

О. Д. Азаров¹
Р. М. Медяний¹
А. С. Фігас¹

ВІДБИВАЧІ СТРУМУ З ВИСОКИМ І НАДВИСОКИМ ВИХІДНИМ ОПОРОМ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

¹Вінницький національний технічний інститут

*Відбивачі струму (ВС) або струмові дзеркала, побудовані на біполярних транзисторах, широко використовуються в різноманітних електронних схемах, таких як: підсилювачі постійного струму, перетворювачі код-струм, аналого-цифрових перетворювачах, джерелах живлення та інших. Особливістю малопотужних біполярних транзисторів є можливість функціонувати в лінійному режимі за відносно невеликих робочих напруг на переходах колектор-емітер і бази емітер близько 0,7... 0,8 В зі струмами 0,1...10 мА. Запропоновано новий підхід побудови ВС з високим і надвисоким $r_{вих}$, що полягає у використанні композиції *n-p-n* і *p-n-p* транзисторів і дозволяє скомпенсувати змінення базового струму транзистора регулятора, який виникає внаслідок дії різноманітних чинників. Проаналізовано статичні характеристики схем відомих ВС, визначено їх недоліки і розглянуто шляхи їх усунення. Виведено аналітичні співвідношення для визначення вихідних опорів запропонованих схем ВС, зокрема, такої, в якій застосовується введення додатного зворотного зв'язку в колекторний контур транзистора регулятора. Здійснено комп'ютерне моделювання статичних характеристик для визначення адекватності отриманих математичних моделей шляхом порівняння отриманих результатів. Крім того, розглянуто побудову ВС з високим і надвисоким $r_{вих}$, що застосовуються для побудови перетворювачів аналогових сигналів. Розглянуто схеми відомих ВС (Відлара та Уілсона) та визначено недоліки таких схем. Виведено аналітичні співвідношення для розрахунків вихідних опорів. Також, отримано вирази для коефіцієнтів передачі струму і напруги, та наведено залежності, що демонструють роботу запропонованих відбивачів струму за різних струмів зміщення. Здійснено схемотехнічне моделювання наведених ВС з високим і надвисоким $r_{вих}$, побудованого із застосуванням композиції інтегральних транзисторів *n-p-n* і *p-n-p* провідності. Надано рекомендації щодо побудови ВС з високим і надвисоким $r_{вих}$, що дає можливість використовувати їх в багатоканальних аналого-цифрових перетворювачах. Здійснено порівняльний аналіз деяких варіантів реалізації ВС з високим і надвисоким $r_{вих}$.*

Ключові слова: відбивач струму, струм, напруга, вихідний опір, коефіцієнт передачі.

Вступ

Відбивачі струму (ВС) або струмові дзеркала, побудовані на біполярних транзисторах, широко використовуються в різноманітних електронних схемах, таких як: підсилювачі постійного струму, перетворювачі код-струм, аналого-цифрові перетворювачі, джерела живлення тощо. Особливістю малопотужних біполярних транзисторів є можливість функціонувати в лінійному режимі за відносно невеликих робочих напруг на переходах колектор-емітер і бази емітер (близько 0,7...0,8 В) зі струмами 0,1...10 мА.

Точнісні характеристики вищезгаданих схем часто-густо істотно залежать від значень вихідних опорів ВС. Так, наприклад, якщо такий пристрій як буфер напруги [1], побудований із застосуванням ВС, працює в широкому діапазоні вхідних напруг, то у разі зміщення струму, що генерує відбивач, збільшується похибка лінійності або масштаб передатної характеристики. Існуючі підходи [2] щодо збільшення вихідного опору $r_{вих}$ базуються на застосуванні комбінацій біполярних і польових транзисторів або операційних підсилювачів, що ускладнює технології виготовлення схем у мікроелектронному виконанні, або погіршує динамічні характеристики. Іноді з цією метою, а також для розширення діапазону струмів, що відбиваються вводяться резистивні дільники напруги, а також додаткові резистори, що задають емітерний струм. Проте такий підхід побудови схем вимагає окремих процедур виготовлення інтегральних резисторів [3]. Відомі праці [4]—[7], в

яких розглядаються відбивачі струму різноманітного призначення з покращеними статичними і динамічними характеристиками. При цьому слід зазначити, що це зазвичай приводить до значного ускладнення схем, яке полягає у введенні допоміжних джерел струму, а іноді і конденсаторів для коригування АЧХ коефіцієнтів передачі. Автори пропонують вдосконалений підхід щодо побудови відбивачів струму з високим і надвисоким $r_{\text{вих}}$ з використанням композиції інтегральних n-p-n і p-p-p транзисторів за відносно нескладною структурою порівняно з поширеною схемою Уілсона. Водночас, запропоновані рішення є новими, не висвітлені в науково-технічній літературі, тому тема статті є актуальною.

Мета досліджень — вдосконалення статичних характеристик відбивачів струму порівняно з відомим шляхом використання комбінацій біполярних транзисторів різної провідності.

Задачі досліджень:

- проаналізувати статичні характеристики схем відомих ВС, визначити їх недоліки і розглянути шляхи їх усунення;
- розглянути новий підхід побудови ВС з високим і надвисоким $r_{\text{вих}}$, що полягає у використанні композиції n-p-n і p-p-p транзисторів і дозволяє скомпенсувати змінення базового струму транзистора регулятора, що виникає внаслідок дії різноманітних чинників;
- навести аналітичні співвідношення для визначення вихідних опорів запропонованих схем ВС, зокрема, такої, в якій застосовується введення додатного зворотного зв'язку в колекторний контур транзистора регулятора;
- здійснити комп'ютерне моделювання статичних характеристик для визначення адекватності отриманих математичних моделей шляхом порівняння отриманих результатів.

Розв'язання задач досліджень

Розглянемо два поширених варіанта побудови ВС і проаналізуємо їх деякі статичні характеристики. Найпростішою є схема відбивача, наведена на рис. 1а, яку ще іноді називають схемою Відлара [8]—[9]. Вона містить транзистор T_1 у діючому вмиканні і вихідний транзистор T_2 . Вхідний струм $I_{\text{вх}}$ подається на T_1 і напруга, що генерується на його переході база–емітер, підключається до бази T_2 , який генерує вихідний струм $I_{\text{вих}}$. Генератор $I_{\text{вх}}$ може бути реалізовано із застосуванням джерела $U_{\text{зм}}$ і резистора $R_{\text{зм}}$. Нехтуючи базовими струмами, маємо $I_{\text{вих}} \approx I_{\text{вх}}$.

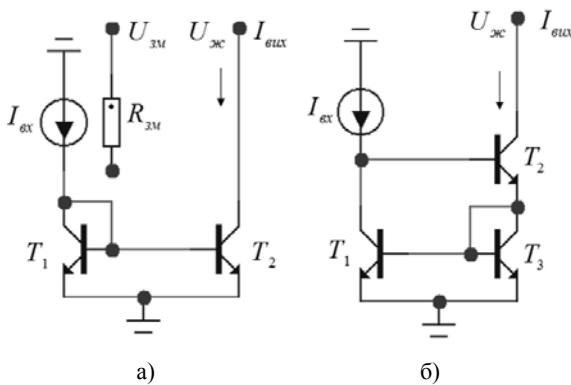


Рис. 1. Варіанти побудови ВС: а) найпростіша схема; б) схема Уілсона

значення вихідного опору з урахуванням дії внутрішнього зворотного зв'язку, а саме

$$r_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_{\text{жс}}}{i_{\text{к}}} = r_{\text{к}}^* (1 + \gamma_{\text{б}} \cdot \beta), \quad \text{де } \gamma_{\text{б}} = \frac{r_{\text{еe}}}{r_{\text{б}} + r_{\text{е}} \cdot \beta + r_{\text{еe}} + R_{\text{Г}}} \text{ — коефіцієнт передачі приросту напруги}$$

$\Delta U_{\text{б}}$ з кола бази в коло емітера; $R_{\text{Г}}$ — опір генератора струму (у цьому випадку $R_{\text{Г}} = r_{\text{Д}} = \frac{\phi_{\text{Т}}}{I_{\text{вх}}}$);

$\phi_{\text{Т}}$ — термопотенціал; $r_{\text{е}}$ — об'ємний малосигнальний опір емітера; $r_{\text{к}}^*$ — колекторний опір схеми загальний емітер.

Коефіцієнт передачі струму визначається у формі $K_I = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}}$, де $\Delta I_{\text{вих}} = \Delta I_{\text{вх}} + \frac{\Delta U_{\text{жс}}}{r_{\text{к}}^*}$. На практиці за невеликого $U_{\text{жс}} \approx U_{\text{б-е}}$ маємо $K_I \approx 1,0$. Водночас збільшення $\Delta U_{\text{жс}}$ приведе до появи додаткової складової $\Delta I_{\text{к}}$ колекторного струму і певного збільшення K_I .

Істотно кращі характеристики має схема Уілсона показана на рис. 1б. Вона містить транзистор

регулятор T_2 , в емітер якого підключено контур від'ємного зв'язку на транзисторах T_1 і T_3 з коефіцієнтом передачі $\chi = 1,0$. У роботі [3] показано, що вихідний опір для такого відбивача дорівнює

$$r_{\text{вих}} = \frac{\beta \cdot r_{\kappa}^*}{2}, \text{ де } \beta \text{ — малосигнальний коефіцієнт передачі по струму для схеми загальний емітер.}$$

Треба зауважити, що в деяких закордонних публікаціях [4], [5] замість відбивача струму використовується термін «струмовідвід». Подальшого збільшення вихідного опору можна досягти використанням комбінацій n-p-n і p-n-p транзисторів, що дещо змінює принцип дії відбивача і дозволяє компенсувати змінення базового струму транзистора регулятора. Схеми таких ВС показано на рис. 2. Ефект збільшення $r_{\text{вих}}$ у таких ВС досягається застосуванням в ролі регулятора складеного транзистора Шиклаї.

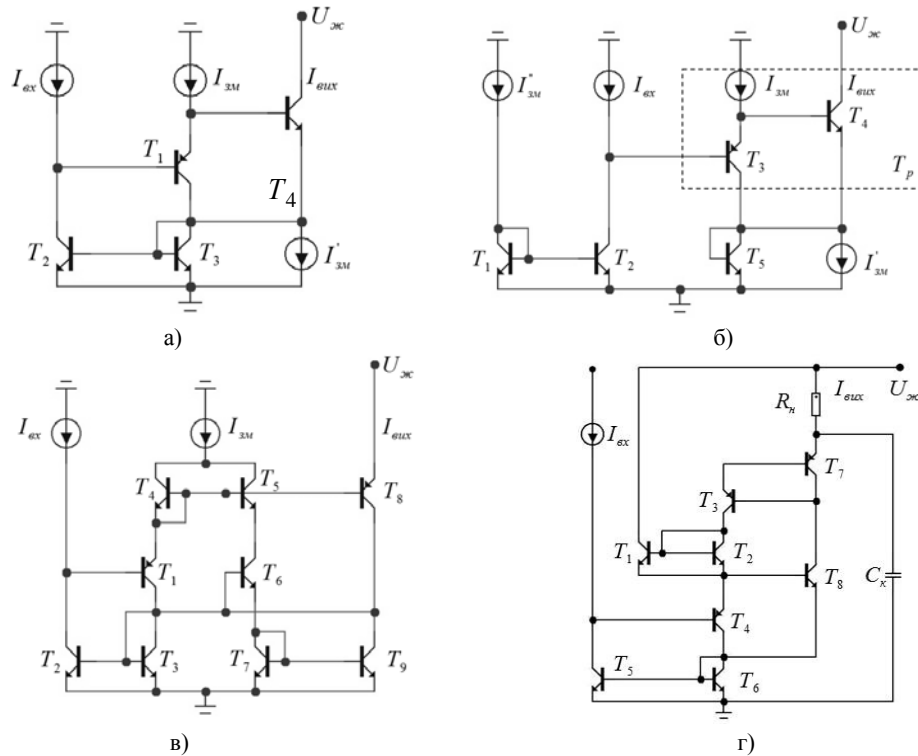


Рис. 2. Відбивачі струму з: а, б, в — високим $r_{\text{вих}}$; г — надвисоким $r_{\text{вих}}$

Так у схемі на рис. 2а регулятор побудовано на транзисторах T_1 і T_4 . Для задання робочої точки T_1 треба застосовувати також генератор струму змищення $I_{\text{ЗМ}}$, а для наближення рівня $I_{\text{Вих}}$ до $I_{\text{ВХ}}$ потрібно додатково ввести генератор $I'_{\text{ЗМ}}$. Причому бажано, щоб виконувалася умова $I'_{\text{ЗМ}} \approx I_{\text{ЗМ}}$, тоді значення коефіцієнта передачі струму $K_I = \frac{I_{\text{Вих}}}{I_{\text{ВХ}}}$ наближається до 1,0. Слід зазначити, що в такому

ВС змінення базового струму $\Delta I_{\text{б4}}$, що виникає внаслідок різних причин, наприклад, приросту $\Delta U_{\text{ке4}}$ через перехід колектор–емітер T_1 передається з інверсним знаком у коло від'ємного зворотного зв'язку. Далі, через відбивач струму, що побудований на транзисторах T_1 і T_3 , приріст $\Delta I_{\text{б4}}$ надходить на вхід схеми, підсилюється транзистором T_1 і повертається на базу T_4 , таким чином баланс у схемі відновлюється. Зазначимо, що цей ВС має контур від'ємного зворотного зв'язку, а також складений транзистор-регулятор, тому вихідний малосигнальний опір $r_{\text{вих}}$ з урахуванням цих чинників в аналітичній формі дорівнюватиме

$$r_{\text{вих}} = r_{\kappa4} (1 + \alpha \cdot K_I), \tag{1}$$

де $r_{\kappa4}$ — колекторний опір транзистора T_4 ; $K_I = \frac{\Delta I_{\text{Вих}}}{\Delta I_{\text{б1}}}$ — коефіцієнт передачі складеного тран-

зистора регулятора; α — малосигнальний коефіцієнт передачі струму для розірваного контуру зворотного зв'язку в ділянці транзистора T_3 (в діодному вмиканні), зокрема так, як це показано на рис. 2б. Коло зворотного зв'язку тут імітується відбивачем струму на транзисторах T_1 , T_2 і генератором струму зміщення I_{3M}'' . Причому рівень I_{3M}'' задається таким, щоб значення $I_{ВХ}$, а також I_{3M} у схемах на рис. 2а і 2б між собою збігались.

В аналітичній формі вихідний опір схеми ВС (рис. 2а) визначається на основі формули (1) у вигляді

$$r_{ВХ} = r_{к4} (1 + \beta_p), \quad (2)$$

де $\beta_p = \beta_1 \cdot \beta_4$. Тут β_1 — коефіцієнт передачі струму транзистора T_1 в схемі із загальним емітером, а β_4 — коефіцієнт передачі струму транзистора T_4 . Комбінація T_1 та T_4 являє собою складений транзистор Шиклаї. Введення транзистора T_1 дозволяє скомпенсувати змінення базового струму T_4 , що виникає в наслідок зміни напруги $U_{ж}$. Застосування транзистора Шиклаї дозволяє мінімізувати падіння напруги як на вході ВС так і на виході ВС.

Визначимо $r_{ВХ}$ для ВС (рис. 2а) у випадку застосування інтегральних транзисторів типу NUHFARRY і PUFARRY [11] за умови задання $I_{ВХ} = 1$ мА, $I_{ВХ} \approx 1$ мА; $I_{3M} = 0,5$ мА $U_{ж} = +1,5$ В. При цьому для випадку розірваного контуру зворотного зв'язку (рис. 2б) для вимірювання $r_{к4}$, K_p і α скористаємось інтегрованим пакетом схемотехнічного моделювання MicroCAP-11. У підсумку маємо: $r_{к4} = 96$ К, $K_p = 743$ і $\alpha = 0,8$. Підставляючи ці значення в (1), отримуємо $r_{ВХ} = 57$ МОм. Варто зазначити, що це набагато більше, ніж для відбивача Уілсона (2,7 МОм) за тих самих робочих струмів.

Схема (рис. 2а) потребує додаткового генератора струму зміщення I_{3M}' , причому, якщо $I_{3M}' \neq I_{3M}$, або цей генератор зовсім відсутній, то рівень $I_{ВХ}$ може відрізнятись від $I_{ВХ}$. Альтернативою зазначеній схемі може слугувати ВС, схему якого показано на рис. 2в. Вона додатково містить 2 струмові дзеркала на транзисторах T_4 , T_5 і T_7 і T_9 , відповідно. Транзистор T_6 , включений за схемою загальна база, забезпечує ідентичність робочих точок транзисторів T_4 , T_5 , на яких зібрано перший внутрішній відбивач, що виконує функцію дільника струму зміщення I_{3M} . Подібна конфігурація цих елементів дозволяє поділити I_{3M} на два струми I_{e1} $I_{к8}$, причому $|I_{e1}| = |I_{к9}|$, що забезпечує баланс роботи загальної схеми, незалежно від значення I_{3M} , або його змінення. Такий підхід дозволяє вилучити зі схеми генератор струму I_{3M}' .

Слід зазначити, що рівень I_{3M} дещо впливає на $r_{ВХ}$ схеми ВС. Так зменшення I_{3M} певною мірою зменшує і $r_{ВХ}$. У таблиці наведено кількісні характеристики цього ВС, отримані шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою інтегрованого пакету програми MicroCAP-11 за умови $I_{ВХ} = 1,0$ мА. Значення малосигнального вихідного опору зручно отримувати у формі $r_{ВХ} = \frac{\Delta U_{ж}}{\Delta I_{ВХ}}$ через амплітудно-частотну характеристику в зоні низьких частот.

Кількісні характеристики ВС

I_{3M} (мА)	2,0	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05
$r_{ВХ}$ (МОм)	552	108	75	62	55	44

Числові значення $r_{ВХ}$ отримано з сім'ї АЧХ, показаних на рис. 3.

Особливістю схем, показаних на рис. 2а—в, є наявність зовнішнього генератора струму зміщення I_{3M} . Причому, найбільше значення $r_{ВХ} = 552$ МОм для схеми на рис. 2в буде у випадку $I_{3M} = 2$ мА. Дещо змінивши конфігурацію схеми (рис. 2а), можна також вилучити генератор струму зміщення I_{3M} . Варіант побудови такого ВС показано на рис. 2г. Його схема містить нові елеме-

нти: транзистори T_3, T_7 , включені в коло колектора регулятора T_8 , а також другий внутрішній відбивач струму на транзисторах T_1, T_2 , підключений до емітера T_4 .

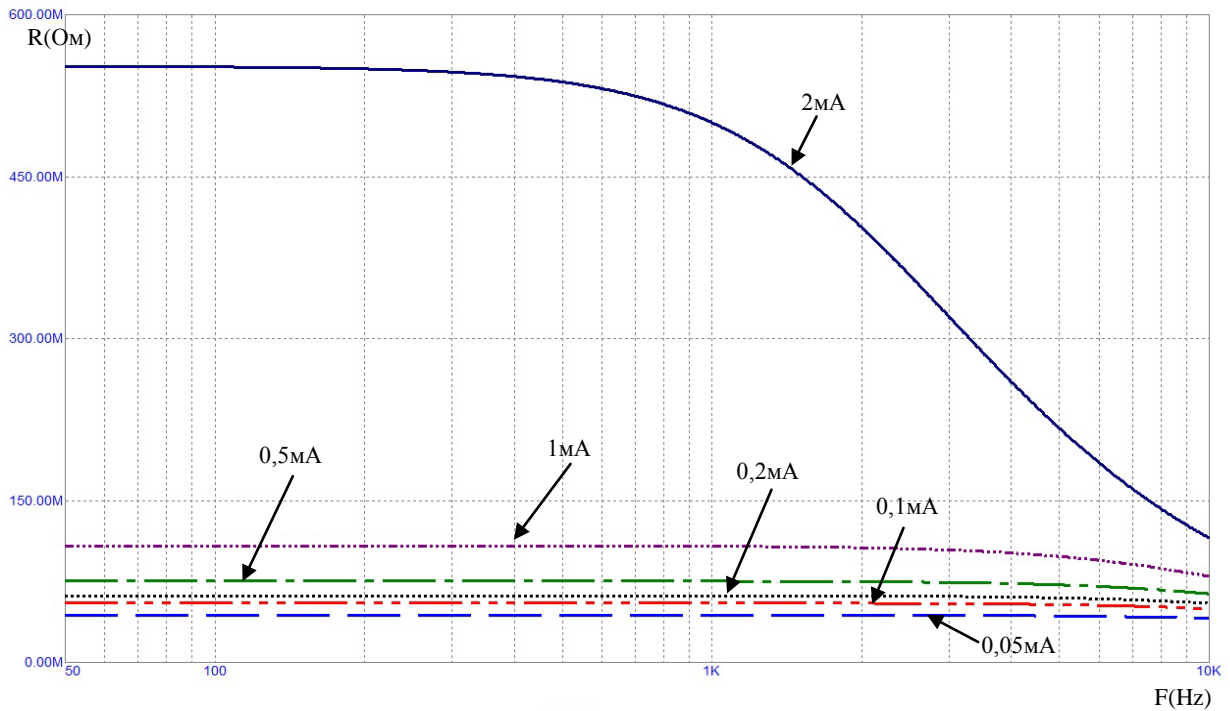


Рис. 3. Сім'я АЧХ в зоні низьких частот для ВС з високим $r_{\text{вих}}$ за різних $I_{\text{зм}}$

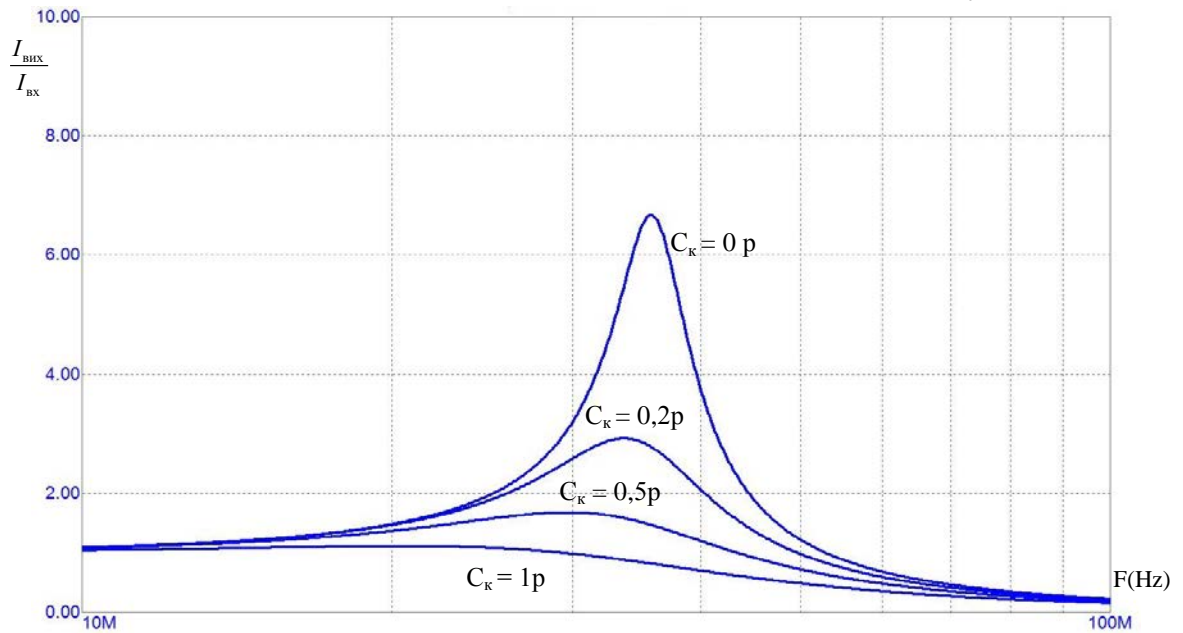


Рис. 4. Сім'я АЧХ ВС за різних значень коригуючого конденсатора

Призначенням цих компонентів є утворення кола додатного зворотного зв'язку (33) між базою і колектором T_8 , що збільшує його коефіцієнт передачі струму K_{I8} і зумовлює зростання $r_{\text{вих}}$. Ступінь цього зростання істотно залежить від глибини зворотного зв'язку, яка у свою чергу автоматично регулюється емітерним опором T_4 . Задаючи певним чином коефіцієнт відбиття між T_1 і T_2 можна наблизити K_{I8} , а також $r_{\text{вих}}$ до нескінченності.

Слід зазначити, що введення контуру додатного зворотного зв'язку регулятора T_8 приводить до підйому АЧХ в зоні високих частот зі збільшенням R_{μ} . Введення до схеми коригувального конденсатора C_k , дозволяє скомпенсувати вказаний підйом. Так на рис. 4 показана малосигнальна

АЧХ ВС при $R_n = 5 \text{ кОм}$ для різних значень коригувального конденсатора C_k . В результаті комп'ютерного моделювання цього ВС за умови $U_{ж} = +4 \text{ В}$ та $I_{вх} = 1 \text{ мА}$: $I_{вих} = 1 \text{ мА}$; $K_I = 1,002$; $r_{вих} = 1,25 \text{ ГОм}$. Таким чином, виходячи з системних вимог, що висуваються до відбивачів струму, можна обрати той чи інший тип конфігурації схеми.

Висновки

1. На основі аналізу недоліків відомих відбивачів струму запропоновано нові підходи щодо побудови струмових дзеркал з високим і надвисоким вихідним опором.
2. Розглянуто варіанти побудови схем з покращеними статичними характеристиками, що полягають у застосуванні композиції, як p-p-n так і p-n-p транзисторів, а також додатного зворотного зв'язку в колі керування транзистора регулятора.
3. Здійснено комп'ютерне моделювання малосигнальних статичних характеристик запропонованих схем ВС і доведено збіжність результатів, отриманих в ході моделювання, а також на основі наведених аналітичних співвідношень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. Д. Азаров, та С. В. Богомолов, *Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013, 142 с.
- [2] У. Титце, и К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника*, Т. II, 12-е изд. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2007.
- [3] *Исследование источников тока на биполярных транзисторах, Раздел 2.3* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/mm/2_3/index.html. Дата обращения: Янв. 19, 2019.
- [4] О. Д. Азаров, та В. Є. Яцик, «Методи покращення статичних характеристик відбивачів струму», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1, 2012.
- [5] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та В. Є. Яцик, «Відбивачі струму для аналогових пристроїв із покращеними статичними і динамічними характеристиками», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, 2012.
- [6] О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, та В. Є. Яцик, «Спеціалізовані відбивачі струму з парафазними входами для двотактних підсилювальних схем», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1, 2013.
- [7] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Високолінійні спеціалізовані струмові дзеркала з давачами рівня сигналу», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (40), с. 30-36, 2017.
- [8] A. V. Grebene, *Bipolar and MOS analog integrated circuit design*, New Jersey, John Wiley & Sons Technology & Industrial Arts, 2002, 912 p.
- [9] А. Б. Гребен, *Проектирование аналоговых интегральных схем*. Москва: Энергия, 1976, 256 с.
- [10] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та В. Є. Яцик, «Аналіз статичних характеристик біполярних транзисторів з використанням керованих і функціональних генераторів струму», *Проблеми інформатизації та управління*, № 1 (37), с. 5-12, 2012.
- [11] М. А. Амелина, и С. А. Амелин, *Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версия 9, 10*. Смоленск, Россия: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013, 618 с.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.02.2019

Азаров Олексій Дмитрович — д-р. техн. наук, професор, декан факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії;

Медяний Роман Михайлович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: fun333@ukr.net ;

Фігас Анна Сергіївна — студентка факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, e-mail: annavegas1488@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. D. Azarov¹
R. M. Medyani¹
A. S. Figas¹

Recovery Current with High and Relevant Extinction Brown on Bipolar Transistors

¹Vinnytsia National Technical Institute

Current reflectors (DCs) or current mirrors built on bipolar transistors are widely used in a variety of electronic circuits, such as: DC amplifiers, code-current converters, analog-to-digital converters, power supplies, and others. The feature of low-power bipolar transistors is the ability to function in linear mode at relatively low operating voltages on collector-emitter transitions and emitter bases about 0,7...0,8 V at currents 0,1...10 mA. A new approach to the construction of an aircraft

with high and ultrahigh rhythms is proposed, consisting in the use of the n - p - n and p - n - p composite transistors and allows to compensate for the change of the base current of the transistor of the regulator, which arises as a result of various factors. The static characteristics of circuits of known aircraft are analyzed, their deficiencies are determined and ways of their elimination are considered. An analytical correlation is derived for determining the initial resistances of the proposed schemes of the Sun, in particular, such that the introduction of a positive feedback in the collector circuit of the transistor of the regulator is used. A computer simulation of static characteristics was performed to determine the adequacy of the mathematical models obtained by comparing the obtained results. In addition, the construction of the aircraft with high and ultrahigh-speed rms used to construct analog signal converters is considered. The schemes of known aircraft (Vidar and Wilsono) are considered and the shortcomings of such schemes are identified. The analytical co-relation for calculation of initial impedance is deduced. Also, expressions for the coefficients of current and voltage are given, and dependencies are presented that demonstrate the work of the proposed reflectors of current at different displacement currents. A schematic design of the above-mentioned aircraft with high and ultrahigh r_{ms} , constructed using the composition of integral transistors n - p - n and p - n - p conductivity, was carried out. The recommendations for the construction of the aircraft with high and ultrahigh r_{ms} are given, which makes it possible to use them in multichannel analog-to-digital converters. A comparative analysis of some variants of the implementation of the aircraft with high and ultrahigh r_{ye} is made.

Keywords: current reflector, current, voltage, output impedance, transmission coefficient.

Azarov Oleksii D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Dean of the Faculty of Information Technology and Computer Engineering;

Mediany Roman M. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Science, e-mail: fun333@ukr.net ;

Figas Anna S. — Student of the Faculty of Information Technology and Computer Engineering, e-mail: annavegas1488@gmail.com

А. Д. Азаров¹
Р. М. Медяний¹
А. С. Фигас¹

Отражатель тока с высоким и сверхвысоким выходным сопротивлением на биполярных транзисторах

¹Вінницький національний технічний інститут»

Отражатели тока (BC) или токовые зеркала, построенные на биполярных транзисторах, широко используются в различных электронных схемах, таких как: усилители постоянного тока, преобразователь код–ток, аналого-цифровый преобразователь, источники питания и других. Особенностью маломощных биполярных транзисторов есть возможность работать в линейном режиме при относительно небольших рабочих напряжениях на переходах коллектор-эмиттер и базы эмиттер около 0,7...0,8 В при токах 0,1...10 мА. Предложен новый подход построения BC с высоким и сверхвысоким $r_{вых}$, заключающийся в использовании композиции n - p - n и p - n - p транзисторов и позволяет компенсировать изменение базового тока транзистора регулятора, который возникает под воздействием различных факторов. Проанализированы статические характеристики схем известных BC, определены их недостатки и рассмотрены пути их устранения. Выведены аналитические соотношения для определения исходных сопротивлений предложенных схем BC, в частности, такой, в которой применяется введение положительной обратной связи в коллекторный контур транзистора регулятора. Осуществлено компьютерное моделирование статических характеристик для определения адекватности полученных математических моделей путем сравнения полученных результатов. Кроме того, рассмотрено построение BC с высоким и сверхвысоким $r_{вых}$ применяемых для построения преобразователей аналоговых сигналов. Рассмотрены схемы известных BC (Видлара и Уилсона) и определены недостатки таких схем. Выведены аналитические соотношения для расчетов выходных сопротивлений. Также, получены выражения для коэффициентов передачи тока и напряжения, и приведены зависимости, демонстрирующие работу предложенных отражателей тока при разных токах смещения. Осуществлено схемотехническое моделирование приведенных BC с высоким и сверхвысоким $r_{вых}$, построенного с применением композиции интегральных транзисторов n - p - n и p - n - p проводимости. Даны рекомендации по построению BC с высоким и сверхвысоким $r_{вых}$, дающие возможность использовать их в многоканальных аналого-цифровых преобразователях. Осуществлен сравнительный анализ некоторых вариантов реализации BC с высоким и сверхвысоким $r_{вых}$.

Ключевые слова: отражатель тока, ток, напряжение, выходное сопротивление, коэффициент передачи.

Азаров Алексей Дмитриевич — д-р. техн. наук, профессор, декан факультета информационных технологий и компьютерной инженерии;

Медяний Роман Михайлович — аспирант кафедры вычислительной техники, e-mail: fun333@ukr.net ;

Фигас Анна Сергеевна — студент факультета информационных технологий и компьютерной инженерии, e-mail: annavegas1488@gmail.com