

ДВОТАКТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГА–СТРУМ І СТРУМ–СТРУМ ЗМІННОГО НАПРЯМКУ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто нові методи структурно-функціональної організації схем високолінійних двотактних перетворювачів напруга–струм і струм–струм, в яких вихідний струм може змінювати свій напрям. Проаналізовано статичні характеристики запропонованих схем, зокрема похибки лінійності та вихідні опори. Надано рекомендації щодо побудови перетворювачів напруга–струм і струм–струм із застосуванням відбивачів струму з високоомними виходами.

Ключові слова: лінійність передатної характеристики, вихідний опір, двотактні перетворювачі струм–струм, напруга–струм.

Вступ

Проектування різноманітних електронних систем, зокрема, багаторозрядних аналого-цифрових систем збирання, опрацювання й ресстрування даних від давачів сигналів вимагає наявності спеціалізованих перетворювачів напруга–струм і струм–струм. Причому статичні й динамічні характеристики останніх повинні бути узгоджені як з вимогами до вказаних систем, так і зі специфікою згаданих давачів.

Слід зазначити, що застосовуючи в аналого-цифрових системах інтегральні компоненти, перевагу слід віддавати тим, які побудовано на принципі перетворення і підсилення струмів. Це зумовлено тим, що значна частина паразитних параметрів інтегральних схем є ємностями [1, 2]. Якщо всі операції над сигналами, здійснювати за допомогою перетворювачів і підсилювачів струмів, а не напруг, то можна усунути подання значних перепадів напруг до паразитних ємностей. У випадках, коли ж треба підсилувати вхідну напругу, то її доцільно спочатку перетворити у струм, потім його підсилити, а на виході схеми струм знову перетворити в напругу. Такий підхід дозволить використовувати властивості біполярних транзисторів аж до граничної частоти і підвищити швидкодію всієї системи. Сьогодні відомі перетворювачі напруга–струм, які будують на базі операційних підсилювачів, а також додаткових дискретних компонентів у вигляді польових транзисторів і прецизійних резисторів, проте такі ПНС не є універсальними і не можуть використовуватися для перетворення струм–струм. Що стосується перетворювачів струм–струм, то існуючі підходи у вигляді конвекторів струму не забезпечують достатньої лінійності передатної характеристики [3–5].

Водночас, слід зауважити, що параметри давачів сигналу [6], зокрема, таких як вихідний опір, а також діапазон амплітуд вихідних струмів або напруг треба узгоджувати з характеристиками перетворювачів напруга–струм (ПНС) або струм–струм (ПСС). Треба також враховувати потребу роботи зі струмами змінного напрямку. При цьому треба зазначити, що інформаційні матеріали викладені в науково-технічній літературі [3–5] далеко не повною мірою розкривають ці особливості, тому ту статтю розглянуто методи побудови високолінійних двотактних перетворювачів напруга–струм і струм–струм змінного напрямку, є актуальною.

Мета досліджень — побудова високолінійних двотактних перетворювачів напруга–струм і струм–струм змінного напрямку на основі високолінійних відбивачів струмів з високоомними вихідними опорами, а також двотактних підсилювачів постійного струму з парафазними двонаправленими виходами.

Задачі досліджень:

1. Аналіз нових запропонованих методів структурно-функціональної організації схем високолінійних двотактних перетворювачів напруга–струм і струм–струм змінного напрямку та вимоги до їх характеристик.

2. Аналіз статичних характеристик запропонованих схем двотактних високолінійних ПНС і ПСС, зокрема похибок лінійності передатної характеристики в діапазоні вхідного і вихідного сигналів, а також значень вихідних опорів.

3. Порівняння статичних характеристик розглянутих ПНС і ПСС, а також надання рекомендацій щодо вибору відповідних реалізацій цих перетворювачів залежно від системних вимог.

Розв'язання поставлених задач

Базовими елементами ПНС і ПСС зазвичай є відбивачі струму з високим вихідним опором не нижче r_C , де r_C — опір колекторного переходу біполярного транзистора, включеного за схемою із загальною базою. Вказані перетворювачі повинні також містити підсилювач постійного струму (ППС), який дозволяє гнучко задавати потрібне значення коефіцієнта передачі струму K_{TI} за допомогою резистивного дільника. При цьому слід додати, що цей підсилювач повинен мати достатньо низький вхідний опір (на рівні r_E — опір емітерного переходу транзистора), два двонаправлених протифазних струмових виходи. Внутрішні коефіцієнти підсилення ППС мають бути достатньо великими ($K'_1 \approx K''_1 = 10^3 - 10^5$), для того щоб від'ємний зворотний зв'язок у контурі регулювання був достатньо глибоким для різних $K_{TI} = 1, 0; 10; 100$ і сам підсилювач не вносив відчутних власних нелінійних спотворень. Відомі так звані балансні двотактні ППС [7—9], які мають всі перераховані властивості і можуть використовуватися для побудови ПНС і ПСС.

Слід зазначити, що ці ПНС і ПСС можна розглядати, як вихідну частину первинних вимірювальних перетворювачів, що слугують для передачі сигналу давачів [6] до вторинних перетворювачів — АЦП. При цьому, оскільки рівень електричного сигналу на виході давача, як правило низький, то його треба підсилити перед подачею на вхід вторинного перетворювача відповідно з вхідним діапазоном АЦП.

Можна запропонувати принаймні три варіанти структурно-функціональної організації ПНС і ПСС залежно від потрібних значень коефіцієнта передачі струму K_I . Так у випадку $K_{TI} > 1$ доцільно використовувати схему, показану на рис. 1.

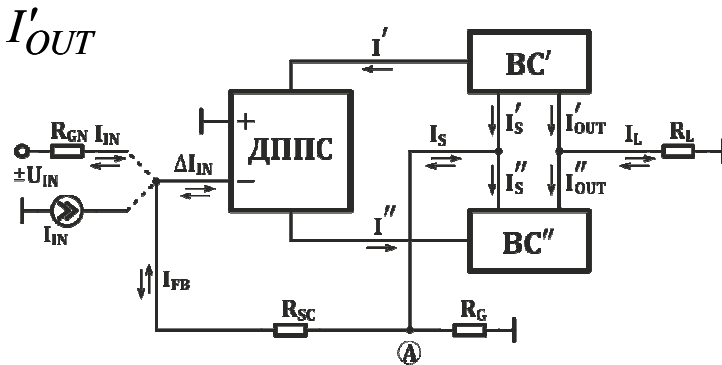


Рис. 1. Функціональна схема ПНС і ПСС для $K_{TI} > 1,0$

Вона містить спеціалізований двотактний підсилювач струму (ДППС) з двома двонаправленими протифазними виходами, два відбивачі струму BC' і BC'' [10, 11] та дільник струму на резисторах R_G і R_{SC} , за допомогою яких задається потрібне значення K_{TI} . Схема функціонує таким чином: вхідний сигнал у вигляді струму I_{IN} подається на вхід ДППС і підсилюється до значень I' і I'' . BC' і BC'' перетворюють ці сигнали у струми давачів, відповідно, I'_S і I''_S , а також у вихідні струми I'_{OUT} і I''_{OUT} , зв'язані співвідношеннями $I'_S = I'_{OUT}$ і $I''_S = I''_{OUT}$. Різниця вихідних струмів формує струм навантаження $I_L = I'_{OUT} - I''_{OUT}$, який протікає через опір навантаження R_L , а різниця струмів давачів формує струм $I_S = I'_S - I''_S$, який подається в коло зворотного зв'язку. Залежно від співвідношення значень I'_{OUT} і I''_{OUT} , струм I_L буде втікати в R_L або витікати з R_L , тобто змінювати свій напрямок. Якщо вхідним сигналом є напруга $\pm U_{IN}$, то її треба перетворити на струм I_{IN} за допомогою резистора R_{GN} .

Для забезпечення потрібної лінійності передатної характеристики ПНС і ПСС треба, щоб внутрішні коефіцієнти підсилення ДППС K'_1 і K''_1 були такими, щоб у схемі від'ємний зворотний зв'язок був достатньо глибоким. За таких умов визначимо коефіцієнт передачі для випадку $K_{TI} > 1,0$. За умови симетричності статичних характеристик виходів (давача і основного) для BC' і BC'' маємо

$$K_{TI} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{I_L}{I_{IN}} = \frac{I_S}{I_{IN}} = \frac{\Delta I_{IN} \cdot K_I}{I_{IN}}$$

При цьому $\Delta I_{IN} = I_{IN} - I_{FB}$, де струм зворотного зв'язку

$$I_{FB} = \frac{U_A}{R_{SC}} = I_S \cdot \frac{R_G}{R_{SC} + R_G},$$

тому

$$\Delta I_{IN} = I_{IN} - \Delta I_{IN} \cdot K_I \cdot \frac{R_{SC}}{R_{SC} + R_G},$$

звідки

$$I_{IN} = \Delta I_{IN} \cdot \left(1 + K_I \cdot \frac{R_{SC}}{R_{SC} + R_G} \right) \approx \Delta I_{IN} \cdot K_I \cdot \frac{R_{SC}}{R_{SC} + R_G}.$$

Підставивши вираз для I_{IN} у початковий вираз для K_{TI} , маємо

$$K_{TI} = \frac{R_M + R_3}{R_M}. \quad (1)$$

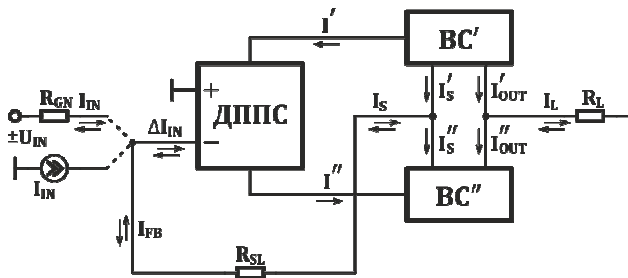


Рис. 2. Функціональна схема ПНС і ПСС для $K_{TI} = 1,0$

Слід зазначити, що формула (1) є справедливою, якщо $K_I \gg K_{TI}$, принаймні, на 2—3 порядки. Це слід враховувати під час вибору ДППС.

Для отримання $K_{TI} = 1,0$ слід застосувати схему, показану на рис. 2. У ній відсутній резистор R_G , а замість R_{SC} слід поставити резистор навантаження для давача R_{SL} , причому його опір повинен бути близьким до R_L . У випадку такої конфігурації схеми ПСС справедливим є співвідношення $I_{OUT} = I_L = I_{FB} = I_S = I_{IN} - \Delta I_{IN}$.

За великих K_I , членом ΔI_{IN} можна знехтувати, тому

$$K_{TI} = \frac{I_L}{I_{IN}} \approx 1,0.$$

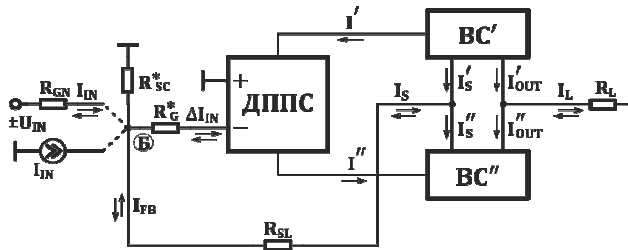


Рис. 3. Функціональна схема ПНС і ПСС для $K_{TI} < 1,0$

У деяких випадках може бути потрібен ПСС з коефіцієнтом передачі струму $K_{TI} < 1,0$. Для цього доцільно використовувати схему, показану на рис. 3. У ній порівняно з попередніми схемами змінено конфігурацію вхідного кола, зокрема уведено ділянку вхідного струму на резисторах R_G^* і R_{SC}^* . Слід зазначити, що для правильного функціонування потрібно виконання умови, коли вхідний опір r_{IN} ДППС буде набагато менше R_G^* , а опір паралельного

з'єднання R_{SL} і резисторів вхідного кола наближається до R_L . У випадку якщо джерелом вхідного сигналу є генератор струму, то

$$K_{TI} = \frac{I_{FB}}{I_{IN}} \approx \frac{R_{SC}^*}{R_{SC}^* + R_G^*}.$$

Експериментальні дослідження, зокрема аналіз статичних характеристик ПСС, похибок лінійності ΔI_L та вхідного опору r_{IN} автори проводили із застосуванням комп'ютерного моделювання, наприклад, за допомогою інтегрованого пакету MicroCap 11 (Copyright© 1982-2017 Spectrum Software). Це зумовлено складністю аналітичних виразів для оцінювання вказаних параметрів, тому чисельні методи розрахунків будуть значно зручнішими і наочнішими.

Узагальнену структурно-функціональну схему двотактного ПСС на основі керованих генераторів струму [7—9], адаптовану для комп'ютерного моделювання, показано на рис. 4. Вона містить два відбивачі струму BC' і BC'' , а також два керовані генератори струму (KTC' і KTC''), які забезпечують підсилення відповідно в K_I' і K_I'' разів. Ці генератори імітують двотактний ПСС з низь-

ким вхідним опором і великими вихідними опорами (∞) по двонаправлених парафазних виходах. Саме такий підхід дає можливість досить точно оцінювати ΔI_L у діапазоні вхідних і вихідних сигналів ПСС, а також вихідний опір r_{OUT} . Слід зазначити, що реальні схеми ПСС, як правило, мають K_I' і K_I'' , значення яких відрізняються незначно (5...10%) [7—9].

Разом з тим під час комп'ютерного моделювання ці параметри можна змінювати в широких межах, що поглиблює можливості досліджень. Базовими вузлами перетворювачів є відбивачі BC' і BC'' і саме від їх властивостей залежать статичні характеристики перших.

На рис. 5а зображено функціональну схему ПСС з двотактним ВС, що має середній вихідний опір, співвимірний з $r_{IN} = \beta(U_E/I_C)$ — опором колекторного переходу біполярного транзистора (де U_E — напруга Ерлі; I_C — струм колектора; β — коефіцієнт підсилення струму). За вибраних типів $p-n-p$ і $n-p-n$ (інтегральні транзистори типу *NUHFARRY* та *PUHFARRY* [12]) опори перетворювача на виході давача сигналу і на основному виході однакові і залежать від рівня робочого струму I_{OP} .

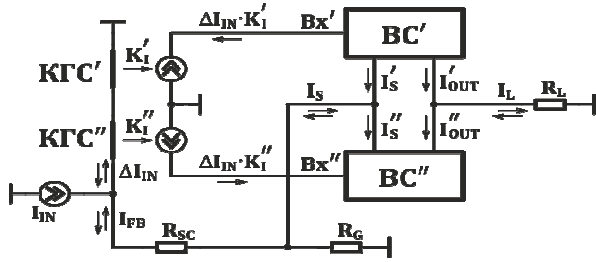


Рис. 4. Узагальнена схема структурно-функціональної моделі ПСС на основі КТС

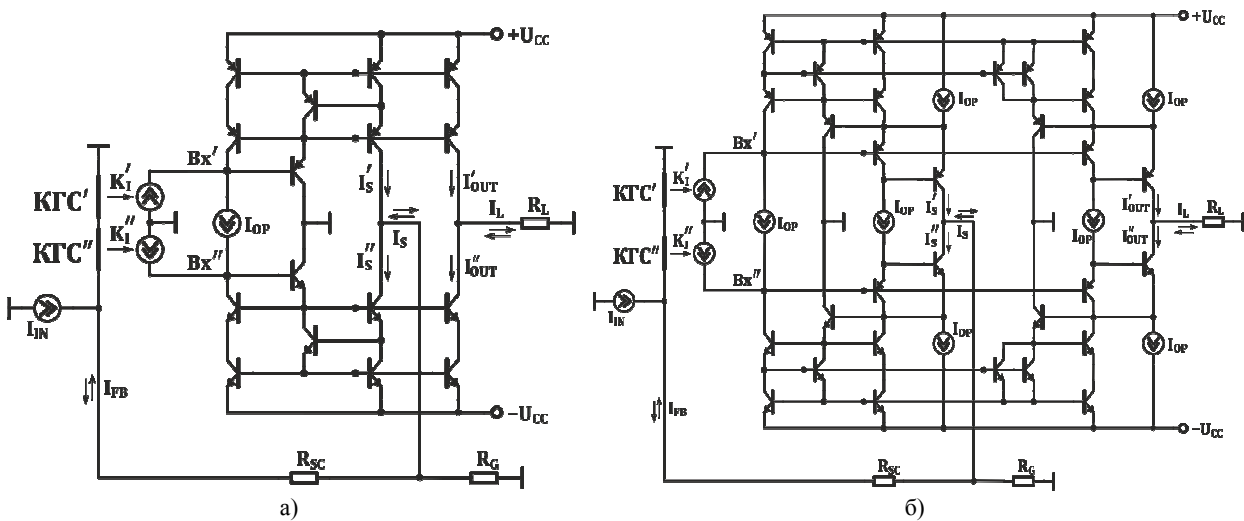


Рис. 5. Структурно-функціональна модель ПСС на основі КТС:

а — із застосуванням двотактного ВС з середнім r_{OUT} ; б — із застосуванням двотактного ВС з високим r_{OUT}

Значення похибок лінійності для цього ПСС для рівних K_{TI} , а також значення r_{OUT} , отримані шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою пакета MicroCap 11, зведено в табл. 1, залежність похибки лінійності від вхідного струму показана на рис. 6а. Її аналіз свідчить, що для зазначених діапазонів вхідного струму абсолютні похибки лінійності мають значення $\Delta IL \approx 1,8...2,2$ нА, а відносні — $\delta IL \approx 2 \cdot 10...4$ %. Вихідний малосигнальний опір відповідає рівню ~ 1 МОм.

Статичні характеристики схем перетворювачів напруга–струм (струм–струм)

Характеристики								
K_{TI}	I_{IN}	K_I	Схема № 1		Схема № 2		Схема № 1 R_{OUT} , МОм	Схема № 2 R_{OUT} , МОм
			ΔI_L , А	δI_L , %	ΔI_L , А	δI_L , %		
0,1	± 5 мА	10^3	1,8н	$1,8 \cdot 10^{-4}$	29п	$2,9 \cdot 10^{-6}$	0,7	11
1	$\pm 0,5$ мА	10^3	1,9н	$1,9 \cdot 10^{-4}$	27п	$2,7 \cdot 10^{-6}$		
		10^4	1,8н	$1,8 \cdot 10^{-4}$	29п	$2,9 \cdot 10^{-6}$		
10	± 50 мкА	10^4	1,9н	$1,9 \cdot 10^{-4}$	27п	$2,7 \cdot 10^{-6}$		
		10^5	1,8н	$1,8 \cdot 10^{-4}$	29п	$2,9 \cdot 10^{-6}$		
100	± 5 мкА	10^4	2,2н	$2,2 \cdot 10^{-4}$	8,2п	$8,2 \cdot 10^{-7}$		
		10^5	1,9н	$1,9 \cdot 10^{-4}$	27п	$2,7 \cdot 10^{-6}$		

Для покращення характеристик ПСС треба дещо змінити конфігурацію схеми регулятора, зок-

рема, використати складений транзистор Шиклаї. При цьому змінення базового струму основного (вихідного) транзистора через перехід емітер-колектор першого (вхідного) транзистора передаються в контур зворотного зв'язку й істотно компенсуються.

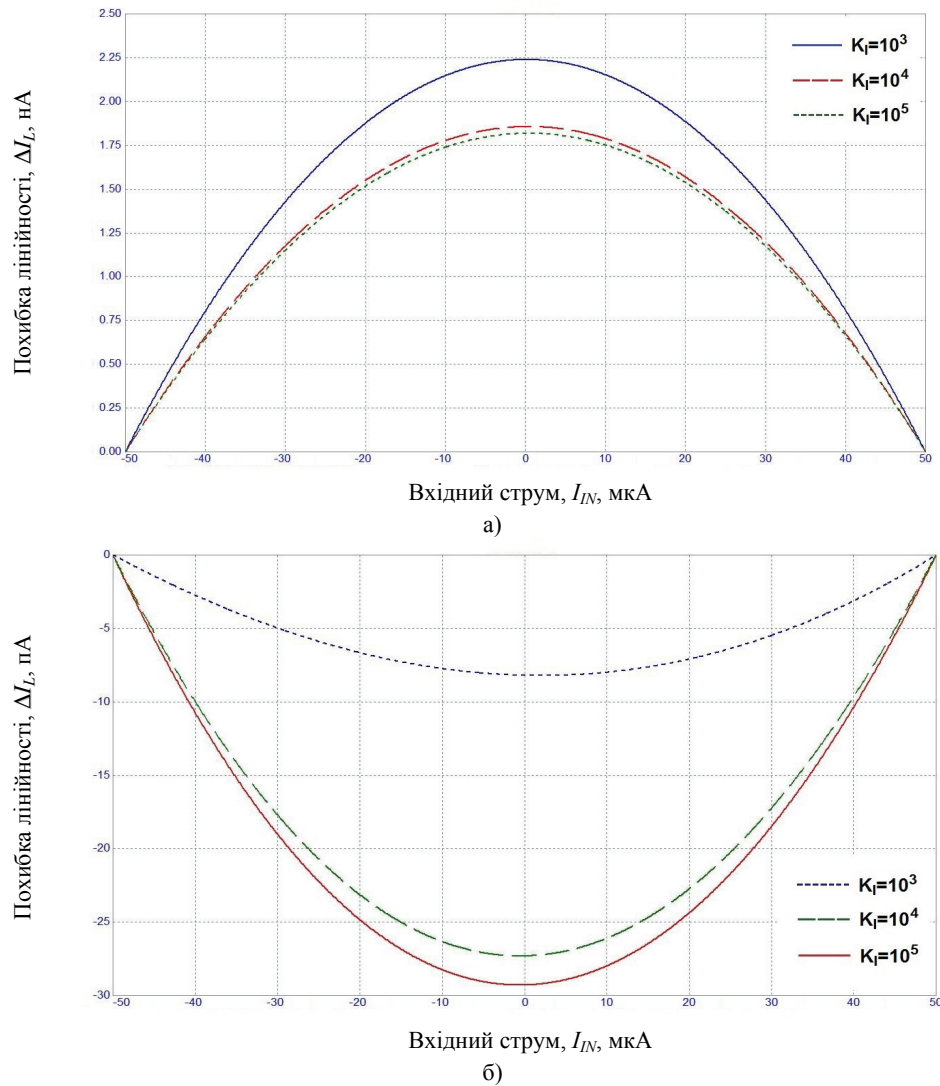


Рис. 6. Залежність похибки лінійності ΔL_L від вхідного струму I_{IN} , коли $K_{TI} = 10$ для ПСС на основі КГС: а — із застосуванням двотактного ВС з середнім r_{OUT} ; б — із застосуванням двотактного ВС з високим r_{OUT}

На рис. 5б показано схему ПСС на базі двотактного ВС з високим вихідним опором. Значення цього параметра для давачів BC' і BC'' можна оцінити за допомогою виразів

$$r'_{OUT} = \frac{r_{Kp-n-p}}{2} \cdot \beta_{n-p-n}; \quad r''_{OUT} = \frac{r_{Kn-p-n}}{2} \cdot \beta_{p-n-p}.$$

Для ПСС у цілому $r_{вих} = r'_{вих} \parallel r''_{вих} = r'_{вих} \cdot r''_{вих} / (r'_{вих} + r''_{вих})$.

При цьому слід зазначити, що схеми BC' і BC'' фактично повторюють одна одну з тією різницею, що побудовані вони на транзисторах різного типу провідності. Статичні характеристики ПСС, в якому використовуються BC' і BC'' з високим вихідним опором отримані шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою пакета МікроСар 11, наведені в таблиці. Залежність похибки лінійності від вхідного струму показана на рис. 6б. Отримані дані свідчать, що характеристики цього перетворювача істотно кращі, ніж у попереднього. Так, абсолютна похибка лінійності має значення < 30 пА, відносна — $3 \cdot 10^{-6} \%$, а вихідний опір — ~ 11 МОм. Такі результати дозволяють стверджувати, що розглянуті ПСС (ПНС) можуть бути рекомендовані для проектування високоточних багаторозрядних аналого-цифрових систем для вимірювання, опрацювання і реструктурування сигналів від різноманітних давачів.

Висновки

1. Запропоновано нові методи структурно-функціональної організації високолінійних двотактних перетворювачів напруга–струм і струм–струм змінного напрямку. Доведено, що вони мають високі технічні показники.

2. Проаналізовано статичні характеристики запропонованих схем ПНС і ПСС. Показано, що вони мають низькі похибки лінійності, а також високі вихідні опори.

3. Порівняння статичних характеристик, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання, дало можливість дати рекомендації щодо вибору запропонованих схем ПНС і ПСС відповідно до системних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гребен А. Б. Проектирование аналоговых интегральных схем / А. Б. Гребен ; пер. с англ. — М. : Энергия, 1976. — 256 с.
2. Grebene A. B. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design / A. B. Grebene. — New York : Wiley-Interscience, 2003. — 912 с.
3. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство / У. Титце, К. Шенк : пер. с нем. — М. : Мир, 1982. — 512 с.
4. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. — 12-е изд. — М. : ДМК Пресс, 2008. — Т. I — 832 с.
5. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. — 12-е изд. — М. : ДМК Пресс, 2007. — Т. II — 942 с.
6. Давачі : довідник / [З. Ю. Готра, Л. Я. Ільницький, С. С. Поліщук та ін.]. — Львів : Камінь, 1995. — 312 с.
7. Азаров О. Д. Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. — 156 с.
8. Азаров О. Д. Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем : монографія / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013. — 142 с.
9. Азаров О. Д. Швидкодіючі двотактні підсилювачі постійного струму з балансним зворотним зв'язком : монографія / О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, Н. О. Білченко. — Вінниця : ВНТУ, 2016. — 136 с.
10. Азаров О. Д. Методи покращення статичних характеристик відбивачів струму / О. Д. Азаров, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2012. — № 1. — С. 31—39.
11. Азаров О. Д. Відбивачі струму для аналогових пристроїв із покращеними статичними і динамічними характеристиками / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2012. — № 2. — С. 48—55.
12. HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models [Electronic resource] / Intersil Corporation™. — Access mode: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

Азаров Олексій Дмитрович — д-р. техн. наук, професор, декан факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua ;

Обертюх Максим Романович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: maxh331@protonmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. D. Azarov¹
M. R. Obertiukh¹

Voltage-to-current and Current-to-current Push–pull Converters with Changeable Direction

¹Vinnitsia National Technical University

There have been proposed the new methods of structurally-functional organization of the schemes of high-linear push–pull voltage-to-current and current-to-current converters in which the output current can change its direction. The static characteristics of the proposed circuits have been analyzed, in particular linearity faults and output impedances. There have been given the recommendations on the construction of PNT, PTT with the use of current reflectors with high output resistances.

Keywords: linearity of transfer characteristic, output resistance, push–pull current-to-current and voltage-to-current converters.

Azarov Oleksii D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Dean of the Department of Information Technology and Computer Engineering, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua ;

Obertiukh Maksym R. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Science, e-mail: maxx331@protonmail.com

А. Д. Азаров¹
М. Р. Обертюх¹

Двухтактные преобразователи напряжение–ток и ток–ток переменного направления

¹Винницкий национальный технический университет

Рассмотрены новые методы структурно-функциональной организации схем высоколинейных двухтактных преобразователей напряжение–ток и ток–ток, в которых выходной ток может изменять свое направление. Проанализированы статические характеристики предложенных схем, в частности погрешности линейности и выходные сопротивления. Даны рекомендации по построению ПНТ, ПТТ с применением отражателей тока с высокоомными выходами.

Ключевые слова: линейность передаточной характеристики, выходное сопротивление, двухтактные преобразователи ток–ток, напряжение–ток.

Азаров Алексей Дмитриевич — д-р. техн. наук, профессор, декан факультета информационных технологий и компьютерной инженерии, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua ;

Обертюх Максим Романович — аспирант кафедры вычислительной техники, e-mail: maxx331@protonmail.com