УДК [621.375.1:621.375.4: 621.375.001.24]

И.А. Колесов

Стабилизация режимов каскадов на биполярных транзисторах Часть 1. Допуски положения рабочей точки каскада с общим эмиттером в режиме большого сигнала

Установлена связь допусков ухода рабочей точки транзистора в каскаде с общим эмиттером, работающем в режиме большого сигнала, при воздействии дестабилизирующих факторов (разброс параметров транзисторов, температурные и другие воздействия) с амплитудой выходного напряжения гармонического сигнала, параметрами элементов схемы и исходным положением рабочей точки. Результаты могут быть распространены на любые виды сигналов, активных элементов и на любые схемы каскадов, в том числе на каскады с обратными связями.

Введение

Успешность проектирования аналоговых устройств в существенной степени определяется начальным приближением выбранной схемы и положениями рабочих точек транзисторов в ее каскадах, определяемых на основе эскизного расчета. Основы такого расчета излагаются в учебной литературе [1–13]. При этом допустимой полагается относительная нестабильность тока коллектора в рабочей точке (РТ) порядка 10–20 %. Это положение справедливо для режима малого сигнала и является следствием линейного приближения разложения в ряд функциональных зависимостей характеристик устройств (коэффициента усиления, неравномерности амплитудно-частотных, шумовых и других характеристик) [8, 12–15]. В режиме большого сигнала такой допуск нестабильности РТ на начальном этапе проектирования в ряде случаев приводит к невозможности обеспечения требуемых уровней выходного напряжения и нелинейных искажений [15]. Связано это с особенностями работы транзистора в режиме большого сигнала, в котором небольшие изменения положения рабочей точки транзистора могут приводить к заходу его мгновенных напряжений и токов в существенно нелинейные области насыщения и отсечки коллекторного тока. Выясняется это, как правило, на одном из заключительных этапов проектирования [15] и часто требует кардинальной переработки проекта. Данное исследование посвящено устранению отмеченного недостатка в алгоритме разработки начального приближения проектируемой схемы аналогового устройства.

В первой части работы установлена связь между исходным положением рабочей точки транзистора в каскаде с общим эмиттером (ОЭ), амплитудой выходного напряжения гармонического сигнала, параметрами элементов схемы и допустимыми уходами рабочей точки при воздействии дестабилизирующих факторов (технологический разброс параметров транзисторов, температурные, климатические и другие воздействия).

Во второй части работы для расчета допусков изменения положений рабочих точек при воздействии дестабилизирующих факторов нагрузочные характеристики приводятся к промежуткам «коллектор — эмиттер» транзисторов для типовых каскадов аналоговых усилителей с другими способами включения транзисторов, с различными видами обратных связей, с динамическими нагрузками.

В третьей части рассмотрены парциальные уходы коллекторного тока в РТ за счет технологического разброса параметров транзисторов и изменения температуры среды.

В четвертой части даны соотношения для расчета нестабильности РТ при воздействии основных дестабилизирующих факторов для типовых схем обеспечения и стабилизации режима.

В пятой части изложены особенности использования справочных данных транзисторов при расчетах схем стабилизации режима.

Выбор рабочей точки

В усилителях гармонических сигналов малой и средней мощности, работающих без отсечки тока коллектора (рис. 1.1), рабочая точка транзистора обычно выбирается вблизи середины рабочего участка выходной динамической характеристики (ДХ) для переменного тока — нагрузочной прямой (рис. 1.2) [1–19]. Постоянное напряжение на коллекторе (между коллектором и эмиттером) в РТ

$$U_{\text{ко}} \geq u_{\text{к нас}} + (1,1 \div 1,2)U_{\text{кт}-} = u_{\text{к нас}} + (1,1 \div 1,2)\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{2}, \qquad (1.1)$$

где $U_{\text{кт}-}$ — амплитуда отрицательной полярности напряжения сигнала на коллекторе; $\Delta U_{\text{вых}}$ — требуемый размах выходного напряжения (перепад выходного напряжения $U_2(t)$ от максимального до минимального значения); $u_{\text{к нас}}$ — минимальное мгновенное напряжение между коллектором и эмиттером, соответствующее началу резкого роста нелинейных искажений за счет насыщения транзистора (заметим, что оно определяется по ДХ$_-$ в соответствии с рис. 1.2 при РТ A с координатами $U_{\text{ко}}$, $I_{\text{ко}}$).

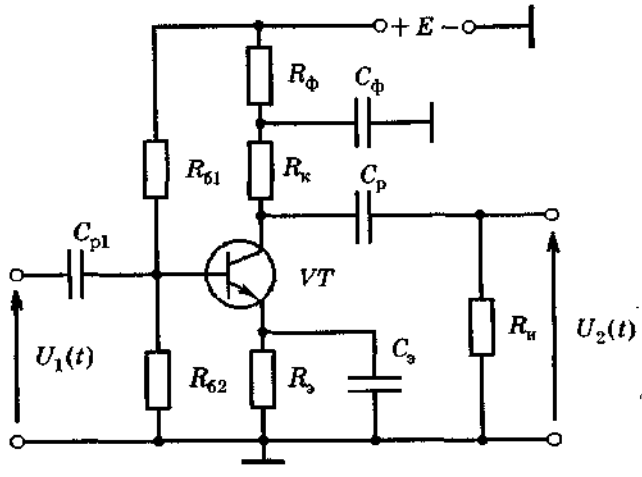


Рис. 1.1. Каскад с общим эмиттером

Постоянный ток коллектора в рабочей точке

$$I_{\text{ко}} \geq (1,1 \div 1,2)I_{\text{кт}-} = (1,1 \div 1,2)\frac{U_{\text{кт}+}}{R_{\text{н}-}} \approx (1,1 \div 1,2)\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{2R_{\text{н}-}}, \qquad (1.2)$$

где $I_{\text{кт}-}$ — амплитуда отрицательной полярности тока коллектора; $U_{\text{кт}+}$ — амплитуда положительной полярности напряжения на коллекторе; $R_{\text{н}-}$ — сопротивление коллекторной нагрузки для переменного тока,

$$R_{\text{н}-} = \frac{R_{\text{к}}R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}}. \qquad (1.3)$$

В выражениях (1.1), (1.2) *предусмотрен выбор* РТ *с запасами*: по напряжению не менее $u_{\text{к нас}} + (0,1 \div 0,2)U_{\text{кт}-}$, по току не менее $(0,1 \div 0,2)I_{\text{кт}-}$. Эти запасы необходимы для исключения из рабочего цикла нелинейных участков выходных характеристик транзистора:

$$u_{\text{к}} < u_{\text{к нас}}; \quad i_{\text{к}} < i_{\text{к min}} = I_{\text{ко}} - (1,1 \div 1,2)I_{\text{кт}-} \leq (0,05 \div 0,1)\frac{\Delta I_{\text{к}}}{2}.$$

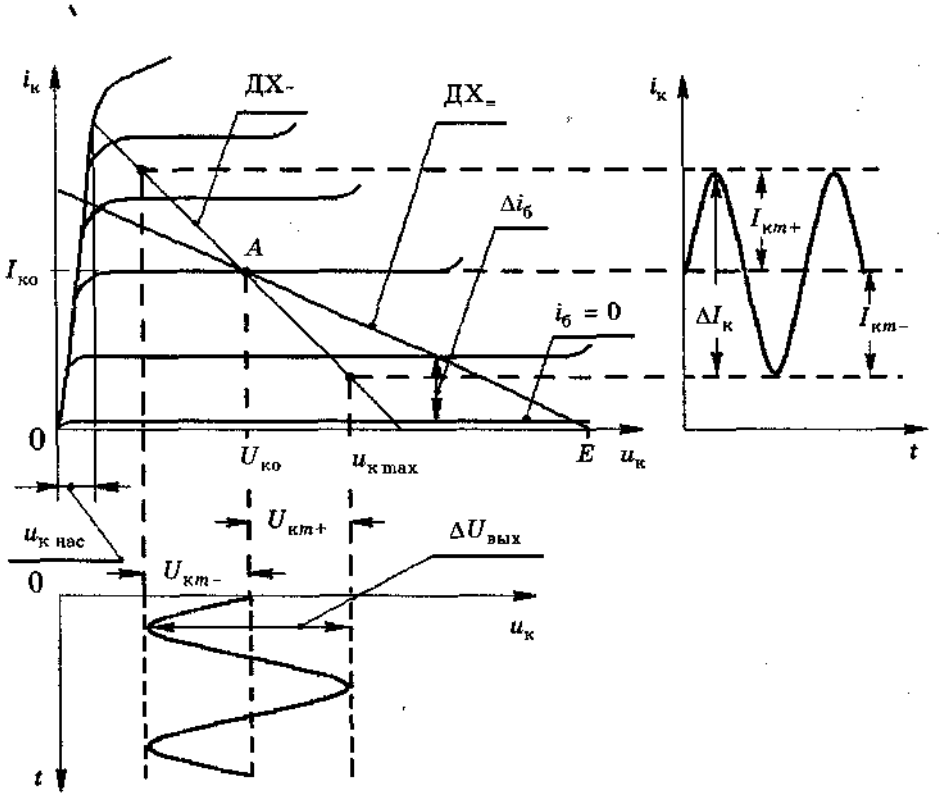


Рис. 1.2. Динамические характеристики каскада для постоянного (ДХ=) и переменного (ДХ~) токов

Таким образом исключается из рабочего цикла участок характеристик, определяемый переходом в зону насыщения, и участок характеристик, определяемый переходом в область отсечки тока коллектора (при $i_{б\,min} < (0,2 \div 0,5)\Delta i_б$, где $\Delta i_б$ — шаг по току базы на выходных характеристиках транзистора). Кроме того, запасы принципиально необходимы для обеспечения допусков изменения положения рабочей точки при воздействии дестабилизирующих факторов.

Допуски изменения тока коллектора в РТ

Под воздействием дестабилизирующих факторов РТ транзистора перемещается (рис. 1.3) ($A_{нас} \leftarrow \ldots A_{max} \leftarrow \ldots A \ldots \rightarrow A_{отс}$) по нагрузочной прямой для постоянного тока (по ДХ=). Эта выходная динамическая характеристика определяется выражением

$$E = U_{к=} + I_{к=} R_{н=}, \qquad (1.4)$$

где E — напряжение источника питания; $U_{к=}$ — текущее значение постоянного напряжения на коллекторе (при бесконечно медленном изменении тока базы и $U_1(t) = 0$); $I_{к=}$ — текущее значение постоянного тока коллектора (при бесконечно медленном изменении тока базы и $U_1(t) = 0$); $R_{н=}$ — сопротивление нагрузки транзистора по постоянному току (для рис. 1.1 $R_{н=} = R_ф + R_к + R_э$).

В соответствии с перемещением РТ изменяется положение нагрузочной прямой для переменного тока (ДХ~), проходящей через РТ:

$$\Delta u_к = u_к - U_{ко} = -(i_к - I_{ко}) R_{н~} = \Delta i_к R_{н~}, \qquad (1.5)$$

где $u_к$, $i_к$ — текущие значения напряжения на коллекторе и тока коллектора при наличии сигнала на входе ($U_1(t) \neq 0$), при постоянном токе коллектора и постоянном напряжении на коллекторе в рабочей точке ($U_{к=} = U_{ко}$, $I_{к=} = I_{ко}$); $\Delta u_к$, $\Delta i_к$ — текущие значения приращений напряжения на коллекторе и тока коллектора под действием входного сигнала $U_1(t)$.

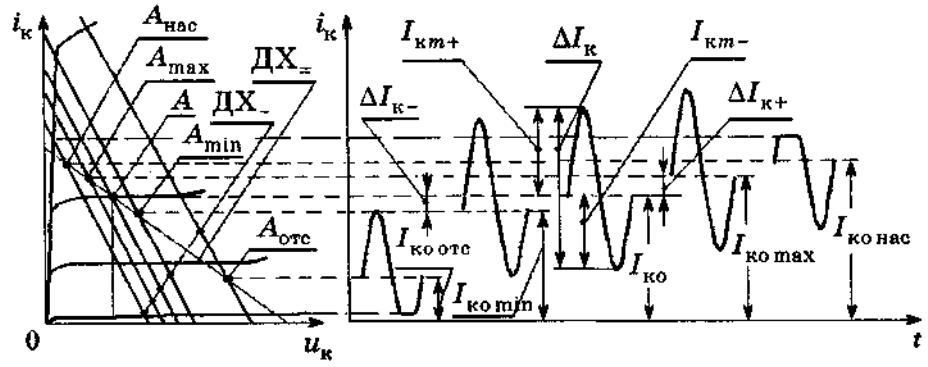


Рис. 1.3. Влияние изменения положения ДХ- на форму выходного сигнала при гармоническом входном воздействии

Из рис. 1.2, 1.3 видно, что изменение положения РТ в пределах отрезка $[A_{max}, A_{min}]$ при неизменном размахе тока коллектора

$$\Delta I_к = I_{кm+} + I_{кm-} \tag{1.6}$$

обеспечивает требуемый размах выходного напряжения

$$\Delta U_{вых} = U_{кm-} + U_{кm+} = \Delta I_к R_н . \tag{1.7}$$

Выходное напряжение при этом по форме близко к форме гармонического входного сигнала ($U_{кm-} \approx U_{кm+}$). Выход РТ за пределы отрезка $[A_{max}, A_{min}]$ ведет к резкому увеличению нелинейных искажений (см. рис. 1.3). Эти искажения обусловлены ограничением положительной полярности сигнальной составляющей тока коллектора при $I_{ко\,нас} > I_{ко\,max}$ (заход в область насыщения) или ограничением сигнальной составляющей отрицательной полярности при $I_{ко\,отс} < I_{ко\,min}$ (заход в область отсечки тока коллектора).

Если принять, что обеспечение заданного размаха выходного напряжения ($\Delta U_{вых} = 2U_m$) допустимо при коэффициентах гармоник порядка 5–10 % [1–7, 9], то верхняя граница положения РТ по току коллектора $I_{ко\,max}$ определяется заходом минимального мгновенного напряжения на коллекторе на линию критического режима (в область насыщения), а нижняя граница — $I_{ко\,min}$ — заходом минимального мгновенного тока коллектора в область отсечки ($i_{к\,min} \approx (0,05 \div 0,1) I_{ко}$).

Выбранное исходное положение рабочей точки $A(U_{ко}, I_{ко})$ при этом обеспечивает заданную амплитуду выходного напряжения под воздействием дестабилизирующих факторов (рис. 1.4), если

$$I_{к=} = I_{ко-\Delta I_{к-}}^{+\Delta I_{к+}}, \tag{1.8}$$

где $\Delta I_{к+}$ и $\Delta I_{к-}$ — максимально допустимые уходы тока коллектора в РТ под воздействием дестабилизирующих факторов (в сторону увеличения и в сторону уменьшения соответственно).

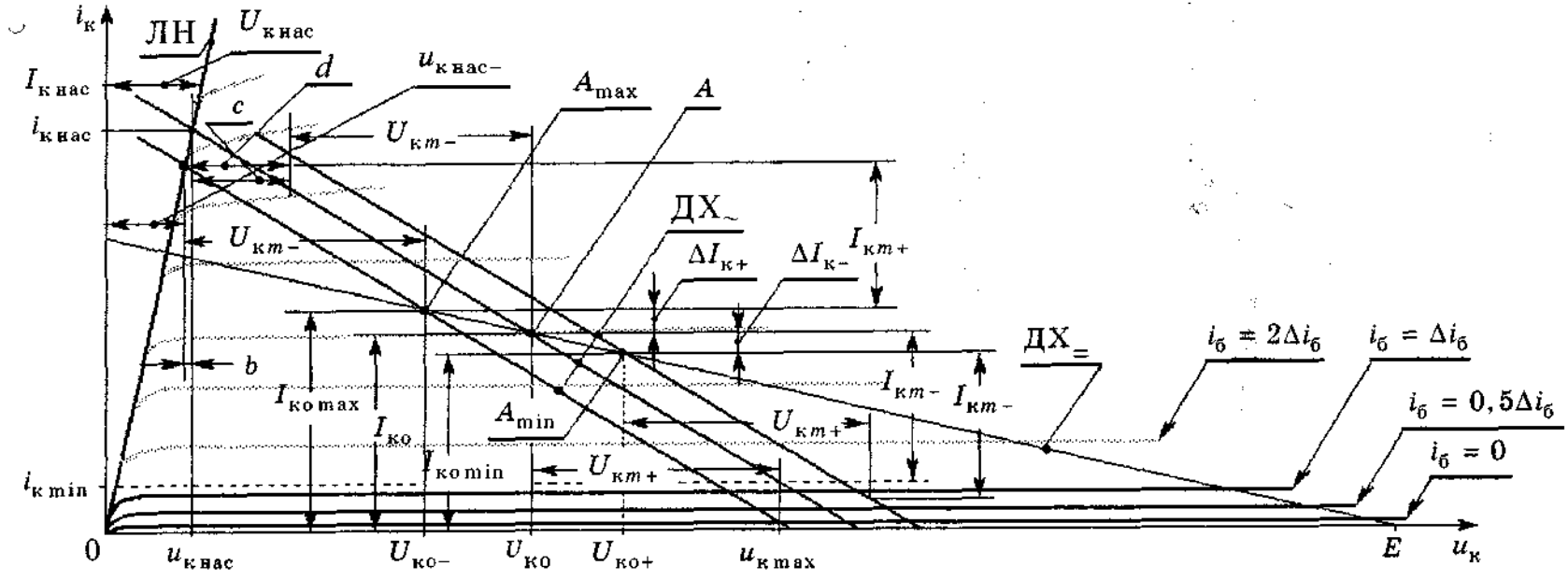


Рис. 1.4. Определение допусков ухода тока коллектора в рабочей точке (в сторону увеличения и в сторону уменьшения)

Допуск ухода $I_{ко}$ ***в сторону уменьшения*** $\Delta I_{к-}$. В рабочей области выходных статических характеристик транзистора допуск на уменьшение тока коллектора под действием дестабилизирующих факторов $\Delta I_{к-}$ практически не зависит от сопротивления нагрузки для постоянного тока $R_{н=}$, так как мал наклон выходных статических характеристик $i_к(u_к)$ при малых токах базы ($i_{б\min} \approx \Delta i_б$) (см. рис. 1.3, 1.4). На этом основании $\Delta I_{к-}$ *можно определить приближенным равенством*

$$\Delta I_{к-} \approx I_{ко} - I_{кт-} - i_{к\min}, \tag{1.9}$$

где $i_{к\min}$ — минимальное мгновенное значение тока коллектора (соответствует $u_{к\max}$) при выбранном $U_{ко}$ для обеспечения заданной величины $U_{кт+}$. Обычно для гармонического сигнала согласно (1.2)

$$i_{к\min} \geq (5 \div 10) \cdot 10^{-2} I_{ко}.$$

Допуск ухода $I_{ко}$ ***в сторону увеличения*** $\Delta I_{к+}$ существенно зависит от сопротивления нагрузки для постоянного тока $R_{н=}$, так как он ограничивается линией насыщения тока коллектора (ЛН), соответствующей переходу транзистора в режим насыщения (см. рис. 1.4). Этот допуск связан с выбранным запасом $U_{ко}$ (1.1). Для выявления связи представим (1.1) в виде

$$U_{ко} = u_{кнас} + U_{кт-} + \Delta U_m, \tag{1.10}$$

где $\Delta U_m \geq (0{,}1 \div 0{,}2) U_{кт-}$.

Увеличение $I_{ко}$ до $I_{ко} + \Delta I_{ко+}$ уменьшает $U_{ко}$ (при обеспечении заданной амплитуды отрицательной полярности выходного напряжения $U_{кт-}$) до

$$U_{ко-} = u_{к\,нас.} + U_{кт-}. \tag{1.11}$$

Изменение напряжения на коллекторе транзистора в рабочей точке при этом равно (см. рис. 1.4)

$$\Delta U_{ко-} = U_{ко} - U_{ко-} = \Delta I_{ко+} R_{н=} = d. \tag{1.12}$$

Приращение d состоит из двух частных приращений:

- приращения b за счет конечной крутизной линии насыщения

$$S_н = \frac{I_{к\,нас}}{U_{к\,нас}}; \tag{1.13}$$

- приращения c, обусловленного сдвигом ДХ$_-$.

Согласно рис. 1.4

$$d = b + c = \left(\frac{\Delta U_{ко-}}{R_{н-}} \frac{1}{S_н} - \frac{\Delta I_{ко+}}{S_н} \right) + \Delta U_{ко-} = \Delta I_{ко+} R_{н=}, \tag{1.14}$$

где $\Delta I_{ко+}/S_н$ — изменение напряжения насыщения при сдвиге $\Delta I_{ко+}$.

Преобразовав (1.14), получим

$$\Delta U_{ко-} \left(\frac{1 + S R_{н-}}{R_{н-}} \right) = \Delta I_{ко+} \left(1 + S R_{н=} \right). \tag{1.15}$$

Отсюда получается соотношение для оценки максимально допустимого ухода тока коллектора в РТ в сторону увеличения под воздействием дестабилизирующих факторов:

$$\Delta I_{к+} = \frac{U_{ко} - u_{к\,нас} - U_{кт-}}{R_{н-}} \frac{1 + S_н R_{н-}}{1 + S_н R_{н=}}. \tag{1.16}$$

Таким образом, *допустимое увеличение тока коллектора в рабочей точке* $\Delta I_{к+}$ *при заданной амплитуде выходного напряжения определяется четырьмя параметрами*:

Допуск ухода $I_{ко}$ ***в сторону уменьшения*** $\Delta I_{к-}$. В рабочей области выходных статических характеристик транзистора допуск на уменьшение тока коллектора под действием дестабилизирующих факторов $\Delta I_{к-}$ практически не зависит от сопротивления нагрузки для постоянного тока $R_{н=}$, так как мал наклон выходных статических характеристик $i_к(u_к)$ при малых токах базы ($i_{б\min} \approx \Delta i_б$) (см. рис. 1.3, 1.4). На этом основании $\Delta I_{к-}$ *можно определить приближенным равенством*

$$\Delta I_{к-} = I_{ко} - I_{кт-} - i_{к\min}, \tag{1.9}$$

где $i_{к\min}$ — минимальное мгновенное значение тока коллектора (соответствует $u_{кmax}$) при выбранном $U_{ко}$ для обеспечения заданной величины $U_{кт+}$. Обычно для гармонического сигнала согласно (1.2)

$$i_{к\ min} \geq (5 \div 10) \cdot 10^{-2} I_{ко}.$$

Допуск ухода $I_{ко}$ ***в сторону увеличения*** $\Delta I_{к+}$ существенно зависит от сопротивления нагрузки для постоянного тока $R_{н=}$, так как он ограничивается линией насыщения тока коллектора (ЛН), соответствующей переходу транзистора в режим насыщения (см. рис. 1.4). Этот допуск связан с выбранным запасом $U_{ко}$ (1.1). Для выявления связи представим (1.1) в виде

$$U_{ко} = u_{кнас} + U_{кт-} + \Delta U_m, \tag{1.10}$$

где $\Delta U_m \geq (0{,}1 \div 0{,}2) U_{кт-}$.

Увеличение $I_{ко}$ до $I_{ко} + \Delta I_{ко+}$ уменьшает $U_{ко}$ (при обеспечении заданной амплитуды отрицательной полярности выходного напряжения $U_{кт-}$) до

$$U_{ко-} = u_{к\,нас} + U_{кт-}. \tag{1.11}$$

Изменение напряжения на коллекторе транзистора в рабочей точке при этом равно (см. рис. 1.4)

$$\Delta U_{ко-} = U_{ко} - U_{ко-} = \Delta I_{ко+} R_{н=} = d. \tag{1.12}$$

Приращение d состоит из двух частных приращений:

- приращения b за счет конечной крутизной линии насыщения

$$S_н = \frac{I_{к\,нас}}{U_{к\,нас}}; \tag{1.13}$$

- приращения c, обусловленного сдвигом ДХ$_-$.

Согласно рис. 1.4

$$d = b + c = \left(\frac{\Delta U_{ко-}}{R_{н-}} \frac{1}{S_н} - \frac{\Delta I_{ко+}}{S_н} \right) + \Delta U_{ко-} = \Delta I_{ко+} R_{н=}, \tag{1.14}$$

где $\Delta I_{ко+}/S_н$ — изменение напряжения насыщения при сдвиге $\Delta I_{ко+}$.

Преобразовав (1.14), получим

$$\Delta U_{ко-} \left(\frac{1 + S R_{н-}}{R_{н-}} \right) = \Delta I_{ко+} (1 + S R_{н=}). \tag{1.15}$$

Отсюда получается соотношение для оценки максимально допустимого ухода тока коллектора в РТ в сторону увеличения под воздействием дестабилизирующих факторов:

$$\Delta I_{к+} = \frac{U_{ко} - u_{к\,нас} - U_{кт-}}{R_{н-}} \frac{1 + S_н R_{н-}}{1 + S_н R_{н=}}. \tag{1.16}$$

Таким образом, *допустимое увеличение тока коллектора в рабочей точке* $\Delta I_{к+}$ *при заданной амплитуде выходного напряжения определяется четырьмя параметрами:*

- запасом положения рабочей точки по напряжению ($U_{\text{ко}} - U_{\text{кт}-}$);
- крутизной линии насыщения транзистора ($u_{\text{к нас}}$, $i_{\text{к нас}}$, $S_{\text{н}}$);
- сопротивлением нагрузки каскада для постоянного тока ($R_{\text{н}=}$);
- сопротивлением нагрузки каскада для переменного тока ($R_{\text{н}\sim}$).

Заметим, что в общем случае сопротивление нагрузки для постоянного тока $R_{\text{н}=}$ определяется суммой сопротивлений, по которым протекает генерируемая источником питания постоянная составляющая тока выходного электрода активного элемента (за исключением самого активного элемента). Сопротивление нагрузки для переменного тока $R_{\text{н}\sim}$ определяется сопротивлением, которое встречает переменная составляющая тока выходного электрода активного элемента на пути протекания от выходного электрода до общего провода.

Заключение

В заключение систематизируем *порядок выбора положения* РТ *и расчета максимально-допустимого ухода тока коллектора, обеспечивающего заданную амплитуду выходного напряжения сигнала в каскаде с общим эмиттером.*

1. *Определение положения* РТ транзистора в схеме с ОЭ ($U_{\text{ко}}$, $I_{\text{ко}}$) *производится* согласно формулам (1.1), (1.2) по известным величинам амплитуды выходного напряжения $U_{\text{кт}\sim} \approx U_{2m} \approx \dfrac{\Delta U_{\text{вых}}}{2}$ и сопротивления нагрузки для переменного тока $R_{\text{н}\sim}$ *с учетом запаса на исключение области насыщения, запаса на исключение области отсечки тока коллектора и запаса на нестабильность положения* РТ *под воздействием дестабилизирующих факторов*:

$$U_{\text{ко}} - U_{\text{кт}\sim} \geq u_{\text{к нас}} + (0{,}1 \div 0{,}2)U_{\text{кт}\sim} \approx u_{\text{к нас}} + (0{,}1 \div 0{,}2)\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{2}; \qquad (1.17)$$

$$I_{\text{ко}} - I_{\text{кт}\sim} \geq (0{,}1 \div 0{,}2)I_{\text{кт}\sim} = (0{,}1 \div 0{,}2)\frac{U_{\text{кт}+}}{R_{\text{н}\sim}}. \qquad (1.18)$$

2. *Выбранная РТ определяет мощность, рассеиваемую транзистором* на коллекторном переходе, $P_{\text{ко}} = I_{\text{ко}}U_{\text{ко}}$, которая не должна превышать

$$P_{\text{ко}} = I_{\text{ко}}U_{\text{ко}} \leq (0{,}7 \div 0{,}8)P^{*}_{\text{к max}},$$

где $P^{*}_{\text{к max}}$ — справочное значение максимально допустимой мощности, рассеиваемой на коллекторном переходе выбранного транзистора при стандартной температуре перехода, равной 25 °С. Запас по мощности рассеяния транзистора необходим для обеспечения его работоспособности при саморазогреве (за счет потребляемой мощности питания) и при воздействии повышенной температуры окружающей среды.

3. *Через выбранную рабочую точку* на семействе выходных статических характеристик транзистора в схеме с ОЭ ($i_{\text{к}}(u_{\text{к}}, i_{\text{б}})$) *проводится* ДХ~.

4. *После определения сопротивления нагрузки для постоянного тока по соотношениям* (1.16) и (1.9) *рассчитываются максимально допустимые уходы тока коллектора в РТ под воздействием дестабилизирующих факторов* ($\Delta I_{\text{к}+}$ и $\Delta I_{\text{к}-}$ — в сторону увеличения и в сторону уменьшения соответственно).

Изложенный порядок выбора РТ и расчета допусков ухода тока коллектора в РТ под воздействием дестабилизирующих факторов можно использовать для других активных элементов и видов сигналов, а также для других схем усилительных каскадов. Для этого необходимо «привести» выходные напряжения и токи сигналов через $R_{\text{н}\sim}$ *к промежутку коллектор-эмиттер* транзистора. «Приведение» заключается в пересчете выходного напряжения U_{2m} и $R_{\text{н}\sim}$ к эквивалентным значениям (действующим на промежуток коллектор-эмиттер,

в том числе и по амплитудам сигналов положительной и отрицательной полярностей), обеспечивающим заданные U_{2m} для других сигналов, способов включения и схем каскадов. Целесообразность такого «приведения» становится очевидной, если учесть, что в абсолютном большинстве случаев характеристики транзисторов в справочниках [16–21] приводятся только для наиболее распространенного способа включения транзисторов — с ОЭ.

Соотношения (1.9), (1.16) могут быть использованы и для оценки правильности выбора РТ, если она была выбрана предварительно из иных соображений.

Литература

1. Опадчий Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс) : учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров ; под ред. О.П. Глудкина. – М. : Горячая линия — Телеком, 2005. – 768 с.

2. Палов В.Н. Схемотехника аналоговых устройств : учебник для вузов / В.Н. Палов, В.Н. Ногин. – 2-е изд., исправ. – М. : Горячая линия — Телеком, 2001. – 320 с.

3. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства : учеб. пособие для вузов / В.Н. Ногин. – М. : Радио и связь, 1992. – 304 с.

4. Остапенко Г.С. Усилительные устройства : учеб. пособие для вузов / Г.С. Остапенко. – 2-е изд. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.

5. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства : учебник для вузов / Г.В. Войшвилло. – 2-е. изд. – М. : Радио и связь, 1983. – 264 с.

6. Головин О.В. Электронные усилители / О.В. Головин, А.А. Кубицкий. – М. : Связь, 1983. – 320 с.

7. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства : учеб. пособие для вузов / И.Г. Мамонкин. – 2-е изд. – М. : Связь, 1977. – 360 с.

8. Мигулин И.Н. Усилительные устройства на транзисторах (проектирование) / И.Н. Мигулин, М.З. Чаповский. – 2-е изд. – Киев : Техника, 1974. – 428 с.

9. Варшавер Б.А. Расчет и проектирование импульсных усилителей : учеб. пособие для вузов / Б.А. Варшавер. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 1975. – 288 с.

10. Шарыгина Л.И. Сборник задач по усилительным устройствам : учеб. пособие / Л.И. Шарыгина. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2001. –115 с.

11. Красько А.С. Проектирование аналоговых электронных устройств : метод. указ. / А.С. Красько. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – 31 с.

12. Жаркой А.Г. Расчет нелинейных искажений гармонических сигналов в транзисторных усилителях: методические указания к курсовому проектированию по дисциплинам «Усилительные устройства» и «Радиоприемные устройства» для студентов специальности «Радиотехника» / А.Г. Жаркой. – Томск : ротапринт ТИАСУРа, 1987 г. – 54 с.

13. Мелихов С.В. Чувствительность радиоприемных устройств: учеб. пособие / С.В. Мелихов, М.К. Назаренко. – Томск : Томск. гос. акад. систем упр. и радиоэлектроники, 1995. – 65 с.

14. Шор К.Г. Малошумящие транзисторные усилители / К.Г. Шар // Биб-ка по радиоэлектронике. – Вып. 28. – М. : Энергия, 1971. – 112 с.

15. Мелихов С.В. Влияние нагружающих обратных связей на уровень выходного сигнала усилительных каскадов / С.В. Мелихов, И.А. Колесов // Широкополосные усилители / под ред. А.А. Кузьмина. – Томск : Томск. ин-т автоматизир. систем упр. и радиоэлектроники, 1975. – С. 111–117.

16. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам / В.Ю. Лавриненко. – 8-е изд., перераб. – Киев : Техника, 1977. – 376 с.

17. Транзисторы для аппаратуры широкого применения : справочник /К.М. Брежнева [и др.] ; под ред. Б.Л. Перельмана. – М. : Радио и связь, 1981. – 656 с.

18. Полупроводниковые приборы: Транзисторы : справочник / В.Л. Аронов [и др.] ; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 904 с.

19. Галкин В.И. Полупроводниковые приборы : справочник / В.И. Галкин, А.Л. Булычев, В.А. Прохоренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Беларусь, 1987. – 285 с.

20. Транзисторы : справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с.

21. Полупроводниковые приборы народнохозяйственного назначения: Транзисторы. Отраслевой руководящий документ. Группа 6341 // Сб. справ. листков. РД 11 0817.2-92. Издание официальное. – М. : Российский НИИ «Электростандарт», 1992. – 360 с.

Колесов Игорь Анатольевич
Канд. техн. наук, доцент, проф. каф. средств радиосвязи ТУСУРа
Тел. : (3822) 41 37 03, 41 31 74
Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

I.A. Kolesov

Stabilization of a bipolar transistor regime
1. Tolerance of the common emitter transistor operating point in case of large signals

There was investigated the relation between the output signal, the circuit parameters and the common emitter transistor operating point tolerance in case of large signals under the influence of destabilizing factors (transistor parameters scattering, temperature and other parameters variation). The results can be used while analyzing any kind of signals, active devices and circuits, including feedback stages.