

УДК 621.372.63

**М. А. Філінюк, д. т. н., проф.; О. О. Лазарєв, к. т. н., доц.;**  
**Л. Б. Ліщинська, д. т. н.**

## **ОЦІНКА РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ОДНОТРАНЗИСТОРНИХ КОНВЕЄРІВ СТРУМУ**

*В статті обґрунтовано систему основних робочих параметрів струмових конвеєрів. Визначено аналітичні залежності між робочими і формальними параметрами конвеєра струму, що дозволяє за значеннями чотирьох  $Y$ -параметрів транзистора визначити основні робочі та формальні параметри одностранзисторного конвеєра струму. Проведено дослідження основних робочих параметрів одностранзисторних конвеєрів струму на біполярному та польовому транзисторах, що дозволило визначити переваги та недоліки розглянутих конвеєрів струму.*

**Ключові слова:** конвеєр струму,  $Y$ -параметри транзистора, критеріальна оцінка ефективності.

### **Вступ**

Сьогодні інтенсивно розвивається схемотехніка інформаційних пристроїв на основі струмових конвеєрів [1]. Струмовий конвеєр – базовий елемент для побудови електронних схем, який у 1968 році запропонували Седра (Sedra A. S.) і Сміт (Smith K. C.) [2]. У 1970 році вони запропонували вдосконалений варіант конвеєра струму другого покоління ССІІ (Current Conveyor of the Second generation) [3], який виявився більш продуктивним блоком для побудови електронних схем. Конвеєр струму є базовим блоком, на основі якого можна реалізувати всі схеми, які реалізуються на операційних підсилювачах (масштабні перетворювачі, інтегратори, диференціатори, суматори, конвертори та інвертори опорів, активні фільтри і т. ін.) [4]. У 90-х роках минулого сторіччя оновився інтерес до струмових конвеєрів, оскільки виникла необхідність у більш високочастотних і енергоефективних схемах. Струмовий підхід забезпечує певні переваги порівняно з роботою з напругами, а саме: більшу швидкодію та частотний діапазон, оскільки схеми можуть працювати на частотах близьких до граничної частоти  $f_T$  транзисторів; немає необхідності забезпечувати великі значення коефіцієнтів підсилення, оскільки для струмових конвеєрів коефіцієнт передачі струму дорівнює одиниці; мають більшу точність і простоту, оскільки немає необхідності у використанні прецизійних резисторів для перетворення струмів у напруги – і схеми можуть бути побудовані тільки на транзисторах; мають меншу споживану потужність, бо в цьому випадку схеми менш чутливі до нелінійних спотворень, які виникають під час роботи з малими напругами.

Прагнення отримання параметрів конвеєра струму, близьких до ідеальних, призвело до побудови багатотранзисторних конвеєрів струму. Порівняльний аналіз їхньої ефективності показав, що такі багатотранзисторні схеми за деякими параметрами (енергоспоживання, частотний діапазон роботи) гірші, ніж одностранзисторні схеми [5].

Тому є актуальною оцінка робочих параметрів одностранзисторних конвеєрів струму та встановлення найбільш оптимальних рішень побудови одностранзисторних конвеєрів струму.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є аналітична оцінка основних робочих параметрів одностранзисторних конвеєрів струму з метою їх порівняльного аналізу та пошук найефективніших схем технічних рішень.

Для досягнення цієї мети розв'язують такі задачі:

1. Обґрунтування основних робочих параметрів струмових конвеєрів.
2. Знаходження аналітичної залежності між робочими і формальними параметрами конвеєра струму.

3. Дослідження робочих параметрів однострижорних конвеєрів струму в діапазоні частот та пошук найефективніших рішень.

### Обґрунтування основних параметрів струмових конвеєрів

На первинному етапі розв'язують задачу обґрунтування основних робочих параметрів струмового конвеєра другого покоління (ССП) (рис. 1), який в ідеальному випадку описують системою рівнянь (1), представлених на рис. 1 [6]:

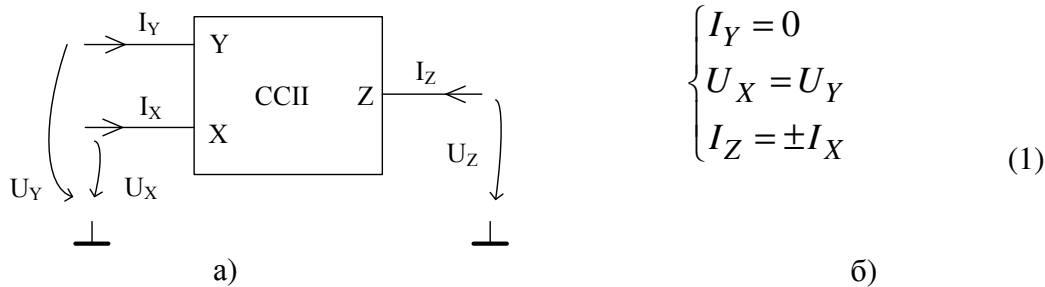


Рис. 1. Умовне позначення ССП (а) та система рівнянь (б);  $I_X, I_Y, I_Z$  – струми електродів та значення напруг  $U_X, U_Y, U_Z$  між клемми і спільною шиною в конвеєрі струму другого покоління

Виходячи із цієї системи, визначимо наступні такі параметри ССП:

- коефіцієнт передачі струму:  $K_I = \frac{I_Z}{I_X}$  (для ідеального ССП  $K_I = 1$ );
- коефіцієнт передачі напруги:  $K_U = \frac{U_X}{U_Y}$  (для ідеального ССП  $K_U = 1$ );
- провідність входу Y:  $Y_Y = \frac{I_Y}{U_Y}$  (для ідеального ССП  $Y_Y = 0$ );
- опір входу X:  $Z_X = \frac{U_X}{I_X}$  (для ідеального ССП  $Z_X = 0$ );
- провідність виходу Z:  $Y_Z = \frac{I_Z}{U_Z}$  (для ідеального ССП  $Y_Z = 0$ ).

Гранична частота коефіцієнта передачі струму  $f_{K_I}$  – це частота, на якій модуль коефіцієнта передачі струму  $K_I$  зменшиться в  $\sqrt{2}$  порівняно з низькочастотним значенням  $K_{I0}$ .

Гранична частота коефіцієнта передачі напруги  $f_{K_U}$  – це частота, на якій модуль коефіцієнта передачі напруги  $K_U$  зменшиться в  $\sqrt{2}$  порівняно з низькочастотним значенням  $K_{U0}$ .

### Аналітична залежність між робочими і формальними параметрами конвеєра струму

Система рівнянь (1) характеризує ідеальний конвеєр струму. Реальний конвеєр струму характеризує система рівнянь виду:

$$\begin{cases} I_Y = a_{11}U_Y + a_{12}I_X + a_{13}U_Z \\ U_X = a_{21}U_Y + a_{22}I_X + a_{23}U_Z \\ I_Z = a_{31}U_Y + a_{32}I_X + a_{33}U_Z \end{cases}, \quad (2)$$

де  $a_{ij}$  – елементи квадратної матриці,  $i=1..3, j=1..3$ .

У результаті аналізу системи рівнянь (2) знаходимо аналітичні залежності між елементами  $a_{ij}$  та робочими параметрами конвеєра струму:

$$\begin{aligned} \dot{K}_I = \frac{I_Z}{I_X} = a_{32}(U_Y = 0, U_Z = 0) \quad \dot{K}_U = \frac{U_X}{U_Y} = a_{21}(I_X = 0, U_Z = 0) \\ Y_Y = \frac{I_Y}{U_Y} = a_{11}(I_X = 0, U_Z = 0) \quad Z_X = \frac{U_X}{I_X} = a_{22}(U_Y = 0, U_Z = 0) \\ Y_Z = \frac{I_X}{U_Z} = a_{33}(U_Y = 0, I_X = 0) \end{aligned} \quad (3)$$

Отже, для знаходження робочих параметрів ССП потрібно виміряти комплексні  $a_{ij}$ -параметри. Вони можуть бути як безрозмірними, так і мати розмірність провідності чи опору. Для їх вимірювання потрібно забезпечити режими короткого замикання (КЗ) та холостого ходу (ХХ) в різноманітних комбінаціях, що на високих і надвисоких частотах являє собою значну технічну проблему, тому пропонуємо описувати конвеєр струму  $Y_{ij}$ -параметрами, для вимірювання яких необхідно забезпечити лише режим короткого замикання [7]. Для цього конвеєр струму розглядаємо як незалежний триполюсник, який описує система рівнянь

$$\begin{cases} I_Y = Y_{11}U_Y + Y_{12}U_X + Y_{13}U_Z \\ I_X = Y_{21}U_Y + Y_{22}U_X + Y_{23}U_Z \\ I_Z = Y_{31}U_Y + Y_{32}U_X + Y_{33}U_Z \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язавши одночасно системи рівнянь (2) та (3), знаходимо аналітичні залежності між системами  $a_{ij}$  та  $Y_{ij}$ -параметрами:

$$\begin{aligned} a_{11} = Y_{11} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{22}}, \quad a_{12} = Y_{12} / Y_{22}, \quad a_{13} = Y_{13} - \frac{Y_{12}Y_{23}}{Y_{22}}, \\ a_{21} = -\frac{Y_{21}}{Y_{22}}, \quad a_{22} = 1 / Y_{22}, \quad a_{23} = -\frac{Y_{23}}{Y_{22}}, \\ a_{31} = Y_{31} - \frac{Y_{32}Y_{21}}{Y_{22}}, \quad a_{32} = Y_{32} / Y_{22}, \quad a_{33} = Y_{33} - \frac{Y_{32}Y_{23}}{Y_{22}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отже, розрахувавши або вимірявши  $Y_{ij}$ - параметри конвеєра струму, знаходимо його  $a_{ij}$ -параметри та робочі параметри (3).

Процес знаходження  $a_{ij}$ -параметрів можна спростити.  $Y_{ij}$ - параметри, які входять у (4), є параметрами невизначеної матриці, для якої справедливе рівняння [8]:

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} = 0 (j = 1, 2..m); \sum_{j=1}^m y_{ij} = 0 (i = 1, 2..m). \quad (6)$$

Використовуючи Y-параметри чотириполюсника, утвореного шляхом заземлення одного з електродів струмового конвеєра та умови (6), знаходимо інші Y-параметри струмового конвеєра та на їх основі розраховуємо його  $a_{ij}$ -параметри (5) та робочі параметри (3) (табл. 1).

Таблиця 1

Y-параметри та робочі параметри конвеєра струму

№ п/п	Матриця провідності	Y-параметри матриці	Робочі параметри конвеєра струму
Із заземленням Z-електродом	$[Y_Z] =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11}^Z & Y_{12}^Z \\ Y_{21}^Z & Y_{22}^Z \end{bmatrix}$	$Y_{13} = -(Y_{11} + Y_{12}) = -(Y_{11}^Z + Y_{12}^Z)$ $Y_{23} = -(Y_{21} + Y_{22}) = -(Y_{21}^Z + Y_{22}^Z)$ $Y_{31} = -(Y_{11} + Y_{21}) = -(Y_{11}^Z + Y_{21}^Z)$ $Y_{32} = -(Y_{12} + Y_{22}) = -(Y_{12}^Z + Y_{22}^Z)$ $Y_{33} = -(Y_{13} + Y_{23}) = Y_{11}^Z + Y_{12}^Z + Y_{21}^Z + Y_{22}^Z$	$\dot{K}_I = \frac{-(Y_{12}^Z + Y_{22}^Z)}{Y_{22}^Z}$ $\dot{K}_U = -\frac{Y_{21}^Z}{Y_{22}^Z}$ $Y_Y = Y_{11}^Z - \frac{Y_{21}^Z Y_{12}^Z}{Y_{22}^Z}$ $Z_X = 1 / Y_{22}^Z$ $Y_Z = Y_{11}^Z + Y_{12}^Z + Y_{21}^Z + Y_{22}^Z - \frac{(Y_{12}^Z + Y_{22}^Z)(Y_{21}^Z + Y_{12}^Z)}{Y_{22}^Z}$
Із заземленням X-електродом	$[Y_Z] =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{13} \\ Y_{31} & Y_{33} \end{bmatrix} =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11}^X & Y_{12}^X \\ Y_{21}^X & Y_{22}^X \end{bmatrix}$	$Y_{12} = -(Y_{11} + Y_{13}) = -(Y_{11}^X + Y_{12}^X)$ $Y_{32} = -(Y_{31} + Y_{33}) = -(Y_{21}^X + Y_{22}^X)$ $Y_{23} = -(Y_{13} + Y_{33}) = -(Y_{12}^X + Y_{22}^X)$ $Y_{21} = -(Y_{11} + Y_{31}) = -(Y_{11}^X + Y_{21}^X)$ $Y_{22} = -(Y_{12} + Y_{32}) = Y_{11}^X + Y_{12}^X + Y_{21}^X + Y_{22}^X$	$\dot{K}_I = \frac{Y_{21}^X + Y_{22}^X}{Y_{11}^X + Y_{12}^X + Y_{21}^X + Y_{22}^X}$ $\dot{K}_U = \frac{Y_{11}^X + Y_{21}^X}{Y_{11}^X + Y_{22}^X + Y_{21}^X + Y_{12}^X}$ $Y_Y = Y_{11}^X - \frac{(Y_{11}^X + Y_{12}^X)(Y_{11}^X + Y_{21}^X)}{Y_{12}^X + Y_{22}^X + Y_{11}^X + Y_{21}^X}$ $Z_X = 1 / (Y_{22}^X + Y_{12}^X + Y_{21}^X + Y_{11}^X)$ $Y_Z = Y_{22}^X - \frac{(Y_{21}^X + Y_{22}^X)(Y_{12}^X + Y_{22}^X)}{Y_{11}^X + Y_{22}^X + Y_{21}^X + Y_{12}^X}$

Із заземленим Y-електродом	$[Y_Z] =$ $= \begin{bmatrix} Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11}^X & Y_{12}^X \\ Y_{21}^X & Y_{22}^X \end{bmatrix}$	$Y_{12} = -(Y_{22} + Y_{32}) = -(Y_{11}^Y + Y_{21}^Y)$ $Y_{13} = -(Y_{23} + Y_{33}) = -(Y_{12}^Y + Y_{22}^Y)$ $Y_{21} = -(Y_{22} + Y_{23}) = -(Y_{11}^Y + Y_{12}^Y)$ $Y_{31} = -(Y_{32} + Y_{33}) = -(Y_{21}^Y + Y_{22}^Y)$ $Y_{11} = -(Y_{21} + Y_{31}) = Y_{11}^Y + Y_{12}^Y +$ $+ Y_{21}^X + Y_{22}^X$	$\dot{K}_I = \frac{Y_{21}^Y}{Y_{11}^Y}$ $\dot{K}_U = \frac{Y_{21}^Y + Y_{22}^Y}{Y_{11}^Y}$ $Y_Y = Y_{11}^Y + Y_{12}^Y + Y_{21}^Y + Y_{22}^Y -$ $- \frac{(Y_{11}^Y + Y_{21}^Y)(Y_{11}^Y + Y_{12}^Y)}{Y_{11}^Y}$ $Z_X = 1 / Y_{11}^Y$ $Y_Z = Y_{22}^Y - \frac{Y_{21}^Y Y_{12}^Y}{Y_{11}^Y}$
----------------------------	---	---	---

### Дослідження робочих параметрів однострижорних конвеєрів струму

У якості найпростіших конвеєрів струму можна використовувати біполярні та польові транзистори (рис. 2) [6].

Для біполярного транзистора (рис. 2, а)  $U_X = \frac{U_Y}{(1 + (1/g_m R_X))}$ , де  $g_m$  – крутизна біполярного транзистора,  $R_X$  – опір, під'єднаний до вивода X. Оскільки  $g_m R_X \gg 1$ , то  $U_X \approx U_Y$ .  $I_Z = -\beta/(\beta + 1)I_X$ , оскільки  $\beta \gg 1$ , то  $I_Z \approx -I_X$  [6]. Отже, з урахуванням (1), біполярний транзистор можна розглядати як найпростіший конвеєр струму з інверсією напрямку струму ССІГ.

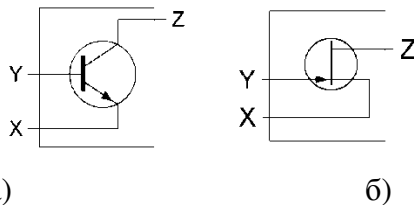


Рис. 2. Однострижорні конвеєри струму ССІГ на біполярному (а) та польовому (б) транзисторах

Аналогічно для польового транзистора (рис. 2, б)  $U_X = \frac{U_Y}{(1 + (1/g_m R_X))}$ , де  $g_m$  – крутизна польового транзистора. Оскільки  $g_m R_X \gg 1$ , то  $U_X \approx U_Y$ ,  $I_Z \approx -I_X$ . Отже, з урахуванням (1) польовий транзистор можна розглядати як найпростіший конвеєр струму з інверсією напрямку струму ССІГ.

Із метою порівняльної оцінки робочих параметрів цих конвеєрів струму проведемо комп'ютерне моделювання та розрахунок їх основних параметрів.

Схеми, використані для комп'ютерного моделювання роботи однострижорних конвеєрів струму на біполярному та польовому транзисторах, зображені на рис. 3. Моделювання виконано в програмі AWR Microwave Office 10. У схемі (рис. 3, а) використано біполярний транзистор 2SC5435 у режимі:  $I_E = 2,4$  мА,  $U_{KE} = 2,6$  В, гранична частота  $f_T \approx 7$  ГГц. У схемі (рис. 3, б) використано польовий транзистор PMBF5484,  $I_C = 2$  мА,  $U_{3B} = -0,2$  В,  $f_T \approx 220$  МГц.

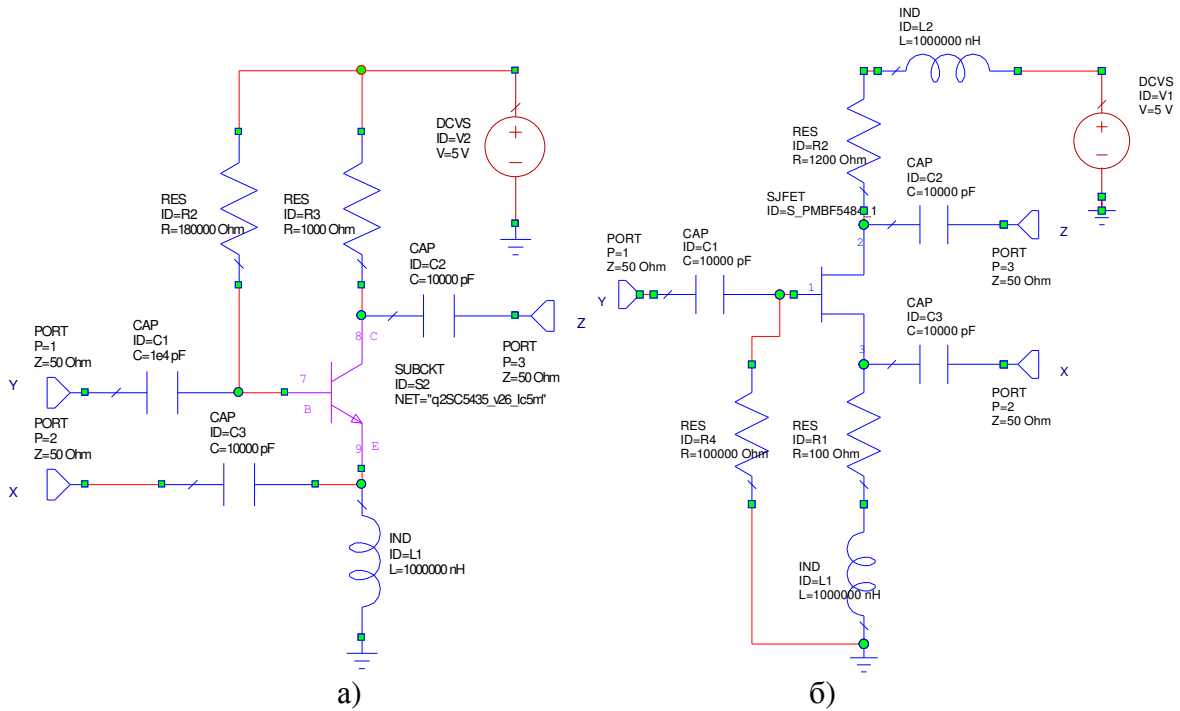


Рис. 3. Схеми однотранзисторних конверсів струму на біполярному (а) та польовому (б) транзисторах

Для визначення повної системи формальних  $a$ -параметрів та робочих параметрів ССП необхідно визначити значення лише будь-яких чотирьох  $Y$ -параметрів невизначеної матриці конверса струму.

На рис. 4 та 5 наведені графіки частотної залежності параметрів  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{22}$  конверса струму на біполярному та польовому транзисторах у діапазоні частот від  $0,001 f_T$  до  $f_T$ .

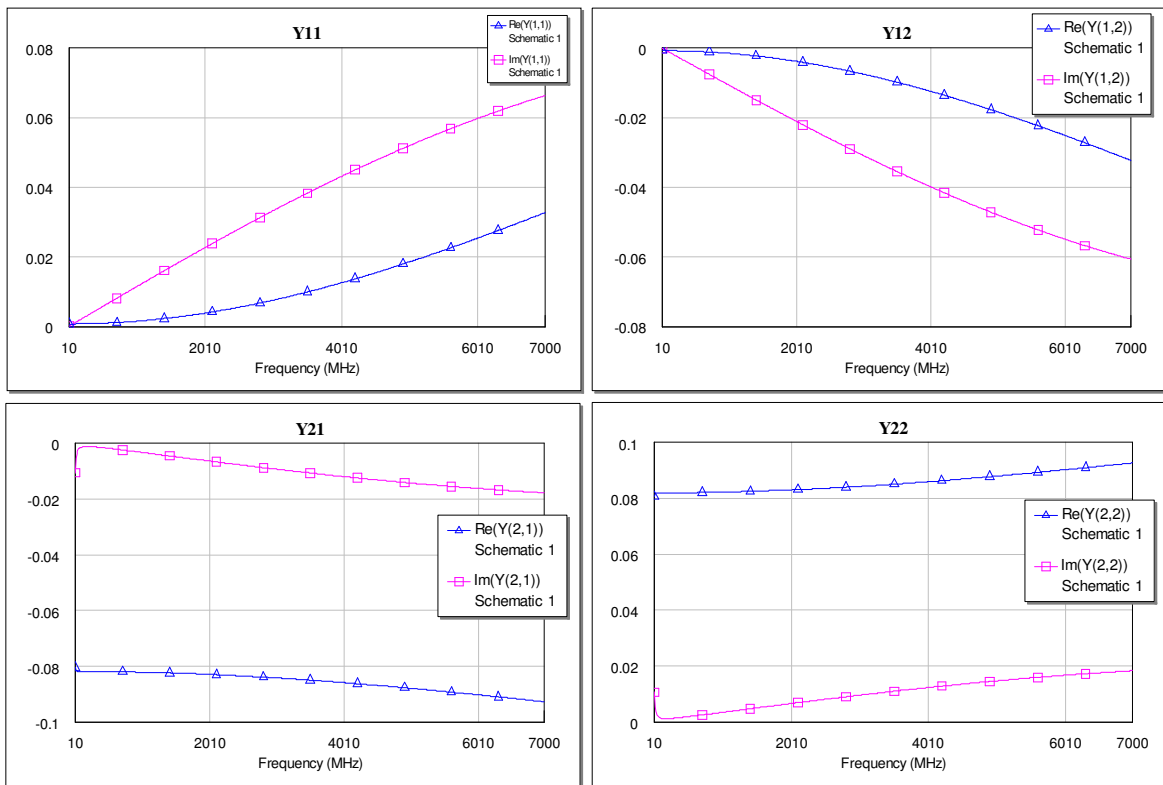


Рис. 4. Частотні залежності  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{22}$  – параметрів ССП на біполярному транзисторі

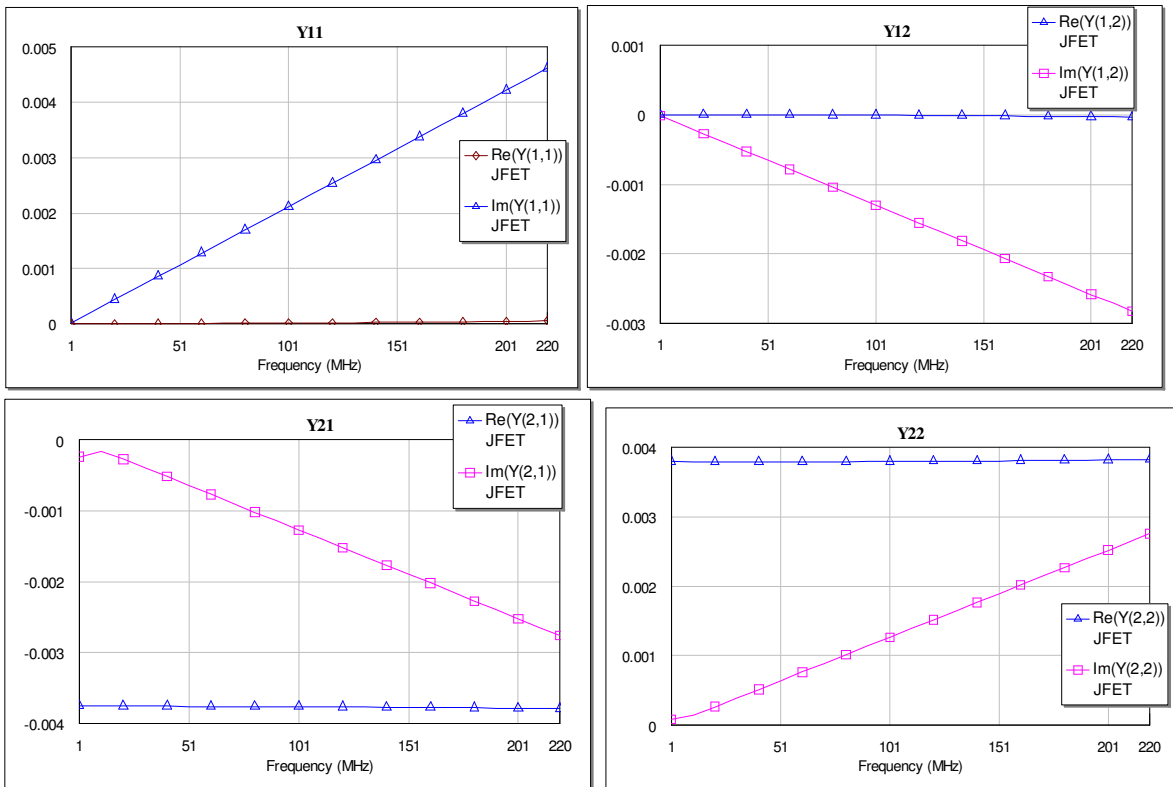


Рис. 5. Частотні залежності  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{22}$  – параметрів ССП на польовому транзисторі

Використавши значення  $Y$ -параметрів ССП, розраховують частотні залежності коефіцієнтів передачі струму та напруги конвеєра струму на біполярному та польовому транзисторах (рис. 6).

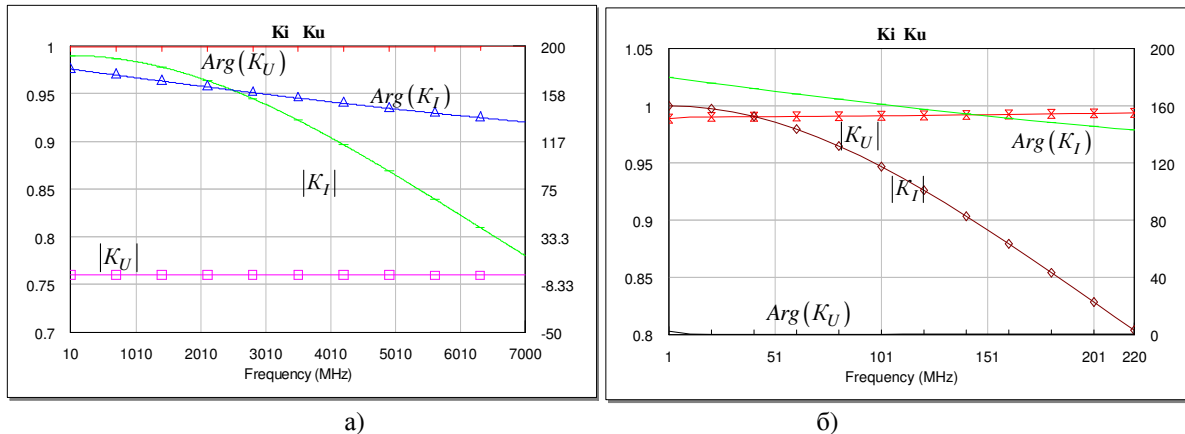


Рис. 6. Частотні залежності фази та модуля коефіцієнтів передачі струму  $K_I$  та напруги  $K_U$  конвеєра струму на біполярному (а) та польовому (б) транзисторах

Необхідно зауважити, що ці значення коефіцієнтів передачі визначені для режимів короткого замикання на виводах  $Y$  та  $Z$  та холостого ходу на  $X$ . Під час роботи на навантаження, наприклад 50 Ом, значення коефіцієнтів зменшуються.

З урахуванням паразитних міжелектродних ємностей транзистора  $C_{BK} = 0,25$  пФ,  $C_{EK} = 0,25$  пФ та індуктивностей виводів транзистора  $L_K = 0,6$  нГн,  $L_B = 0,45$  нГн активний складник провідності транзистора стає від'ємним на високих частотах, що призводить до збільшення коефіцієнтів передачі струму та напруги на цих частотах.

На рис. 7, 8 та 9 зображені частотні залежності вхідної провідності  $Y_Y$ , вхідного опору  $Z_X$  та вихідної провідності  $Y_Z$ .

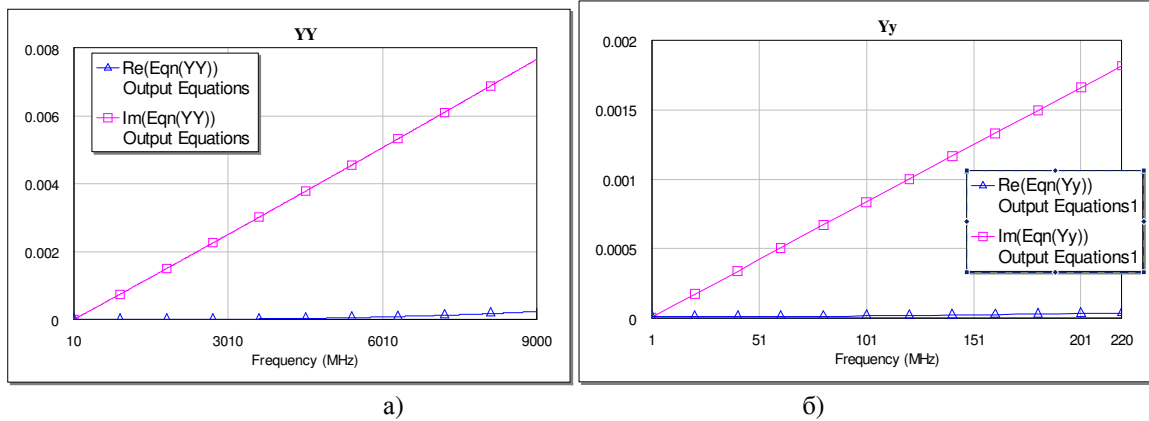


Рис. 7. Активний і реактивний складники вхідної провідності  $Y_Y$  конвеєра струму на біполярному (а) та польовому (б) транзисторах

За наведеними результатами комп'ютерного моделювання, біполярний і польовий транзистори є однотранзисторними конвеєрами струму на частотах до  $f_T$ . Наявність індуктивностей та ємностей виводів призводить до появи від'ємного активного опору, що робить конвеєр струму потенційно нестійким, але дозволяє збільшити значення коефіцієнтів передачі більших за одиницю.

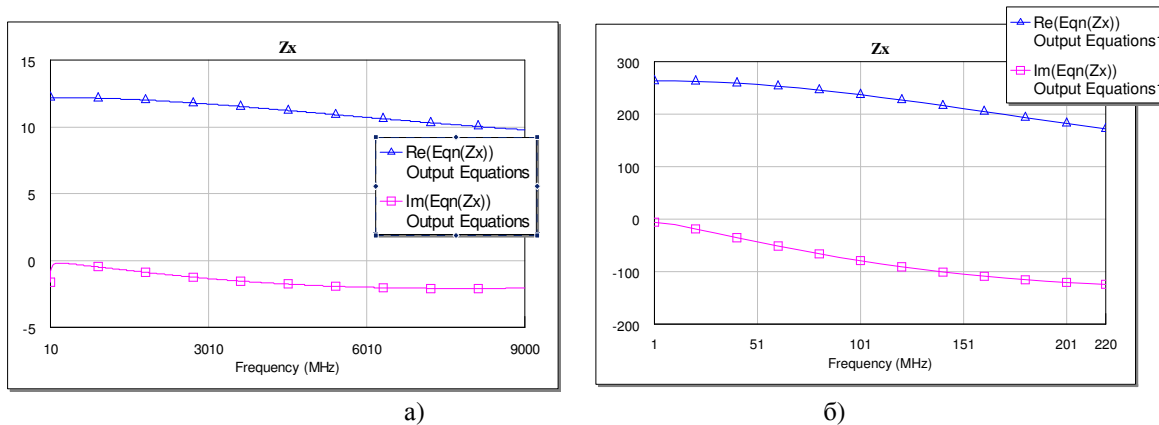


Рис. 8. Активний і реактивний складники вхідного опору  $Z_X$  конвеєра струму на біполярному (а) та польовому (б) транзисторах

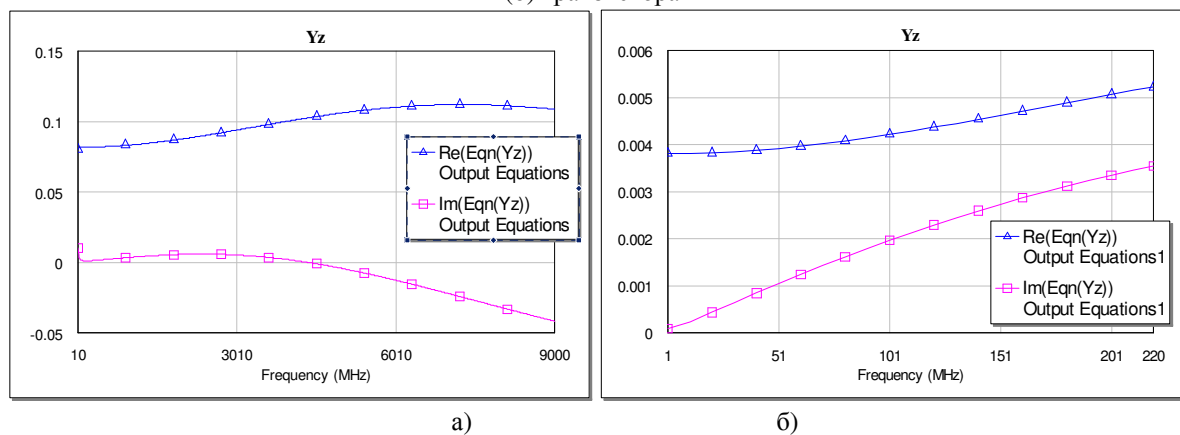


Рис. 9. Активний і реактивний складники вихідної провідності  $Y_Z$  конвеєра струму на біполярному (а) та польовому (б) транзисторах

Проведемо порівняльний аналіз однотранзисторних конвеєрів струму на біполярному та



польовому транзисторах. Обидва конвеєри струму можуть працювати на частотах близьких до граничної частоти  $f_T$  транзисторів, проте коефіцієнт передачі струму більший у польовому транзисторі, а коефіцієнт передачі напруги – у біполярному внаслідок більшої крутизни  $g_m$ . Також конвеєр струму на польовому транзисторі має значно більший вхідний опір  $Z_X$ , що призводить до сильного впливу опору навантаження на коефіцієнт передачі напруги  $K_U$ . У табл. 2 наведені робочі параметри цих конвеєрів струму на частоті  $0,5 f_T$  ідеального конвеєра струму та критерії ефективності.

Таблиця 2

Робочі параметри конвеєрів струму на базі біполярного та польового транзисторів

Параметр	Біполярний конвеєр струму	Польовий конвеєр струму	Ідеальний конвеєр струму
$K_I$	0,92	0,94	1
$K_U$	0,999	0,99	1
$Y_Y$	0,003 См	0,009 См	0 См
$E_{Y_Y}$	0,87	0,69	1
$Y_Z$	0,098 См	0,0048 См	0 См
$E_{Y_Z}$	0,169	0,806	1
$Z_X$	11,6 Ом	247 Ом	0 Ом
$E_{Z_X}$	0,812	0,168	1
$E$	0,643	0,614	1

Критерії ефективності за провідностями  $Y_Y$ ,  $Y_Z$  та опором  $Z_X$  розраховані за формулами  $E_Y = \frac{0,01}{0,01 + Y}$ ,  $E_Z = \frac{100}{100 + Z}$ , виходячи з припущення, що ефективності 0,5 відповідає провідність 0,02 См та опір 50 Ом. Інтегральний критерій ефективності розрахований за

формулою  $E = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n E_i}$  [5].

Виходячи з одержаних результатів, конвеєр струму на біполярному транзисторі за інтегральним критерієм ефективності є трохи кращим ( $E=0,643$ ) за конвеєр струму на польовому транзисторі ( $E=0,614$ ), що пояснюється більшим значенням коефіцієнта передачі напруги  $K_U$  та меншим значенням вхідного опору  $Z_X$ .

### Висновки

1. Обґрунтовано систему основних робочих параметрів конвеєрів струму, яка містить коефіцієнт передачі струму  $K_I$ , коефіцієнт передачі напруги  $K_U$ , провідність входу  $Y_Y$ , опір входу  $Z_X$ , провідність виходу  $Y_Z$ , граничну частоту коефіцієнта передачі струму  $f_{K_I}$ , граничну частоту коефіцієнта передачі напруги  $f_{K_U}$ , що дозволило визначити критерії для проведення порівняльного аналізу однострижисторних конвеєрів струму на біполярному та польовому транзисторах.

2. Визначено аналітичні залежності між робочими і формальними параметрами конвеєра струму, що дозволяє за значеннями чотирьох Y-параметрів транзистора визначити основні робочі та формальні параметри одно транзисторного конвеєра струму.

3. Проведено дослідження основних робочих параметрів однострижкових конвеєрів струму на біполярному та польовому транзисторах, що дозволило визначити переваги та недоліки цих конвеєрів струму. Обидва конвеєри струму працюють на частотах близьких до граничної частоти  $f_T$  транзисторів, проте конвеєр струму на біполярному транзисторі за інтегральним критерієм ефективності є трохи кращим ( $E=0,643$ ) за конвеєр струму на польовому транзисторі ( $E=0,614$ ), що пояснюється більшим значенням коефіцієнта передачі напруги  $K_U$  та меншим вхідним опором  $Z_X$ .

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ferri G. C. Low-voltage low-power CMOS current conveyors / G. Ferri, N. C. Guerrini. – Springer, 2010 – 226 p. – ISBN 1441953639, 978-1441953636.
2. Smith K. C. The current conveyors – a new circuit building block / K. C. Smith, A. S. Sedra // Proc. IEEE. – Aug. 1968. – Vol. 56. – P. 1368 – 1369.
3. Sedra A. S. A second-generation current conveyor and its applications / A. S. Sedra, K. C. Smith // IEEE Transactions on Circuit Theory. – Feb. 1970. – Vol. CT-17. – P. 132 – 134.
4. Sedra A. S. Current Conveyor Theory And Practice / In book Analogue IC design: the current-mode approach // A. S. Sedra, W. Gordon; під. ред. С. Toumazou, F. J. Lidgley, D. Haigh. – IET, – 1993. – 646 p. - ISBN 0863412971, 9780863412974.
5. Филинюк Н. А. Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров / Н. А. Филинюк, А. А. Лазарев, Л. Б. Лищинская, В. П. Стахов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 4 (8). – С. 17 – 21.
6. Current Conveyors. History, Theory, Application sand Implementation [Електронний ресурс] / P. Eloranta, С. Toumazou // СС.PPT. - 11.03.04. - Режим доступу: [http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E416/cc\\_handout07.pdf](http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E416/cc_handout07.pdf).
7. Бакалов В. П. Основы теории цепей. / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – М. : Радио и связь, 2000. – 592 с.
8. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – К. : Вища школа, 1971. – 568 с.

**Філінюк Микола Антонович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, e-mail: Filinyuk@vstu.vinnica.ua.

**Лазарев Олександр Олександрович** – к. т. н., доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, e-mail: Alexander.Lazarev.VNTU@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.

**Ліщинська Людмила Броніславівна** – д. т. н., завідувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних систем, e-mail: L\_Fil1@mail.ru.

Вінницький торговельно-економічний інститут.