

О. Д. Азаров, д. т. н., проф.; М. Ю. Теплицький

МОДЕЛЬ ПЕРЕДАТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОТАКТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА СТРУМУ З ВИБІРКОВИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

У статті розроблено математичну модель характеристики вхід-вихід двотактного підсилювача постійного струму, а також аналітичні співвідношення для коефіцієнта передачі в діапазоні вхідного сигналу. Показано, що використання двоступеневих проміжних каскадів підсилення дозволяє значно підвищити лінійність передатної характеристики підсилювача.

Ключові слова: двотактний підсилювач струму, передатна характеристика, похибка лінійності, проміжний каскад, відбивач струму, керований генератор струму.

Вступ

Останні два десятиліття характеризуються зростанням інтересу розробників аналогових пристроїв до двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС). Їхніми перевагами над одноктактними структурами, насамперед, є висока лінійність передатної характеристики, а також симетричність фронтів перехідної характеристики під час реакції на прямокутниковий імпульс. Відмітною особливістю двотактних схем є також широкий діапазон частот максимальної неспотвореної потужності синусоїдального сигналу.

Актуальність

Першим варіантом побудови ДППС можна вважати схему [1], запропоновану американським дослідником Фраєм ще в 1976 році. Вона містить вхідний двотактний каскад у вигляді самодоповняльної схеми із загальною базою на біполярних транзисторах різного типу провідності, а також два одноктактних тракту проміжного протифазного підсилення. Недоліком цієї схеми є складність завдання робочих точок транзисторів проміжних каскадів, а також високий рівень струму зсуву нуля. Подальший розвиток ДППС – введення до структури відбивачів струму і двотактного тракту проміжного підсилення, що може містити також і вихідний каскад [2, 3].

Окремим напрямком у цьому плані є так звані «конвеєри струму», на основі яких можна будувати низку операційних перетворювачів струмів і напруг. Загальним недоліком вказаних схем є надмірне збільшення числа каскадів за потреби досягнення великого коефіцієнта передачі на рівні 100 – 120 дБ і, відповідно, значний фазовий зсув між вхідним і вихідним сигналами, що призводить до зниження швидкодії. Крім того, під час зростання опору навантаження в таких пристроях знижується підсилення схем.

Слід зазначити, що вперше розв'язання проблеми самобалансування робочих точок проміжних каскадів підсилення було запропоновано у ВНТУ [4]. При цьому вказане самобалансування здійснюється шляхом застосування вибіркового зворотного зв'язку (ВЗЗ). Крім того, при цьому симетруються коефіцієнти передачі проміжних каскадів, побудованих на транзисторах різного типу провідності. Водночас, незважаючи на наявність певних елементів теорії в цьому напрямку, досі ще відсутні узагальнені математичні моделі передатних характеристик ДППС, що дозволяє оцінити їхню лінійність під час проектування. Зважаючи на все вищевказане, тема статті «Модель передатної характеристики двотактного підсилювача струму з вибірковою зворотним зв'язком» є актуальною.

Мета досліджень

Виведення математичної моделі статичної передатної характеристики ДППС,

побудованого із введенням вибіркового зворотного зв'язку у проміжні каскади підсилення.

Завдання досліджень

1. Отримати аналітичні співвідношення характеристики вихід-вхід ДППС із вибіркоким зворотним зв'язком, структурно-функціональна модель якого побудована із застосуванням керованих і функціональних генераторів струму.
2. Оцінити адекватність моделей передатних характеристик ДППС шляхом порівняння результатів, отриманих за допомогою аналітичних співвідношень, а також отриманих комп'ютерним аналізом запропонованих схемних рішень.
3. Запропонувати рекомендації щодо структурно-функціональної організації ДППС із вибіркоким зворотним зв'язком для одно- і багатоступневих проміжних каскадів, а також рекомендації щодо підвищення лінійності передатної характеристики.

Розв'язання задач

Розглянемо узагальнену структурно-функціональну схему двотактного симетричного ППС (рис. 1а), що реалізує метод балансного завдання струмів робочих точок проміжних підсилювальних каскадів. Суть методу полягає у введенні двох інтегрованих контурів вибіркового зворотного зв'язку у проміжні каскади підсилення, за допомогою яких симетруються вихідні струми протифазних каналів підсилення, реалізованих на транзисторах різного типу провідності, і задаються робочі точки трактів проміжного підсилення. Вказана схема підсилювача складається із двотактного вхідного каскаду, побудованого на транзисторах VT1 та VT2, двох трактів проміжного протифазного підсилення з коефіцієнтами передачі K'_i і K''_i та вихідного каскаду, реалізованого на відбивачах струму ВСІ та ВСІІ. Ці інтегровані контури (позначені пунктиром) складаються з двонаправленого відбивача струму (ДВС), а також компенсаторів струму КСІ та КСІІ. При цьому балансування робочих точок здійснюється за допомогою компенсаційних струмів $I'_{кмс}$ і $I''_{кмс}$.

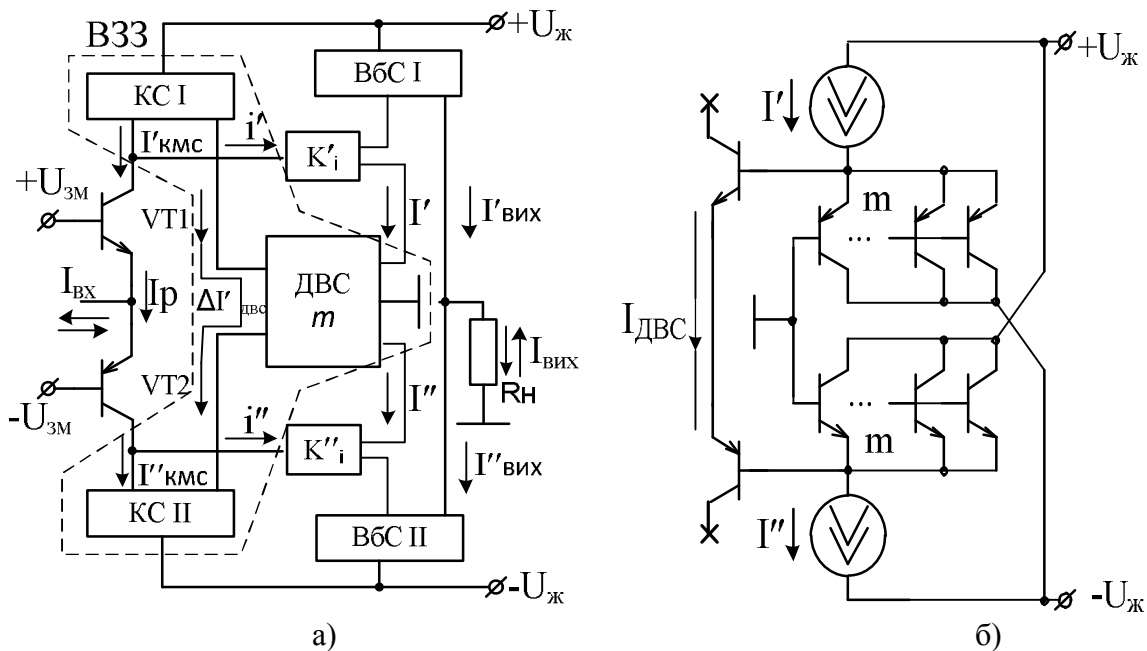


Рис. 1. ДППС із вибіркоким зворотним зв'язком:
 а) структурно-функціональна схема; б) двонаправлений відбивач струму

Вибірковість контуру зворотного зв'язку означає його здатність реагувати тільки на непропорційні прирости струмів проміжних каскадів протифазного підсилення і формувати

відповідні компенсаційні струми $I'_{кмс}$ та $I''_{кмс}$ за допомогою компенсаторів КСІ та КСІІ. Введення до структури підсилювача ДВС дозволяє формувати неперервні сигнали про співвідношення I' та I'' і відповідно регулювати компенсаційні струми до досягнення балансування схеми по контурах зворотного зв'язку. Одним з можливих варіантів реалізації ДВС є схема, представлена на рисунку 1б, яку побудовано на комплементарних транзисторах із загальною базою [5].

Дія зворотних зв'язків призводить до підтримання у схемі балансового співвідношення:

$$\frac{I'}{I_p} = \frac{I_p}{I''} \tag{1}$$

Причому у разі наявності цього балансу $I'_{кмс} \approx I''_{кмс} \approx I_p$, де I_p – струм робочої точки.

Параметр m визначає глибину зворотного зв'язку ДВС. Струм $I_{двс}$, що формується на виходах ДВС, дорівнює:

$$I_{двс} = I_p = \frac{\sqrt{I' \cdot I''}}{m} \tag{2}$$

Оцінити потенційні характеристики ДППС можна шляхом заміни реальних елементів схеми на ідеальні (транзистори замінюють керованими генераторами струму). Для цього запропоновано еквівалентну схему підсилювача, побудовану на керованих генераторах струму (лінійних та функціональних), наведену на рис. 2 [6].

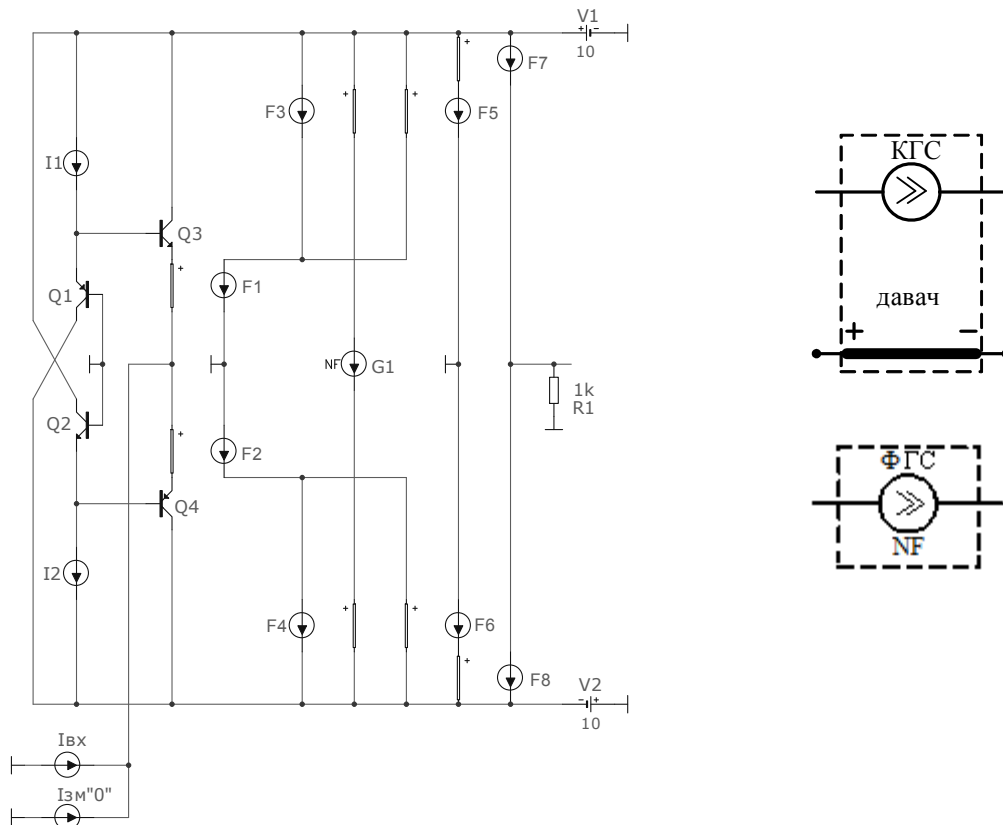


Рис. 2. ДППС на керованих і функціональних генераторах струму

Проаналізуємо струми, що протікають у цій схемі. Вхідний струм $I_{вх}$ та струм зміщення нуля $I_{зм}$ розгалужуються у вхідному каскаді та в сумі зі струмом $\Delta I_{двс}$ утворюють прирости вхідного струму по верхньому та нижньому каналах $i'_{вх}$ та $i''_{вх}$. При цьому можна скласти

систему рівнянь:

$$\begin{cases} i'_{\text{ex}} = -\frac{1}{2}(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}}) + \Delta I_{\text{двс}}, \\ i''_{\text{ex}} = \frac{1}{2}(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}}) + \Delta I_{\text{двс}}. \end{cases} \quad (3)$$

Далі прирости i'_{ex} та i''_{ex} підсилюються у проміжному каскаді з відповідними коефіцієнтами передачі K'_i та K''_i . Враховуючи те, що приріст струму на виході ДВС $\Delta I_{\text{двс}} = \sqrt{I' \cdot I''} - I_p$, отримуємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} I' = (-\frac{1}{2}(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}}) + \sqrt{I' \cdot I''} - I_p)K', \\ I'' = (\frac{1}{2}(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}}) + \sqrt{I' \cdot I''} - I_p)K'', \end{cases} \quad (4)$$

де I' та I'' – вихідні струми верхнього та нижнього каналів підсилення.

Для того, щоб отримати рівняння передатної характеристики ДППС, потрібно розв'язати систему рівнянь (4) відносно струмів I' та I'' . Спочатку поділимо перше рівняння на K'_i та друге – на K''_i й отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{I'}{K'} = -\frac{1}{2}(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}}) + \sqrt{I' \cdot I''} - I_p, \\ \frac{I''}{K''} = \frac{1}{2}(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}}) + \sqrt{I' \cdot I''} - I_p. \end{cases} \quad (5)$$

Від другого рівняння віднімемо перше й отримаємо:

$$I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}} = \frac{I''}{K''} - \frac{I'}{K'} \quad (6)$$

Із виразу (2) отримуємо значення струмів I' та I'' :

$$I' = \frac{I_p^2 m^2}{I''}, \quad (7)$$

$$I'' = \frac{I_p^2 m^2}{I'}. \quad (8)$$

Далі підставимо вираз (8) у (6) й отримаємо:

$$I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}} = \frac{I_p^2 m^2 K' - I'^2 K''}{I' K' K''}. \quad (9)$$

Розв'язуючи рівняння (9) відносно I' , отримуємо такі дійсні корені:

$$I'_1 = \frac{-(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}})K'K'' - \sqrt{((I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}})K'K'')^2 + 4I_p^2 m^2 K'K''}}{2K''},$$

$$I'_2 = \frac{-(I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}})K'K'' + \sqrt{((I_{\text{ex}} + I_{\text{зм}})K'K'')^2 + 4I_p^2 m^2 K'K''}}{2K''}.$$

Аналогічно, підставляючи (7) у (6), отримуємо корені рівняння для I'' :

$$I_1'' = \frac{(I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'' - \sqrt{((I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'')^2 + 4I_p^2 m^2 K'K''}}{2K'},$$

$$I_2'' = \frac{(I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'' + \sqrt{((I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'')^2 + 4I_p^2 m^2 K'K''}}{2K'}.$$

Враховуючи фізичний принцип дії підсилювача, а саме – явище, за якого, якщо струм втікає в схему, то він втікає в її вихід з навантаження, для струмів I' та I'' можна скласти загальне рівняння передатної характеристики в діапазоні вхідного сигналу у вигляді:

$$I_{\text{вих}}(I_{\text{вх}}) = I_2' - I_1'' =$$

$$= \frac{-(I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'' + \sqrt{((I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'')^2 + 4I_p^2 m^2 K'K''}}{2K''} -$$

$$- \frac{(I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'' - \sqrt{((I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})K'K'')^2 + 4I_p^2 m^2 K'K''}}{2K'}.$$
(10)

Слід також звернути увагу на таку важливу властивість схеми, як наявність певної нелінійності в залежності $I_{\text{вих}} = f(I_{\text{вх}})$. При цьому абсолютна та відносна похибки лінійності ДППС визначають через струми I' та I'' за формулами:

$$\Delta I_{\text{нл}} = |I'| - |I''|, \quad (11)$$

$$\delta I_{\text{нл}} = \frac{\Delta I_{\text{нл}}}{\max(I', I'')} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Наявність похибки лінійності підсилювача можна ілюструвати за допомогою графіка передатної характеристики, наведеного на рис. 3.

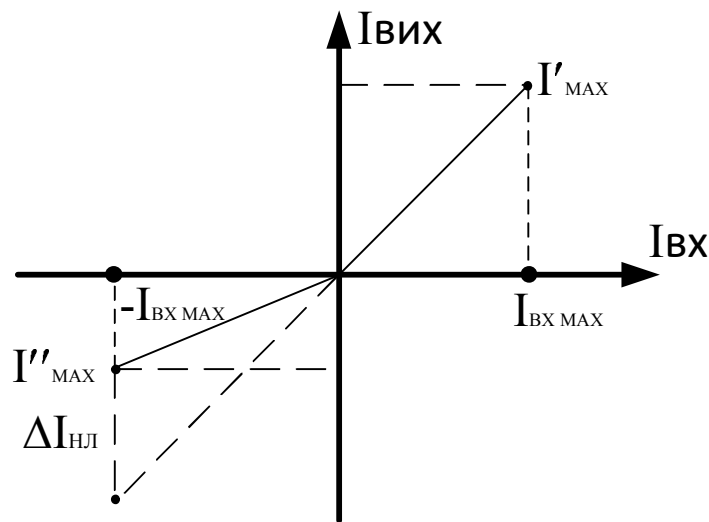


Рис. 3. Графік похибки лінійності передатної характеристики ППС

Коефіцієнт передачі $K_{i_{\text{вих}}}$ можна знайти через похідну рівняння (10) передатної характеристики у вигляді:

$$K_{i\text{вих}} = \frac{dI_{\text{вих}}(I_{\text{вх}})}{dI_{\text{вх}}} = \frac{K'K'' + \frac{2K'^2K''^2(I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})}{2\sqrt{K'K''(4I_p^2m^2 + K'K''I_{\text{вх}}^2 + 2K'K''I_{\text{вх}}I_{\text{зм}} + K'K''I_{\text{зм}}^2)}}}{\frac{K'K''}{2} - \frac{2K'^2K''^2(I_{\text{вх}} + I_{\text{зм}})}{4\sqrt{K'K''(4I_p^2m^2 + K'K''I_{\text{вх}}^2 + 2K'K''I_{\text{вх}}I_{\text{зм}} + K'K''I_{\text{зм}}^2)}}}$$

$$= \frac{K'K''}{K''}$$

Графік залежності $K_{i\text{вих}}$ від вхідного струму наведено на рис. 4. Як видно з цього рисунка, $K_{i\text{вих}}$ змінюється в діапазоні вхідного сигналу, що додатково свідчить про наявність похибки лінійності.

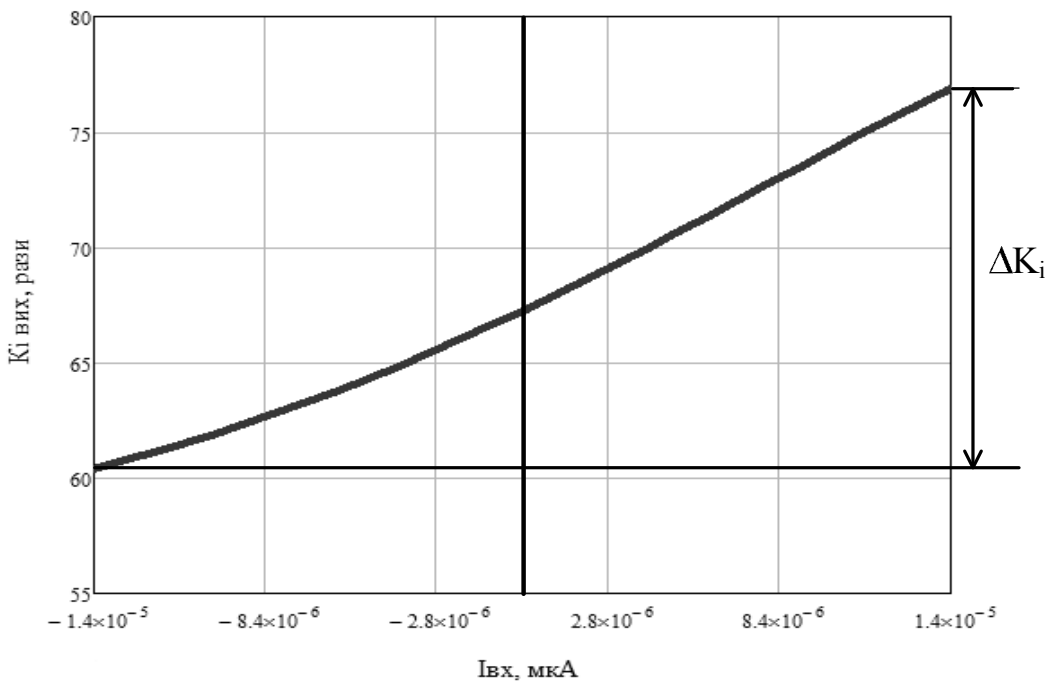
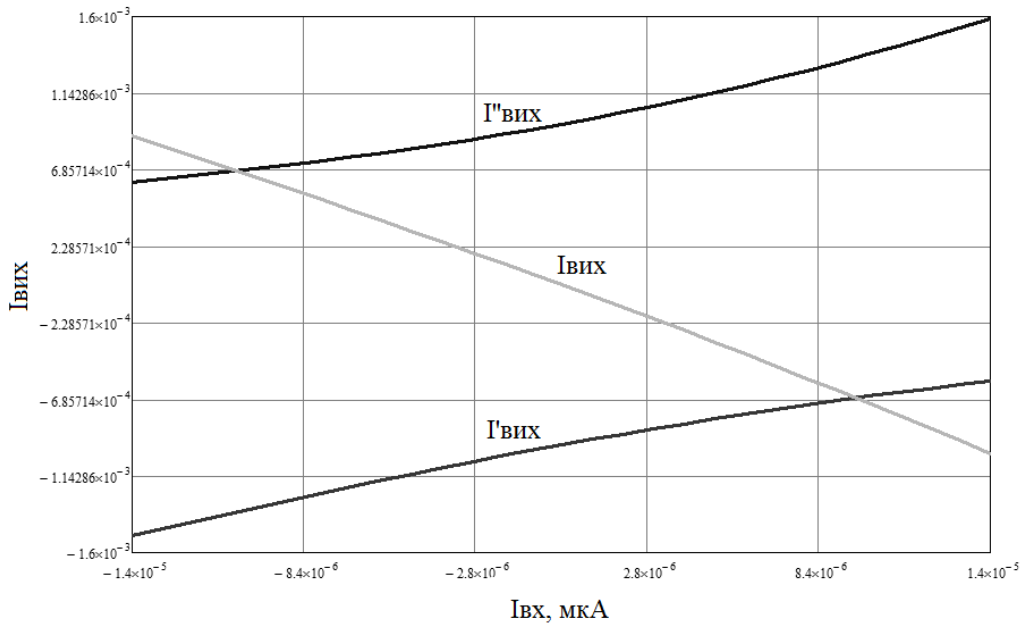
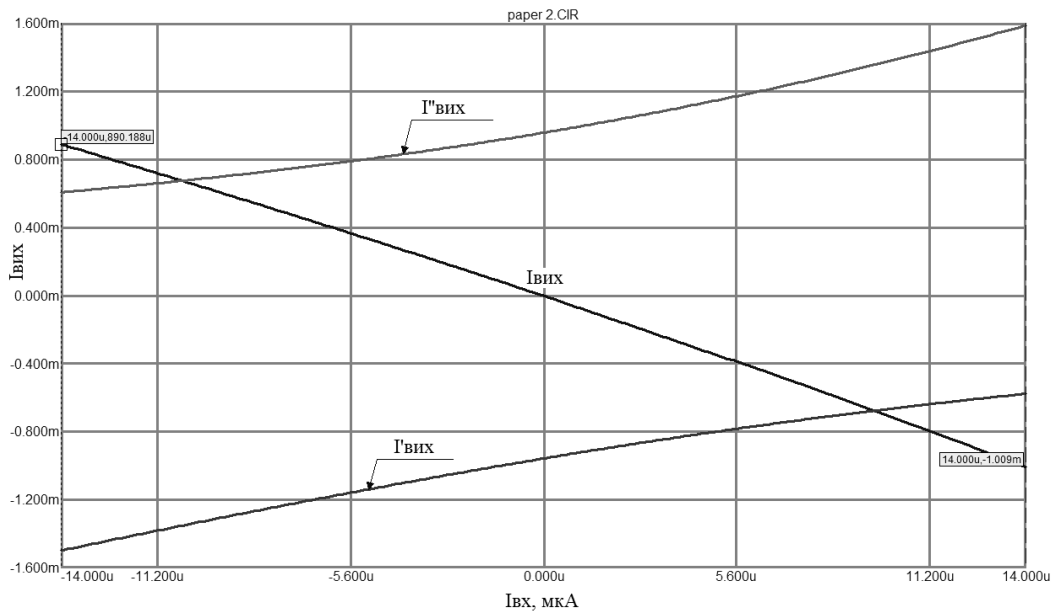


Рис. 4. Залежність $K_{i\text{вих}} = f(I_{\text{вх}})$ від вхідного струму

Одним із чинників, що впливають на похибку лінійності підсилювача є неідентичність коефіцієнтів підсилення K_i' та K_i'' проміжних каскадів. Наприклад, для схеми, наведеної на рис. 2, похибка лінійності становить ≈ 90 мкА при $K_i' = 52$ та $K_i'' = 93$ (за умови використання моделей біполярних транзисторів Intersil HFA 3178) [7]. Графіки передатної характеристики для вказаної ідеалізованої схеми, у якій відповідні вузли, такі, як: відбивачі та компенсатори струму, ДВС і проміжні підсилювальні каскади, замінено на керовані та функціональні генератори струму, наведені на рис. 5.



а)



б)

Рис. 5. Передатні характеристики ідеалізованого ППС, отримані:
а) у середовищі Mathcad;
б) за підсумками комп'ютерного моделювання в Мігросар

Треба підкреслити при цьому наявність збіжності результатів математичного та комп'ютерного моделювань, що підтверджує адекватність отриманої моделі передатної характеристики ДППС.

Варто зазначити, що важливим є завдання зменшення похибки лінійності. Першим зі шляхів її розв'язання буде вирівнювання коефіцієнтів підсилення K_i' та K_i'' проміжних каналів протифазного підсилення [8]. Для цього доцільно використовувати побудову проміжних каскадів з m -кратним запаралелюванням підсилювальних транзисторів, а також запаралелюванням транзисторів ДВС, як показано на рис. 6.

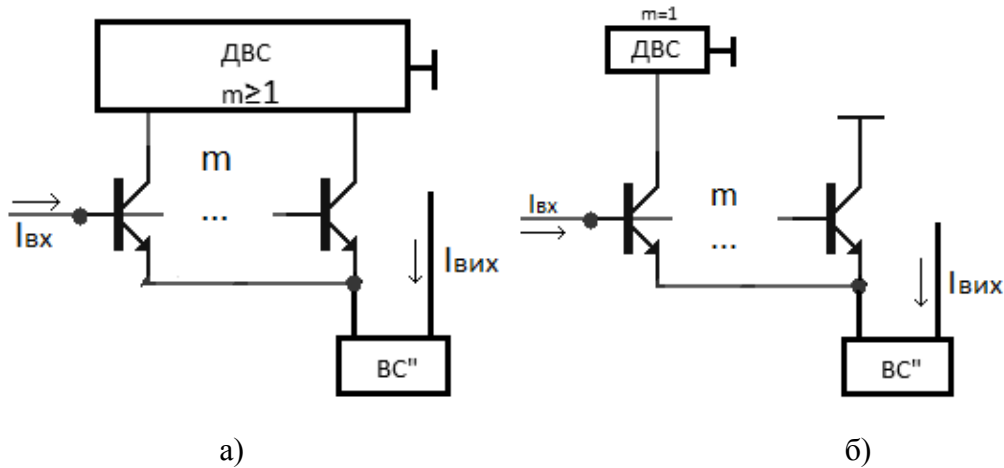


Рис. 6. Варіанти підключення одноступеневих проміжних каскадів до ДВС:
 а) із зосередженими транзисторами;
 б) із розгалуженням транзисторів

Використання параметра m , тобто m пар паралельно підключених транзисторів у ДВС (див. рис. 6а), дозволяє зменшити глибину внутрішнього зворотного зв'язку підсилювача та запобігти генерації схеми, проте (порівняно з іншим варіантом (рис. 6б)) вимагає більших апаратних витрат. Інший шлях – це застосування в кожному каналі проміжного підсилення двоступеневих схем із застосуванням комбінацій n-p-n- та p-n-p-транзисторів.

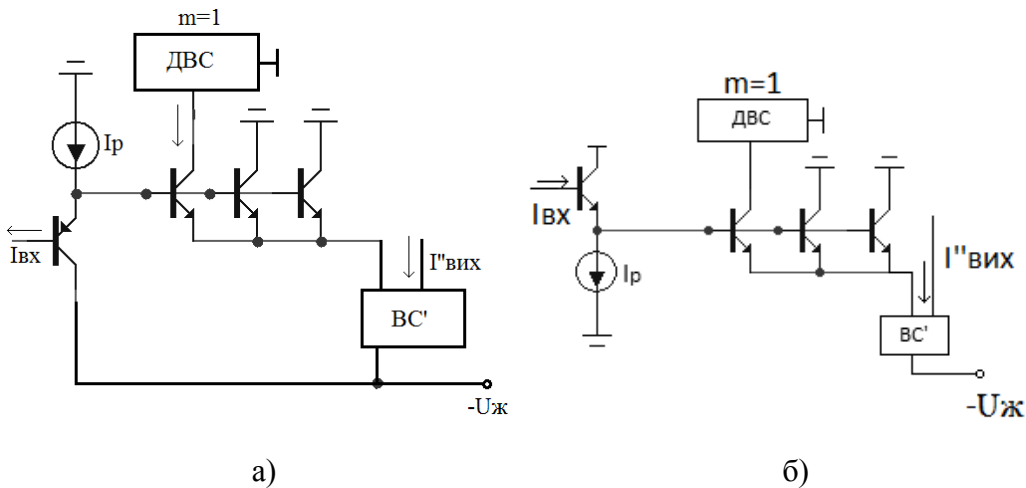
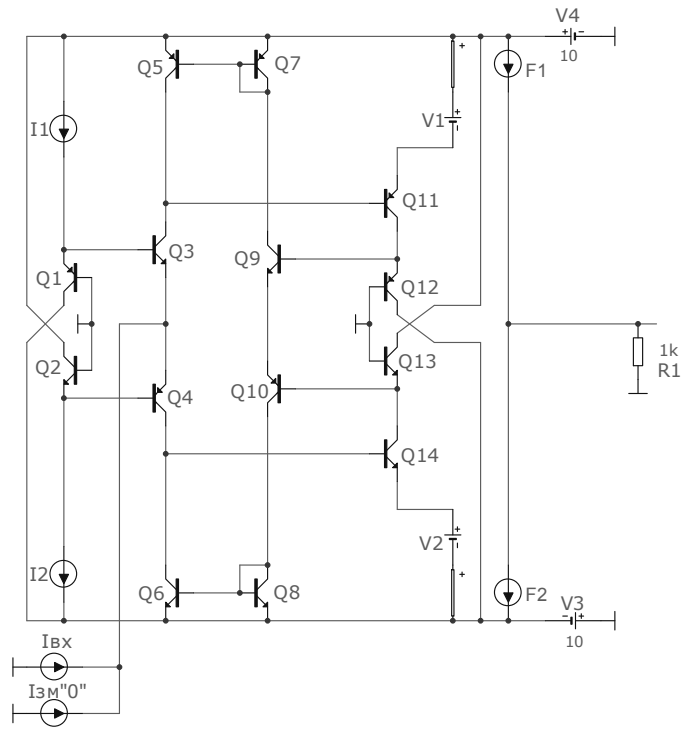


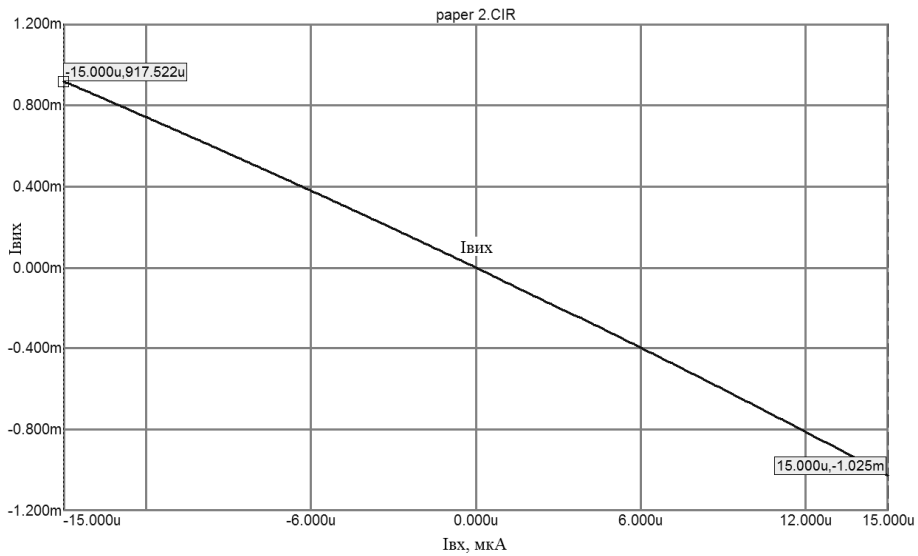
Рис. 7. Підключення двоступеневих проміжних каскадів до ДВС
 а) з комбінацією транзисторів p-n-p та n-p-n;
 б) з комбінацією транзисторів одного типу провідності (на прикладі n-p-n)

Варто зазначити, що використання ДВС з параметром $m > 1$, крім зменшення похибки лінійності та збільшення коефіцієнта передачі, дозволяє також зменшити струм зміщення 0 у m разів.

Розглянемо декілька принципових схем ДППС та порівняємо їхні характеристики. На рис. 8 наведено спрощену схему та передатну характеристику ППС з одноступеневим проміжним каскадом, у якому вихідні транзисторні відбивачі струму замінено на керовані генератори струму.



а)

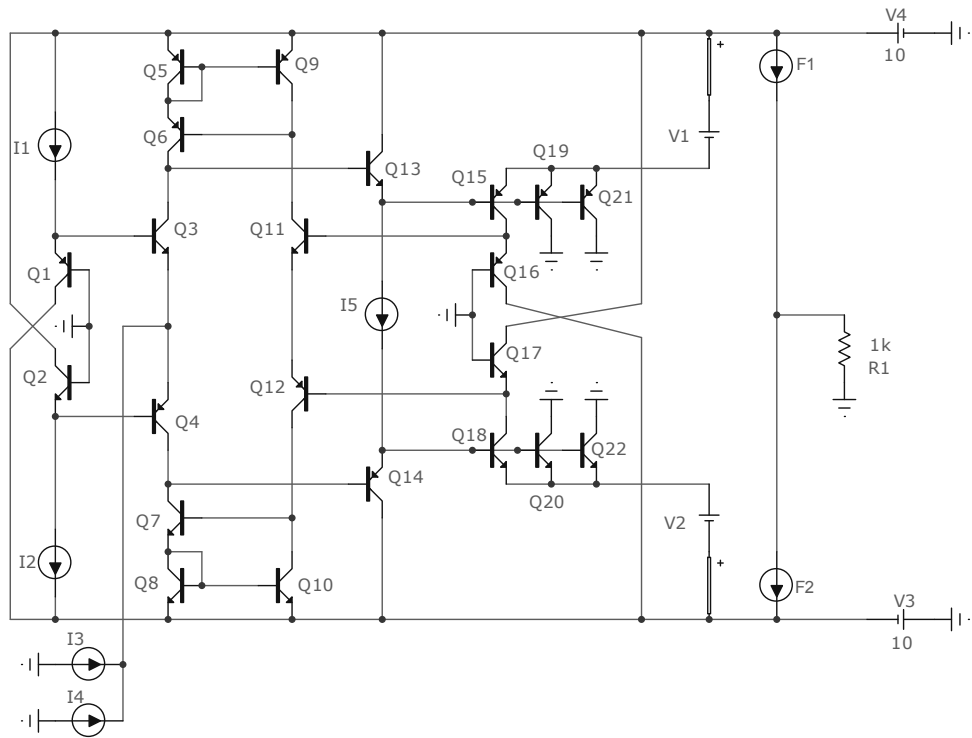


б)

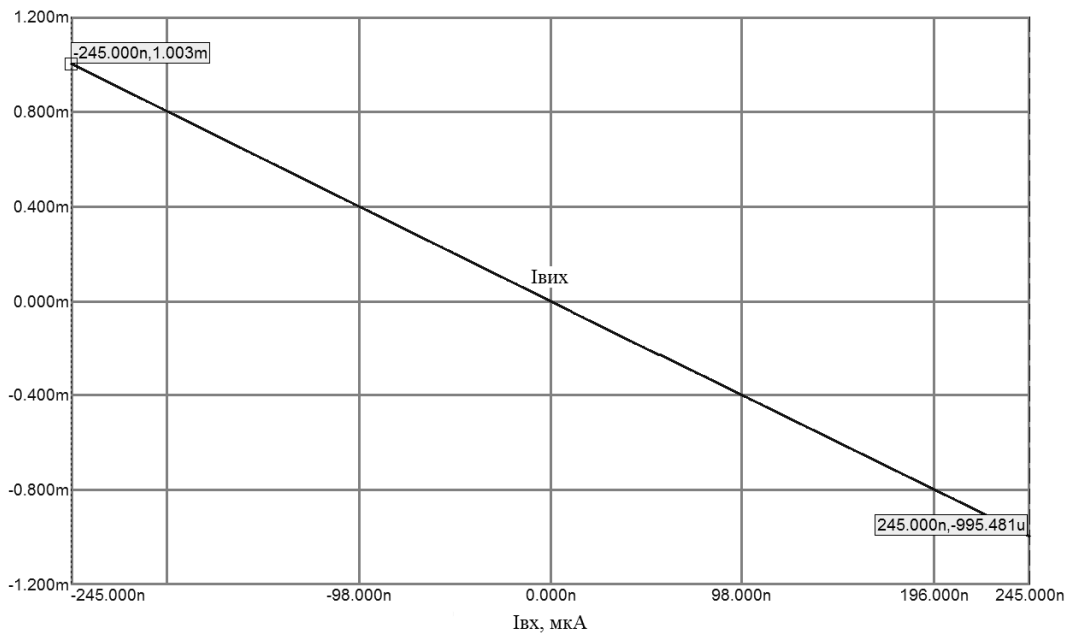
Рис. 8. Двотактний ППС:
а) спрощена принципова схема;
б) передатна характеристика $I_{вих} = f(I_{вх})$

Як можна обчислити з графіка, похибка лінійності розглянутої схеми становить $\Delta I_{нл} = 104$ мкА, або 10,4 % за умови, що $K_i' = 52$, $K_i'' = 93$ та $\Delta I_p = 104$ мА.

Розглянемо схему ППС з двоступеневими розгалуженими проміжними каскадами підсилення (рис. 9). Коефіцієнти підсилення K_i' та K_i'' такої схеми є значно вищі порівняно з попередньою схемою і відповідно дорівнюють 63,8 дБ та 62,6 дБ, параметр $m=3$.



а)



б)

Рис. 9. ППС із двоступневими проміжними каскадами:

а) принципова схема;

б) передатна характеристика

Отримані результати свідчать про ефективність використання двоступневих проміжних каскадів. Це дозволяє, зокрема, збільшити підсилення схеми, розширити смугу пропускання, що призведе до підвищення точності. Похибка лінійності цієї схеми становить 8 мкА, тобто 0,8% при робочому струмі 1 мА. Отже, цей підхід має усі переваги над схемами ППС з одноступневими проміжними каскадами.

Висновки

1. Отримано математичну модель статичної передатної характеристики ДППС, що дозволяє визначити значення $I_{вих}$ при заданому $I_{вх}$, а також оцінити її лінійність.
2. Порівняння результатів дослідження передатної характеристики з використанням аналітичних виразів та комп'ютерного моделювання підтверджує їхню збіжність, що свідчить про адекватність отриманих співвідношень.
3. Запропоновано рекомендації щодо структурно-функціональної організації схем підсилювачів. Доведено, що застосування параметра m і композиції n - p - n - і p - n - p -транзисторів дозволяє підвищити лінійність передатної характеристики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Patent 3852678 USA, МПК Н 03F 3/26. Push-pull amplifier with current mirrors for determining the quiescent operating point / George Joseph Frye; Claimer and patent holder George Joseph Frye. – № 358152; claimed 07.05.73; published 12.10.76.
2. Patent 4274059 USA, МПК Н 03F 3/30. Single ended push-pull amplifier / Claimer and patent holder Yasuhisa Okabe assignor to Victor Company of Japan. – № 963901; claimed 27.11.78; published 16.06.81.
3. Patent 6734720 USA, МПК Н 03F 3/45. Operational amplifier in which the idle current of its output push-pull transistors is substantially zero / Claimer and patent holder Hiroshi Imai, assignor to Denso Corporation. – № 10/223702; claimed 20.08.02; published 11.03.04.
4. Азаров О. Д. Двотактні підсилювачі постійного струму для багато розрядних перетворювачів інформації, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 156 с.
5. Теплицький М. Ю. Двотактні підсилювачі постійного струму на базі двонаправлених відбивачів струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – Київ, 2011. – № 2 (34). – С. 15 – 22.
6. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.
7. Технічний опис HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models: Application Note, Intersil, 1994. – 5 р.
8. Гарнага В. А. Методи завдання робочих точок проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – Київ, 2009. – № 1(25). – С. 6 – 14.

Азаров Олексій Дмитрович – д. т. н., професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки.

Теплицький Михайло Юхимович – аспірант кафедри обчислювальної техніки.

Вінницький національний технічний університет.