

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение Высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет»**

---

**Факультет технической кибернетики  
Кафедра «Измерительные информационные технологии»**

**Ю.Н. Дьяченко**

# **Усилительные каскады на основе биполярных транзисторов**

**Методические указания  
к практическим и лабораторным работам**

**Санкт-Петербург**

**2012**

Методические указания содержат описания практических и лабораторных работ, цель которых научить студентов умению рассчитывать, экспериментально исследовать и проводить компьютерное моделирование простых усилительных каскадов на биполярных транзисторах, используемых в электрических и электронных цепях.

Методические указания предназначены для студентов изучающих курсы «Электротехника», «Электроника и электротехника», «Электроника и схемотехника», «Электроника и микропроцессорная техника» по направлениям подготовки 200100 «Приборостроение», 230400 «Информационные системы и технологии», 090900 «Информационная безопасность».

Печатается по решению кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

## Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| Программа работы .....  | 4         |
| Общее описание транзисторных усилительных каскадов .....  | 6         |
| Расчёт схем усилительных каскадов .....   | 8         |
| Расчет основных параметров биполярного транзистора.....   | 8         |
| Расчёт усилительного каскада с общим эмиттером.....   | 9         |
| <i>Расчет каскада с ОЭ по постоянному току (расчет рабочей точки) .....</i>                     | <i>9</i>  |
| <i>Расчет усилительного каскада с ОЭ по переменному току .....</i>                              | <i>11</i> |
| Расчёт усилительного каскада с общим коллектором (эмиттерного повторителя).....                 | 13        |
| <i>Расчет усилительного каскада с ОК по постоянному току.....</i>                               | <i>13</i> |
| <i>Расчет усилительного каскада с ОК по переменному току .....</i>                              | <i>14</i> |
| Моделирование работы усилительных каскадов .....  | 15        |
| Анализ режима работы каскадов по постоянному току (рабочей точки) .....                         | 15        |
| Анализ температурной стабильности рабочей точки каскадов.....                                   | 15        |
| Исследование работы усилительных каскадов на переменном токе ..                                 | 17        |
| <i>Построение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной характеристик (ФЧХ) каскадов.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Влияние сопротивлений источника и нагрузки на коэффициент усиления.</i>                      | <i>18</i> |
| <i>Влияния изменения параметров каскадов на коэффициент усиления .....</i>                      | <i>19</i> |
| <i>Моделирование работы каскада во временной области .....</i>                                  | <i>20</i> |
| <i>Спектральный анализ выходного напряжения каскада с ОЭ.....</i>                               | <i>21</i> |
| Требования к отчету по работе .....   | 23        |
| Литература .....  | 23        |

Целью работы является расчет, исследование, компьютерное моделирование усилительных каскадов на биполярных транзисторах. Исследуют особенности функционирования и характеристики усилительных каскадов с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

## Программа работы

1. Расчёт схем усилительных каскадов.
  - 1.1. Рассчитать основные параметры биполярного транзистора.
  - 1.2. Рассчитать усилительный каскад с общим эмиттером.
  - 1.3. Рассчитать усилительный каскад с общим коллектором.
2. Моделирование работы усилительных каскадов.
  - 2.1. Исследовать работу усилительного каскада по постоянному току.
    - 2.1.1. Исследовать режим каскада по постоянному току.
    - 2.1.2. Исследовать температурную стабильность рабочей точки каскада.
  - 2.2. Исследовать работу усилительного каскада по переменному току.
    - 2.2.1. Снять амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики каскада.
    - 2.2.2. Исследовать влияние сопротивлений источника сигнала и нагрузки на коэффициент усиления каскада.
    - 2.2.3. Исследовать влияние изменения параметров каскада на его коэффициент усиления.
  - 2.3. Исследовать работу каскада во временной области (только для каскада с ОЭ).
  - 2.4. Провести спектральный анализ выходного напряжения каскада (только для каскада с ОЭ).
3. Оформление отчета по работе.

Таблица 1. Варианты заданий.

| № варианта      |     | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         |
|-----------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $I_K^0 (I_Э^0)$ | мА  | 2          | 1          | 1,5        | 1,8        | 2,5        | 3          | 1,6        | 2          | 3,5        | 2,8        |
| $R_H$           | кОм | 3          | 5          | 4          | 3          | 2          | 1,5        | 3          | 1,5        | 1          | 1,8        |
| $r_u$           | кОм | 2          | 1,5        | 1,2        | 0,8        | 1          | 0,6        | 2,5        | 1,3        | 0,8        | 1          |
| $U_n$           | В   | 15         | 15         | 10         | 10         | 12         | 12         | 8          | 8          | 14         | 14         |
| $f_n$           | Гц  | 50         | 75         | 100        | 150        | 20         | 50         | 75         | 100        | 150        | 20         |
| $T_{START}$     | °С  | -15        | -10        | -35        | -20        | -40        | -30        | -25        | -15        | 0          | -45        |
| $T_{STOP}$      | °С  | 100        | 110        | 85         | 90         | 70         | 80         | 105        | 110        | 125        | 95         |
| Тип БТ          |     | 2N3<br>390 | 2N3<br>903 | 2N2<br>712 | 2N5<br>223 | 2N3<br>904 | 2N4<br>123 | 2N5<br>210 | 2N3<br>711 | 2N4<br>124 | 2N5<br>209 |

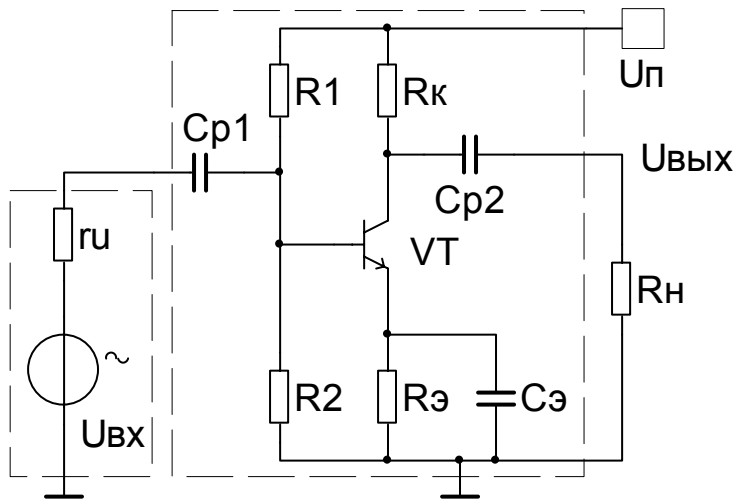


Рис. 1. Схема каскада с общим эмиттером (ОЭ)

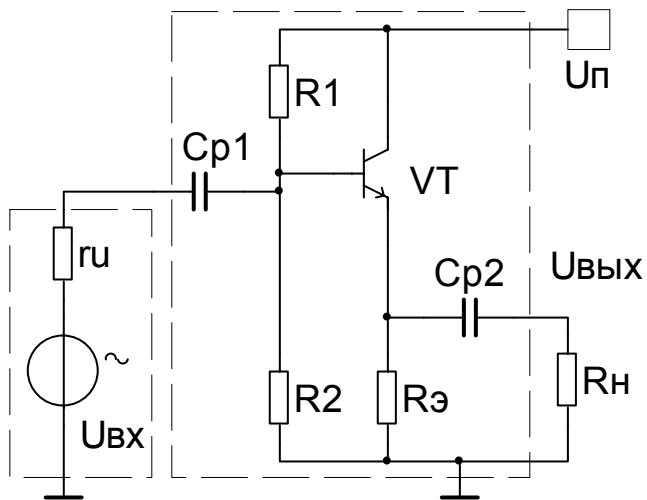


Рис. 2. Схема каскада с общим коллектором (ОК)

## Общее описание транзисторных усилительных каскадов

Транзисторные каскады используют для усиления сигналов постоянного и переменного тока. В работе исследуются каскады для усиления переменных сигналов.

В усилительном каскаде с ОЭ (рис. 1) входным сигналом является напряжение на базе, а выходным – напряжение на коллекторе транзистора. Собственно каскад выделен пунктиром, вне которого расположены внешние подключаемые элементы: источник питания постоянного напряжения  $U_n$ ; источник переменного входного напряжения  $U_{вх}$  с внутренним сопротивлением  $r_u$ ; сопротивление нагрузки  $R_n$ . Основное достоинство каскада – высокий коэффициент усиления по напряжению  $K$ . Однако каскад имеет низкое входное и высокое выходное сопротивления, что приводит к тому, что сопротивления источника входного напряжения  $r_u$  и нагрузки  $R_n$  оказывают существенное влияние на коэффициент  $K$ . Кроме того, на частотную характеристику каскада в области высоких частот, сильное влияние оказывает собственная емкость коллектор-база транзистора. В итоге полоса частот каскада может быть существенно ограничена сверху, особенно при наличии значительного сопротивления  $r_u$ .

В каскаде с ОК (рис. 2) входным сигналом является напряжение на базе, а выходным – напряжение на эмиттере. В каскаде реализована 100% последовательная отрицательная обратная связь (ООС) по напряжению, в результате чего коэффициент передачи напряжения  $K \approx 1$ , а каскад имеет второе название *эмиттерный повторитель* (ЭП). Каскад не усиливает напряжение, но, по сравнению с каскадом ОЭ, имеет повышенный коэффициент усиления тока. Наличие ООС обеспечивает высокое входное и низкое выходное сопротивления, поэтому каскад с ОК широко используют в качестве буферного для согласования усилителей с источниками напряжения и нагрузкой и в выходных цепях усилителей мощности. Еще одно достоинство эмиттерного повторителя – существен-

но более широкая полоса пропускания в области высоких частот по сравнению с каскадом ОЭ и меньшее влияние на нее сопротивления  $r_u$ .

Важная характеристика транзистора – передаточная характеристика, которая описывается приближенной формулой

$$I_k = I_{k\beta 0}(T) \cdot \exp\left(\frac{U_{\beta\epsilon}}{\Phi_T}\right)$$

$I_k$  – коллекторный ток;

$I_{k\beta 0}(T)$  – обратный (тепловой) ток коллекторно-базового перехода, сильно зависящий от температуры  $T$ ;

$U_{\beta\epsilon}$  – управляющее напряжение между базой и эмиттером;

$\Phi_T$  – тепловой потенциал.

Передаточная характеристика представляет собой экспоненту, следовательно, малым изменениям напряжения  $U_{\beta\epsilon}$  соответствуют значительные изменения тока  $I_k$ .

Непосредственно для расчета усилительных каскадов передаточную характеристику не используют, однако по ней определяют важный параметр транзистора, называемый *крутизной*

$$S = \frac{dI_k}{dU_{\beta\epsilon}} = \frac{1}{\Phi_T} \cdot I_{k\beta 0}(T) \cdot \exp\left(\frac{U_{\beta\epsilon}}{\Phi_T}\right) = \frac{I_k}{\Phi_T}$$

Крутизна определяет усилительные свойства транзистора и всего каскада.

Базовый, коллекторный и эмиттерный токи связаны соотношениями:

$$I_\beta = \frac{I_k}{b} \quad I_\epsilon = I_k + I_\beta \approx I_k$$

$b \gg 1$  – коэффициент передачи базового тока. Если значение  $b$  велико, то, при проведении практических расчетов, различием между коллекторным и эмиттерным токами можно пренебречь.

## Расчёт схем усилительных каскадов

### Расчет основных параметров биполярного транзистора

Исходные данные для расчёта каскадов с ОЭ и ОК и тип транзистора приведены в Таблице 1.

Каскады с ОЭ и ОК обычно используют для усиления переменного сигнала, следовательно, значения крутизны  $S$  и других параметров транзистора в процессе его работы меняются. Однако, если использовать каскад в режиме усиления малого сигнала, то параметры транзистора приближенно можно считать постоянными. Так как для обоих каскадов заданы одинаковые транзисторы и их режимы работы ( $I_K^0 = I_E^0$ ), то и значения параметров будут одинаковыми. Для расчета параметров используют значение начального коллекторного  $I_K^0$  или эмиттерного  $I_E^0$  тока, определяющего режим по постоянному току (рабочую точку) каскада.

Крутизну  $S$  определяют из соотношения

$$S = \frac{I_K^0}{\Phi_T} = \text{const} \quad \Phi_T \approx 25\text{мВ при температуре } 20^\circ\text{C} \quad (1)$$

Важными параметрами транзистора являются его дифференциальное входное  $r_{бэ}$  и дифференциальное выходное  $r_{кэ}$  сопротивления, которые рассчитывают по формулам:

$$r_{бэ} = \frac{dU_{бэ}}{dI_{бэ}} = b \cdot \frac{dU_{бэ}}{dI_K} = \frac{b}{S} = \frac{b \cdot \Phi_T}{I_K^0} \quad r_{кэ} = \frac{U_Y}{I_K^0} \quad (2)$$

$U_Y = (40 \div 200)\text{В}$  – напряжение Эрли.

Значения  $b$  и  $U_Y$  для заданного транзистора берут из описания его модели – View model в программе Multisim. Обозначения:  $b$  – Bf,  $U_Y$  - Vaf.



## Расчёт усилительного каскада с общим эмиттером

Исходные данные для расчёта каскада с ОЭ приведены в Таблице 1.

Методика расчёта носит приближенный характер, поэтому результаты расчётов следует округлять до 2 ÷ 3 значащих цифр.

### Расчет каскада с ОЭ по постоянному току (расчет рабочей точки)

Расчет рабочей точки усилительного каскада переменного тока с ОЭ, работающего в классе А, иллюстрирует рис. 3.

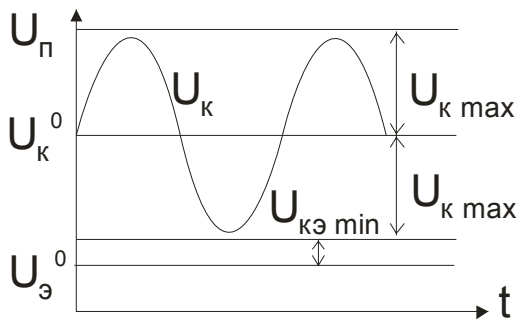


Рис. 3. Диапазоны постоянных и переменных напряжений каскада с ОЭ.

Полный размах переменного напряжения в каскаде ограничен диапазоном постоянного напряжения питания  $0 \div U_{\text{п}}$ . Для нормальной работы каскада по переменному току и максимального использования рабочего диапазона, необходимо предварительно правильно задать режим по постоянному току — значения постоянных напряжений в узлах схемы и токов в её ветвях.

Чем больше сопротивление  $R_{\text{э}}$  и падение напряжения  $U_{R_{\text{э}}}$  на нем (рис. 1), тем больше глубина ООС по постоянному току и лучше температурная стабилизация рабочей точки. Однако при этом растет уровень постоянного напряжения на эмиттере транзистора и сужается рабочий диапазон каскада по переменному току. Поэтому выбирают

$$U_{\text{э}}^0 = U_{R_{\text{э}}} = (0,1 \div 0,15) \cdot U_{\text{п}}$$

При уменьшении напряжения коллектор-эмиттер транзистор может войти в режим насыщения, что приведет к потере усилительных свойств и искажению

формы переменного сигнала. Чтобы не допускать насыщения транзистора, задают минимальное падение напряжения коллектор-эмиттер

$$U_{кэ \min} = (1,5 \div 2) \cdot U_{кэ \text{ нас}} \quad (3)$$

$U_{кэ \text{ нас}}$  – напряжение насыщения транзистора принимают равным 0,5В.

Постоянное напряжение на коллекторе, соответствующее рабочей точке

$$U_{к}^0 = \frac{U_{\Pi} + U_{э}^0 + U_{кэ \min}}{2}$$

Максимально возможная амплитуда выходного сигнала синусоидальной формы

$$U_{к \max} = \frac{U_{\Pi} - U_{э}^0 - U_{кэ \min}}{2}$$

Сопротивления эмиттерного и коллекторного резисторов

$$R_{э} = \frac{U_{э}^0}{I_{к}^0} \quad R_{к} = \frac{U_{\Pi} - U_{к}^0}{I_{к}^0}$$

Сопротивления резисторов R1 и R2 делителя задают значение постоянного напряжения  $U_{б}^0$  на базе транзистора и обеспечивают достаточное значение базового тока  $I_{б}^0$  при малой потребляемой делителем напряжения мощности. Напряжение на базе можно рассчитать по формуле

$$U_{б}^0 = U_{э}^0 + 0,6\text{В} \quad (4)$$

Токи базы  $I_{б}^0$  и резистивного делителя  $I_{\text{дел}}$  находят из соотношений

$$I_{б}^0 = \frac{I_{к}^0}{b} \quad I_{\text{дел}} = 5 \cdot I_{б}^0 \quad (5)$$

Сопротивления резисторов R1 и R2 делителя находят по формулам

$$R1 = \frac{U_{\Pi} - U_{б}^0}{I_{\text{дел}} + I_{б}^0} \quad R2 = \frac{U_{б}^0}{I_{\text{дел}}} \quad (6)$$

## Расчет усилительного каскада с ОЭ по переменному току

### *Расчет входного и выходного сопротивления каскада по переменному току*

Входное  $r_{вх}$  и выходное  $r_{вых}$  сопротивления каскада оказывают определяющее влияние на его согласование с источником входного напряжения и нагрузкой. Сопротивление  $r_{вх}$  определяют как эквивалентное сопротивление между входным узлом и узлом земли. Источник постоянного напряжения питания  $U_{п}$  для переменного напряжения является аналогом земли, следовательно, значение  $r_{вх}$  равно сопротивлению параллельно соединенных на землю резисторов  $R_1, R_2$  и собственного входного сопротивления транзистора  $r_{бэ}$ . Сопротивление  $r_{вых}$ , представляющее собой эквивалентное сопротивление между выходным узлом и узлом земли, определяют аналогичным образом.

$$r_{вх} = \frac{R_1 R_2 r_{бэ}}{R_1 R_2 + R_1 r_{бэ} + R_2 r_{бэ}} \quad r_{вых} = \frac{R_K r_{кэ}}{R_K + r_{кэ}}$$

### *Расчет конденсаторов*

В рабочем диапазоне частот реактивное сопротивление конденсатора практически равно нулю, следовательно, конденсаторы передают сигналы без искажения. На частотах меньших нижней частоты рабочего диапазона  $f_H$  конденсаторы задерживают входной переменный сигнал, коэффициент усиления каскада снижается. Конденсаторы, совместно с эквивалентными сопротивлениями, выполняют роль фильтров верхних частот, следовательно, для их расчета необходимо найти значение частоты среза  $f_c$  фильтров. В случае равенства  $f_c$  для всех трех фильтров и условия, что снижение коэффициента усиления каскада на частоте  $f_H$  не превышает 30% (-3дБ) емкости конденсаторов определяют по формулам

$$f_c < \frac{f_H}{\sqrt{3}} \approx 0,5f_H; \quad C_{p1} = \frac{1}{\pi f_H r_{вх}}; \quad C_{p2} = \frac{1}{\pi f_H (r_{вых} + R_H)}; \quad C_э = \frac{S}{\pi f_H} \quad (7)$$

### *Расчет коэффициентов усиления каскада по напряжению*

Коэффициент усиления по напряжению при наличии сопротивления  $R_3$  и отсутствии конденсатора  $C_3$  определяют по формуле

$$K_3 = -\frac{SR_K}{1 + SR_3 + R_K/r_{кэ}}$$

Знак «минус» указывает, что каскад с ОЭ инвертирующий: он изменяет фазу выходного сигнала по отношению к входному на  $180^\circ$ . Значение  $K_3$  невелико, т. к.  $R_3$  создает ООС стабилизирующую каскад по постоянному току, но одновременно уменьшающую его коэффициент усиления. Для исключения этого нежелательного явления на переменном токе,  $R_3$  шунтируют конденсатором  $C_3$ , что гарантирует повышение коэффициента усиления в пределах рабочей полосы частот до значения

$$K = -\frac{SR_K \cdot r_{кэ}}{R_K + r_{кэ}}$$

Для определения влияния изменений коллекторного сопротивления на  $K$  его значения рассчитывают при  $R_K$ ;  $1,25R_K$  и  $0,75R_K$ .

На величину  $K$  влияние оказывают внутреннее сопротивление источника сигнала  $r_u$  и сопротивление нагрузки  $R_H$ . Влияние этих сопротивлений на  $K$  исключено в идеальном усилителе напряжения, имеющем  $r_{вх} = \infty$  и  $r_{вых} = 0$ . Однако каскад с ОЭ имеет низкое входное и высокое выходное сопротивление, следовательно,  $r_u$  и  $R_H$  могут значительно изменять величину коэффициента усиления в соответствии с формулами

$$K_{r_u} = K \frac{r_{вх}}{r_{r_u} + r_{вх}} \quad K_H = K \frac{R_H}{R_H + r_{вых}} \quad (8)$$

## Расчёт усилительного каскада с общим коллектором (эмиттерного повторителя)

Исходные данные для расчёта каскада с ОК приведены в Таблице 1.

Основные параметры транзистора (формулы (1) и (2)) одинаковы в каскадах с ОК и ОЭ, т.к. заданы одинаковые режимы работы  $I_э^0 = I_к^0$ .

### Расчет усилительного каскада с ОК по постоянному току

Расчет рабочей точки усилительного каскада переменного тока с ОК, работающего в классе А, иллюстрирует рис. 4.

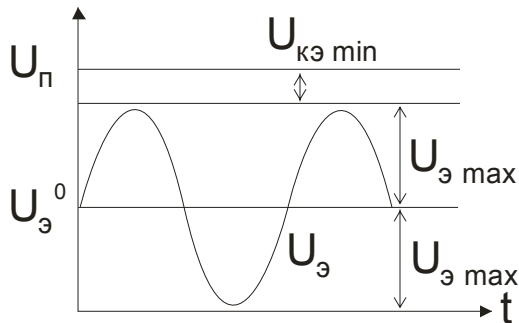


Рис. 4. Диапазоны постоянных и переменных напряжений каскада с ОК.

Полный размах переменного напряжения в каскаде ограничен диапазоном постоянного напряжения питания  $0 \div U_п$ . Для предотвращения режима насыщения транзистора, по формуле (3) рассчитывают минимальное падение напряжения коллектор-эмиттер  $U_{кэ min}$ .

Постоянные напряжения на эмиттере транзистора и максимально возможная амплитуда выходного сигнала синусоидальной формы равны

$$U_э^0 = \frac{U_п - U_{кэ min}}{2} = U_{э max}$$

Значение эмиттерного сопротивления

$$R_э = \frac{U_э^0}{I_э^0}$$

Постоянное напряжение на базе транзистора  $U_б^0$  находят по формуле (4).

Значения токов базы  $I_б^0$  и делителя  $I_{дел}$  рассчитывают по формулам (5), сопротивления резисторов делителя  $R_1$  и  $R_2$  по формулам (6), но при другом значении  $U_б^0$ .

### Расчет усилительного каскада с ОК по переменному току

Входное  $r_{вх}$  и выходное  $r_{вых}$  сопротивления каскада с ОК по переменному току

$$r_{вх} = \frac{R_1 R_2 (r_{бэ} + b \cdot R_э)}{R_1 R_2 + (R_1 + R_2)(r_{бэ} + b \cdot R_э)} \quad r_{вых} \approx \frac{1}{S}$$

Для расчёта ёмкостей разделительных конденсаторов  $C_{р1}$  и  $C_{р2}$  в каскаде с ОК используют формулы (7). Расчет проводят исходя из того же значения нижней частоты  $f_n$  рабочего диапазона, но для других значений  $r_{вх}$  и  $r_{вых}$ .

Коэффициент передачи напряжения ненагруженного каскада

$$K = \frac{SR_э}{SR_э + 1 + R_э/r_{кэ}}$$

Чем больше степень неравенства  $R_э \gg 1/S$ , тем ближе значение  $K$  приближается к единице.

Для определения влияния изменений эмиттерного сопротивления на  $K$ , его значения рассчитывают для  $R_э$ ;  $1,25R_э$  и  $0,75R_э$ .

Для определения влияния на величину  $K$  внутреннего сопротивления источника сигнала  $r_u$  и сопротивления нагрузки  $R_n$  используют формулы (8).

## Моделирование работы усилительных каскадов

Запустите программу Multisim и создайте схему соответствующего каскада. Для этого выберите в меню *Place/Component* или в панели компонентов заданный транзистор и другие элементы схемы с расчетными значениями номиналов. При необходимости номинал элемента можно скорректировать: щелкните на нем два раза левой клавишей мыши, откройте вкладку *Value* и поставьте нужный номинал. В разделе *Sources* выбирают источник постоянного напряжения  $U_n$  для питания каскада и источник переменного входного напряжения  $U_{вх}$ , устанавливая заданное значение  $U_n$ .

Если на схеме не проставлены номера узлов, откройте пункт меню *Options/Sheet Properties/ Circuit* установите опцию *Show all*.

Моделирования работы каскадов с ОК и с ОЭ проводят по одинаковой методике, но с учетом ряда отличий, приведённых в соответствующих пунктах.

### Анализ режима работы каскадов по постоянному току (рабочей точки)

*Simulate/Analyses/DC Operating Point*. Результатом анализа являются значения постоянных напряжений в заданных узлах схемы: на базе, коллекторе, эмиттере транзистора. Напряжения в соответствующих узлах выбирают во вкладке *Output*. Значения напряжений не должны отличаться от расчётных значений более чем на 10%. При больших различиях можно настроить каскад путем подбора резистора R1 или R2, а при различиях более 20÷25% следует проверить расчёты и схему. Измерение можно провести с помощью мультиметра или вольтметров, но это менее удобно.

### Анализ температурной стабильности рабочей точки каскадов

*Simulate/Analyses/Temperature Sweep*. Анализ позволяет определить влияние изменения температуры на характеристики и параметры усилительного каскада, в частности влияние температуры на стабильность рабочей точки по постоянному току. Необходимые установки:

- Start и Stop: начальная  $T_{start}$  и конечная  $T_{stop}$  температура анализа
- Sweep type: масштаб по оси температуры – линейный.
- Increment step size: величина приращения по температуре  $5 \div 10^\circ\text{C}$ .
- Output: анализируемый узел схемы;  
для каскада с ОЭ – коллектор транзистора;  
для каскада с ОК – эмиттер транзистора.
- Analysis to Sweep: DC operating point – анализ рабочей точки по постоянному току.

Нестабильность рабочей точки усилительного каскада проявляется в изменении постоянных напряжений в узлах схемы. Основной причиной неустойчивости является изменение от температуры напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$  транзистора, которое составляет отрицательную величину ( $-2,0 \div -2,5$ ) мВ/ $^\circ\text{C}$ . Дополнительную неустойчивость вносит увеличение коэффициента передачи базового тока  $\beta$  при росте температуры.

В усилительном каскаде с ОЭ максимальное изменение постоянного напряжения происходит в выходном узле – на коллекторе транзистора  $U_k$ . Температурный коэффициент напряжения  $U_{бэ}$  можно определить по изменению коллекторного напряжения с учетом коэффициента усиления каскада по постоянному току  $K_э$ , зависящего от соотношения  $R_k/R_э$ .

$$\frac{\Delta U_k}{\Delta T} = \frac{U_{k\ stop} - U_{k\ start}}{T_{stop} - T_{start}} \left[ \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}} \right] \quad - \text{ значение изменения } U_k \text{ на } 1^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta T} = \frac{\Delta U_k}{\Delta T} \cdot \frac{1}{K_э} \left[ \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}} \right] \quad - \text{ значение изменения } U_{бэ} \text{ на } 1^\circ\text{C}$$

В усилительном каскаде с ОК выходным узлом является эмиттер, а  $K \approx 1$

$$\frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta T} \approx \frac{\Delta U_э}{\Delta T} = \frac{U_{э\ stop} - U_{э\ start}}{T_{stop} - T_{start}} \left[ \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}} \right]$$

Результаты, полученные в ходе моделирования, следует сравнить с теоретическими величинами.



## Исследование работы усилительных каскадов на переменном токе

Построение амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной характеристик (ФЧХ) каскадов

*Simulate/Analyses / AC Analysis.* АЧХ и ФЧХ представляют собой графики зависимостей от частоты отношения амплитуд выходного и входного напряжений и угла фазового сдвига между этими напряжениями. По графикам характеристик можно определить коэффициент усиления каскадов по переменному току, рабочий диапазон частот каскадов, фазовые сдвиги напряжения в рабочем диапазоне частот и на его границах. В качестве генератора входного сигнала  $U_{вх}$  используют источник переменного синусоидального напряжения. Характеристики снимают для основного коэффициента усиления каскада  $K$  при отключенных  $R_n$  и  $r_u$ , и подключенном  $C_э$ .

! Отключение  $C_э$  и  $R_n$  означает разрыв цепи их подключения или, что проще, установку опции Open во вкладке Fault меню Properties компонента. Отключение  $r_u$  означает закорачивание цепи компонента или установку опции Short во вкладке Fault меню Properties.

Необходимые установки:

- Start frequency: начальную частоту устанавливают равной  $(0,2 \div 0,3)f_n$ ;
- Stop frequency: конечную частоту устанавливают экспериментально в ходе проведения моделирования равной  $(3 \div 5)f_B$ ;
- Sweep type: масштаб частотной оси. Графики строят с использованием логарифмического десятичного масштаба;
- Number of points per decade: количество точек на декаду в которых проводится анализ (обычно достаточно 10 точек);
- Vertical scale: масштаб вертикальной оси используют и линейный и логарифмический в децибелах;

- Output: выходной узел каскада, в котором измеряется переменное выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Это узел, в котором подключено сопротивление нагрузки  $R_n$ .

Графики АЧХ строят в двух масштабах: полулогарифмическом и логарифмическом. Полулогарифмический масштаб – логарифмический десятичный масштаб по частотной оси и линейный по оси амплитуд. Логарифмический масштаб – логарифмический масштаб по обеим осям.

График ФЧХ строят только в полулогарифмическом масштабе.

По полученной АЧХ, с помощью маркеров, определяют верхнюю  $f_v$  и нижнюю  $f_n$  границы рабочего диапазона частот. Этим частотам соответствует спад АЧХ по отношению к номинальному значению коэффициента усиления на 30% или на -3дБ в логарифмическом масштабе. Номинальное значение  $K$  определяют маркером на средней частоте  $f_{\text{ср}}$  рабочего диапазона. Частоту  $f_{\text{ср}}$  приблизительно определяют визуально по графику с логарифмическим масштабом оси частот, или как среднее геометрическое значений  $f_v$  и  $f_n$

$$f_{\text{ср}} = \sqrt{f_n \cdot f_v}$$

Для каскада с ОЭ проводят дополнительное моделирование с целью определения значения  $K_э$  при отключенных  $C_э$ ,  $R_n$  и  $r_u$ . Условия эксперимента и частотный диапазон не меняют, снимают только АЧХ.

**Влияние сопротивлений источника и нагрузки на коэффициент усиления**

В ходе проведения исследования определяют значения коэффициента усиления каскада по переменному току для различных режимов его работы путем снятия дополнительных АЧХ (без ФЧХ) с подключенным  $C_э$ . Определяют:

коэффициент усиления каскада с нагрузкой –  $K_n$  (подключены  $C_э$  и  $R_n$ , отключен  $r_u$ );

коэффициент усиления каскада при наличии внутреннего сопротивления источника входного напряжения –  $K_{r_u}$  (подключены  $C_э$  и  $r_u$ , отключен  $R_n$ ).

Также определяют влияние  $r_u$  на изменение значения  $f_B$ .

Моделирование частотных характеристик может быть осуществлено с помощью графопостроителя, без использования режима AC Analysis.

В отчёте приводят графики АЧХ снятые для разных значений коэффициента усиления каскада и только одной ФЧХ для основного коэффициента усиления  $K$ . Сравнивают значения величин  $f_H$ ,  $K$ ,  $K_3$ ,  $K_H$ ,  $K_{r_u}$  полученные путем моделирования с расчетными значениями, оценивают влияние  $r_u$  на изменение  $f_B$ .

Влияния изменения параметров каскадов на коэффициент усиления *Simulate/Analyses/ Parameter Sweep*. Анализ позволяет исследовать влияние изменений параметров любого отдельного компонента схемы на работу и характеристики усилительного каскада в целом. В качестве генератора входного сигнала  $U_{вх}$  включают источник синусоидального напряжения.

Необходимые установки:

- Device type, Name – тип и обозначение изменяемого компонента;
- Parameter – параметр компонента который будет изменяться;
- Start, Stop – начальное и конечное значения параметра;
- Sweep variation type – масштаб оси (в данном случае линейный);
- Increment и # of points – шаг приращения параметра и количество точек анализа. Величины взаимосвязаны, достаточно установить одну из них;
- Analysis to Sweep : AC Analysis – устанавливают анализ по переменному току. Опции для анализа те же, что и при снятии основной АЧХ;
- Output – устанавливают напряжение в узле подключения нагрузки  $U_{вых}$ .

Для каскада с ОЭ исследуют влияния величины коллекторного сопротивления  $R_k$  на коэффициент усиления каскада  $K$  (отключены  $R_H$  и  $r_u$ , подключен  $C_3$ ). Моделирование проводят для трех значений сопротивления:  $R_k$ ;  $1,25R_k$ ;  $0,75R_k$ . Значения коэффициента усиления  $K$  определяют по АЧХ в середине ра-

бочего диапазона частот каскада с помощью маркеров. По оси амплитуд используют линейный масштаб.

Для каскада с ОК проводят аналогичный анализ, но исследуют влияние на  $K$  изменения  $R_3$  (отключены  $R_H$  и  $r_U$ ). Моделирование проводят для трех значений сопротивления:  $R_3$ ;  $1,25R_3$ ;  $0,75R_3$ .

Оценку полученных результатов проводят путём сравнения значений  $K$  полученных при моделировании с расчётными значениями.

### Моделирование работы каскада во временной области

***Simulate/Analyses/ Transient Analysis.*** Моделируют работу каскада ОЭ во времени при воздействии на его вход синусоидального напряжения с различными амплитудами (отключены  $R_H$  и  $r_U$ ).

Характеристики транзистора имеют существенную нелинейность, поэтому усилительные каскады могут вносить значительные искажения в усиливаемый сигнал. В режиме малого сигнала, при малых амплитудах входного и выходного напряжений, амплитудная характеристика каскада близка к линейной зависимости и усиленное синусоидальное напряжение почти не имеет искажений. При увеличении амплитуды напряжения начинает сказываться нелинейность передаточной характеристики транзистора, кроме того, транзистор может входить в режим насыщения и отсечки. Всё это приводит к заметным искажениям формы выходного напряжения усилительного каскада. Для проведения моделирования на вход каскада подключают источник переменного синусоидального напряжения с начальной амплитудой порядка  $U_{вх}=(2\div 10)\text{мВ}$  и частотой  $f$  расположенной в рабочем диапазоне частот каскада, например  $f = (20\div 25)f_H$ .  
Необходимые установки:

- **Initial condition** – начальные условия выполнения анализа можно принять автоматические по умолчанию. Для исключения вывода длительного переходного процесса в момент включения схемы, можно включить опцию **Calculate DC operating point** – предварительный расчёт рабочей точки.

- Start time – время начала анализа устанавливают равным или нулю, или 1-2 периодам входного сигнала для исключения начального переходного процесса.
- End time – конечное время анализа устанавливают таким, чтобы можно было рассмотреть 2÷5 периодов выходного сигналов.
- Generate time steps automatically – установка автоматического выбора шага может приводить к некоторой «корявости» графиков. В этом случае лучше задать минимальное количество точек на временной оси или максимальное значение временного шага (исходя из значения порядка 100 точек на период).
- Output – выбирают узел подключения нагрузки каскада  $U_{\text{вых}}$ .

Моделирование проводят для нескольких значений  $U_{\text{вх}}$ , которые определяют опытным путём в ходе проведения анализа:

- для  $U_{\text{вх max}}$ , соответствующего  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых max}}$  – максимальному значению выходного напряжения, при котором синусоидальный сигнал  $U_{\text{вых}}$  ещё не имеет визуально заметных искажений;
- для  $U_{\text{вх раб}} = (0,25 \div 0,3) U_{\text{вх max}}$ , соответствующего  $U_{\text{вых}} = (0,25 \div 0,3) U_{\text{вых max}}$  – рабочий режим малого сигнала;
- для  $U_{\text{вх огр}} = (3 \div 4) U_{\text{вх max}}$  соответствующего  $U_{\text{вых}} > U_{\text{вых max}}$  – режим ограничения, когда выходное напряжение каскада имеет существенные нелинейные искажения.

В каждом из трёх случаев измеряют значения  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$  и оценивают коэффициент усиления каскада.

### Спектральный анализ выходного напряжения каскада с ОЭ

***Simulate/Analyses /Fourier Analysis.*** Определяют спектральный состав выходного напряжения каскада на основе преобразования Фурье, т.е. наличие и значения амплитуд высших гармоник при воздействии на вход каскада синусои-

дального напряжения. В ходе проведения моделирования Transient Analysis нелинейные искажения были оценены только визуально, здесь проводится исследование позволяющее оценить их количественно по отдельным гармоникам спектра выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  и по суммарному коэффициенту нелинейных искажений THD. Схема и условия проведения моделирования те же, что при Transient Analysis. Необходимые установки:

- Fundamental frequency – основная частота входного напряжения. Устанавливают частоту источника входного синусоидального напряжения как в Transient Analysis;
- Number of harmonics – количество оцениваемых гармоник спектра (9);
- Stop time – устанавливается как и в случае Transient Analysis;
- Vertical scale – установка линейного или логарифмического масштаба вертикальной оси графиков. Рекомендуется линейный масштаб;
- Display as bar graph – отображение графика в виде распределения амплитуд гармоник спектра по частотам;
- Normalize graph – амплитуда основной гармоники приводится к 1;
- Output – выбирают узел подключения нагрузки  $U_{\text{вых}}$ .

Моделирование проводят для нескольких значений амплитуды усиливаемого напряжения, как и в случае Transient Analysis:

- для  $U_{\text{вх max}}$ ;
- для  $U_{\text{вх раб}}$ ;
- для  $U_{\text{вх огр}}$ .

В каждом из трёх случаев определяют суммарный коэффициент гармоник THD, оценивают гармонический состав  $U_{\text{вых}}$ .

## Требования к отчету по работе

В отчёте должны быть приведены:

- расчёты номиналов всех входящих в каскады элементов и его параметров;
- принципиальные схемы каскадов с номиналами элементов;
- численные результаты проведённого моделирования;
- графики полученных характеристик;
- анализ результатов исследования в виде сравнения полученных результатов с теоретическими и расчётными величинами.

## Литература

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том 1: Пер. с нем., М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с. : ил.
2. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. Электроника и микропроцессорная техника : учеб. для вузов.— Изд. 3-е, перераб. и доп.— М. : Высшая школа, 2005.— 790 с. : ил.— Библиогр.: с. 786 - 787.
3. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с., ил.