

## Операционен усилвател на проводимост

Доц.к.т.н. инж. Стефан Ивaнов Куцаров  
Инж. Лъчезар Петров Тошев

Съществуващите операционни усилватели на проводимост (ОУП) имат предавателна проводимост  $G = I_0/U_i$  ( $I_0$  - изходен ток,  $U_i$  - входно напрежение), обикновено в границите от 1,5 mS до 100 mS [1] [2]. В много практически случаи е желателно  $G$  да има значително по-големи стойности. Например при свързване в изхода на ОУП на активен товар със съпротивление  $R_T$  се получава коефициент на усилване по напрежение  $A = G R_T$ , който нараства с увеличаване на  $G$ .

Основна схема (фиг.1). Тя съдържа един диференциален усилвател ДУ с коефициент на усилване  $K_d$  и две токови огледала Т01 и Т02 с коефициенти на огледалност  $K_1 = I_{01}/I_{a1}$  и  $K_2 = I_{02}/I_{a2}$ , където  $I_{a1}$  и  $I_{a2}$  са токовете през точки "a1" и "a2", а  $I_{01}$  и  $I_{02}$  - токовете през "01" и "02". За правилната работа на схемата е необходимо  $K_1 = K_2 = K$ . При нулево входно напрежение  $U_i$  се получава  $I_{a1} = I_{a2}$  и  $I_{01} = I_{02}$ , поради което през  $R_Y$  и  $R_T$  не протича ток, т.е. изходният ток  $I_0$  на ОУП е 0. Когато  $U_i \neq 0$  през  $R_T$  протича  $I_0 = k_0 I_{R_Y}$  и тъй като  $I_{R_Y} = K_d U_i / R_Y$  се получава  $I_0 = k_0 K_d U_i / R_Y$ . Предавателната проводимост на ОУП е:

$$G = \frac{I_0}{U_i} = \frac{k_0 K_d}{R_Y} \quad (1)$$

От (1) се вижда основното предимство на предлаганата схема на ОУП - големите стойности на  $G$  се осигуряват чрез право-пропорционалната и зависимост от  $K_d$ . Освен това е възможно регулиране на  $G$  (например за компенсиране на производствени-те толеранси на  $K_d$  (чрез  $R_Y$ ).

Схеми на токовете огледала. Т01 и Т02 се реализират с идентични схеми, но Т01 е с PNP транзистори, а Т02 - с NPN транзистори. На фиг.2 са дадени трите най-прости схеми [3], като Т1 и Т2 трябва да са с еднакви параметри. При това за

ниски честоти коефициентите на огледалност и изходните съпротивления са

$$\text{за фиг. 2а} \quad K_0 = 1 \quad \text{и} \quad R_0 = \frac{z_E}{\mu} \quad (2a)$$

$$\text{за фиг. 2б} \quad K_0 = \frac{z_E}{z_E + R_{E2}} \quad \text{и} \quad R_0 = \frac{z_E + R_{E2}}{\mu} \quad (2б)$$

$$\text{за фиг. 2в} \quad K_0 = \frac{R_{E2}}{R_{E2}} \quad \text{и} \quad R_0 = \frac{z_E + R_{E2}}{\mu} \quad (2в)$$

В (2) с  $z_E$  е означено обемното съпротивление на емитера, а  $\mu$  е коефициентът, отчитащ ефекта на Ерли за модулация на базата. Подробности за  $z_E$  и  $\mu$  има в [3]. За практическо използване се препоръчва схемата от фиг. 2в, която по принцип осигурява произволни стойности на  $K_0$  и има значително  $R_0$ . Честотната зависимост на  $K_0$  за трите токови огледала е

$$K_0 = \frac{K_{00} \omega_d}{2 \cdot (2s + \omega_d)} \quad (3)$$

където  $\omega_d = 2\pi f_d$  и  $f_d$  е честотата на преминаване на транзисторите в токовите огледала.

Параметри на ОУП. Входните параметри на ОУП съвпадат с тези на ДУ. Изходното съпротивление  $R_0$  е равно на паралелно свързаните изходни съпротивления на Т01 и Т02 и се определя на основата на формули (2). Като се вземе предвид, че честотната зависимост на  $K_d$  е

$$K_d = \frac{K_{d0} \omega_0}{(s + \omega_0)} \quad (4)$$

където  $K_{d0}$  е постоянно-токовия коефициент на усилване на ДУ и  $\omega_0$  е горната му гранична честота, от (1) и (3) се получава

$$G(s) = \frac{K_{00} K_{d0}}{R_T} \cdot \frac{\omega_0 \cdot \omega_d}{2 \cdot (\omega_0 + s)(\omega_d + 2s)} \quad (5)$$

Изходният ток  $I_0$  на ОУП протича през товар  $Z_T(s)$  върху който се получава пад на напрежение  $U_0 = I_0 \cdot Z_T$ . Поради това винаги съществува и коефициент на усилване по напрежение на ОУП

$$A(s) = \frac{U_0}{U_i} = \frac{G(s) \cdot Z_T(s)}{1} \quad (6)$$

Обикновено  $Z_T(s)$  има капацитивен характер, тъй като винаги успоредно на  $R_T$  е свързан паразитния изходен капацитет  $C_O$  на ОУП, а понякога и товарен кондензатор  $C_T$ . Като се взема предвид това и изрази (5) и (6) се получава

$$A(s) = \frac{K_{00} K_{d0} R_o R_T}{R_T (R_o + R_T)} \cdot \frac{\dots \omega_1 \omega_2}{s \cdot (s + \omega_1)(s + \omega_2)} \left[ \frac{R_o R_T}{(R_o + R_T)} (s + 1) \right] \quad (7)$$

Първият множител в (7) е постояннотоковия коефициент на усилване  $A_0$ . Очевидно капацитетите в изхода водят до получаването на трети полюс в израза за  $A(s)$ . Взаимното разположение на трите полюса е различно в зависимост от  $\omega_1, \omega_2, R_o, R_T, C_O$  и  $C_T$ . За простота честотата на най-нискочестотния полюс се отбелязва с  $\omega_1$ , на следващия – с  $\omega_2$  и най-високочестотния – с  $\omega_3$ . Когато за ДУ се използва ОУ се получава  $\omega_1 = \omega_0$ , а при използване на високочестотни транзистори в Т01 и Т02 –  $\omega_3 = \omega_2$ . Възможно е при твърде голям  $C_T$  да се получи  $\omega_2 = R_o R_T [C_T + C_T] / [R_o + R_T]$ .

Работа на ОУП с ООВ. За осигуряване на стабилна работа на ОУП практически винаги той се обхваща с ООВ по напрежение, но наличието на три полюса в  $A(s)$  е предпоставка за самовъзбуждане. То липсва при коефициент на усилване  $A_1 > A_0 \omega_1 / \omega_2$ . При нужда от реализация на по-малки коефициенти на усилване се използва веригата за честотна компенсация, дадена с прекъснатата линия на фиг.1 [4]. Тя трябва да има времеконстанта

$$RC \leq \frac{0,9}{K_{min} \cdot \omega_2} \quad (8)$$

Проектиране. Изходните данни за проектирането на ОУП от фиг.1 са минималният коефициент на усилване  $K_{min}$  при наличие на ООВ, горната гранична честота  $f_B$ , изходното съпротивление  $R_O$ , максималното съпротивление  $R_{Tmax}$  на товара и максималното изходно напрежение  $U_{max}$ . Приема се, че двете токови огледала са реализирани по схемата от фиг.2в. За удовлетворяване на зададените параметри е необходимо да бъде изпълнено неравенството

$$C_T + 2 \cdot C_{Vc} \leq \frac{1}{2\pi f_B R_{Tmax}} \quad (9)$$

където  $C_T$  е товарния капацитет и  $C_{c'c}$  е капацитета на колекторния преход на транзисторите Т2 в токовете огледала от фиг.2 (приема се  $C_{c'c} = 5 - 10$  pF). Избира се ДУ с честота на единично усилване

$$f_A = 2 \gg K_{m.и} \cdot f_B \quad (10)$$

Приема се максималният му изходен ток да е  $I_{ДУ\max}$ , при което

$$K_0 = \frac{I_{0\max}}{I_{ДУ\max}} \quad (11)$$

където  $I_{0\max} = U_{0\max} / R_{T\max}$

Ако се получи  $K_0 = 5$  се препоръчва на изхода на ДУ да се свърже противотактен емитерен повторител за увеличаване на  $I_{ДУ\max}$ . Изчисляват се

$$R_Y = K_0 \frac{SR}{2\pi f_B U_{0\max}} \cdot R_{T\max}; \quad R_{E2} = 34 \cdot 10^{-4} R_0, \quad R_{E1} = K_0 \cdot R_{E2} \quad (12)$$

където  $SR$  е скоростта на нарастване на изходното напрежение на ДУ. Накрая се изчисляват двете постоянни захранващи напрежения

$$U_{CC} \approx |U_{EE}| = U_{0\max} + \left( I_{CC} + \frac{U_{0\max}}{K_0 \cdot R_{T\max}} \right) R_{E2} + U_{CE} \quad (13)$$

където  $I_{CC}$  е захранващият ток на ДУ и  $U_{CE} \approx 3$  V е напрежението колектор-емитер на Т2. Избират се еднакви транзистори в двете токови огледала с

$$f_T \gg 2 f_B, U_{CE\max} \gg 2 U_{CE} \text{ и } I_{C\max} \gg I_{CC} + I_{0\max} \quad (14)$$

Съществуват практически случаи, когато даден ОУП трябва да работи с по-голям  $C_T$  от определения по (9). Това се осигурява чрез намаляване на  $f_B$  до стойност

$$f_B' \leq \frac{1}{2\pi R_{T\max} (C_T + 2C_{c'c})} \quad (15)$$

която се реализира чрез прибавяне на елементите  $R$  и  $C$  на

Фиг. 1. Тяхното произведение се определя от (8) като  $\omega_2$  се замести с  $2\pi f_v$ .

### Експеримент

Изходни данни  $K_{min} = 10$ ,  $f_v = 100,000 \text{ Hz}$

$$U_{оквх} = 0,1 \text{ V} \quad R_0 = 500 \text{ к}\Omega \quad R_{Тнар} = 2000 \text{ }\Omega$$

Изчислява се максимално допустимия капацитет от (9)

$$C_{T+2} \text{ в } \leq \frac{L}{2\pi \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3} = 8 \text{ нФ}$$

Избираме ОУ от (10) с  $f_A = 1 = 1 \cdot 10 \cdot 100 \cdot 10^3 = 1 \text{ MHz}$ . Избираме ОУ тип 1У0741. Максималният изходен ток  $e(U_{оквх}/R_{Тнар}) = 0,1/2000 = 50 \mu\text{A}$ . Изчислява се коефициентът на огледалност от (11)  $K_0 = 50 \mu\text{A} / 20 \mu\text{A} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ . Избира се  $K_0 = 1$ . Изчислява се от (12)  $R_V = 0,1 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^3 / 2 \pi \cdot 10^5 \cdot 0,1 = 200 \text{ }\Omega$

$R_{E2} = 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^3 = 170 \text{ }\Omega$ . Избира се  $200 \text{ }\Omega$ ,  $R_{E1} = 1 \cdot 200 = 200 \text{ }\Omega$ . Изчисляват се захранващите напрежения от (13)

$$U_{к} = |U_{EE}| = 0,1 + (5 \cdot 10^{-3} + 0,1/2000) \cdot 200 + 5 = 2,1 \text{ V}$$

Избират се транзистори с  $f_T \gg 2 \cdot 10^5 \text{ Hz}$

$$I_C \gg 5 \cdot 10^{-3} + \frac{0,1}{2000} = 5,05 \text{ mA} = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad \text{и} \quad U_{CE} \gg U_{к} = 4,2 \text{ V}$$

Избрани са транзисторите РМР КТ 3107 и  $N \text{ PMS} 201$ . Експерименталните резултати съвпадат с проектираните.

### Л И Т Е Р А Т У Р А:

1. Мелник Дх. Наръчник по операционни усилватели София, Техника 1980г.
2. Lenk J. Manual for Integrate circuit user RPC Reston Virginia 1973
3. Херпи М. Аналоговые интегральные схемы Сов. радио Москва '79
4. Тошев Л. Ст. Куцаров Високоволтов мощен операционен усилвател Научна сесия ВММ "Б.И.Ленин" '89г.