

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА**

**АНАЛОГОВЫЕ
ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА**

САМАРА 1995

Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
Методические указания

С а м а р а 1995

Составитель Г. П. Вечканов

УДК 621.375

Аналоговые электронные устройства: метод. указания к лабораторным работам и к контролируемой самостоятельной работе студентов /Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Составитель Г. П. Вечканов. Самара, 1995. 48 с.

Приведены методические указания к выполнению четырех лабораторных работ и трех заданий для контролируемой самостоятельной работы студентов (КСРС). Лабораторные работы посвящены исследованию различных схем включения транзисторов, усилительных каскадов, обратных связей. Указания для КСРС содержат порядок расчета однокаскадного усилителя, его элементов и логарифмических частотных характеристик. Предназначены для студентов специальности 2007. Подготовлены на кафедре радиотехники .

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева.

Рецензенты: А. В. Зеленский,
М. Н. Пиганов

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМЫ ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Цель работы - ознакомление с классификацией и основными показателями усилителей, приобретение навыков по экспериментальным исследованиям усилительных устройств.

Методика проведения измерений основных характеристик усилительных устройств

Все эксперименты проводятся на лабораторных макетах усилителей по схеме, представленной на рис.1.



Рис.1. Схема проведения эксперимента

В процессе экспериментального исследования усилительного устройства измеряют характеристики, перечисленные ниже.

Амплитудная характеристика и динамический диапазон

Амплитудная характеристика снимается на средней частоте. Для измерений используются электронный вольтметр (ЭВ), осциллограф и генератор синусоидальных сигналов (ГСС). На ГСС устанавливается средняя частота 5 кГц и амплитуда сигнала от нуля плавно увеличи-

вается до тех пор, пока на выходе усилителя не появятся наблюдаемые на экране осциллографа существенные нелинейные искажения. В полученном диапазоне изменения входного сигнала снимается зависимость напряжения выходного сигнала (ЭВ) от напряжения входного (ГСС) в 10-15 точках.

Динамический диапазон рассчитывается по формуле

$$D = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{ВЫХ.макс}}}{U_{\text{ВЫХ.мин}}} \right),$$

где $U_{\text{ВЫХ.макс}}$ - предельное напряжение неискаженного выходного сигнала,

$$U_{\text{ВЫХ.мин}} = 3U_{\text{ш}},$$

$U_{\text{ш}}$ - напряжение шума на выходе усилителя, измеренное при нулевом входном сигнале.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Для снятия АЧХ к входу усилителя подключают ГСС. Напряжение выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}(f)$ измеряют с помощью ЭВ, подключенного к выходным клеммам усилителя.

Предварительно с помощью осциллографа выбирают амплитуду входного сигнала $U_{\text{ВХ}}(f_0)$ так, чтобы на средней частоте f_0 усилитель работал в линейном режиме. Либо без осциллографа входной сигнал устанавливают таким, чтобы напряжение выходного сигнала было равно 70-80 мВ. В этом случае усилитель будет работать в надежно линейном режиме.

АЧХ снимают начиная с частоты 20 Гц. Далее частоты рекомендуют брать в следующем порядке:

20Гц, 50Гц, 100Гц, 200Гц, 500Гц, 1кГц, 2кГц, 5кГц,

Удобство такой последовательности заключается в том, что в логарифмическом масштабе эти частоты располагаются на частотной оси примерно на одинаковом расстоянии, что значительно облегчает процесс построения графиков АЧХ.

Частота повышается до тех пор, пока выходное напряжение не

упадет до уровня 0,5 от значения выходного сигнала на средней частоте.

При построении по результатам измерений графиков АЧХ по горизонтальной оси координат откладывают частоты в логарифмическом масштабе, а по вертикальной - коэффициент усиления K в относительных единицах и строится зависимость $K(f)$:

$$K(f) = \frac{U_{\text{вых}}(f)}{U_{\text{вх}}(f_0)}$$

На построенных таким образом АЧХ проводят уровень $0,707K_0$, где K_0 - коэффициент усиления на средней частоте. Отмечают точки пересечения этой линии с АЧХ и определяют соответствующие им частоты f_n и f_v .

Могут быть построены также логарифмические АЧХ. В этом случае по вертикальной оси откладывают коэффициент усиления G в децибелах и строится зависимость $G(f)$:

$$G(f) = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}(f)}{U_{\text{вх}}(f_0)}$$

Частоты f_n и f_v определяют по уровню -3 дБ относительно G_0 .

Переходная характеристика

Переходная характеристика (ПХ) - это изменение выходного напряжения во времени при скачкообразном изменении входного сигнала. Для снятия ПХ к входу усилителя подключают генератор импульсов прямоугольной формы (ГИ), а к выходу - осциллограф. Амплитуду входных импульсов выбирают так, чтобы усилитель работал в линейном режиме. Частоту и длительность импульсов выбирают, исходя из удобства снятия параметров переходной характеристики с экрана осциллографа. ПХ срисовывают с экрана осциллографа в реальном масштабе времени с использованием масштабных меток и измерителя амплитуды, нормируют по установившемуся значению $U_{\text{уст}}$ и по рисунку определяют следующие параметры, характеризующие искажения импульса в усилителе:

время установления $t_y = t_{(0,9)} - t_{(0,1)}$,

выброс фронта $\delta = (U_{\max} - U_{уст}) / U_{уст}$,
 время задержки по уровню 0,5 $t_{в} = t_{(0,5)}$,
 спад вершины импульса $\Delta = (U_{\max} - U_{т}) / U_{\max}$, где $U_{т}$ - ордината
 конца импульса.

Входное и выходное сопротивления усилителя

Измерение входного сопротивления $R_{вх}$ производят в линейном режиме на средней частоте по схеме, изображенной на рис.2, методом

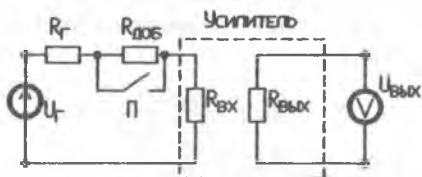


Рис.2. Схема измерения входного сопротивления

добавочного сопротивления $R_{доб}$, включаемого во входную цепь усилителя последовательно с ГСС. Затем с помощью вольтметра V измеряют выходные напряжения $U_{вых0}$ при замкнутом ключе Π и $U_{вых1}$ - при разомкнутом .

Входное сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_{вх} = R_{доб} \frac{U_{вых1}}{U_{вых0} - U_{вых1}} - R_T ,$$

где R_T - выходное сопротивление ГСС.

Измерение выходного сопротивления $R_{вых}$ производят также в линейном режиме на средней частоте по схеме, помещенной на рис.3, методом шунта. Измеряют выходные напряжения $U_{вых0}$ при разомкнутом ключе Π и $U_{вых1}$ - при замкнутом .

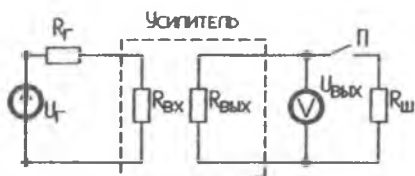


Рис.3. Схема измерения выходного сопротивления

Выходное сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_{\text{вых}} = \left[\frac{U_{\text{вых0}}}{U_{\text{вых1}}} - 1 \right] R_{\text{ш}},$$

где $R_{\text{ш}}$ – сопротивление шунта.

Пояснения к работе

Исследуемую схему (рис.4) собирают на лабораторном макете №1 (рис.5) с помощью имеющихся на нем переключателей и соединительных элементов (перемычек).

Для исследования характеристик усилительного каскада с общим эмиттером переключатель П1 ставят в положение 2, отключая второй каскад на транзисторе VT2. Клеммы Г2 и Г3 – входные, Г6 и Г9 – выходные. Перемычку А1-А2 вынимают, а перемычку Б1-Б2 вставляют. Сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$ устанавливают в гнезда В1-В2.

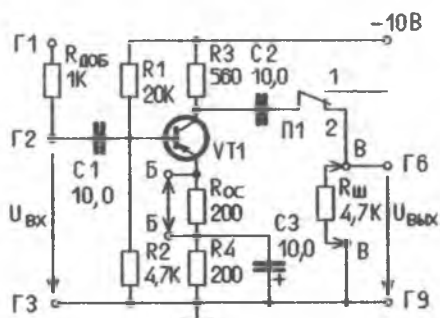


Рис.4. Исследуемая схема каскада ОЭ

-10В

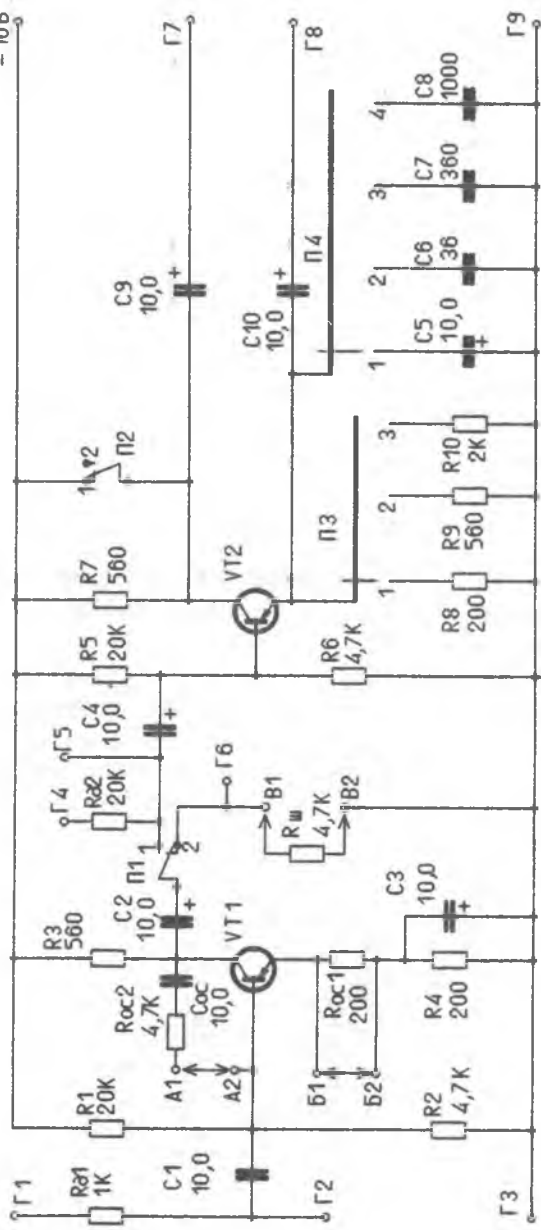


Рис.5. Принципиальная схема лабораторного макета №1

Содержание экспериментальной части работы

1. Снять амплитудную характеристику усилителя.
2. Определить динамический диапазон усилителя.
3. Снять АЧХ усилителя и определить верхнюю и нижнюю граничные частоты.
4. Снять переходную характеристику и определить ее параметры.
5. Определить входное и выходное сопротивления усилителя.

Список рекомендуемой литературы

1. В о й ш в и л л о Г. В. Усилительные устройства. М.: Связь, 1975. С. 1-40, 70-80.
2. Ц ы к и н Г. С. Усилительные устройства. М.: Связь, 1971. С. 8-29, 103-107.
3. О с т а п е н к о Г. С. Усилительные устройства. М.: Радио и связь, 1989. С. 1-48, 176-180, 180-187.

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение и методику снятия амплитудной, частотной, фазовой, переходной характеристик.
2. Назовите входные и выходные характеристики и параметры усилителя.
3. Нелинейные искажения и причины их появления.
4. Линейные искажения и причины их появления.
5. Что такое динамический диапазон усилителя и как он определяется экспериментально?
6. Расскажите о методике измерения:
 - а) входного и выходного сопротивлений усилителя;
 - б) нелинейных искажений.
7. Поясните методику построения логарифмических частотных характеристик.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМЫ ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

Ц е л ь р а б о т ы – приобретение навыков по расчету транзисторных каскадов усилителей, изучение качественных показателей и характеристик каскада с общим коллектором (эмиттерного повторителя), его влияния на показатели усилителя.

Пояснения к работе

Исследуемая схема собирается на лабораторном макете №1 (см.рис.5) с помощью имеющихся на нем переключателей и соединительных элементов (перемычек). Перемычку А1-А2 удаляют, а перемычка Б1-Б2 и резистор шунта $R_{ш}$ должны быть вставлены.

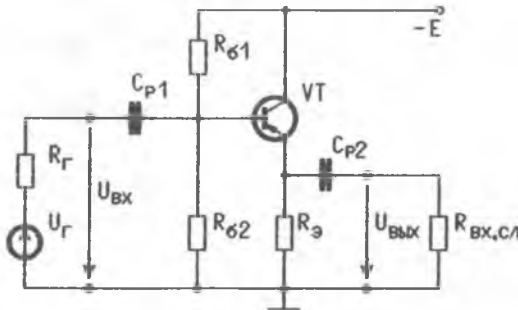


Рис.6. Схема каскада ОК

В начале эксперимента переключатель П1 должен находиться в положении 2, П2 – в положении 1, П3 и П4 – в положении 2. В этом случае каскад на транзисторе VT1 оказывается отсоединенным, а исследуется схема каскада на транзисторе VT2, включенном по схеме "общий коллектор" (ОК). Входными клеммами являются Г5-Г3, выходными – Г8-Г9. Клемма Г4 используется при измерении входного сопротивления для подачи входного сигнала через добавочное сопротивление $R_{д2} = 20$ кОм.

Каскад с ОК (эмиттерный повторитель) может быть представлен как каскад с ОЭ со 100% отрицательной обратной связью типа Н, т.е. последовательной по входу и параллельной по выходу. Напряжение обратной связи $U_{ос} = U_{вых}$ (рис.6) снимается с сопротивления нагрузки $R_{н} = R_{э} \parallel R_{вх.сл}$ и последовательно с напряжением источника сигнала $U_{вх}$ поступает на вход усилителя.

Коэффициент передачи по напряжению K , входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления определяются из выражений

$$K = \frac{SR_{н}}{1 + SR_{н}}, \quad R_{вх} = h_{11} + (1 + h_{21})R_{н}, \quad R_{вых} = \frac{h_{11} + R_{i}}{1 + h_{21}},$$

где $R_{i} = R_{г} \parallel R_{б1} \parallel R_{б2}$ - внутреннее сопротивление эквивалентного источника сигнала,

$$S = \frac{h_{21}}{h_{11} + R_{i}} - \text{крутизна коллекторного тока.}$$

Из приведенных выражений следует, что входное сопротивление каскада ОК велико, выходное - мало, а коэффициент передачи по напряжению меньше 1 (близок к 1). Схема ОК усиливает только по току с коэффициентом усиления $h_{21} \gg 1$.

Эмиттерные повторители находят применение во входных каскадах для согласования с высокоомным генератором, в выходных каскадах для согласования с нагрузкой, в каскадах предварительного усиления, т.к. высокое входное сопротивление каскада ОК способствует повышению коэффициента усиления предшествующего каскада ОЭ.

Благодаря действию отрицательной обратной связи (ООС) частотные искажения в схеме ОК значительно меньше, чем в схеме ОЭ. При емкости нагрузки, равной нулю, верхняя частота в полосе пропускания определяется только внутренними емкостями транзистора и по уровню 3 дБ примерно равна

$$f_{в} = \frac{F}{2\pi R_{экв} \cdot (C_{бэ} + C_{к})},$$

где $F = 1 + SR_{н}$ - глубина ООС ($F \gg 1$);

$$R_{экв} = (h_{11} - r_{б}) \parallel (r_{б} + R_{i});$$

$C_{бэ}, C_{к}$ - емкости переходов транзистора;

$r_{б}$ - сопротивление тела базы транзистора.

Из выражений следует, что для увеличения верхней частоты в полосе пропускания следует уменьшать сопротивление источника сигнала

R_i и увеличивать сопротивление нагрузки R_H . Верхняя частота при этом приближается к значению граничной частоты f_T передачи тока транзистора.

Выходное сопротивление схемы ОК на высокой частоте благодаря действию ООС носит индуктивный характер. Поэтому при небольшой емкости нагрузки в выходной цепи каскада возникает резонанс, который может привести к расширению полосы пропускания и к появлению выброса в частотной характеристике в области верхних частот.

Расчетное задание

1. Рассчитать входное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя при $R_H=200$ Ом, 560 Ом и 2 кОм. Значение R_T принять равным 300 Ом, $h_{11}=600$ Ом, $h_{21}=80$. Значения остальных параметров взять из схемы лабораторного макета (см. рис. 5).

2. Рассчитать коэффициент усиления первого каскада на транзисторе VT1 для случаев: а) второй каскад – эмиттерный повторитель с $R_H=200$ Ом; б) второй каскад аналогичен первому, т.е. собран по схеме ОЭ.

При выполнении п. 2 задания расчет коэффициента усиления первого каскада производить по формуле

$$K = h_{21} \frac{R_H}{h_{11}}, \quad \text{где} \quad R_H = R_3 \parallel R_5 \parallel R_6 \parallel R_{\text{вх. тр. сл.}}$$

Входное сопротивление $R_{\text{вх. тр. сл}}$ транзистора следующего каскада зависит от схемы его включения.

При включении по схеме ОЭ $R_{\text{вх. тр. сл}} = h_{11}$.

При включении по схеме ОК $R_{\text{вх. тр. сл}} = h_{11} + (1 + h_{21})R_H$.

Содержание экспериментальной части работы

1. Снять амплитудную характеристику эмиттерного повторителя при $R_H=560$ Ом.

2. Исследовать зависимость АЧХ эмиттерного повторителя от параметров R_H и C_H нагрузки, для чего изменять положения переключателей ПЗ и П4 в следующем порядке:

- а) ПЗ в положении 1, П4 в положении 2 ($R_H=200 \text{ Ом}$, $C_H=36\text{пФ}$);
- б) ПЗ в положении 2, П4 в положении 3 ($R_H=560 \text{ Ом}$, $C_H=360\text{пФ}$);
- в) ПЗ в положении 3, П4 в положении 4 ($R_H=2 \text{ кОм}$, $C_H=1000\text{пФ}$).

3. Определить входное сопротивление эмиттерного повторителя при различных значениях R_H .

4. Определить коэффициент усиления первого каскада на транзисторе VT1 в области средних частот для случаев:

- а) второй каскад – эмиттерный повторитель (П2-1, П4-2),
- б) второй каскад аналогичен первому (П2-2, П4-1).

При выполнении п.4 установить П1 в положение 1, П3 в положение 2 (входные клеммы Г2-Г3, выходные Г5-Г9).

Список рекомендуемой литературы

1. В о й ш в и л л о Г.В. Усилительные устройства. М.:Связь, 1975. С. 84-92, 137-153.
2. Ц ы к и н Г.С. Усилительные устройства. М.:Связь, 1971. С. 110-113, 239-245, 248-252.
3. О с т а п е н к о Г.С. Усилительные устройства. М.:Радио и связь, 1989. С. 1-48, 180-187.

Контрольные вопросы

1. Изобразите принципиальную схему эмиттерного повторителя и объясните назначение элементов.
2. Как обеспечивается температурная стабилизация рабочей точки в эмиттерном повторителе?
3. Нелинейные искажения в эмиттерном повторителе, их зависимость от амплитуды входного сигнала.
4. Поясните зависимость входного сопротивления транзистора в схеме ОК от сопротивления нагрузки R_H .
5. Поясните зависимость выходного сопротивления транзистора в схеме ОК от сопротивления источника сигнала R_t .
6. Каков характер зависимости входного и выходного сопротивлений схемы ОК от частоты?
7. Характер зависимости коэффициента передачи схемы ОК от частоты.
8. Каковы основные особенности каскада ОК?
9. Сравните основные параметры резисторного каскада ОЭ и эмиттерного повторителя (ОК).
10. Какой вид обратной связи действует в схеме ОК?
11. Как влияет обратная связь на свойства усилителя?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ С РЕОСТАТНО-ЕМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ

Ц е л ь р а б о т ы - изучение влияния элементов схемы на частотную характеристику усилителя, приобретение навыков расчета элементов усилителя по заданным частотным искажениям.

Пояснения к работе

Эта работа выполняется на лабораторном макете № 2, схема которого приведена на рис.7.

Переключатель П1 предназначен для исследования влияния емкости в цепи эмиттера на АЧХ усилителя в области низких частот. Переключатель П2 позволяет исследовать влияние коллекторной нагрузки на коэффициент усиления и частотную характеристику. Переключатель П3 позволяет отключить первый каскад от второго, а также исследовать влияние на АЧХ емкости разделительного конденсатора в области низких частот.

Исследуемый усилитель представляет собой двухкаскадный транзисторный усилитель с реостатно-емкостной связью. Подобные схемы широко применяются в усилителях напряжения низкой частоты, а при использовании высокочастотных транзисторов могут быть применены и в широкополосных усилителях.

Существующие методы анализа транзисторных усилительных каскадов базируются на замене активного элемента эквивалентным четырехполосником, параметры которого определяются через параметры физической эквивалентной схемы, а в области низких частот находятся по справочнику.

Наличие реактивных элементов в схеме вызывает спад АЧХ в области нижних и верхних частот. Так, входная емкость следующего каскада $C_{вх.сл}$ (рис.8) вызывает спад АЧХ в области верхних частот, а емкости разделительного C_p и эмиттерного $C_э$ конденсаторов - в области нижних частот.

Коэффициент усиления K_0 усилительного каскада в области средних частот

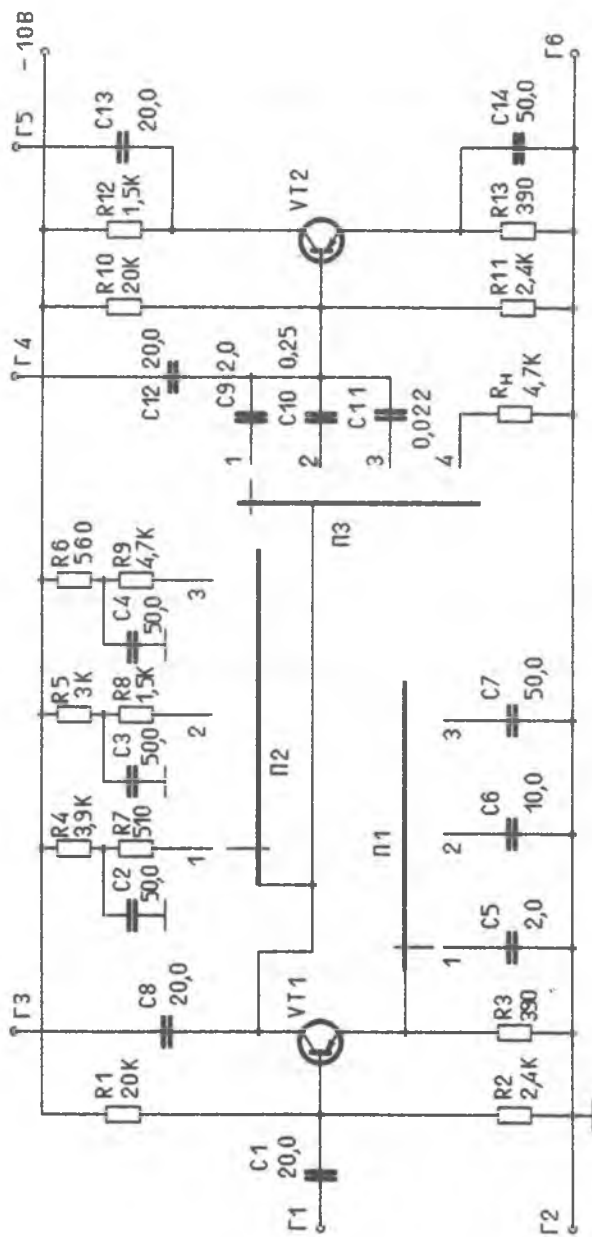


Рис.7. Принципиальная схема лабораторного макета №2

$$K_0 = SR_H,$$

где $S = \frac{h_{21}}{h_{11} + R_t}$ - крутизна коллекторного тока;

$R_t = R_r \parallel R_{\sigma 1} \parallel R_{\sigma 2}$ - сопротивление эквивалентного источника сигнала;

$R_H = R_k \parallel R_{вх.сл}$ - сопротивление нагрузки каскада.

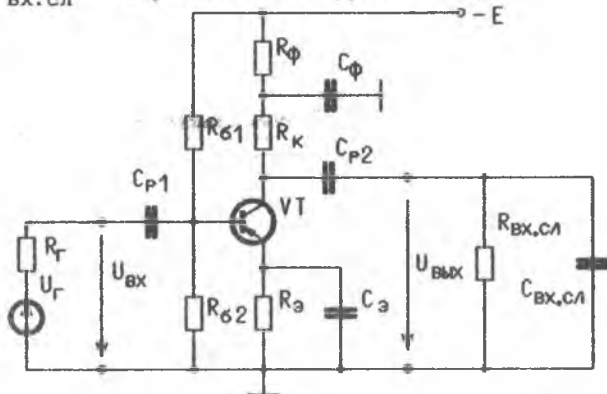


Рис. 8. Схема каскада с реостатно-емкостной связью

Частотные искажения, вносимые разделительным конденсатором на частоте f_H , рассчитывают по формуле

$$M_{нр} = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega_H^2 \tau_p^2}}, \quad \text{где } \omega_H = 2\pi f_H.$$

При расчете искажений, вносимых емкостью C_{p1} , принимают $\tau_p = \tau_{p1} = (R_r + R_{вх1})C_{p1}$, где $R_{вх1} = R_{\sigma 1} \parallel R_{\sigma 2} \parallel h_{11}$.

Для емкости C_{p2} $\tau_p = \tau_{p2} = (R_k + R_{вх.сл})C_{p2}$.

Частотные искажения, вносимые емкостью $C_э$ на частоте f_H ,

$$M_{нэ} = \sqrt{\frac{F^2 + \omega_H^2 \tau_э^2}{1 + \omega_H^2 \tau_H^2}}, \quad \text{где } F = 1 + SR_H - \text{глубина ООС, } \tau_э = R_э C_э.$$

Цепь $R_ф C_ф$ обеспечивает подъем АЧХ в области нижних частот. Искажения, вносимые этой цепью на частоте f_H ,

$$M_{нФ} = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \omega_H^2 \tau_{Ф}^2}{1 + \omega_H^2 \tau_{Ф}^2}}$$

$$\text{где } \alpha = \frac{R_k R_{Ф}}{R_k + R_{Ф}} \cdot \frac{R_{Ф} + R_k + R_{\text{вх.сл}}}{R_{Ф}(R_k + R_{\text{вх.сл}})}, \quad \tau_{Ф} = \frac{R_k R_{Ф}}{R_k + R_{Ф}} C_{Ф}$$

Суммарные искажения на частоте f_H

$$M_H = M_{нр1} + M_{нр2} + M_{нз} + M_{нФ}$$

Коэффициент частотных искажений на верхней рабочей частоте f_B определяется по формуле

$$M_B = \sqrt{1 + \omega_B^2 \tau_H^2}$$

где $\tau_H = R_H C_H$ - постоянная времени цепи нагрузки,

$C_H = C_{\text{вх.сл}} + C_{\text{вых.т}}$ - полная емкость нагрузки,

$C_{\text{вых.т}}$ - выходная емкость транзистора VT (обычно $C_{\text{вых.т}} \ll C_{\text{вх.сл}}$).

В исследуемом макете №2 (см. рис. 7) при расчете первого каскада на транзисторе VT1 следует принять

$R_{нк} = R_{10} \parallel R_{11} \parallel h_{11}$, где $R_k = R_7, R_8, R_9$; h_{11} - параметр VT2,

$C_{\text{вх.сл}} = C_0 = C_{\text{бэ2}} + (1 + S_2 R_{12}) C_{к2}$,

где $S_2 = h_{21} / h_{11}$ - крутизна коллекторного тока VT2;

$C_{\text{бэ2}} = \frac{S_2}{2\pi f_T}$ - емкость перехода "база-эмиттер" VT2;

$C_{к2}$ - емкость коллекторного перехода VT2.

Расчетное задание

1. Рассчитать коэффициент усиления первого каскада и всего усилителя в области средних частот для одного из положений переключателя П2.

2. Рассчитать искажения АЧХ для частот сигнала 200 и 500 Гц в области нижних частот и для частот сигнала 100 и 200 кГц в области верхних частот.

Следующие параметры транзисторов VT1 и VT2 принять $h_{11} = 600 \text{ Ом}$, $h_{21} = 80$, $C_k = 30 \text{ пФ}$, $f_T = 1 \text{ МГц}$, $R_T = 300 \text{ Ом}$. Остальные параметры взять из схемы на рис. 7.

Содержание экспериментальной части работы

1. Снять амплитудную характеристику первого каскада для трех положений переключателя П2 (П1 в положении 3, П3 в положении 1) и определить коэффициенты усиления в линейном режиме. Входные клеммы Г1-Г2, выходные - Г4-Г6.

2. Для П1 и П2 в положении 3 определить на средней частоте:

а) коэффициент усиления первого K_1 и второго K_2 каскадов, для чего разделить каскады, переведя П3 в положение 4. При измерении коэффициента усиления первого каскада входные клеммы Г1-Г2, выходные Г3-Г6. Для второго каскада входные клеммы Г4-Г2, выходные - Г5-Г6.

б) коэффициент усиления K всего усилителя, для чего соединить каскады, переведя П3 в положение 1. Входные клеммы Г1-Г2, выходные - Г5-Г6. Сравнить K с произведением $K_1 K_2$, сделать выводы.

3. Исследовать зависимость АЧХ первого каскада с подсоединенным вторым каскадом в области нижних частот от величины емкости разделительного конденсатора (для трех положений П3, П1 в положении 3, П2 в положении 2, вход Г1-Г2, выход Г4-Г6).

4. Исследовать зависимость АЧХ первого каскада в области нижних частот от величины емкости в цепи эмиттера (для трех положений П1, П3 в положении 1).

5. Исследовать АЧХ первого каскада в области верхних частот в зависимости от сопротивления нагрузки (для трех положений П2, П1 в положении 3, П3 в положении 1), определить коэффициент усиления K_0 на средней частоте, верхнюю частоту $f_{\text{в}}$ по уровню $0,707K_0$ и площадь усиления $Q=f_{\text{в}}K_0$ для каждой зависимости.

Список рекомендуемой литературы

1. В о й ш в и л л о Г.В. Усилительные устройства. М.:Связь, 1975. С. 137-153, 162-192.
2. Ц ы к и н Г.С. Усилительные устройства. М.:Связь, 1971. С. 48-77, 78-102, 163-183, 283-290, 330-346.
3. О с т а п е н к о Г.С. Усилительные устройства. М.:Радио и связь, 1989. С. 108-132, 222-230.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы и назначение элементов схемы каскадов предварительного усиления.
2. Как влияет на частотную характеристику каскада емкость нагрузки и разделительного конденсатора?
3. Нарисуйте эквивалентную схему каскада для области нижних частот и объясните принцип формирования частотной характеристики.
4. Нарисуйте эквивалентную схему каскада для области верхних и средних частот и поясните принцип формирования частотной характеристики.
5. Входное сопротивление усилительного каскада, методика его расчета и экспериментального определения.
6. Почему в схемах каскадов предварительного усиления транзистор включают преимущественно по схеме с ОЭ?
7. Что является причиной температурной нестабильности каскада и как ее можно уменьшить?
8. Чем следует руководствоваться при выборе рабочей точки в транзисторных каскадах предварительного усиления?
9. Поясните влияние емкости эмиттерного конденсатора на частотную характеристику в области нижних частот.
10. Какие факторы влияют на амплитудную характеристику усилителя?
11. Чем определяется вид частотной характеристики усилителя в области высоких частот?
12. Почему отличается коэффициент усиления обособленного каскада от коэффициента усиления того же каскада, включенного в многокаскадный усилитель?
13. Что называют площадью усиления каскада и от чего она зависит?
14. Как и почему нужно изменить сопротивления R_k , $R_{б1}$ и $R_{б2}$, чтобы уменьшить частотные искажения в области верхних частот?
15. В какую сторону нужно изменить входное сопротивление следующего каскада, чтобы снизить частотные искажения в области нижних частот?

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Ц е л ь р а б о т ы - приобретение навыков расчета усилительных каскадов с обратной связью (ОС), экспериментальное исследование влияния отрицательной обратной связи (ООС) на параметры и характеристики усилителя.

Общие сведения

Обратной связью называют связь, за счет которой происходит передача сигнала из выходной цепи во входную цепь усилителя. В усилительной технике в основном применяют ООС, которая позволяет улучшить эксплуатационные показатели усилителя - уменьшает нелинейные, частотные и фазовые искажения, стабилизирует все характеристики усилителя, но одновременно уменьшает коэффициент усиления. При ООС гармонические составляющие источника сигнала и сигнала обратной связи находятся в противофазе. Качественные изменения основных характеристик усилителя зависят от глубины ООС F и могут быть оценены с помощью выражений:

коэффициент гармоник $k_{гОС} = k_{г}/F$;

коэффициент частотных искажений $M_{ОС} = 1 + (M - 1)/F$;

угол фазового сдвига $\varphi_{ОС} = \varphi/F$.

При анализе влияния ОС считают, что усилитель работает в линейном режиме, при этом его можно рассматривать как линейный активный четырехполюсник. Для анализа усилителей с ОС применяют 4 системы параметров: Y , Z , H , K . В зависимости от того, в каких соотношениях находятся сопротивления источника сигнала и нагрузки с входным и выходным сопротивлениями усилителя и каков способ снятия и введения сигнала ОС, различают 4 типа ОС: Y , Z , H , K . Сигнал обратной связи с выхода усилителя может быть снят двумя способами - по току или по напряжению, он может вводиться во входную цепь также двумя способами - последовательно или параллельно. Параметры усилителя с ОС зависят от способа снятия и введения сигнала обратной связи. Кроме того, ОС может быть комбинированной,

т.е. включающей в себя несколько типов ОС одновременно. В лабораторной работе исследуются три вида ОС: Y, Z и комбинированная.

Обратная связь типа Z (последовательная ООС по току)

Схема каскада с ООС типа Z приведена на рис.9. Обратная связь типа Z увеличивает входное и выходное сопротивления усилителя, поэтому ее целесообразно применять при малых сопротивлениях источника сигнала и нагрузки, иначе эффективность ее падает.

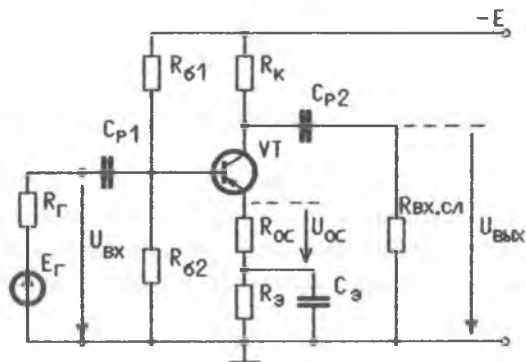


Рис.9. Схема каскада с последовательной ООС по току

Коэффициент усиления по напряжению схемы с ООС типа Z вычисляют по формуле

$$K_{OC} = K/F,$$

где $K = SR_H$ - коэффициент усиления усилителя без ООС (при $R_{OC} = 0$);

$F = 1 + SR_H$ - глубина ООС;

$R_H = R_K \parallel R_{Вх.сл}$ - сопротивление нагрузки каскада;

$S = h_{21} / (h_{11} + R_t)$ - крутизна коллекторного тока;

$R_t = R_\Gamma \parallel R_{Б1} \parallel R_{Б2}$ - сопротивление эквивалентного источника сигнала.

При большой глубине ОС, т.е. при $SR_H \gg 1$, можно использовать приближенную формулу $K_{OC} = R_H / R_{OC}$. Эту формулу обычно применяют для оперативной оценки величины коэффициента усиления каскада с ООС типа Z.

Входное сопротивление рассчитывают по формуле $R_{\text{вх.ос}} = h_{11} F_{\text{кв1}}$ либо по эквивалентной формуле $R_{\text{вх.ос}} = h_{11} + (1 + h_{21}) R_{\text{ос}}$, где $F_{\text{кв1}}$ - глубина ООС при коротком замыкании на входе, т.е. при $R_1 = 0$.

При большой глубине ООС и для оперативной оценки величины входного сопротивления можно использовать приближенную формулу

$$R_{\text{вх.ос}} \approx h_{21} R_{\text{ос}}$$

Выходное сопротивление каскада с ООС типа Z равно $R_{\text{вых.ос}} = F/h_{22}$.

Обратная связь типа Y (параллельная ООС по напряжению)

Схема каскада с ООС типа Y приведена на рис.10. Обратная связь типа Y уменьшает входное и выходное сопротивления усилителя, поэтому ее целесообразно применять при больших сопротивлениях источника сигнала и нагрузки, иначе эффективность ее падает.

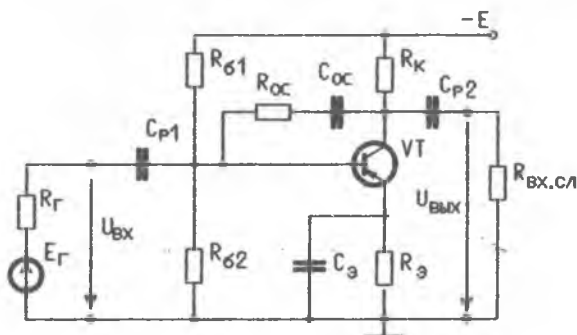


Рис.10. Схема каскада с параллельной ООС по напряжению

Коэффициент усиления по напряжению схемы с ООС типа Z вычисляют по формуле

$$K_{\text{ос}} = K/F,$$

где $K = SR_{\text{н}}$ - коэффициент усиления каскада без ООС,

$$F = 1 + \frac{R_1}{R_{\text{ос}}} K - \text{глубина ООС типа Y;}$$

$S = \frac{h_{21}}{h_{11} + R_t}$ - крутизна коллекторного тока;

$$R_H = R_K \parallel R_{\text{вх.сл}} , \quad R_t = R_r \parallel R_{\sigma 1} \parallel R_{\sigma 2} .$$

При большой глубине ОС, т.е. при $F \gg 1$, можно использовать приближенную формулу $K_{\text{ос}} = R_{\text{ос}} / R_t$. Эту формулу обычно применяют для оперативной оценки величины коэффициента усиления каскада с ОС типа Y.

Входное сопротивление каскада с ОС без учета базового делителя равно

$$R_{\text{вх.ос}} = h_{11} / F_{\text{хх1}} ,$$

где $F_{\text{хх1}} = 1 + (1 + h_{21}) \frac{R_H}{R_{\text{ос}}}$ - глубина ОС при холостом ходе на входе, т.е. при $R_t \gg h_{11}$.

Так как $F_{\text{хх1}} > 1$, то $R_{\text{вх.ос}} < h_{11}$, при этом входное сопротивление уменьшается с увеличением R_H и с уменьшением $R_{\text{ос}}$. При $F_{\text{хх1}} \gg 1$ или для оперативной оценки величины входного сопротивления можно использовать упрощенную формулу

$$R_{\text{вх.ос}} = \frac{R_{\text{ос}}}{K_U} , \quad \text{где } K_U = h_{21} \frac{R_H}{h_{11}} - \text{коэффициент усиления по напряжению каскада без ОС.}$$

Выходное сопротивление каскада с ОС типа Y рассчитывают по формуле $R_{\text{вых.ос}} = R_K / F_{\text{хх2}}$, где $F_{\text{хх2}}$ - глубина ОС при холостом ходе на выходе, т.е. при $R_{\text{вх.сл}} \gg R_K$,

$$F_{\text{хх2}} = 1 + \frac{R_t}{R_{\text{ос}}} \cdot \frac{h_{11}}{R_t + h_{11}} S R_K .$$

Выходное сопротивление каскада без обратной связи примерно равно значению R_K . Так как $F_{\text{хх2}} > 1$, то с введением ОС типа Y выходное сопротивление уменьшается.

Комбинированная ОС по току (Z) и напряжению (Y)

Схема с комбинированной ОС приведена на рис.11. Она также уменьшает коэффициент усиления каскада в число раз, равное глубине ОС. Остальные характеристики и параметры схемы ОС зависят от

того, ООС какого типа сильнее (глубже).

Точные расчетные соотношения для комбинированной ООС достаточно сложны и здесь не приводятся. Приблизительно глубину ООС можно определить по формуле

$$F = F_T F_H,$$

где F_T - глубина ООС типа Z, рассчитанная в предположении, что цепь ООС типа Y разомкнута;

F_H - глубина ООС типа Y, при расчете которой вместо параметра h_{11} подставляют значение $R_{вх.ос}$, полученное при расчете ООС типа Z.

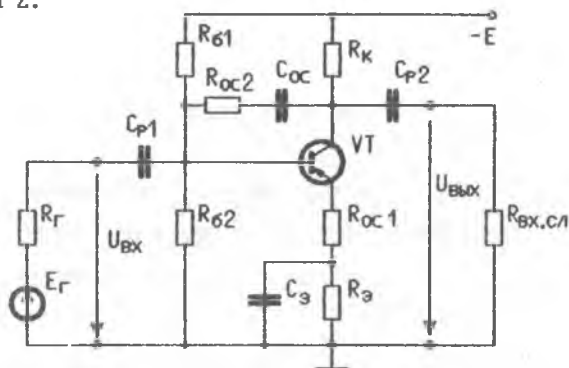


Рис.11. Схема каскада с комбинированной ООС

При расчете входного и выходного сопротивления используется аналогичный прием. Для расчета входного сопротивления можно воспользоваться также приближенной формулой

$$R_{вх.ос} = \frac{h_{11} + R_{ос1}(1 + h_{21})}{1 + \frac{h_{21} \cdot R_H}{R_H + R_{ос2}}}$$

Пояснения к работе

Исследуемую схему собирают на первом каскаде лабораторного макета № 1. Переключатель П1 устанавливают в положение 2, разъединяя каскады.

Схема с ООС типа Z (последовательной ООС по току) получается при удалении перемычек А1-А2 и Б1-Б2.

Для введения ООС типа Y (параллельной ООС по напряжению) обе перемычки А1-А2 и Б1-Б2 вставляются в схему в свои гнезда.

Для введения комбинированной ООС перемычку Б1-Б2 следует удалить, а перемычку А1-А2 вставить.

Для получения схемы без ООС необходимо перемычку А1-А2 удалить, а перемычку Б1-Б2 вставить.

Входными клеммами служат гнезда Г2 и Г3, а выходными - Г6-Г9. Сопротивление $R_{ш}=4,7$ кОм служит нагрузкой каскада и используется для определения выходного сопротивления. Через клемму Г1 входной сигнал подается при измерении входного сопротивления методом добавочного сопротивления.

Расчетное задание

Для заданного типа ООС рассчитать входное и выходное сопротивления, глубину ООС и коэффициент усиления. В расчетах принять $h_{11}=600$ Ом, $h_{21}=80$, $R_r=300$ Ом.

Содержание экспериментальной части работы

1. Собрать схему усилительного каскада без обратной связи и выполнить следующие эксперименты:

а) снять амплитудную характеристику и измерить коэффициент усиления на средней частоте,

б) снять АЧХ исследуемого каскада,

в) измерить входное и выходное сопротивления каскада.

2. Собрать схему усилительного каскада с заданным типом ООС и выполнить эксперименты в объеме п.1.

Сравнить результаты исследований каскада без ООС и с ООС. Определить уровень снижения частотных искажений в области нижних и верхних частот при введении ООС.

Список рекомендуемой литературы

1. В о й ш в и л л о Г.В. Усилительные устройства. М.:Связь, 1975. С. 47-68, 302-310.

2. Ц ы к и н Г.С. Усилительные устройства. М.:Связь, 1971. С. 30-47, 310-318.

3. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. М.: Радио и связь, 1989. С. 49–107.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение обратной связи.
2. Объясните, для чего применяют ООС в усилителях?
3. Как влияет ООС на частотную, фазовую и переходную характеристики усилителя?
4. Назовите способы снятия сигнала обратной связи.
5. Назовите способы введения сигнала ООС.
6. Как влияет ООС различных типов на входное и выходное сопротивление усилителя?
7. Как влияет ООС на коэффициент усиления?
8. Как и почему изменяется коэффициент нелинейных искажений и каково влияние уровня внутренних помех усилителя при введении ООС?
9. Как влияет ООС на стабильность коэффициента усиления?
10. Дайте сравнительную характеристику параллельной и последовательной ООС.
11. Дайте сравнительную характеристику ООС по току и напряжению.
12. Когда целесообразно применять тот или иной тип ООС и почему?

Контролируемая самостоятельная работа студентов (КСРС)

КСРС включает в себя выполнение трех расчетных заданий:

1. Расчет параметров моделей биполярного транзистора и диода.
2. Расчет параметров и характеристик каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме "общий эмиттер" (ОЭ).
3. Построение логарифмических частотных характеристик по сложной передаточной функции.

Все три задания являются связанными, поэтому приступать к выполнению последующего задания можно только при условии получения правильных результатов расчета предыдущего задания.

Каждый студент получает сквозное индивидуальное задание на все занятия. Результаты выполнения каждого задания контролируются преподавателем.

Ц е л ь К С Р С – ознакомление с принципами построения моделей активных элементов в программе PSpice, приобретение навыков расчета режима работы и коэффициента усиления однокаскадного усилителя, освоение методики построения логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ).

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА И ДИОДА

Данная методика позволяет произвести расчет параметров моделей по справочным данным при различных комбинациях исходных данных и используется в дальнейшем в процессе выполнения курсового проекта при моделировании спроектированного аналогового устройства на ЭЕМ.

Расчет параметров модели биполярного транзистора

В первом задании рассчитываются параметры модели Эберса-Молла для биполярного транзистора. Из справочников для расчета параметров модели могут быть использованы следующие данные:

τ_{oc} - постоянная времени коллекторной цепи,

$C_k(U_{кб})$ - емкость коллектора при заданном напряжении,

$I_{\sigma} = f(U_{\sigma\delta})$ - входная характеристика транзистора или точка

$I_{\sigma.t}, U_{\sigma\delta.t}$ на входной характеристике,

$h_{21min} \dots h_{21max}$ - разброс коэффициента усиления по току,

$I_{\sigma.обр}(U_{\sigma.обр})$ - обратный ток эмиттерного перехода при заданном напряжении на переходе "эмиттер-база",

$I_{к.обр}(U_{к.обр})$ - обратный ток коллекторного перехода при заданном напряжении на переходе "коллектор-база",

$f_{гр}$ - граничная частота усиления в схеме ОЭ,

$U_{к\delta.нас}(I_{к.нас})$ - напряжение на переходе "коллектор-эмиттер" в режиме насыщения при заданном токе коллектора,

$U_{\sigma\delta.нас}(I_{к.нас})$ - напряжение на переходе "эмиттер-база" в режиме насыщения при заданном токе коллектора,

$U_{к\delta.пред}$ - предельное напряжение между коллектором и эмиттером,

$I_{к\delta.пред}$ - предельный ток коллектора в непрерывном режиме,

$h_{21f}(f_{в})$ - коэффициент усиления тока на частоте f ,

$I_{к} = f(U_{к\delta}, I_{\sigma})$ - выходные характеристики транзистора или токи

$I_{к1}(U_{к\delta1})$ и $I_{к2}(U_{к\delta2})$ при $I_{\sigma} = \text{const}$ (в заданиях

$U_{к\delta1} = 0, U_{к\delta2} = U_{к\delta.пред}$).

Используя заданную комбинацию из перечисленных справочных данных по методике, приведенной ниже, производится расчет следующих параметров модели:

RB, IS, NF, BF, BR, VAF, TF, CJC,

где RB - сопротивление тела базы (r_{σ}),

IS - ток насыщения эмиттерного перехода (I_{σ}),

NF - коэффициент неидеальности эмиттерного перехода (n_f),

BF - коэффициент усиления тока в схеме "общий эмиттер" (ОЭ) при нормальном включении (h_{21}),

BR - коэффициент усиления тока в схеме ОЭ при инверсном включении (h_{21i}),

VAE - напряжение Эрли при нормальном включении (U_{af}),

TF - постоянная времени эмиттерного перехода при нормальном включении транзистора ($\tau_{э}$),

CJC- барьерная емкость коллекторного перехода при нулевом смещении ($C_{к0}$).

Порядок расчета

1. $r_{э} = \tau_{ос} / C_{к}$. Если постоянная времени $\tau_{ос}$ не задана, то принимают $r_{э} = 0,1 h_{21} / I_{к.пред}$.

$$2. h_{21} = \sqrt{h_{21min} \cdot h_{21max}}$$

3. По входной характеристике $I_{б} = f(U_{бэ})$ в заданной точке $I_{б.т}$, $U_{бэ.т}$ определяют параметр $h_{11} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_{б}$. Если точка не задана, то ее выбирают на входной характеристике в рабочей области. При отсутствии входной характеристики ток в точке принимают равным $I_{б.т} = I_{к.нас} / h_{21}$ или $I_{б.т} = 0,25 I_{к.пред} / h_{21}$, а напряжение $U_{бэ.т} = U_{бэ.нас}$ либо $U_{бэ.т} = U_{кэ.нас}$, либо $U_{бэ.т} = (1...6) h_{11} I_{б.т}$. Если параметр h_{11} неизвестен, то выбирают

$$h_{11} = r_{э} + \frac{(0,026...0,2)}{I_{б.т}}$$

4. Вычисляют параметр $n_f = \pi \phi_T / 0,026$, где $\pi \phi_T = (h_{11} - r_{э}) I_{б.т}$ - температурный потенциал перехода.

5. Определяют ток насыщения

$$I_s = \frac{(1 + h_{21}) I_{б.т}}{\exp \left[\frac{U_{бэ.т} - r_{э} I_{б.т}}{\pi \phi_T} \right] - 1}$$

6. Вычисляют напряжение Эрли в нормальном режиме

$$U_{af} = (1 + h_{21}) I_{\sigma} \tau h_{22}$$

Если параметр h_{22} неизвестен, то принимают

$$U_{af} = U_{кэ.пред} / \xi, \text{ где } \xi = 0,01 \dots 0,25.$$

7. При $I_{\sigma} > I_{к.обp} > I_{\sigma} / h_{21}$ параметр h_{21t} рассчитывают по формуле

$$h_{21t} = \frac{h_{21} I_{\sigma}}{I_{к.обp} h_{21} - I_{\sigma}}$$

В остальных случаях принимают $h_{21t} = 1$. Если ток $I_{к.обp}$ не задан, то принимают $I_{к.обp} = I_{\sigma.обp} / 3$.

8. Рассчитывают высокочастотные параметры модели:

$C_{к0} = C_{к} \sqrt{1 + U_{кб}}$ - емкость коллекторного перехода при нулевом смещении,

$\tau_{\sigma} = 1 / (2\pi f_{гр})$ - постоянная времени в нормальном включении.

Если частота $f_{гр}$ не задана, то принимают $f_{гр} = h_{21f} \cdot f_{в}$.

9. Остальные параметры модели принимаются по умолчанию.

Построение характеристик

1. Входная характеристика $I_{\sigma} = f(U_{бэ})$ рассчитывается для $U_{бэ}$ в пределах $I_{\sigma} = 0 \dots I_{к.пред} / h_{21}$ по формуле

$$U_{бэ} = r_{\sigma} I_{\sigma} + \pi \tau \cdot \ln \left[\frac{(1 + h_{21}) I_{\sigma}}{I_{\sigma}} + 1 \right]$$

2. Выходные характеристики $I_{к} = f(U_{кэ}, I_{\sigma})$ строятся по формуле

$$I_{к} = I_{кн} \left(1 + U_{кэ} / U_{af} \right), \text{ где } I_{кн} = h_{21} \cdot I_{\sigma}$$

Каждая характеристика строится по двум точкам при $U_{кэ} = 0$ и

$U_{кэ} = U_{кэ.пред}$ для токов базы $I_{\sigma} = 0, i, 2i, 3i, 4i, 5i$, где

$$i = 0,2 \cdot (I_{кэ.пред} / h_{21})$$

Расчет параметров модели диода

Исходные данные из справочника:

$I_d = f(U_d)$ - вольт-амперная характеристика диода или точка

$I_{д.т}, U_{д.т}$ на этой характеристике.

$I_{д.обр}(U_{д.обр})$ - обратный ток диода при заданном напряжении,

f_{max} - максимальная рабочая частота,

$C_d(U_{д.обр.с})$ - барьерная емкость при заданном напряжении,

t_B - время восстановления сопротивления,

$U_{д.пр}$ - постоянное предельное прямое напряжение,

$I_{д.пр}$ - предельный выпрямленный ток.

В процессе расчета вычисляются следующие параметры модели диода: I_S - ток насыщения (I_S), R_S - объемное сопротивление (R_S), N - коэффициент неидеальности перехода (n), τ_T - среднее время жизни дырок (τ_0), C_{J0} - барьерная емкость перехода при нулевом смещении (C_0).

Порядок расчета

1. Рассчитывают объемное сопротивление $R_S = kU_{д.т} / I_{д.т}$, где $k = 0,03 \dots 0,8$ (чем меньше k , тем резче переход). Если точка $U_{д.т}, I_{д.т}$ не задана в исходных данных, то ее определяют по вольт-амперной характеристике в рабочей области. Если вольт-амперная характеристика не задана, то принимают $I_{д.т} = I_{д.пр}$, $U_{д.т} = U_{д.пр}$.

2. Принимают $I_S = I_{д.обр}$, $n = m\phi_T$, где $m\phi_T = \frac{U_{д.т} - R_S I_{д.т}}{\ln(1 + I_{д.т} / I_S)}$.

3. Рассчитывают $\tau_0 = 1 / (2\pi f_{max})$ или принимают $\tau_0 = t_B$. При отсутствии данных считают $\tau_0 = 0$.

4. $C_0 = C_d \cdot \sqrt{1 + U_{д.обр.с}}$. Если параметр C_d не задан, то $C_0 = 0$.

5. Остальные параметры модели диода принимают значения по умолчанию.

Построение характеристики

Характеристику $I_{\text{д}} = f(U_{\text{д}})$ при $U_{\text{д}} > 0$ рассчитывают по формуле

$$U_{\text{д}} = R_{\text{с}} I_{\text{д}} + m\phi_{\text{т}} \cdot \ln \left(\frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{с}}} + 1 \right) \quad \text{в пределах } I_{\text{д}} = 0 \dots I_{\text{дпр}}.$$

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ, ВКЛЮЧЕННОМ ПО СХЕМЕ ОЭ

Расчетное задание состоит из четырех пунктов:

1. Расчет упрощенной схемы.
2. Расчет каскада с базовым делителем.
3. Расчет каскада с обратной связью.
4. Тепловой расчет транзистора.

В процессе расчета усилительных каскадов используются параметры $m\phi_{\text{т}}$, $r_{\text{б}}$, $I_{\text{с}}$, h_{21} транзистора, определенные при выполнении первого задания.

Расчет напряжения $U_{\text{бэп}}$ для заданного значения тока базы $I_{\text{бп}}$ в режиме покоя производится по формуле

$$U_{\text{бэп}} = r_{\text{б}} I_{\text{бп}} + m\phi_{\text{т}} \cdot \ln \left[\frac{(1 + h_{21}) I_{\text{бп}}}{I_{\text{с}}} + 1 \right]. \quad (1)$$

1. Расчет упрощенной схемы

Расчетная схема усилительного каскада приведена на рис.12.

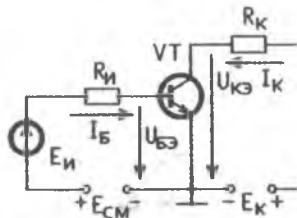


Рис.12. Упрощенная схема каскада

В процессе выполнения задания необходимо рассчитать режим работы транзистора $I_{кп}$, $I_{кэп}$, $I_{бп}$, $U_{бэп}$ из условия получения максимальной амплитуды сигнала, определить требуемое напряжение смещения $E_{см}$, коэффициент усиления K в режиме малого сигнала, входное сопротивление транзистора h_{11} и максимальные амплитуды тока $I_{км}$ и напряжения $U_{кэп}$ неискаженного сигнала.

Исходными данными для расчета являются напряжение питания E_k , сопротивление источника сигнала $R_{и}$, сопротивление нагрузки в коллекторной цепи R_k .

Порядок расчета

1. Определяется ток $I_{кп}$ из условия получения максимальной амплитуды выходного сигнала. Используя уравнение нагрузочной линии по постоянной составляющей $I_k = \frac{E_k - U_{кэ}}{R_k}$, определяют максимальный ток $I'_k = E_k / R_k$, соответствующий $U_{кэ} = 0$.

Ток коллектора покоя с учетом запаса на температурные изменения принимается равным
$$I_{кп} = 0,8 \left[\frac{I'_k}{2} \right].$$

Остальные параметры режима равны $U_{кэп} = E_k - R_k I_{кп}$, $I_{бп} = I_{кп} / h_{21}$, а напряжение $U_{бэп}$ рассчитывается по формуле (1).

2. Определяют максимальные амплитуды тока коллектора $I_{км} = I_{кп} - I_{кмин}$ и напряжения на коллекторе $U_{кэп} = E_k - R_k I_{км}$, где $I_{кмин} = 0,1 \dots 3$ мА в зависимости от мощности транзистора.

3. Требуемое напряжение смещения равно $E_{см} = I_{бп} R_{и} + U_{бэп}$.

4. Входное сопротивление транзистора h_{11} вычисляется по формуле $h_{11} = r_{б} + (1 + h_{21}) r_{э}$, где $r_{э} = m \varphi_T / I_{кп}$.

5. Коэффициент усиления по напряжению
$$K = \frac{U_{вых}}{E_{и}}$$
, где $U_{вых}$ — переменная составляющая напряжения на коллекторе.

При подаче сигнала напряжения и токи в транзисторе будут иметь значения $U_k = U_{кп} + u_{вых}$, $I_k = I_{кп} + i_k$, $I_б = I_{бп} + i_б$, $U_{бэ} = U_{бэп} + u_{бэ}$, где $U_{бэп}$, $U_{кп}$, $I_{кп}$, $I_{бп}$ - напряжения и токи в режиме покоя, $u_{вых}$, i_k , $i_б$, $u_{бэ}$ - переменные составляющие напряжений и токов.

Тогда $E_{и} = u_{бэ} + R_{и} i_б$. Т.к. $U_k = E_k - I_k R_k$, то после подстановки I_k получаем $U_{кп} = E_k - I_{кп} R_k$, $u_{вых} = -i_k R_k$.

Учитывая, что $h_{21} = i_k / i_б$, $h_{11} = u_{бэ} / i_б$, после подстановки выражений для $u_{вых}$ и $E_{и}$ в формулу для K и деления числителя и знаменателя на ток $i_б$ получаем

$$K = -h_{21} \frac{R_k}{h_{11} + R_{и}}$$

2. Расчет каскада с базовым делителем

Схема каскада приведена на рис.13.

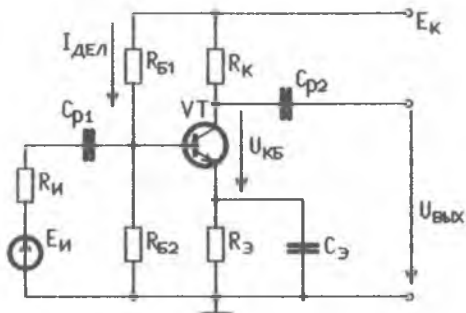


Рис.13. Схема каскада с базовым делителем

Необходимо выбрать и обеспечить режим работы транзистора ($I_{кп}$, $U_{кэп}$, $I_{бп}$, $U_{бэп}$) из условия получения максимальной амплитуды выходного сигнала, рассчитать сопротивление эмиттерной стабилизации рабочей точки $R_{э}$, сопротивления базового делителя

$R_{\sigma 1}, R_{\sigma 2}$, входное сопротивление транзистора h_{11} , сквозной коэффициент усиления K_C и коэффициент усиления по напряжению K_U .

Исходными данными для расчета являются значения E_K , $R_{\text{и}}$, R_K и параметры транзистора, рассчитанные в первом задании.

Порядок расчета

1. Рассчитывают значение $R_{\text{э}} = U_{\text{рз}} / I_{\text{кп}}$. Величину $U_{\text{рз}}$ выбирают из условия $U_{\text{рз}} = mE_K$, где $m=0,1-0,2$. Уравнение нагрузочной линии по постоянной составляющей имеет вид $I_K = \frac{E_K - U_{\text{кэ}}}{R_K + R_{\text{э}}}$. Максимальный ток, определенный по нагрузочной линии при $U_{\text{кэ}}=0$, равен

$$I_K' = \frac{E_K}{R_K + R_{\text{э}}}$$

Ток коллектора покоя с запасом на температурное смещение рабочей точки принимается равным $I_{\text{кп}} = 0,8 \frac{I_K'}{2} = 0,4I_K'$.

После подстановок получаем расчетную формулу для $R_{\text{э}}$:

$$R_{\text{э}} = \frac{2,5 m}{1 - 2,5 m} R_K$$

При выполнении расчетного задания принять $m=0,15$.

2. Режим работы $I_{\text{кп}} = 0,4I_K'$, где $I_K' = E_K / (R_K + R_{\text{э}})$, $I_{\text{бп}} = I_{\text{кп}} / h_{21}$, $U_{\text{кэп}} = E_K - (R_K + R_{\text{э}}) I_{\text{кп}}$, $U_{\text{бэп}}$ определяется по формуле (1).

3. Задаются током делителя $I_{\text{дел}} = 10I_{\text{бп}}$ и из уравнения $R_{\sigma 2} I_{\text{дел}} = U_{\text{бэп}} + I_{\text{эп}} R_{\text{э}}$ вычисляют

$$R_{\sigma 2} = \frac{U_{\text{бэп}} + I_{\text{эп}} R_{\text{э}}}{I_{\text{дел}}}, \quad R_{\sigma 1} = \frac{E_K}{I_{\text{дел}}} - R_{\sigma 2}$$

4. Амплитуды тока и напряжения $I_{\text{км}} = I_{\text{кп}} - I_{\text{км\text{ин}}}$, $U_{\text{кэм}} = I_{\text{км}} R_K$.

5. Сквозной коэффициент усиления $K_C = U_{\text{вых}} / E_{\text{и}}$.

После преобразования по переменной составляющей сопротивлений базового делителя $R_{\sigma 1}$, $R_{\sigma 2}$ и источника сигнала $E_{и}$ с внутренним сопротивлением $R_{и}$ в эквивалентный источник напряжения $E_{i} = E_{к} \frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma} + R_{и}}$ с внутренним сопротивлением $R_{i} = R_{\sigma} \parallel R_{и}$, где $R_{\sigma} = R_{\sigma 1} \parallel R_{\sigma 2}$, получаем эквивалентную схему каскада, полностью совпадающую со схемой, рассмотренной в разд. 2.

Представляя $K_{с}$ в виде $K_{с} = \frac{u_{\text{вых}}}{E_{и}} = \frac{u_{\text{вых}}}{E_{i}} \frac{E_{i}}{E_{и}}$ и учитывая,

что $h_{11} = r_{\sigma} + (1 + h_{21})r_{э}$, где $r_{э} = \pi \phi_{т} / I_{кп}$, можно сразу записать

$\frac{u_{\text{вых}}}{E_{i}} = -h_{21} \frac{R_{к}}{R_{i} + h_{11}}$. Учитывая, что $\frac{E_{i}}{E_{и}} = \frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma} + R_{и}}$, получаем

расчетное выражение $K_{с} = -h_{21} \frac{R_{к}}{R_{i} + h_{11}} \frac{R_{\sigma}}{R_{и} + R_{\sigma}}$.

Коэффициент усиления по напряжению K_{0} равен $K_{с}$ при $R_{и} = 0$, т.е.

$$K_{0} = -h_{21} \frac{R_{к}}{h_{11}}$$

3. Расчет каскада с обратной связью

Схема каскада с эмиттерной обратной связью приведена на рис. 14.

В этом пункте задания рассчитывают требуемое сопротивление $R_{э}^*$ в цепи стабилизации режима по постоянному току, входное сопротивление транзистора $R_{\text{вх.ос}}$, коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{ос0}}$ и сквозной коэффициент усиления каскада с обратной связью $K_{\text{сос}}$.

Исходными данными для расчета являются значения $E_{к}$, $R_{к}$, $R_{и}$, сопротивление обратной связи $R_{\text{эос}}$ в цепи эмиттера, а также рассчитанные в разд. 2 значения $R_{э}$, $R_{\sigma 1}$, $R_{\sigma 2}$, h_{11} , $I_{кп}$, параметры транзистора.

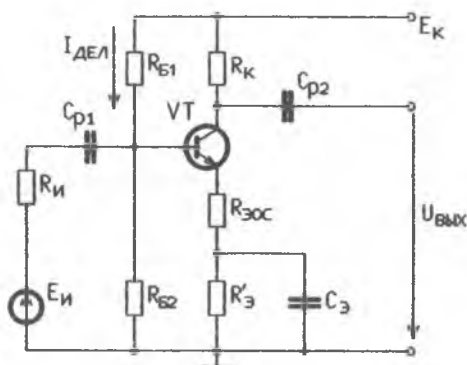


Рис. 14. Схема каскада с обратной связью

Порядок расчета

1. Для того, чтобы режим работы транзистора по постоянному току остался таким же, как в разд. 2, принимают $R_{\text{Э}}^* = R_{\text{Э}} - R_{\text{ЭОС}}$.

2. Рассчитывают входное сопротивление с обратной связью

$$R_{\text{вхОС}} = \frac{u_{\text{вх}}}{i_{\text{вх}}}, \text{ где } u_{\text{вх}}, i_{\text{вх}} - \text{переменные составляющие в цепи базы транзистора.}$$

Т.к. конденсатор $C_{\text{Э}}$ имеет большую емкость, то для переменной составляющей он представляет короткое замыкание. Поэтому входное напряжение $u_{\text{вх}} = u_{\text{БЭ}} + i_{\text{Э}} R_{\text{ЭОС}}$, где $i_{\text{Э}} = i_{\text{к}} + i_{\text{б}}$ - переменная составляющая тока эмиттера.

Учитывая, что $i_{\text{вх}} = i_{\text{б}}$, $u_{\text{БЭ}}/i_{\text{б}} = h_{11}$, $i_{\text{к}}/i_{\text{б}} = h_{21}$, получаем расчетную формулу для входного сопротивления каскада с обратной связью:

$$R_{\text{вхОС}} = h_{11} + (1 + h_{21}) R_{\text{ЭОС}}, \text{ где } h_{11} \text{ берется из разд. 2.}$$

3. Коэффициент усиления по напряжению равен $K_{\text{ОС0}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}}$, где $u_{\text{ВЫХ}}$ - напряжение переменной составляющей на коллекторе транзистора.

Полное напряжение на коллекторе $U_{\text{к}} = E_{\text{к}} - R_{\text{к}} I_{\text{к}}$. Учитывая, что $I_{\text{к}} = I_{\text{кп}} + i_{\text{к}}$, где $I_{\text{кп}}$ - ток коллектора покоя, $i_{\text{к}}$ - переменная составляющая тока коллектора, получаем $U_{\text{к}} = U_{\text{кп}} + u_{\text{ВЫХ}}$, где $U_{\text{кп}} = E_{\text{к}} - R_{\text{к}} I_{\text{кп}}$ - напряжение на коллекторе в точке покоя, $u_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{к}} i_{\text{к}}$.

Подставив выражение для $u_{\text{вых}}$ в формулу для $K_{\text{ос0}}$ и разделив числитель и знаменатель на i_{σ} , получаем расчетную формулу

$$K_{\text{ос0}} = -h_{21} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{вх.ос}}}, \text{ где } K_{\text{ос0}} - \text{коэффициент усиления по напряжению при } R_{\text{и}} = 0.$$

4. Сквозной коэффициент усиления $K_{\text{с.ос}}$ определяется с учетом внутреннего сопротивления источника сигнала:

$$K_{\text{с.ос}} = \frac{u_{\text{вых}}}{E_{\text{и}}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} \frac{u_{\text{вх}}}{E_{\text{и}}} = K_{\text{ос0}} K_{\text{вх.ц}},$$

где $K_{\text{вх.ц}} = u_{\text{вх}}/E_{\text{и}}$ - коэффициент передачи входной цепи.

Преобразуем входную цепь каскада в эквивалентный источник напряжения $E_{\text{и}}$ с внутренним сопротивлением $R_{\text{и}}$ так, как это было сделано в п.5 разд.2. Тогда коэффициент передачи входной цепи

$$\text{можно представить в виде } K_{\text{вхц}} = \frac{u_{\text{вх}}}{E_{\text{и}}} = \frac{u_{\text{вх}}}{E_{\text{т}}} \frac{E_{\text{т}}}{E_{\text{и}}},$$

$$\text{где } \frac{u_{\text{вх}}}{E_{\text{т}}} = \frac{R_{\text{вх.ос}}}{R_{\text{т}} + R_{\text{вх.ос}}}, \quad \frac{E_{\text{т}}}{E_{\text{и}}} = \frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma} + R_{\text{и}}}.$$

После подстановок получаем расчетную формулу

$$K_{\text{с.ос}} = -h_{21} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{т}} + R_{\text{вх.ос}}}.$$

Для самоконтроля следует иметь в виду, что всегда $K_0 > K_{\text{с}} > K_{\text{с.ос}}$, а также $K_{\text{ос0}} > K_{\text{с.ос}}$.

4. Тепловой расчет транзистора

Выделяющаяся в транзисторе электрическая энергия преобразуется в тепловую и нагревает его. На участке "переход-среда" создается разность температур

$$\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{с}} = P_{\text{рас}} R_{\text{пс}},$$

где $T_{\text{п}}$ - температура коллекторного перехода,

$T_{\text{с}}$ - температура среды,

$P_{\text{рас}}$ - мощность, которую должен рассеять транзистор,

$$P_{\text{рас}} = I_{\text{к.ср}} U_{\text{кэ.ср}} - \text{для нелинейного режима,}$$

$$P_{\text{рас}} = I_{\text{кп}} U_{\text{кэп}} - \text{для линейного режима работы}$$

$R_{\text{пс}}$ - тепловое сопротивление "переход-среда" без теплоотвода, град/Вт.

В общем случае $R_{\text{пс}} = R_{\text{пк}} + R_{\text{кс}}$, где $R_{\text{пк}}$ - тепловое сопротивление "переход-корпус"; $R_{\text{кс}} = A/S$, где $A=800-1400$, S - площадь поверхности, рассеивающей тепло, см². Для транзистора без теплоотвода $S = S_{\text{корп}}$ - это площадь поверхности корпуса транзистора.

Предельная мощность, которую может рассеять транзистор при температуре окружающей среды, равной $T_{\text{с}}$:

$$\text{без теплоотвода} - P_{\text{пред}}(T_{\text{с}}) = \frac{T_{\text{пмак}} - T_{\text{с}}}{R_{\text{пс}}}$$

$$\text{с теплоотводом} - P_{\text{пред}}(T_{\text{с}})_{\text{т}} = \frac{T_{\text{пмак}} - T_{\text{с}}}{R_{\text{пст}}}$$

где $R_{\text{пст}} = R_{\text{пк}} + R_{\text{кст}}$ - тепловое сопротивление "переход-среда" с теплоотводом ($R_{\text{пст}} < R_{\text{пс}}$),

$R_{\text{кст}} = A/S_{\text{т}}$ - тепловое сопротивление "корпус-среда" с теплоотводом ($R_{\text{кст}} < R_{\text{кс}}$), $S_{\text{т}}$ - площадь теплоотвода ($S_{\text{т}} > S_{\text{корп}}$).

В справочнике (и в исходных данных к первому практическому занятию), когда приводят данные транзистора с теплоотводом, полагают поверхность теплоотвода настолько большой, что $R_{\text{кст}} \ll R_{\text{пк}}$. Поэтому считают, что $R_{\text{кст}} = 0$ и $R_{\text{пст}} = R_{\text{пк}}$.

Площадь теплоотвода $S_{\text{тепл}}$, необходимая для рассеивания мощности $P_{\text{рас}}$ при температуре среды $T_{\text{смак}}$, рассчитывается по формуле

$$S_{\text{тепл}} = \frac{A}{R_{\text{кс. треб}}}, \text{ где } R_{\text{кс. треб}} = R_{\text{пс. треб}} - R_{\text{пк}},$$

$$R_{\text{пс. треб}} = \frac{T_{\text{пмак}} - T_{\text{смак}}}{P_{\text{рас}}}$$

Если $R_{\text{кс. треб}} < 0$, то транзистор не сможет рассеять мощность $P_{\text{рас}}$ при температуре $T_{\text{смак}}$ с любым теплоотводом. При выполнении задания расчет продолжать до конца, в том числе рассчитать и

$S_{\text{тепл}} < 0$ для контроля.

Исходные данные для расчета могут содержать следующие параметры: $T_{\text{пмах}}$, $S_{\text{корп}}$, $P_{\text{пред}}(T)$, $P_{\text{пред}}(T)_{\text{т}}$, dP/dT , $T_{\text{смах}}$, $R_{\text{пк}}$, $R_{\text{пс}}$, T_0 , где T_0 - температура, для которой дополнительно необходимо рассчитать $P_{\text{пред}}(T_0)$ и $P_{\text{пред}}(T_0)_{\text{т}}$. Часто в справочной литературе $P_{\text{пред}}$ указывают для двух значений температур T_1 и T_2 .

При вычислении $P_{\text{рас}}$ значения $I_{\text{кп}}$ и $U_{\text{кэп}}$ берутся для схемы на рис. 12, рассчитанной в разд. 1. В расчетах принять $A=800$.

Результаты расчетов должны быть сведены в таблицу, в которой необходимо последовательно указать значения следующих параметров: $P_{\text{рас}}$, $T_{\text{пмах}}$, $R_{\text{пс}}$, $R_{\text{пк}}$, $R_{\text{кс}}$, $R_{\text{пс.треб}}$, $R_{\text{кс.треб}}$, $S_{\text{тепл}}$, $S_{\text{корп}}$, $P_{\text{пред}}(T_{\text{смах}})$, $P_{\text{пред}}(T_{\text{смах}})_{\text{т}}$, $P_{\text{пред}}(T_0)$, $P_{\text{пред}}(T_0)_{\text{т}}$, $T_{\text{смах}}(P_{\text{рас}})$, $T_{\text{смах}}(P_{\text{рас}})_{\text{т}}$.

Элементы расчета

1. Дано: $P(T) = P_{\text{пред}}(T_1) \dots P_{\text{пред}}(T_2)$.

$$\text{Расчет: } R_{\text{пс}} = \frac{T_2 - T_1}{P_{\text{пред}}(T_1) - P_{\text{пред}}(T_2)}$$

2. Дано: $P(T) = P_{\text{пред}}(T_1)$ и $T_{\text{пмах}}$. Расчет: $R_{\text{пс}} = \frac{T_{\text{пмах}} - T_1}{P_{\text{пред}}(T_1)}$.

3. Дано: $P(T)_{\text{т}} = P_{\text{пред}}(T_1)_{\text{т}} \dots P_{\text{пред}}(T_2)_{\text{т}}$.

$$\text{Расчет: } R_{\text{пст}} = R_{\text{пк}} = \frac{T_2 - T_1}{P_{\text{пред}}(T_1)_{\text{т}} - P_{\text{пред}}(T_2)_{\text{т}}}$$

4. Дано: $P(T)_{\text{т}} = P_{\text{пред}}(T_1)_{\text{т}}$ и $T_{\text{пмах}}$. Расчет: $R_{\text{пст}} = R_{\text{пк}} = \frac{T_{\text{пмах}} - T_1}{P_{\text{пред}}(T_1)_{\text{т}}}$.

5. Дано: dP/dT . Расчет: $R_{\text{пс}} = \frac{1}{dP/dT}$.

6. $P_{\text{пред}}(T_{\text{смах}}) = \frac{T_{\text{пмах}} - T_{\text{смах}}}{R_{\text{пс}}}$, $P_{\text{пред}}(T_{\text{смах}})_{\text{т}} = \frac{T_{\text{пмах}} - T_{\text{смах}}}{R_{\text{пк}}}$.

7. $P_{\text{пред}}(T_0) = \frac{T_{\text{пмах}} - T_0}{R_{\text{пс}}}$, $P_{\text{пред}}(T_0)_{\text{т}} = \frac{T_{\text{пмах}} - T_0}{R_{\text{пк}}}$.

8. Максимальная температура перехода:

$$T_{\text{пmax}} = T + P_{\text{пред}}(T) \cdot R_{\text{пс}} \quad \text{или} \quad T_{\text{пmax}} = T + P_{\text{пред}}(T) \cdot R_{\text{пк}}.$$

9. Максимальная температура среды, до которой транзистор сможет рассеять мощность $P_{\text{рас}}$:

$$T_{\text{сmax}}(P_{\text{рас}}) = T_{\text{пmax}} - P_{\text{рас}} R_{\text{пс}} \quad \text{— без теплоотвода,}$$

$$T_{\text{сmax}}(P_{\text{рас}})_{\text{т}} = T_{\text{пmax}} - P_{\text{рас}} R_{\text{пк}} \quad \text{— с теплоотводом.}$$

Пример расчета площади теплоотвода

Дано: $S_{\text{корп}}$, $P_{\text{пред}}(T_1) \dots P_{\text{пред}}(T_2)$, $T_{\text{сmax}}$, $P_{\text{рас}}$.

Рассчитать $S_{\text{тепл}}$, необходимую для рассеивания $P_{\text{рас}}$ при $T_{\text{сmax}}$.

$$1) R_{\text{кс}} = \frac{A}{S_{\text{корп}}}; \quad 2) R_{\text{пс}} = \frac{P_{\text{пред}}(T_1) - P_{\text{пред}}(T_2)}{T_2 - T_1};$$

$$3) T_{\text{пmax}} = T_1 + P_{\text{пред}}(T_1) \cdot R_{\text{пс}}; \quad 4) R_{\text{пк}} = R_{\text{пс}} - R_{\text{кс}};$$

$$5) R_{\text{пс. треб}} = \frac{T_{\text{пmax}} - T_{\text{сmax}}}{P_{\text{рас}}}; \quad 6) R_{\text{кс. треб}} = R_{\text{пс. треб}} - R_{\text{пк}}.$$

$$7) S_{\text{тепл}} = \frac{A}{R_{\text{кс. треб}}}.$$

ПОСТРОЕНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Логарифмические частотные характеристики являются удобным средством для быстрого изображения графиков амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик по известной передаточной функции $K(p)$, представленной как произведение передаточных функций элементарных (типовых) звеньев.

Обычно строят асимптотические логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ). При этом АЧХ и ФЧХ представляются в виде отрезков прямых линий. Точность таких характеристик является вполне удовлетворительной для приближенной оценки формы частотной характеристики и частотных искажений.

При построениях ЛАЧХ частотная ось представляется в логарифмическом масштабе. На рис.15 показан способ быстрого построения логарифмической частотной оси. Этот способ используется при выполнении данного задания. При построении логарифмической АЧХ коэффициент передачи $\Lambda(\omega)$ откладывается в децибелах. Он связан с коэффициентом передачи $K(\omega)$ в относительных единицах соотношением $\Lambda(\omega) = 20 \cdot \lg K(\omega)$.

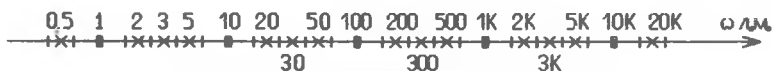


Рис. 15. Ось частот в логарифмическом масштабе

В результате перехода от относительных единиц к децибелам ЛАЧХ сложной передаточной функции получается простым суммированием ЛАЧХ типовых (элементарных) звеньев, входящих в эту функцию.

Обычно в передаточных функциях аналоговых устройств встречаются четыре типа элементарных звеньев. Их передаточные функции $K(p)$, графики асимптотических логарифмических частотных характеристик $\Lambda(\omega)$, $\varphi(\omega)$ и точные выражения $K(\omega)$, $\varphi(\omega)$ приведены ниже. На графиках $\Lambda(\omega)$ числа 20, -20, -40 обозначают наклон соответствующих участков в децибелах на декаду. Декада - это отрезок частотной оси, на концах которого частоты отличаются в 10 раз.

На всех графиках ЛАЧХ типовых звеньев $\omega_1 = 1/\tau_1$. Частоты, на которых происходят изломы асимптотических АЧХ и ФЧХ, называют сопряженными.

Типовые звенья

1. Форсирующее звено: $K(p) = 1 + p\tau_1$. ЛАЧХ приведены на рис.16, а.

Точные выражения: $K(\omega) = \sqrt{1 + \omega^2 \tau_1^2}$, $\varphi(\omega) = \arctg(\omega \tau_1)$.

2. Инерционное звено: $K(p) = \frac{1}{1 + p\tau_1}$. ЛАЧХ приведены на рис.16, б.

Точные выражения: $K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_1^2}}$, $\varphi(\omega) = -\arctg(\omega \tau_1)$.

3. Реальное дифференцирующее звено: $K(p) = \frac{p\tau_1}{1+p\tau_1}$. ЛАЧХ на рис.17,а.

Точные выражения: $K(\omega) = \frac{\omega\tau_1}{\sqrt{1+\omega^2\tau_1^2}}$, $\phi(\omega) = 90^\circ - \arctg(\omega\tau_1)$.

4. Колебательное звено: $K(p) = \frac{1}{p^2\tau_1^2 + 2\xi p\tau_1 + 1}$. ЛАЧХ на рис.17,б.

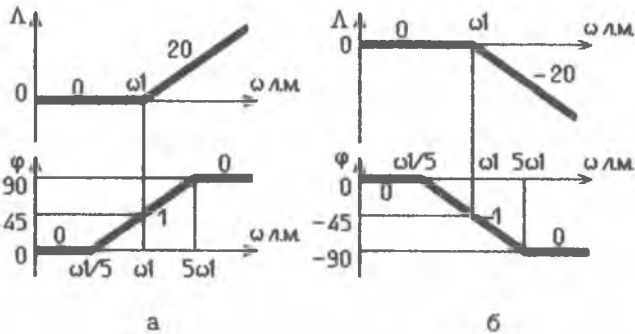


Рис.16. ЛАЧХ форсирующего и инерционного звеньев

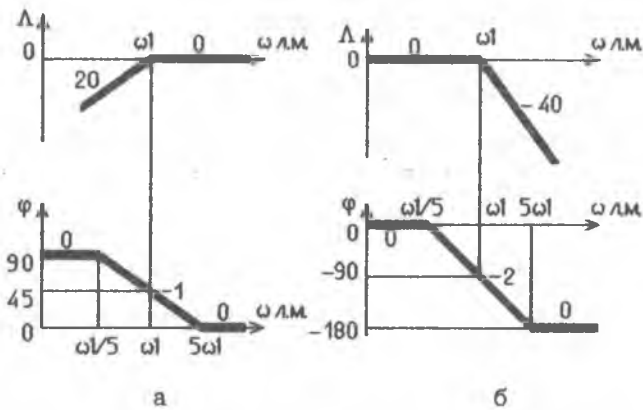


Рис.17. ЛАЧХ реального дифференцирующего и колебательного звеньев

Точные выражения: $K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2\tau_1^2)^2 + 4\xi^2\omega^2\tau_1^2}}$.

$$\text{При } \omega^2 \tau_1^2 < 1 \quad \varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi\omega\tau_1}{1 - \omega^2 \tau_1^2}.$$

$$\text{При } \omega^2 \tau_1^2 > 1 \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{2\xi\omega\tau_1}{\omega^2 \tau_1^2 - 1} - 180^\circ.$$

Порядок выполнения третьего задания

Исходными данными для третьего задания являются: выражение для передаточной функции $K(p)$; сопряженные частоты $\omega_1 = 1/\tau_1$, $\omega_2 = 1/\tau_2$ и т.д. звеньев, входящих в передаточную функцию; коэффициенты затухания ξ колебательных звеньев; коэффициент усиления K_0 и частота ω' .

В процессе выполнения задания требуется выполнить три следующих пункта:

1. Построить ЛАЧХ (АЧХ и ФЧХ) заданной передаточной функции и указать наклоны отрезков аппроксимирующих прямых.

2. В точках сопряжения аппроксимирующих прямых снять значения Λ и φ и поместить их в таблицы по возрастанию частоты.

3. Рассчитать точные значения Λ и φ на заданной частоте ω' и сравнить их с асимптотическими значениями.

Пример выполнения задания

Пусть необходимо выполнить задание со следующими исходными

$$\text{данными: } K(p) = K_0 \frac{p\tau_1}{1 + p\tau_1} \cdot \frac{1 + p\tau_2}{p^2 \tau_3^2 + 2\xi_3 p\tau_3 + 1},$$

$$\omega_1 = 1000, \quad \omega_2 = 200, \quad \omega_3 = 3000, \quad \xi_3 = 0,2, \quad K_0 = 10, \quad \omega' = 5000.$$

Передаточная функция представляет собой произведение передаточных функций трех элементарных звеньев: $K(p) = K_0 \cdot K_1(p) \cdot K_2(p) \cdot K_3(p)$.

Индексами помечены постоянные времени: 1 - реального дифференцирующего звена, 2 - форсирующего, 3 - колебательного.

Полезно для исключения ошибок перед построением ЛАЧХ произвести исследование передаточной функции в частотной области, для чего оператор p в выражении $K(p)$ заменяется на $j\omega$.

Исследование АЧХ: Если $\omega \rightarrow 0$, то $K(j\omega) \rightarrow K_0 \cdot j\omega\tau_1$. Т.е. слева АЧХ представляется в виде отрезка прямой с наклоном

20 дБ/дек, пересекающей частотную ось на частоте $1/\tau_1$. При $\omega \rightarrow \infty$ "бесконечность" $K(j\omega) \rightarrow K_0 \frac{1}{j\omega\tau_{эк}}$, где $\tau_{эк} = \frac{\tau_3^2}{\tau_2}$ — постоянная времени интегрирующего звена. Следовательно, справа АЧХ представляется в виде прямой с наклоном -20 дБ/дек, пересекающей частотную ось на частоте $1/\tau_{эк}$.

Исследование ФЧХ: Если $\omega \rightarrow \infty$, то $\varphi_1 \rightarrow 90^\circ$, $\varphi_2 \rightarrow 0$, $\varphi_3 \rightarrow 0$, поэтому $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$ стремится к 90° . При больших ω суммарное значение φ стремится к -90° .

Перед построением ЛАЧХ следует выбрать диапазон частот на частотной оси. Начальная и конечная частоты выбираются кратными 10. Начальная частота $\omega_{нач}$ должна быть меньше частоты $\omega_{мин}/10$, где $\omega_{мин}$ — минимальная сопряженная частота из задания. В примере $\omega_{мин} = \omega_2 = 200$. Поэтому при $\omega_2/10 = 20$ принимаем $\omega_{нач} = 10$.

Конечная частота должна быть больше $10\omega_{макс}$. В примере $\omega_{макс} = \omega_3$, поэтому $\omega_{кон} > 10\omega_3 = 30\,000$. Принимаем $\omega_{кон} = 100\,000$. Следовательно, ось частот, начиная с частоты $\omega_{нач} = 10$, необходимо разбить на четыре декады.

При построении логарифмических АЧХ и ФЧХ сначала строят ЛАЧХ элементарных звеньев, а затем суммированием получают логарифмические АЧХ и ФЧХ всей передаточной функции. Для простоты логарифмическая АЧХ строится без учета K_0 .

Результаты построения ЛАЧХ для заданной передаточной функции приведены на рис. 18. После построений ЛАЧХ заполняются табл. 1 и табл. 2, в которые заносятся значения Λ и φ , снятые с построенных графиков в точках сопряжения по возрастанию частоты.

АЧХ Таблица 1

ω	Λ , дБ
$\omega_2 = 200$	-14
$\omega_1 = 1000$	14
$\omega_3 = 3000$	23
$\omega' = 5000$	19

ФЧХ Таблица 2

ω	φ , град
$\omega_2/5 = 40$	90
$\omega_1/5 = 200$	135
$\omega_3/5 = 600$	135
$5 \cdot \omega_2 = 1000$	100
$5 \cdot \omega_1 = 5000 = \omega'$	-30
$5 \cdot \omega_3 = 15000$	-90

Расчет точных значений Λ и φ на частоте ω'

Для расчета $\Lambda(\omega')$ передаточную функцию переводят в частотную область путем замены p на $j\omega$. Модуль коэффициента передачи в частотной области для всей передаточной функции равен произведению модулей коэффициентов передачи отдельных звеньев:

$$K(\omega) = \frac{\omega\tau_1}{\sqrt{1+\omega^2\tau_1^2}} \cdot \sqrt{1+\omega^2\tau_2^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2\tau_3^2)^2 + 4\xi_3^2\omega^2\tau_3^2}}$$

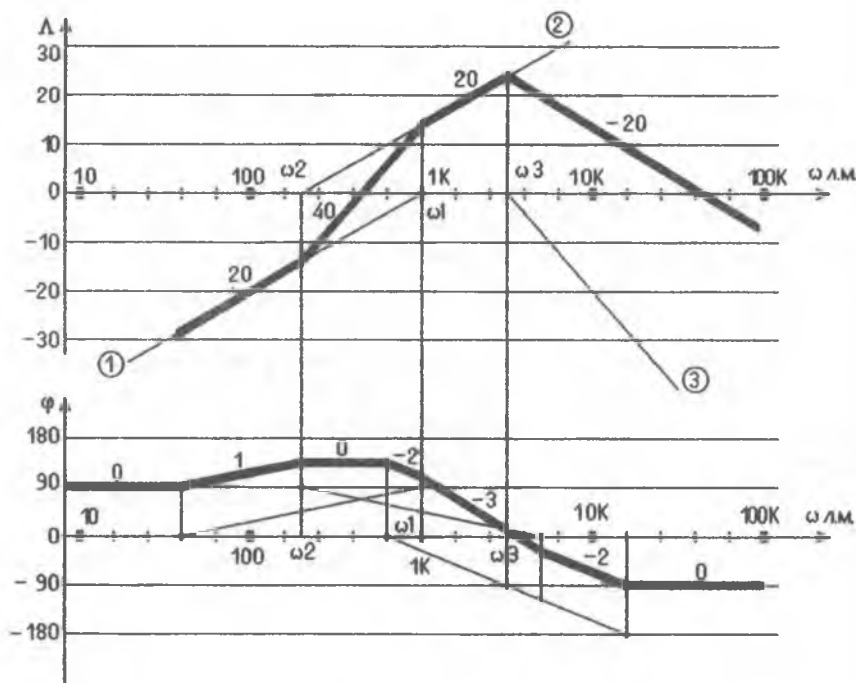


Рис. 18. Суммарные логарифмические АЧХ и ФЧХ

На частоте $\omega = \omega' = 5000$ вычисляют

$$\omega\tau_1 = \omega' / \omega_1 = 5; \quad \omega\tau_2 = \omega' / \omega_2 = 25; \quad \omega\tau_3 = \omega' / \omega_3 = 1,666.$$

После подстановки получают точное значение $K(\omega')=12,93$ и значения в децибелах $\Lambda(\omega')=20 \cdot \lg K(\omega')=22,23$ дБ (сравнить с 19 дБ из табл.1).

Для расчета $\varphi(\omega')$ представляют значение фазового сдвига на частоте ω' в устройстве с заданной передаточной функцией $K(p)$ как сумму сдвигов фаз, возникающих в элементарных звеньях, составляющих $K(p)$: $\varphi(\omega')=\varphi_1(\omega')+\varphi_2(\omega')+\varphi_3(\omega')$,

где $\varphi_1(\omega')=90-\arctg(5)=11,3^\circ$, $\varphi_2(\omega')=\arctg(25)=87,7^\circ$.

Так как $\omega' \tau_3 > 1$, то для колебательного звена

$$\varphi_3(\omega')=\arctg \frac{2\xi_3 \omega' \tau_3}{\omega'^2 \tau_3^2 - 1} - 180 = -159,43^\circ.$$

Тогда $\varphi(\omega')=11,3+87,7-159,43=-60,43^\circ$ (сравнить с -30° из табл.2).

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б о ч к а р е в В.А., В е ч к а н о в Г.П., В е ч к а н о в а Р.А. Использование программы ПРАМ-2.6 в учебном процессе. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 32с.

2. В е ч к а н о в Г.П. Проектирование усилителя низкой частоты с использованием ЭВМ: Метод. указания к курсовому проектированию/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1993. 29с.

3. В е ч к а н о в Г.П. Проектирование широкополосного усилителя с использованием ЭВМ: Метод. указания к курсовому проектированию/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1993. 29с.

4. О с т а п е н к о Г.С. Усилительные устройства. М.: Радио и связь, 1981. 400с.

5. Ц и к и н Г.С. Усилительные устройства. М.: Связь, 1971. 365с.

Аналоговые электронные устройства

**Составитель Вечканов
Геннадий Петрович**

Редактор Г.А. Усачева
Техн. редактор Г.А. Усачева
Корректор Н.С. Купринова

Подписано в печать 18.07.95. Формат 60x84¹/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 2,8.
Усл.кр.-отт. 2,9. Уч.-изд.л. 3,0. Тираж 150 экз.
Заказ 329.

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П.Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд -во Самарского государственного аэрокосмического
университета. 443001 Самара, ул.Ульяновская,18.