

Вінницький національний технічний університет

Гарнага Володимир Анатолійович

УДК 681.3

**ДВОТАКТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ
БАГАТОРОЗРЯДНИХ АЦП І ЦАП, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2011

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор,
Заслужений працівник освіти України
Азаров Олексій Дмитрович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри обчислювальної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України
Філінюк Микола Антонович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри проектування комп'ютерної та
телекомунікаційної апаратури

доктор технічних наук, професор
Літвіх Віктор Вікторович,
Національний технічний університет України «КПІ»,
професор кафедри автоматизації експериментальних досліджень.

Захист відбудеться «18» березня 2011 р. о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розіслано «11» лютого 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підсилювачі постійного струму (ППС) є невід’ємними компонентами перетворювачів форми інформації. Водночас, їх недосконалість призводить до появи некоригованих складових статичної похибки перетворення та не дозволяє покращити динамічні характеристики АЦП і ЦАП, у яких ППС застосовуються. У свою чергу це обмежує підвищення точності і швидкодії багаторозрядних ПФІ, які входять до складу систем перетворення, оброблення та реєстрування аналогових сигналів.

Розвиток мікроелектронних технологій і можливість виготовлення на одному кристалі комплементарних n-p-n і p-n-p біполярних транзисторів, параметри яких мають незначні розбіжності (одного порядку), стимулював розробників до проектування нових схем на базі двотактних структур. Існуючі двотактні підсилювачі перевершують одноктактні аналоги за швидкодією, зокрема, швидкістю наростання вихідного сигналу, шириною смуги повної неспотвореної потужності та лінійністю статичної передатної характеристики. Саме завдяки вказаним перевагам інтерес до двотактних структур зростає, і з’являються нові схемні рішення. Водночас, фахівцям не вдалося вирішити проблему збільшення підсилення на каскад існуючих двотактних ППС. Незважаючи на це, значна кількість провідних фірм світу, зокрема, Analog Device, Elantec, Texas Instruments, National Semiconductor, серійно випускають двотактні підсилювачі постійного струму.

Варто відзначити, що наукові школи колишнього СРСР, а також України займалися проблемами побудови підсилювачів постійного струму з високими статичними і динамічними характеристиками. Спроби побудувати двотактні структури ППС було здійснено в Україні у Вінницькому політехнічному інституті ще у 80-х роках ХХ ст. у науковій школі професора Азарова О. Д. При цьому вже на початку 2000-х років відбулася значна активізація роботи у вказаному напрямку. Підтвердженням цього слугує значна кількість публікацій, присвячених двотактним підсилювачам постійного струму, як в Україні, так і за її межами. Слід відзначити, що двотактні підсилювачі постійного струму мають специфічні похибки як зміщення нуля, так і похибку масштабу, які досить складно зменшити схемотехнічним шляхом. Зменшення цих похибок можливе при використанні ППС у складі каналів АЦ і ЦА-перетворення, що самокоригується або самокалібрується. Такий підхід дозволяє також зменшити похибку інтегральної нелінійності каналу перетворення АЦП, якщо її важко чи неможливо усунути вказаними процедурами. Саме тому дослідження в напрямку побудови двотактних симетричних підсилювачів постійного струму із високими статичними і динамічними характеристиками є актуальним.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження здійснювалося здобувачем протягом 2006-2010 років відповідно до наукового напрямку кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, зокрема, у ході виконання науково-дослідних програм «Розробка теорії швидкісного порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі вагової надлишковості» (номер державної реєстрації 0105U002439), «Теорія побудови пристроїв та елементної бази прискореного високоточного аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0108U000664) та координаційного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України (наказ №37 від 13.02.1997 р.) за напрямком – “Перспективні інформаційні технології, прилади комплексної автоматизації, системи зв’язку”. Указані дослідження виконувались також у рамках функціонування спільної науково-дослідної лабораторії відмовостійких інформаційно-обчислювальних і керуючих систем між Інститутом кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України та Вінницьким національним технічним університетом згідно договору №58/33.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є покращення статичних і динамічних характеристик двотактних підсилювачів струму шляхом такої їх структурно-функціональної організації, що базується на введенні до схеми внутрішніх контурів вибіркового зворотного зв’язку і генераторів компенсаційних струмів. Це дозволяє збільшити підсилення на каскад, навантажувальну здатність та швидкодію.

У рамках вибраного напрямку сформульовано такі задачі досліджень:

1. Розглянути відомі структури і принципові схеми однокатних та двокатних підсилювачів постійного струму, а також проаналізувати вплив їх статичних і динамічних характеристик на похибки перетворення багаторозрядних ПФІ.

2. Дослідити запропоновані метод структурно-функціональної організації двокатних підсилювачів постійного струму із введенням внутрішніх контурів вибіркового зворотного зв'язку і компенсаторів струму у проміжні каскади підсилювача, а також метод параметричної компенсації неідентичної статичних характеристик транзисторів різного типу провідності у проміжних каскадах двокатних ППС.

3. Скласти математичні моделі: статичних передатних характеристик, а також динамічних характеристик, зокрема, АЧХ, ФЧХ, перехідної характеристики двокатних підсилювачів постійного струму. Оцінити нелінійні спотворення статичних передатних характеристик, а також нелінійні спотворення в діапазоні частот вхідного сигналу.

4. Проаналізувати статичні і динамічні характеристики відомих і запропонованих схем двокатних ППС, зокрема, загального і каналних малосигнальних коефіцієнтів передачі в діапазоні вхідного і вихідного сигналів та запропонувати класифікацію двокатних ППС.

5. Здійснити комп'ютерне моделювання статичних і динамічних характеристик двокатних симетричних ППС, а також надати рекомендації щодо проектування аналогових вузлів на основі двокатних симетричних ППС для багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються.

6. Розробити і виготовити макет аналогової частини багаторозрядного АЦП порозрядного наближення з ваговою надлишковістю, що самокалібрується, на базі двокатних симетричних підсилювачів постійного струму.

Об'єктом дослідження є процеси виникнення статичних і динамічних похибок у двокатних підсилювачах постійного струму, а також шляхи зменшення цих похибок за рахунок побудови таких пристроїв за двокатною симетричною структурою та введення вибіркового зворотного зв'язку у проміжні підсилювальні каскади.

Предметом дослідження є структурно-функціональна організація двокатних симетричних підсилювачів постійного струму, а також їхні статичні і динамічні характеристики, а саме: підсилення на каскад, навантажувальна здатність та швидкодія.

Методи дослідження: основи теорії електронних схем та елементи теорії похибок використано для аналізу статичних і динамічних характеристик підсилювачів постійного струму; математичний апарат спеціальних функцій, зокрема, повних еліптичних інтегралів першого та другого роду застосовано для оцінювання коефіцієнту нелінійних спотворень базової схеми двокатного ППС; за допомогою математичного апарату лінійної квадратичної апроксимації оцінено нелінійність статичної передатної характеристики двокатного підсилювача струму; основи теорії багаторозрядних ПФІ системного призначення застосовано для визначення коригованих і некоригованих складових похибок перетворювального каналу АЦП, в якому використовуються ДСППС; комп'ютерне моделювання із використанням сучасних пакетів прикладних програм схемо технічного аналізу використано для дослідження статичних і динамічних характеристик двокатних підсилювачів постійного струму.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Уперше запропоновано метод структурно-функціональної організації двокатних симетричних підсилювачів постійного струму з покращеними статичними і динамічними характеристиками, що базується на введенні у протифазні канали підсилення контурів вибіркового зворотного зв'язку, який реагує на непропорційність приростів вихідного сигналу. Це дозволяє (у $1.5 \div 2$ рази) збільшити підсилення на каскад і загальний коефіцієнт передачі при заданій кількості каскадів, покращити навантажувальну здатність (коефіцієнт передачі практично не залежить від R_H , значення якого може змінюватися на 2–3 порядки), а також – швидкодію пристроїв.

2. Подальшого розвитку отримав метод параметричної компенсації неідентичності статичних характеристик проміжних каскадів двотактних ППС, побудованих на транзисторах різного типу провідності, зокрема, при значних (2-3 рази) розбіжностях їх коефіцієнтів передачі по струму. Використання цього методу дозволяє істотно (на порядок) зменшити похибку зміщення нуля схем.

3. Удосконалено математичні моделі статичних і динамічних характеристик двотактних симетричних ППС, зокрема, передатної характеристики, АЧХ, ФЧХ та перехідної характеристики. Це дозволяє оцінити значення малосигнальних коефіцієнтів передачі та похибки лінійності в діапазоні малого та великого сигналів. Показано, що смуга повної неспотвореної потужності запропонованих пристроїв у 3÷5 разів перевищує аналогічний параметр ППС, побудованих за асиметричною структурою.

4. Удосконалено математичну модель нелінійних спотворень ППС із двотактною симетричною структурою в діапазоні частот вхідного сигналу. Це дозволяє здійснити порівняльний аналіз характеристик запропонованих пристроїв із ППС, побудованими за асиметричною структурою. Доповнено також класифікацію двотактних підсилювачів постійного струму, що дозволяє систематизувати відомі й запропоновані підходи та виділити схеми з кращими показниками, залежно від вимог, що висуваються до вказаних пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено структурні, функціональні та принципові схеми двотактних підсилювачів постійного струму з високою лінійністю, покращеною навантажувальною здатністю і швидкодією, а також надано рекомендації з проектування на базі цих пристроїв аналогових вузлів для багаторозрядних ПФІ. Це дало змогу зменшити у 3÷5 разів некориговану складову похибки лінійності багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються або самокоригуються.

2. Знижено вимоги до розкиду параметрів транзисторів, що застосовуються в сигнальних колах двотактних симетричних ППС. Це дозволяє відмовитися від використання прецизійних елементів, а відповідно спростити технологію виготовлення таких пристроїв. Крім того, покращується симетрія фронтів перехідної характеристики підсилювачів постійного струму, проміжні каскади яких побудовано на транзисторах різного типу провідності.

3. Розроблено й виготовлено з використанням двотактних симетричних ППС аналогову частину макету багаторозрядного ($n=16$) АЦП прискореного порозрядного наближення, що самокалібрується, з ваговою надлишковістю. У пристрої використовуються такі аналогові вузли: буферний підсилювач, підсилювач струмів для високочутливого компаратора, а також перетворювач «струм-напруга».

4. Надано рекомендації щодо використання сучасних інтегрованих пакетів САПР і схемотехнічного моделювання для аналізу статичних і динамічних характеристик аналогових вузлів, побудованих на двотактних симетричних підсилювачах постійного струму, для багаторозрядних АЦП і ЦАП (14–18 розрядів), що самокалібруються.

Основні наукові результати та практичні рекомендації впроваджено в Національній радіокомпанії України, у ТОВ «СІ Текнолоджі інструментс» (Російська Федерація), а також у навчальний процес кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету в рамках викладання дисциплін «Комп'ютерна електроніка», «Лінійні інтегральні схеми», «Аналого-цифрова техніка», «Моделювання пристроїв і елементів обчислювальної техніки».

Особистий внесок здобувача. У статтях, написаних у співавторстві, авторів належить: малосигнальні моделі заміщення біполярних транзисторів із керованими генераторами струму, а також аналітичні вирази, що описують АЧХ і ФЧХ двотактного ППС [1, 16], математична модель передатної характеристики та похибки лінійності двотактного симетричного ППС [2, 3], методи задання струму робочих точок та методи симетрування коефіцієнтів передачі проміжних підсилювальних каскадів двотактних ППС [4, 5, 15], аналітичні вирази для оцінювання нелінійних спотворень, що виникають у сигнальних

колах двотактних підсилювальних схем [6], структурна та схемна організація сигнальних каскадів двотактних ППС [7-14].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи було апробовано на 12 науково-технічних конференціях: XIII міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика–2006”; I та II Міжнародних конференціях “Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації” (м. Вінниця 2007, 2009); IX Міжнародної конференції “Контроль і управління у складних системах”(м. Вінниця 2008); Міжнародній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” СПРТП–2009; Міжнародній конференції “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія 2010” (м. Вінниця 2010); Науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 2005–2010 рр.).

Публікації. За результатами наукових досліджень опубліковано 46 наукових праць, серед яких 15 статей у наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань, затверджених ВАК України, 1 патент України на винахід, 22 патенти України на корисну модель, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 6 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, що містять 64 рисунки і 14 таблиць, висновків, додатків (3) і списку використаних джерел (141 найменування). Загальний обсяг дисертації становить 182 сторінки, з яких основний зміст викладено на 150 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок із науково-дослідними програмами, темами, сформульовано мету та завдання дослідження. Окреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, конкретну участь автора, наведено інформацію про впровадження результатів роботи, їх апробацію, публікації та структуру дисертації.

У **першому розділі** здійснено аналіз переваг і недоліків існуючих одноктних і двотактних структур підсилювачів постійного струму, розглянуто їхні статичні і динамічні характеристики. На основі підсумків цього аналізу запропоновано структурну схему узагальненого двотактного підсилювача постійного струму (рис. 1, а), який інтегрує в собі властивості такого класу схем. Відзначено, що недолік такого підходу полягає у складності завдання струмів робочої точки I' та I'' проміжних підсилювальних каскадів, що формуються компенсаторами I та II, оскільки від точності їх припасування в значній мірі будуть залежати характеристики підсилювача, зокрема, зміщення нуля. При цьому, при змінні умов навколишнього середовища чи напруги живлення, у пристрої будуть змінюватися робочі точки проміжних підсилювальних каскадів. Запропоновано указану схему взяти за базову для отримання аналітичних виразів, що дозволять оцінити статичні і динамічні характеристики такого класу пристроїв.

Здійснено аналіз коригованих і некоригованих похибок перетворювального каналу АЦП із самокалібруванням. Показано, що для зменшення похибки інтегральної нелінійності перетворювачів потрібно використовувати високолінійні швидкодіючі аналогові вузли. Визначено напрями і сформульовано задачі досліджень.

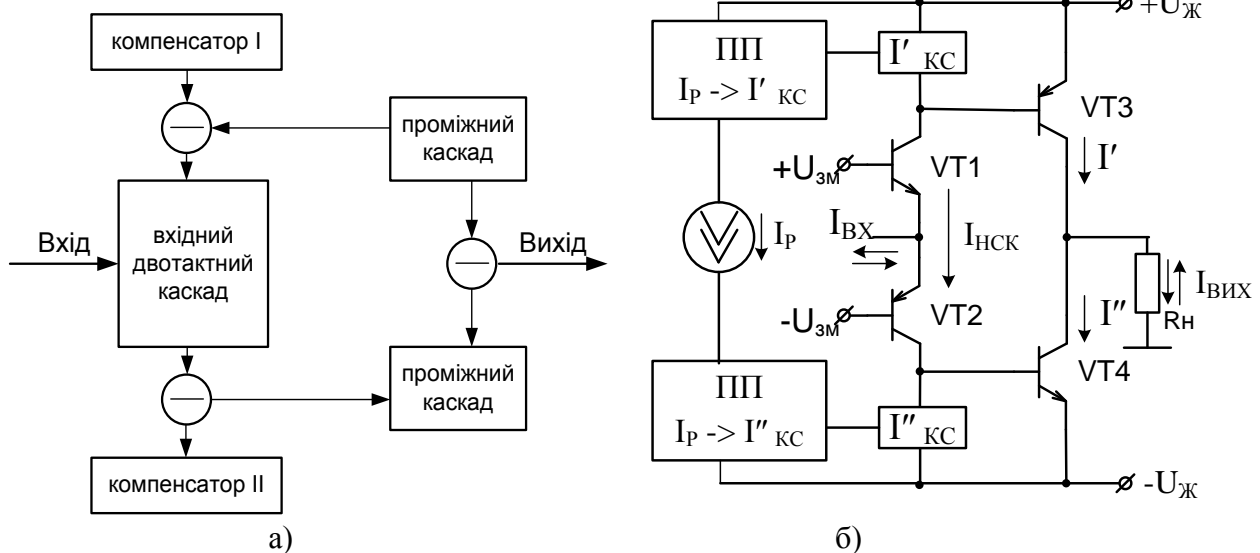


Рис. 1. Узагальнені структурна та функціональні схеми двотактних ППС: а) з припасуванням компенсаційних струмів; б) із параметричною компенсацією базових струмів підсилювальних каскадів

У **другому розділі** здійснено аналіз двох запропонованих методів структурно-функціональної організації двотактних симетричних підсилювачів постійного струму з покращеними статичними і динамічними характеристиками:

1) із параметричною компенсацією неідентичності колекторних струмів із переведенням вхідного двотактного каскаду в «мікрорежим» на рівні базових струмів проміжних підсилювальних каскадів;

2) із симетруванням коефіцієнтів підсилення та вихідних струмів проміжних каскадів за рахунок уведення вибірових контурів симетричного зворотного зв'язку та компенсаторів струму.

Структури, що реалізують запропоновані методи, наведено, відповідно, на рис. 1, б та рис. 2 а, б. Перший метод ґрунтується на використанні параметричних перетворювачів (ПП) компенсаційних струмів. Вони дозволяють забезпечити струми робочої точки протифазних підсилювальних каскадів I' та I'' ППС, незважаючи на те, що вказані каскади побудовані на транзисторах різного типу провідності. При цьому наскрізний струм, що протікає через транзистори вхідного каскаду VT1 та VT2 при $I_{ВХ}=0$, визначається у вигляді

$$I_{НСК} = I'_{КС} + I''_{КС}, \text{ при цьому } I' = I''_{КС} \cdot B' \approx I'' = I'_{КС} \cdot B'' \approx I_p,$$

де $I'_{КС}$ $I''_{КС}$ – компенсаційні струми підсилювальних каскадів,

B' та B'' – статичні коефіцієнти передачі, відповідно, р-п-р та п-р-п транзисторів підсилювальних каскадів двотактного ППС,

I_p – заданий рівень струму робочої точки.

Недоліком такого підходу є деяке зменшення швидкодії підсилювача порівняно зі схемами, що працюють у номінальних режимах робочої точки. Він виникає через те, що транзистори вхідного двотактного каскаду VT1 та VT2 працюють у зоні мікрострумів, що дещо звужує смугу пропускання ППС.

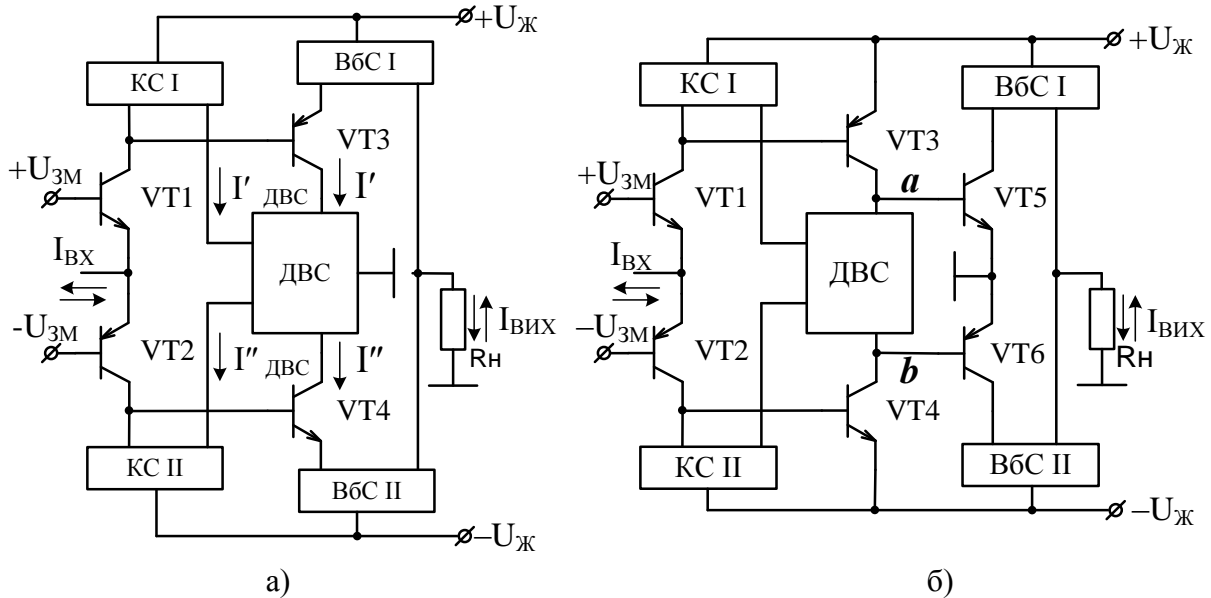


Рис. 2. Методи структурно-функціональні організації двотактних ППС з уведенням вибіркового зворотного зв'язку у проміжні підсилювальні каскади: а) з однією парою проміжних підсилювальних каскадів; б) з двома парами проміжних підсилювальних каскадів

Суть другого методу полягає у введенні двох контурів вибіркового зворотного зв'язку (ВЗЗ) у протифазні каскади підсилення ППС. Вони містять двонаправлений відбивач струму (ДВС) та компенсатори струму верхній (КС I) та нижній (КС II). Такий підхід дозволяє вирівняти канальні коефіцієнти передачі по струму і автоматично задати через КС I та КС II відповідні робочі точки схеми. При цьому термін вибірковість означає здатність зворотного зв'язку реагувати тільки на непропорційні прирости струмів $\Delta I'$ та $\Delta I''$ проміжних каскадів підсилення і формувати відповідні компенсаційні струми $\Delta I'_{\text{ДВС}}$ та $\Delta I''_{\text{ДВС}}$. Контури ВЗЗ діють таким чином, що по каналу з меншим підсиленням K_1 збільшується, а по каналу з більшим підсиленням – зменшується доти, аж поки ці коефіцієнти не вирівняються. Використання вихідного каскаду на відбивачах струму (ВбС I та ВбС II) дозволяє досягти високої навантажувальної здатності схеми і незалежності K_i від R_H .

Найпростіший двонаправлений відбивач струму з давачами на транзисторах у діодному вмиканні, принципову схему якого показано на рис. 3, а, дозволяє підтримувати таке співвідношення струмів у підсилювальних каскадах

$$\frac{I'}{I_p} = \frac{I_p}{I''}.$$

При цьому залежно від приростів, що виникають $I' = I_p + \Delta I'$ і $I'' = I_p - \Delta I''$ у парах проміжних підсилювальних каскадів, струм $I_{\text{ДВС}}$ буде визначатися за співвідношенням

$$I_{\text{ДВС}} = I_0 \cdot \exp(U_a + U_b) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{1}{2\varphi_T} \cdot \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I' \cdot I''}{I_0^2}\right)\right) = \sqrt{I' \cdot I''},$$

де I_0 – початковий тепловий струм транзистора,

U_a, U_b – напруги у відповідних вузлах,

φ_T – термопотенціал.

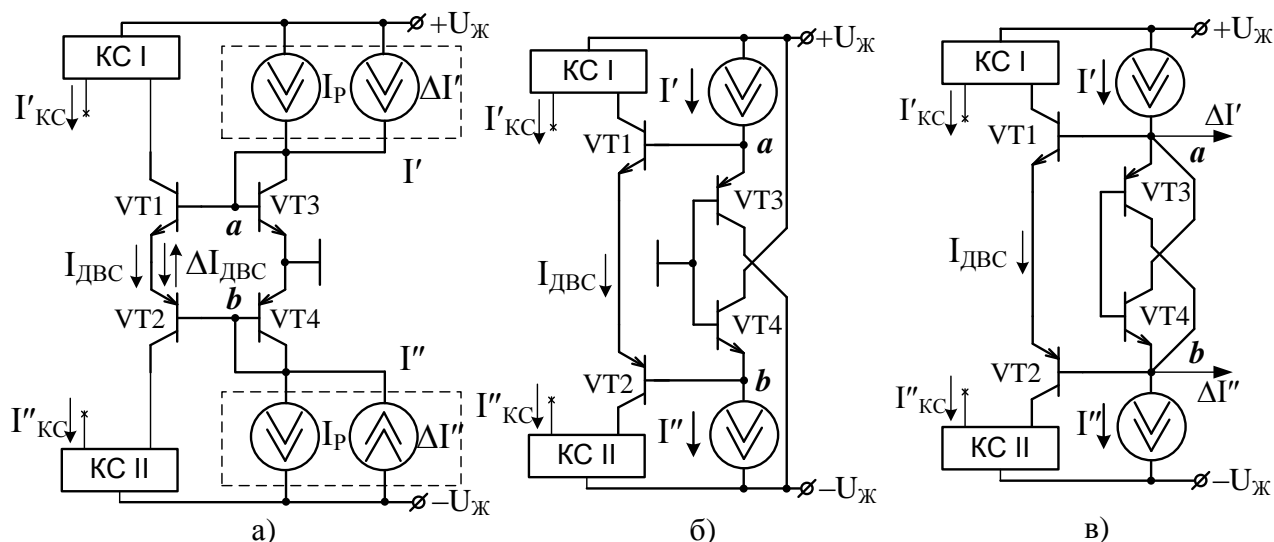


Рис. 3. Двонаправлений відбивач струму із застосуванням давачів: а) на діодах; б) на комплементарних транзисторах із загальною базою; в) на комплементарних транзисторах із самобалансуванням базових струмів

Таким чином, якщо $I' = I''$, то $I_{\text{ДВС}} = I_p$. Прирости компенсаційних струмів $\Delta I'_{\text{ДВС}}$ та $\Delta I''_{\text{ДВС}}$ визначаються через $\Delta I_{\text{ДВС}}$, який залежить від характеру змінення $\Delta I'$ і $\Delta I''$. При їх пропорційному змініні згідно з виразами

$$\frac{I_p + \Delta I'}{I_p} = \frac{I_p}{I_p - \Delta I''}, \text{ маємо } \Delta I' = \frac{\Delta I'' \cdot I_p}{I_p - \Delta I''}, \Delta I'' = \frac{\Delta I' \cdot I_p}{I_p + \Delta I'}$$

$\Delta I_{\text{ДВС}}$ практично дорівнює нулю, як показано на рис. 4, а (графік 1). Водночас, при непропорційному змініні I' і I'' , компенсаційні струми починають змінюватися, як показано на рис. 4, а (графік 2) та на рис. 4, б. При цьому амплітуда приростів компенсаційних струмів залежить від рівня неузгодженості I' та I'' .

Слід відзначити, що використання ДВС із давачами струму на комплементарних транзисторах із загальною базою, схему якого показано на рис. 3, б, у двотактних ППС дозволяє досягти кращої узгодженості статичних вольт-амперних характеристик транзисторів VT1 і VT3 та VT2 і VT4 порівняно зі схемою ДВС, що містить давачі на транзисторах у діодному вмиканні. При цьому, струми транзисторів VT3 і VT4, а також VT1 і VT2 практично не залежать від напруги живлення, що додатково покращує симетрування струмів робочої точки двотактних ППС. Схема ДВС, побудована із використанням давачів на комплементарних транзисторах із самобалансуванням базових струмів (рис. 3, в), використовується переважно для багатокаскадних ППС.

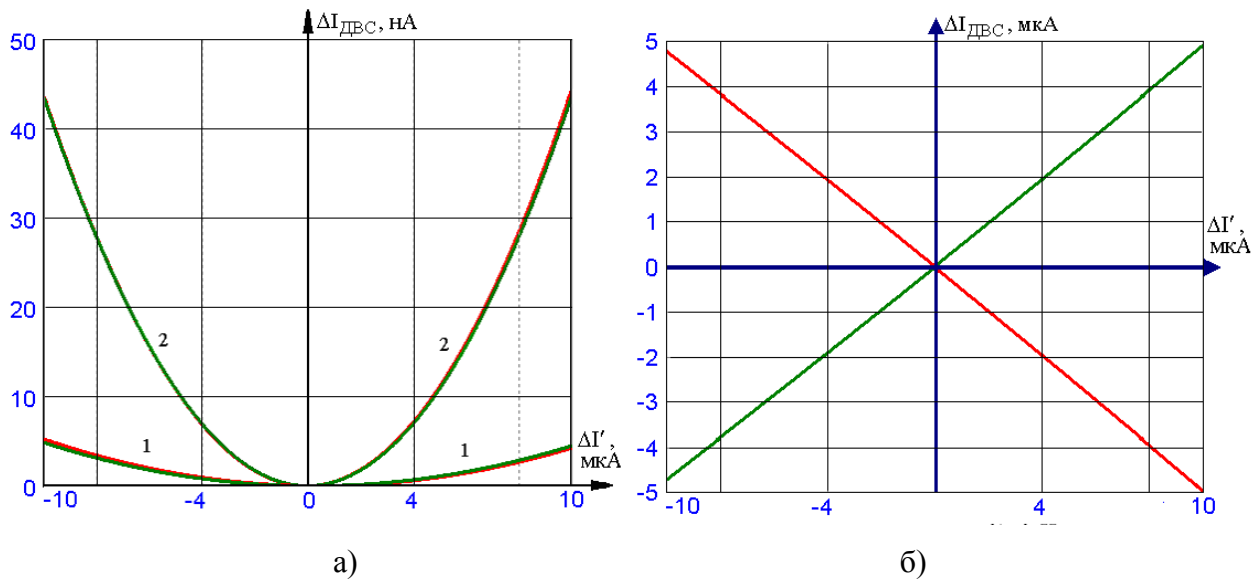


Рис. 4. Графіки залежностей компенсаційних струмів $\Delta I_{\text{ДБС}} = f(\Delta I', \Delta I'')$: а) при пропорційних $\Delta I'$ і $\Delta I''$ – 1 та при однакових приростах з протилежними знаками – 2; б) при непропорційних значеннях $\Delta I'$ та $\Delta I''$

Проаналізуємо характеристики двотактного симетричного ППС із двома парами проміжних підсилювальних каскадів. Для такої схемної конфігурації загальний коефіцієнт передачі по струму оцінюється за співвідношенням

$$(K_i)_4 = K_{\text{ex}} \cdot K_{\text{npI}} \cdot K_{\text{npII}} \cdot K_{\text{вих}} = \frac{2 \cdot \beta_2' \cdot \beta_2'' \cdot (\alpha_1' + \alpha_1'')}{\beta_2'' + \beta_2'} \cdot \frac{2 \cdot \beta_3' \cdot \beta_3''}{\beta_3' + \beta_3''} \cdot K_{\text{вих}},$$

де $\alpha_1', \alpha_1'', \beta_2', \beta_2'', \beta_3', \beta_3''$ – відповідні коефіцієнти передачі по струму транзисторів сигнальних каскадів ППС,

$K_{\text{ex}}, K_{\text{npI}}, K_{\text{npII}}, K_{\text{вих}}$ – коефіцієнти підсилення по струму вхідного каскаду, I-ї та II-ї пари підсилювальних та вихідного каскаду, відповідно.

Підставляючи параметри реальної елементної бази, наприклад, біполярних транзисторів фірми Intersil серії HFA3046/3096, і використовуючи ВБС із $K_i \approx 2.5$, отримаємо

$$(K_i)_4 = 10880 \approx 80.7 \text{ (дБ)},$$

при цьому значення підсилення на каскад такого чотирикаскадного двотактного ППС (рис. 2, б) визначається за виразом

$$(K_i^*)_4 = \sqrt[4]{(K_i)_4} \approx 10.2.$$

Виведено аналітичний вираз для оцінювання статичної передатної характеристики схеми двотактного ППС

$$I_H(I_{\text{ex}}) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\beta_4 \cdot \beta_2}{\beta_2 + 1} + \frac{\beta_3 \cdot \beta_1}{\beta_1 + 1} \right) \cdot I_{\text{ex}} + \left(\frac{\beta_4 \cdot \beta_2}{\beta_2 + 1} - \frac{\beta_3 \cdot \beta_1}{\beta_1 + 1} \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{I_{\text{ex}}^2}{4} + I_0^2} - I_0 \right), \quad (1)$$

де I_n – струм навантаження двотактного підсилювача постійного струму, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – диференційні коефіцієнти підсилення по струму біполярних транзисторів сигнальних кіл ППС. Його графічну інтерпретацію наведено на рис. 5. Тут пунктиром показано ідеальне значення вихідного струму.

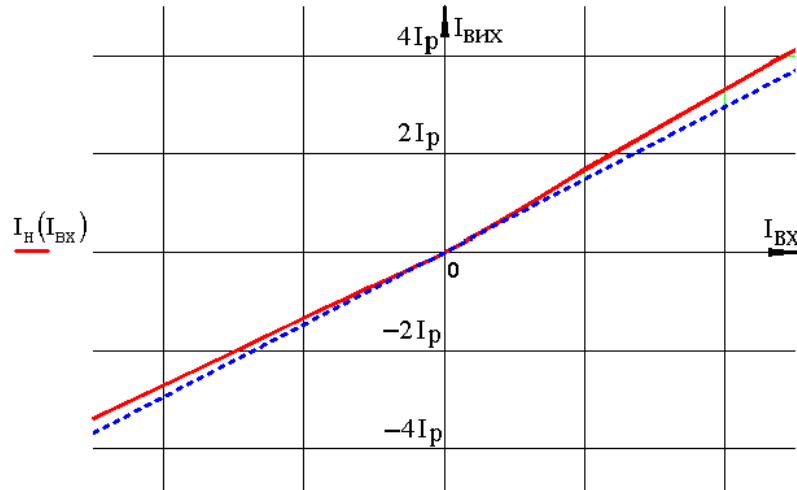


Рис. 5. Передатна характеристика базової схеми двотактного ППС

Оцінено похибку лінійності передатної характеристики узагальненої схеми двотактного підсилювача струму. При цьому під час аналізу доцільно враховувати два аспекти:

а) по-перше – приріст вихідного струму ΔI_n залежно від значення струму зміщення у транзисторах VT1 і VT2 за умови, що $I_{ВХ}=0$;

б) по-друге – приріст вихідного струму залежно від значення вхідного струму $I_{вх}$.

Водночас, приріст вихідного струму визначається за допомогою такого аналітичного співвідношення, яке отримано з виразу (1)

$$\Delta I_n = \bar{\beta} \Delta I + \Delta \beta \left(\sqrt{\frac{\Delta I^2}{4} + I_{зм}^2} - I_{зм} \right), \quad (2)$$

де $I_{зм}$ – струм зміщення вхідного каскаду,

ΔI – приріст вхідного струму,

$\bar{\beta}$ – середнє алгебраїчне значення диференційних коефіцієнтів підсилення,

$\Delta \beta$ – різниця диференційних коефіцієнтів підсилення біполярних транзисторів проміжного каскаду.

Використовуючи останнє співвідношення і проводячи перетворення, можна отримати вираз для оцінювання нелінійності статичної передатної характеристики від вхідного струму

$$v_{cm} = \frac{\left(-\frac{\bar{\beta}_1}{2} + \bar{\beta}_2 \hat{I}_0 \right) \hat{I}}{\bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 \hat{I}_0 - \frac{\bar{\beta}_2}{2} \hat{I}^2},$$

де $\hat{I} = I/I_p$, – приведенне значення вхідного струму.

Вказане співвідношення слугує для оцінювання коефіцієнта нелінійності через залежність $\bar{\beta}$. У загальному випадку коефіцієнт нелінійності визначається трьома чинниками (у порядку зменшення їх значення):

- 1) залежністю $\bar{\beta}$ від струму;
- 2) залежністю $\Delta\beta$ від струму;
- 3) нелінійністю коефіцієнта передачі(вираз (2)).

Варто зазначити, що вплив чинника 1 можливо мінімізувати не лише зменшивши $\bar{\beta}_1$ та $\bar{\beta}_2$, але й шляхом вибору робочої точки \hat{I}_0 . Мінімізації v_{cm} можна досягти за умови $-\frac{\bar{\beta}_1}{2} + \bar{\beta}_2 \hat{I}_0 = 0$.

У **третьому розділі** проаналізовано динамічні характеристики двотактних симетричних підсилювачів постійного струму з використанням керованих генераторів струму. Вказані аналітичні вирази дозволяють оцінити потенційні динамічні характеристики такого класу ППС та виявити шляхи подальшого їх покращення. Використовуючи теорему косинусів, виведено загальний коефіцієнт підсилення узагальненої схеми двотактного підсилювача по струму у діапазоні частот вхідного сигналу

$$Ki(f) = \sqrt{K'_{np}(f)^2 + K''_{np}(f)^2 - 2 \cdot K'_{np}(f) \cdot K''_{np}(f) \times \cos \left[[180 - \Delta\varphi] \cdot \frac{\pi}{180} \right]},$$

де $K'_{np}(f) = |\vec{K}_1|$ та $K''_{np}(f) = |\vec{K}_2|$ коефіцієнти передачі по струму верхнього і нижнього каналів підсилювача визначаються у вигляді:

$$K'_{np}(f) = \frac{\alpha' \cdot \beta''}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p'} \right)^2}}, \quad K''_{np}(f) = \frac{\alpha'' \cdot \beta'}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_p''} \right)^2}}.$$

Загальна фазова характеристика визначається виразом

$$\varphi'(f) = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{K'_{np} \cdot \sin \left[\Delta\varphi(f) \frac{180}{\pi} \right]}{\sqrt{K'_{np}(f)^2 + K''_{np}(f)^2 - 2 \cdot K'_{np}(f) \cdot K''_{np}(f) \cos \left[[180 - \Delta\varphi(f)] \cdot \frac{\pi}{180} \right]}}.$$

Графічна інтерпретація коефіцієнтів передачі проміжних підсилювальних каскадів та відповідні динамічні характеристики наведено на рис. 6, а і 6, б відповідно.

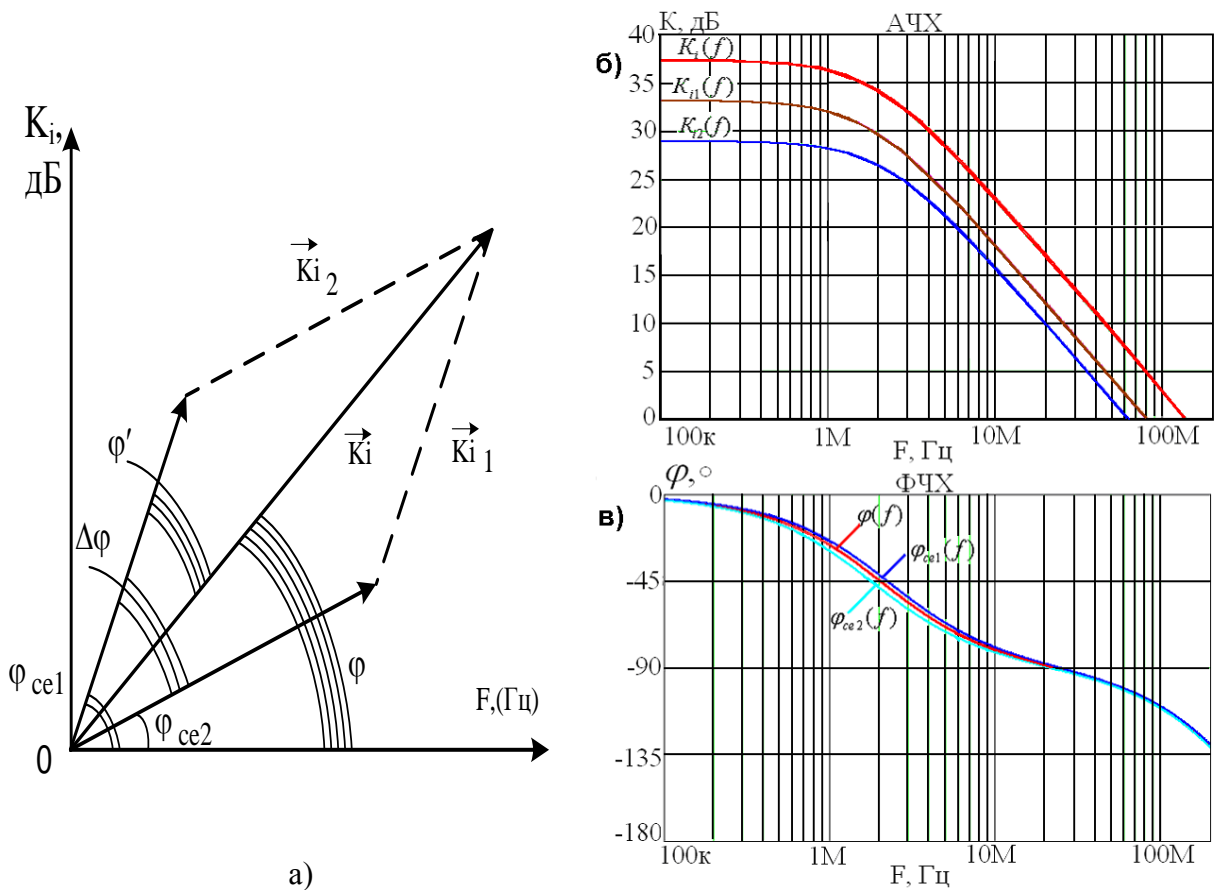


Рис. 6. Графічна інтерпретація коефіцієнтів передачі: а) векторна діаграма ДПС; б) АЧХ; в) ФЧХ

Для оцінювання нелінійних спотворень у діапазоні частот вхідного сигналу, що виникають у підсилювальних каскадах двотактних симетричних ППС, отримано аналітичний вираз

$$v_{дин} = \frac{\Delta\beta}{16\beta_{cp}} \cdot \frac{I_{ex}}{I_{зм}} \left(1 - \frac{3}{64} \cdot \frac{I_{ex}^2}{I_{зм}^2} \right). \quad (3)$$

При цьому гармонійні складові обчислюються у вигляді:

$$\begin{cases} a_2 = -I_{зм} \sqrt{1 + \frac{x^2}{8}} \cdot \frac{1}{2} \cdot x^2 \cdot \Delta\beta; \\ a_3 = 0; \\ a_4 = -\Delta\beta \cdot I_{зм} \sqrt{1 + \frac{x^2}{8}} \cdot \frac{\alpha^4}{16}; \\ a_5 = 0, \end{cases}$$

де a_2, a_3, a_4, a_5 – відповідні гармонійні складові вихідного сигналу ППС, $x = I_{вх}/I_{зм}$ коефіцієнт, що характеризує режим зони вхідного сигналу ППС,

$\alpha^2 = \frac{x^2}{x^2 + 8}$ – параметр при розкладі виразу (3) у ряд Тейлора.

Для порівняння статичних і динамічних характеристик відомих і запропонованих схем двотактних підсилювачів постійного струму проведено комп'ютерне моделювання у

середовищі MicroCAP 9.0. На рис. 7 показано графіки перехідних функцій та реакції схем на вхідний синусоїдальний сигнал.

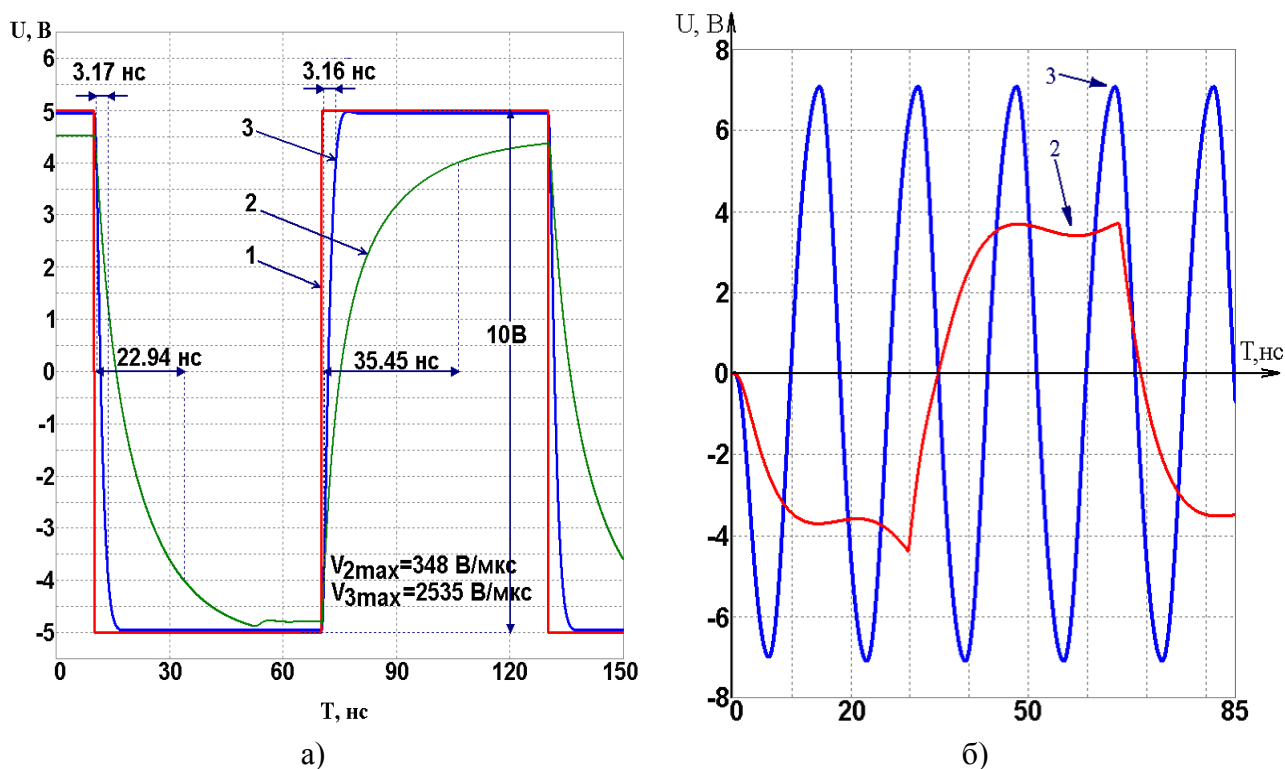


Рис. 7. Динамічні характеристики двотактних схем: а) перехідна характеристика; б) реакції схем на гармонійний вхідний сигнал

Тут: 1 – ідеальний вихідний сигнал, 2 – сигнал з виходу одностактного ППС, 3 – вихідний сигнал запропонованого двотактного симетричного ППС. З наведених графіків очевидно, що запропонований двотактний ППС має значно кращі динамічні характеристики ніж його аналог, зокрема, по швидкості наростання вихідного сигналу, симетрії фронтів перехідної характеристики та смугі повної неспотвореної потужності.

У **четвертому розділі** розглянуто рекомендації щодо практичної реалізації запропонованих схем аналогових вузлів, побудованих на основі двотактних симетричних ППС, зокрема, перетворювача «струм–напруга», буферного підсилювача та підсилювача різниці для компаратора із регульованою чутливістю. На рис. 8 наведено принципову схему та фрагмент монтажної схеми макету швидкодіючого двотактного підсилювача струму з нелінійним зворотним зв'язком для високочутливого компаратора. Вказані схеми ППС захищено патентами України №18599 та №51958.

Надано рекомендації з проектування аналогових вузлів із високими статичними і динамічними характеристиками для багаторозрядних ПФІ на базі двотактних підсилювачів постійного струму.

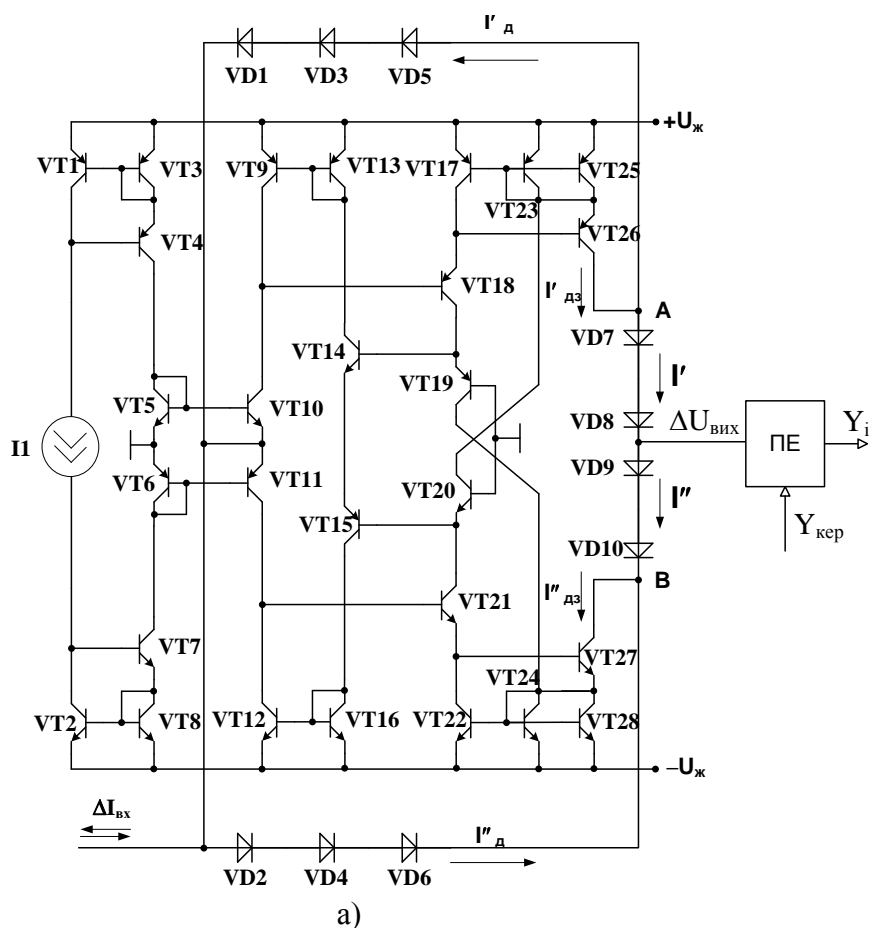


Рис. 8. Підсилювач різницевого струму з нелінійним зворотнім зв'язком на базі двотактного ППС а) принципова схема; б) фрагмент монтажної плати

У роботі також наведено структурну схему аналогової частини розробленого макету АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю. На рис. 9, а показано структуру цього пристрою, а на рис. 9, б – перехідну характеристику попереднього підсилювача різниці струмів, що входить до його складу. Тут: БП – буферний підсилювач, ПР – підсилювач різницевого струму, КН – компаратор напруг, 2хЦАП – здвоєний цифроаналоговий перетворювач, БК – блок керування.

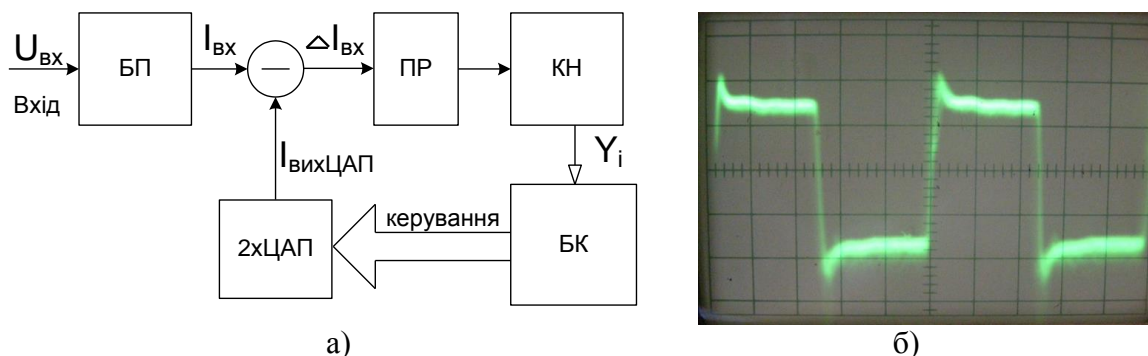


Рис. 9. Аналогова частина АЦП порозрядного наближення, що самокалібрується: а)структурна схема фрагменту макету; б) перехідна характеристика ПР

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, принципові схеми та порівняльні оцінки статичних і динамічних характеристик відомих та запропонованих двотактних підсилювачів постійного струму.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі досліджено запропоновані методи структурно-функціональної організації двотактних симетричних підсилювачів постійного струму з покращеними статичними і динамічними характеристиками. Ці ППС використовуються для побудови високолінійних швидкодіючих аналогових вузлів багаторозрядних АЦП і ЦАП. Основні результати досліджень є такими:

1. Запропоновано метод структурно-функціональної організації двотактних підсилювачів постійного струму шляхом уведення до схеми двох симетричних контурів вибіркового зворотного зв'язку. Це дозволяє підвищити швидкодію, навантажувальну здатність, збільшити підсилення на каскад у 1.5–2 рази, а також – загальний коефіцієнт передачі при однаковому числі каскадів, порівняно з відомими двотактними аналогами. Запропонований підхід дозволяє досягти практично незалежності коефіцієнта передачі від R_n , значення якого може змінюватися на 2–3 порядки.

2. Удосконалено метод параметричної компенсації неідентичності статичних характеристик транзисторів проміжних каскадів двотактних ППС. Він дозволяє при значних розбіжностях (в 2–2,5 рази) коефіцієнтів підсилення по струму біполярних n - p - n та p - n - p транзисторів, зменшити похибку зміщення нуля схеми та забезпечити заданий режим по постійному струму проміжних підсилювальних каскадів, незважаючи на змінення умов навколишнього середовища та старіння.

3. Удосконалено математичні моделі передатних характеристик двотактного ППС. Вони дозволяють оцінювати коефіцієнти підсилення по струму, визначити значення статичних похибок, зокрема, похибки лінійності в діапазоні вхідних і вихідних сигналів, а також задати режим робочої точки двотактних симетричних ППС для досягнення мінімальних спотворень передатної характеристики. Удосконалено також математичні моделі динамічних характеристик, зокрема, АЧХ, ФЧХ, а також перехідної характеристики двотактного підсилювача постійного струму. Показано, що смуга повної неспотвореної потужності запропонованих пристроїв істотно (у 5 і більше разів) перевищує аналогічні характеристики одноктактних ППС.

4. Дістала подальшого розвитку математична модель нелінійних спотворень коефіцієнта передачі в діапазоні частот вхідного сигналу запропонованих ППС, яка дозволила здійснити порівняльний аналіз зі структурами ППС, побудованих за одноктактною структурою. Доповнено класифікацію двотактних підсилювачів постійного струму запропонованим класом двотактними симетричними структурами. Вона дозволяє систематизувати відомі і запропоновані підходи щодо побудови двотактних ППС і виділити найкращі схемні реалізації.

5. Здійснено порівняльний аналіз статичних і динамічних характеристик двотактних і одноктактних ППС, результати яких засвідчують, що перші мають кращі характеристики порівняно з відомими двотактними і одноктактними аналогами. Так, зокрема, швидкість наростання вихідного сигналу запропонованого пристрою у 6 разів вища, ніж у відомих одноктактних підсилювачів і становить понад 2500 В/мкс. Надано також рекомендації з проектування аналогових вузлів на базі двотактних підсилювачів постійного струму. Їх застосування дозволяє зменшити у 3–5 разів некориговану похибку інтегральної лінійності багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються або самокоригуються.

6. Проведене комп'ютерне моделювання підтвердило, що застосування двотактних симетричних структур дозволяє зменшити вимоги щодо допусків на розкид параметрів транзисторів, які використовуються в сигнальних колах двотактних підсилювачів, і при цьому відмовитися від процедур високоточного припасування параметрів або застосування прецизійних елементів. Вказана особливість дозволяє спростити технологію виготовлення таких підсилювачів та симетрувати фронти їх перехідної характеристики.

7. Розроблено і виготовлено аналогову частину макету 16-розрядного АЦП порозрядного наближення із ваговою надлишковістю, у якому використовуються аналогові вузли, зокрема, буферний підсилювач, підсилювач струмів для високоточного компаратора та перетворювач «струму–напруга» на базі двотактних симетричних ППС. При цьому надано

рекомендації із застосування сучасних програмних пакетів схемотехнічного моделювання для визначення статичних і динамічних характеристик двотактних симетричних підсилювачів постійного струму.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою досліджень опубліковано 46 наукових праць, основними з них є:

1. Моделі АЧХ і ФЧХ інтегральних біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / О. Д. Азаров, С. Ш. Каців, В. А. Гарнага та інш. // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – №4(28). – С. 5–15.

2. Гарнага В. А. Похибки лінійності двотактного симетричного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – №1 (11). – С. 124–132.

3. Гарнага В. А. Математичка модель передатної характеристики двотактного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – №2 (12). – С. 5–11.

4. Гарнага В. А. Методи задання робочих точок проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – №1(25). – С. 6–14.

5. Гарнага В. А. Методи симетрування коефіцієнтів передачі проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Електронне наукове фахове видання “Наукові праці Вінницького національного технічного університету”. – Вінниця, 2009. – №3. – [Електронний ресурс]. Режим доступу до журналу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.htm>.

6. Гарнага В. А. Нелінійні спотворення у двотактних симетричних підсилювачах постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – №2(14). – С. 26-33.

7. Пат. на винахід 91923 Україна, МПК (2006) H03K 5/22, H03F 3/26, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. А. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № a200900486 заявл. 26.07.2007 опубл. 10.09.2010, бюл. № 17.

8. Пат. на корисну модель 18466 Україна, МПК (2006) H03F3/26. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Лукашук О. О., Гарнага В. А., Решетнік О. О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200604582 заявл. 25.04.2006; опубл. 15.11.2006 Бюл. №11. – 7 с.

9. Пат. на корисну модель 18599 Україна, МПК (2006) H03F3/26. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Лукашук О. О., Гарнага В. А., Решетнік О. О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200605299 заявл. 15.05.2006; опубл. 15.11.2006 Бюл. №11. – 7 с.

10. Пат. на корисну модель 19370 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Решетнік О. О., Тарасова О. М.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200606551 заявл. 13.06.2006; опубл. 15.12.2006; Бюл. №12. – 7 с.

11. Пат. на корисну модель 19728 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Лукашук О. О., Богомолів С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200608586 заявл. 31.07.2006; опубл. 15.12.2006; Бюл. №12. – 7 с.

12. Пат. на корисну модель 21954 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Буферний елемент / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. А., Лукашук О. О., Решетнік О. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200611431 заявл. 30.10.2006; опубл. 10.04.2007; Бюл. №4. – 7 с.

13. Пат. на корисну модель 26495 Україна, МПК (2006) H 03 K 5/22, G 05 B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. А.,

Решетнік О.О., заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200705196 заявл. 11.05.2007; опубл. 25.09.2006 Бюл. №15. – 9 с.

14. Пат. на корисну модель 51958 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00, Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомоллов С. В, Гарнага В. А., Кириленко Д. О. // заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u201000906 заявл. 29.01.2010; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15. – 5 с.

15. Гарнага В. А. Вирівнювання коефіцієнтів передачі проміжних каскадів двотактних підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: міжнар. наук.-техн. конф., 22–24 квіт. 2009 р.: тези допов. – Вінниця, 2009. – С. 176–177.

16. Гарнага В. А. Моделі АЧХ і ФЧХ двотактних підсилювачів струму на основі схем заміщення транзисторів у форматі SPICE / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Теплицький М. Ю. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: міжнар. науч.-техн. конф., 19–21 трав. 2010 р.: тези допов. – Вінниця, 2010. – С. 360–361.

АНОТАЦІЯ

Гарнага В. А. Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2011.

Дисертацію присвячено аналізу методів структурно-функціональної організації двотактних підсилювачів постійного струму зі збільшеними характеристиками підсилення на каскад, навантажувальною здатністю та швидкодією. У роботі досліджуються запропоновані методи та структури відповідних двотактних схем. Наведено аналітичні вирази для статичної передатної характеристики та відповідних похибок лінійності, а також отримано співвідношення для визначення динамічних характеристик базових схем двотактних підсилювачів постійного струму. У роботі проведено порівняльне схемотехнічне моделювання відомих і запропонованих схем і показано, що двотактні симетричні ППС мають кращі статичні і динамічні характеристики порівняно з аналогами. Доведено, що застосування аналогових вузлів, побудованих на базі двотактних підсилювачів постійного струму, дозволяє суттєво покращити інтегральну лінійність перетворювачів форми інформації.

Ключові слова: вибірковий зворотний зв'язок, двотактний підсилювач постійного струму, двонаправлений відбивач струму.

АННОТАЦИЯ

Гарнага В. А. Двухтактные усилители постоянного тока для многоуровневых самокалибрующихся АЦП и ЦАП. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2011.

Диссертация посвящена разработке и анализу методов структурно-функциональной организации двухтактных усилителей постоянного тока с улучшенными характеристиками усиления на каскад, нагрузочной способностью и быстродействием. В работе исследованы методы построения усилителей постоянного тока с «микрорежимом» входного каскада и структуры, функционирующие в номинальном режиме с двухконтурными избирательными обратными связями, а также показаны соответствующие функциональные схемы. Приведены аналитические выражения для определения коэффициентов передачи предложенных двухтактных усилителей тока, а также соотношения для оценивания компенсационных токов, возникающих в избирательном контуре обратной связи.

Проанализированы традиционные подходы к построению усилителей постоянного тока на основе дифференциального входного каскада, выделены и прилюстрированы недостатки таких структур. Также в работе проанализированы структуры двухтактных усилителей постоянного тока как с противофазными каналами усиления, так и со сквозными усилительными каскадами, приведены их характеристики. Проведенный анализ позволил определить направление и сформулировать задачи исследований.

Выведены аналитические выражения для оценивания передаточной характеристики и соответствующих погрешностей линейности базовых схем двухтактных усилителей постоянного тока. Проанализированы факторы, которые больше всего влияют на статическую линейность двухтактного усилителя постоянного тока, и предложены подходы для уменьшения их воздействия.

В диссертационной работе оценен коэффициент нелинейных искажений двухтактного усилителя постоянного тока в диапазоне входного сигнала, а также приведены

аналитические соотношения для определения амплитуд гармонических составляющих выходного сигнала.

Предложены малосигнальные схемы замещения с управляемыми источниками тока основных усилительных каскадов на биполярных транзисторах. Получены аналитические соотношения для оценивания потенциальных динамических характеристик двухтактных усилителей с симметричной структурой, а также определены пути дальнейшего улучшения статических и динамических характеристик.

Получены математические модели переходных характеристик базовых схем двухтактных усилителей постоянного тока, позволяющие оценить время нарастания, симметрию переднего и заднего фронтов, а также время установления выходного сигнала при работе усилителей без обратной связи.

В работе проведено сравнительное схемотехническое моделирование известных и предложенных схем, а также показано, что двухтактные симметричные УПТ имеют лучшие статические и динамические характеристики по сравнению с аналогами.

Предложены высоколинейные аналоговые узлы для многоразрядных преобразователей формы информации, построенные на базе двухтактных симметричных усилителей постоянного тока. Доказано, что применение таких аналоговых узлов позволяет существенно улучшить интегральную линейность преобразователей формы информации.

Приведены рекомендации по использованию современных программ схемотехнического анализа для моделирования статических и динамических характеристик двухтактных усилителей постоянного тока, а также рекомендации по проектированию высоколинейных аналоговых узлов для многоразрядных АЦП и ЦАП на базе двухтактных усилителей постоянного тока. В работе приведены принципиальные схемы преобразователя «ток–напряжение», буферного усилителя и усилителя разностного тока с нелинейной обратной связью для высокочувствительного компаратора напряжений.

Результаты диссертационных исследований подтверждаются соответствующими актами внедрения.

Ключевые слова: выборочная обратная связь, двухтактный усилитель постоянного тока, двунаправленный отражатель тока.

ABSTRACT

Harnaha V. A. Direct current push-pull amplifier for multi bit ADC and DAC with self calibration. – A manuscript.

The thesis for a Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – Computer System and Components. Vinnitsia National Technical University. Vinnytsia – 2011.

The dissertation is devoted to methods of structural and functional organization of push-pull current amplifier which used selective feedback at amplifying stages that allow to obtain devices with increased performance on stage amplification, loading capacity and speed. In this research the methods and proposed structure of the push-pull circuits were described. Analytical expressions were obtained for evaluating the transmission characteristics and linearity errors of the relevant basic push-pull amplifier circuit DC. We also obtain relations for the potential of dynamic characteristics of push-pull amplifier with symmetrical structure. In this paper, a comparative circuit modeling of known and proposed schemes shows that two-stroke symmetrical DCA have better static and dynamic characteristics in comparison with analogues. The application of analog units built on amp push-pull DC to significantly improve the linearity of integrated information converters.

Keywords: selective feedback, direct current push-pull amplifier, directed current mirror.

Підписано до друку 03.02.2011 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2011-032
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59