

## ЕЛЕМЕНТИ ТА ПРИСТРОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 681.3:621.375

### Математична модель передатної характеристики двотактного підсилювача постійного струму із симетричною структурою

*Азаров О.Д. д. т. н., проф.; Гарнага В.А. асп.*

#### Вступ

У теперішній час у процесі проектування аналогових електронних схем, реалізованих у мікроелектронному виконанні, широко використовується комп'ютерне моделювання на базі бібліотек математичних моделей компонентів. Багато провідних компаній світу, що займаються випуском аналогових великих інтегральних схем (ВІС), серед яких Analog Device, Intersil, Texas Instrument, International Semiconductor надає комп'ютерні моделі своїх виробів для розробників апаратного забезпечення [1]. Використовуючи ці моделі в рамках пакетів прикладних програм схемотехнічного аналізу можна дослідити статичні і динамічні характеристики електронних схем довільної конфігурації [2-3], а також деякі інші параметри. Проте на етапі вибору конфігурації принципової схеми доцільно попередньо оцінити її потенційні характеристики, не прив'язуючись до конкретної елементної бази. Для цього треба мати математичні моделі передатних характеристик вказаних пристроїв, в аналітичні вирази для яких входять, наприклад, такі параметри як коефіцієнти передачі по струму  $p$ - $p$  і  $p$ - $n$  транзисторів.

#### Актуальність

Передатна характеристика підсилювача може визначатися, зокрема, у вигляді залежності  $I_{вих}=f(I_{вх})$ , де  $I_{вх}$  – вхідний струму, а  $I_{вих}$  – вихідний струм. Вона дозволяє оцінити потенційні параметри схеми, такі як: похибки лінійності, коефіцієнти підсилення по струму, смугу повної потужності та швидкодію на попередньому етапі проектування (евристичного синтезу) схеми з використанням таких узагальнених характеристик як коефіцієнти передачі по струму  $\beta$   $p$ - $p$  і  $p$ - $n$  транзисторів [2]. Це дозволяє зробити висновок, про характеристики схеми, її переваги і недоліки та відбракувати невдалі варіанти. Слід відзначити, що незважаючи на десятиліття інтенсивних спроб формалізувати синтез оптимальних систем у галузі аналогової електротехніки на основі аналітичних варіаційних методів, ці математичні апарати виявилися малоефективними в інженерній практиці: не було отримано жодного з'єднання, системи, які б містили ознаки винаходу [3]. Тому після евристичного синтезу і вибору остаточної конфігурації принципової схеми доцільно додатково дослідити її за допомогою прикладних програм схемотехнічного моделювання із використанням фізичних моделей компонентів. Математичні моделі транзисторів у форматі PSpice доречно використовувати при детальному моделюванні схеми із використанням конкретної елементної бази, на якій планується випуск таких підсилювальних пристроїв.

Слід зазначити, що значна кількість підсилювачів постійного струму (ППС), що розробляються провідними виробниками електронних компонентів Analog Device, Intersil і т. д. мають переважно асиметричну структуру побудови. Такий підхід є традиційним, проте у ньому потенційно закладено певні недоліки, з якими має змиритися кінцевий споживач, зокрема: нелінійність статичної передатної характеристики, асиметричність динамічної реакції схеми на двополярний прямокутний вхідний імпульс та інші [1, 2, 4]. При цьому спроби побудувати двотактні симетричні структури наштовхувалися на проблеми завдання режиму по постійному струму у проміжних підсилювальних каскадах.

Автори пропонують побудову підсилювальних пристроїв здійснювати на базі двотактних симетричних структур ППС, в яких проблему завдання робочої точки схеми подолано за допомогою використання двонаправлених відбивачів струму. Перевагами такого підходу є висока лінійність статичної передатної характеристики, підвищена швидкодія, а також симетрична реакція на вхідний прямокутний двополярний імпульс [4]. Незважаючи на ряд практичних реалізацій різновидів цих підсилювачів, до того ж захищених патентами ЄСРР та України, аналіз передатної характеристики таких ППС проведено недостатньо глибоко через брак відповідних аналітичних залежностей. Тому тема статті в якій розглядаються вказані залежності є актуальною.

#### Метою статті є

Побудувати і проаналізувати математичну модель статичної передатної характеристики двотактних симетричних ППС, в якій враховано неідентичність коефіцієнтів передачі  $\beta$  по струму  $p$ - $p$  і  $p$ - $n$  транзисторів, що дозволяє, зокрема, оцінити нелінійність коефіцієнта передачі в діапазоні вхідного і вихідного сигналів.

**Задачі досліджень**

Отримати з використанням методу квадратичної апроксимації аналітичні вирази для передатної характеристики двотактних симетричних підсилювачів постійного струму із врахуванням неідентичності коефіцієнтів підсилення  $\beta$  по струму p-p-n і p-p-p транзисторів.

Оцінити в рамках запропонованої математичної моделі значення коефіцієнта передачі двотактного симетричного ППС у малосигнальній зоні, а також урахувати вплив змінень значень  $\beta$  диференціальних коефіцієнтів підсилення по струму p-p-n і p-p-p транзисторів у діапазоні сигналу.

Перевірити адекватність отриманої математичної моделі у діапазоні вхідного і вихідного сигналів шляхом порівняльного аналізу похибок лінійності передатної характеристики двотактного ППС отриманих у рамках виведених співвідношень, а також за допомогою пакету прикладних програм схемотехнічного моделювання із використанням конкретних бібліотек фізичних моделей елементної бази.

**Розв'язання задач**

Розглянемо спрощену схему підсилювача постійного струму із симетричною структурою, що наведена на рис. 1.

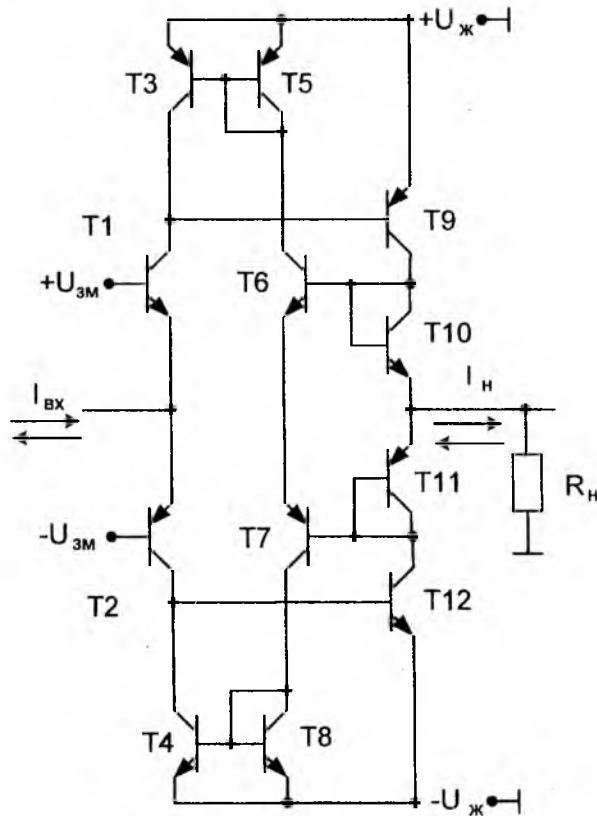


Рисунок 1 – Спрощена принципова схема двотактного симетричного ППС

Двотактний симетричний ППС складається із вхідного каскаду, побудованого на транзисторах T1 і T2, включених за самоповняльною схемою із загальною базою та проміжних каскадів підсилення на транзисторах T9 і T10, включених за схемою із загальним емітером. Для завдання і балансування режиму по постійного струму проміжних каскадів у схему введено двонаправлений відбивач струму на транзисторах T3 і T5, T6 і T7, T4 і T8 і двох транзисторів T10, T11 у діодному вмиканні.

Для двотактного симетричного ППС коефіцієнт передачі по струму описується формулою

$$K_i = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}$$

Для малосигнальної зони будемо аналізувати прирости струму на резисторі навантаження [5]:

$$\Delta I_n = \frac{\beta_{12}\alpha_2 + \beta_9\alpha_1}{2} I_{вх} + (\beta_{12}\alpha_2 - \beta_9\alpha_1) \left( \sqrt{\frac{I_{вх}^2}{4} + I_0^2} - I_0 \right),$$

де  $\Delta I_n$  – струм, що протікає через навантаження,  $I_{вх}$  – вхідний струм,  $I_0$  – зміщення нуля,  $\beta_9$  і  $\beta_{12}$  – диференційні коефіцієнти підсилення по струму відповідних транзисторів у схемі із загальним емітером,  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – параметри відповідних транзисторів у схемі із загальною базою.

При дослідженні нелінійності статичної передатної характеристики підсилювача постійного струму із симетричною структурою [5] використовуємо квадратичну апроксимацію залежності транзисторів від базового струму:

$$\beta \cong \beta_0 + \beta' \Delta I_{ex} + \beta'' \Delta I_{ex}^2, \quad (1)$$

де  $\beta_0$  – диференційний коефіцієнт підсилення струму при малому сигналі.  $\beta'$  і  $\beta''$  це коефіцієнти ряду Тейлора:

$$\beta' = \left. \frac{d\beta}{d\Delta I_{ex}} \right|_{\Delta I_{ex}=0}, \quad \beta'' = \left. \frac{d^2\beta}{d\Delta I_{ex}^2} \right|_{\Delta I_{ex}=0} \quad (2)$$

Для визначення залежності  $\beta$  від колекторного струму будемо використовувати вираз:

$$\beta \cong \beta_0 + A \Delta I_{\kappa} + B \Delta I_{\kappa}^2, \quad (3)$$

де коефіцієнти Тейлора визначаються як:

$$A = \left. \frac{d\beta}{d\Delta I_{\kappa}} \right|_{\Delta I_{\kappa}=0}, \quad B = \left. \frac{d^2\beta}{d\Delta I_{\kappa}^2} \right|_{\Delta I_{\kappa}=0} \quad (4)$$

У формулі (3)

$$\Delta I_{\text{кол}} = I_{\text{кол}} - I_{\kappa 0},$$

де  $I_{\kappa 0}$  – струму колектора при  $\Delta I_{ex} = 0$ , тобто «режимний спокій» відповідає параметрам робочої точки.

Інформацію для визначення коефіцієнтів  $A$  і  $B$  у формулі (3) беремо із залежність  $\beta = f(I_{\kappa})$ , що визначається чисельними методами в рамках математичних моделей транзисторів або експериментально (рис. 2).

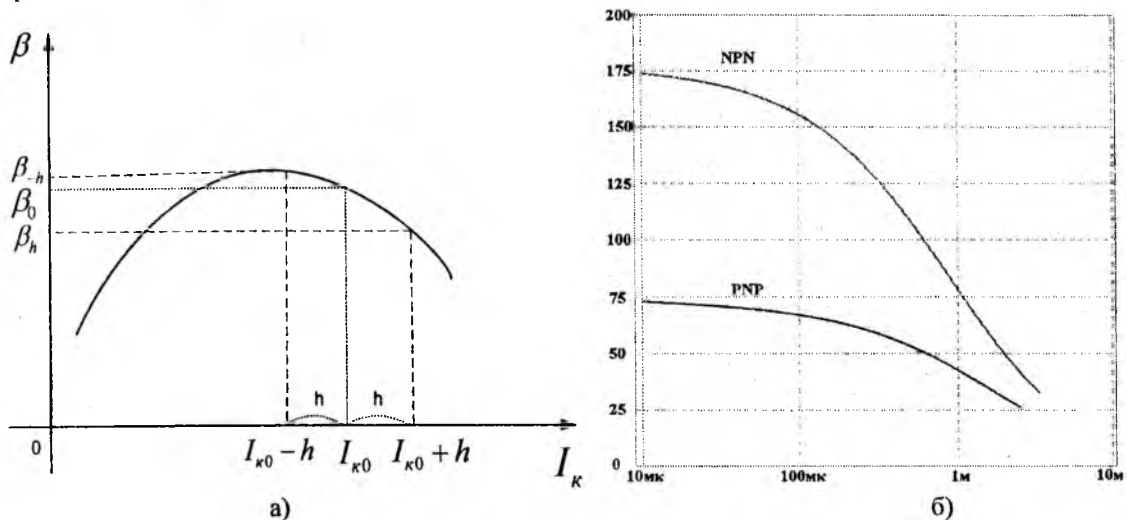


Рисунок 2 – Залежність значення коефіцієнту підсилення  $\beta$  від колекторного струму  $I_{\kappa}$ : а) узагальнене; б) транзистори БМК Серії 700.

Формула (3) відповідає апроксимації параболою частини графіка  $\beta(I_{\kappa})$  в охресті робочої точки ( $I_{\kappa} = I_{\kappa 0} = I_0$ ). Слід зазначити, що рівняння параболі однозначно визначається завданням будь-яких трьох її

точок. Такими точками зручно взяти робочу точку  $I_x = I_{к0}$ ,  $\beta = \beta_0$  і дві інших, відступивши в обидва боки по вісі струму на крок  $h$   $I_{к1+h} = I_{к0} + h$ ,  $\beta = \beta_h$  та  $I_{к1-h} = I_{к0} - h$ ,  $\beta = \beta_{-h}$ . Значення кроку  $h$  не повинне значно перевищувати амплітуду коливань колекторного струму і мати допуск у діапазоні  $\pm 10 \div 20\%$ . Перша умова забезпечує максимально точну апроксимацію в робочому діапазоні струмів колектора, друга ж мінімізує вплив обчислювальних похибок.

Для розрахунку коефіцієнтів  $A$  і  $B$  у формулі (3) будемо використовувати такі вирази:

$$A = \frac{\beta_h - \beta_{-h}}{2h}; \quad B = \frac{\beta_h - 2\beta_0 + \beta_{-h}}{2h^2}, \quad (5)$$

Для оцінювання точності параболічної апроксимації можна повторити обрахунки для  $A$  і  $B$ , зменшивши при цьому крок  $h$  у два рази. Якщо значення  $A$  і  $B$  від цього змінюються не значно, то апроксимація є досить точною. Через значення  $A$  та  $B$  (5) виражаються і коефіцієнти  $\beta_1$  та  $\beta$  у формулі (1). Ці вирази отримано з використанням зв'язку між похідними (2) і (4):

$$\frac{d\beta}{d\Delta I_{ex}} = \beta_0 \frac{d\beta}{d\Delta I_{к}},$$

$$\frac{d^2\beta}{d\Delta I_{ex}^2} = 2\beta_0 \left( \beta_0 \frac{d^2\beta}{d\Delta I_{к}^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{d\beta}{d\Delta I_{к}} \right)^2 \right).$$

Після використання цих формул ми отримаємо:

$$\beta = \beta_0 + \beta' \Delta I_{ex} + \beta'' \Delta I_{ex}^2,$$

де  $\beta' = \beta_0 \frac{\beta_h - \beta_{-h}}{2h}$ ,  $\beta'' = \beta_0 \left( \beta_0 \frac{\beta_h - 2\beta_0 + \beta_{-h}}{2h^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\beta_h - \beta_{-h}}{2h} \right)^2 \right)$ .

Представивши  $\beta$  транзисторів у плечах двотактного проміжного каскаду у вигляді залежності від вхідного струму, маємо:

$$\beta^{(9)}(I_{ex}) = \beta_0^{(3)} + \beta'^{(3)} \Delta I_{ex} + \beta''^{(3)} \Delta I_{ex}^2,$$

$$\beta^{(12)}(I_{ex}) = \beta_0^{(4)} + \beta'^{(4)} \Delta I_{ex} + \beta''^{(4)} \Delta I_{ex}^2. \quad (6)$$

Після цього ми можемо визначити коефіцієнти, що використовувалися у формулі:

$$\Delta\beta \cong a + b\Delta I_{ex} + c\Delta I_{ex}^2, \quad K_i \cong d + e\Delta I_{ex} + f\Delta I_{ex}^2. \quad (7)$$

Таким чином:

$$a \cong \frac{\beta_0^{(12)}\alpha_2 - \beta_0^{(9)}\alpha_1}{2}; \quad b \cong \frac{\beta_1^{(12)}\alpha_2 - \beta_1^{(9)}\alpha_1}{2}; \quad c \cong \frac{\beta_2^{(12)}\alpha_2 - \beta_2^{(9)}\alpha_1}{2};$$

$$d \cong \frac{\beta_0^{(12)}\alpha_2 + \beta_0^{(9)}\alpha_1}{2}; \quad e \cong \frac{\beta_1^{(12)}\alpha_2 + \beta_1^{(9)}\alpha_1}{2}; \quad f \cong \frac{\beta_2^{(12)}\alpha_2 + \beta_2^{(9)}\alpha_1}{2}. \quad (8)$$

Підставимо значення отриманих допусків (8) у (7), та отримаємо:

$$\Delta\beta(I_{ex}) \cong \frac{\beta_0^{(12)}\alpha_2 - \beta_0^{(9)}\alpha_1}{2} + \frac{\beta_1^{(12)}\alpha_2 - \beta_1^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex} + \frac{\beta_2^{(12)}\alpha_2 - \beta_2^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex}^2$$

$$K_i(I_{ex}) \cong \frac{\beta_0^{(12)}\alpha_2 + \beta_0^{(9)}\alpha_1}{2} + \frac{\beta_1^{(12)}\alpha_2 + \beta_1^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex} + \frac{\beta_2^{(12)}\alpha_2 + \beta_2^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex}^2 \quad (9)$$

Для проєктування і реалізації підсилювачів постійного струму із симетричною структурою у мікроелектронному виконанні доцільно використовувати напівзамовні великі інтегральні схеми (ВІС). Однією із перспективних ВІС, що використовується під час проєктування є напівзамовні матричні схеми Серії 700 [6, 7].

Для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі проаналізуємо характеристики, отримані за допомогою комп'ютерного моделювання, проведеного для наведеної схеми. На рис. 3а представлено графік АЧХ транзисторів Серії 700 n-p-n і p-n-p типів включених за схемою із загальним емітером для визначення коефіцієнта підсилення по струму, а на рис. 3б АЧХ базової схеми двотактного ППС із симетричною структурою у малосигнальній зоні. Мало сигнальні значення  $K_i$  у діапазоні частот вхідного сигналу доцільно знімати за допомогою АЧХ.

Після оцінювання значень  $\beta$  у малосигнальній зоні (рис. 3а) використаємо квадратичну апроксимацію. Підставимо відповідні значення координат точок у рівняння (6) і отримаємо залежність, що буде наближувати коефіцієнт підсилення по струму транзистора n-p-n типу Серії 700 (рис. 4а).

Підставимо отримані значення коефіцієнтів (9) в (10) і отримаємо залежність коефіцієнта підсилення по струму від вхідного струму для базової схеми ППС (рис. 1) при значеннях  $\beta_{n-p-n}=118$  та  $\beta_{p-n-p}=67$ .

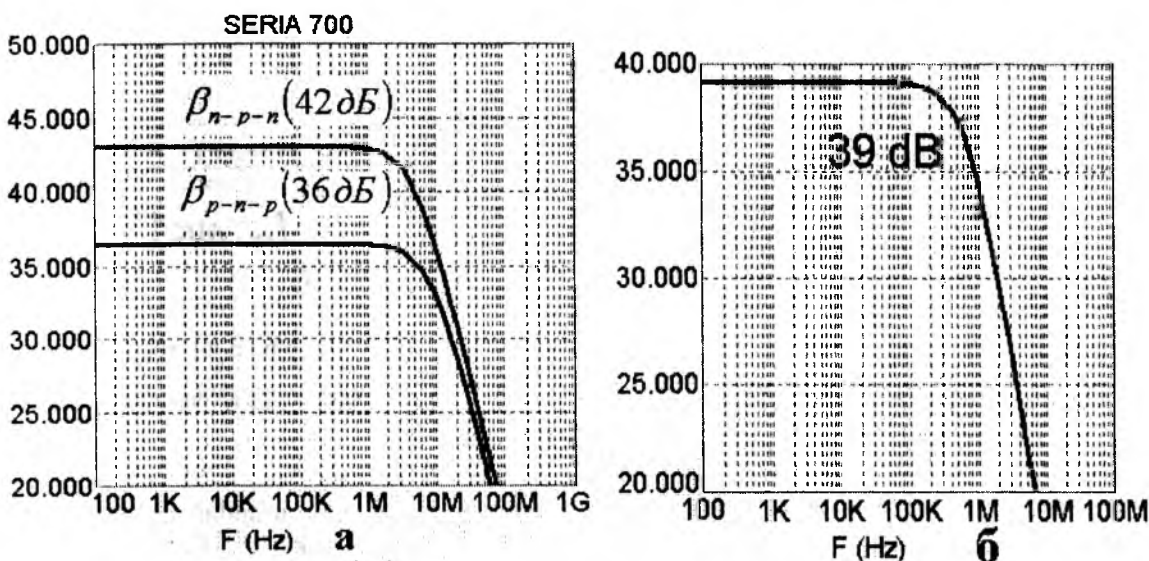


Рисунок 3 – Коефіцієнти передачі по струму для :

а) n-p-n і p-n-p транзисторів Серії 700; б) двотактного ППС із симетричною структурою

На рис. 3.б представлено результати моделювання за допомогою програми схемо-технічного моделювання MicroCap 9.0 та моделей бібліотеки моделей Серії 700 у форматі PSpice. Таким чином із рис. 3б видно, що коефіцієнт підсилення найпростішого ППС знаходиться на рівні 39 дБ, що відповідає значенню  $K_i \approx 90$ , і збігається із даними, отриманими для розробленої математичної моделі.

На рис. 5 представлено графік залежності похибки лінійності статичної передатної характеристики двотактного симетричного ППС від амплітуди вхідного струму  $I_{вх}$ , який було отримано шляхом комп'ютерного моделювання. Дослідження проводилися у заданому діапазоні вхідного сигналу  $\pm 1$  мкА без резистора зворотного зв'язку та із резистором навантаження 1к $\Omega$ . Результати моделювання представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Діапазон, $I_{вх}$ (нА)	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 40$	$\pm 100$	$\pm 500$	$\pm 1000$
$\Delta U_{лmax}$ (мкВ) (PSpice)	0,42	1,69	6,7	42,16	1044	4069
$\Delta U_{лmax}$ (мкВ) (мат. модель.)	0,46	1,56	6,46	42,38	1045	4066

У табл. 1 наведено результати досліджень за допомогою розробленої математичної моделі та із використанням програми схемотехнічного моделювання і бібліотек моделей реальних транзисторів. З представлених даних очевидно, що розроблена математична модель досить точно описує передатну характеристику ППС із симетричною структурою.

Слід відзначити, що не зважаючи на відсутність вихідного каскаду, який би збільшував навантажувальну здатність каскаду попереднього підсилення схеми, похибки лінійності є досить низькими. Водночас додаткове введення вихідного каскаду дозволить збільшити загальний коефіцієнт передачі.

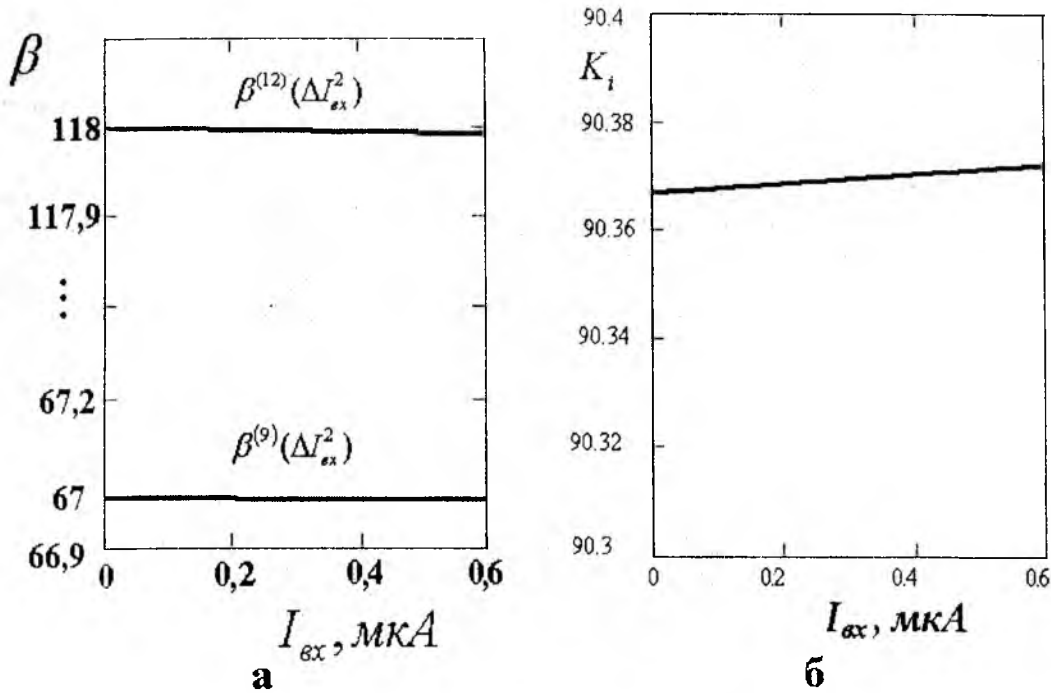


Рисунок 4 – Графіки залежностей коефіцієнту підсилення від струму: а)  $\beta$  p-p-n і p-p-p транзисторів на основі інтерполяційних функцій  $\beta^{(12)}(\Delta I_{ox}^2)$  і  $\beta^{(9)}(\Delta I_{ox}^2)$ ; б)  $K_i$  ППС із симетричною структурою  $K_i(I_{ox})$ .

На рис. 5 а) представлено процедуру виділення характеристики нелінійності із статичної передатної характеристики  $U_{вих}=f(I_{вх})$  за допомогою лінійної функції  $y=k \cdot x+b$ . Підсумкова функція отримана у вигляді  $U_{нелін}=f(I_{вх})+(I_{вх} \cdot k+b)$  рис. 5 б).

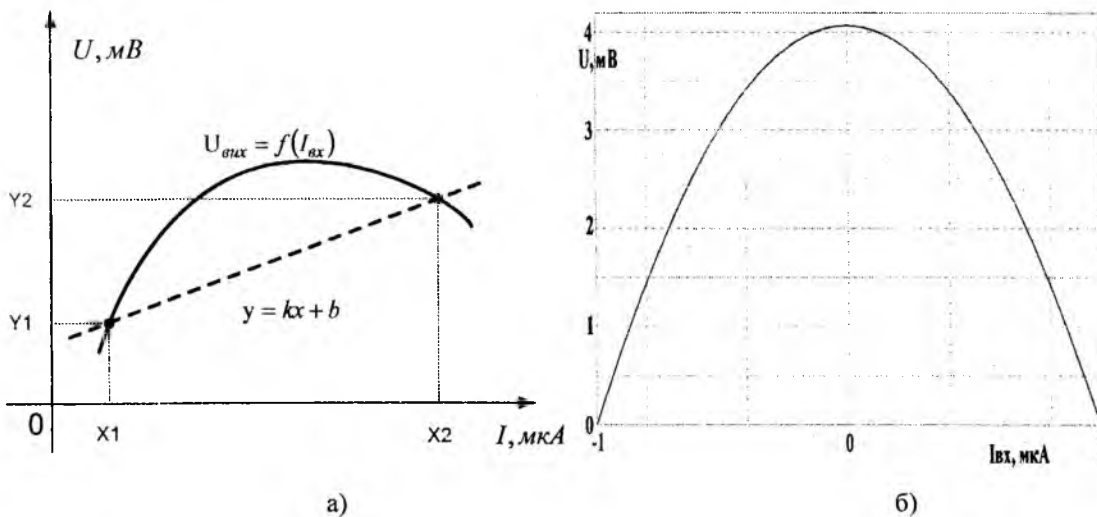


Рисунок 5 – Графіки статичної передатної характеристики: а) схематичної; б) двотактного симетричного ППС у діапазоні  $\pm 1 \mu A$ .

### Висновки

Отримано аналітичні співвідношення для статичної передатної характеристики підсилювача постійного струму із симетричною структурою із врахуванням неідентичності коефіцієнтів підсилення  $\beta$  по струму транзисторів p-p-n і p-n-p типів, які дозволяють проаналізувати потенційні характеристики пристрою.

У рамках запропонованої математичної моделі оцінено вплив змінення коефіцієнта передачі базової схеми двотактного симетричного ППС у малосигнальній зоні з урахуванням змінення значень диференційних коефіцієнтів підсилення по струму  $\beta$  транзисторів різного типу провідності.

Доведено адекватність отриманої математичної моделі у діапазоні вхідного і вихідного сигналів шляхом порівняльного аналізу похибок лінійності ППС, отриманих у рамках виведених співвідношень, а також за допомогою пакету прикладних програм схемотехнічного моделювання із використанням бібліотек фізичних моделей транзисторів сучасних напівзаставних ВІС.

### Список використаних джерел

1. Walt Kesler ANALOG-DIGITAL CONVERSION. ADI Central Application Department March 2004. 1127 pages.
2. Alan B. Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design: Wiley Classic Library New Jersey 2003, 915 p.
3. В. Н. Иванов, В.В. Иванов Проектирование аналоговых систем на специализирован их ВИС. -- ЦНИИ «Румб», 1988. -- 146 с.
4. О.Д. Азаров, В.А. Гарнага, Похибки лінійності двотактного симетричного підсилювача постійного струму // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: Міжнар. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2008. – №1(11). – с. 124-132.
5. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму / Азаров О.Д., Гарнага В.А., Решетнік О.О., Богомолів С.В. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Електронне наукове фахове видання – 2007. – №1(1). 8 с. [www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html)
6. H. Camenzind 700 Series 20V BIPOLAR ARRAY DESIGN MANUAL. San Francisco CA 94110-5151.: Array Design Inc., 2005, 192 p.
7. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

### Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – д.т.н., професор, директор інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 51-32-93,

Гарнага Володимир Анатолійович – аспірант кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.