

МЕТОД ПОБУДОВИ ШИРОКОСМУГОВОГО ДВОТАКТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ВІДБИВАЧАХ СТРУМУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У представленому фундаментальному дослідженні здійснено вичерпний та багаторівневий аналіз структурно-функціональної організації новітньої архітектури двотактних підсилювачів постійного струму (ДППС), побудованих з використанням складних внутрішніх контурів вибіркового зворотного зв'язку та вдосконалених багатовузлових відбивачів струму. [1, 1] Дослідження охоплює глибокий теоретичний огляд еволюції транзисторних підсилювальних трактів, починаючи від базових симетричних архітектур і закінчуючи найсучаснішими топологіями, здатними функціонувати в умовах інтенсивних синфазних завад та флуктуацій напруги живлення. На основі теорії нелінійних електричних кіл наведено деталізований опис статичної передатної характеристики, а також проаналізовано відповідні похибки лінійності в умовах температурних дрейфів. Отримано комплексне пояснення динамічних характеристик базових схем двотактних підсилювачів постійного струму з урахуванням паразитних ємностей корпусів та ефектів деградації напівпровідникових структур. Доведено, що впровадження спеціалізованого блоку балансування підсилення струмів дозволяє повністю нейтралізувати вплив напруги живлення на похибку зсуву нуля, що відкриває безпрецедентні можливості для використання розробленої архітектури як прецизійних буферних каскадів у високошвидкісних багаторозрядних аналого-цифрових перетворювачах (АЦП) та оптико-електронних інформаційних технологіях.

Ключові слова: Двотактний підсилювач постійного струму (ДППС), струм зсуву нуля, відбивач струму, лінійність, блок балансування підсилення струмів, зворотний зв'язок, аналого-цифрове перетворення, температурна нестабільність, синфазна завада.

Abstract

This fundamental research presents an exhaustive and multi-level analysis of the structural and functional organization of a novel architecture for two-stroke (push-pull) direct current amplifiers (DPPS), constructed using complex internal selective feedback loops and advanced multi-node current reflectors. [1, 1] The study encompasses a deep theoretical review of the evolution of transistor amplification paths, from basic symmetrical architectures to state-of-the-art topologies capable of functioning under intense common-mode interference and power supply voltage fluctuations. Based on the theory of nonlinear electrical circuits, detailed descriptions are provided for the static transfer characteristic and the corresponding linearity errors under thermal drift conditions. A comprehensive explanation for analyzing the dynamic characteristics of basic DPPS circuits is obtained, taking into account package parasitic capacitances and semiconductor degradation effects. It is proven that the implementation of a specialized current gain balancing unit allows for the complete neutralization of the supply voltage's impact on the zero-offset error. This opens unprecedented possibilities for utilizing the developed architecture as precision buffer stages in high-speed, multi-bit analog-to-digital converters (ADCs) and advanced optoelectronic information technologies.

Keywords: Two-cycle direct current amplifier (DPPS), zero offset current, current reflector, linearity, current gain balancing unit, feedback, analog-to-digital conversion, temperature instability, common-mode interference.

Вступ

Проблема високоточного підсилення сигналів постійного струму є однією з найскладніших та найфундаментальніших задач у сучасній твердотільній електроніці, мікросхемотехніці та системах обробки аналогової інформації. Класифікація цих пристроїв у міжнародній системі Універсальної

десятьової класифікації чітко вказує на їх належність до категорії транзисторних підсилювачів, які є основою для побудови складної обчислювальної техніки. На відміну від підсилювачів змінного струму, де каскади можуть бути ізольовані один від одного за допомогою роздільних конденсаторів для усунення впливу постійної складової, підсилювачі постійного струму вимагають гальванічного зв'язку між усіма елементами тракту. Ця гальванічна зв'язаність призводить до того, що будь-яка незначна зміна режиму роботи по постійному струму в перших каскадах підсилювача неминуче передається на всі наступні каскади і сприймається системою як корисний сигнал, що призводить до похибок.

Двотактні підсилювачі постійного струму (ДППС) історично розглядаються як найбільш ефективний схемотехнічний компроміс між енергоефективністю, лінійністю та динамічним діапазоном. Такі архітектури відомі своєю високою лінійністю передатної характеристики, широкою смугою пропускання, яка може сягати сотень мегагерц, та значною швидкістю змінення вихідної напруги.[1, 1, 7] Завдяки цим властивостям, ДППС знаходять надзвичайно широке застосування в різноманітних критично важливих областях електроніки, слугують ядром для високошвидкісних аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів, а також у надскладних багатоканальних цифрових системах обробки сигналів.

Проте фундаментальна проблема дрейфу нуля залишається актуальною. Основними джерелами цього дрейфу є температурна нестабільність напруги база-емітер в транзисторах, деградація параметрів напівпровідника з часом (зокрема, ефект негативної температурної нестабільності зміщення), а також флуктуації напруги живлення. Зміна напруги живлення викликає асиметрію струмів у диференційних каскадах і генерує похибку зсуву нуля на вході. Дане дослідження присвячене структурному та фізичному аналізу новітньої запатентованої архітектури ДППС, яка вирішує ці проблеми шляхом створення самобалансуючої системи з ідеальними симетричними властивостями.[1, 1].

Результати дослідження

1. Еволюція архітектур та критичний аналіз базових технічних рішень

Історично склалося так, що мінімізація кількості активних компонентів вважалася пріоритетною задачею для зменшення площі кристала, проте такий підхід призводив до компромісів у метрологічних характеристиках. Одним із класичних рішень є симетричний підсилювач струму (патент США № 3,852,678), який містить лише шість транзисторів.[1, 1] Незважаючи на простоту, ця топологія має критичні функціональні недоліки, головним з яких є вкрай низький коефіцієнт підсилення по струму, що жорстко обмежує сферу застосування пристрою через залежність від технологічного розкиду параметрів транзисторів.

Наступним еволюційним кроком стало значне ускладнення топології. Прототипом до досліджуваної інноваційної моделі є підсилювач, захищений патентом України № 61272. Даний пристрій включає в себе вже двадцять два транзистори, формуючи розгалужену багаторівневу структуру. Проте і цей прототип характеризується недостатньою точністю роботи, яка зумовлена значним впливом коливань напруги живлення на похибку зсуву нуля по входу через відсутність механізму компенсації синфазної завади.

Порівняльний аналіз показує, що базова 6-транзисторна модель має низький коефіцієнт підсилення та вкрай низьку стійкість до флуктуацій напруги живлення. Прототип з 22 транзисторами має складну локальну сітку зворотних зв'язків, але все ще характеризується високою похибкою зсуву нуля. Натомість новітня модель (патент України № 152508), що базується на 24 транзисторах та одному прецизійному резисторі, забезпечує високий коефіцієнт підсилення, абсолютну стійкість до флуктуацій напруги живлення завдяки блоку балансування та високу точність фіксації точки спокою.

2. Структурно-функціональна топологія новітньої архітектури

Розроблений ДППС базується на вісімнадцяти базових транзисторах, до яких інтегровано ще шість додаткових транзисторів спеціального призначення та один прецизійний резистор зворотного зв'язку.[1, 1] Вхідна шина безпосередньо з'єднана з резистором зворотного зв'язку та емітерами першої пари транзисторів, формуючи вхід з надзвичайно низьким диференційним опором.

Інноваційність розробки полягає в організації керування базами вхідних транзисторів, які підключені до емітерів спеціального блоку балансування (восьмого і дев'ятого транзисторів).[1, 1] Бази цих балансуючих транзисторів жорстко з'єднані з шиною нульового потенціалу, що формує ідеальну гальванічну опору. Цей вузол функціонує як активний синфазний компенсатор: будь-які флуктуації, викликані зміною напруг живлення, дзеркально відбиваються в цьому блоці, генеруючи протифазний компенсаційний струм.

Каскад посилення струмової помилки реалізовано через складну систему струмових дзеркал, які гарантують, що нелінійності індивідуальних напівпровідникових переходів взаємно компенсуються. Формування вихідної потужності покладено на симетричний драйверний каскад, а глобальна петля керування замикається через єдиний пасивний резистор зворотного зв'язку, який жорстко детермінує загальний коефіцієнт підсилення.

Корисна модель пояснюється кресленням, на якому зображена схема двотактного підсилювача постійного струму (рис. 1).

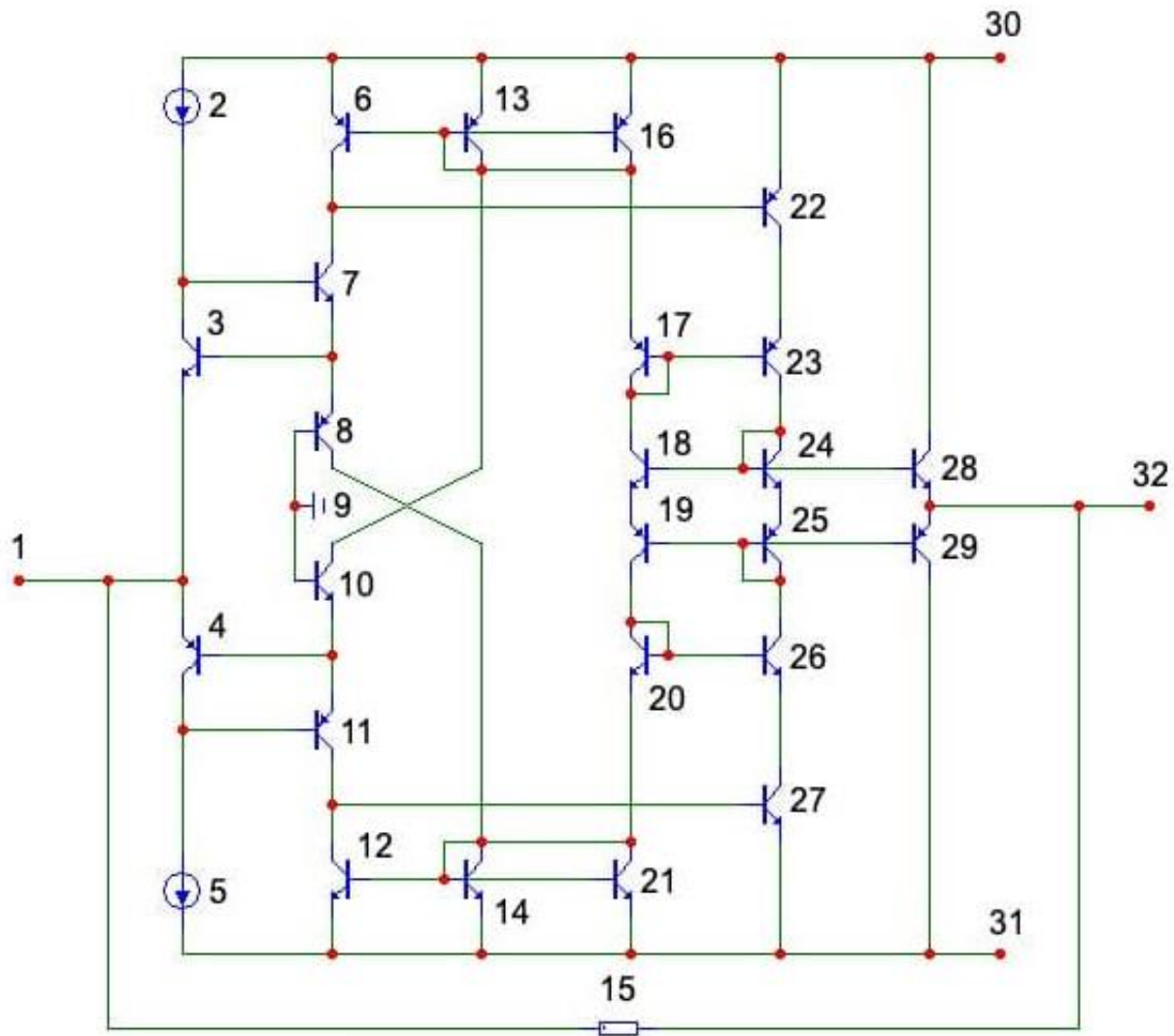


Рисунок 1 – Двотактний підсилювач постійного струму

3. Фізико-математична динаміка перехідних процесів та балансування струмів

При позитивному збуренні (коли вхідний струм втікає у схему), потенціал на об'єднаних емітерах вхідної пари зростає.[1, 1] Це призводить до того, що провідність першого транзистора зменшується, а другого – збільшується. Ця диференційна асиметрія активує компенсаційний блок: лівий балансуєчий транзистор відкривається, а правий закривається. Ці зміни транслюються через матрицю дзеркал на драйверний каскад, в результаті чого у вихідній парі струм навантаження починає активно генеруватися відповідним транзисторним плечем, проходячи через вихідну шину і частково повертаючись через резистор зворотного зв'язку на вхід (процес автобалансування).

При негативному вхідному збуренні (коли струм витікає зі схеми) процес є повністю симетричним та ізоморфним: перший транзистор вхідної пари відкривається, другий закривається, лівий вузол балансування зменшує провідність, а правий збільшує.[1, 1] У вихідному каскаді протилежне транзисторне плече перебирає на себе функцію активної генерації потужного струму. Протягом усього циклу джерела струму та фіксуючі транзистори утримують незмінний режим роботи, виконуючи функцію стабільного енергетичного каркаса архітектури.

4. Оцінка лінійності, компенсація флуктуацій живлення та паразитної ємності

Коефіцієнт підсилення розімкнутої петлі в даній топології досягає екстремально високих значень (понад 120 дБ). Відповідно до класичних теорем для систем із зворотним зв'язком, замкнений коефіцієнт передачі струму (трансїмпеданс) детермінується виключно опором пасивного резистора зворотного зв'язку. Статична передатна характеристика є абсолютно лінійною, оскільки експоненціальні нелінійні складові транзисторів пригнічуються пропорційно глибині зворотного зв'язку.

Щодо коефіцієнта придушення зміни напруги живлення, то завдяки прив'язці баз балансуєчих транзисторів до шини нульового потенціалу, стрибок напруги живлення викликає абсолютно ідентичний (синфазний) приріст струмів у лівій і правій гілках симетричної матриці. Завдяки геометричній ідентичності кристала, ці струми генерують два однакові за модулем, але протилежні за напрямком компенсаційні потоки. Таким чином, приріст струму зсуву нуля повністю нівелюється, і досягається безпрецедентна стабільність.

Використання струмового способу передачі сигналів між внутрішніми каскадами мінімізує вплив паразитних реактивностей. Оскільки посилення по напрузі у внутрішніх вузлах мінімальне, ефект множення паразитної ємності практично усувається. Це дозволяє схемі досягати високої швидкості змінення вихідної напруги та широкої смуги пропускання. Крім того, диференційна структура ефективно відхиляє ефекти старіння напівпровідників, сприймаючи їх як синфазну заваду.

Висновок

Спираючись на результати дослідження новітньої архітектури двотактних підсилювачів постійного струму (патент UA 152508), доведено, що класичні концепції мінімізації компонентної бази вичерпали свій потенціал. Впровадження методу побудови ДППС на базі симетричної матриці перехресних зв'язків з прив'язкою баз балансуєчих транзисторів до шини нульового потенціалу дозволило здійснити якісний стрибок у характеристиках.

Запропонована архітектура здійснює ідеальне дзеркальне відбиття та компенсацію флуктуацій, чим досягається абсолютна нейтралізація впливу зміни напруги живлення на похибку зсуву нуля по входу. Застосування глобального зворотного зв'язку та принципів струмового керування ефективно нівелює вплив паразитних реактивностей та деградаційних процесів, забезпечуючи екстремально широку смугу пропускання. Результати дослідження свідчать, що розроблений підсилювач є оптимальним рішенням для застосування як прецизійного буферного каскаду в передових оптико-електронних системах та багаторозрядних перетворювачах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О. Д. Азаров, С. А. Кирилашук, О. О. Лукашук. Патент на корисну модель № 152508. Двотактний підсилювач постійного струму. МПК G05F 1/08. Опубл. 15.02.2023, бюл. № 7.
2. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов. Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013. 142 с.
3. D. Grujić, L. Saranovac, "Limitations of CMOS broadband power amplifiers due to package parasitics", Electronics, 2015.
4. M. Marjanović et al., "Study of NBTI effects on the electrical characteristics of MOS transistors", Electronics, 2015.
5. О. О. Лукашук, "Метод побудови буферного каскаду для підвищення точності АЦП в оптико-електронних системах", Міжнародна конференція ODS 2025, Вінниця.
6. Universal Decimal Classification (UDC) Consortium, structure and categories for 621.375.4.
7. О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, Н. О. Біліченко. Швидкодіючі двотактні підсилювачі постійного струму з балансним зворотним зв'язком. Вінниця: ВНТУ, 2016. 136 с.
8. I. G. Beershadskiy, V. A. Favlenko, "Highly Stable Autogenerator Photocurrent Amplifier", Izmeritel'naya Tekhnika, 1971.

Науковий керівник: **Азаров Олексій Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ОТ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua

Лукашук Олександр Олегович – аспірант групи 123-23а, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: o.lukashuk3.14@gmail.com

Циркун Владислав Вікторович – аспірант групи 123-24а, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vladtsyrkun@gmail.com

Supervisor: **Azarov Olexiy** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Engineering, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsia, e-mail: azarov2@vntu.edu.ua

Oleksandr Lukashuk – Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: o.lukashuk3.14@gmail.com

Vladislav Tsyrykun – Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vladtsyrkun@gmail.com