

## ДО ПИТАННЯ ПРО КЛАСИФІКАЦІЮ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ У РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОЛАХ

Сташук В.Д.

*Показана необхідність аналізу умов, за яких можна зневажити прямою передачею сигналу через двобічний канал зворотної передачі, причому потрібно розглядати вплив зворотного зв'язку на вхідні і всі передаточні функції. Це дозволяє обґрунтовано підійти до визначення виду зворотного зв'язку.*

### Вступ. Постановка задачі

У сучасній навчальній і спеціальній літературі прийнято класифікувати зворотні зв'язки (ЗЗ) у радіоелектронних колах за способом з'єднання на вході і виході каналів прямої і зворотної передачі. При цьому розрізняють паралельний і послідовний ЗЗ на вході і паралельний і послідовний ЗЗ на виході чи відповідно ЗЗ за напругою і за струмом [1-3]. Така класифікація має на увазі, що обидва канали прямої і зворотної передачі є однобічними, тобто такими, що передають сигнали в одному напрямку. Однак така класифікація часто без застережень застосовується і до кіл з ЗЗ, які мають двобічний канал зворотної передачі, що найбільше часто зустрічається в практично застосовуваних радіоелектронних пристроях. Некоректний перенос висновків, отриманих для кіл з однобічним каналом зворотної передачі, на кола з двобічним каналом, веде до помилок і непорозумінь [4], зокрема й у відношенні класифікації ЗЗ. Наприклад, ЗЗ у схемі, рис. в (див. нижче) відповідно до прийнятої класифікації потрібно розглядати як паралельно - паралельний і до того ж як позитивний, але нижче буде показана помилковість такого судження.

### Теоретичні викладки

Аналізуючи властивості кіл з ЗЗ, звичайно розглядають вплив того чи іншого виду зворотних зв'язків на вхідні й одну з передаточних функцій кола (ФК), наприклад, на коефіцієнт передачі напруги. Однак, оскільки режим на вході і виході електричного кола характеризується двома фізичними величинами — струмом і напругою, можна розглядати чотири передаточні функції: коефіцієнти передачі напруги і струму, передаточний опір і передаточну провідність.

Розглянемо систему, охоплену ЗЗ з однобічними каналами прямої і зворотної передачі, робота якої на вході і виході визначається двома величинами, і яку можна описати системою рівнянь:

$$x_{\text{вих}} = \mu x_{\text{вх}}, \quad x_{\text{вх}} = x_{\Gamma} + x_{\text{ЗЗ}}, \quad x_{\text{ЗЗ}} = \beta x_{\text{вих}}, \quad y_{\text{вх}} = w_{\text{вх}} x_{\text{вх}}, \quad y_{\text{вих}} = w_{\text{н}} x_{\text{вих}}, \quad (1)$$

де  $\mu, \beta$  - коефіцієнти передачі прямого і зворотного каналів,  $w_{\text{вх}}, w_{\text{н}}$  - вхідний імітанс та імітанс навантаження.

З (1) можна одержати наступні функції:

$$\left. \begin{aligned} K_x^{33} &= \frac{x_{\text{вих}}}{x_{\Gamma}} = \frac{\mu}{1-\beta\mu}, & K_y^{33} &= \frac{y_{\text{вих}}}{y_{\text{вх}}} = \mu \frac{w_{\text{н}}}{w_{\text{вх}}} = K_y, & W_{\text{пер}}^{33} &= \frac{y_{\text{вих}}}{x_{\Gamma}} = \frac{\mu w_{\text{н}}}{1-\beta\mu}, \\ V_{\text{пер}}^{33} &= \frac{x_{\text{вих}}}{y_{\text{вх}}} = \frac{\mu}{w_{\text{вх}}} = V_{\text{пер}}, & W_{\text{вх}}^{33} &= \frac{y_{\text{вх}}}{x_{\Gamma}} = \frac{w_{\text{вх}}}{1-\beta\mu}, & V_{\text{вх}}^{33} &= \frac{x_{\Gamma}}{y_{\text{вх}}} = v_{\text{вх}}(1-\beta\mu), \end{aligned} \right\} (2)$$

де  $v_{\text{вх}} = 1/w_{\text{вх}}$ , верхній індекс <sup>33</sup> позначає функцію кола при наявності ЗЗ, а відсутність індексу свідчить про відсутність ЗЗ, тобто при  $\beta = 0$ ; змінні  $x_{\text{вх}}, x_{\Gamma}, x_{\text{ос}}$  є струмами при паралельному ЗЗ на вході чи напругами при послідовному ЗЗ на вході;  $x_{\text{вих}}$  — напруга чи струм при ЗЗ за напругою чи за струмом на виході.

Замінюючи в (1) і (2) змінні  $x$  та  $y$  на струми і напруги, як це показано в табл. 1, одержимо усі види ЗЗ відповідно до прийнятої класифікації, а також відповідні їм вирази функцій кола, що наведені в табл. 2.

Таблиця 1

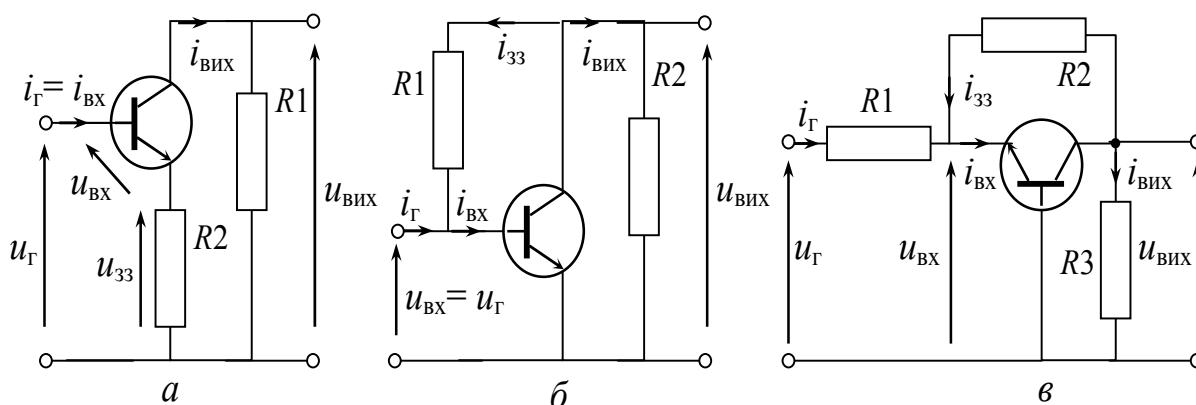
Змінні і параметри	Види зворотних зв'язків			
	Послідовно - паралельна	Послідовно - послідовна	Паралельно - паралельна	Паралельно - послідовна
$x_{\Gamma}$	$u_{\Gamma}$	$u_{\Gamma}$	$i_{\Gamma}$	$i_{\Gamma}$
$x_{\text{вх}}$	$u_{\text{вх}}$	$u_{\text{вх}}$	$i_{\text{вх}}$	$i_{\text{вх}}$
$y_{\text{вх}}$	$i_{\text{вх}}$	$i_{\text{вх}}$	$u_{\text{вх}}$	$u_{\text{вх}}$
$x_{\text{вих}}$	$u_{\text{вих}}$	$i_{\text{вих}}$	$u_{\text{вих}}$	$i_{\text{вих}}$
$y_{\text{вих}}$	$i_{\text{вих}}$	$u_{\text{вих}}$	$i_{\text{вих}}$	$u_{\text{вих}}$
$x_{33}$	$u_{33}$	$u_{33}$	$i_{33}$	$i_{33}$
$\mu$	$\mu_U = u_{\text{вих}}/u_{\text{вх}}$	$\mu_Y = i_{\text{вих}}/u_{\text{вх}}$	$\mu_Z = u_{\text{вих}}/i_{\text{вх}}$	$\mu_i = i_{\text{вих}}/i_{\text{вх}}$
$\beta$	$\beta_U = u_{33}/u_{\text{вих}}$	$\beta_Z = u_{33}/i_{\text{вих}}$	$\beta_Y = i_{33}/u_{\text{вих}}$	$\beta_i = i_{33}/i_{\text{вих}}$
$W_{\text{вх}}$	$Y_{\text{вх}} = i_{\text{вх}}/u_{\text{вх}}$	$Y_{\text{вх}} = i_{\text{вх}}/u_{\text{вх}}$	$Z_{\text{вх}} = u_{\text{вх}}/i_{\text{вх}}$	$Z_{\text{вх}} = u_{\text{вх}}/i_{\text{вх}}$
$W_{\text{н}}$	$Y_{\text{н}} = i_{\text{вих}}/u_{\text{вих}}$	$Z_{\text{н}} = u_{\text{вих}}/i_{\text{вих}}$	$Y_{\text{н}} = i_{\text{вих}}/u_{\text{вих}}$	$Z_{\text{н}} = u_{\text{вих}}/i_{\text{вих}}$

Таблиця 2

Схем. функції	Види зворотних зв'язків			
	Послідовно – паралельна	Послідовно – послідовна	Паралельно – паралельна	Паралельно – послідовна
$Z_{\text{ВХ}}^{\text{oc}}$	$Z_{\text{ВХ}}(1 - \beta_U \mu_U)$	$Z_{\text{ВХ}}(1 - \beta_Z \mu_Y)$	$Z_{\text{ВХ}} / (1 - \beta_Y \mu_Z)$	$Z_{\text{ВХ}} / (1 - \beta_i \mu_i)$
$K_U^{\text{oc}}$	$\mu_U / (1 - \beta_U \mu_U)$	$\mu_Y Z_{\text{Н}} / (1 - \beta_Z \mu_Y)$	$\mu_Z / Z_{\text{ВХ}}$	$\mu_i Z_{\text{Н}} Y_{\text{ВХ}}$
$K_i^{\text{oc}}$	$\mu_U Y_{\text{Н}} Z_{\text{ВХ}}$	$\mu_Y Z_{\text{Н}}$	$\mu_Z Y_{\text{Н}} / (1 - \beta_Y \mu_Z)$	$\mu_i / (1 - \beta_i \mu_i)$
$Z_{\text{пер}}^{\text{oc}}$	$\mu_U Z_{\text{ВХ}}$	$\mu_Y Z_{\text{Н}} Z_{\text{ВХ}}$	$\mu_Z / (1 - \beta_Y \mu_Z)$	$\mu_i Z_{\text{Н}} / (1 - \beta_i \mu_i)$
$Y_{\text{пер}}^{\text{oc}}$	$\mu_U Y_{\text{Н}} / (1 - \beta_U \mu_U)$	$\mu_Y / (1 - \beta_Z \mu_Y)$	$\mu_Z Y_{\text{Н}} Y_{\text{ВХ}}$	$\mu_i Y_{\text{ВХ}}$

З наведених даних видно, що кожен вид ЗЗ впливає на дві з чотирьох передаточних ФК, причому різні види ЗЗ впливають на різні передаточні ФК. Саме цю обставину пропонується використовувати при визначенні, до якого виду відноситься ЗЗ у радіоелектронному колі, при наявності як однібічного каналу зворотної передачі, так і двобічного.

Відзначимо, що передаточні функції каналів прямої і зворотної передачі  $\mu$  і  $\beta$  при різних видах ЗЗ мають смисл коефіцієнтів передачі напруги чи струму, передаточного опору чи передаточної провідності, див.табл.1.



Розглянемо приклади. Для схеми *a* знаходимо вхідну і передаточні функції (тут і далі при виводі функцій кола нехтуємо малою провідністю  $h_{22e}$  і вважаємо  $h_{21e} + 1 \approx h_{21e}$ ):

$$Z_{\text{вх}}^{33} = h_{11e} \left( 1 + \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_1 \right), \quad K_U^{33} = \frac{-\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_2}{1 + \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_1}, \quad Y_{\text{пер}}^{33} = -\frac{\frac{h_{21e}}{h_{11e}}}{1 + \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_1}, \quad (3)$$

$$K_i^{33} = -h_{21e} = K_i, \quad Z_{\text{пер}}^{33} = -h_{21e} R_2 = Z_{\text{пер}}.$$

Приймаючи в (3)  $\mu_y = -h_{21e}/h_{11e}$ ,  $\beta_z = R_1$ ,  $Z_{\text{вх}} = h_{11e}$ ,  $Z_{\text{н}} = R_2$ , одержимо

$$Z_{\text{вх}}^{33} = Z_{\text{вх}} (1 - \beta_z \mu_y), \quad K_U^{33} = \frac{\mu_y Z_{\text{н}}}{1 - \beta_z \mu_y}, \quad Y_{\text{пер}}^{33} = \frac{\mu_y}{1 - \beta_z \mu_y} \quad (4)$$

$$K_i^{33} = \mu_y Z_{\text{вх}}, \quad Z_{\text{пер}}^{33} = \mu_y Z_{\text{пер}},$$

що відповідає послідовно - послідовному ЗЗ. Повний збіг ФК (4) з формулами табл. 2 пояснюється тим, що в схемі, зображеній на рис. а, канал прямої і канал зворотної передачі є однобічними.

Дійсно, вихідна змінна  $i_{\text{вих}} = \frac{h_{21e}}{h_{11e}} u_{\text{вх}}$  залежить тільки від вхідної  $u_{\text{вх}}$ , а змінна зворотного зв'язку  $u_{33} = R_3 i_{\text{вих}}$  тільки від  $i_{\text{вих}}$ .

У схемі, зображеній на рис. б, маємо:

$$Z_{\text{вх}}^{33} = \frac{h_{11e}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 h_{21e} + h_{11e}}, \quad K_U^{33} = \frac{R_2(h_{11e} - R_1 h_{21e})}{h_{11e}(R_1 + R_2)},$$

$$K_i^{33} = \frac{h_{11e} - R_1 h_{21e}}{R_1 + R_2 h_{21e} + h_{11e}}, \quad Z_{\text{пер}}^{33} = \frac{R_2(h_{11e} - R_1 h_{21e})}{R_1 + R_2 h_{21e} + h_{11e}}, \quad (5)$$

$$Y_{\text{пер}}^{33} = \frac{h_{11e} - R_1 h_{21e}}{h_{11e}(R_1 + R_2)}.$$

Як бачимо, функції (5) не зводяться до формул табл. 2, тому що канал зворотної передачі через опір  $R_1$  є двобічним. Вирази для  $K_U^{33}$  в (5) можна перетворити до виду

$$K_U^{33} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_{\text{н}} + \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

де  $R_{\text{н}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ , так що вихідна напруга

$$u_{\text{вих}} = -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_{\text{н}} u_{\text{вх}} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{\text{вх}} = u_{\text{вих1}} + u_{\text{вих2}} \quad (6)$$

складається з напруги  $u_{\text{вих1}}$ , що надходить по однобічному каналу прямої передачі, і напруги  $u_{\text{вих2}}$ , переданої з входу на вихід через подільник  $R_1, R_2$ , утворений двобічним каналом зворотної передачі. Однак, якщо прийняти  $R_1 \gg h_{11e}$  і  $R_1 \gg R_2$ , формули (5) можна привести до виду

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{вх}}^{33} &\approx \frac{h_{11e}}{1 + \frac{h_{21e}R_2}{R_1}}, & Z_{\text{пер}}^{33} &\approx \frac{h_{21e}R_2}{1 + \frac{h_{21e}R_2}{R_1}}, & K_i^{33} &\approx -\frac{h_{21e}}{1 + \frac{h_{21e}R_2}{R_1}}, \\ K_U^{33} &\approx -\frac{h_{21e}R_2}{h_{11e}}, & Y_{\text{пер}}^{33} &\approx -\frac{h_{21e}}{h_{11e}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Функції (7) відповідають формулам табл. 2 для паралельно-паралельного ЗЗ, якщо прийняти

$$\mu_z = -h_{21e}R_2, \quad \beta_y = 1/R_1, \quad Z_{\text{вх}} = h_{11e}, \quad Y_{\text{н}} = 1/R_2.$$

Відзначимо, що умова  $R_1 \gg R_2$  рівносильна нехтуванню доданком  $u_{\text{вих2}}$  у (6), тобто напругою, що надходить на вихід через двобічний канал зворотної передачі, у порівнянні з напругою, переданою через канал прямої передачі. А умова  $R_1 \gg h_{11e}$  означає, що змінна зворотного зв'язку  $i_{33}$  залежить головним чином від  $u_{\text{вих}}$ . Отже, ЗЗ у схемі б, можна лише умовно віднести до паралельно - паралельного негативного ЗЗ за умови  $R_1 \gg R_2$  і  $R_1 \gg h_{11e}$ .

Функції схеми, зображеної на рис. в, мають вид:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{вх}}^{33} &= \frac{R_1R_2(h_{21e} + 1) + R_1R_3 + (R_1 + R_2 + R_3)h_{11e}}{R_2(h_{21e} + 1) + R_3 + h_{11e}}, \\ K_U^{33} &= \frac{(R_2h_{21e} + h_{11e})R_3}{R_1R_2(h_{21e} + 1) + R_1R_3 + (R_1 + R_2 + R_3)h_{11e}}, \\ K_i^{33} &= \frac{R_2h_{21e} + h_{11e}}{R_2(h_{21e} + 1) + R_3 + h_{11e}}, & Z_{\text{пер}}^{33} &= \frac{(R_2h_{21e} + h_{11e})R_3}{R_2(h_{21e} + 1) + R_3 + h_{11e}}, \\ Y_{\text{пер}}^{33} &= \frac{R_2h_{21e} + h_{11e}}{R_1R_2(h_{21e} + 1) + R_1R_3 + (R_1 + R_2 + R_3)h_{11e}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

і також не зводяться до формул табл. 2, які відповідали би якому-небудь виду ЗЗ. Це пояснюється тим, що в схемі в присутні два канали зворотної передачі, утворені відповідно опорами  $R_1$  і  $R_2$ , причому другий з них є двобічним. Дійсно, вимкнувши ЗЗ через  $R_2$ , прийнявши в (8)  $R_2 \rightarrow \infty$ , одержимо:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{вх}}^{33} &= \frac{h_{11e}}{(h_{21e} + 1)} \left( 1 + \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_1 \right), & K_U^{33} &= \frac{\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_3}{1 + \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_1}, \\ K_i^{33} &= \frac{h_{21e}}{h_{21e} + 1}, & Z_{\text{пер}}^{33} &= \frac{h_{21e} R_3}{h_{21e} + 1}, & Y_{\text{пер}}^{33} &= \frac{\frac{h_{21e}}{h_{11e}}}{1 + \frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Функції (9) відповідають формулам табл. 2 для послідовно - послідовного ЗЗ при

$$\mu_y = h_{21e}/h_{11e}, \quad \beta_z = -R_1, \quad Z_{\text{вх}} = h_{11e}/(h_{21e} + 1), \quad Z_{\text{н}} = R_3,$$

як і в схемі *a*. Якщо ж в (8) прийняти  $R_1 = 0$ , одержимо:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{вх}}^{33} &= \frac{(R_2 + R_3)h_{11e}}{R_2(h_{21e} + 1) + R_3 + h_{11e}}, & K_U^{33} &= \frac{(h_{21e}R_2 + h_{11e})R_3}{h_{11e}(R_2 + R_3)}, \\ K_i^{33} &= \frac{h_{21e}R_2 + h_{11e}}{(h_{21e} + 1)R_2 + R_3 + h_{11e}}, & Z_{\text{пер}}^{33} &= \frac{(h_{21e}R_2 + h_{11e})R_3}{(h_{21e} + 1)R_2 + R_3 + h_{11e}}, \\ Y_{\text{пер}}^{33} &= \frac{h_{21e}R_2 + h_{11e}}{(R_2 + R_3)h_{11e}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

За умови  $R_2 \gg R_3$ ,  $R_2 \gg h_{11e}$  вирази (10) зводяться до виду

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{вх}}^{33} &\approx \frac{\frac{h_{11e}}{(h_{21e} + 1)}}{1 + \frac{1}{h_{21e}R_2} \cdot \frac{h_{21e}R_3}{(h_{21e} + 1)}}, & K_i^{33} &\approx \frac{\frac{h_{21e}}{(h_{21e} + 1)}}{1 + \frac{1}{h_{21e}R_2} \cdot \frac{h_{21e}R_3}{(h_{21e} + 1)}}, \\ Z_{\text{пер}}^{33} &\approx \frac{\frac{h_{21e}}{(h_{21e} + 1)} R_3}{1 + \frac{1}{h_{21e}R_2} \cdot \frac{h_{21e}R_3}{(h_{21e} + 1)}}, & K_U^{33} &\approx \frac{h_{21e}R_3}{h_{11e}}, & Y_{\text{пер}}^{33} &\approx \frac{h_{21e}}{h_{11e}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Покладаючи в (11)

$$\mu_z = h_{21e}R_3/(h_{21e} + 1), \quad \beta_y = -1/(h_{21e}R_2), \quad Z_{вх} = h_{11e}/(h_{21e} + 1), \quad Y_n = 1/R_3,$$

одержимо формули табл. 2 для паралельно-паралельного негативного ЗЗ. Зміст умов  $R_2 \gg R_3$ ,  $R_2 \gg h_{11e}$  такий же, як для схеми б. Таким чином, у схемі, в, діють два негативних ЗЗ: послідовно - послідовний і паралельно - паралельний. Про характер ЗЗ у схемі в у 60-і роки велася дискусія на сторінках журналу "Радіотехніка". Приводилися такі міркування:  $u_{вих}$  і  $i_{вх}$  синфазні,  $i_{зз}$  і  $u_{вих}$  синфазні, отже ЗЗ позитивний. Однак, каскад із загальною базою стійкий, що характерно для негативного ЗЗ. Помилковість таких міркувань не тільки в тім, що не враховується двобічність каналу зворотного зв'язку через  $R_2$ , але й у тім, що при паралельно-паралельному ЗЗ канал прямої передачі характеризується не коефіцієнтом передачі напруги, а передаточним опором, канал же зворотного зв'язку - передаточною провідністю (див. табл.1). З (11) бачимо, що коефіцієнт передачі напруги  $K_U^{ЗЗ} = K_U$  — позитивний, але не залежить від ЗЗ і не впливає на ЗЗ. Передаточний опір каналу прямої передачі  $\mu_z$  також позитивний. Однак передаточна провідність каналу зворотної передачі  $\beta_y = -1/(h_{21e}R_2)$  негативна. Це пояснюється тим, що струм зворотного зв'язку спрямований до емітера, отже, є протифазним струму бази. З цієї ж причини провідність зменшується в  $h_{21e}$  раз. Для порівняння відзначимо, що в схемі б передаточна провідність каналу зворотної передачі  $\beta_y = 1/R_1$  позитивна, однак передаточний опір  $\mu_z = -h_{21e}R_2$  негативний, тому ЗЗ у схемі б - негативний, що ніколи і не заперечувалось.

### Висновки

1. Положення класичної теорії ЗЗ не можна беззастережно застосовувати до електронних кіл з двобічними каналами зворотної передачі, режим яких визначається двома змінними на вході та виході: струмом і напругою.
2. При визначенні виду ЗЗ в електронних колах потрібно аналізувати їх вплив на всі функції кола, входні і передаточні, характеризуючи режим на вході і на виході як напругами, так і струмами.
3. Необхідно визначати умови, коли можна знехтувати прямим проходженням сигналу через канал зворотної передачі.
4. У різних видах ЗЗ канали прямої і зворотної передачі потрібно характеризувати відповідними передаточними функціями.
5. Знак ЗЗ визначається знаками тільки тих передаточних функцій, що характеризують канали прямої і зворотної передачі при даному виді ЗЗ.

### Література

1. Боді Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. — М.: Гос. изд. иностр. литературы, 1948. — 641 с.

2. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. - М.:Высш.шк.,1988. 464 с.
3. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь. 1985. 488 с.
4. Трохименко Я.К. Ошибки формальной теории усилителей с обратной связью. // Радиоэлектроника. - 1973. № 2. С. 127 – 134.

<p>В.Д. Сташук <b>К вопросу о классификации обратных связей в радиоэлектронных цепях.</b> Показана необходимость анализа условий, при которых можно пренебречь прямой передачей сигнала через обратимый канал обратной передачи. Это позволяет обосновано подойти к определению вида обратной связи.</p>	<p>V.D. Stashuk. <b>To a question on classification of feedback in radioelectronic circuits.</b> In the article, necessity of the analysis of conditions when it is possible to neglect direct transfer of a signal through the reversible feedback channel is shown. It allows to define a kind of a feedback correctly.</p>
--	---

*Надійшла до редакції 20 травня 2006 року*