

Р. А. КАРПЕНКО

ТЕМПЕРАТУРНА СТАБІЛЬНІСТЬ ТРАНЗИСТОРНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПРИ БЕЗПОСЕРЕДНЬОМУ З'ЄДНАННІ КАСКАДІВ ТА КОМБІНОВАНОМУ ЗВОРТНОМУ ЗВ'ЯЗКУ

Простота і економічність безпосереднього з'єднання каскадів транзисторних підсилювачів забезпечили їм широке застосування в інженерній практиці.

Стабілізація режиму таких підсилювачів забезпечується різноманітними зворотними зв'язками. Проте немає зручних для інженерної практики критеріїв оцінки температурної стабільності схем, аналогічних відомим, для каскадів з одним транзистором [1]. Ця стаття присвячена кількісним характеристикам температурної стабільності найбільш поширених схем транзисторних підсилювачів, одержаних на основі аналізу типової узагальненої схеми, зображеної на рис. 1.

Для оцінки температурної стабільності режиму такої схеми зручно скористатися поняттям коефіцієнта нестабільності $S = \Delta I_k / \Delta I_{k0}$ (ΔI_k — повний приріст колекторного струму; ΔI_{k0} — приріст теплового струму колектора).

Приріст струму колектора першого транзистора можна визначити як функцію від струму I_{k01} і I_{k02} з рівнянь, справедливих для схеми рис. 1,

$$E_k = I_{k1} R_{k1} + I_{b2} (R_{k1} + r_{b2}) + I_{e2} (r_{e2} + R'_{e2} + R''_{e2}) - I_{b1} R''_{e2}; \quad (1)$$

$$E_k = I_{k2} R_{k2} + I_0 (R_{e1} + R_0 + R_{k2}) + I_{e1} R_{e1}; \quad (2)$$

$$I_{e2} R''_{e2} = I_{b1} (R'_0 + r_{b1} + R''_{e2}) + I_{e1} (r_{e1} + R_{e1}) + I_0 R_{e1}, \quad (3)$$

де I_0 — струм через опір R_0 ;

I_e, I_b, I_k — постійні струми емітера, бази і колектора обох транзисторів;

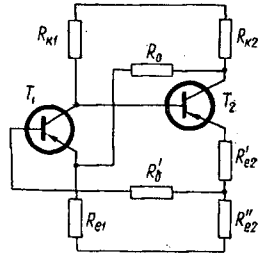


Рис. 1. Типова узагальнена схема підсилювача при безпосередньому з'єднанні каскадів та комбінованому зворотному зв'язку.

для схеми рис. 1,

α — статичний коефіцієнт підсилення по струму в схемі із спільною базою;

r_b, r_e — опори транзисторів по постійному струму.

Розв'яжемо систему рівнянь (1) — (3) відносно $I_{к1}$; $I_{к2}$. Визначаючи приріст струмів колекторів, слід у всіх рівняннях замінити статичні параметри транзистора на динамічні

$$\alpha_{\text{дин}} = \alpha_{\text{стат}} (r_k + r_b) / (r_k + r_b + R_{\text{н}}),$$

де $R_{\text{н}}$ — опір навантаження каскаду змінному струму;

r_k, r_e — диференціальні опори колекторного та емітерного переходів транзисторів;

r_b — об'ємний опір бази [2].

Визначимо коефіцієнти нестабільності кожного транзистора, враховуючи зворотний зв'язок,

$$S_{\beta 1} = \frac{\Delta I_{к1}}{\Delta I_{к01}}; \quad S_{\beta 2} = \frac{\Delta I_{к2}}{\Delta I_{к02}}.$$

При цьому $S_{\beta 1}, S_{\beta 2}$ зручно виразити через коефіцієнти нестабільності тих же каскадів без врахування зворотних зв'язків, визначених за формулами для каскаду з одним транзистором, і глибини зворотного зв'язку. Одержимо вирази

$$S_{\beta 1} = \frac{S_{01}}{(1 + K_1 \beta_1)} \cdot \frac{1}{(1 + K_{\beta 1} \cdot K_2 \beta_2)}, \quad (4)$$

де

$$S_{01} = \frac{1 + \frac{R_1}{R_{b1} + R_{л1}}}{1 - \alpha_1 + \frac{R_1}{R_{b1} + R_{л1}}};$$

$$K_1 = \frac{\alpha_1 R_{н1}}{R_1 + (R_{b1} + R_{л1})(1 - \alpha_1)}; \quad K_{\beta 1} = \frac{K_1}{1 + K_1 \beta_1}. \quad [3]$$

Відповідно для першого транзистора

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{дин1}}; \quad R_{b1} = R'_b + r_{b1}; \quad R_1 = [r_{e1} + R_{e1} \parallel (R_0 + R_{к2})];$$

$$R_{л1} = (R_2 \parallel R_3) (1 - K'_2 \beta_2);$$

де

$$R_{н1} = R_{к1} \parallel R_{\text{вх2}};$$

$$R_2 = R''_e; \quad R_3 = [r_{e2} + R'_{e2} + (R_{к1} + r_{b2})(1 - \alpha_{\text{дин2}})];$$

$$K'_2 = \alpha_{\text{дин2}} R_{н2} / R_3;$$

$$R_{н2} = R_{к2} \parallel (R_0 + R_{e1});$$

$$\beta_2 = R_{e1} / (R_{e1} + R_0);$$

$$R_{\text{вх2}} = [R_{e2} / (1 - \alpha_{\text{дин2}})] + r_{b2}; \quad R'_{e2} = R''_{e2} + r_{e2};$$

$$\beta_1 = R_2 / (R_2 + R'_3); \quad R'_3 = [r_{e2} + R'_{e2} + r_{b2}(1 - \alpha_{\text{дин2}})];$$

$$K_2 = \alpha_{\text{дин2}} R_{н2} / [R_{e2} + r_{b2}(1 - \alpha_{\text{дин2}})]$$

(\parallel позначає паралельне з'єднання елементів).

Коефіцієнт нестабільності другого транзистора

$$S_{\beta 2} = \frac{S_{02}}{(1 - K_2' \beta)} \cdot \frac{1}{(1 + K_{\beta 1} K_2' \cdot \beta_2)}, \quad (5)$$

де

$$S_{02} = \frac{1 + \frac{R_1'}{r_{\beta 2} + R_{K1}}}{1 - \alpha_{\text{дин}2} + \frac{R_1'}{r_{\beta 2} + R_{K1}}};$$

$$K_2'' = \frac{\alpha_{\text{дин}2} R_{H2}}{R_1' + (1 - \alpha_{\text{дин}2})(r_{\beta 2} + R_{K1})};$$

$$\beta = \beta_2 \cdot \beta_2'; \quad \beta_2' = \frac{R_{e2}''}{R_{e2}'' + R_{\beta 1} + \frac{R_1}{(1 - \alpha_{\text{дин}1})}};$$

$$R_1' = (r_{e2} + R_{e2}') + \left[R_{e2}'' \parallel \left(R_{\beta 1} + \frac{R_1}{1 - \alpha_{\text{дин}1}} \right) \right] (1 + K_1');$$

$$K_1' = \frac{\alpha_{\text{дин}1} R_{K1}}{[R_1 + (1 - \alpha_{\text{дин}1}) R_{\beta 1}]}$$

Покладаючи R_{e2}' , $R_{\beta 1}$ або $R_{\beta 1}'$ рівними нескінченності, одержимо вираз коефіцієнтів нестабільності для простіших схем, зображених на рис. 2. Коефіцієнти нестабільності наведені в таблиці.

Абсолютний приріст струмів обох транзисторів можна визначити за одержаними формулами коефіцієнтів нестабільності кож-

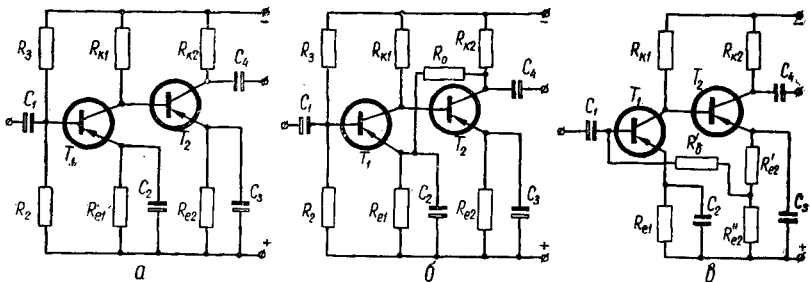


Рис. 2. Принципові схеми найбільш поширених різновидностей транзисторних підсилювачів при безпосередньому з'єднанні каскадів:

а — при відсутності загального зворотного зв'язку; б — із загальним зворотним зв'язком по напрузі; в — із загальним зворотним зв'язком по струму.

ного транзистора. Наприклад, абсолютний приріст струму колектора другого транзистора, обумовлений зміною теплових струмів колекторів обох транзисторів, знаходимо із співвідношення

$$\begin{aligned} \Delta I_{K2(I_{K0})} = & \Delta I_{K2(I_{K02})} - \Delta I_{K1(I_{K01})} \frac{R_{H1} K_2}{R_{H2}} + \\ & + \Delta I_{\beta 1(I_{K01})} \frac{R_{\beta} K_2'}{R_{H2}}, \end{aligned} \quad (6)$$

Транзистори

СХЕМА

Рис. 2, а	Рис. 2, б	Рис. 2, в
$S_{\beta 1} = S_{01}(a) = \frac{1 + \frac{R_{e1}}{R_x}}{1 - \alpha_1 + \frac{R_{e1}}{R_x}},$ $R_x = R_2 \parallel R_3$	$S_{\beta 1} = \frac{S_{01}(a)}{1 + K_1 K_2 \beta_2};$ $K_1 = \frac{\alpha_2 R_{k1}}{R_{e1} + (1 - \alpha_1) R_x};$ $K_2 = \frac{\alpha_2 R_{h2}}{R_{e2} + R_{k1} (1 - \alpha_1)};$ $\beta_2 = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_0};$ $R_{h2} = R_{k2} \parallel (R_0 + R_{e1});$	$S_{\beta 1} = \frac{S_{01}}{1 + K_1 \beta_1};$ $S_{01} = \frac{1 + \frac{R_{e1}}{R_0' + R_x}}{1 - \alpha_1 + \frac{R_{e1}}{R_0' + R_x}};$ $K_1 = \frac{\alpha_1 R_{k1}}{R_{e1} + (R_0' + R_x) (1 - \alpha_1)};$ $\beta_1 = \frac{R_{e2}'}{R_{e2}' + R_{e2}''};$ $R_{h2} = R_{k1} \parallel R_{b22};$ $R_{b22} = \frac{R_{e2}' + R_{e2}''}{1 - \alpha_2};$ $R_x = R_{e2}'' \parallel [R_{e1}' + R_{k1} (1 - \alpha_2)];$
T_2 $S_{\beta 2} = S_{02}(a) = \frac{1 + \frac{R_{e2}}{R_{k1}}}{1 - \alpha_2 + \frac{R_{e2}}{R_{k1}}}$	$S_{\beta 2} = \frac{S_{02}(a)}{1 + K_1 K_2 \beta_2}$	$S_{\beta 2} = S_{02} = \frac{R_{k1}}{1 + \frac{R_{e2}' + (R_{e2}'' \parallel R_{b21}) (1 + K_1')}{1 - \alpha_2 + \frac{R_{e2}' + (R_{e2}'' \parallel R_{b21}) (1 + K_1')}{R_{k1}}}};$ $R_{b21} = R_0' + \frac{R_{e1}}{1 - \alpha_1};$ $K_1' = \frac{\alpha_1 R_{k1}}{R_{e1} + (1 - \alpha_1) R_0'}$

$$r_e \ll R_{e1}; \quad r_e \ll (R_0 + R_x); \quad R_x \ll r_e(1 - \alpha_1); \quad \alpha = \alpha_{\text{ср}}^{\text{ср}}$$

де

$$\begin{aligned}\Delta I_{\kappa 2(I_{\kappa 02})} &= S_{\beta 2} \Delta I_{\kappa 02}; \\ \Delta I_{\kappa 1(I_{\kappa 01})} &= S_{\beta 1} \Delta I_{\kappa 01}; \\ \Delta I_{\delta 1(I_{\kappa 01})} &= \frac{\Delta I_{\kappa 01}}{\alpha_{\text{дин}1}} [S_{\beta 1} (1 - \alpha_{\text{дин}1}) - 1]; \\ R_d &= R_2 \parallel R_3.\end{aligned}$$

Аналогічно можна визначити і абсолютний приріст струму в навантаженні першого каскаду

$$\Delta I_{R_{\kappa 1}(I_{\kappa 0})} = \Delta I_{\kappa 1(I_{\kappa 01})} + \Delta I_{\delta 2(I_{\kappa 02})}, \quad (7)$$

де

$$\Delta I_{\delta 2(I_{\kappa 02})} = \frac{\Delta I_{\kappa 02}}{\alpha_{\text{дин}2}} [S_{\beta 2} (1 - \alpha_{\text{дин}2}) - 1].$$

Одержані вирази коефіцієнтів нестабільності справедливі для схем, зібраних на складених транзисторах при використанні їх еквівалентних параметрів з врахуванням елементів температурної стабілізації [4].

На основі наведених співвідношень обчислені коефіцієнти нестабільності і визначено приріст струмів для схем різного типу, зображених на рис. 1 і 2, зібраних як на окремому, так і на складених транзисторах. Потім абсолютний приріст колекторних струмів транзисторів визначали експериментально при зміні температури в діапазоні від $+20$ до $+65^\circ \text{C}$ для германієвих транзисторів типу П14, що працювали в умовах, коли основним джерелом нестабільності режиму були зміни теплових струмів колекторних переходів [1]. Розходження експериментальних та розрахованих даних не перевищує 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А г а х а н я н М. М., Температурная стабилизация режима транзисторного усилительного каскада, Радиотехника, 1962, т. 17, № 4.
2. П о п о в П. А., Плоскостной триод как распределитель тока, Электросвязь, 1959, № 9.
3. К о н е в Ю. И., Полупроводниковые триоды в автоматике, «Советское радио», 1960.
4. К а р п е н к о Р. А., Эквивалентные параметры составного полупроводникового триода с учетом элементов температурной стабилизации, Вестник КПИ, № 2, серия радиотехники, 1965.

Р. А. КАРПЕНКО

THE TEMPERATURE STABILITY OF TRANSISTOR AMPLIFIERS WITH DIRECT COUPLING OF CASCADES INCLUDING A COMBINE LOOP-BACK

S u m m a r y

The article is dedicated to determination of an engineer criterion of an estimation of a temperature stability of complex transistor amplifiers. Obtained expressions of non-stability coefficients describe quantitative the stability of the most used transistor amplifier circuits with the combine loop-back.