

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

А. Г. Алексеев, П. В. Климова

**СХЕМОТЕХНИКА
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
УСТРОЙСТВ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

СПб ГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015**

УДК 621.375(075.8)
ББК 32.846я73
А47

Рецензент
кандидат технических наук,
доцент кафедры телевидения и метрологии СПбГУТ
А. Н. Бучатский

*Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом СПбГУТ*

Алексеев, А. Г.
А47 Схемотехника телекоммуникационных устройств : лабораторный
практикум / А. Г. Алексеев, П. В. Климова; СПбГУТ. – СПб., 2015. – 67 с.

Изложен материал для выполнения компьютерных лабораторных работ. Приведены общие методы электронного моделирования на ПК с привлечением разработанной в СПбГУТ программы Fastmean 6.0, а также измерения различных характеристик и параметров усилительных устройств, построенных на дискретных элементах и на интегральных микросхемах в соответствии с программой дисциплины «Схемотехника телекоммуникационных устройств». При этом основной акцент сделан на построение эквивалентных схем и представление усилителей в виде четырехполюсников.

Можно использовать как при традиционных, так и при дистанционных технологиях обучения.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 11.03.01 «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

**УДК 621.375(075.8)
ББК 32.846я73**

© Алексеев А. Г., Климова П. В., 2015

© Федеральное государственное образовательное
бюджетное учреждение высшего профессионального
образования «Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Задание к лабораторным работам 1–4	5
Задание к лабораторной работе 5	5
Лабораторная работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ	7
Лабораторная работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ И ОС	22
Лабораторная работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ	31
Лабораторная работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ	38
Лабораторная работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ НА ИНТЕГРАЛЬНОМ ОУ В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЯХ	45
ПРИЛОЖЕНИЕ	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	66

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень лабораторных занятий в высшей школе предполагает не только использование измерительных стендов, оснащенных современной измерительной техникой, но и виртуальных исследований. Компьютерное моделирование дает обучающимся мощный аппарат исследования, позволяющий создавать невыполнимые для реальных измерений условия и тем самым глубже проникать в работу устройств и детальнее понимать происходящие в них физические процессы.

Важными элементами схемотехники являются активные приборы, такие как транзистор и операционный усилитель (ОУ). Поэтому создание модели транзистора и ОУ – одно из условий виртуальных исследований.

Так как изучение схем выполняется в первую очередь в частотном диапазоне, моделирование активного элемента производится в этой же области. Модель биполярного транзистора базируется на источнике тока, управляемом током (ИТУТ) с П-образной структурой. Программным продуктом является Fastmean, который вычисляет модуль и фазу коэффициента передачи в выбранном частотном диапазоне.

Построение модели ОУ основано на использовании источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН). Ее частотные свойства описываются двухполюсной функцией передачи, поскольку в большинстве случаев ОУ выполняются с внутренней частотной коррекцией. При замене гармонического входного сигнала на импульсный (меандр) программа позволяет измерять переходные характеристики.

В программе предусмотрено деление сложных схем на подсхемы, что позволяет существенно упрощать схемы исследуемых устройств, представлять их в виде четырехполюсников. В процессе исследования изучаются важные разделы курса, приобретаются практические навыки, закрепляется теория. Происходит формирование навыков, умений и компетенций в расчетах и экспериментальных исследованиях электронных цепей.

Принятые модели транзистора и ОУ, а также схемы на них, неоднократно проверены на практике. Они адекватно описывают работу аналоговых устройств как в частотной, так и во временной области.

Предложенная методика дает возможность бакалаврам и магистрам быстро и легко проводить анализ электронных структур большой сложности.

Задание к лабораторным работам 1, 2, 3, 4

В табл. 1, 2 и 3 приведены тип транзистора и его параметры, ток покоя коллектора $I_{0К}$ и напряжение источника питания E_0 .

Таблица 1

N п.п.	Тип	h_{21min}	h_{21max}	$ h_{21} $	при f	$\tau_{ос}$	$C_{к}$
					МГц		
0	КТ306Г	40	200	5	100	500	5
1	КТ325В	160	400	10	100	125	2.5
2	КТ375Б	50	280	2.5	100	300	5
3	КТ396А	40	250	7	300	11	1.5
4	КТ3102А	100	250	1.5	10	100	6
5	КТ306Г	40	200	5	100	500	5
6	КТ325В	160	400	10	100	125	2.5
7	КТ375Б	50	280	2.5	100	300	5
8	КТ396А	40	250	7	300	11	1.5
9	КТ3102А	100	250	1.5	10	100	6

Таблица 2

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{0К}, mA$	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3

Таблица 3

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_0, B	8	10	12	6	8	10	12	10	12	6

Вариант задания определяется по трем последним цифрам номера зачетной книжки. Например, три последние цифры в зачетной книжке 069. Этот вариант выделен в таблицах.

Задание к лабораторной работе 5

В табл. 4 приведены типы микросхем операционного усилителя, исследуемых в этой лабораторной работе, и их параметры.

Вариант задания в работе 5 определяется по последней цифре номера зачетной книжки. Для того же примера (069) в табл. 4 он также выделен. При выполнении лабораторной работы коэффициент усиления в дБ необходимо перевести в безразмерное число.

В табл. 5 приведены номинальные значения элементов интегратора.

В табл. 6 приведены номинальные значения элементов дифференциатора.

Таблица 4

№	Тип ОУ	Частота единичного усиления (МГц)	Коэффициент усиления ОУ (дБ)	Скорость нарастания (В/мкс)	Максимальный выходной ток (мА)
0	ОРА628	160	90	310	30
1	ОРА650	560	47	180	55
2	ОРА646	650	47	180	52
3	ОРА640	1300	53	350	52
4	ОРА658	680	68	1000	60
5	ОРА688	260	66	1700	85
6	ОРА603	160	86	1000	150
7	ОРА622	250	80	1700	70
8	ОРА620	300	50	175	50
9	ОРА655	400	55	250	50

Таблица 5

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R, кОм	1	2	1.3	1.6	2	1.5	1.8	1.2	1	2.2
C, пФ	100	200	220	100	510	360	270	240	330	430

Таблица 6

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R, кОм	2.4	3.3	10	5.1	4.7	6.8	7.5	2.7	8.2	2.2
C, нФ	20	30	22	47	68	82	51	24	10	18

Вариант задания на интегратор и дифференциатор определяются по предпоследней цифре номера зачетной книжки. В табл. 5 и 6 он также выделен.

Каждый раздел исследования должен заканчиваться объяснением полученных результатов и выводом.

Лабораторная работа 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

1. Цель работы

Изучить свойства усилительного каскада с Общим Эмиттером (ОЭ) в режиме малого сигнала. Выполнить анализ в частотной и временных областях. Исследовать свойства каскада при изменении сопротивления источника сигнала, нагрузки и элементов схемы. Определить входное и выходное сопротивления каскада.

2. Подготовка к работе

2.1. Изучить п. 3 (основные сведения) данного лабораторного практикума.

2.2. Теоретические сведения содержатся в литературе [1–3].

2.3. Ознакомиться с указанием по использованию программы Fastmean [5].

3. Основные сведения

По определению, в схеме с ОЭ эмиттер транзистора присоединяется к проводу (узлу) общему для входа и выхода каскада, как показано на рис. 1.1. Полная принципиальная схема каскада ОЭ представлена ниже на рис. 1.6.

Изучение свойств каскада необходимо разбить на две части:

- расчет режима работы каскада на постоянном токе (3.1).
- исследование свойств каскада ОЭ по сигналу на переменном токе (3.2).

Каждая часть состоит из пунктов, которые подробно рассмотрены ниже.

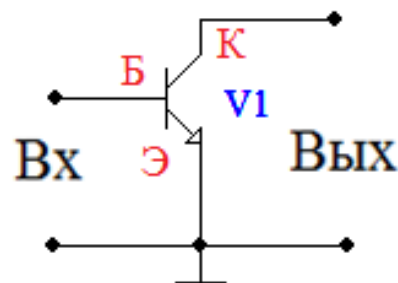


Рис.1.1. Максимально упрощенное представление о схеме включения транзистора с ОЭ

3.1. Расчет режима работы транзистора на постоянном токе

Эта часть состоит из пяти пунктов.

3.1.1. Расчет сопротивлений резисторов цепей питания.

3.1.2. Расчет элементов модели транзистора.

3.1.3. Составление эквивалентной схемы каскада по постоянному току.

3.1.4. Вычисление на Fastmean тока покоя коллектора $I_{0К}$.

3.1.5. Построение нагрузочной линии по постоянному току.

3.1.1. Расчет сопротивлений резисторов цепей питания.

Цепи питания транзистора определяются способом подачи смещения вне зависимости от способа его включения на переменном токе. На рис. 1.2 показана схема смещения с эмиттерной стабилизацией. Положение точки покоя (исходной рабочей точки) в активной области выходных статических

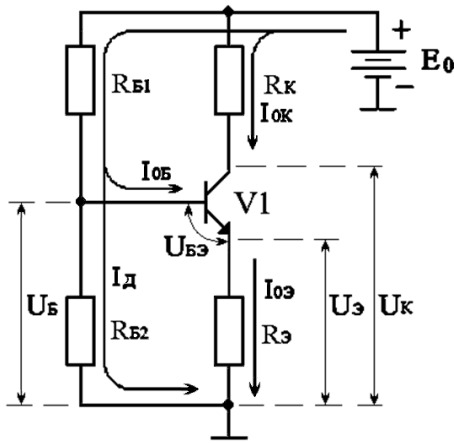


Рис. 1.2. Схема включения транзистора на постоянном токе

характеристик транзистора определяется резисторами R_{B1} , R_{B2} , R_K , R_E , а также напряжением источника питания E_0 . Стабильность режима работы транзистора достигается с помощью обратной связи, создаваемой резистором R_E .

Заданными являются: напряжение источника питания E_0 , ток покоя коллектора I_{0K} и тип транзистора.

Приняв значения $U_{Э} = 0,1 E_0$ и $U_K = 0,5 E_0$, вычислим напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{0K} = U_{KЭ} = U_K - U_{Э}$ и

напряжение на базе $U_B = U_{BЭ} + U_{Э}$, где напряжение между базой и эмиттером $U_{BЭ} = 0,6 \text{ В}$ – для кремниевых транзисторов при небольших токах коллектора.

По заданному току покоя I_{0K} вычисляем ток базы $I_{0B} = I_{0K}/h_{21}$, где $h_{21} = \sqrt{h_{21\max} \times h_{21\min}}$; $h_{21\max}$, $h_{21\min}$ – максимальный и минимальный статические коэффициенты передачи тока для ОЭ. Ток делителя $I_D = 10 I_{0B}$, ток эмиттера $I_{0Э} = (1 + h_{21})I_{0B}$.

Теперь вычисляем сопротивления резисторов:

$$R_E = U_{Э}/I_{0Э}, R_{B1} = (E_0 - U_B)/(I_D + I_{0B}), R_{B2} = U_B/I_D, R_K = (E_0 - U_K)/I_{0K}.$$

Далее, необходимо выбрать значения резисторов по номинальному ряду.

Значения сопротивлений резисторов стандартизованы. Установлены ряды номинальных значений (табл. 1). Ряды E представляют собой десятичные ряды геометрической прогрессии со знаменателем прогрессии, равным $q_N = \sqrt[N]{10}$ для ряда EN . Цифра после буквы E указывает число номинальных величин в каждом десятичном интервале (декаде). Приводимые в таблице числа можно применять путем умножения или деления этих чисел на $10n$, где n – целое положительное или отрицательное число. Фактические значения сопротивлений могут отличаться от номинальных в пределах определенных допусков. Ряд допускаемых отклонений от номинальных значений также нормализован. С уменьшением допусков возрастает лишь число промежуточных значений.

В табл. 1.1 приведен номинальный ряд значений резисторов, изготовляемых с точностью 20 % (столбцы *E6*), 10 % – в столбцах *E12* и 5 % – в столбцах *E24*.

Таблица 1.1

<i>E6</i>	<i>E12</i>	<i>E24</i>	<i>E6</i>	<i>E12</i>	<i>E24</i>	<i>E6</i>	<i>E12</i>	<i>E24</i>
1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7
		1,1		2,4	2,4			5,1
	1,2	1,2		2,7	2,7		5,6	5,6
		1,3			3,0			6,2
1,5	1,5	1,5	3,3	3,3	3,3	6,8	6,8	6,8
		1,6			3,6			7,5
	1,8	1,8		3,9	3,9		8,2	8,2
		2,0			4,3			9,1

3.1.2. Расчет элементов модели транзистора.

Поскольку биполярный транзистор обладает высоким выходным сопротивлением и управляется током базы, логично рассматривать его как источник тока, управляемый током (ИТУТ) (рис. 1.3).

Параметры модели получают по входному сопротивлению на постоянном токе $H_{11} = U_{БЭ}/I_{0Б}$ и коэффициенту усиления тока базы h_{21} . Минус учитывает направление тока коллектора.

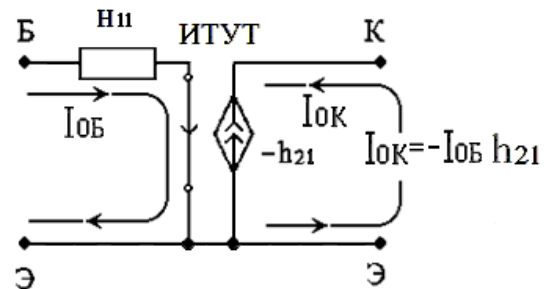


Рис. 1.3. Модель биполярного транзистора для постоянного тока. (ИТУТ)

3.1.3. Составление эквивалентной схемы каскада по постоянному току.

Заменив транзистор его эквивалентной моделью (рис. 1.3), получим эквивалентную схему по постоянному току (рис. 1.4).

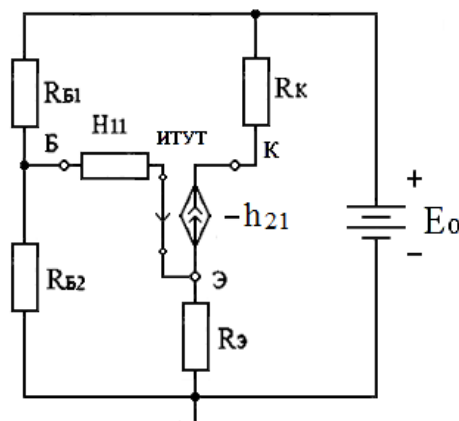


Рис. 1.4. Эквивалентная схема каскада по постоянному току

3.1.4. Вычисление на Fastmean тока покоя коллектора $I_{0К}$.

Введем эквивалентную схему каскада (рис. 1.4) в компьютер и, кликнув «Анализ на постоянном токе», определим ток покоя $I_{0К}$. Результаты расчетов сводим в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметр	$R_{Б1}$	$R_{Б2}$	$R_{К}$	$R_{Э}$	h_{21}	E_0	$I_{0К}$
Единица изм.	кОм	кОм	кОм	кОм		В	мА
Расчет							
На Fastmean							

Сравнить результаты предварительного расчета и на компьютере.

3.1.5. Построение нагрузочной линии по постоянному току.

Типовая нагрузочная линия по постоянному току изображена рис. 1.5, а.

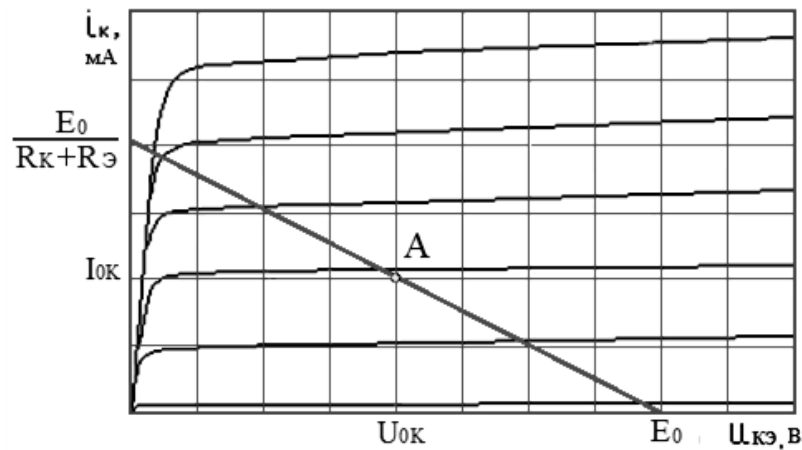


Рис. 1.5, а. Нагрузочная линия по постоянному току

По полученным результатам (табл. 1.2) построить нагрузочную линию для постоянного тока в исследуемом усилителе, отметить на ней точку покоя А. Для выполнения этого пункта предусмотрен рис. 1.5, б.

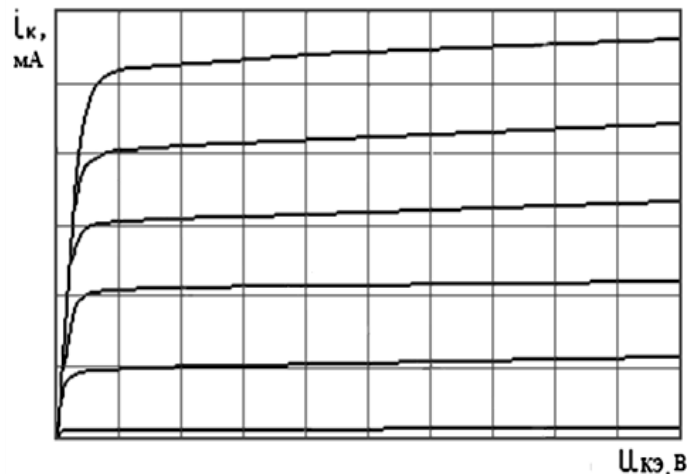


Рис. 1.5, б. Поле для построения нагрузочной линии

3.2. Исследование свойств каскада ОЭ по сигналу на переменном токе

На рис. 1.6 показана принципиальная схема каскада с ОЭ. Дополнительно выделены входные и выходные контакты усилителя. Источник питания E_0 отнесен к усилителю, но может быть показан автономно. Обратите внимание, что в Fastmean источник питания изображается в виде круга.

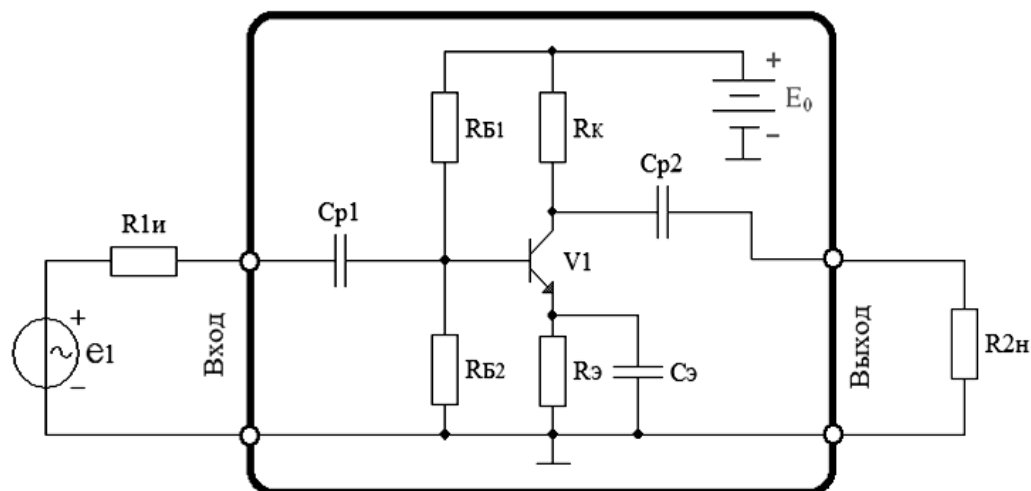


Рис. 1.6. Принципиальная схема каскада с ОЭ

Переменная составляющая сигнала попадает на вход транзистора (базу) через конденсатор C_{P1} , а передается в нагрузку от коллектора через конденсатор C_{P2} . В соответствующем частотном диапазоне конденсатор $C_э$ шунтирует (замыкает накоротко) сопротивление $R_э$, поэтому напряжение на эмиттере по сигналу практически равно нулю и схема соответствует включению (рис. 1.1).

Исследование состоит из восьми пунктов.

3.2.1. Построение нагрузочной линии по сигналу.

3.2.2. Расчет элементов модели транзистора для переменного тока (по сигналу).

3.2.3. Составление эквивалентной схемы каскада ОЭ.

3.2.4. Расчет параметров АЧХ и ПХ с помощью Fastmean, а именно:

– амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ее параметров: $K_{скв}$ – сквозной коэффициент усиления на средней частоте в дБ, $f_{н\sqrt{2}}$ – частота нижнего среза, $f_{в\sqrt{2}}$ – частота верхнего среза;

– переходной характеристики (ПХ): $t_н$ – время нарастания, Δ – спад вершины импульса при заданной длительности импульса $t_и$.

3.2.5. Определение влияния на параметры АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1н}$ и нагрузки $R_{2н}$ (рис. 1.6);

3.2.6. Определение влияния на АЧХ и ПХ емкости нагрузки.

3.2.7. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} и блокировочного конденсатора $C_э$.

3.2.8. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада ОЭ.

3.2.1. Построение нагрузочной линии по сигналу.

Переменная составляющая коллекторного тока протекает через резистор R_K и сопротивление внешней нагрузки R_{2H} (рис. 1.6).

Таким образом, эквивалентной нагрузкой транзистора R_H переменному току на средних частотах оказывается параллельное соединение этих двух элементов схемы. Нагрузочная линия по сигналу проходит (как и нагрузочная линия постоянному току) через точку покоя A . Полагая, что максимальная неискаженная амплитуда выходного тока $I_{K \max}$ равна току покоя I_{0K} , находим амплитуду выходного напряжения.

$$U_{2m \max} = I_{K \max} R_H,$$

где $R_H = R_K \parallel R_{2H}$.

Рис. 1.7 повторяет рис. 1.5, а, на котором определена точка покоя A . Отложим на этом же рисунке по горизонтальной оси напряжение, равное $U_{0K} + U_{2m \max}$ (точка B). Соединив точки A и B прямой, получим отрезок нагрузочной линии переменному току (по сигналу) для данной точки покоя при отрицательной полярности сигнала. При положительной полярности сигнала нагрузочная прямая пойдет вверх от точки A . На заготовке (рис. 1.5, б) необходимо построить нагрузочные линии постоянному и переменному току. Рисунок этот сохранить.

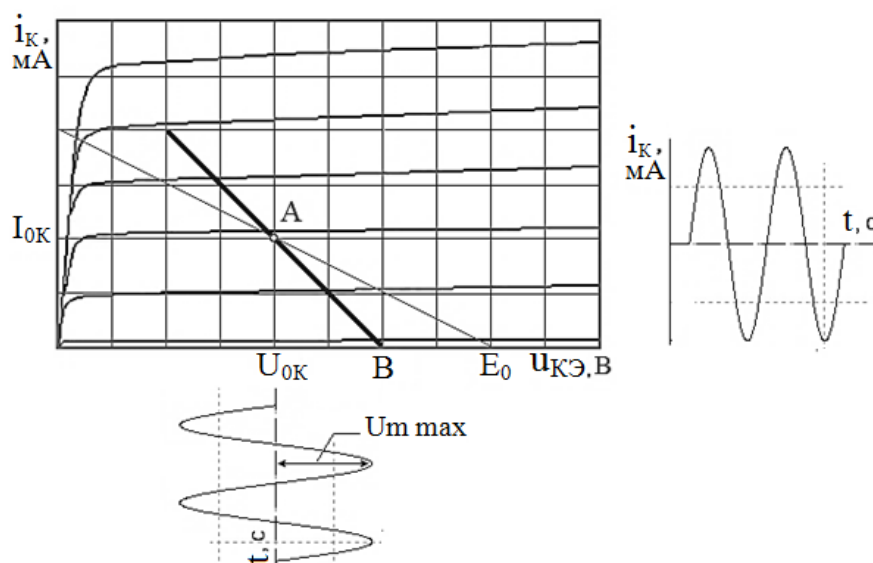


Рис. 1.7. Нагрузочная линия для переменного тока

3.2.2. Расчет элементов модели транзистора для переменного тока (по сигналу).

Выбор модели транзистора по сигналу ИТУТ основан на ранее использованной П-образной схеме (рис. 1.3) с добавлением к ней частотно-зависимых элементов (рис. 1.8). Подобная этой, модель транзистора известна в литературе как схема Джиаколетто.

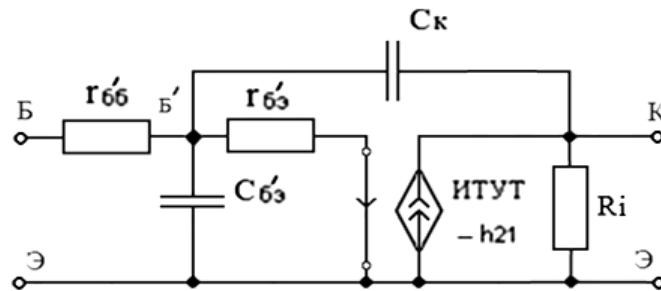


Рис. 1.8. Эквивалентная модель биполярного транзистора для сигнала

Для расчета элементов модели необходимо взять из справочника следующие параметры транзистора: τ_{oc} – постоянная времени цепи обратной связи; C_K – емкость коллекторного перехода; модуль коэффициента передачи тока $|h_{21Э}|$ на высокой частоте f , указанной изготовителем.

Выходное сопротивление транзистора $1/h_{22}$ обозначено R_i . Оно определяется напряжением Эрли $U_{ЭР}$ (100...300 В) и током покоя транзистора $I_{0К}$. Так, при $U_{ЭР} = 100$ В и $I_{0К} = 4$ мА $R_i = 25$ кОм, что, как правило, значительно больше R_K . По этой причине его часто не учитывают.

Элементы $r_{бб}$, $r_{бэ}$, S , $C_{бэ}$ могут быть вычислены из выражений:

$$r_{бб} = \frac{\tau_{oc}}{C_K}; \quad S = \frac{I_{0К}(\text{мА})}{U_T(\text{мВ})}; \quad r_{бэ} = (1 + h_{21Э}) \frac{U_T(\text{мВ})}{I_{0К}(\text{мА})}; \quad h_{11} = r_{бб} + r_{бэ};$$

$$C_{бэ} = \frac{S}{2\pi f_T}; \quad f_T = |h_{21}| \times f,$$

где f_T – частота единичного усиления (при $h_{21} = 1$), а $U_T = kT/q$,

причем $k = 1,38 \times 10^{-21}$ Дж/°С – постоянная Больцмана;

T – температура в градусах Кельвина;

$q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. Значит, $U_T = \frac{T}{11,6}$ (мВ).

При комнатной температуре (20 °С) $U_T = 25,6$ мВ, параметр h_{21} вычислен ранее.

3.2.3. Составление эквивалентной схемы каскада ОЭ.

Для составления эквивалентной схемы каскада с ОЭ при малом сигнале заменим в принципиальной схеме каскада (рис. 1.6) транзистор $V1$ эквивалентной моделью (рис. 1.8). Помня о том, что сопротивление источника питания E_0 переменному току равно нулю, вследствие чего верхние концы резисторов R_{B1} и R_K соединяются с общим проводом, получаем эквивалентную схему каскада ОЭ, показанную на рис. 1.9. В этой схеме резистор R_6 заменил параллельное соединение резисторов R_{B1} и R_{B2} .

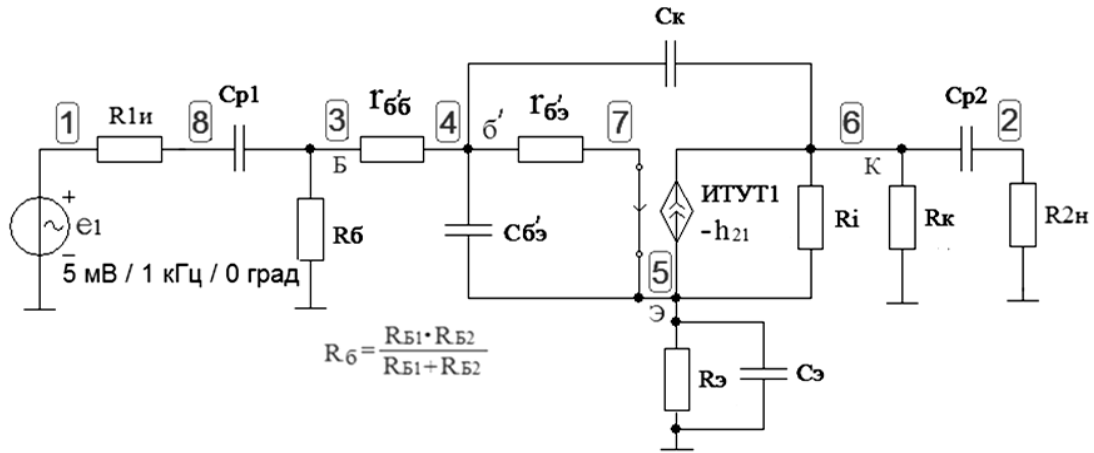


Рис. 1.9. Эквивалентная схема каскада ОЭ для малого сигнала

Значения всех элементов схемы на рис. 1.9 свести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

e_1	$R_{1И}$	C_{p1}	R_6	$r_{бб}$	$r_{бэ}$	$C_{бэ}$	C_K	h_{21}	$R_э$	$C_э$	R_K	C_{p2}	$R_{2Н}$
мВ	кОм	мкФ	кОм	Ом	Ом	пФ	пФ		Ом	мкФ	кОм	мкФ	кОм
5	0,1	10,0								1000,0		10,0	2

3.2.4. Расчет параметров АЧХ и ПХ с помощью Fastmean.

Перед работой на компьютере следует выполнить предварительный расчет $K_{СКВ}$ на средней частоте и частоты верхнего среза $f_{B\sqrt{2}}$.

$$K_{СКВ} = \frac{R_6}{(R_{1И} + R_6)} \cdot \frac{h_{21} R_H}{R_{\Gamma} + R_{ВХ}};$$

$$K_{СКВ \text{ дБ}} = 20 \lg K_{СКВ},$$

где

$$R_6 = \frac{R_{B1} \times R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \quad R_H = R_K \parallel R_{2Н} = \frac{R_K \cdot R_{2Н}}{R_K + R_{2Н}}, \quad R_{\Gamma} = R_{1И} \parallel R_6 = \frac{R_{1И} \cdot R_6}{R_{1И} + R_6},$$

$$R_{\text{вх}} = h_{11}, \quad f_{\text{в}\sqrt{2}} = \frac{1}{2\pi C_0 \times \left[r_{\text{б}\text{'}} \parallel (r_{\text{б}\text{'}} + R_{\Gamma}) \right]},$$

где

$$C_0 = C_{\text{б}\text{'}} + C_{\text{к}} \times \left(1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} R_{\text{н}} \right).$$

Значительное количество элементов эквивалентной схемы желательно заменить эквивалентным активным четырехполюсником, обладающим такими же свойствами, что и заменяемая им часть. В транзисторном каскаде удобно выделить и поместить в подсхему эквивалентную модель самого транзистора (рис. 1.8). Технология этого преобразования показана в Приложении. Тогда эквивалентная схема каскада ОЭ примет вид (рис. 1.10). В подсхеме находится транзистор. Элементы каскада, не вошедшие в подсхему, заключены между узлами 8 и 2. Источник гармонического сигнала с эдс $e_1 = 5$ мВ и внутренним сопротивлением $R_{1и}$ подключается ко входу усилителя. К выходу усилителя присоединена нагрузка $R_{2н}$.

На рис. 1.10 появился новый элемент $C_{\text{н}}$, отражающий эквивалентную емкость нагрузки. Дело в том, что чисто резистивной в реальности нагрузка быть не может. По меньшей мере всегда имеет место монтажная емкость. В случае, если нагрузкой будет какой-либо другой усилительный каскад, в состав эквивалентной емкости нагрузки войдет его входная емкость. Примем для расчетов $C_{\text{н}} = 10$ пФ.

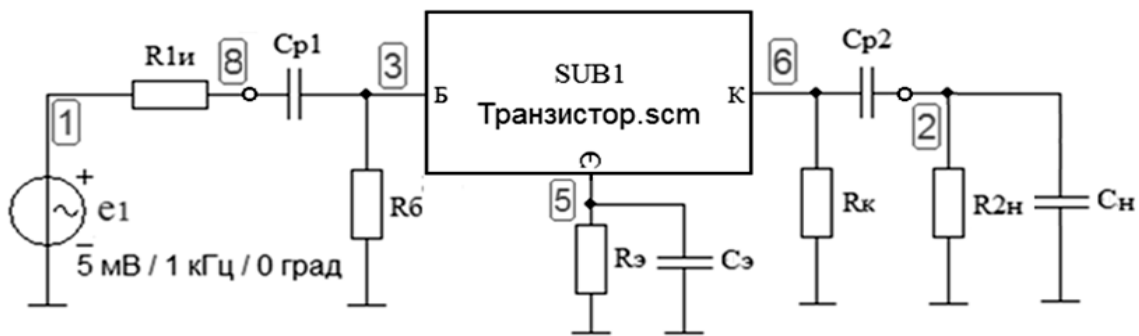


Рис. 1.10. Схема исследования АЧХ и ПХ каскада ОЭ

Значения других элементов схемы (рис. 1.10) должны соответствовать табл. 1.3.

Для определения параметров АЧХ ($K_{\text{с\кв}}$ и $f_{\text{н}\sqrt{2}}$, $f_{\text{в}\sqrt{2}}$) необходимо получить изображение этой характеристики. В диалоговом окне следует задать начальную частоту $f_{\text{нач}} = 10$ Гц и конечную $f_{\text{кон}} = 100$ МГц, установить логарифмическую развертку по частоте, что обеспечивает на час-

тотной оси X логарифмический масштаб. АЧХ в двойном логарифмическом масштабе (рис. 1.11) получаем, записав для оси Y выражение $db(\text{mag}(U(2)/U(1)))$.

Сквозной коэффициент усиления определяем на средних частотах, где характеристика достигает максимального уровня. Граничные частоты $f_{H\sqrt{2}}$, $f_{B\sqrt{2}}$ определяем по уровню на 3 дБ ниже $K_{\text{СКВ}}$ дБ. На рисунке это соответствует 25 дБ. Значения граничных частот находим с помощью инструментальной линейки.

На этих частотах коэффициент усиления по напряжению уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, что соответствует уровню 0,707 от его значения на средних частотах. По мощности коэффициент усиления здесь снижается в два раза.

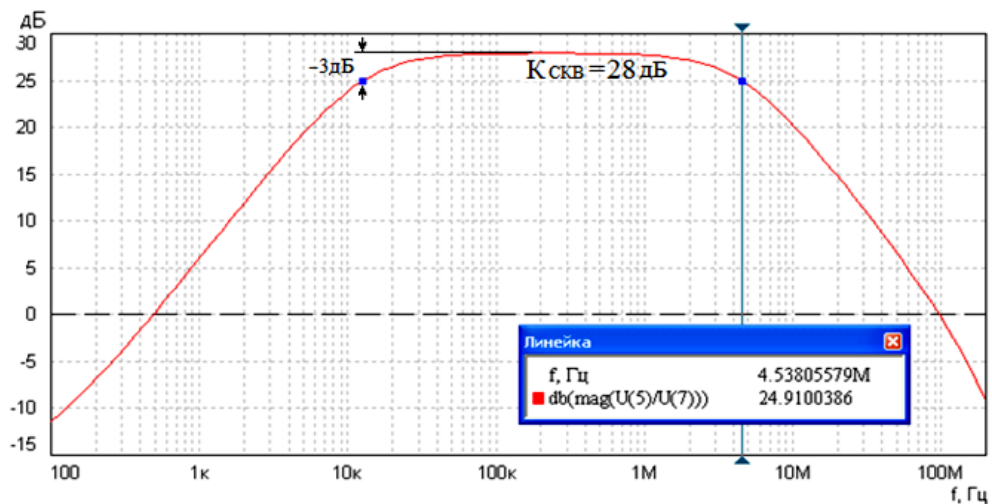


Рис. 1.11. Пример АЧХ каскада с ОЭ

Для проверки результатов расчета удобно пользоваться двумя АЧХ: простым отношением $\text{mag}(U(2)/U(1))$ и в децибелах – $db(\text{mag}(U(2)/U(1)))$. Тогда отпадает необходимость тратить время на перевод децибел в безразмерные величины и наоборот.

Сравнить результаты предварительного расчета и расчета на Fastmean.

Для определения параметров ПХ (t_H – время нарастания и Δ – процент спада вершины импульса) необходимо подать на вход схемы последовательность прямоугольных импульсов (меандр) с амплитудой $e_1 = \pm 5$ мВ и длительностью импульсов $t_{И}$, указанной в табл. 1.4.

Заданная длительность прямоугольных импульсов устанавливается частотой их следования $f_{И} = 1/2t_{И}$ в окне источника сигнала. Время нарастания t_H принято измерять на импульсах малой длительности, а относительный спад вершины импульса Δ на импульсах большой длительности.

При включении опции «переходный процесс» на экране появляется изображение формы напряжения в выбранных узлах схемы. В том числе

у источника сигнала и на выходе исследуемого устройства. Шаг расчета выбирается по форме наблюдаемой характеристики так, чтобы она не получилась ломаной.

При работе с прямоугольными импульсами приходится учитывать, что в электронной схеме после ее включения начинается процесс установления напряжений во всех узлах этой схемы. Причиной этого является накопление заряда на емкостных элементах, имеющихся в данной схеме. В схеме на рис. 1.10 используются конденсаторы с номинальными значениями емкостей 10 мкФ и даже 1000 мкФ. Такие соотношения приводят к тому, что процесс установления наблюдается до 300 мс. Огромный вклад здесь вносит конденсатор $C_Э$.

Признаком окончания процесса установления можно считать равенство уровней положительного и отрицательного импульсов. Выбрать импульсы для проведения измерений можно, задав очень большое значение конечного времени, после чего вырезать несколько последних импульсов. Можно также вспомнить о том, что Fastmean имеет опцию «перем. состояния» и «перенести на схему как начальные условия». Их последовательное включение выполняет то, что только что было описано. Иногда приходится повторять эти две команды. После достижения цели задается конечное время, равное длительности двух-трех импульсов, и производится измерение параметров импульса.

Для определения параметров ПХ вполне достаточно установить конечное время (t_{\max}) в 2...3 раза больше длительности импульса (рис. 1.12).

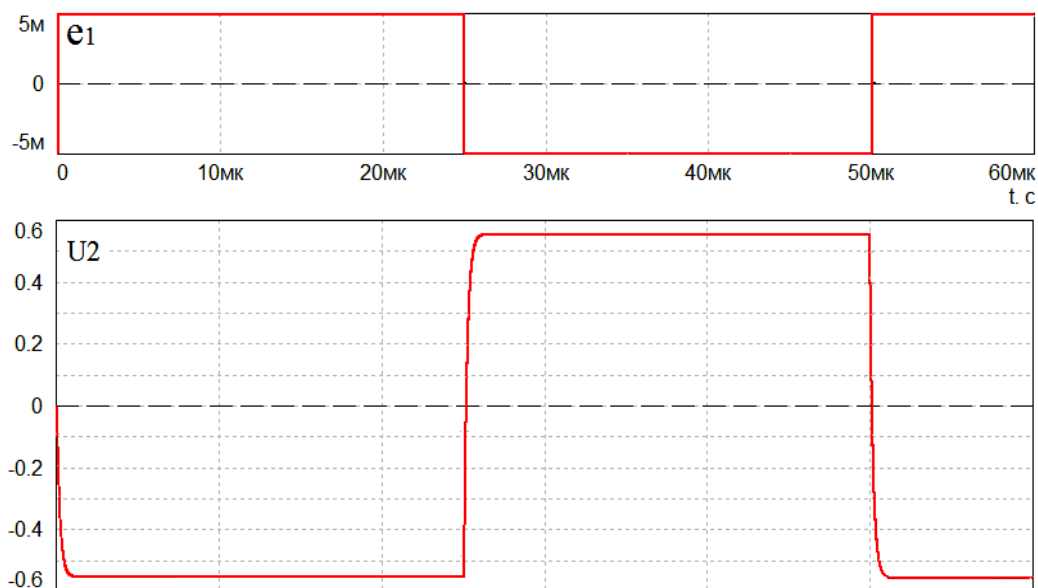


Рис. 1.12. К выбору конечного времени

При конечном времени 60 мкс помещаются отрицательный и положительный импульсы. Выходное напряжение, как подобает каскаду с ОЭ, находится в противофазе с входным напряжением. Измерение времени нарастания t_H исследователю естественнее выполнять на втором импульсе (25...50 мкс).

Для этого надо выделить область фронта импульса (рис. 1.13), а к выходному напряжению U_2 в строчке «выражение по оси Y » найти коэффициент, изменяющий размах импульса так, чтобы было наглядно и легко находить уровни 0,1 и 0,9 установившегося значения импульса. Определить время t_1 и t_2 можно только с помощью инструментальной линейки. Время нарастания $t_H = t_2 - t_1$.

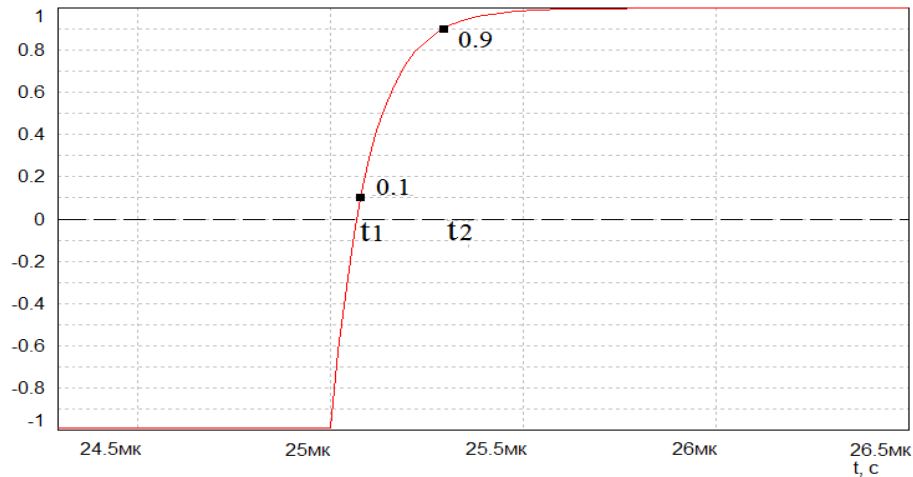


Рис. 1.13. Измерение времени нарастания

На рис. 1.14 показана форма искажения вершины импульса большой длительности. Искажение фронта импульса при таком масштабе увидеть невозможно, поскольку время нарастания импульса t_H , как следует из рис. 1.13, составляет доли микросекунды. От длительности импульсов, подаваемых на вход усилителя, оно не зависит. Здесь измеряем спад вершины импульса Δ в процентах.

Результаты измерений занести в табл. 1.4.

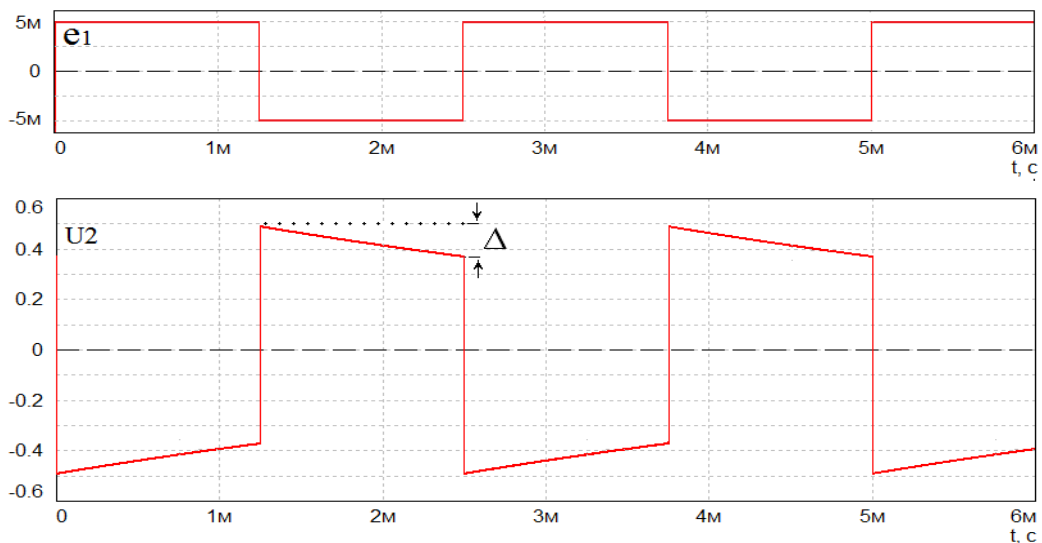


Рис. 1.14. Определение спада вершины импульса большой длительности

Таблица 1.4

$K_{\text{СКВ}}$	$f_{\text{H}\sqrt{2}}$	$f_{\text{B}\sqrt{2}}$	Δ^*	t_{H}^{**}	Примечание
дБ	кГц	МГц	%	нс	* $t_{\text{И}} = 1,25\text{мс}$, ** $t_{\text{И}} = 25\text{мкс}$

Примечание. Под параметром $K_{\text{СКВ}}$ понимается сквозной коэффициент передачи $K_{\text{СКВ}} = 20 \lg(U(R_{2\text{H}})/e_1)$ на средней частоте. Все остальные параметры АЧХ и ПХ соответствуют своим определениям.

3.2.5. Определение влияния на параметры АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1\text{И}}$ и нагрузки $R_{2\text{H}}$.

Для определения влияния на параметры АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1\text{И}}$ и сопротивления нагрузки $R_{2\text{H}}$ (рис. 1.10) необходимо производить измерения АЧХ и ПХ при значениях $R_{1\text{И}}$ и $R_{2\text{H}}$, данных в табл. 1.5. При этом значения всех остальных элементов схемы должны оставаться неизменными. Наглядные представления о влиянии элементов схемы дают попарные изображения. В этом пункте надо построить по две пары АЧХ и по две пары ПХ для импульсов разной длительности.

Таблица 1.5

№ п/п	$R_{1\text{И}}$	$R_{2\text{H}}$	$K_{\text{СКВ}}$	$f_{\text{H}\sqrt{2}}$	$f_{\text{B}\sqrt{2}}$	Δ^*	t_{H}^{**}	Примечание
	кОм	кОм	дБ	кГц	МГц	%	нс	
1	0,1	2						* $t_{\text{И}} = 1,25\text{мс}$, ** $t_{\text{И}} = 25\text{мкс}$
2	0,5	2						
3	0,1	0,5						
4	0,5	0,5						

Сравнить влияние изменений $R_{1\text{И}}$ и $R_{2\text{H}}$ на параметры АЧХ и ПХ и сделать вывод.

3.2.6. Определение влияния на АЧХ и ПХ емкости нагрузки.

Возвращаемся к схеме на рис. 1.10. В табл. 1.6 указаны номинальные значения элементов схемы, соответствующие табл. 1.3 без подсхемы. Необходимо построить пару АЧХ при значениях C_{H} 10 пФ и 100 пФ. При тех же значениях C_{H} построить пару ПХ для импульса длительности 25 мкс. Рисунки сохранить.

Таблица 1.6

e_1	$R_{1\text{И}}$	C_{p1}	R_6	h_{21}	R_9	C_9	$R_{\text{К}}$	C_{p2}	$R_{2\text{H}}$
мВ	кОм	мкФ	кОм		Ом	мкФ	кОм	мкФ	кОм
5	0,1	10,0				1000,0		10,0	2

3.2.7. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} и блокировочного конденсатора C_{Σ} .

В этом пункте необходимо построить пару АЧХ при двух значениях емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} , согласно табл. 1.7, и пару ПХ для импульса длительностью 1250 мкс. При этом значения остальных элементов схемы на рис. 1.10 соответствуют табл. 1.3.

Таблица 1.7

$C_{p1} = C_{p2}$	$K_{СКВ}$	$f_{H\sqrt{2}}$	$f_{B\sqrt{2}}$	Δ^*	Примечание
мкФ	дБ	кГц	МГц	%	
10,0					* $t_{И} = 1,25$ мс
1,0					

Влияние *блокировочного* конденсатора C_{Σ} на характеристики каскада также можно наблюдать, построив пару АЧХ и пару ПХ при различных значениях емкостей этого конденсатора. Для получения более наглядных графиков требуются разные соотношения крайних значений емкостей конденсатора C_{Σ} в случае гармонического или импульсного сигнала. Так, для ПХ при длительности импульса $t_{И} = 1250$ мкс лучше взять значения емкости C_{Σ} 1000 мкФ и 100 мкФ, в то время как на АЧХ нагляднее будут характеристики при C_{Σ} 1000 мкФ и 10 мкФ. Рисунки сохранить.

3.2.8. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада ОЭ.

Эти показатели усилителей, наряду с коэффициентом усиления, АЧХ и ПХ, имеют большое значение. По ним можно судить, как будет взаимодействовать устройство с источником сигнала, нагрузкой или с предыдущим каскадом и последующим. Обычно измерения проводят на средней частоте $f_0 = \sqrt{f_{H\sqrt{2}} f_{B\sqrt{2}}}$.

Входное сопротивление определяем, используя схему на рис. 1.10. В диалоговом окне записываем $\text{mag}(U(8)/I(R_{1И}))$ и задаем узкий диапазон частот относительно f_0 . Получаем частотную зависимость входного сопротивления. С помощью инструментальной линейки узнаем $R_{ВХ}$. Рисунок сохраняем.

Выходное сопротивление определяется по аналогичной схеме. Однако напряжение источника сигнала следует подать на выход усилителя, предварительно отключив сопротивление нагрузки и заземлив освободившийся конец $R_{1И}$. Для измерения $R_{ВЫХ}$ необходим вспомогательный резистор R . Номинальное значение его сопротивления любое (в пределах 1 Ом–10 кОм). Схема измерения приведена на рис. 1.15.

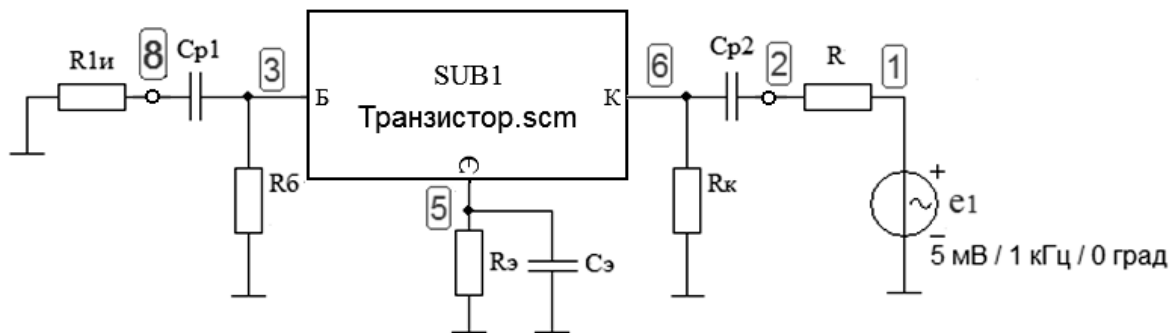


Рис. 1.15. Схема измерения выходного сопротивления усилителя

В диалоговом окне записываем $\text{mag}(U(2)/I(R))$, узкий диапазон частот относительно f_0 задаем, как при определении $R_{\text{вх}}$. Получаем частотную зависимость входного сопротивления. С помощью инструментальной линейки узнаем $R_{\text{вых}}$. Рисунок сохраняем.

Контрольные вопросы

1. Как выглядит принципиальная схема каскада?
2. Каково назначение имеющихся в схеме элементов?
3. Каковы пути прохождения постоянных и переменных токов?
4. Как построить на семействе выходных статических характеристик нагрузочную линию постоянному и переменному току?
5. Почему происходит инвертирование сигнала в схеме?
6. Как влияет на режим работы транзистора изменение сопротивлений резисторов в схеме?
7. Каковы причины, вызывающие снижение коэффициента усиления в области нижних и верхних частот?
8. Как выглядит эквивалентная схема каскада для области нижних, средних и верхних частот?
9. Как выглядит ПХ в области больших и малых времен?
10. Как влияет изменение номинальных значений элементов схемы на АЧХ и ПХ?

Лабораторная работа 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ И ОС

1. Цель работы

Изучить свойства каскада с ОЭ и обратной связью (ОС) в режиме малого сигнала. Выполнить анализ в частотной и временной областях. Исследовать влияние сопротивления источника сигнала, нагрузки и элементов схемы. Изучить изменение свойств каскада ОЭ при введении отрицательной обратной связи.

2. Подготовка к работе

- 2.1. Изучить п. 3 (основные сведения) данного лабораторного практикума.
- 2.2. Теоретические сведения содержатся в литературе [1–3].

3. Основные сведения

Обратная связь применяется для улучшения показателей самих усилителей. В каскадах ОЭ возможны два вида внешней отрицательной ОС, не изменяющей способ включения транзистора в схеме. На рис. 2.1 с максимальным упрощением показаны эти две структуры.

В схеме на рис. 2.1, а с помощью элемента ОС R_{OC} часть выходного сигнала из коллектора транзистора подается на его базу. Здесь имеет место параллельная по входу и по выходу ОС. В схеме на рис. 2.1, б ОС создается благодаря присутствию элемента R_{OC} в эмиттерной цепи – часть выходного сигнала поступает из эмиттера в базу. В работе исследуется только структура (рис. 2.1, б).

Такой каскад ОЭ с ОС можно представить в виде соединения двух четырехполюсников (рис. 2.2). Четырехполюсник A представляет собой собственно усилитель ОЭ, четырехполюсник B_0 – цепь ОС. В этой конструкции, очевидно, что ОС последовательная по входу и выходу.

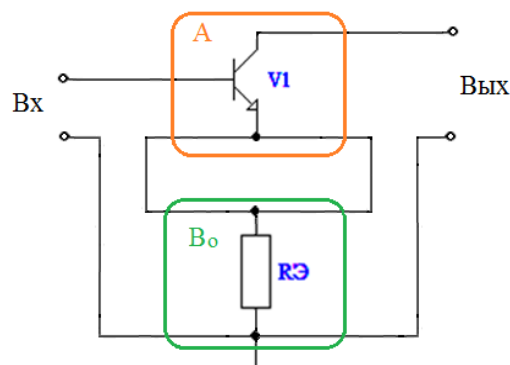
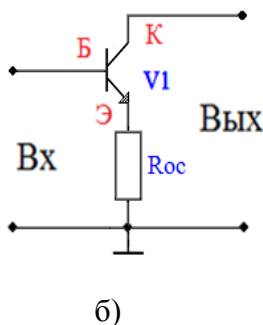
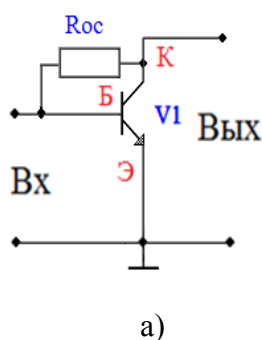


Рис. 2.1. Организация ОС в каскадах с ОЭ

Рис. 2.2. Блок-структурная схема каскада ОЭ с ООС

Принципиальная схема каскада представлена на рис. 2.3. Эта схема отличается от схемы в лабораторной работе 1 (для последующего описания введем сокращение ЛР 1) лишь тем, что в ней отсутствует блокировочный конденсатор в цепи эмиттера $C_Э$. Это, тем не менее, оказывает существенное влияние на свойства каскада.

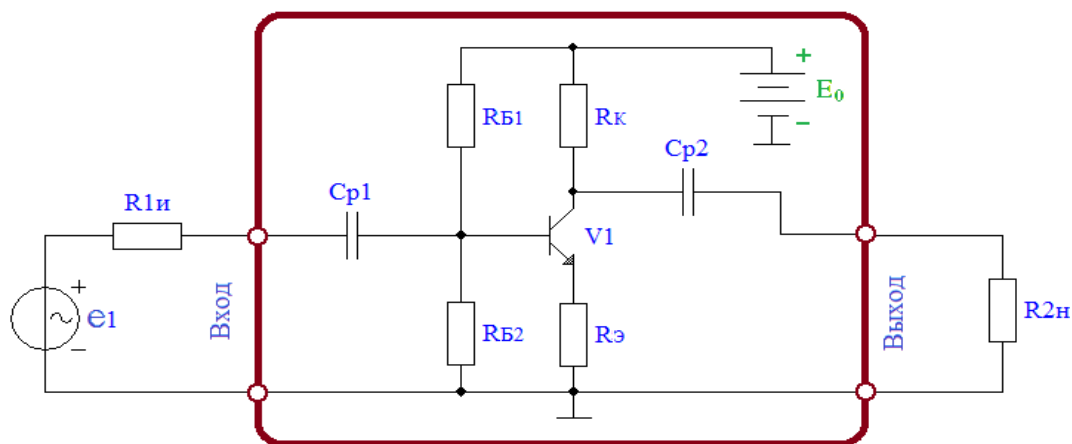


Рис. 2.3. Принципиальная схема каскада ОЭ с отрицательной обратной связью

Изучение свойств каскада необходимо разбить на две части.

- Расчет режима работы каскада на постоянном токе (3.1).
- Исследование свойств каскада ОЭ по сигналу на переменном токе (3.2).

3.1. Реализация точки покоя транзистора

В схеме (с ОС) определение точки покоя ничем не отличается от рис. 1.4 в ЛР 1, поскольку схемы на постоянном токе не отличаются друг от друга. Отрицательная ОС по сигналу возникает при отсутствии конденсатора $C_Э$, в то время как элементы цепей питания транзистора R_{B1} , R_{B2} , R_K , $R_Э$ не переключаются, и значения их сопротивлений не претерпевают изменений.

Таким образом, если ЛР 1 уже выполнена, то значения сопротивлений резисторов можно взять оттуда.

3.2. Исследование свойств каскада ОЭ по сигналу на переменном токе

Эта часть состоит из шести пунктов.

3.2.1. Составление эквивалентной схемы каскада ОЭ с отрицательной обратной связью.

3.2.2. Изучение влияния обратной связи на АЧХ и ПХ каскада ОЭ с ОС.

3.2.3. Определение влияния на АЧХ и ПХ емкости нагрузки.

3.2.4. Определение влияния изменений емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} на параметры АЧХ и ПХ.

3.2.5. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада ОЭ с ОС.

3.2.6. Изучение влияния частотно-зависимой обратной связи на АЧХ и ПХ каскада.

3.2.1. Составление эквивалентной схемы каскада ОЭ с отрицательной обратной связью.

Для составления эквивалентной схемы каскада ОЭ с ООС заменим транзистор эквивалентной моделью. Модель транзистора – схему Джиаколетто – и расчет ее элементов также можно взять из ЛР 1 (рис. 1.7). Эквивалентная схема каскада ОЭ с ООС примет вид, показанный на рис. 2.4.

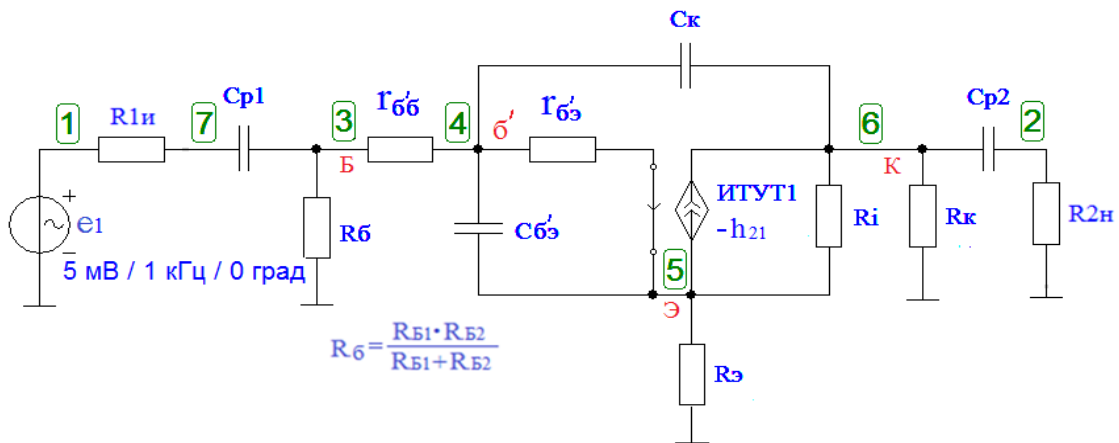


Рис. 2.4. Эквивалентная схема каскада ОЭ с ООС

3.2.2. Изучение влияния обратной связи на АЧХ и ПХ каскада ОЭ с ОС.

Перед работой на компьютере следует выполнить предварительный расчет сквозного коэффициента усиления с обратной связью $K_{\text{СКВ}, F}$ на средней частоте и частоты верхнего среза $f_{\text{в}\sqrt{2}, F}$.

$$K_{\text{СКВ}, F} = \frac{R_{\text{б}} h_{21} R_{\text{н}}}{R_{\text{б}} R_{1\text{и}} + (R_{\text{б}} + R_{1\text{и}}) R_{\text{вх}, F}}$$

где

$$R_{\text{вх}, F} = h_{11} + (1 + h_{21}) R_{\text{э}}, \quad R_{\text{н}} = R_{\text{к}} \parallel R_{2\text{н}}, \quad f_{\text{в}\sqrt{2}, F} = f_{\text{в}\sqrt{2}} F,$$

где

$$F = 1 + \frac{h_{21} R_{\text{э}}}{h_{11} + R_{\text{э}} + R_{\text{г}}}, \quad R_{\text{г}} = R_{1\text{и}} \parallel R_{\text{б}}.$$

Значение частоты верхнего среза $f_{\text{в}\sqrt{2}}$ можно взять из ЛР 1 или рассчитать по приведенным там формулам.

Для определения параметров АЧХ и ПХ необходимо ввести в компьютер схему с рис. 2.5. Технология получения схемы исследования показана

в прил. Методика расчета параметров АЧХ и ПХ не отличается от методики расчета, приведенной в п. 3.2.3 ЛР 1. Значения всех элементов схемы на рис. 2.4 также можно взять из табл. 1.3, разумеется, $C_{Э} = 0$. В этой схеме $R_{Э}$ создает частотнонезависимую ОС. Так принято называть ОС, когда в ее цепи нет реактивных элементов. Глубина ОС максимальна при заданных элементах схемы. Емкость нагрузки сохраняем прежней 10 пФ.

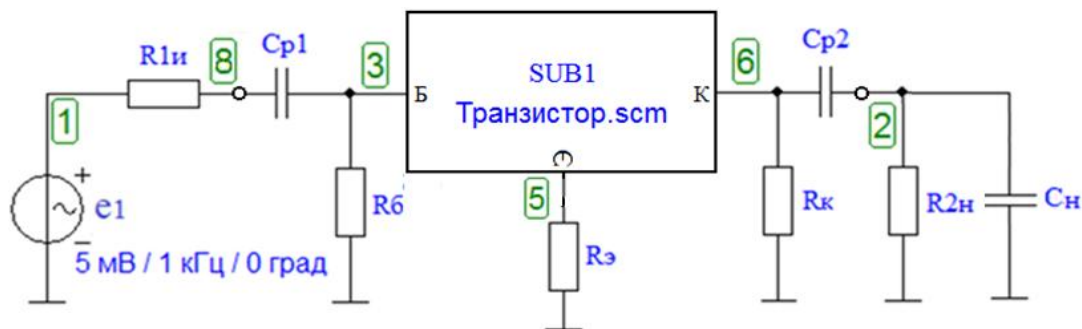


Рис. 2.5. Схема исследования каскада ОЭ с ОС

Рекомендуем сравнить одновременно две АЧХ (без ОС и с ОС). С этой целью следует на одном рисунке изобразить обе характеристики в двойном логарифмическом масштабе (рис. 1.11). Результаты измерений заносим в табл. 2.1. Данные без ОС можно взять из ЛР 1.

Во временной области также необходимо построить по две ПХ (при наличии ОС и без нее) для каждого импульса заданной длительности (табл. 2.1). Рисунки сохранить.

Таблица 2.1

Параметры	$K_{СКВ}$	$f_{Н\sqrt{2}}$	$f_{В\sqrt{2}}$	Δ *	t_H **	Примечание
Единицы измерения	дБ	кГц	МГц	%	нс	* $t_H = 1,25$ мс, ** $t_H = 25$ мкс
без ОС						
с ОС						

Примечание. Под параметром $K_{СКВ}$ понимается сквозной коэффициент передачи $K_{СКВ} = 20 \lg(U(R_{2H})/e_1)$ на средней частоте. Все остальные параметры АЧХ и ПХ соответствуют своим определениям.

Сравнить результаты предварительного расчета и табл. 2.1 и сделать вывод.

3.2.3. Определение влияния на АЧХ и ПХ емкости нагрузки.

Возвращаемся к схеме на рис. 2.3. В табл. 2.2 указаны номинальные значения элементов схемы, во многом совпадающие с табл. 1.3 ЛР 1. Необходимо построить на одном графике пару АЧХ при значениях C_H 10 пФ

и 100 пФ. При тех же значениях C_H построить графики с двумя ПХ для импульсов длительности 25 мкс и 1,25 мс. Рисунки сохранить.

Таблица 2.2

e_1	$R_{1И}$	C_{p1}	R_6	$R_Э$	R_K	C_{p2}	$R_{2И}$
мВ	кОм	мкФ	кОм	Ом	кОм	мкФ	кОм
5	0,1	10,0				10,0	2

3.2.4. Определение влияния изменений емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} на параметры АЧХ и ПХ.

Для определения влияния емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} и C_{p2} (рис. 2.5) на АЧХ и ПХ необходимо получить характеристики каскада при разных значениях этих емкостей (табл. 2.3.). Остальные элементы схемы сохранить неизменными, согласно табл. 1.3 ЛР 1. На одном графике построить две АЧХ при разных значениях емкости разделительных конденсаторов. Построить также на одном графике две ПХ для импульсов большой длительности. Измерить параметры полученных характеристик и заполнить ими табл. 2.3. Сравнить с результатами п. 3.2.7 ЛР 1.

Таблица 2.3

$C_{p1} = C_{p2}$	$K_{скв, F}$	$f_{н\sqrt{2}, F}$	$f_{в\sqrt{2}, F}$	Δ_F^*	Примечание
мкФ	дБ	кГц	МГц	%	
10,0					* $t_{И} = 1,25$ мс
1,0					

Сравнить результаты измерений и сделать вывод.

3.2.5. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада ОЭ с ОС.

Методика измерения этих показателей подробно описана в п. 3.2.7 ЛР 1. Здесь необходимо определить значения входного и выходного сопротивления для схемы каскада с ОС (рис. 2.5) и сравнить их с результатами, полученными в ЛР 1. Рисунки сохранить.

3.2.6. Изучение влияния частотно-зависимой обратной связи на АЧХ и ПХ каскада.

На рис. 2.6 приведена принципиальная схема каскада с ОЭ и частотно-зависимой ОС. Для получения такого изображения схемы использовано двукратное выделение подсхемы (прил.). Этот выбор объясняется тем, что в данном пункте лабораторной работы внимание уделяется только элементам цепи ОС.

В эмиттерной цепи усилителя включаем последовательно два резистора $R_{Э1}$ и $R_{Э2}$. Их суммарное сопротивление $R_{Э1} + R_{Э2} = R_Э$, включенному в схеме на рис. 2.3. При отсутствии эмиттерных конденсаторов схема на рис. 2.6 адекватна схеме на рис. 2.3.

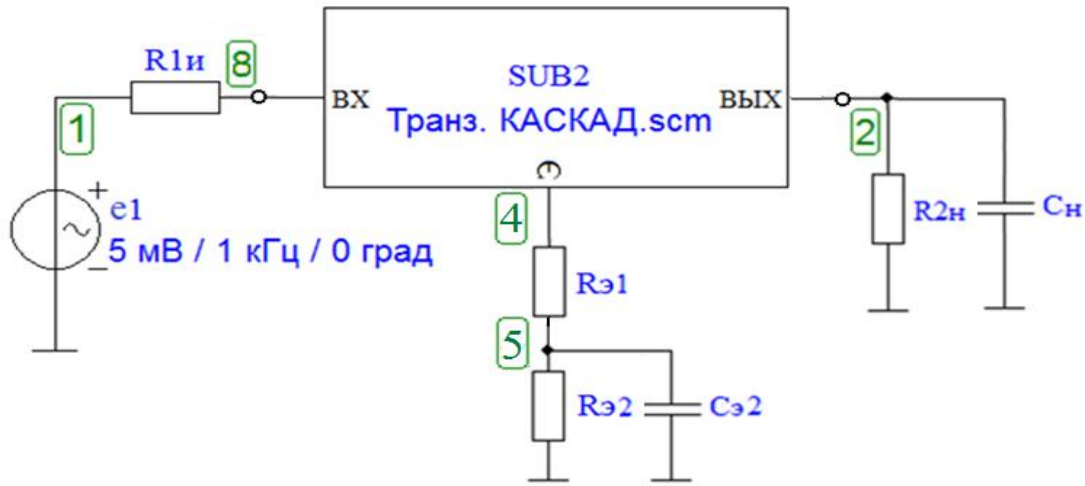


Рис. 2.6. Схема усилителя с уменьшенной ОС

В случае совпадения значений соответствующих элементов обе схемы будут иметь одинаковые характеристики.

Подключение к резистору $R_{э2}$ конденсатора большой емкости $C_{э2}$ (не менее $C_{э}$) приводит к уменьшению глубины ОС. Это объясняется тем, что конденсатор $C_{э2}$ шунтирует резистор $R_{э2}$, т. е. делает сопротивление цепи для переменного тока между узлом 5 и землей пренебрежимо малым. Причиной ОС теперь является только резистор $R_{э1}$.

Если емкость $C_{э2}$ очень велика, то обратную связь можно по-прежнему рассматривать как частотно-независимую. Влияние емкости проявится, скорее всего, на очень низкой частоте за полосой пропускания. Коэффициент усиления с ОС будет определяться только одним резистором $R_{э1}$.

Для реализации заданного $K_{СКВ, F}$ на средних частотах необходимо рассчитать $R_{э1}$ и $R_{э2}$ из выражений

$$R_{э1} = \frac{k_1 \times \frac{R_H \times h_{21}}{K_{СКВ, F}} - (R_{\Gamma} + h_{11})}{1 + h_{21}},$$

где

$$k_1 = \frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma} + R_{1и}}, \quad R_{\sigma} = \frac{R_{Б1} \times R_{Б2}}{R_{Б1} + R_{Б2}}, \quad R_{\Gamma} = R_{1и} \parallel R_{\sigma}, \quad R_H = R_K \parallel R_{2н} = \frac{R_K \times R_{2н}}{R_K + R_{2н}},$$

$$R_{э2} = R_{э} - R_{э1}.$$

Студенты выполняют расчет для $K_{СКВ, F} = 10$.

ОС, создаваемая резистором $R_{э1}$, также расширяет полосу пропускания в сравнении с каскадом без ОС.

В схеме каскада (рис. 2.7) к резистору $R_{Э1}$ подключается конденсатор $C_{Э1}$. Емкость $C_{Э1} < C_{Э2}$, она оказывает влияние на АЧХ в области высоких частот. Частотно-зависимый двухполюсник $R_{Э1} - C_{Э1}$ создает частотно-зависимую ОС, действие которой проявляется в полосе пропускания усилителя. Изменяя в эмиттере емкость конденсатора $C_{Э1}$, можно добиваться желаемой АЧХ или ПХ в усилителе с ОС. Такие схемы известны под названием *каскад с высокочастотной эмиттерной коррекцией*.

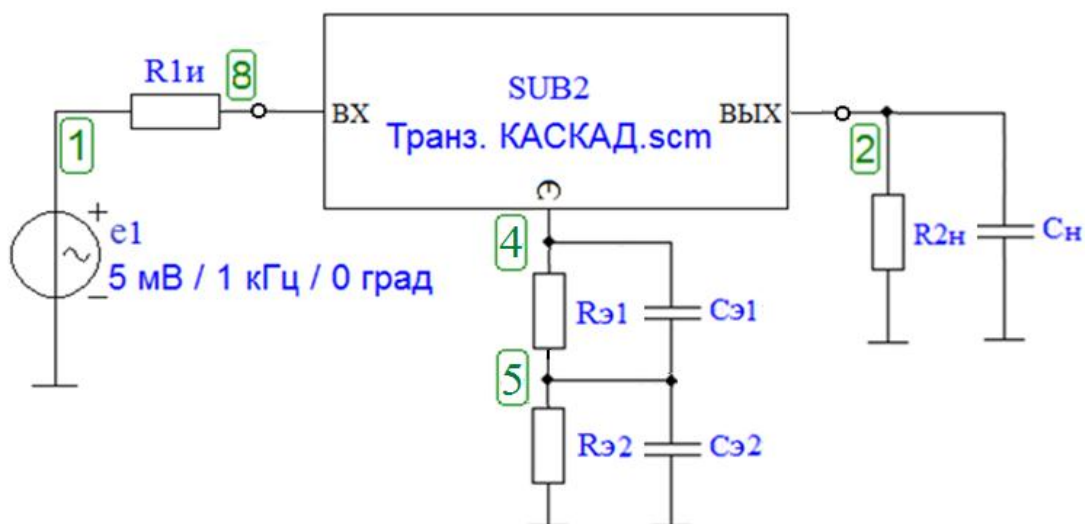


Рис. 2.7. Принципиальная схема каскада ОЭ с отрицательной частотно-зависимой ОС

3.2.6.1. Определение величины корректирующей емкости конденсатора $C_{Э1}$ для получения максимальной частоты верхнего среза $f_{в\sqrt{2}\max}$ при заданном $K_{скв, F}$.

Построить АЧХ для схемы без корректирующего конденсатора $C_{Э1}$ (рис. 2.6) при $C_{Э2} = 1000$ мкФ.

Определить параметры АЧХ $K_{скв, F}$, $f_{в\sqrt{2}}$, $f_{н\sqrt{2}}$ и занести результаты в табл. 2.4 (строка 1).

Таблица 2.4

№ п/п	$C_{Э1}$	$K_{скв, F}$	$f_{н\sqrt{2}}, F$	$f_{в\sqrt{2}}, F$	$t_{н, F}^*$	Примечание
	пФ		кГц	МГц	нс	
1	0					* $t_{И} = 25$ мкс
2	$C_{опт} =$					

Затем, подключить конденсатор $C_{Э1}$ к резистору $R_{Э1}$ (схема на рис. 2.7), задать диапазон изменения емкости $C_{Э1} = 200 \dots 1200$ пФ и получить семейство АЧХ (рис. 2.8).

Значение емкости $C_{Э1}$, которое реализует плоскую максимально широкополосную АЧХ по уровню -3 дБ, будет оптимальным $C_{Э1} = C_{\text{опт}}$. В примере на рис. 2.8 такой характеристикой является кривая 2. При этом корректирующая емкость $C_{Э1}$ равна 270 пФ. Кривая 1 получается при отсутствии емкости $C_{Э1}$ (рис. 2.6).

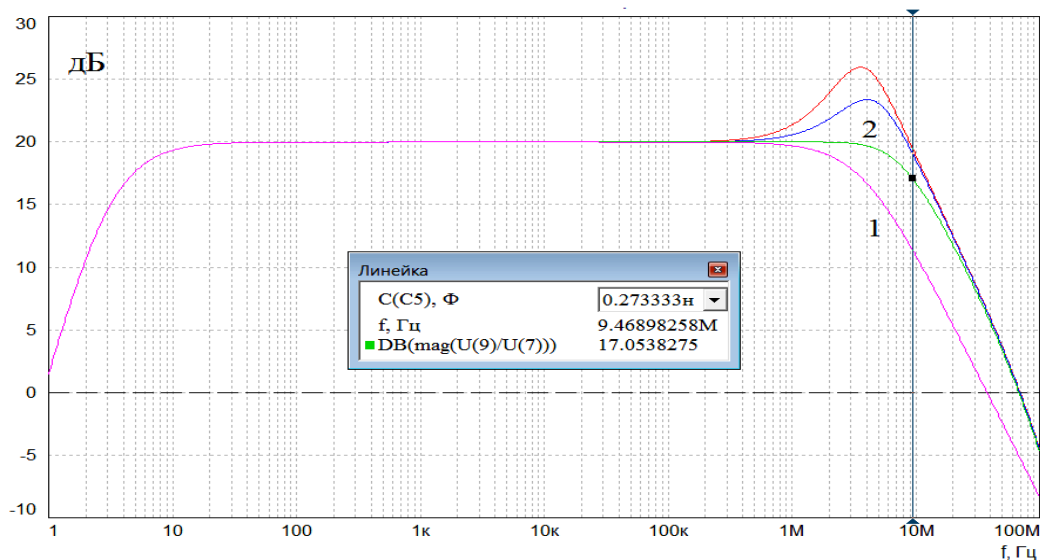


Рис. 2.8. АЧХ каскада ОЭ с частотно-зависимой ОС

Значение емкости $C_{Э1}$, которое реализует плоскую максимально широкополосную АЧХ по уровню -3 дБ, будет оптимальным $C_{Э1} = C_{\text{опт}}$. В примере на рис. 2.8 такой характеристикой является кривая 2. При этом корректирующая емкость $C_{Э1}$ равна 270 пФ. Кривая 1 получается при отсутствии емкости $C_{Э1}$ (рис. 2.6).

Найти точное значение оптимальной емкости коррекции позволяет операция «Параметр». Причем в окне параметров устанавливается число значений, равное 2. Одно из них должно содержать заведомо меньшую емкость, чем $C_{\text{опт}}$. Его значение должно быть неизменным. Другое значение берем из предварительного расчета по рис. 2.8 и варьируем его. Пока это значение больше $C_{\text{опт}}$, верхняя грань шкалы графика АЧХ пойдет выше $K_{\text{СКВ}, F}$, как, например, на рис. 2.8. При совпадении изменяемого значения емкости с значением $C_{\text{опт}}$ АЧХ ни в одной точке графика не превысит уровень $K_{\text{СКВ}, F}$. Поэтому шкала по вертикали будет заканчиваться значением $K_{\text{СКВ}, F}$ в дБ. Контроль максимального значения вертикальной оси графика АЧХ позволяет легко определить оптимальное значение корректирующей емкости.

Результаты измерений занести в табл. 2.4 (строка 2) и определить выигрыш в полосе пропускания на верхних частотах.

3.2.6.2. Измерение параметров ПХ.

Для измерения параметров ПХ в схемах на рис. 2.6 и 2.7 необходимо заменить генератор гармонического сигнала на импульсный. Задать частоту следования $f_{И}$, обеспечивающую импульс длительностью 25 мкс.

На рис. 2.9 показан вариант ПХ при отсутствии корректирующей емкости (кривая 1) и при оптимальной по АЧХ корректирующей емкости (кривая 2). На фронте импульса при оптимальной коррекции возникает небольшой выброс δ , который измеряется в процентах к установившемуся значению.

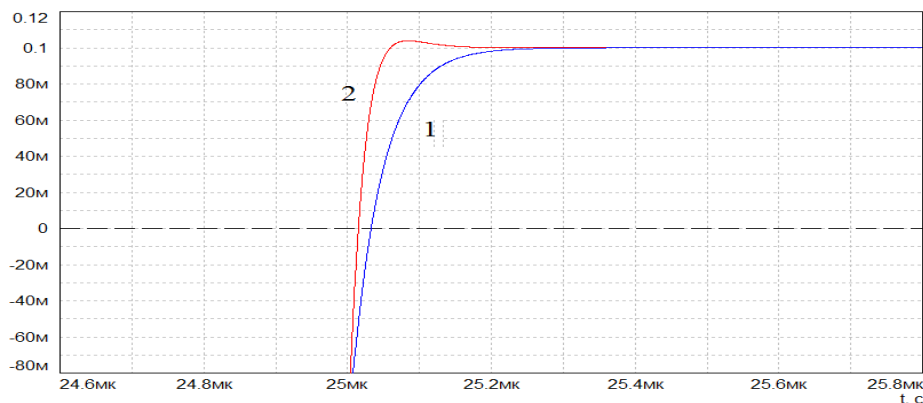


Рис. 2.9. ПХ при $C_{Э1} = 0$ и $C_{Э1} = C_{\text{опт}}$

По полученным ПХ вычислить время нарастания импульса t_{HF} при $C_{Э1} = 0$ и $C_{Э1} = C_{\text{опт}}$. Заполнить табл. 2.4.

Оценить влияние $C_{Э1}$ (табл. 2.4) на параметры АЧХ и на параметры ПХ и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Каковы пути прохождения переменных токов?
2. Как изменяется АЧХ при введении ОС?
3. Как влияет изменение номинальных значений элементов схемы на АЧХ и ПХ?
4. Какими элементами схемы определяется коэффициент усиления напряжения на средних частотах?
5. Какие элементы схемы определяют входное сопротивление?
6. От каких элементов схемы зависит выходное сопротивление?
7. ОС какого вида возникает при отсутствии конденсатора $C_{Э}$?
8. Как влияет эмиттерная ОС на АЧХ и ПХ каскада?
9. Почему в резисторном каскаде возникает подъем на АЧХ в области верхних частот?
10. Как влияет ОС на коэффициент усиления в области средних частот?

Лабораторная работа 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

1. Цель работы

Изучить свойства усилительного каскада с общей базой (ОБ) в режиме *малого сигнала*. Выполнить анализ в частотной и временной областях. Исследовать свойства каскада при изменении сопротивления источника сигнала, нагрузки и элементов схемы. Определить входное и выходное сопротивления каскада.

2. Подготовка к работе

2.1. Изучить п. 3 (основные сведения) данного лабораторного практикума.

2.2. Теоретические сведения содержатся в литературе [1–3].

3. Основные сведения

По определению, в схеме с ОБ база транзистора присоединяется к проводу, общему для входа и выхода каскада. На рис. 3.1, а показано простейшее изображение схемы с ОБ.

Другое изображение транзистора с ОБ представлено на рис. 3.1, б. Такое изображение каскада с ОБ позволяет рассматривать его как структуру с ОЭ, охваченную ОС. В этой схеме имеет место параллельная по входу и последовательная по выходу отрицательная ОС (рис. 3.2). Полная принципиальная схема каскада с ОБ представлена на рис. 3.3.

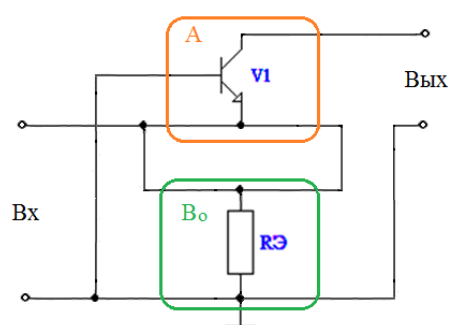
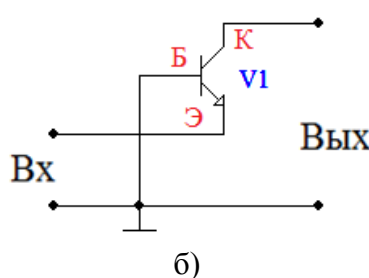
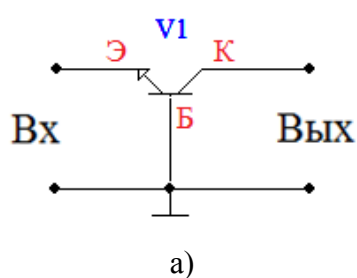


Рис. 3.1. Схема включения транзистора с ОБ

Рис. 3.2. Структура ОС в каскаде с ОБ

Изучение свойств каскада необходимо разбить на две части:

- Расчет режима работы каскада на постоянном токе (3.1).
- Исследование свойств каскада с ОБ по сигналу на переменном токе (3.2).

3.1. Расчет режима работы каскада на постоянном токе

Реализация точки покоя в схеме ОБ может быть осуществлена точно также как в ОЭ. Все расчеты на постоянном токе (в части 3.1 ЛР 1) легко повторить. Студенты, выполнившие такие расчеты для схемы ОЭ, могут просто перенести их в эту лабораторную работу.

3.2. Исследование свойств каскада с ОБ по сигналу на переменном токе

На рис. 3.3 показана принципиальная схема каскада с ОБ. Переменная составляющая сигнала поступает на эмиттер транзистора через конденсатор C_{P1} , а передается в нагрузку (из коллектора) через конденсатор C_{P2} . Конденсатор C_B соединяет базу с общим проводом. В соответствующем частотном диапазоне (на средних частотах) его сопротивление переменному току практически равно нулю, поэтому напряжение на базе по сигналу также практически равно нулю, и схема соответствует включению (рис. 3.3).

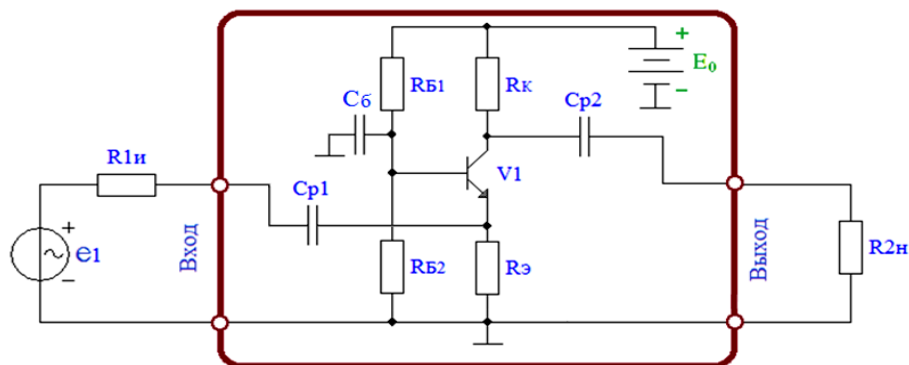


Рис. 3.3. Принципиальная схема каскада с ОБ

Исследование состоит из шести пунктов.

3.2.1. Расчет элементов модели транзистора для переменного тока.

3.2.2. Составление эквивалентной схемы каскада с ОБ.

3.2.3. Расчет параметров АЧХ и ПХ с помощью Fastmean, а именно:

– амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ее параметров:

$K_{СКВ}$ – сквозной коэффициент усиления на средней частоте в дБ, $f_{H\sqrt{2}}$ – частота нижнего среза, $f_{B\sqrt{2}}$ – частота верхнего среза;

– переходной характеристики (ПХ): t_H – время нарастания, Δ – спад вершины импульса при заданной длительности импульса t_H .

3.2.4. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала R_{1H} и нагрузки R_{2H} (рис. 3.3).

3.2.5. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений емкостей разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} (рис. 3.3).

3.2.6. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада ОБ.

3.2.1. Расчет элементов модели транзистора для переменного тока.

Модель транзистора не зависит от схемы его включения. Выбираем здесь также П-образную схему замещения (аналогичную схеме Джаколетто). Расчеты ее элементов выполняем, как в ЛР 1 или берем оттуда.

3.2.2. Составление эквивалентной схемы каскада с ОБ.

Эквивалентную схему каскада с ОБ получаем, заменив в принципиальной схеме (рис. 3.3) транзистор V1 его эквивалентной моделью и против источник питания E_0 . Тогда эквивалентная схема каскада с ОБ принимает вид рис. 3.4.

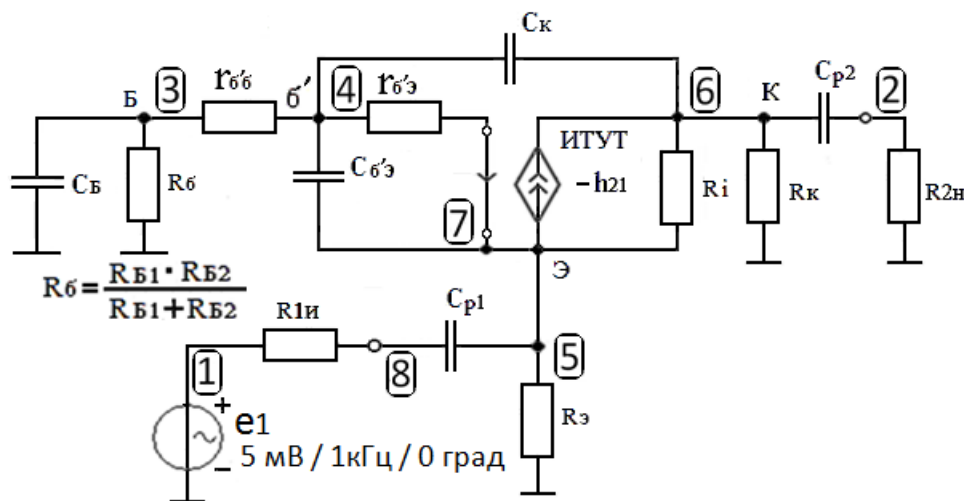


Рис. 3.4. Эквивалентная схема каскада с ОБ

Результаты расчетов всех элементов схемы (рис. 3.4) свести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

e_1	$R_{и}$	C_{p1}	$C_б$	$R_б$	$r_{б'б}$	$r_{б'э}$	$C_{б'э}$	$C_к$	h_{21}	$R_э$	$R_к$	C_{p2}	$R_{2н}$
мВ	кОм	мкФ	мкФ	кОм	Ом	Ом	пФ	пФ		Ом	кОм	мкФ	кОм
5	0,1	1,0	10,0									1,0	2

3.2.3. Расчет параметров АЧХ и ПХ с помощью Fastmean.

Этот пункт выполняется аналогично пункту 3.2.4. в ЛР 1.

Перед работой на компьютере следует выполнить предварительный расчет $K_{скв}$ на средней частоте

$$K_{ОБскв} = \frac{R_э}{R_{и} + R_э} \cdot \frac{h_{21} R_н}{h_{11} + R_Г (1 + h_{21})}$$

где

$$R_{\Gamma} = R_{1И} \parallel R_{Э} = \frac{R_{1И} \times R_{Э}}{R_{1И} + R_{Э}}, \quad R_{Н} = R_{К} \parallel R_{2Н} = \frac{R_{К} \times R_{2Н}}{R_{К} + R_{2Н}},$$

$$h_{11} = r_{б'б} + r_{б'э}.$$

Для исследования усилительного каскада удобно выделить и поместить в отдельную подсхему эквивалентную модель самого транзистора (рис. 1.7 ЛР 1). Технология этого преобразования показана в прил. Тогда эквивалентная схема каскада с ОБ примет вид, представленный на рис. 3.5. В подсхеме находится транзистор. Элементы каскада, находящиеся вне подсхемы, взаимодействуют с выводами транзистора. Входом каскада является узел 8, а выходом узел 2. Источник гармонического сигнала с ЭДС $e_1 = 5$ мВ и внутренним сопротивлением $R_{1И}$ подключен к входу каскада. К выходу каскада присоединена нагрузка $R_{2Н}$.

Введя в компьютер полученную схему, можем исследовать АЧХ и ПХ каскада с ОБ. Схема исследования каскада с ОБ приведена на рис. 3.5.

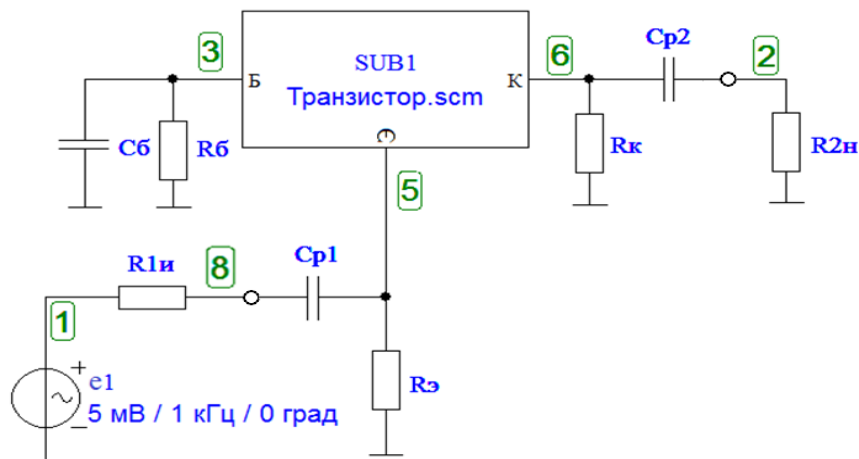


Рис. 3.5. Схема исследования каскада с ОБ

Для определения параметров АЧХ ($K_{сқв}$ и $f_{н\sqrt{2}}, f_{в\sqrt{2}}$) необходимо получить изображение этой характеристики. В диалоговом окне следует задать начальную частоту $f_{н} = 10$ Гц и конечную $f_{к} = 100$ МГц, установить логарифмическую развертку по частоте, что обеспечивает на частотной оси X логарифмический масштаб. АЧХ в двойном логарифмическом масштабе (рис. 1.11 ЛР 1) получаем, записав для оси Y выражение $db(mag(U(2)/U(1)))$.

Для определения параметров ПХ ($t_{н}$ – время нарастания и Δ – процент спада вершины импульса) необходимо подать на вход схемы последовательность прямоугольных импульсов (меандр) с амплитудой $e_1 = \pm 5$ мВ, и длительностью импульсов $t_{И}$, указанной в табл. 3.2.

Заданная длительность прямоугольных импульсов устанавливается частотой их следования $f_{И} = 1/2t_{И}$ в окне параметров источника сигнала.

Таблица 3.2

$K_{СКВ}$	$f_{Н\sqrt{2}}$	$f_{В\sqrt{2}}$	Δ^*	$t_{Н}^{**}$	Примечание
дБ	кГц	МГц	%	нс	* $t_{И} = 1,25$ мс, ** $t_{И} = 25$ мкс

Примечание. Под параметром $K_{СКВ}$ понимается сквозной коэффициент передачи $K_{СКВ} = 20 \lg(U(R_{2Н})/e_1)$ на средней частоте. Все остальные параметры АЧХ и ПХ соответствуют своим определениям.

Сравнить результаты предварительного расчета и расчета на Fastmean.

3.2.4. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений сопротивления источника сигнала $R_{1И}$ и сопротивления нагрузки $R_{2Н}$.

Для определения влияния на параметры АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1И}$ и сопротивления нагрузки $R_{2Н}$ (рис. 3.5) необходимо производить измерения АЧХ и ПХ при значениях $R_{1И}$ и $R_{2Н}$, данных в табл. 3.5. При этом значения всех остальных элементов схемы должны оставаться неизменными. Наглядные представления о влиянии элементов схемы дают попарные изображения. В этом пункте надо построить две пары АЧХ и по две пары ПХ для импульсов разной длительности.

Результаты расчета свести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

№ п/п	$R_{1И}$	$R_{2Н}$	$K_{СКВ}$	$f_{Н\sqrt{2}}$	$f_{В\sqrt{2}}$	Δ^*	$t_{Н}^{**}$	Примечание
	кОм	кОм	дБ	кГц	МГц	%	нс	
1	0,1	2						* $t_{И} = 1,25$ мс, ** $t_{И} = 25$ мкс
2	0,5	2						
3	0,1	0,5						
4	0,5	0,5						

Сравнить влияние изменений $R_{1И}$ и $R_{2Н}$ на параметры АЧХ и ПХ и сделать вывод.

3.2.5. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений емкостей разделительных конденсаторов $C_{р1}$, $C_{р2}$.

Необходимо произвести вычисление АЧХ и ПХ при значениях емкостей разделительных конденсаторов, равных 10 мкФ и 1 мкФ. При этом значения остальных элементов схемы рис. 3.5 соответствуют табл. 3.1. Здесь надо построить две пары АЧХ и две пары ПХ для импульсов большой длительности.

Результаты внести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

№ п/п	$C_{p1} = C_{p2}$	$K_{скв}$	$f_{н\sqrt{2}}$	$f_{в\sqrt{2}}$	Δ^*	Примечание
	мкФ	дБ	кГц	МГц	%	
1	1,0					* $t_{И} = 1,25$ мс
2	0,1					

3.2.6. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада ОБ.

Входное сопротивление определяем по той же методике что и в ЛР 1, используя схему на рис. 1.9, а в этой работе на рис. 3.5. В диалоговом окне записываем $\text{mag}(U(8)/I(R_{1И}))$ и задаем узкий диапазон частот относительно f_0 . Получаем частотную зависимость входного сопротивления. С помощью инструментальной линейки узнаем $R_{ВХ}$. Рисунок сохраняем.

Выходное сопротивление определяется по методу, показанному на рис. 1.15 ЛР 1. Подсхема по-прежнему содержит файл «Транзистор.scm.» Напряжение источника сигнала подаем на выход усилителя, предварительно отключив сопротивление нагрузки и заземлив освободившийся конец $R_{1И}$. Для измерения $R_{ВЫХ}$ необходим вспомогательный резистор R . Номинальное значение его сопротивления любое в разумных пределах.

Схему измерения (рис. 3.6) необходимо собрать. В диалоговом окне записать $\text{mag}(U(2)/I(R))$, задать узкий диапазон частот относительно средней частоты f_0 . После чего получаем частотную зависимость выходного сопротивления. С помощью инструментальной линейки узнаем $R_{ВЫХ}$ на частоте f_0 . Рисунок сохраняем.

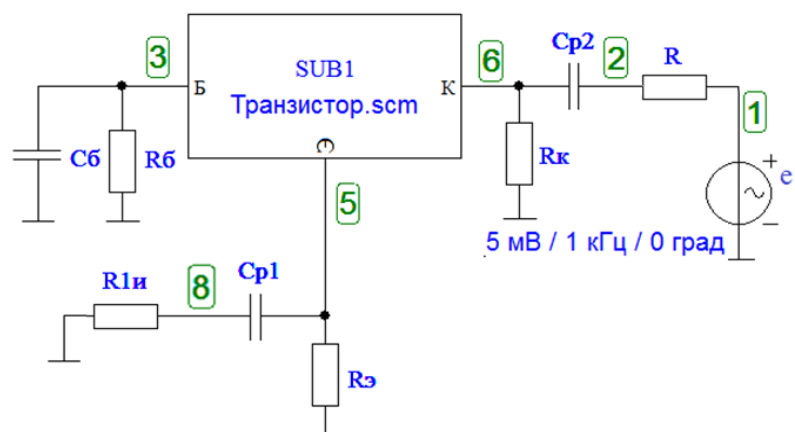


Рис. 3.6. Схема измерения выходного сопротивления

Контрольные вопросы

1. Каково назначение имеющихся в схеме элементов?
2. Каковы пути прохождения постоянных и переменных токов?
3. Какой вид ОС формирует схему каскада с ОБ?
4. Как влияет увеличение сопротивления $R_{1и}$ на АЧХ?
5. Почему при одинаковых значениях элементов полоса пропускания в каскаде с ОБ не совпадает с полосой пропускания в каскаде с ОЭ?
6. Почему в каскаде ОБ верхняя граничная частота выше, чем в ОЭ?
7. Почему в каскаде ОБ не происходит инверсии сигнала на выходе?
8. Как выглядит эквивалентная схема каскада для области нижних, средних и верхних частот?
9. Как выглядит ПХ в области больших и малых времен?
10. Как влияет изменение номинальных значений элементов схемы на АЧХ и ПХ?

Лабораторная работа 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДЕЛИ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

1. Цель работы

Изучить свойства усилительного каскада с общим коллектором (ОК) в режиме *малого сигнала*. Выполнить анализ в частотной и временной областях. Исследовать свойства каскада при изменении сопротивлений источника сигнала, нагрузки и элементов схемы. Определить входное и выходное сопротивления каскада.

2. Подготовка к работе

2.1. Изучить п. 3 (основные сведения) данного лабораторного практикума.

2.2. Теоретические сведения содержатся в литературе [1–3].

3. Основные сведения

По определению в схеме с ОК коллектор транзистора присоединяется к проводу, общему для входа и выхода каскада. На рис. 4.1, а показано простейшее изображение схемы с ОК.

Другое представление транзистора с ОК показано на рис. 4.1, б. Такое изображение каскада с ОК позволяет рассматривать его как структуру с ОЭ, охваченную ОС. В этой схеме имеет место последовательная по входу и параллельная по выходу отрицательная ОС (рис. 4.2). Полная принципиальная схема каскада ОК представлена на рис. 4.4.

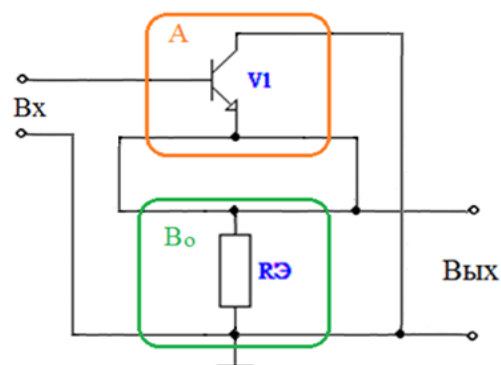
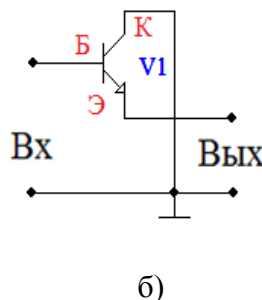
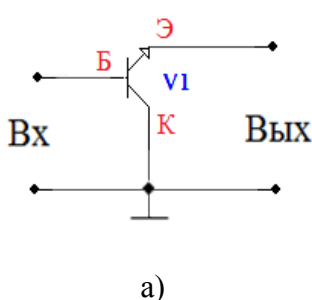


Рис. 4.1. Схема включения транзистора с ОК

Рис. 4.2 Структура обратной связи в каскаде с ОК

Изучение свойств каскада необходимо разбить на две части:

- Расчет режима работы каскада на постоянном токе (3.1).
- Исследование свойств каскада с ОК по сигналу на переменном токе (3.2).

3.1. Расчет режима работы каскада на постоянном токе

В схеме ОК может быть осуществлена аналогично решению этой задачи в ОЭ и в ОБ.

Все расчеты на постоянном токе (в части 3.1) легко повторить. Характерно, что в схеме с ОК, как правило, отсутствует резистор R_K . Положение точки покоя в активной области выходных статических характеристик транзистора определяется в этом случае резисторами R_{B1} , R_{B2} , R_E и напряжением источника питания E_0 (рис. 4.3).

По этой причине сохранение режима работы транзистора (координат его точки покоя), установленного в схеме ОЭ, требует изменения сопротивлений оставшихся резисторов, их перерасчет.

Рекомендуется установить $U_{КЭ}$ таким же, как в ЛР 1 или ЛР 3. Дальнейшие расчеты выполняются по формулам, данным в ЛР 1. Аналогично выполняется расчет элементов модели транзистора и составление эквивалентной схемы каскада по постоянному току. Заканчивается часть 3.1 построением нагрузочной линии постоянному току с указанием на ней точки покоя.

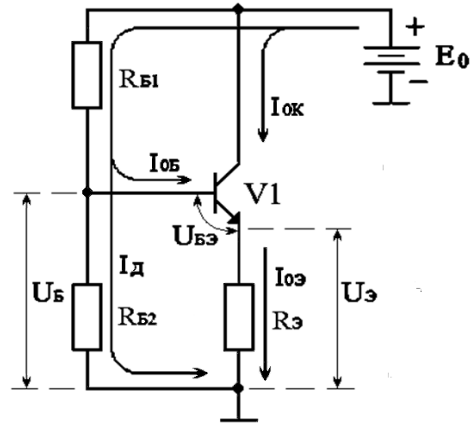


Рис. 4.3. Схема каскада по постоянному току

3.2. Исследование свойств каскада с ОК по сигналу на переменном токе

Принципиальная схема каскада с ОК представлена на рис. 4.4. Переменная составляющая сигнала поступает на базу транзистора через разделительный конденсатор C_{P1} , а передается в нагрузку R_{2H} через разделительный конденсатор C_{P2} из эмиттера. Сопротивление источника питания E_0 переменному току практически равно нулю, поэтому коллектор оказывается соединенным с общим проводом и схема соответствует структуре соединений на рис. 4.1, б.

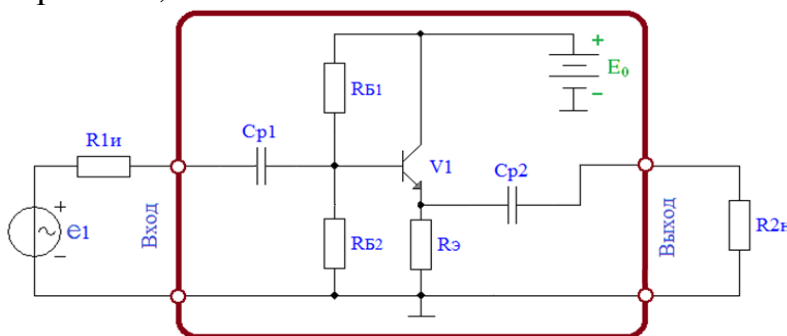


Рис. 4.4. Принципиальная схема каскада ОК

Исследование состоит из пяти пунктов.

3.2.1. Расчет элементов модели транзистора для переменного тока.

3.2.2. Составление эквивалентной схемы каскада с ОК.

3.2.3. Расчет функций АЧХ и ПХ с помощью Fastmean, а именно:

– амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ее параметров:

$K_{\text{СКВ}}$ – сквозной коэффициент усиления на средней частоте в дБ, $f_{\text{H}\sqrt{2}}$ – частота нижнего среза, $f_{\text{В}\sqrt{2}}$ – частота верхнего среза;

– переходной характеристики (ПХ): $t_{\text{н}}$ – время нарастания, Δ – спад вершины импульса при заданной длительности импульса $t_{\text{и}}$.

3.2.4. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1\text{И}}$ и нагрузки $R_{2\text{Н}}$ (рис. 4.4).

3.2.5. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада с ОК.

Эти пункты подробно рассмотрены ниже.

3.2.1. Расчет элементов модели транзистора для переменного тока.

Модель транзистора не зависит от схемы его включения. Выбираем здесь также П-образную схему замещения (аналогичную Джаколетто). Расчеты ее элементов выполняем, как в ЛР 1 или берем оттуда.

3.2.2. Составление эквивалентной схемы каскада с ОК.

Эквивалентную схему каскада с ОК получаем, заменив в принципиальной схеме на рис. 4.4 транзистор V1 его эквивалентной моделью. Тогда эквивалентная схема каскада ОК примет вид, представленный на рис. 4.5.

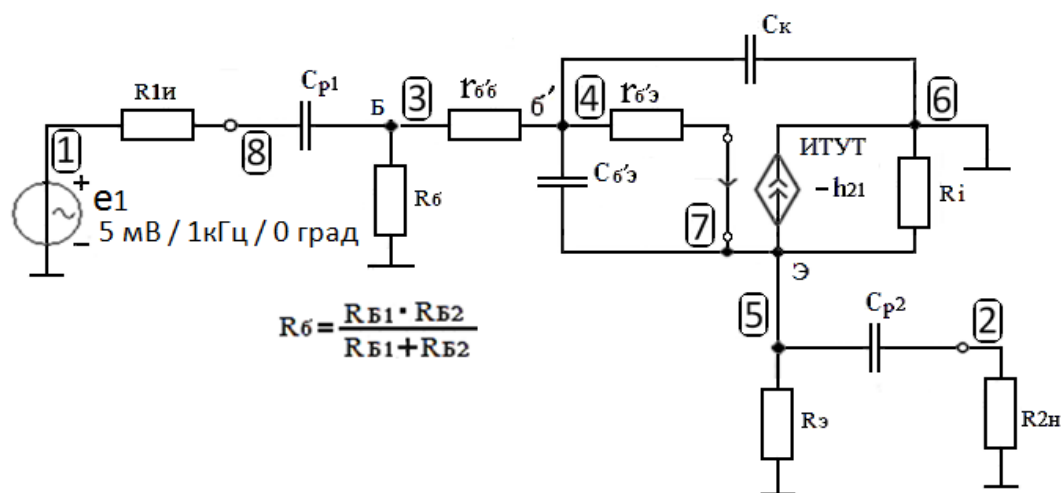


Рис. 4.5. Эквивалентная схема каскада ОК

Значения всех элементов схемы на рис. 4.5 свести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

e_1	$R_{1И}$	C_{p1}	R_6	$r_{6'6}$	$r_{6'э}$	$C_{6'э}$	C_K	h_{21}	$R_э$	C_{p2}	$R_{2Н}$
мВ	кОм	мкФ	кОм	Ом	Ом	пФ	пФ		Ом	мкФ	кОм
5	0,1	10								10	2

3.2.3. Расчет функций АЧХ и ПЧ с помощью Fastmean

Перед работой на компьютере желательно выполнить предварительный расчет $K_{СКВ}$ на средней частоте.

$$K_{ОКСКВ} = \frac{R_6}{R_{1И} + R_6} \times \frac{(1 + h_{21})R_H}{R_{Г} + R_{ВХОК}},$$

где

$$R_6 = \frac{R_{Б1} \times R_{Б2}}{R_{Б1} + R_{Б2}}, \quad R_{Г} = R_{1И} \parallel R_6 = \frac{R_{1И} \times R_6}{R_{1И} + R_6}, \quad R_H = R_э \parallel R_{2Н} = \frac{R_э \times R_{2Н}}{R_э + R_{2Н}},$$

$$R_{ВХОК} = h_{11} + (1 + h_{21})R_H.$$

$$h_{11} = r_{6'6} + r_{6'э}.$$

Для исследования усилительного каскада удобно выделить и поместить в отдельную подсхему эквивалентную модель самого транзистора аналогично рис. П7. Технология этого преобразования показана в прил. Тогда эквивалентная схема каскада с ОК принимает вид, представленный на рис. 4.6. В подсхеме находится транзистор, элементы каскада заключены между узлами 4 и 2. Источник гармонического сигнала с ЭДС $e_1 = 5$ мВ и внутренним сопротивлением $R_{1И}$ подключен к входу усилителя. К выходу усилителя присоединена нагрузка $R_{2Н}$.

Теперь можно собрать схему рис. 4.6 и вести исследования.

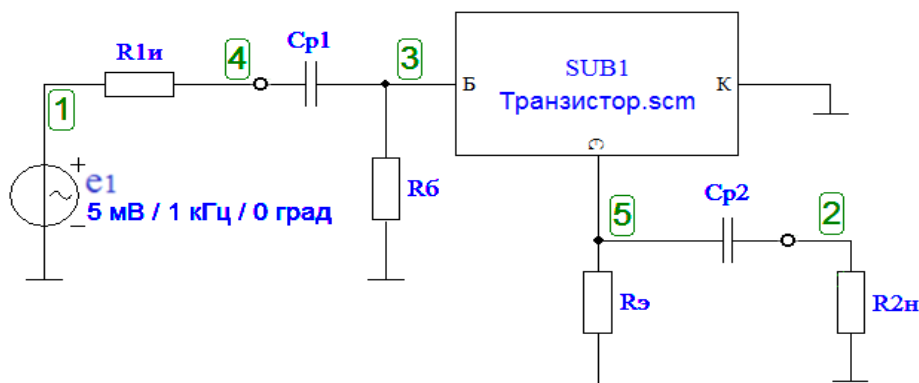


Рис. 4.6. Схема исследования каскада с ОК

Для определения параметров АЧХ ($f_{H\sqrt{2}}$, $f_{B\sqrt{2}}$, и $K_{СКВ}$) необходимо подать на вход гармонический сигнал $e_{1m} = 5$ мВ, придать конденсаторам

C_{p1}, C_{p2} значения 10 мкФ. Значения резисторов R_6 и R_3 берем из табл. 4.1. В диалоговом окне выбираем диапазон исследуемых частот, для частотной оси устанавливаем логарифмический масштаб. В связи с тем, что в каскаде ОК имеет место глубокая ОС, конечную частоту f_{max} следует увеличить примерно на порядок. Рекомендуем пользоваться двумя АЧХ: простым отношением $\text{mag}(U(2)/U(1))$ и в децибелах – $\text{db}(\text{mag}(U(2)/U(1)))$.

Для определения параметров ПХ (t_H – время нарастания и Δ – процент спада вершины импульса) необходимо подать на вход схемы последовательность прямоугольных импульсов (меандр) с амплитудой $e_1 = \pm 5$ мВ, и длительностью импульсов $t_{И}$, указанной в табл. 4.2.

Заданная длительность прямоугольных импульсов устанавливается частотой их следования $f_{И} = 1/2t_{И}$ в окне параметров источника сигнала.

Таблица 4.2

$K_{СКВ}$	$f_{H\sqrt{2}}$	$f_{B\sqrt{2}}$	Δ^*	t_H^{**}	Примечание
дБ	кГц	МГц	%	нс	* $t_{И} = 1250$ мкс, ** $t_{И} = 25$ мкс

Примечание. Под параметром $K_{СКВ}$ понимается сквозной коэффициент передачи $K_{СКВ} = 20 \lg(U(R_{2H})/e_1)$ на средней частоте. Все остальные параметры АЧХ и ПХ соответствуют своим определениям.

3.2.4. Определение влияния на АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1И}$ и нагрузки R_{2H} .

Для определения влияния на параметры АЧХ и ПХ изменений сопротивлений источника сигнала $R_{1И}$ и сопротивления нагрузки R_{2H} (рис. 4.6) необходимо производить вычисления АЧХ и ПХ при значениях $R_{1И}$ и R_{2H} , указанных в табл. 4.3. При этом значения всех остальных элементов схемы должны соответствовать табл. 4.1. Наглядные представления о влиянии элементов схемы дают попарные изображения. В этом пункте надо построить две пары АЧХ и по две пары ПХ для импульсов разной длительности.

Результаты расчета свести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ п/п.	$R_{1И}$	R_{2H}	$K_{СКВ}$	$f_{H\sqrt{2}}$	$f_{B\sqrt{2}}$	Δ^{**}	t_H^*	Примечание
	кОм	кОм	дБ	кГц	МГц	%	нс	
1	0,1	2						* $t_{И} = 1250$ мкс, ** $t_{И} = 25$ мкс
2	0,5	2						
3	0,1	0,5						
4	0,5	0,5						

3.2.5. Измерение входного и выходного сопротивлений каскада с ОК.

Входное сопротивление определяем, по той же методике что и в ЛР 1, используя схему на рис. 1.9, а в этой работе на рис. 4.6. В диалоговом окне записываем $\text{mag}(U(4)/I(R_{1И}))$ и задаем узкий диапазон частот относительно f_0 . Получаем частотную зависимость входного сопротивления. С помощью инструментальной линейки узнаем $R_{вх}$. Рисунок сохраняем.

Выходное сопротивление определяется по схеме на рис. 4.7 (рис. 1.15 ЛР 1). Подсхема должна содержать файл «Транзистор.scm». Остальное совпадает. Напряжение источника сигнала подаем на выход усилителя, предварительно отключив сопротивление нагрузки и заземлив освободившийся конец $R_{1И}$. Для измерения $R_{вых}$ необходим вспомогательный резистор R . Номинальное значение его сопротивления любое в разумных пределах.

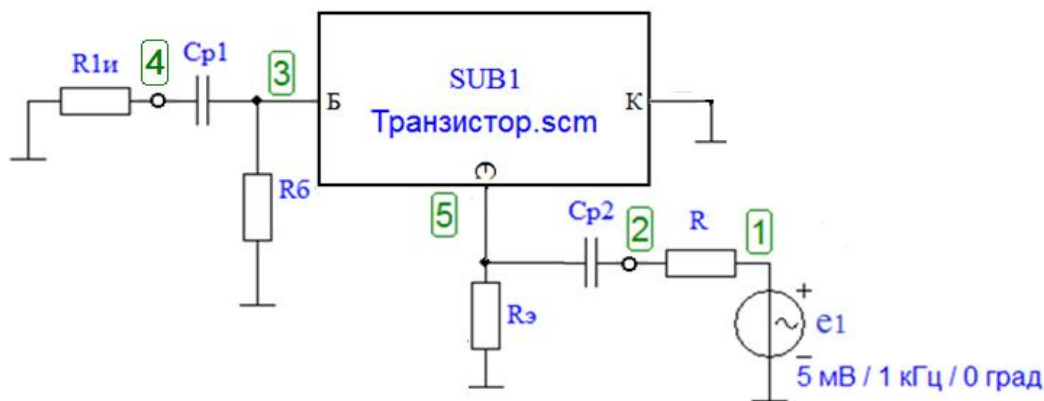


Рис. 4.7. Схема измерения выходного сопротивления каскада с ОК

Схему измерения (рис. 4.7) необходимо собрать. В диалоговом окне записываем $\text{mag}(U(2)/I(R))$, задаем узкий диапазон частот относительно f_0 . Получаем частотную зависимость выходного сопротивления. С помощью измерительной линейки узнаем $R_{вых}$ на частоте f_0 . Рисунок сохраняем.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается построение нагрузочной линии постоянному току в схеме с ОК?
2. Как определить координаты точки покоя?
3. Как проходят пути постоянных и переменных токов, протекающих в схеме?
4. Почему не изменяется полярность напряжения усиливаемого сигнала?
5. Каково назначение элементов схемы?
6. Какого вида ОС имеет место в каскаде с ОК?

7. Почему коэффициент усиления напряжения на средних частотах в каскаде с ОК меньше единицы?
8. Почему схему с ОК называют «эмиттерный повторитель»?
9. Как влияет изменение номинальных значений элементов схемы на АЧХ и ПХ?
10. Как выглядят эквивалентные схемы в различных областях частот?

Лабораторная работа 5.

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ НА ИНТЕГРАЛЬНОМ ОУ В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЯХ

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, целесообразно сосредоточить внимание на информации об исследуемом объекте. Выполненные в виде интегральных микросхем (ИС), операционные усилители являются чрезвычайно удобными функциональными узлами, которые с успехом можно применять для изготовления сложных электронных устройств. По конструктивному выполнению ОУ является законченным высокостабильным, высококачественным усилителем, имеющим высокий коэффициент усиления.

Операционный усилитель – это унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, удовлетворяющий ряду требований. Несмотря на различие используемой элементной базы, функционального назначения и технологии изготовления, основой большинства ИС является схемотехника дифференциальных усилителей. Дифференциальный каскад (ДК), по существу, является основным схемотехническим элементом интегральной аналоговой электроники.

Рассмотрим типичный ОУ широкого применения $\mu A 741$ (рис. 5.1). В нем содержится ряд интересных схемных решений: каскодное включение транзисторов, многоколлекторный (многоэмиттерный) транзистор, источник опорного напряжения, комплементарные транзисторы и др.

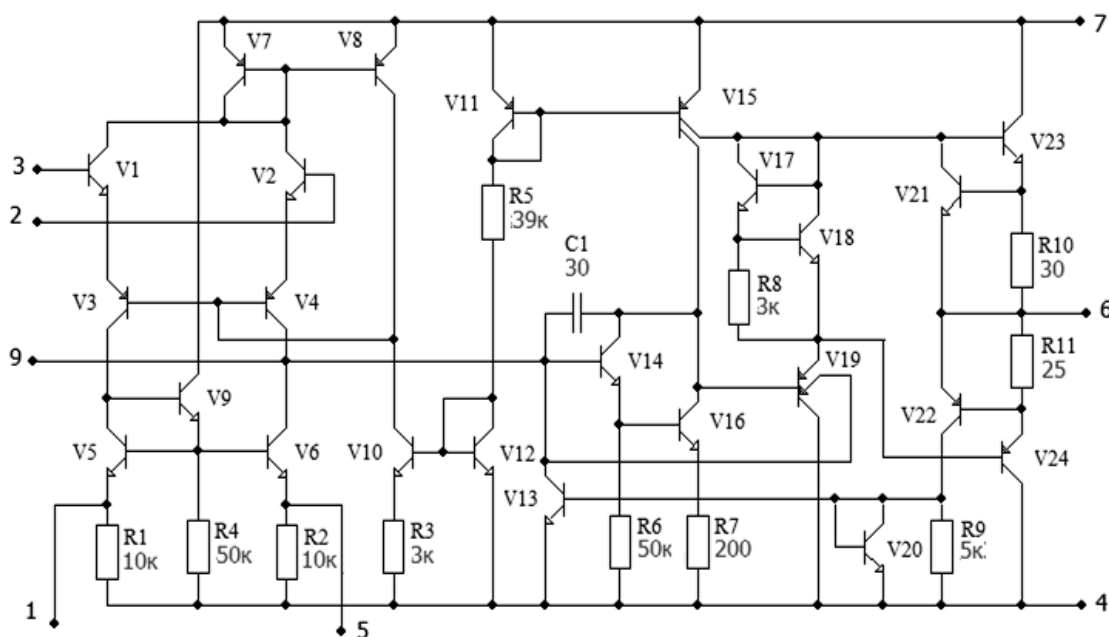


Рис. 5.1. Принципиальная схема ОУ $\mu A 741$

В этом ОУ ДК выполнен на транзисторах V1, V3 (левое плечо) и V2, V4 (правое плечо). Эти пары транзисторов образуют каскодные соединения ОК-ОБ и, очевидно, не поворачивают фазу входных сигналов. Нагрузкой левого плеча ДК является транзистор V5, нагрузкой правого плеча – транзистор V6. Такого рода соединения иногда называют динамической нагрузкой. Транзисторы V5, V9 и V6 образуют два источника стабильного тока (ИСТ). Другое название такой конструкции – токовое зеркало. Для ДК они являются высокоомной нагрузкой на переменном токе. Транзистор V9 выполняет две функции. С транзисторами V5 и V6 он образует сложное токовое зеркало усиленное местными ОС при помощи резисторов R1 и R2. ОС значительно увеличивает выходное сопротивление транзисторов. Одновременно с этим транзистор V9 передает сигнал с левого плеча ДК на базу транзистора V6. Этот транзистор не просто элемент ИСТ, он в этой тройке активен. Транзистор V6 передает сигнал на выход ДК, причем как схема с ОЭ с поворотом фазы. Сигнал в правом плече ДК противофазен сигналу в левом, однако благодаря транзистору V6 токи на выходе ДК складываются в фазе. Вследствие удвоения выходного тока в ДК с несимметричным выходом сохраняется коэффициент усиления на уровне каскада с ОЭ. Такое схемное решение носит название *инвертор тока*.

Выходной каскад (ЭП) построен по двухтактной схеме на комплементарных транзисторах V23 и V24. Необходимое смещение создается источником опорного напряжения (ИОН 1) на транзисторах V17 и V18. Каскад усиления напряжения (ОЭ) выполнен на составных транзисторах V14, V16. Транзистор V19 используется для сдвига уровня.

На рис. 5.2 изображена упрощенная схема ОУ $\mu\text{A} 741$. Упрощение достигается за счет исключения вспомогательных узлов, таких как, например, защита от короткого замыкания и представление токовых зеркал символом источника стабильного тока (ИСТ). Здесь хорошо виден входной ДК, выполненный по каскодной схеме, усилитель напряжения на составных транзисторах, выходной эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах.

С момента появления $\mu\text{A} 741$ (1968) разработано много новых серий ОУ с улучшенными техническими параметрами и надежностью: совершенствуются схемы ДК, увеличивается коэффициент усиления, полоса пропускания. Площадь усиления достигает уже 3 ГГц.

В качестве примера новых разработок можно рассмотреть ОУ ОРА640. Из упрощенной схемы (рис. 5.3) видно, что усилитель содержит два каскада: ДК и оконечный. ДК построен по каскадной схеме (ОЭ-ОБ). Левое плечо образуют транзисторы V1, V3, правое – V2, V4. Для увеличения ко-

эфициента усиления в качестве нагрузки используются структуры токового зеркала, изображенные в виде ИСТ (ИСТ 2, 3, 4, 5). Переход к несимметричному выходу осуществляется с помощью инвертора тока (V5, V6), как в схеме $\mu\text{A} 741$.

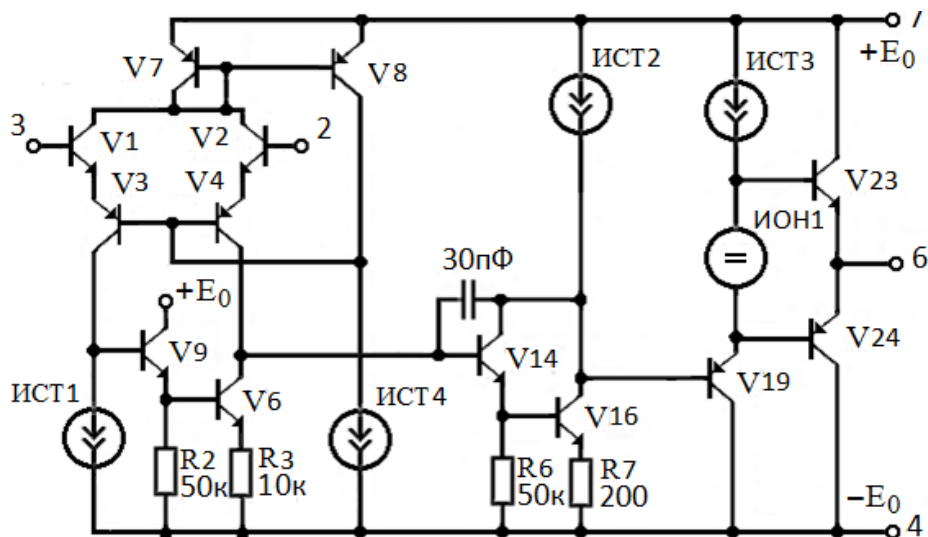


Рис. 5.2. Упрощенная схема ОУ $\mu\text{A} 741$

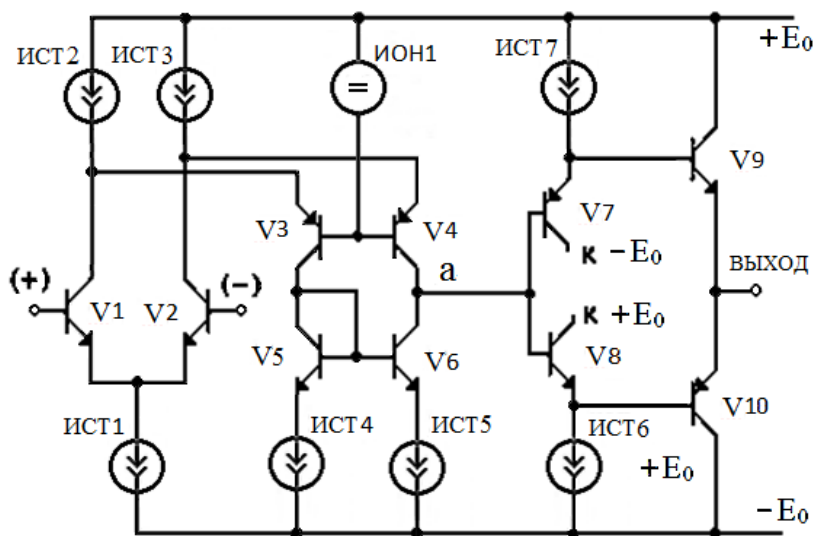


Рис. 5.3. Упрощенная схема ОУ OPA640

Простейшее и изящное решение дает применение комплементарных транзисторов, при котором смещение потенциала транзистором одной проводимости компенсируется транзистором другой проводимости. В результате в точке «а» устанавливается нулевой потенциал на постоянном напряжении и чрезвычайно высокое сопротивление на переменном.

Выходной каскад выполняется двухтактным. В нем также используются транзисторы разной проводимости. В верхнем плече находятся транзисторы V7 и V9, в нижнем – V8, V10. Каждая пара образует составной

транзистор Нортонa. Поскольку узел схемы в точке «а» (коллектор V4) является весьма высокоомным, единственный простой ЭП не в состоянии обеспечить преобразование полного сопротивления на его входе до нужного выходного.

Первое звено оконечного каскада на транзисторах V7 и V8 не только служит дополнительным преобразователем импеданса, но и одновременно создает смещение напряжения, которое необходимо комплементарному ЭП во втором звене, выполненному на транзисторах V9 и V10. Применение транзисторов разной проводимости взаимно компенсирует изменение уровней потенциалов на постоянном токе. Переход база – эмиттер транзистора V7, вследствие того, что его структура pnp , повышает уровень напряжения на величину напряжения база – эмиттер. Переход транзистора V9, вследствие того, что его структура pnp , настолько же понижает уровень напряжения. Аналогично происходят сдвиги уровня в другом плече. В итоге на выходе ОУ устанавливается нулевой потенциал без специальной схемы сдвига уровня. Такой оконечный каскад отличается также большой симметрией.

Структурно все ОУ, указанные в задании к ЛР 5, похожи и соответствуют рис. 5.3.

Для анализа работы схем на ОУ в частотной и временной области такое схемное упрощение все же не достаточно. Для ОУ, содержащего в действительности до трех десятков транзисторов, необходимо создать макро-модель ОУ, в которой главными принимаются параметры, определяющие вид его АЧХ. Такими параметрами являются коэффициент усиления в области нижних частот μ и частота единичного усиления f_1 . Построение макро-модели осуществляется в процессе выполнения лабораторной работы.

1. Цель работы

Изучить схемотехнические особенности построения интегральных ОУ, принцип построения макро-модели в частотной области. Исследовать влияние внешних цепей ОС на характеристики устройств с ОУ.

2. Подготовка к работе

- 2.1. Изучить п. 3 (основные сведения) данного лабораторного практикума.
- 2.2. Теоретические сведения содержатся в литературе [1–4].

3. Основные сведения

В программе Fastmean предусмотрено построение схем на ОУ, однако имеющийся в ней элемент дает представление о некотором идеальном ОУ. Он действует в неограниченной полосе частот. Реальные микросхемы

не обладают такими свойствами. По этой причине необходимо построить модель ОУ, отражающую частотные свойства существующих ИС. Это позволит исследовать АЧХ, ФЧХ и ПХ усилительных каскадов на стандартных ОУ.

Изучение свойств усилителей на ОУ необходимо разбить на две части.

- Построение макромоделей ОУ с частотной коррекцией (3.1).
- Исследование свойств каскада на ОУ в частотной и временной областях (3.2).

3.1. Построение макромоделей ОУ с частотной коррекцией

Модель, удобная для учебного процесса, показана на рис. 5.4. Элементы частотной коррекции не показаны. Схема, однако, обладает свойствами скорректированного ОУ, в частности ее характеристики определяются двумя полюсами в функции передачи.

Эта модель состоит из трех блоков, построенных на идеальных операционных усилителях. Первый (ОУ1) обеспечивает дифференциальный вход устройства с бесконечно большим входным сопротивлением. Третий (ОУ3) обеспечивает нулевое выходное сопротивление и служит буфером между выходом макромоделей и внешними цепями. Частотные свойства в предложенной макро модели ОУ определяются двумя парами RC-элементов на выходах ОУ1 и ОУ2 (узлы 4 и 5). Общий коэффициент усиления макро модели ОУ указывается над ОУ1. Другие блоки имеют коэффициент усиления равный 1.

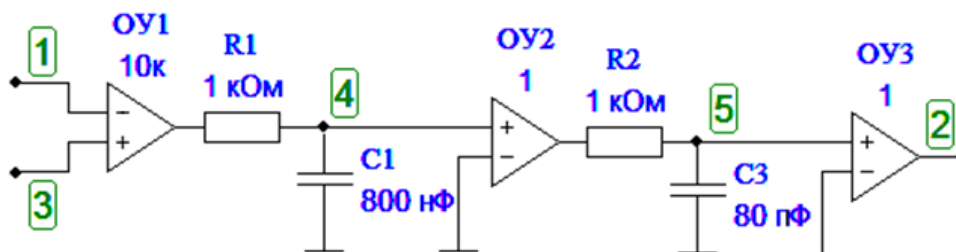


Рис. 5.4. Макромодель с параметрами элементов, задающих частотные свойства ОУ

Функция передачи ОУ с частотной коррекцией характеризуется доминирующим полюсом на частоте f_{p1} . Он определяет начало спада коэффициента усиления в области нижних частот. Другой полюс на частоте f_{p2} , обычно в 2...3 раза превышающей частоту единичного усиления f_1 , определяет границу частотного диапазона с единичным наклоном АЧХ – 20 дБ/дек. Рис. 5.5 дает представление о частотных свойствах реального ОУ. АЧХ построена по макромоделю (рис. 5.4).

Далее, используем эту конструкцию для определения АЧХ, ФЧХ и ПХ ОУ с ОС.

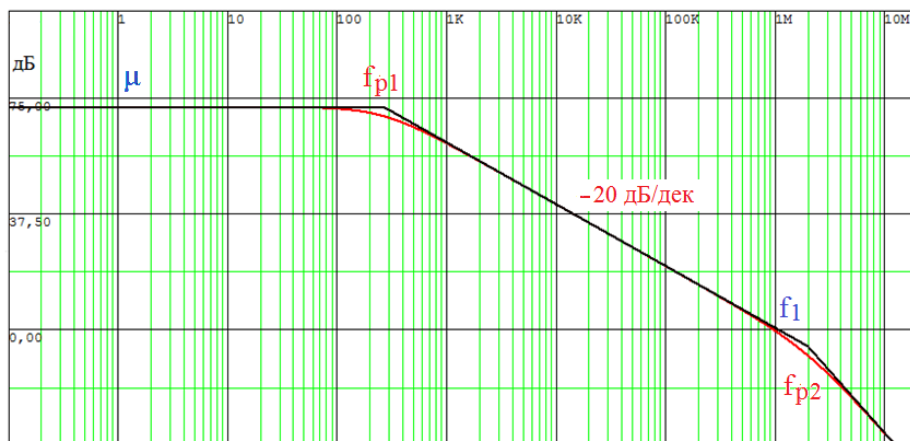


Рис. 5.5. Типовая АЧХ ОУ с коррекцией

Задание 1. Составить макромоделль по заданным параметрам. Указать общий коэффициент усиления ОУ μ над ОУ1, другие блоки имеют усиление 1. Емкости, связанные с частотами полюсов, определяются из выражения $C_i = 1/2\pi f_{pi}R$.

3.2. Исследование свойств каскада на ОУ в частотной и временной областях

Исследование состоит из двух пунктов:

3.2.1. Схемы на ОУ с частотно-независимой ОС.

3.2.2. Схемы на ОУ с частотно-зависимой ОС.

3.2.1. Схемы на ОУ с частотно-независимой ОС.

На рис. 5.6 приведены две основные схемы включения ОУ.

Неинвертирующий усилитель с ОС изображен на рис. 5.6, а. В этой схеме сигнал подается на прямой вход ОУ. Напряжение отрицательной ОС поступает на инверсный вход ОУ. Цепь ОС из резисторов R1 и R2 образует последовательную ОС по входу и параллельную по выходу. Коэффициент усиления K_{FH} этой структуры записан под схемой. Здесь μ собственный коэффициент усиления ОУ без ОС, F – глубина ОС.

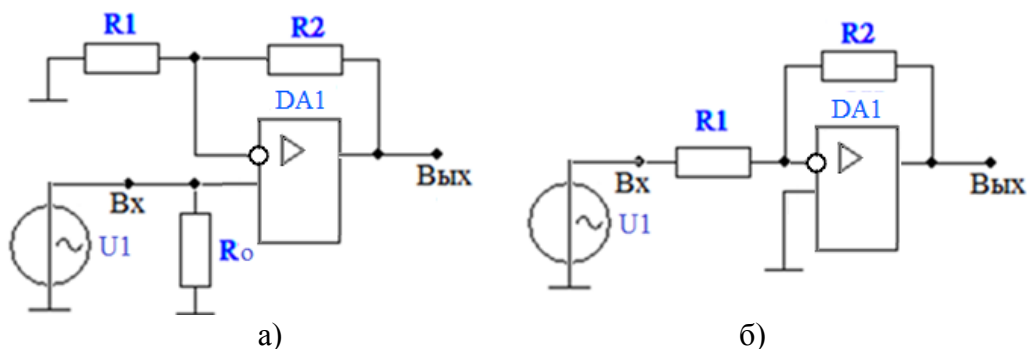


Рис. 5.6. Основные схемы включения операционных усилителей

$$K_{Fи} = \frac{\mu}{F} \approx 1 + \frac{R2}{R1}; \quad K_{Fн} = \frac{R2}{R1 + R2} \frac{\mu}{F} \approx \frac{R2}{R1};$$

$$F = 1 + \mu B = 1 + \mu \frac{R1}{R1 + R2}.$$

Инвертирующий усилитель с ОС изображен на рис. 5.6, б. В этой схеме сигнал через резистор R1 подается на инверсный вход ОУ. На этот же вход должен поступать и сигнал ОС, иначе она не будет отрицательной. Таким образом, и в инвертирующем включении ОУ цепь ОС образуется резисторами R1 и R2. При этом получается параллельная по инверсному входу ОУ и параллельная по выходу ОС. Коэффициент усиления $K_{Fи}$ этой структуры также записан под соответствующей схемой. Глубина ОС в обеих схемах одинакова.

3.2.1.1. Характеристики в частотной области.

В работе предусмотрены исследования устройств на ОУ в следующих режимах:

- режим без ОС;
- режим усиления с ОС при подаче сигнала на инверсный или на прямой вход ОУ.

Сложную эквивалентную схему ОУ (рис. 5.4) удобно представить в виде подсхемы (прил.). Полученный прямоугольник можно воспринимать как законченную ИС ОУ и на ее основе проводить исследования различных схем с ОУ.

С этого момента в исследуемых схемах подсхема на рис. 5.7 будет заменять макромодель с рис. 5.4.

Режим без ОС можно создать, подключив к одному из входов подсхемы ОУ (рис. 5.7) источник гармонического сигнала (с амплитудой 1...2 мВ) и заземлив другой. В этом случае исследованию подвергается собственно сама микросхема ОУ.

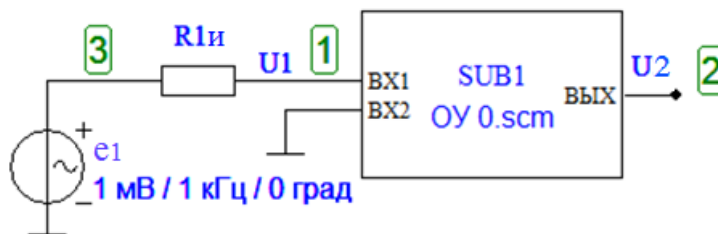


Рис. 5.7. Схема включения ОУ без ОС

Полученная АЧХ в двойном логарифмическом масштабе должна быть похожа на рис. 5.5.

Частотные характеристики ОУ представлены на рис. 5.8.

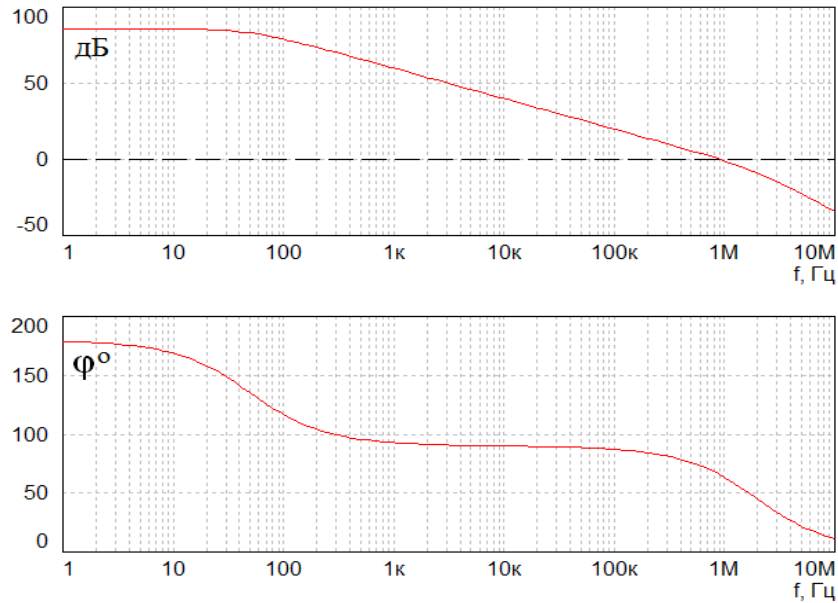


Рис. 5.8. Частотные характеристики ОУ

Задание 2. Построить АЧХ ОУ без ОС, определить коэффициент усиления μ на нижних частотах (20...80 Гц), частоты полюсов и частоту единичного усиления f_1 .

Режим ОУ с ОС получается при подключении к под схеме резисторов ОС R1 и R2 (рис. 5.9). Для получения заданных коэффициентов усиления с ОС K_F , равными 100 и 10, необходимо включить требуемые сопротивления резисторов ОС. Их можно рассчитать, приняв $R_1 = 1...2$ кОм.

Если источник сигнала подключается к инверсному входу ОУ через резистор R1. Получаем *инвертирующий усилитель* (рис. 5.9).

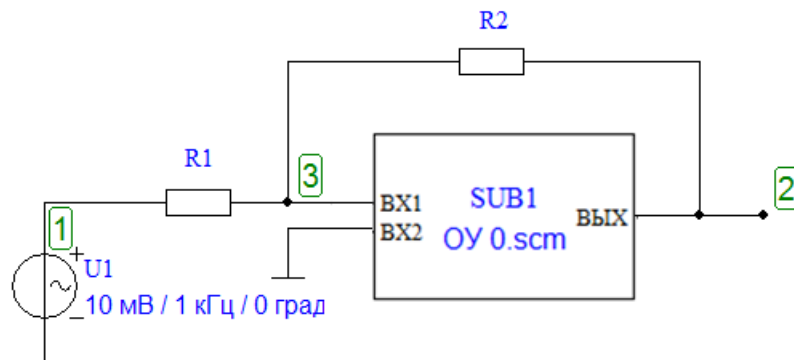


Рис. 5.9. Инвертирующий усилитель

Задание 3. Построить АЧХ и ФЧХ инвертирующего усилителя при $K_F = 100$ и $K_F = 10$. Входные напряжения здесь удобно задать одинаковыми для всех коэффициентов усиления так, чтобы выходное напряжение не пре-

вышло 1 В. Используя функцию «параметр» можно наблюдать несколько АЧХ. Для сравнения построить АЧХ усилителя на одном рисунке с АЧХ без ОС, определить граничные частоты полосы пропускания.

Задание 4. Определить входное сопротивление инвертирующего усилителя (рис. 5.9). Для этого в диалоговом окне написать $\text{mag } U(1)/I(R1)$.

*Инвертирующий усилитель
с высоким входным сопротивлением*

Для получения высокого входного сопротивления в инвертирующем усилителе используется Т-образная цепь ОС. Резисторы, подключаемые ко входу ОУ, выбираются высокоомными (например 1 МОм). Два других используются для управления коэффициентом усиления.

Коэффициент усиления такой схемы рассчитывается следующим образом:

$$K_F = \frac{\mu(R_4(R_5 + R_6) + R_5R_6)}{\mu R_3 R_6 + (R_3 + R_4)(R_5 + R_6) + R_5 R_6} \approx \frac{(1 + R_5/R_6)R_4}{R_3}.$$

Задание 5. Рассчитать элементы цепи ОС по заданному коэффициенту усиления $K_F = 100$ и $K_F = 10$. Построить АЧХ усилителя (рис. 5.10). Определить входное сопротивление усилителя и сравнить с входным сопротивлением усилителя на рис. 5.9.

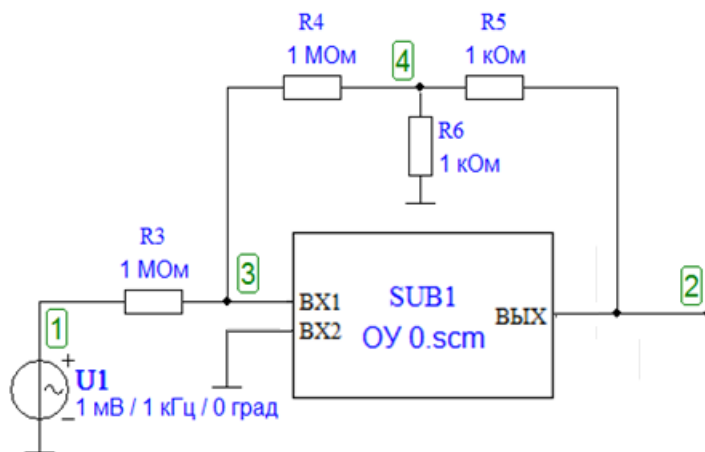


Рис. 5.10. Инвертирующий ОУ
с высоким входным сопротивлением

Неинвертирующий усилитель на ОУ получается при подаче сигнала на его прямой вход (рис. 5.6, а). На практике вызывает интерес частный случай такого включения – операционный повторитель (ОП) (рис. 5.11).

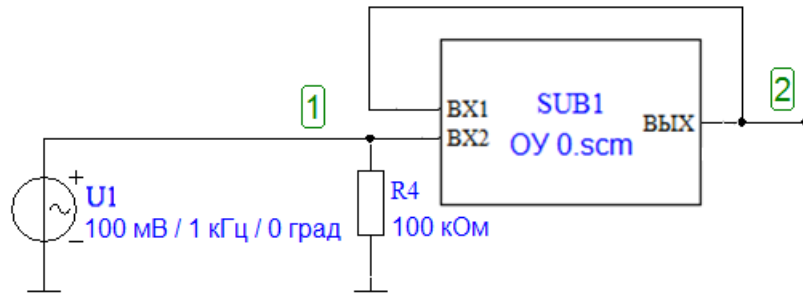


Рис. 5.11. Операционный повторитель

Режим ОП получается в неинвертирующем усилителе при $R_2 = 0$ (рис. 5.6, а). Выход ОУ непосредственно соединяется с инверсным входом, использование резистора R_1 в этом случае теряет смысл. Резистор R_4 необходим для протекания входного постоянного тока ОУ. Его сопротивление может составлять десятки и сотни кОм. Оно определяет входное сопротивление ОП. При этом следует помнить о входных токах ОУ.

Задание 6. Получить АЧХ ОП. Сравнить с АЧХ ОУ без ОС. В версии Fastmean 6.0 кроме функции «параметр» для сравнения можно использовать несколько разных схем с генераторами гармонического сигнала на одном экране.

3.2.1.2. Характеристики во временной области.

Переходную характеристику (ПХ) усилителя получаем при подаче на его вход напряжения прямоугольной формы. Для этого в схемах на рис. 5.9 и 5.11 необходимо переключить источник сигналов с гармонических колебаний на меандр. Задать двухполярный сигнал ± 1 мВ и длительность импульса $t_{И} = 25$ мкс.

Задание 7. Получить изображения ПХ усилителей (рис. 5.9 и 5.11). Сравнить параметры переходных характеристик (рис. 5.12).

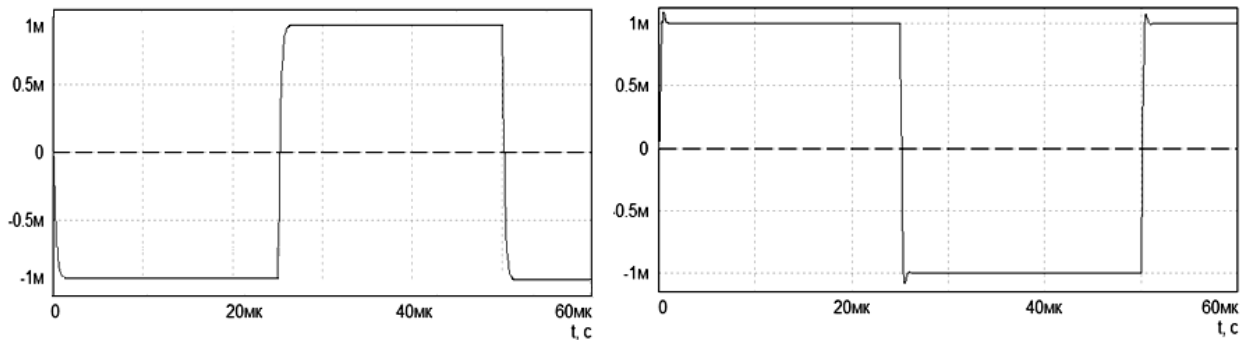


Рис. 5.12. ПХ усилителей по рис. 5.9 и 5.11

3.2.2. Схемы на ОУ с частотно-зависимой ОС.

Из огромного разнообразия схем ОУ с частотно-зависимыми цепями ОС для лабораторного исследования выбраны только две.

Одна из них представляет собой интегратор (рис. 5.13, а), другая – дифференциатор (рис. 5.13, б). Соответствующие функции определяются RC-элементами. Резисторы R_0 выполняют вспомогательные функции. В интеграторе R_0 обеспечивает необходимую ОС на постоянном токе, в дифференциаторе – необходимый запас по фазе.

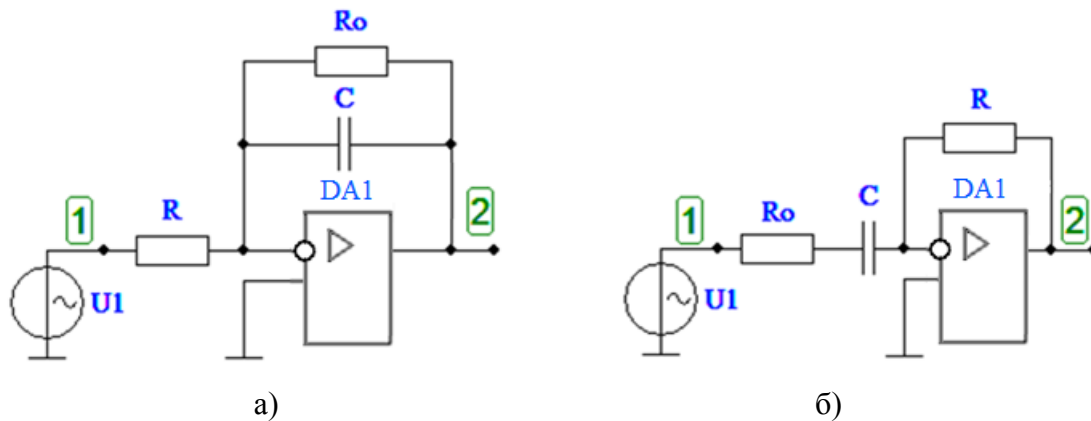


Рис. 5.13. ОУ в режиме интегрирования (а) и дифференцирования (б)

3.2.2.1. Характеристики в частотной области.

ИНТЕГРАТОР. Заменяя ОУ в схеме рис. 5.13, а на макромодель-подсхему, получаем схему для исследования интегратора рис. 5.14. Номинальные значения внешних элементов берем из заданий к лабораторным работам (табл. 5).

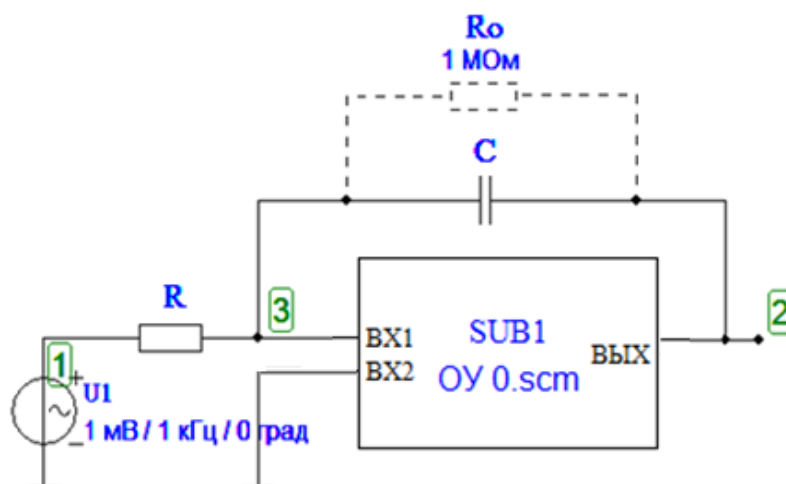


Рис. 5.14, а. Схема интегратора

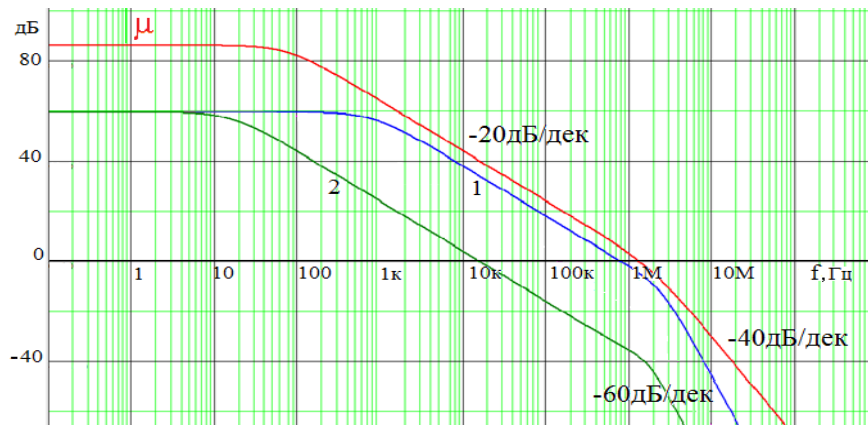


Рис. 5.14, б. Схема АЧХ интегратора

Действие интегрирования, как и подобает, выполняют RC элементы. Идеальная кривая интегрирования представляет собой прямую линию с наклоном -20 дБ/дек. Без резистора на выходе ОУ не будет поддерживаться нулевой потенциал, в реальной ИС скорее всего возникнет триггерный режим. Резисторы R_0 и R на низких частотах (пока сопротивление конденсатора C велико) определяют коэффициент усиления и ограничивают его. На высоких частотах сопротивление конденсатора стремится к нулю, оно берет на себя роль сопротивления ОС, вследствие чего падает коэффициент усиления.

Задание 8. Построить АЧХ интегратора на одном рисунке с АЧХ ОУ без ОС.

ДИФФЕРЕНЦИАТОР. Используя рис. 5.13, б и макро модель-подсхему ОУ, получаем схему для исследования дифференциатора (рис. 5.15). Номинальные значения внешних элементов берем из заданий к лабораторным работам (табл. 6).

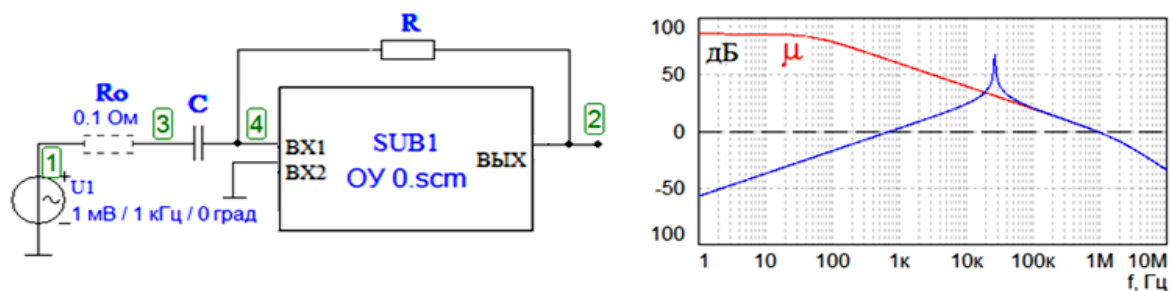


Рис. 5.15. Схема дифференциатора и его АЧХ

Действие дифференцирования, как и подобает, выполняют RC элементы. Идеальная кривая дифференцирования представляет собой прямую линию с наклоном $+20$ дБ/дек.

На низких частотах сопротивление конденсатора C велико, передача сигнала от источника U_1 на вход ОУ ничтожна, передача в петле ОС велика. По этой причине коэффициент усиления очень мал.

На высоких частотах сопротивление конденсатора стремится к нулю, указанные функции меняют качественный характер на противоположный. Коэффициент усиления увеличивается. Однако его АЧХ не может выйти за границу АЧХ ОУ без ОС и АЧХ дифференциатора идет по ней. Последняя имеет наклон -20 дБ/дек.

В области пересечения АЧХ изменение наклона может составить 40 дБ/дек. Это эквивалентно изменению фазового сдвига в петле ОС на 180°. Показанный штрихами резистор R_0 , необходим для обеспечения устойчивости усилителя. Здесь указано такое сопротивление, что можно рассматривать схему, как будто этот вспомогательный резистор вообще отсутствует.

Задание 9. Построить АЧХ дифференциатора на одном графике с АЧХ ОУ без ОС. Определить сопротивление R_0 , при котором подъем на АЧХ дифференциатора *перестает* иметь место.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕТЛЕВОГО УСИЛЕНИЯ μ_V

Об устойчивости усилителя судят по характеристике петлевого усиления. Для ее получения необходимо разомкнуть цепь ОС.

В реальной схеме с ОУ выполнить измерения с разомкнутой петлей ОС весьма сложно из-за чрезвычайно высокого коэффициента усиления ОУ и необходимости сохранения нулевых потенциалов на постоянном напряжении. Использование ПК существенно облегчает решение этой задачи. На рис. 5.16 показан вариант выполнения разрыва петли ОС на ПК в схеме на рис. 5.15.

В предложенной макромоделе удобно осуществлять размыкание петли ОС на выходе ОУ. Началом (входом) разомкнутой петли ОС является узел 1, заканчивается она (выходом) в узле 2. Преобразование схемы (рис. 5.15) выполняется следующим образом. Цепь ОС отключается от выхода ОУ. Гармонический источник сигнала отключается от входа усилителя (резистор R_0) и переносится к цепи ОС (резистор R). Освободившийся левый вывод резистора R_0 заземляется. Малое (практически нулевое) выходное сопротивление ОУ не требует нагружать выход ОУ на эквивалентное сопротивление нагрузки в месте разрыва петли. Полученная схема (рис. 5.16) пригодна для исследования петлевого усиления и глубины ОС.

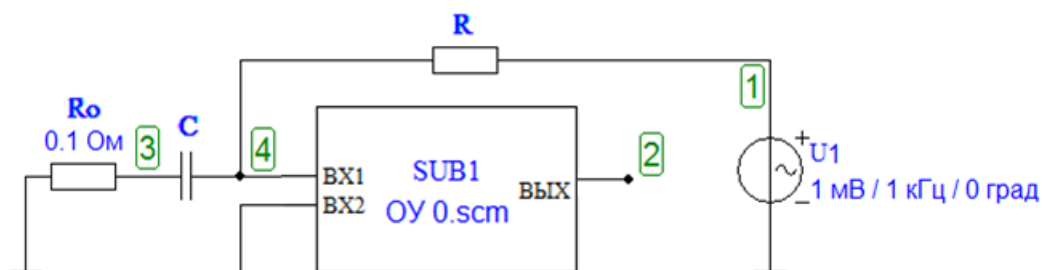


Рис. 5.16. Схема дифференциатора из рис. 5.15 с разомкнутой петлей ОС

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ПО ФАЗЕ

Это можно выполнить, представив на мониторе одновременно АЧХ и ФЧХ петлевого усиления. По АЧХ с помощью линейки находим частоту, на которой модуль коэффициента петлевого усиления становится равным единице (0 дБ), а по ФЧХ на этой же частоте определяем величину фазового сдвига. Эта величина и будет соответствовать искомому запасу по фазе. Для каждой кривой находим свой запас по фазе.

На рис. 5.17 показаны характеристики петлевого усиления для различных значений сопротивления R_0 . Кривая 1 соответствует практически нулевому значению R_0 , кривая 2 соответствует сопротивлению R_0 , найденному в задании 9, 240 Ом. На АЧХ частота пересечения линии 0 дБ меняется незначительно (точки *a* и *b*). На ФЧХ у кривой 1 запас по фазе менее 1 градуса (практически усилитель самовозбудился), у кривой 2 запас по фазе более 47°. Данные, полученные с помощью инструментальной линейки, приведены на рис. 5.18. Слева результаты кривой 1, справа – 2.

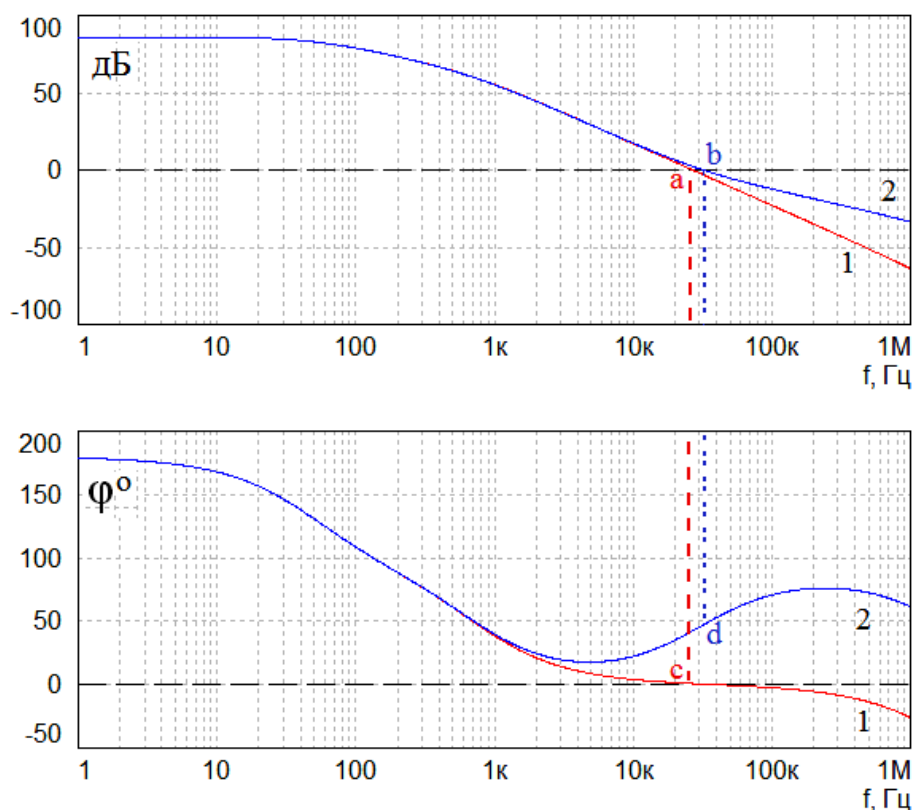


Рис. 5.17. АЧХ и ФЧХ петлевого усиления дифференциатора



Рис. 5.18. Показания линейки по кривым 1 и 2 из рис. 5.17

Задание 10. Построить АЧХ петлевого усиления дифференциатора. С помощью линейки Fastmean определить запас устойчивости по фазе при значении R_0 0,1 Ом и его значении, найденном в задании 9.

3.2.2.2. Характеристики во временной области.

Переходные характеристики получаем при подаче на вход исследуемой схемы напряжения прямоугольной формы. Для этого в схемах на рис. 5.14 и 5.15 необходимо переключить источник сигналов с гармонических колебаний на меандр. Задать двухполярный сигнал ± 1 мВ. Частота следования прямоугольных импульсов устанавливается в зависимости от их длительности импульса $t_{И} = 1/2f$. В [1] для интегратора и дифференциатора приняты $t_{И} = 500$ мкс.

Задание 11. ИНТЕГРАТОР. Получить диаграмму интегрированных импульсов. Увеличивая длительность входного импульса, определить ее значение, при котором линейный закон интегрирования переходит в экспоненциальный (рис. 5.19).

!!! Длительность импульса, при котором появляются искажения на диаграмме интегрирования, может быть на порядок выше исходного. Обратите внимание, что с увеличением длительности импульса возрастает и размах сигнала.

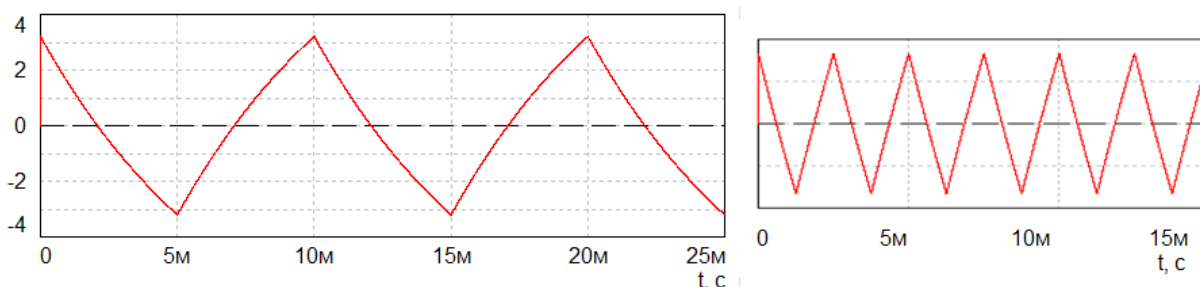


Рис. 5.19. Форма сигнала на выходе ИНТЕГРАТОРА при разной длительности импульсов

Задание 12. ДИФФЕРЕНЦИАТОР. Получить диаграммы дифференцированных импульсов при значении сопротивления резистора R_0 , полученном в задании 9, и без него.

Рекомендуем построить две схемы дифференциатора и получить два графика в разных окнах аналогично рис. 5.20.

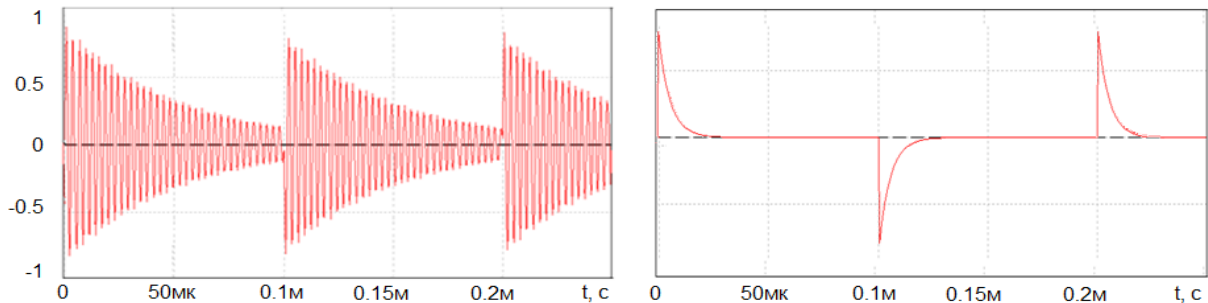


Рис. 5.20. Форма сигнала на выходе ДИФФЕРЕНЦИАТОРА при разном запасе по фазе

Контрольные вопросы

1. Какой вид имеют АЧХ и ФЧХ ОУ?
2. Чем отличается АЧХ и ПХ ОУ от усилителя переменного тока?
3. С какой целью в усилительных устройствах применяется ОС?
4. Как влияет на форму АЧХ ОС?
5. Какие элементы схем усилителей определяют глубину ОС?
6. В чем причина самовозбуждения усилителей?
7. Как выглядят схемы инвертирующего и неинвертирующего устройства на ОУ?
8. Как влияет ОС на входное и выходное сопротивление ОУ?
9. Как выглядят схемы интегрирующего и дифференцирующего каскада на ОУ?
10. Какой вид имеют АЧХ интегрирующего и дифференцирующего усилителя?

ПРИЛОЖЕНИЕ

В версии Fastmean 6 имеется возможность в сложной электронной схеме выделять отдельные ее части как подсхемы. Они изображаются в виде прямоугольника с необходимым количеством выводов. Такая подсхема функционирует также как схемная структура, находящаяся в прямоугольнике. Малые подсхемы можно объединять в более крупные. Выводы подсхем соединяются с внешними электронными компонентами при помощи портов.

Сложную эквивалентную схему каскада ОЭ (рис. 1.8 ЛР 1) удобно представить в виде подсхемы, содержащей модель транзистора, и остальных элементов схемы каскада. То же относится и к каскадам ОБ и ОК. Подсхема в этих схемах заменяет собой транзистор и выступает как активный четырехполюсник с параметрами биполярного транзистора. Такое представление усилительного каскада упрощает исследование влияния элементов схемы на характеристики усилительного устройства, а приучает к работе с настоящими транзисторами и ИС.

ПОСТРОЕНИЕ ПОДСХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ТРАНЗИСТОРАХ

В качестве подсхемы для каскадов на одиночных транзисторах (ОЭ, ОБ, ОК) удобно и целесообразно выбрать сам транзистор. Тогда эквивалентная схема транзистора и будет подсхемой.

Собрав эквивалентную схему транзистора, выделяем три внешних вывода: база (Б), эмиттер (Э) и коллектор (К). Соединяем их с портами (рис. П1). Порты находятся на панели инструментов в основной группе. Портам (NEW –PORT) логично дать новые названия Б, Э, К.

!!! Название выводов можно менять, но идентификатор очень капризный – не терпит пропусков между буквами, знаки + и – и многое другое.

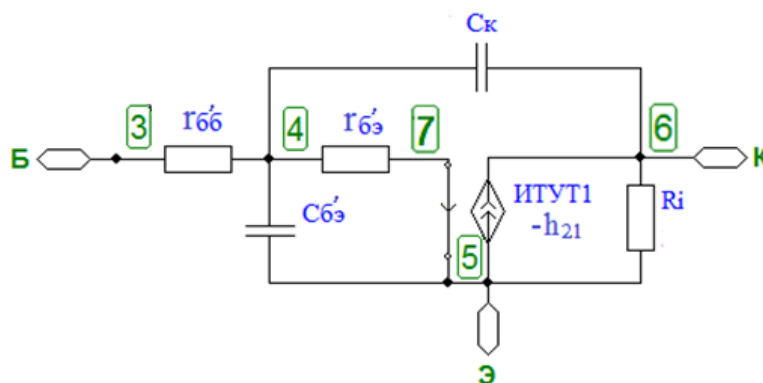


Рис. П1. Эквивалентная схема транзистора, помещаемая в подсхему

Полученный файл надо сохранить с запоминающимся названием, дав ему какое-то имя, например «Транзистор».

После этого обязательно следует открыть новый файл и кликнуть элемент «подсхема» на панели инструментов (рис. П2).

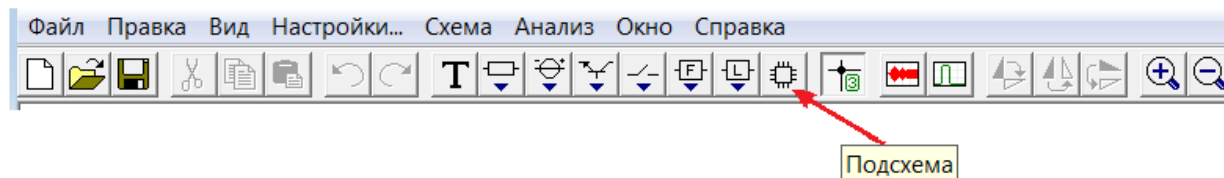


Рис. П2. Панель инструментов

Появившийся прямоугольник SUB1 (рис. П3, а) кликнуть дважды.

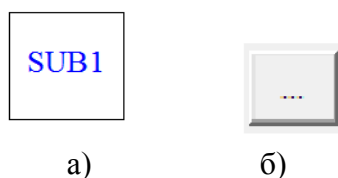


Рис. П3. Свободная подсхема (а) и стартер ее заполнения (б)

В открывшемся окне (рис. П4) активировать кнопку ... (рис. П3, б). Откроется новое окно с библиотекой Fastmean 6 (рис. П5).

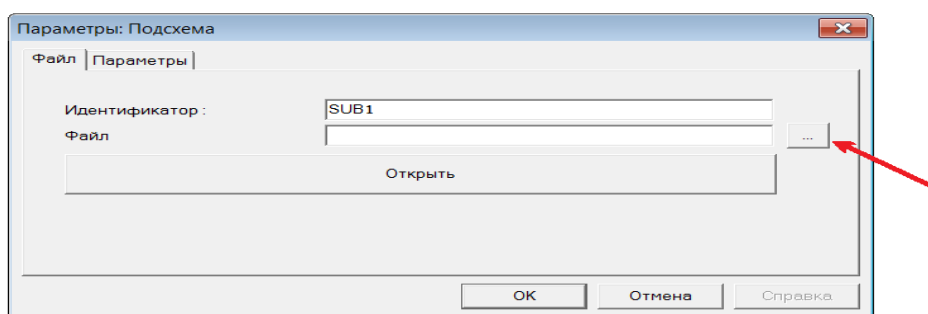


Рис. П4. Окно управления подсхемой

Выбрав имя заготовленного файла «Транзистор.scm», переносим его в окно, затем нажимаем клавишу «открыть».

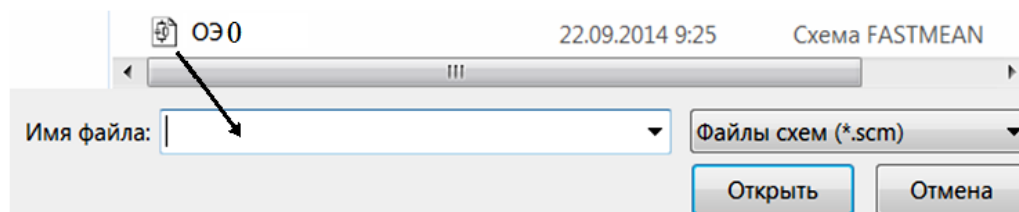


Рис. П5. Перенос выделенного файла (рис. П1) в подсхему

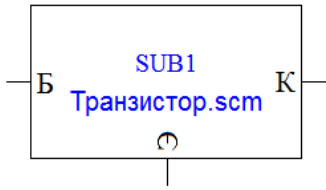


Рис. П6. Подсхема, содержащая эквивалентную схему транзистора по рис. П1

При этом открывается предыдущее окно (рис. П4). Активируя «ОК», получаем подсхему с именем «Транзистор.scm» (рис. П6), содержащую эквивалентную схему транзистора по рис. П1.

К сожалению обозначения выводов записываются вдоль продольной оси портов и буква «Э» в узле 4 оказывается неудачно расположенной. Разворот порта переместит его на переднюю грань прямоугольника, что еще менее удобно.

С этого момента можно исследовать любую схему усилителя на биполярном транзисторе, подключая к *подсхеме* внешние элементы. Примером служит рис. П7.

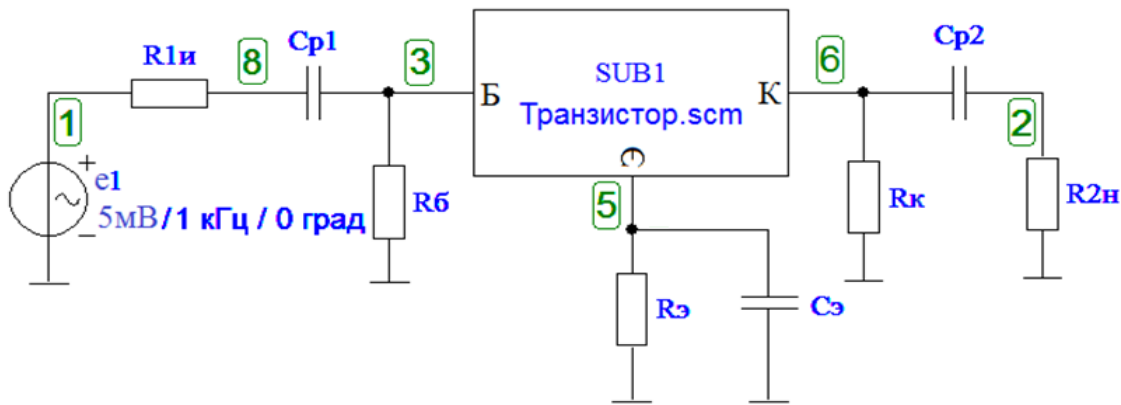


Рис. П7. Схема исследования каскада с ОЭ

Вернуться к эквивалентной схеме транзистора (рис. П1) и произвести какие-либо изменения в ней можно кликнув имя файла «Транзистор.scm» на подсхеме SUB1. Вследствие этого возвращаемся в окно управления подсхемой (рис. П4). По команде «Открыть» на экране появляется эквивалентная схема транзистора (рис. П1).

ПОСТРОЕНИЕ ПОДСХЕМЫ УСИЛИТЕЛЯ ОЭ С ОС

В связи с тем, что исследуется действие ОС, создаваемой элементами эмиттерной цепи, здесь целесообразно обратить на них особое внимание, убрав из поля зрения менее важные элементы. В этом случае также следует внести в подсхему элементы входной и выходной цепи, а именно C_{P1} , $R_б$ и C_{P2} , $R_к$ (рис. П7). Схема усилителя будет взаимодействовать с внешними цепями через порты, соединенные с узлами 8 и 2 (рис. П8).

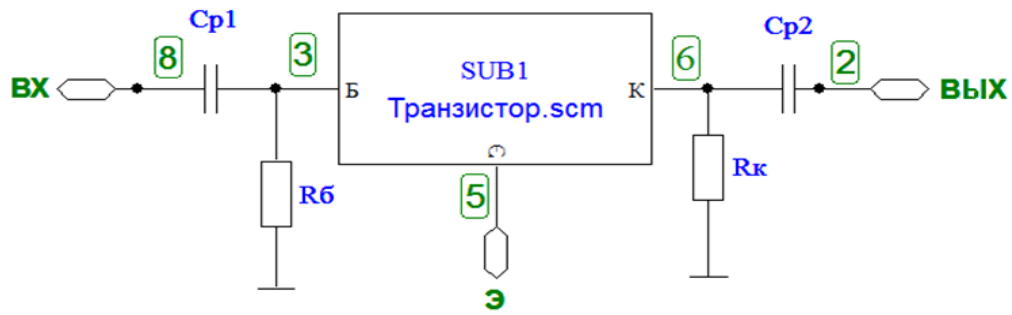


Рис. П8. Укрупнение подсхемы

Первый порт принимает на себя роль входа, а второй порт – роль выхода усилительного устройства. Порт эмиттера сохраняем.

После выполнения описанной выше процедуры создания подсхемы получаем схемную структуру, удобную для исследования влияния эмиттерной ОС в каскаде ОЭ. Она приведена на рис. П9.

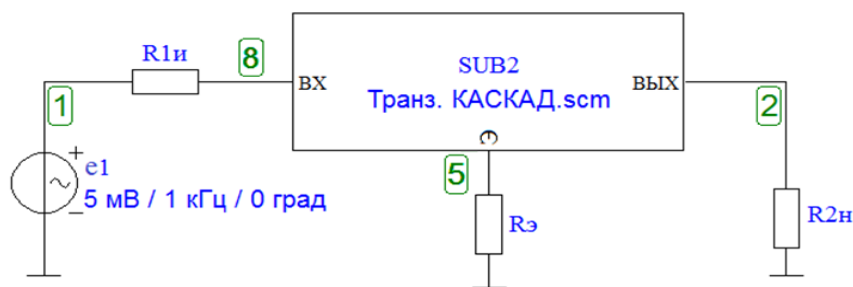


Рис. П9. Схема исследования каскада ОЭ с ОС

ПОСТРОЕНИЕ ПОДСХЕМЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Обеспечим подсхему внешними выводами. Для этого нужные выводы помечаются портами (рис. П10). Полученный файл необходимо сохранить, например с именем ОУ0. Выполняя действия прил., получаем подсхему ОУ, содержащую макромодель ОУ (файл ОУ0). Инверсным выбран вход 1. С этого момента в исследуемых схемах подсхема (рис. П11, а) будет заменять макромодель на рис. П10.

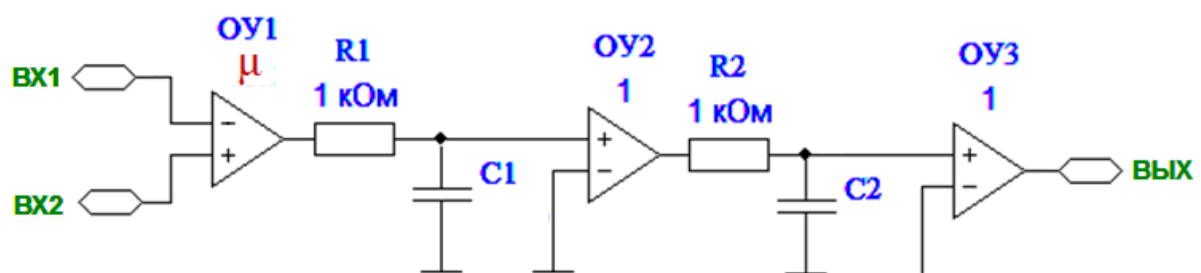


Рис. П10. Подготовка макромодели ОУ для подсхемы

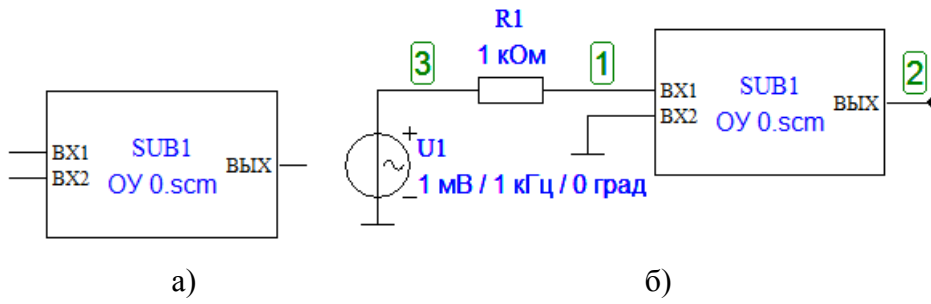


Рис. П11. Подсхема ОУ (а), измерение собственных параметров ОУ (б)

Вид подсхемы ОУ и схема измерения собственных характеристик ОУ показаны на рис. П11.

Список литературы

1. Павлов, В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учеб. для вузов / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. – 2-е изд., исправ. – М. : Горячая линия – Телеком, 2001.
2. Алексеев, А. Г. К расчету резисторных каскадов : метод. указания / А. Г. Алексеев, П. В. Климова. – 2011. – www.seusut.narod2.ru
3. Алексеев, А. Г. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Анализ частотных характеристик типовых структур аналоговых устройств : учеб. пособие / А. Г. Алексеев, П. В. Климова ; СПбГУТ. – СПб., 2012.
4. Алексеев, А. Г. Схемотехника телекоммуникационных устройств. Обеспечение устойчивости операционных усилителей : учеб. пособие / А. Г. Алексеев, П. В. Климова ; СПбГУТ. – СПб., 2014.
5. Официальный сайт программы FASTMEAN www.fastmean.ru.

**Алексеев Алексей Георгиевич
Климова Полина Валентиновна**

**СХЕМОТЕХНИКА
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Лабораторный практикум

Редактор С. Д. Щербакова

Компьютерная верстка Н. А. Ефремовой

План издания 2015 г., п. 87

Подписано к печати 06.04.2015

Объем 4,25 усл.-печ. л. Тираж 15 экз. Заказ 567

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ

191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ

