выходные зажимы; при заземлении клеммы COM (общий) на клеммах "-" и "+" получается парафазный сигнал.



Рис.2.16. Увеличенное изображение мультиметра

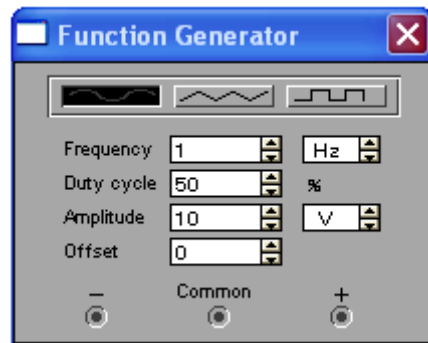


Рис.2.17. Увеличенное изображение функционального генератора


Осциллограф

Осциллограф (*Oscilloscope*)- это прибор, который предназначен для визуального контроля за формой электрических сигналов и измерения их параметров по изображению, наблюдаемому на экране электронно-лучевой трубки. При этом возможно измерение амплитудных и временных параметров сигналов. Осциллограф имеет два канала, которые позволяют наблюдать два независимых сигнала при одной развертке. При выносе осциллографа на рабочее поле он приобретает вид как на рис.2.18,а.

На изображении осциллографа имеется четыре клеммы, две клеммы внизу – входы канала А и канала В, две клеммы справа: верхняя – для заземления (подключается к земле обязательно) и нижняя – для внешней синхронизации.

Для настройки осциллографа и наблюдения сигналов нужно двойным щелчком мыши на его изображении открыть его лицевую панель (рис.2.18,б).

На панели осциллографа показаны два канала (*Channel*) А и В с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел ($\mu V/Div$) до 5 кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения по вертикали (*Y position*).

Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок  . Режим **AC** предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока. Его называют режимом "закрытого входа", поскольку в этом режиме на входе усилителя включается разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую. В режиме **0** входной зажим замыкается на землю (сигнал нельзя наблюдать). В режиме **DC** (включен по умолчанию) можно

проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим еще называют режимом "открытого входа", поскольку входной сигнал поступает на вход вертикального усилителя непосредственно. С правой стороны от кнопки **DC** расположен входной зажим канала.

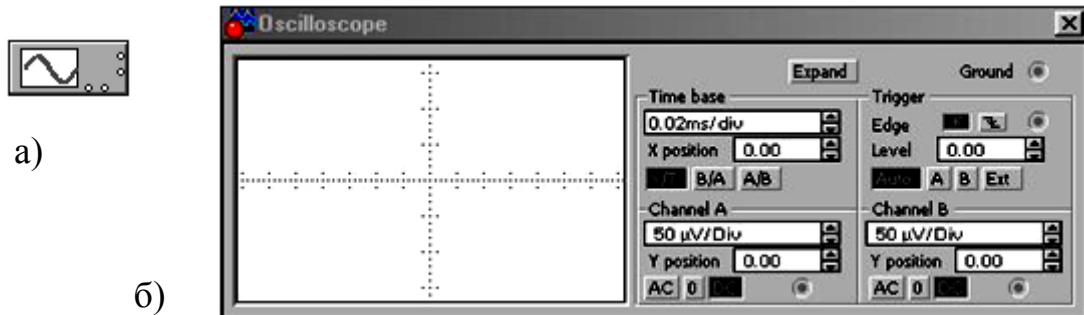


Рис.2.18. Условное изображение осциллографа на рабочем поле (а) и его лицевая панель (б)

Режим развертки выбирается кнопками **Y/T** **B/A** **A/B**. В режиме Y/T (включен по умолчанию) реализуется режим развертки: по вертикали - напряжение сигнала, по горизонтали - время. В режиме B/A: по вертикали - сигнал канала B, по горизонтали - сигнал канала A. В режиме A/B: по вертикали - сигнал канала A, по горизонтали - сигнал канала B.

В режиме развертки Y/T длительность развертки (**Time base**) может быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел (**ns/div**) до 1 с/дел (**s/div**) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали (**X position**). Запуск развертки в режиме **Auto** осуществляется по входным сигналам.

При нажатии на кнопку **Expand**, лицевая панель осциллографа существенно меняется (рис.2.19): увеличивается размер экрана, появляется возможность прокрутки изображения по горизонтали и его сканирования с помощью вертикальных визирных линий (синего и красного цвета), которые за треугольники (они обозначены также цифрами 1 и 2) можно курсором перетаскивать в любое место экрана.

При этом в индикаторных окошках под экраном приводятся результаты измерения напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями). Изображение можно инвертировать нажатием кнопки **Reverse** и записать данные в файл нажатием кнопки **Save**. Возврат к исходному состоянию осциллографа - нажатием кнопки **Reduce**.

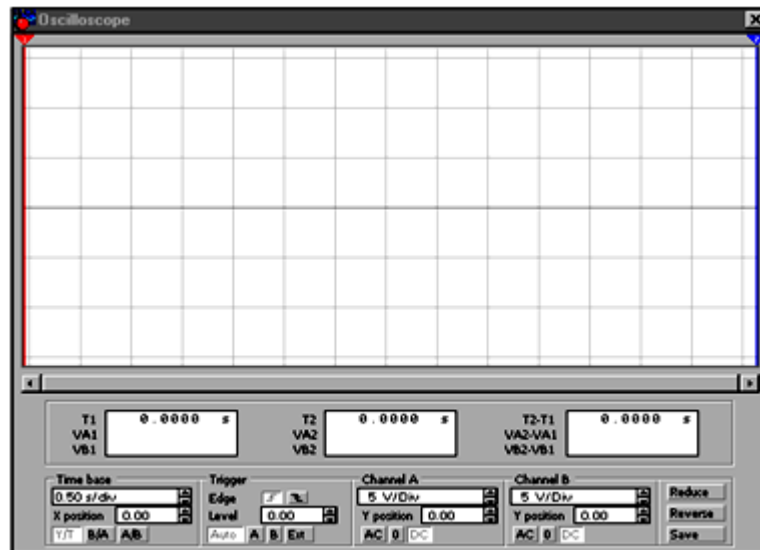


Рис.2.19. Увеличенная лицевая панель осциллографа

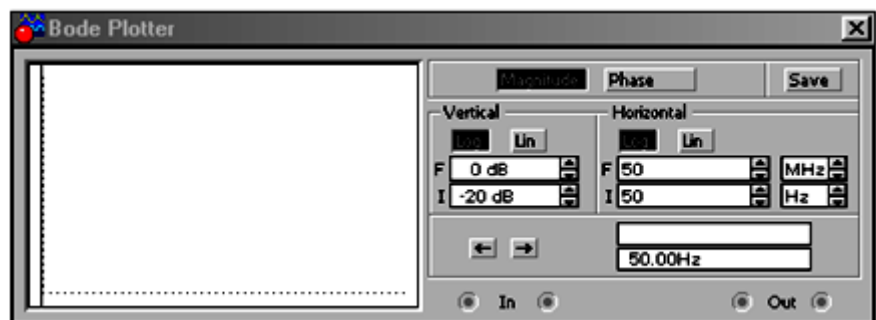
Измеритель АЧХ и ФЧХ

Измеритель диаграмм Боде (или Боде-плоттер) предназначен для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ) электрических цепей. При выносе измерителя АЧХ и ФЧХ на рабочее поле он приобретает вид как на рис.2.20,а.

Боде-плоттер имеет четыре зажима: два входных (**In**) и два выходных (**Out**). Для измерения отношения амплитуд или фазового сдвига нужно подключить положительные выводы входов In и Out (левые выводы соответствующих входов) к исследуемым точкам, а два других вывода заземлить. При двойном щелчке мышью по уменьшенному изображению Боде-плоттера открывается его увеличенное изображение (рис.2.20,б).



а)



б)

Рис.2.20. Условное изображение Боде-плоттера на рабочем поле (а) и Лицевая панель Боде-плоттера (б)

Верхняя панель плоттера задает вид получаемой характеристики: АЧХ (кнопка **Magnitude**) или ФЧХ (кнопка **Phase**).

Левая панель управления (*Vertical*) задает параметры по вертикальной оси:

- начальное (*I* - initial) и конечное (*F* - final) значения параметров,
- вид масштаба шкалы вертикальной оси - логарифмическая (*Log*) или линейная (*Lin*).

Правая панель управления (*Horizontal*) настраивается аналогично для горизонтальной оси. По горизонтальной оси всегда откладывается частота в Герцах в линейном или логарифмическом масштабе. В начале горизонтальной шкалы расположен курсор. Его можно перемещать нажатием на кнопки со стрелками, расположенными справа от экрана, либо "тащить" с помощью мыши. Координаты точки пересечения курсора с графиком характеристики выводятся на информационных полях внизу справа.

При получении АЧХ по вертикальной оси откладывается отношение напряжений:

- в линейном масштабе от 0 до 109 (10E9);
- в логарифмическом масштабе от -200dB до 200dB.

При получении ФЧХ по вертикальной оси откладываются градусы, - от -720° до 720°.

Подключение к схеме контрольно-измерительных приборов производится аналогично подключению компонентов. Причем для такого прибора, как осциллограф, соединения целесообразно проводить цветными проводниками, поскольку их цвет определяет цвет соответствующей осциллограммы.

Задание 2.3. Технология моделирования электронных схем

Необходимо набрать схему усилителя, рассчитанного в разделе 1, подключить необходимые приборы и добиться требуемых показаний. В качестве прототипа при необходимости можно воспользоваться схемой на рис.2.21.



В отчете представить схему для моделирования и последовательность этапов моделирования схемы.

Для моделирования схемы необходимо воспользоваться типовой последовательностью создания схемы в рабочем окне программного пакета:

1. Выбор и установка компонентов и приборов;
2. Соединение компонентов;
3. Задание параметров компонентов и режимов приборов измерения;
4. Редактирование компонентов при необходимости.

По справочникам зарубежных аналогов рекомендованному транзистору подбираем транзисторы, входящие в библиотеку программы Electronics Workbench. Если таких транзисторов в библиотеке нет, то производим подбор транзисторов из библиотеки программы, наиболее соответствующих разработанной схеме по следующим основным

параметрам: коэффициент усиления, амплитудно-частотная характеристика. С целью получения требуемого коэффициента усиления и выравнивания АЧХ, при моделировании возможно использование поочередно нескольких транзисторов и корректировка значений сопротивлений в цепи эмиттера и в цепи делителя.

Когда схема создана, заданы параметры элементов и настроены приборы для начала имитации процесса необходимо включить питание в верхнем правом углу на панели  инструментов. Данное действие приведет в рабочее состояние схему и в одном из окон строки состояния будет показываться время работы схемы, которое не соответствует реальному и зависит от скорости процессора и системы персонального компьютера. Прервать имитацию можно двумя способами. Если вы закончили работу, то нужно выключить питание . Если же нужно временно прервать работу схемы, например, для детального рассмотрения осциллограммы, а затем продолжить работу можно воспользоваться кнопкой **Pause**, которая расположена ниже переключателя питания на панели инструментов.

В случае серьезной ошибки в схеме (замыкание элемента питания накоротко, отсутствие нулевого потенциала в схеме) будет выдано предупреждение.

Анализ осциллограмм производится после выключения схемы, осциллограмма при этом сохраняется.

При изменении каких-либо параметров элементов, схему следует выключать, иначе возможно получение неверных результатов.

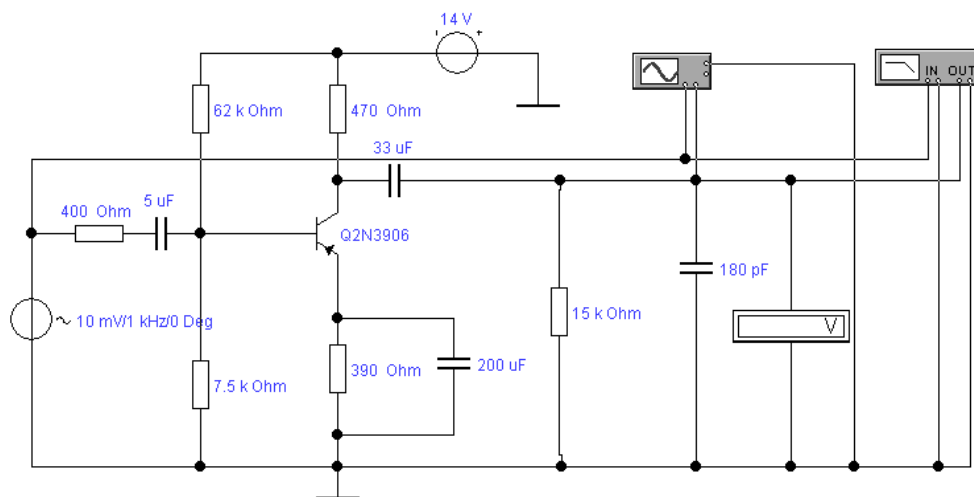


Рис.2.21. Вариант схемы усилителя на рабочем поле

Вопросы для самоконтроля

1. Дать сравнительную оценку каскадов усиления при различных способах включения транзистора.

2. Как различаются усилительные каскады по режимам работы?
3. Из каких основных меню состоит интерфейс пользователя?
4. Каково назначение основных меню среды моделирования?
5. Какие компоненты моделируются в системе?
6. Какие параметры настраиваются в амперметрах и вольтметрах?

Поясните их физический смысл?

7. Поясните назначение развертки. Какие параметры настраиваются для нее? Каков их физический смысл?

8. Какие параметры настраиваются для каждого канала осциллографа? На что они влияют?

9. Чем отличаются между собой входы АС и DC? Почему?

10. В чем отличие двухлучевого осциллографа и двух однолучевых осциллографов?

11. Какие параметры измеряет измеритель диаграмм Боде?

12. Какие параметры настраиваются для измерителя диаграмм Боде?

13. По каким параметрам отбираются аналоги транзисторов?

14. Чем отличаются полные и неполные аналоги транзисторов?

15. Возможно ли использовать неполные аналоги транзисторов для моделирования?

16. Какие возможности систем проектирования необходимы кроме пакетов схемотехнического моделирования?

3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

Цель

1. Исследовать влияния отрицательной ОС (ООС) на коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления усилителя;
2. Приобрести навыки использования компьютерного моделирования работы усилителя с отрицательной ОС для оценки ее влияние на основные параметры.

Учебные вопросы

- 3.1. Исследование усилителя с отрицательной ОС последовательной по напряжению;
- 3.2. Исследование усилителя с отрицательной ОС параллельной по напряжению;
- 3.3. Исследование усилителя с отрицательной ОС последовательной по току;
4. Исследование усилителя с отрицательной ОС параллельной по току.

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Петин Г.П., Аналоговая схемотехника. - Ростов-на/Д.: ЮФУ , 2010. - 314с.
3. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И., Аналоговая и цифровая электроника. - М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. - 768с.
4. Алиев И. И., Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике. М.: РадиоСофт, 2003. – 240с.
5. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
6. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере / Г.А.Кардашев. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 311 с. : ил. (Массовая радиобиблиотека; 1263)

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Какая обратная связь применяется в усилителях?
2. Как влияет отрицательная обратная связь на коэффициент усиления и его стабильность?
3. Как изменяет отрицательная обратная связь входное сопротивление усилителя?

4. Как изменяет отрицательная обратная связь выходное сопротивление усилителя?
5. Как влияет отрицательная обратная связь на нелинейные искажения, возникшие в усилителе?
6. Что такое частотно-независимая отрицательная обратная связь?
7. Что такое частотно-зависимая отрицательная обратная связь?

Краткие сведения из теории

Обратной связью (ОС) называется такая связь между цепями усилителя, при которой часть энергии усиленных колебаний в виде напряжения или тока с выхода усилителя передается на его вход. Обычно связь осуществляется через пассивные элементы, которые передают сигналы в обоих направлениях. Но выходное напряжение обычно намного больше входного, поэтому влияние входа цепи обратной связи на выход не учитывается. Обратная связь широко используется в электронных усилительных устройствах, при этом, как правило, используется так называемая отрицательная обратная связь (ООС), которая и будет рассматриваться ниже. На первый взгляд, отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления. Однако, как это часто бывает в технике вообще и в электронике в частности, один недостаток того или иного решения может значительно перевешиваться его достоинствами. Отрицательная обратная связь, хотя и уменьшает коэффициент усиления, но исключительно благотворно влияет на многие параметры и характеристики усилителя. В частности, уменьшаются искажения сигнала, в значительно большем диапазоне частот коэффициент усиления оказывается не зависящим от частоты и т.д.

Различают четыре вида обратной связи в усилителе. Эти виды ОС представлены на рисунках 3.1 — 3.4.

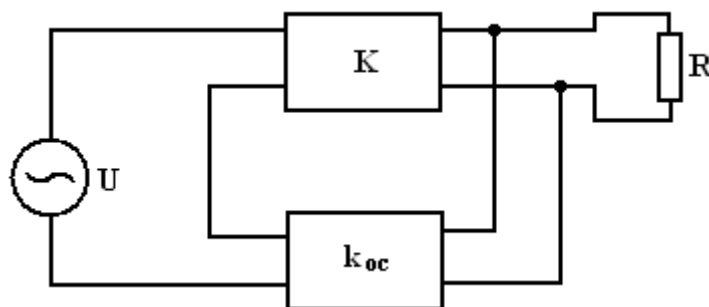


Рис.3.1. Усилитель с ОС, последовательной по напряжению

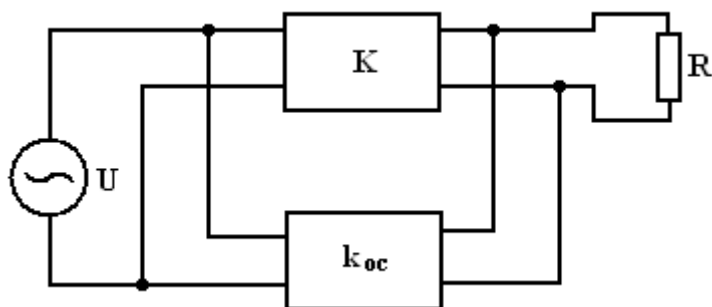


Рис.3.2. Усилитель с ОС,
параллельной по напряжению

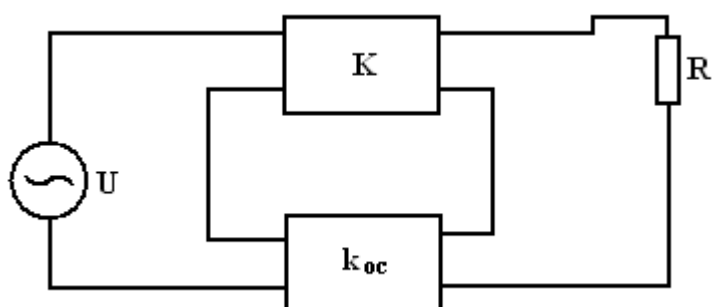


Рис.3.3. Усилитель с ОС, последовательной
по току

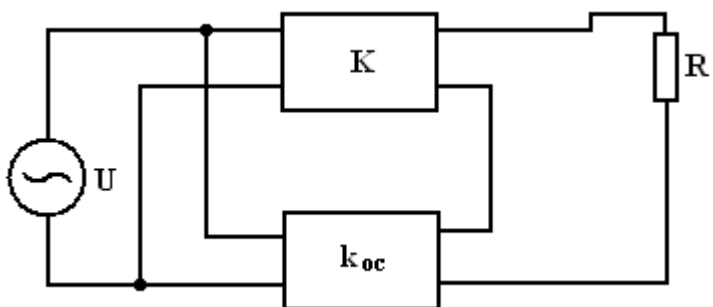


Рис.3.4. Усилитель с ОС, параллельной по
току

На этих рисунках: K - коэффициент усиления усилителя без обратной связи (коэффициент прямой передачи), k_{oc} - коэффициент передачи обратной связи; U - входной сигнал, R - сопротивление нагрузки.

Рассмотрим влияние ООС на примере усилителя, охваченного последовательной обратной связью по напряжению (рис.3.5).

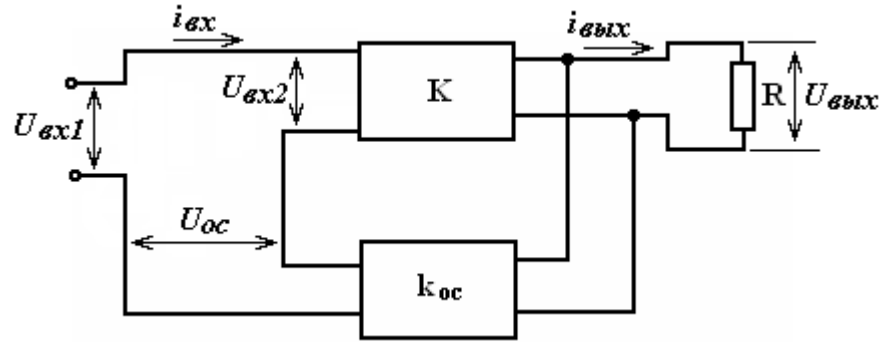


Рис.3.5. Схема усилителя с обратной связью последовательной по напряжению

В структурную схему входят цепь прямой передачи с коэффициентом передачи K и цепь обратной передачи с коэффициентом передачи k_{OC} . В общем случае эти коэффициенты являются комплексными величинами. С целью упрощения будем рассматривать схему, в которой цепи являются линейными, а коэффициенты - вещественными.

На усилитель с ООС подается внешний сигнал U_{BX1} , а на вход цепи прямой передачи - U_{BX2} . Очевидно, что

$$K = \frac{U_{BIX}}{U_{BX2}}; \quad k_{OC} = \frac{U_{OC}}{U_{BIX}}.$$

Определим коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью. Этот коэффициент определяется по формуле

$$K^{OC} = \frac{U_{BIX}}{U_{BX1}},$$

где K^{OC} - коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью.

Легко заметить, что при отрицательной обратной связи в усилителе

$$\begin{aligned} U_{BX2} &= U_{BX1} - U_{OC}, \\ U_{BX1} &= U_{BX2} + U_{OC}. \end{aligned}$$

Поэтому

$$K^{OC} = \frac{U_{BIX}}{U_{BX1}} = \frac{K \cdot U_{BX2}}{U_{BX2} + U_{OC}} = \frac{K \cdot U_{BX2}}{U_{BX2} + k_{OC} \cdot K \cdot U_{BX2}} = \frac{K}{1 + k_{OC} \cdot K}.$$

Таким образом,

$$K^{oc} = \frac{K}{1 + k_{oc} \cdot K}.$$

Величину $1 + k_{oc} \cdot K$ называют **глубиной обратной связи**, а величину $k_{oc} \cdot K$ называют **петлевым усилением**. Если глубина обратной связи достаточно велика ($|k_{oc} \cdot K| \gg 1$), то

$$K^{oc} \approx \frac{1}{k_{oc}}.$$

Отсюда можно сделать следующий очень важный вывод: **если глубина отрицательной обратной связи достаточно велика, то коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью, зависит только от свойств цепи обратной связи и не зависит от свойств прямой цепи.**

Теперь рассмотрим влияние ООС на входное и выходное сопротивления усилителя. Обратимся к структурной схеме усилителя (см. рис.3.5).

Входное сопротивление цепи прямой передачи будет равно

$$R_{BX} = \frac{U_{BX2}}{I_{BX}},$$

а входное сопротивление усилителя, охваченного обратной связью, соответственно

$$R_{BX\ OC} = \frac{U_{BX1}}{I_{BX}}.$$

Произведя следующие преобразования, получим

$$\begin{aligned} R_{BX\ OC} &= \frac{U_{BX1}}{I_{BX}} = \frac{U_{BX2} + U_{OC}}{I_{BX}} = \frac{U_{BX2} + U_{B\bar{Y}LX} \cdot k_{oc}}{I_{BX}} = \frac{U_{BX2} + U_{BX2} \cdot K \cdot k_{oc}}{I_{BX}} = \\ &= \frac{U_{BX2}}{I_{BX}} \cdot (1 + K \cdot k_{oc}) = R_{BX} \cdot (1 + K \cdot k_{oc}). \end{aligned}$$

Таким образом, входное сопротивление усилителя с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению равно

$$R_{BX\ OC} = R_{BX} \cdot (1 + k_{oc} \cdot K).$$

Теперь рассмотрим влияние обратной связи на выходное сопротивление усилителя. При упрощенном исследовании структурной

схемы усилителя (см. рис.3.5) будем исходить из того, что выходное сопротивление источника сигнала близко к 0, цепь обратной связи не представляет сколь-нибудь заметной нагрузки для усилителя и что входное сопротивление цепи прямой передачи значительно больше выходного сопротивления цепи обратной связи.

Пренебрегая, таким образом, ответвлением тока в цепь обратной связи, запишем выражение для выходного тока

$$I_{BbIX} = \frac{K \cdot U_{BX2}}{R_{BbIX} + R_H}.$$

Представим U_{BX2} в следующем виде

$$U_{BX2} = U_{BX1} - U_{OC} = U_{BX1} - k_{OC} \cdot U_{BbIX} = U_{BX1} - k_{OC} \cdot I_{BbIX} \cdot R_H.$$

Подставим выражение U_{BX2} в выражение для I_{BbIX} – получим

$$I_{BbIX} = \frac{K(U_{BX1} - k_{OC} \cdot I_{BbIX} \cdot R_H)}{R_{BbIX} + R_H}.$$

Решим это уравнение относительно I_{BbIX} :

$$I_{BbIX} = \frac{K \cdot U_{BX1}}{R_{BbIX} + (1 + K \cdot k_{OC})R_H}.$$

Это решение может быть представлено следующим образом:

$$I_{BbIX} = \frac{\frac{K}{1 + K \cdot k_{OC}} \cdot U_{BX1}}{\frac{R_{BbIX}}{1 + K \cdot k_{OC}} + R_H} = \frac{K_{OC} \cdot U_{BX1}}{R_{BbIX OC} + R_H},$$

$$\text{где } R_{BbIX OC} = \frac{R_{BbIX}}{1 + K \cdot k_{OC}}.$$

Для других видов отрицательной связи в усилителе коэффициент усиления K_{OC} рассчитывается по аналогичной формуле

$$K^{OC} = \frac{K}{1 + K \cdot k_{OC}}.$$

На входное и выходное сопротивления вид отрицательной обратной связи влияет по-разному.

Рассмотрим **обратную связь по напряжению**. Она препятствует изменению выходного напряжения при изменении сопротивления нагрузки. Это означает, что введение отрицательной обратной связи по напряжению уменьшает выходное сопротивление усилителя. Можно показать, что характер изменения выходного сопротивления не зависит от того, является ли связь параллельной или последовательной. Таким образом, для обратной связи по напряжению

$$R_{\text{вых OC}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + K \cdot k_{\text{OC}}}.$$

Теперь обратимся к **обратной связи по току**. Она препятствует изменению выходного тока при изменении сопротивления нагрузки. Это означает, что введение отрицательной обратной связи по току увеличивает выходное сопротивление. При этом характер изменения выходного сопротивления также не зависит от того, является ли связь параллельной или последовательной. Таким образом, для обратной связи по току

$$R_{\text{вых OC}} = R_{\text{вых}} (1 + K \cdot k_{\text{OC}})$$

Подобные рассуждения (и соответствующие математические выражения) показывают, что параллельная обратная связь уменьшает входное сопротивление усилителя, охваченного ею, а последовательная увеличивает. Характер изменения входного сопротивления не зависит от того, является ли обратная связь по току или по напряжению. Таким образом, при параллельной обратной связи

$$R_{\text{вх OC}} = \frac{R_{\text{вх}}}{1 + K \cdot k_{\text{OC}}}$$

а при последовательной обратной связи

$$R_{\text{вх OC}} = R_{\text{вх}} (1 + K \cdot k_{\text{OC}})$$

Влияние отрицательной обратной связи на частотную, фазовую и переходную характеристики

Частотно-независимая отрицательная обратная связь улучшает частотную, фазовую и переходную характеристики усилителя, расширяя полосу усиливаемых частот. Это происходит потому, что на крайних

частотах диапазона, где усиление без обратной связи уменьшается, глубина обратной связи $(1 + k_{OC} \cdot K)$ также уменьшается. А так как напряжение обратной связи уменьшается, то суммарное напряжение на входе возрастает и усиление увеличивается. В результате края частотной характеристики поднимаются, и полоса усиливаемых частот расширяется, как показано на рис.3.6, на котором кривая 1 - частотная характеристика усилителя без обратной связи, кривая 2 - частотная характеристика усилителя с отрицательной обратной связью. Таким образом, отрицательная обратная связь выравнивает частотную характеристику.

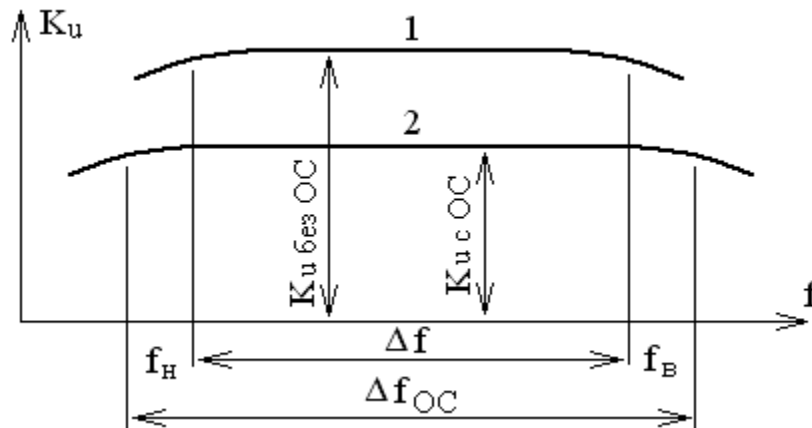


Рис.3.6. Амплитудно-частотные характеристики усилителя

Отрицательная обратная связь уменьшает фазовые сдвиги в усилителе, и фазовая характеристика приближается к линейной. Фазовые искажения в усилителе под действием отрицательной обратной связи уменьшаются.

Переходная характеристика в усилителях с отрицательной обратной связью также улучшается, поскольку уменьшается время восстановления. Это происходит вследствие уменьшения входной емкости усилительных приборов под действием отрицательной обратной связи. Спад вершины импульса уменьшается в результате стабилизации коэффициента усиления усилителя, т. е. подъема частотной характеристики.

Влияние отрицательной обратной связи на нелинейные искажения и динамический диапазон усилителя

В процессе работы усилителя из-за нелинейности вольт-амперной характеристики усилительных приборов (транзисторов, ламп) возникают нелинейные искажения, т.е. появляются новые гармоники, которых не было на входе усилителя. По цепи обратной связи, они поступают на вход усилителя и, пройдя через усилитель, оказываются на выходе, но уже в противофазе с первоначально возникающими гармониками. Поэтому

амплитуды паразитных гармоник на выходе усилителя оказываются ослабленными. А значение напряжения полезного сигнала доводится до прежнего увеличением входного напряжения в $(1 + k_{OC} \cdot K)$ раз. Следовательно, введение отрицательной обратной связи увеличивает соотношение между полезным сигналом и паразитными гармониками, возникающими в усилителе.

Таким образом, отрицательная обратная связь уменьшает на выходе напряжения различных помех, возникающих в усилителе. Следует отметить, что отрицательная обратная связь уменьшает только те помехи, которые возникают в самом усилителе, охваченном обратной связью, но не уменьшает помехи, подведенные к входу усилителя вместе с полезным сигналом. Благодаря уменьшению внутренних помех расширяется динамический диапазон усилителя. Такое действие отрицательной обратной связи наблюдается при всех способах введения обратной связи.

Задание 3.1. Исследование усилителя с отрицательной ОС последовательной по напряжению.

Порядок исследования:

1. Для схемы усилителя с отрицательной обратной связью, последовательной по напряжению, рассчитать K^{OC} , K , k_{OC} , $R_{ВЫХ\ OC}$, если известно, что $U_{ВХ} = (20n - 3)$ мВ, $U_{ВЫХ} = (100n - 20)$ мВ, $R_{ВХ\ OC} = 50n/8$ кОм, $R_{ВХ} = 5n$ кОм, $R_{ВЫХ} = 80n$ кОм, где n - номер варианта по номеру журнала учебной группы;
2. Построить на экране схему (рис.3.7) с использованием моделирующей программы Electronics Workbench (или иной).

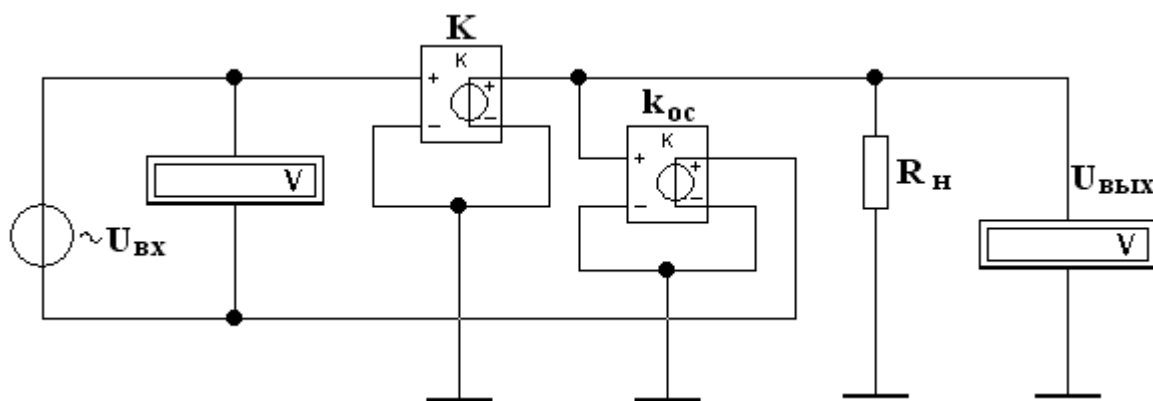


Рис.3.7. Схема моделирования усилителя с ОС, последовательной по напряжению

Интерфейс пользователя Electronics Workbench и порядок построения схемы подробно рассмотрен в разделе 2. Основные этапы этой работы следующие.

Необходимо открыть программу Electronics Workbench и левой кнопкой "мыши" "перетащить" на рабочее поле все необходимые элементы:

- из набора **Источники (Sources)** - источник переменного напряжения (*AC Voltage Source*) и заземления (*Ground*);
- из набора **Базис (Basic)** - резистор (*Resistor*);
- из набора **Аналоговые вычислительные устройства (Controls)** (рис.3.8) - два масштабирующих блока (*Voltage Gain Block*);
- из набора **Индикаторы (Indicators)** - два вольтметра (*Voltmeter*).

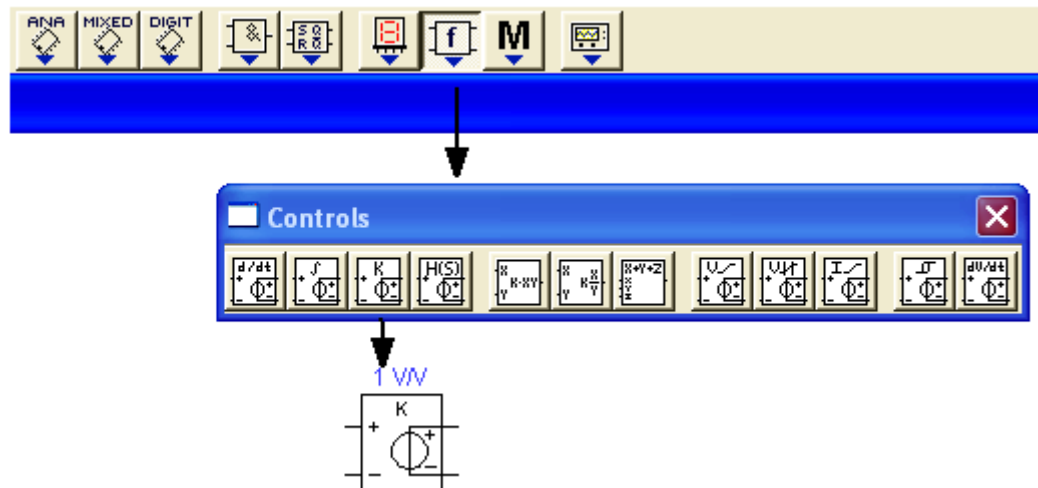


Рис.3.8. Установка на рабочем поле масштабирующего блока

- для построения схем с обратной связью необходимо из набора **Аналоговые вычислительные устройства (Controls)** (рис.3.9) добавить трехвходовый сумматор (*Tree-Way Voltage*).

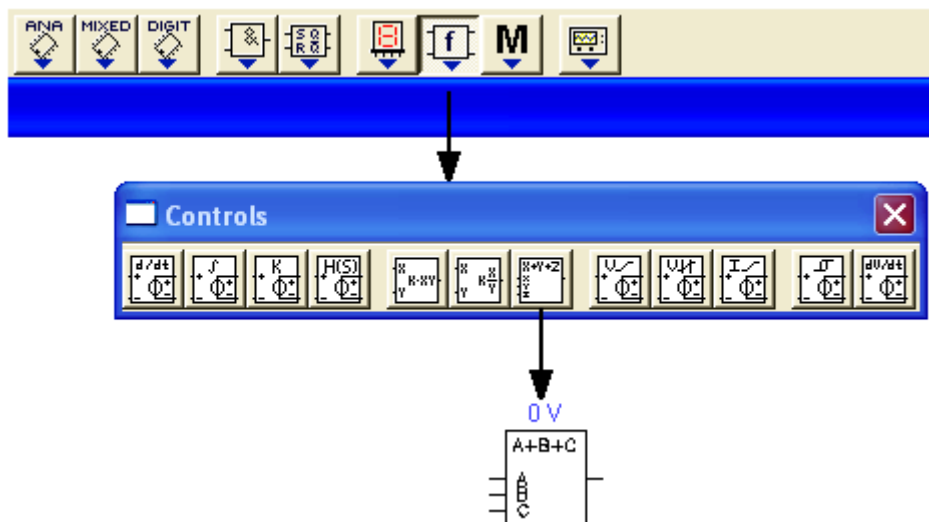


Рис.3.9. Установка на рабочем поле трехвходового сумматора

Соединить все элементы соединительными линиями в соответствии с разрабатываемой схемой. Для задания параметров любого элемента необходимо навести курсор на элемент, и нажать правую кнопку мыши.

Откроется окно, в котором можно удалять элемент (**Delete**), поворачивать элемент на 90° (**Rotate**) или задавать параметры элемента (**Component Properties**).

Задать элементам схемы заданные и вычисленные параметры: U_{BX} , K , k_{OC} , $R_H = 1$ кОм, частота источника сигнала - 50 Гц, вольтметры - в режиме измерения переменного напряжения (**Mode - AC**). Для масштабирующих блоков коэффициенты прямой передачи (K) и цепи обратной связи (k_{OC}) задаются в строке **Gain** (рис.3.10). Для моделирования отрицательной обратной связи в данной программе коэффициент обратной связи k_{OC} в схеме необходимо задавать со знаком минус "-".

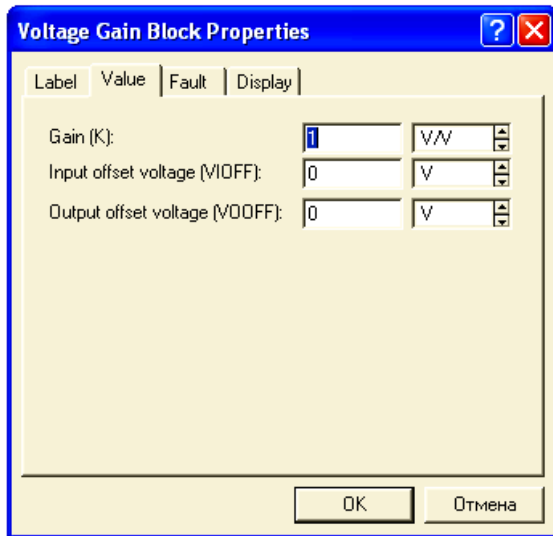


Рис.3.10. Установка значений масштабирующих коэффициентов прямой передачи и обратной связи

Включение схемы осуществляется кнопкой "**|**" в верхнем правом углу рабочего поля (**Activate simulation**). Выключение схемы - нажатием кнопки "0";

3. Зафиксировать значение выходного напряжения и занести в отчет;

4. Рассчитать экспериментальный коэффициент усиления усилителя охваченного ООС. Расчеты и результат занести в отчет;

5. Сделать вывод о правильности выполненных расчетов параметров усилителя;

6. Измерить коэффициент усиления усилителя без ОС. Сделать

вывод о правильности соотношения между K^{OC} и K .

В отчете представить:

- исходные данные и результаты расчета по варианту;
- схему моделирования для исследования с расчетными значениями;
- значения выходного напряжения усилителя с ОС;
- экспериментальные значения K^{OC} и K ;
- выводы о правильности расчетов.

Задание 3.2. Исследование усилителя с отрицательной ОС параллельной по напряжению

Порядок исследования:

1. Для схемы усилителя с отрицательной обратной связью, параллельной по напряжению, рассчитать U_{BX} , K_{OC} , k_{OC} , $R_{BX\ OC}$, если известно, что $U_{ВЫХ} = (100n - 15)$ мВ, $R_{BX} = (6n + 1)$ кОм, $R_{ВЫХ\ OC} = 80n$ кОм,

$R_{\text{ВЫХ}} = 800n/7 \text{ кОм}$, $K = 5$, где n - номер варианта по номеру журнала учебной группы;

2. Построить на экране схему (рис.3.11) с использованием моделирующей программы Electronics Workbench (или иной). Краткая справка по применению моделирующей программы представлена в задании 3.1;

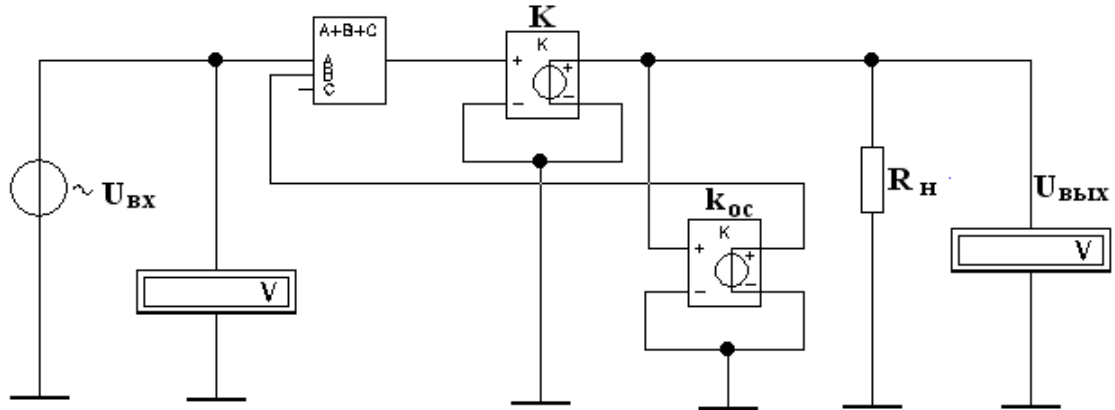


Рис.3.11. Схема усилителя с обратной связью, параллельной по напряжению

3. Зафиксировать значение выходного напряжения и занести в отчет;
4. Рассчитать экспериментальный коэффициент усиления усилителя охваченного ООС. Расчеты и результат занести в отчет;
5. Сделать вывод о правильности выполненных расчетов параметров усилителя;
6. Измерить коэффициент усиления усилителя без ОС. Сделать вывод о правильности соотношения между K^{OC} и K .

В отчете представить:

- исходные данные и результаты расчета по варианту;
- схему моделирования для исследования с расчетными значениями;
- значения выходного напряжения усилителя с ОС;
- экспериментальные значения K^{OC} и K ;
- выводы о правильности расчетов.

Задание 3.3. Исследование усилителя с отрицательной ОС последовательной по току

Порядок исследования:

1. Для схемы усилителя с отрицательной обратной связью, последовательной по току, рассчитать $U_{\text{ВЫХ}}$, K , $R_{\text{ВХ ОС}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$, если известно, что $U_{\text{ВХ}} = (20n + 1) \text{ мВ}$, $K_{\text{ОС}} = 4,5$, $R_{\text{ВЫХ ОС}} = 75n \text{ кОм}$, $R_{\text{ВХ}} = 5n \text{ кОм}$, $k_{\text{ОС}} = 0,04$, где n - номер варианта по номеру журнала учебной группы;
2. Построить на экране схему (рис.3.12) с использованием моделирующей программы Electronics Workbench (или иной). Краткая

справка по применению моделирующей программы представлена в задании 3.1;

3. Зафиксировать значение выходного напряжения и занести в отчет;
4. Рассчитать экспериментальный коэффициент усиления усилителя охваченного ООС. Расчеты и результат занести в отчет;
5. Сделать вывод о правильности выполненных расчетов параметров усилителя;

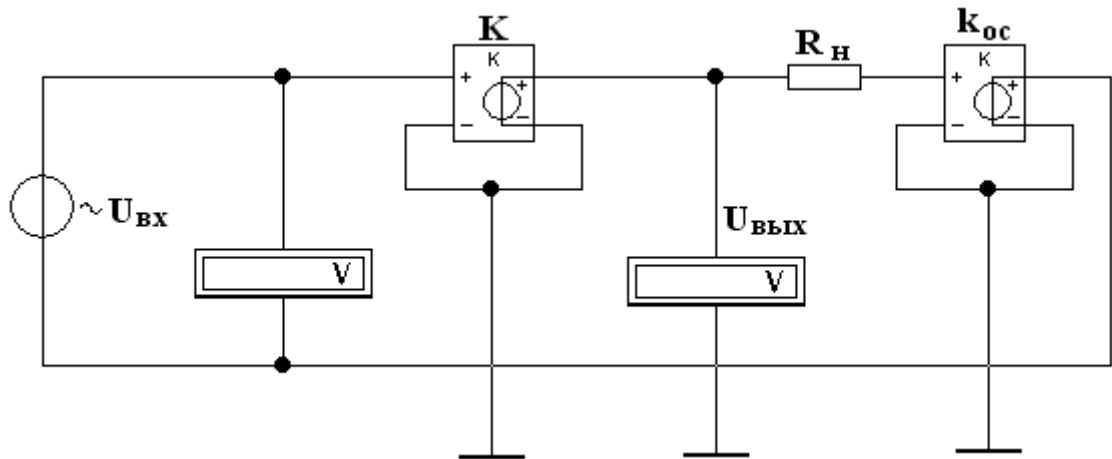


Рис.3.12. Схема усилителя с ОС, последовательной по току

6. Измерить коэффициент усиления усилителя без ОС. Сделать вывод о правильности соотношения между K^{OC} и K .

В отчете представить:

- исходные данные и результаты расчета по варианту;
- схему моделирования для исследования с расчетными значениями;
- значения выходного напряжения усилителя с ОС;
- экспериментальные значения K^{OC} и K ;
- выводы о правильности расчетов.

Задание 3.4. Исследование усилителя с отрицательной ОС параллельной по току

Порядок исследования:

1. Для схемы усилителя с отрицательной обратной связью, параллельной по току, рассчитать U_{BX} , K , K_{OC} , $R_{ВЫХ}$, если известно, что $U_{ВЫХ} = (80n + 10)$ мВ, $R_{ВЫХ\ OC} = 88n$ кОм, $R_{ВХ\ OC} = 10n$ кОм, $R_{ВХ} = (15n + 5)$ кОм, $k_{OC} = 0,05$, где n - номер варианта по номеру журнала учебной группы;
2. Построить на экране схему (рис.3.13) с использованием моделирующей программы Electronics Workbench (или иной). Краткая справка по применению моделирующей программы представлена в задании 3.1;
3. Зафиксировать значение выходного напряжения и занести в отчет;

4. Рассчитать экспериментальный коэффициент усиления усилителя охваченного ООС. Расчеты и результат занести в отчет;
5. Сделать вывод о правильности выполненных расчетов параметров усилителя;
6. Измерить коэффициент усиления усилителя без ОС. Сделать вывод о правильности соотношения между K^{OC} и K .

В отчете представить:

- исходные данные и результаты расчета по варианту;
- схему моделирования для исследования с расчетными значениями;
- значения выходного напряжения усилителя с ОС;
- экспериментальные значения K^{OC} и K ;
- выводы о правильности расчетов.

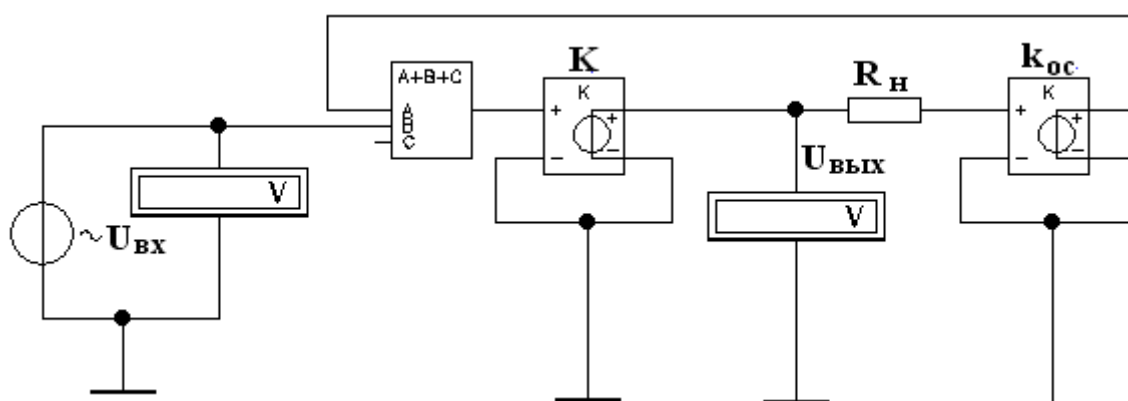


Рис.3.13. Схема усилителя с ОС, параллельной по току

Вопросы для самоконтроля

1. С какой целью в усилитель вводят внешнюю обратную связь?
2. Как влияет отрицательная обратная связь на частотную характеристику RC-усилителя?
3. Как влияет последовательная обратная связь на входное сопротивление усилителя?
4. При каком условии отрицательная обратная связь может превратиться в положительную?
5. Как влияет отрицательная обратная связь на переходную характеристику усилителя?
6. Как влияет отрицательная обратная связь на стабильность коэффициента усиления усилителя?
7. Каковы достоинства и недостатки отрицательной ОС?
8. При какой ОС входное сопротивление увеличивается, а при какой уменьшается?
9. При какой ОС выходное сопротивление увеличивается, а при какой уменьшается?

10. Какой тип ООС в предварительных усилителях предпочтительнее? Почему?

4. АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Цель

1. Анализ методики синтеза амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) усилительных каскадов;
2. Анализ методики синтеза переходных характеристик усилительных каскадов;
3. Синтез АЧХ, ФЧХ и переходных характеристик типовых усилительных каскадов.

Учебные вопросы

- 4.1. Расчет передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и ПХ для усилителя с емкостной нагрузкой;
- 4.2. Анализ характеристик усилителя с емкостной нагрузкой на основе моделирования;
- 4.3. Расчет передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и ПХ для усилителя с индуктивной нагрузкой;
- 4.4. Анализ характеристик усилителя с индуктивной нагрузкой на основе моделирования.

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Павлов В. Н, Ногин В. Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. Для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320с.
3. Петин Г.П., Аналоговая схемотехника. - Ростов-на/Д.: ЮФУ , 2010. - 314с.
4. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И., Аналоговая и цифровая электроника. - М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. - 768с.
5. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
6. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Vissim по элементам телекоммуникационных систем / В.И. Карлащук. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 480 с.: ил. – (Серия «Системы проектирования»).
7. Львов В.Л. Методическое пособие по применению программы Electronics Workbench для проведения лабораторных работ по дисциплинам кафедры систем передачи и обработки информации. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2012. – 54 с.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы;

2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Актуальность занятия

Умение получать основные характеристики усилителя с помощью аналитических расчетов позволяет значительно сократить время разработки самого устройства. Это особенно важно для сложных динамических систем. Не менее важно – объективно подтвердить достоверность расчетов путем моделирования.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Что называется частотными характеристиками?
2. Как получить частотные характеристики теоретическим путем по известной передаточной функции усилителя?
3. Что такое и как получить АЧХ?
4. Что такое и как получить ФЧХ?
5. Что такое и как получить ЛАЧХ?
6. Что такое и как получить ЛФЧХ?

Краткие сведения из теории

Усилитель удобно характеризовать частотными и переходными характеристиками.

Если на вход исследуемого усилителя подать гармонический сигнал

$$U_{ВХ}(t) = U_{0 ВХ} \cos \omega t,$$

где $U_{0 ВХ} = \text{const}$ - амплитуда входного сигнала,

$\omega = 2\pi f$ - циклическая частота,

f - частота колебаний, то на его выходе будет наблюдаться также гармонический сигнал

$$U_{ВЫХ}(t) = U_{ВЫХ}(\omega) \cos [\omega t + \varphi(\omega)],$$

где: $U_{ВЫХ}(\omega) = A(\omega)U_{0 ВХ}$ - амплитуда выходного сигнала,

$\varphi(\omega)$ - фаза выходного сигнала, которые являются функциями частоты.

Частотная зависимость $A(\omega) = \frac{U_{вых}(\omega)}{U_{0 вх}}$ называется **амплитудно-**

частотной характеристикой (АЧХ).

Частотная зависимость угла $\varphi(\omega)$ определяется зависимостью сдвига фазы выходного сигнала относительно входного от частоты входного сигнала и называется **фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).**

Для анализа АЧХ и ФЧХ рассмотрим структурную схему усилителя с отрицательной обратной связью (рис.4.1).

Для простоты исследования примем, что коэффициент усиления собственно усилителя носит вещественный характер и равен 1 ($K = 1$), а коэффициент обратной связи также носит вещественный характер и равен 1 ($k_{oc} = 1$).

Сопротивления Z_1 и Z_2 в общем случае носят комплексный характер. Известно, что комплексный коэффициент усиления

$$\dot{K}_{oc} = \frac{\dot{K}}{1 + \dot{k}_{oc} \cdot \dot{K}}.$$

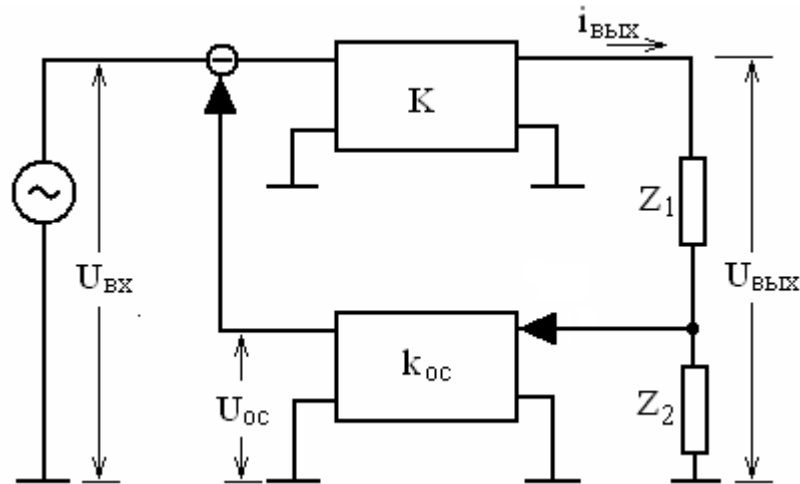


Рис.4.1. Структурная схема усилителя с отрицательной обратной связью

Комплексный коэффициент обратной связи определяется из выражения

$$\dot{k}_{oc} = \frac{\dot{U}_{oc}}{\dot{U}_{ВЫХ}} = \frac{i_{ВЫХ} \cdot Z_2}{i_{ВЫХ} \cdot (Z_1 + Z_2)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Тогда комплексный коэффициент усиления будет равен

$$\dot{K}_{oc} = \frac{1}{1 + \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 + 2Z_2}.$$

Комплексное значение коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью называется также **передаточной функцией усилителя**. В операторной форме ее можно представить в следующем виде

$$H(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{Z_1(p) + Z_2(p)}{Z_1(p) + 2Z_2(p)}.$$

Пример построения АЧХ и ФЧХ

Пусть задана следующая схема усилителя с обратной связью (рис.4.2).

В данном случае $Z_1 = R$, $Z_2 = \frac{1}{pC}$, где p - операторный аргумент.

Подставляя значения Z_1 и Z_2 в выражение для передаточной функции, получим

$$H(p) = \frac{R + \frac{1}{pC}}{R + \frac{2}{pC}} = \frac{pRC + 1}{pRC + 2} = \frac{j\omega T + 1}{j\omega T + 2},$$

где $p = j\omega$, $T = RC$.

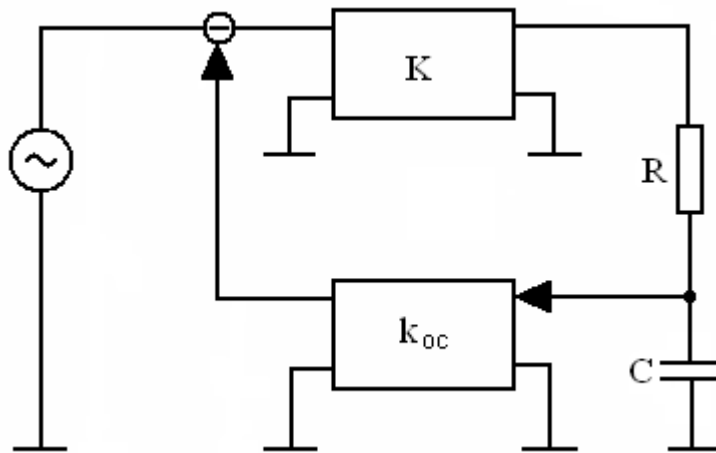


Рис.4.2. Схема усилителя с обратной связью

Умножим числитель и знаменатель выражения для $H(p)$ на сомножитель, сопряженный знаменателю

$$H(p) = \frac{(j\omega T + 1) \cdot (j\omega T - 2)}{(j\omega T + 2) \cdot (j\omega T - 2)} = \frac{-\omega^2 T^2 - j\omega T - 2}{-\omega^2 T^2 - 4} = \frac{\omega^2 T^2 + 2}{\omega^2 T^2 + 4} + j \frac{\omega T}{\omega^2 T^2 + 4}.$$

Как видно из этой формулы, передаточная функция усилителя имеет вещественную и мнимую часть $H(p) = a + jb$.

Из теории известны выражения для АЧХ и ФЧХ:

$$A(\omega) = \sqrt{a^2 + b^2},$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{b}{a}.$$

Определим выражения для АЧХ и ФЧХ рассматриваемого усилителя

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{\omega^4 T^4 + 4\omega^2 T^2 + 4}{(\omega^2 T^2 + 4)^2}} + \frac{\omega^2 T^2}{(\omega^2 T^2 + 4)^2} = \sqrt{\frac{\omega^4 T^4 + 5\omega^2 T^2 + 4}{\omega^4 T^4 + 8\omega^2 T^2 + 16}},$$

$$\phi(\omega) = \arctg \frac{\omega T}{\omega^2 T^2 + 2}.$$

Произведем расчет и построение АЧХ. Результаты расчета представим в виде табл.4.1.

Таблица 4.1

Расчетные данные для построения частотных характеристик

ω	0	$1/T$	∞
$A(\omega)$	0,5	0,63	1
$\phi(\omega)$	0°	$18,4^\circ$	0°

Амплитудно-частотная характеристика будет иметь следующий вид (рис.4.3).

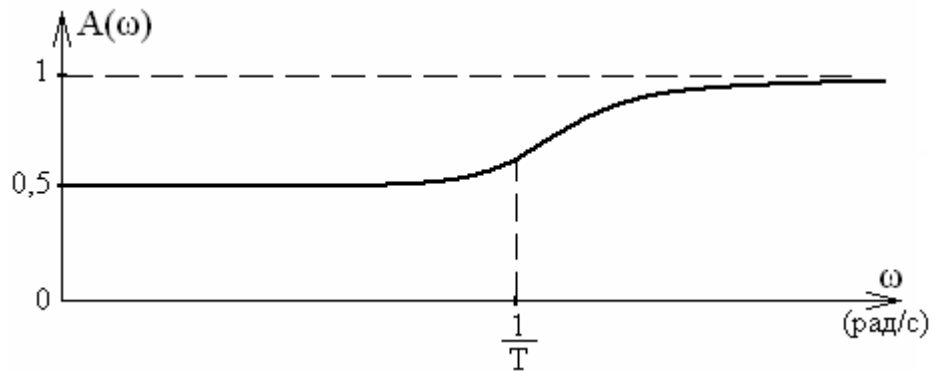


Рис.4.3. Амплитудно-частотная характеристика
(схема на рис.5.2)

Фазочастотная характеристика будет иметь следующий вид (рис.4.4):

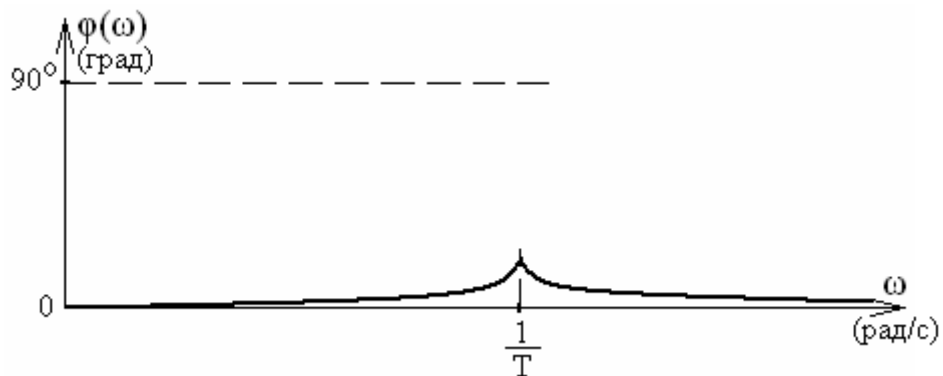


Рис.4.4. Фазочастотная характеристика (схема на рис.5.2)

Так как диапазоны изменения амплитуды и частоты сигнала в усилителе часто бывают очень велики, то на практике применяются логарифмические частотные характеристики.

Логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ) усилительного устройства называют такое представление амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), в котором модуль (амплитуда) частотной характеристики выражен в децибелах, а частота - в логарифмическом масштабе.

Логарифмической фазочастотной характеристикой (ЛФЧХ) усилительного устройства называют такое представление фазочастотной характеристики (ФЧХ), в котором частота выражена в логарифмическом масштабе.

Довольно часто ЛАЧХ И ЛФЧХ строятся на одном графике, чтобы давать полное представление о свойствах объекта. На рис.4.5 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ рассматриваемого усилительного устройства.

Для определения конкретных значений A и φ на заданной частоте необходимо задать значения R , C и f .

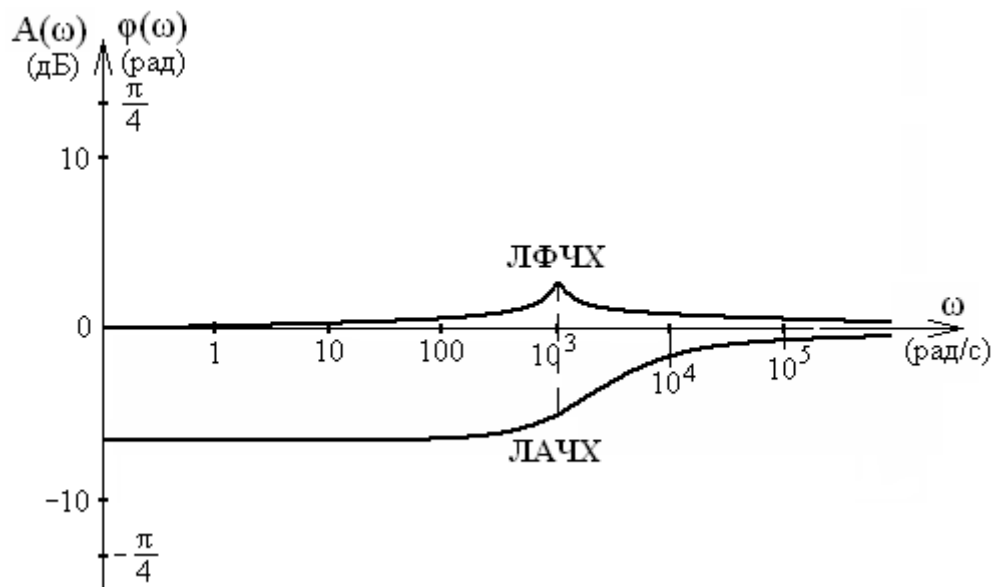


Рис.4.5. ЛФЧХ и ЛАЧХ усилителя с ООС (схема на рис.5.2)

Для оценки быстродействия усилителя с ООС используется переходная характеристика $h(t)$. **Переходной характеристикой** усилителя при нулевых начальных условиях называют сигнал на выходе усилителя при подаче на его вход единичного ступенчатого сигнала (рис.4. 6).

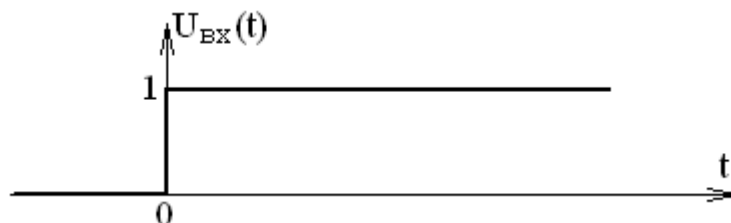


Рис.4.6. Единичный ступенчатый сигнал

При работе в линейном режиме усиления переходная характеристика усилителя связана с передаточной функцией усилителя. Зная передаточную функцию $H(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}$, выражение для переходной функции можно найти по теореме разложения (формула Хевисайда):

$$h(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k \cdot F_2'(p_k)} \cdot e^{p_k t},$$

где p_k - корни характеристического уравнения $F_2(p) = 0$.

Найдем переходную характеристику $h(t)$ усилителя, представленного на рис.4.2. Выше была определена передаточная функция

$$H(p) = \frac{pRC + 1}{pRC + 2} = \frac{pT + 1}{pT + 2} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}.$$

Определим корень характеристического уравнения

$$pT + 2 = 0; \quad p_1 = -\frac{2}{T},$$

и производную $F_2'(p) = T$.

Используя формулу Хевисайда, получим

$$h(t) = \frac{1}{2} + \frac{-\frac{2}{T} \cdot T + 1}{-\frac{2}{T} \cdot T} \cdot e^{\frac{-2t}{T}} = \frac{1}{2} \left(1 + e^{\frac{-2t}{T}} \right).$$

Произведем расчет и построение переходной характеристики. Результаты расчета представим в виде табл.4.2.

Таблица 4.2

Данные для построения переходной характеристики

t	0	T	∞
h(t)	1	0,57	0,5

Переходная характеристика будет иметь следующий вид (рис.4.7).

Для определения конкретного значения $h(t)$ в заданный момент времени необходимо задать значения R, C и t.

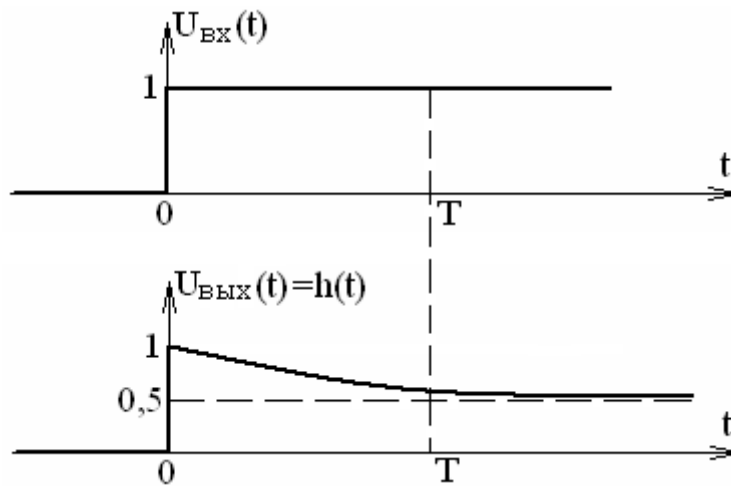


Рис.4.7. Переходная характеристика усилителя
(схема на рис.5.2)

При моделировании на компьютере усилителя (рис.4.2) для исследования ЛАЧХ и ЛФЧХ с использованием Electronics Workbench зададим для примера следующие параметры: $U_{\text{вх}}=10 \text{ мВ}$; $f=1 \text{ кГц}$; $K=1$; $k_{\text{OC}}=1$; $R=10 \text{ кОм}$, $C=100 \text{ мкФ}$.

Для соединения входного напряжения и напряжения обратной связи в программе используется сумматор (**Tree-Way Voltage**), поэтому, чтобы обратная связь была отрицательной, коэффициент передачи звена обратной связи задается отрицательным (-1).

Построим на экране монитора схему усилителя (рис.4.8).

Боде Плоттер (Bode Plotter) находится в наборе Инструменты (**Instruments**). Включив схему, получим на экране Боде Плоттера ЛАЧХ (Magnitude) (рис.4.9) и ЛФЧХ (Phase) (рис.4.10). Пределы измерения амплитуды, фазы и частоты подбираются в соответствующих окнах **F** и **I**.

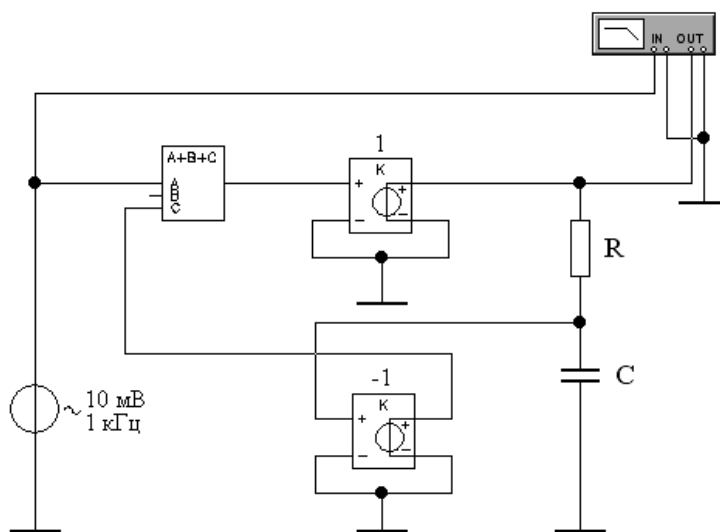


Рис.4.8. Схема для исследования
логарифмических частотных характеристик

Нажимая на стрелки «вправо», «влево» на передней панели Бode Плоттера можно перемещать указатель по экрану, в окошечках справа внизу будут отображаться значение частоты f и соответствующие ей значения $A(f)$ в децибелах для ЛАЧХ или $\varphi(f)$ в градусах для ЛФЧХ. Подведя указатель к значению заданной частоты, определим $A(f)$ и $\varphi(f)$.

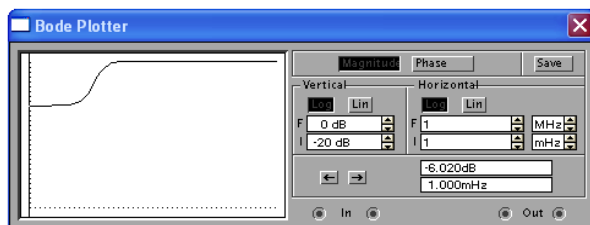


Рис.4.9. ЛАЧХ

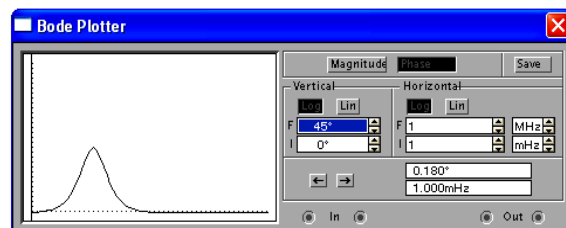


Рис.4.10. ЛФЧХ

Для сравнения рассчитанных и смоделированных результатов необходимо пересчитать угловую частоту в циклическую по формуле $f = \omega / 2\pi$, а значение $A(\omega)$, полученное расчетным методом, перевести в децибелы по формуле $A(\omega) \text{ [dB]} = 20 \lg A(\omega)$ на калькуляторе компьютера.

При моделировании на компьютере усилителя (рис.4.2) для исследования переходной характеристики необходимо построить на экране монитора схему, представленную на рис.4.11. Переключатель (**Switch**) берется из набора Базис (**Basic**). При открытии его свойств (**Component Properties**) надо задать в окне **Ключ (Key)** букву (например, английскую **A**), с помощью которой будете осуществляться переключение. Переключение производится нажатием на клавишу заданной буквы и только при активированном переключателе (выделен красным цветом).

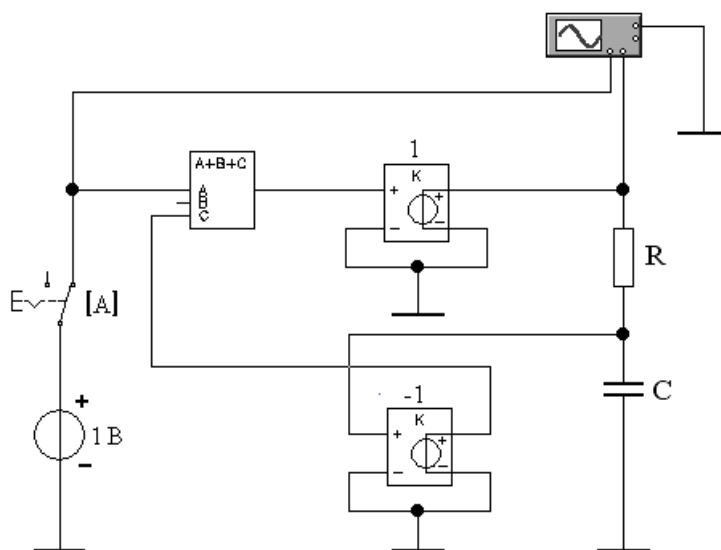


Рис.4.11. Схема для исследования переходной характеристики

Включив схему и переключив ключ в положение «замкнуто», получим на экране осциллографа переходную характеристику (рис.4.12).

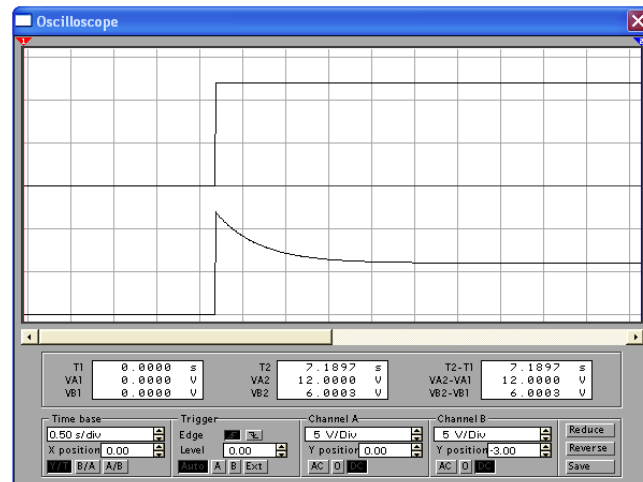


Рис.4.12. Переходная характеристика усилителя

Чтобы определить значение напряжения на выходе усилителя в момент времени t , надо красный указатель (1) курсором установить на начало единичного импульса, а синий указатель (2) - правее красного так, чтобы в правом окошке T2 – T1 число было равно времени t . В этом случае в среднем окошке в нижней строке VB2 будет указано выходное напряжение.

Задание 4.1. Расчет передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и ПХ для усилителя с емкостной нагрузкой

Порядок выполнения задания:

1. Вывести формулы передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики для схемы усилителя с обратной связью, представленной на рис.4.2;

2. Рассчитать $A(f)$ на частоте f для АЧХ, $\varphi(f)$ на частоте f для ФЧХ. Исходные данные для расчетов АЧХ и ФЧХ: $U_r=10\text{ мВ}$; $f_r=1\text{ кГц}$; $K=1$; $k_{OC}=1$; $R=n\text{ кОм}$, $C=(10+n)/100\text{ мкФ}$, $f=(1/2\pi RC - 300/n)\text{ Гц}$, где n - номер студента по журналу;

3. Рассчитать $U_{\text{вых}}(t)$ в момент времени t для переходной характеристики. Исходные данные для расчета переходной характеристики: $U=1\text{ В}$; $K=1$; $k_{OC}=1$; $R=(8+0,4n)\text{ кОм}$, $C=(80+10n)\text{ мкФ}$, $t=(1000RC - 10n)\text{ мс}$, где n - номер студента по журналу.

В отчете представить:

- структурную схему усилителя;
- исходные данные по варианту;
- ввод формул для расчетов;
- расчеты и результаты для поставленных вопросов.

Задание 4.2. Анализ характеристик усилителя с емкостной нагрузкой на основе моделирования

Порядок проведения исследования:

1. Набрать на рабочем поле схему на рис.4.8;
2. Проверить правильность расчетов $A(f)$ и $\varphi(f)$ с помощью компьютерного моделирования, записав в отчет значения характеристик на расчетной частоте;
3. Набрать на рабочем поле схему на рис.4.11;
4. Проверить правильность расчетов переходной характеристики, записать в отчет значение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ в момент времени t .

В отчете представить:

- схему для исследования частотных характеристик;
- схему для исследования переходной характеристики;
- значения $A(f)$ и $\varphi(f)$ на расчетной частоте;
- значение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ в момент времени t .

Задание 4.3. Расчет передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и ПХ для усилителя с индуктивной нагрузкой

Порядок выполнения задания:

1. Вывести формулы передаточной функции, АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики для схемы усилителя с обратной связью, представленной на рис.4.13;
2. Рассчитать $A(f)$ на частоте f для АЧХ, $\varphi(f)$ на частоте f для ФЧХ. Исходные данные для расчетов АЧХ и ФЧХ: $U_r=10\text{мВ}$; $f_r=1\text{кГц}$; $K=1$; $k_{\text{ос}}=1$; $R=n\text{ Ом}$, $L=(100n+200)\text{ мГн}$, $f=R/2\pi L\text{ Гц}$, где n - номер студента по журналу;

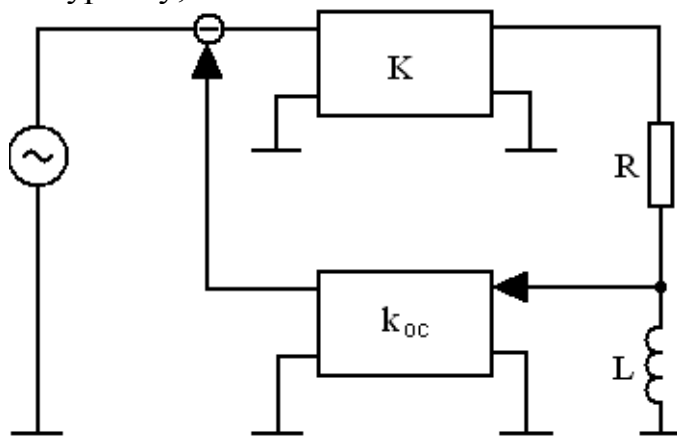


Рис.4.13. Схема усилителя с обратной связью и индуктивной нагрузкой

3. Рассчитать $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ в момент времени t для переходной характеристики. Исходные данные для расчета переходной характеристики:

$U = 1 \text{ В}$; $K = 1$; $k_{OC} = 1$; $R = 0,1n \text{ Ом}$, $L = (50n + 100) \text{ мГн}$, $t = R/2L \text{ с}$, где n - номер студента по журналу

В отчете представить:

- структурную схему усилителя;
- исходные данные по варианту;
- ввод формул для расчетов;
- расчеты и результаты для поставленных вопросов.

Задание 4.4. Анализ характеристик усилителя с индуктивной нагрузкой на основе моделирования

Порядок проведения исследования:

1. Набрать на рабочем поле схему на рис.4.14;
2. Проверить правильность расчетов $A(f)$ и $\varphi(f)$ с помощью компьютерного моделирования, записав в отчет значения характеристик на расчетной частоте;
3. Набрать на рабочем поле схему на рис.4.15;
4. Проверить правильность расчетов переходной характеристики, записать в отчет значение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ в момент времени t .

В отчете представить:

- схему для исследования частотных характеристик;
- схему для исследования переходной характеристики;
- значения $A(f)$ и $\varphi(f)$ на расчетной частоте;
- значение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ в момент времени t .

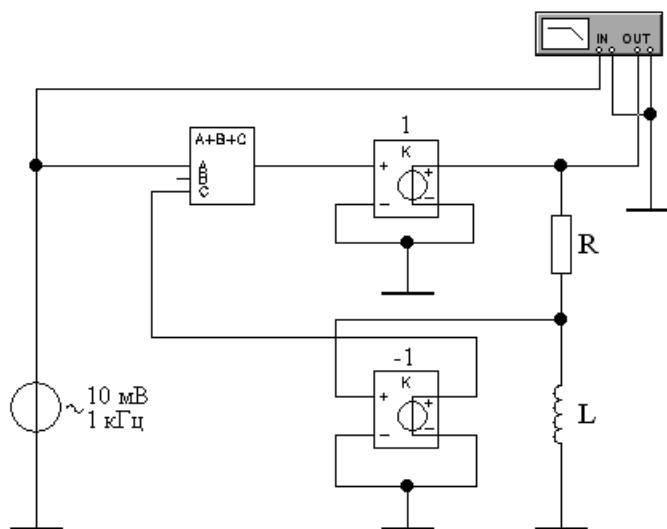


Рис.4.14. Схема для исследования частотных характеристик усилителя с индуктивной нагрузкой

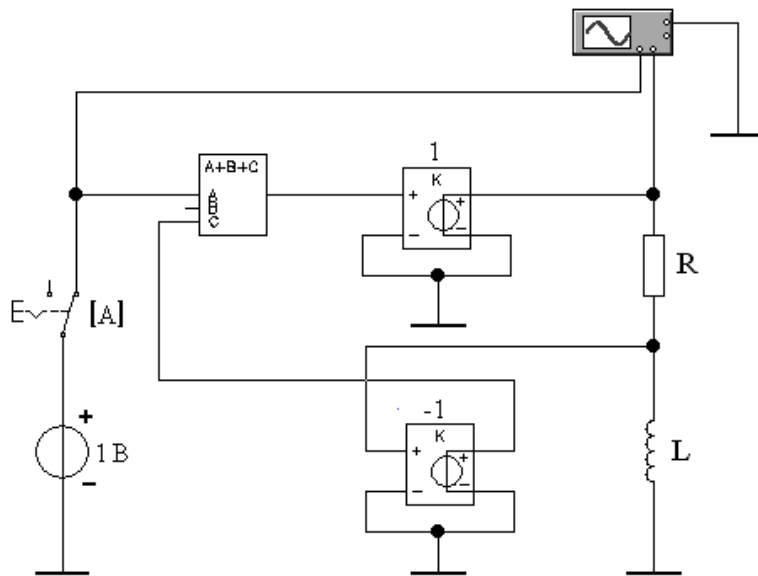


Рис.4.15. Схема для исследования переходной характеристики усилителя с индуктивной нагрузкой

Вопросы для самоконтроля

1. Какие свойства усилителя характеризуют передаточная характеристика?
2. Какие свойства усилителя характеризуют АЧХ?
3. Какие свойства усилителя характеризуют ФЧХ?
4. Какие свойства усилителя характеризует переходная характеристика?
5. В чем отличия АЧХ и ЛАЧХ?
6. Какими приборами снимаются частотные и переходные характеристики? Почему?
7. Каким образом можно снять переходную характеристику обычным электронным осциллографом?