

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

БОГОМОЛОВ СЕРГІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 681.3

**ВИСОКОЛІНІЙНІ АНАЛОГОВІ ПРИСТРОЇ НА БАЗІ ДВОТАКТНИХ СТРУКТУР  
ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
**Азаров Олексій Дмитрович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
директор Інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Філінюк Микола Антонович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури;

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Бех Олександр Дмитрович**,  
Інститут проблем математичних машин і систем НАН України,  
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться «22» грудня 2012 р. о 9<sup>30</sup> 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, ГНК.

Автореферат розісланий «15» листопада 2012 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Багаторозрядні аналого-цифрові системи, як різновид інформаційних систем, призначені для прямого і зворотного перетворення, вимірювання, реєстрування й цифрового опрацювання аналогових сигналів. Точність таких систем у значній мірі залежить від рівня похибок пристроїв, що входять до складу трактів перетворення аналогових сигналів. У більшості таких систем для підвищення точності використовуються принципи самокоригування та самокалібрування передатної характеристики цих трактів. Перевагою такого підходу є можливість забезпечення високих метрологічних характеристик при знижених вимогах до елементної бази, а також технології виготовлення. Проте, незважаючи на високі точносні характеристики, досягнуті в існуючих аналогових пристроях, існують потреби та резерви у напрямку їх вдосконалення. Відомо, що багаторозрядні аналого-цифрові системи доцільно розглядати як сукупність аналогових та цифрових пристроїв, що дозволяє роздільно проводити аналіз їх характеристик. Це, у свою чергу, дає можливість визначити системні вимоги щодо статичних та динамічних характеристик, а також шляхи їхнього вдосконалення. Необхідно відзначити, що АЦП і ЦАП у складі багаторозрядних аналого-цифрових систем застосовуються в поєднанні із іншими аналоговими вузлами. Відомо також, що не всі складові похибок піддаються коригуванню. Особливо складним є коригування похибок інтегральної лінійності. Тому, для цього поруч із структурними рішеннями необхідно використовувати спеціальні схемотехнічні підходи. Це, у свою чергу, потребує окремих досліджень їх метрологічних характеристик.

Розвиток технологій і можливість виготовлення на одному кристалі комплементарних як біполярних, так і польових транзисторів, стимулюють розробників до проектування двотактних структур і схем на їх базі. Відомо, що порівняно із одноктактними, двотактні підсилювачі постійного струму (ППС) мають більшу швидкість наростання вихідного сигналу, кращу лінійність передатної характеристики та ширшу смугу пропускання. Проте, в існуючих моделях таких схем має місце збільшення кількості проміжних каскадів, що виникає внаслідок наявності проблеми завдання робочих точок, а також залежність коефіцієнту підсилення схеми від опору навантаження.

У теперішній час моделі двотактних ППС виготовляють ряд провідних компаній у галузі електронних компонентів. Найвідомішими з них є: Analog Devices, National Semiconductor, Texas Instruments, Intersil.

У 70-80-х роках у колишньому СРСР було розроблено серію інтегральних ППС, зокрема, таких в яких використовується диференційний вхідний каскад і які були подібними до одноктактних американських аналогів. При цьому, слід відзначити таких науковців: Полоннікова Д. Е., Прокопенка Н. Н., Шила В. Л., Бахтіарова Г. Д., Малініна В. В., Школіна В. П., Войшвілла Г. В., та інших.

Реалізація двотактних структур ППС була здійснена в Україні у Вінницькому політехнічному інституті ще у 80-х роках ХХ ст. у науковій школі професора Азарова О. Д. У теперішній час продовжується активна робота у цьому напрямку. Підтвердженням цього слугує значна кількість публікацій, присвячених двотактним ППС та аналоговим пристроям на базі двотактних структур, як в Україні, так і за її межами.

Слід відзначити, що двотактні ППС мають специфічні похибки як масштабу, так і зсуву нуля, які досить складно зменшити схемотехнічним шляхом. Зменшення таких похибок в аналогових пристроях у складі багаторозрядних аналого-цифрових систем здійснюється з використанням процедури самокоригування та самокалібрування. Проте похибку інтегральної лінійності вказаними процедурами усунути складно.

Саме тому дослідження в напрямку побудови високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур для багаторозрядних аналого-цифрових систем структурно-схемотехнічними шляхами є актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження здійснювалося здобувачем протягом 2009-2012 років відповідно до наукового

напрямку кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, зокрема, у ході виконання науково-дослідних програм «Теорія побудови пристроїв та елементної бази прискореного високоточного аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0105U000664) та «Методи, пристрої та елементна база високопродуктивного, відмовостійкого аналого-цифрового перетворення (номер державної реєстрації 0111U001114).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є покращення статичних і динамічних характеристик аналогових пристроїв, побудованих на базі двотактних структур, а також аналого-цифрових систем, до складу яких вони входять.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Провести огляд існуючих методів побудови високолінійних аналогових пристроїв для багаторозрядних аналого-цифрових систем, а також проаналізувати похибки, що виникають у каналах аналого-цифрового і цифроаналогового перетворення.

2. Систематизувати складові коригованих і некоригованих статичних похибок каналів перетворення аналогових сигналів, а також розробити математичні моделі передатних характеристик транзисторних каскадів двотактних підсилювачів струму для високолінійних аналогових пристроїв, зокрема, з параметричним завданням робочих точок.

3. Проаналізувати запропоновані методи схемно-функціональної організації високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур, зокрема, високолінійних буферних пристроїв, а також перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга, побудованих на основі двотактних підсилювачів постійного струму.

4. Отримати аналітичні співвідношення для оцінювання нелінійних спотворень вхідних каскадів двотактних підсилювачів струму у частотній зоні для високолінійних аналогових пристроїв.

5. Розробити рекомендації щодо проектування аналогових пристроїв із двотактною структурою для багаторозрядних аналого-цифрових систем на прикладі аналізатора параметрів звукових трактів.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення електричних сигналів в електронних колах двотактних підсилювачів постійного струму, а також в аналогових пристроях, побудованих за двотактною структурою.

**Предметом дослідження** є статичні і динамічні похибки високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур та підсилювачів постійного струму, а також методи структурно-функціональної організації цих пристроїв, що забезпечують мінімізацію вказаних похибок.

**Методи дослідження:** основи теорії електронних схем та елементи теорії похибок для розроблення моделей статичних і динамічних похибок аналогових пристроїв, побудованих за двотактною структурою; математичний апарат спеціальних функцій, зокрема, повних еліптичних інтегралів першого та другого роду для оцінювання коефіцієнту нелінійних спотворень вхідних каскадів; основи теорії багаторозрядних ПФІ системного призначення для визначення коригованих і некоригованих складових похибок каналів АЦ і ЦА перетворення; комп'ютерне моделювання електронних схем із використанням сучасних інтегрованих пакетів прикладних програм схемотехнічного аналізу для дослідження статичних і динамічних характеристик аналогових пристроїв, побудованих за двотактною структурою.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Уперше отримано математичну модель статичної передатної характеристики вхідного двотактного каскаду підсилювача постійного струму, в якому по парафазних виходах застосовано керовані генератори струму, які є еквівалентами проміжних і вихідного каскадів. Це дає можливість у рамках вихідного діапазону, виділити й оцінити потенційні рівні статичних похибок, зокрема, похибку лінійності як у режимі малого, так і великого сигналів. Показано також, що для підвищення лінійності схеми доцільно зменшувати похибку зсуву нуля.

2. Подальшого розвитку дістали методи схемно-функціональної організації двотактних підсилювачів струму, а також блоків параметричного і компенсаційного коригування струму зсуву нуля, які на відміну від існуючих дають можливість задавати низький, середній та високий рівні вхідних опорів. Це дозволяє на системному рівні за рахунок зменшення потенціалу квазінуля мінімізувати некориговану складову похибки лінійності перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга, а також аналого-цифрових систем, до складу яких вони входять.

3. Подальшого розвитку дістали методи підвищення точності буферних пристроїв на базі двотактних структур, які на відміну від існуючих дають можливість нейтралізувати дії ряду негативних чинників, зокрема, тих, що впливають на параметри транзисторів ядра схеми під час зміни режимів роботи. Це дозволяє досягти високої лінійності передатної характеристики (похибка на рівні 0,0001%), а також істотно (на 1-2 порядки) зменшити струм зсуву нуля в діапазоні вхідного сигналу.

4. Подальшого розвитку дістали математичні моделі динамічних характеристик і нелінійних спотворень вхідних каскадів двотактних підсилювачів струму в діапазоні частот, в яких на відміну від існуючих використовується апарат повних еліптичних інтегралів I і II роду, а також уводиться ідеалізація проміжних і вихідного каскадів за допомогою заміни їх керованими генераторами струму. Це дозволяє вичленити й оцінити динамічні похибки виключно вхідних двотактних каскадів, враховуючи їх переважний вплив на характеристики схеми.

5. Подальшого розвитку отримали аналітичні вирази для передатних характеристик перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга, в яких враховано вхідні опори двотактних підсилювачів струму, а також інші чинники, що впливають на режими роботи схем. Це дало змогу досягти високої лінійності (похибка менше 0,0001%) без істотного збільшення коефіцієнта передачі і збереження високої швидкодії, а також зменшити похибку аналого-цифрових систем, компонентами яких вони є.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в ході досліджень наукові положення, зокрема, методи структурно-функціональної організації двотактних підсилювачів струму і буферних схем сприяли розробці і створенню високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур для багаторозрядних аналого-цифрових систем. Основними практичними результатами при цьому є такі:

1. Запропоновано рекомендації щодо проектування високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур, статичні і динамічні характеристики яких дозволяють використовувати їх у багаторозрядних (більше 14 двійкових розрядів) аналого-цифрових системах, зокрема, в аналізаторі параметрів звукових трактів.

2. Розроблено ряд практичних рішень, захищених патентами України, зокрема, функціональних і принципівих схем двотактних підсилювачів постійного струму, вхідний опір яких можна вибирати відповідно до системних вимог, а також блоків параметричного і компенсаційного коригування зсуву нуля, які в комплексі застосовуються при побудові високолінійних аналогових пристроїв.

3. Розроблено практичні схеми високолінійних буферних пристроїв на базі двотактних структур, побудованих на транзисторах різного типу провідності, статичні характеристики яких можуть бути неідентичними і для яких не вимагається їх припасування, а також пристрої параметричного коригування струму зсуву нуля.

4. Розроблено і виготовлено макет аналого-цифрової плати аналізатора параметрів звукових трактів. Доведено практичними дослідженнями, а також комп'ютерним моделюванням, що заміна аналогових вузлів, реалізованих із застосуванням серійних інтегральних схем, на запропоновані пристрої, дозволяє покращити статичні і динамічні характеристики системи.

Основні наукові результати та практичні рекомендації впроваджено на Державному підприємстві «Національна радіокомпанія України», зокрема, методи підвищення точності та швидкодії аналогових пристроїв на основі двотактних симетричних підсилювачів постійного

струму у високоточних багаторозрядних АЦП і ЦАП аналізатора параметрів звукових трактів АПЗТ-АЗ, а також у навчальний процес на кафедрі 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.** Всі результати наукових і експериментальних досліджень, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані і розроблені автором особисто. Особистий внесок здобувача у працях, написаних у співавторстві: [1] – аналітичні співвідношення, що описують коефіцієнти підсилення двотактного симетричного ППС, комп'ютерне моделювання передатної характеристики ППС із симетричною структурою; у [2] – структури двотактних симетричних ППС; у [3, 12] – структурна та схемна організація ВДК, аналітичні співвідношення, що описують статичні коефіцієнти передачі ВДК, комп'ютерне моделювання передатної характеристики ДППС; у [4] – побудовано еквівалентну схему ППС на базі схем заміщення біполярних транзисторів із керованими генераторами струму, здійснено комп'ютерне моделювання динамічних характеристик; [5, 14] – аналітичні співвідношення, що описують АЧХ і ФЧХ, а також побудова та комп'ютерне моделювання еквівалентної схеми ВДК; [6] – аналітичні співвідношення, що описують передатні характеристики та коефіцієнти передачі ВДК, а також методики визначення похибки лінійності; [7] – аналітичні співвідношення, що дозволяють оцінити рівень КНС вихідного сигналу ДППС із ВДК; [8] – аналітичні співвідношення, що описують передатні характеристики ПСН та ПНН із урахуванням параметрів підсилювача, зовнішніх кіл та опору навантаження, запропоновано структурно-функціональну організацію вхідних каскадів ДППС із низьким, середнім та високим опором; [9] – запропоновано методи побудови високолінійних буферних пристроїв на базі двотактних симетричних структур, а також структурно-функціональну організацію буферного пристрою із підвищеною навантажувальною здатністю; [10, 15] – аналітичні співвідношення, що описують похибки лінійності переданих характеристик ПСН та ПНН із різними рівнями деталізації, структурно-схемна організація високолінійного ДППС із автокоригуванням зсуву нуля; [11] – запропоновано підходи, щодо побудови аналогових пристроїв для багаторозрядних аналого-цифрових систем, таких, як: БН, ПСН, ПНН вихідний буфер для ЦАП; [16-24] – структурна та схемна організація підсилювальних каскадів аналогових вузлів, проведено комп'ютерне моделювання статичних і динамічних характеристик.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи було апробовано на 10 науково-технічних конференціях: I-III Міжнародній конференціях «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації», м. Вінниця, ВНТУ, 2007, 2009 та 2011 років; Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)»; Міжнародній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія 2010». – Вінниця, ВНТУ 2010; XXXVII-XL науково-технічних 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 у 2008-2011 роках.

**Публікації.** За результатами наукових досліджень опубліковано 134 наукових праці, з яких: 13 статей у наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань, 7 патентів на винахід, 104 патенти на корисну модель, 10 праць у збірниках матеріалів та тез доповідей наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, що містять 68 рисунків і 9 таблиць, висновків, списку використаних джерел (232 найменування) та додатку. Загальний обсяг дисертації складає 184 сторінок, з яких основний зміст викладено на 143 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок із науково-дослідними програмами, темами, сформульовано мету та завдання дослідження. Визначено 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 існуючих методів побудови високолінійних аналогових пристроїв, який показав, що статичні і динамічні характеристики аналого-цифрових систем у значній мірі визначаються характеристиками аналогових вузлів, які входять до їх складу. Узагальнену структуру аналогової частини багаторозрядної аналого-цифрової системи наведено на рис. 1. Вона містить: Д1, Д2, ..., Дn – давачі сигналів, П1, П2, ..., Пn – нормуючі підсилювачі, Ф, Ф1, Ф2, ..., Фn – фільтри, АК – аналоговий комутатор, БП – буферний пристрій, ПВЗ – пристрій вибірки-зберігання, АЦП та ПЦП – перетворювач струм-напруга та напруга-напруга, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій.

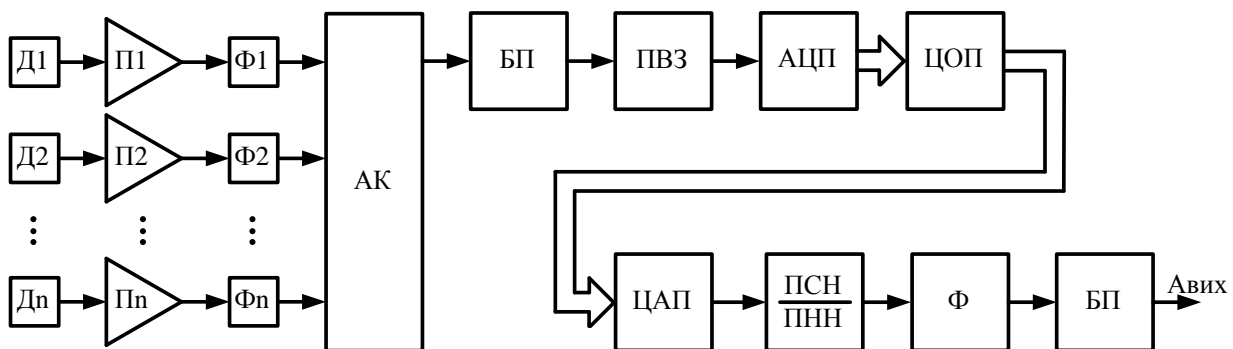


Рисунок 1 – Узагальнена структура аналогової частини багаторозрядної аналого-цифрової системи

Відомо, що існують три види похибок аналого-цифрового і цифроаналогового перетворення: зсув нуля (адитивна похибка), змінення масштабу (мультиплікативна похибка), нелінійність. Нелінійність у свою чергу ділиться на диференційну й інтегральну. Особливо складним є коригування інтегральної нелінійності, оскільки це вимагає застосування прецизійних компонентів, а також високоточних вимірювальних приладів.

Інтегральна нелінійність у значній мірі визначається нелінійністю передатних характеристик аналогових вузлів: підсилювачів, буферних пристроїв, а також перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга. Тому підвищення лінійності цих пристроїв дасть можливість підвищити точність усієї аналого-цифрової системи.

Традиційні підходи до побудови аналогових пристроїв на базі одноканальних ППС не завжди здатні забезпечити відповідний рівень точності та швидкодії, тому потрібен пошук нових підходів у рамках їх як структурної, так і схмотехнічної організації. При цьому ефективним є застосування двоканальних структур, що дозволяє будувати функціонально завершені лінійні аналогові вузли для низькочастотних аналого-цифрових систем такі, як двоканальні ППС, буферні пристрої, перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга. Використання у перетворювальних трактах низькочастотних аналого-цифрових систем аналогових пристроїв, побудованих на базі двоканальних ППС, дозволить зменшити похибку інтегральної лінійності, а застосування процедур самокоригування або самокалібрування дозволить додатково зменшити похибки нуля та масштабу.

Таким чином основним напрямком досліджень є створення аналогових пристроїв з покращеними статичними і динамічними характеристиками для низькочастотних аналого-цифрових систем із застосування нових підходів щодо їх структурної та схмотехнічної організації.

Проведений аналіз практичних результатів і тенденцій у галузі створення високолінійних пристроїв для систем вимірювання, реєстрації та опрацювання сигналів дозволив сформулювати задачі досліджень.

У **другому розділі** здійснено аналіз запропонованих структурних та схемних рішень щодо побудови вхідного двотактного каскаду (ВДК) із парафазними виходами. Показано, що незважаючи на використання транзисторів різного типу провідності з істотно неідентичними статичними характеристиками, коефіцієнти передачі по струму у протифазних в каналах підсилення будуть практично ідентичними.

Структурно-функціональну організацію ядра схеми ВДК із компенсацією зсуву нуля представлено на рис. 2, а. Основою його є вхідний двотактний підсилювач-фазорозщеплювач (ПФР). Режим по постійному струму емітерних виходів забезпечується каскодуванням (рис. 2, б). Для дослідження потенційних характеристики ПФР у схему введено керовані генератори струму F1 і F2, що дозволяють усунути вплив проміжних та вихідних каскадів двотактних ППС (рис. 2, в). Джерело струму  $I_{зс0}$  забезпечує компенсацію струму зсуву нуля.

Виведено аналітичні вирази для передатної характеристики ВДК у зоні великого сигналу, які мають вигляд:

$$I'_K = \left( \frac{1}{2} I_{вх} + \sqrt{\frac{I_{вх}^2}{4} + \frac{I_p^2}{(1+B') \cdot (1+B'')}} \right) \cdot (1+B') \cdot A'',$$

$$I''_K = \left( \frac{1}{2} I_{вх} - \sqrt{\frac{I_{вх}^2}{4} + \frac{I_p^2}{(1+B') \cdot (1+B'')}} \right) \cdot (1+B'') \cdot A',$$
(1)

де  $A', A'', B', B''$  – статичні коефіцієнти передачі транзисторів.

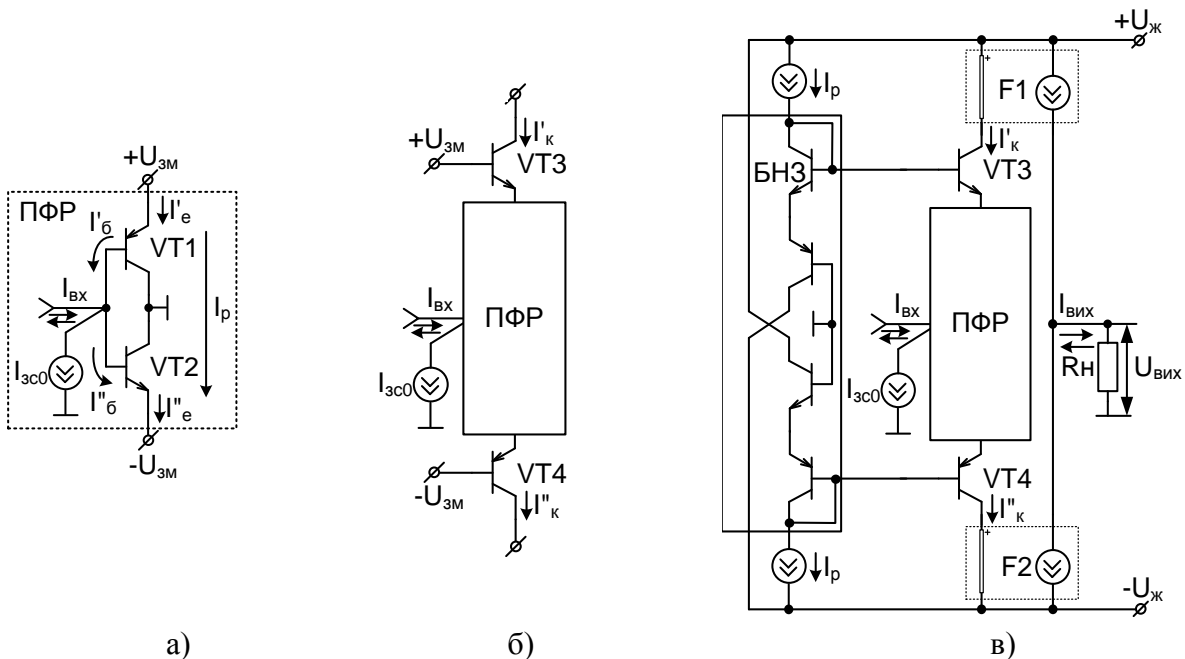


Рисунок 2 – Двотактний підсилювач струму: а) вхідний підсилювач-фазорозщеплювач з емітерними виходами; б) принцип каскодування виходів; в) схематична організація двокаскадного ДПС із використанням КГС



Показано, що завдяки введенню компенсації зміщення нуля ВДК, передатні характеристики по парафазних виходах будуть практично однакові, а графіки залежності  $I'_k = f(I_{\text{вх}})$  і  $I''_k = f(I_{\text{вх}})$  дзеркально відображаються відносно графіка загальної передатної характеристики (рис. 3).

При визначенні коефіцієнтів передачі у режимі малого сигналу, маємо:

$$k'_i = \chi' \cdot (1 + \beta') \cdot \alpha'',$$

$$k''_i = \chi'' \cdot (1 + \beta'') \cdot \alpha',$$

де  $\chi', \chi''$  – коефіцієнти розгалуження  $i_{\text{вх}}$  по верхньому і нижньому каналах відповідно,  $\beta', \beta'', \alpha', \alpha''$  – малосигнальні коефіцієнти передачі колекторного та емітерного струмів транзисторів VT1, VT2, VT3, VT4 відповідно.

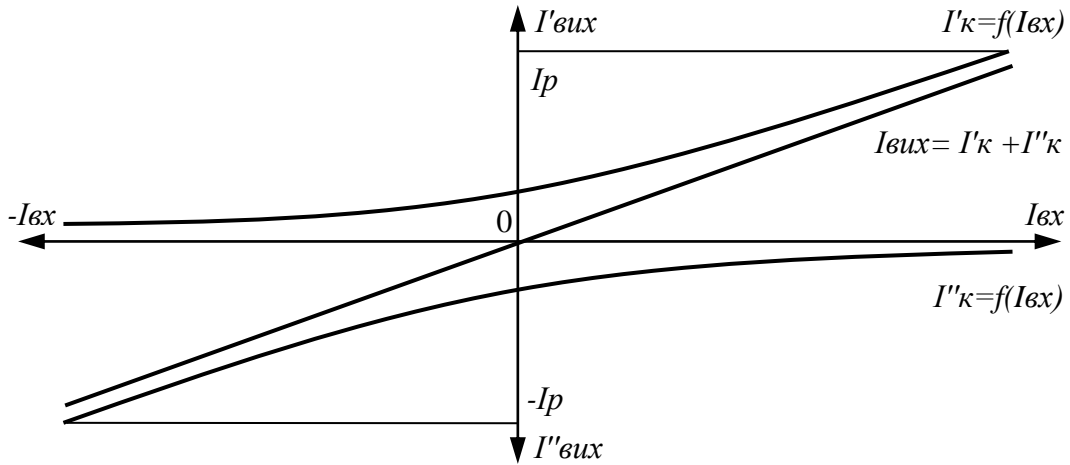


Рисунок 3 – Статичні передатні характеристики ВДК по парафазних і загальному виходах

На основі (1), отримуємо вирази, що описують передатну характеристику вхідного двотактного каскаду у малосигнальній зоні:

$$i'_k = \frac{\beta' \cdot \beta'' \cdot \alpha''}{\beta' + \beta''} \cdot i'_{\text{вх}},$$

$$i''_k = \frac{\beta' \cdot \beta'' \cdot \alpha'}{\beta' + \beta''} \cdot i''_{\text{вх}}.$$

Враховуючи, що  $B' \approx \beta'$ ,  $B'' \approx \beta''$ ,  $A' \approx \alpha'$ ,  $A'' \approx \alpha''$ , маємо співвідношення для передатної характеристики ВДК підсилювача струму із двотактною структурою:

$$I_H = \frac{\beta' \alpha'' + \beta'' \alpha'}{2} I_{\text{вх}} + (\beta' \alpha'' - \beta'' \alpha') \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{вх}}^2}{4} + \frac{I_P^2}{\beta' \cdot \beta''}}. \quad (2)$$

Для завдання робочих точок ядра треба додатково здійснити балансування режимів транзисторів VT1 і VT2 (див. рис. 2). Для цього використовується окремий генератор  $I_{\text{зс0}}$ , що забезпечує компенсацію струму зсуву нуля. Схемотехнічну реалізацію джерела струму  $I_{\text{зс0}}$  показано на рис. 4. Формування  $I'$ ,  $I''$  і  $I_{\text{зс0}}$  реалізується за параметричним принципом відбивачами струму BC', BC''.

При цьому:

$$I' = I_p \cdot B', \quad I'' = I_p \cdot B'',$$

$$I'_b = \frac{I'}{1+B'}, \quad I''_b = \frac{I''}{1+B''}, \quad I_{зс0} = I'_b - I''_b.$$

Враховуючи ці вирази, отримаємо:

$$I_{зс0} = I_p \cdot \frac{B'' - B'}{(1+B') \cdot (1+B'')} \approx I_p \cdot \frac{B'' - B'}{B'B''}.$$

При цьому необхідно відзначити, що на практиці, якщо не вживати додаткових заходів, ця збіжність буде на рівні 5%.

Нелінійність ВДК у значній мірі визначає нелінійність передатної характеристики всього ППС. Вона передається на вихід схеми через асиметричність «плечей» підсилювача.

При нульовому вхідному струмі маємо:

$$I'_n = (\beta' \alpha'' - \beta'' \alpha') \cdot \sqrt{\frac{I_p^2}{\beta' \cdot \beta''}} \Big|_{I_{вх} = 0}.$$

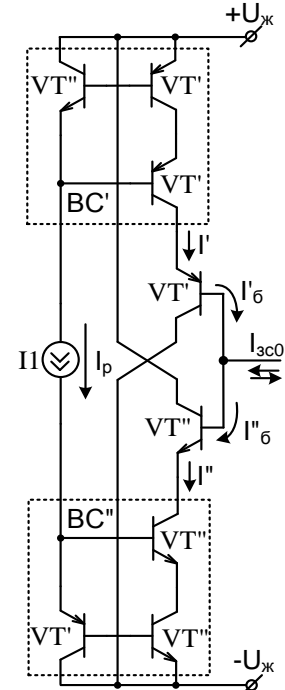


Рисунок 4 – Схемотехнічна реалізація джерела струму компенсації зсуву нуля

Приріст вихідного струму визначається у вигляді:

$$\Delta I_n = I_n(I_{вх}) - I'_n(I_{вх}).$$

Враховуючи (2), маємо:

$$\Delta I_n = \frac{\beta' \alpha'' + \beta'' \alpha'}{2} I_{вх} + (\beta' \alpha'' - \beta'' \alpha') \left( \sqrt{\frac{I_{вх}^2}{4} + \frac{I_p^2}{\beta' \cdot \beta''}} - \sqrt{\frac{I_p^2}{\beta' \cdot \beta''}} \right).$$

Графіки залежності  $\Delta I_n = f(I_{вх})$ , отримані шляхом комп'ютерного моделювання у програмах Mathcad 14 та Micro-Cap 9.0.3.0.1, зображено суцільною лінією на рис. 5. Пунктирною лінією зображено графік залежності  $I_{вих} = k_i \cdot I_{вх}$  для двотактного ППС з ідеальною передатною характеристикою.

Слід зазначити, що функції  $\Delta I'_k = f(I_{вх})$  та  $\Delta I''_k = f(I_{вх})$  мають дві зони:

- 1)  $|I_{вх}| \ll 2I_p$  – малосигнальна зона;
- 2)  $|I_{вх}| \leq 2I_p$  – зона великого сигналу.

У малосигнальній зоні приріст струму:  $\Delta I'_k \approx \Delta I''_k \approx \frac{1}{2} I_{вх}$ . У зоні великого сигналу  $\Delta I'_k \approx \Delta I''_k \approx \Delta \approx I_{вх} - I_p$ .

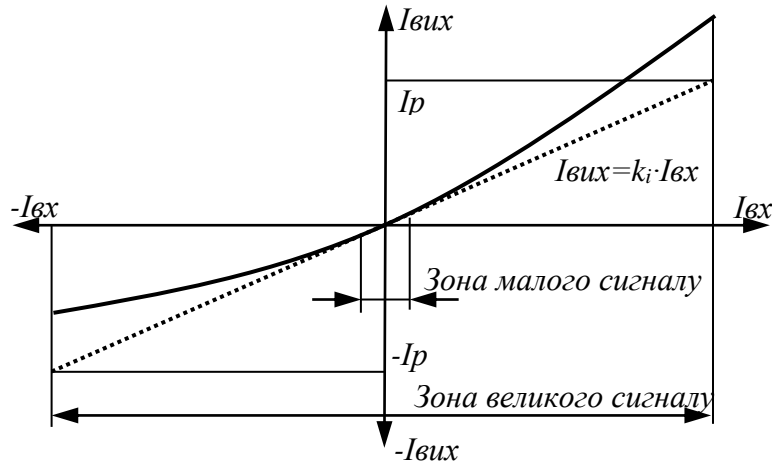


Рисунок 5 – Графік залежності  $\Delta I_n = f(I_{вх})$

Врахувавши (2) і умови наявності малосигнальної зони і зони великого сигналу, отримаємо:

$$\text{при } |I_{вх}| \ll 2I_p: \Delta I_n \approx \beta'' \alpha' I_{вх} - (\beta'' \alpha' - \beta' \alpha'') \cdot I_p,$$

$$\text{а при } |I_{вх}| \leq 2I_p: \Delta I_n \approx \beta' \alpha'' I_{вх} - (\beta'' \alpha' - \beta' \alpha'') \cdot I_p.$$

Це дозволяє оцінити рівень нелінійності передатної характеристики залежно від розбіжностей значень  $\beta$  для р-п-р і п-р-п транзисторів, як у зоні великого, так і малого сигналів.

Виведено також аналітичні співвідношення, що дозволяють оцінити рівень КНС вихідного сигналу ДППС із ВДК. Доведено, що їх рівень є достатньо низьким у досить широкому діапазоні частот, а тому достатньо враховувати дві перші парні гармоніки.

Доведено, що вираз для визначення нелінійних спотворень матиме вигляд:

$$\bar{K}_\Gamma = \frac{\Delta\beta}{16 \cdot \beta_{сер}} \cdot \frac{\tilde{I}_{вх}}{I} \left( 1 - \frac{3}{64} \cdot \frac{\tilde{I}_{вх}^2}{I^2} \right),$$

де  $\Delta\beta$  – абсолютна різниця між коефіцієнтами підсилення транзисторів,  $\beta_{сер}$  – середній коефіцієнт підсилення.

Для аналізу коефіцієнтів передачі побудовано малосигнальні еквівалентні схеми заміщення ВДК двотактних ППС, як у форматі SPICE, так і з представленням параметрів елементів у комплексній формі. Показано, що математичні моделі АЧХ і ФЧХ для цих схем, як для першого, так і для другого варіантів є досить складними для комп'ютерного моделювання і вимагають спрощення. Запропоновано складання математичних моделей АЧХ і ФЧХ здійснювати із застосуванням узагальнених виразів у вигляді комбінацій аналітичних співвідношень для коефіцієнтів передачі і фазових характеристик окремих каскадів. Це значно спрощує схемотехнічний аналіз статичних і динамічних характеристик за допомогою пакетів прикладних програм. Показано, що складання математичних моделей АЧХ і ФЧХ запропонованих ВДК, доцільно здійснювати із застосуванням векторного зображення

коефіцієнтів передачі по струму і фазових зсувів. При цьому, використовуючи теорему косинусів, виведено загальний коефіцієнт підсилення ВДК по струму у діапазоні частот вхідного сигналу:

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

де  $K_i'(f)$ ,  $K_i''(f)$  – коефіцієнти передачі по струму верхнього і нижнього каналів ВДК, які визначаються у вигляді:

$$K_i'(f) = \frac{\beta_{n-p-n}}{\beta_{p-n-p} + \beta_{n-p-n}} \cdot \frac{\beta_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT1}}\right)^2}} \cdot \frac{\alpha_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT2}}\right)^2}},$$

$$K_i''(f) = \frac{\beta_{p-n-p}}{\beta_{p-n-p} + \beta_{n-p-n}} \cdot \frac{\beta_{n-p-n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT2}}\right)^2}} \cdot \frac{\alpha_{p-n-p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{pT4}}\right)^2}}.$$

Загальна фазова характеристика тут задається співвідношенням

$$\varphi'(f) = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{K_{i1} \cdot \sin \left[ \Delta\varphi(f) \cdot \frac{180}{\pi} \right]}{\sqrt{K_{i1}^2(f) + K_{i2}^2(f) - 2 \cdot K_{i1}(f) \cdot K_{i2}(f) \cos \left[ (180 - \Delta\varphi(f)) \cdot \frac{\pi}{180} \right]}}.$$

Графічна інтерпретація коефіцієнтів передачі для вхідного двотактного каскаду із загальним колектором з каскодуванням по емітерах та відповідні динамічні характеристики наведено на рис. 6, а і б відповідно.

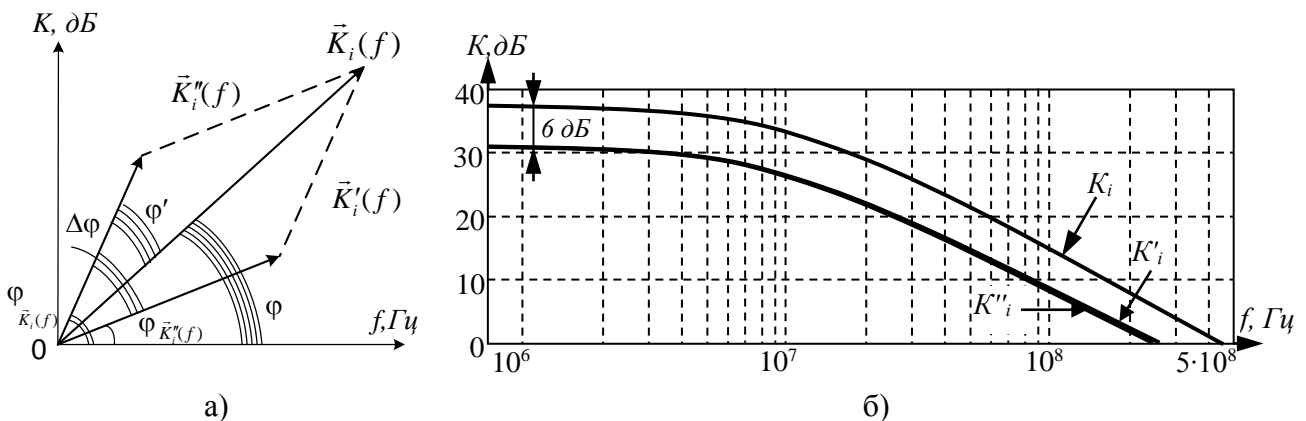


Рисунок 6 – Графічна інтерпретація функцій коефіцієнтів передачі для вхідного двотактного каскаду: а) векторна діаграма; б) АЧХ і ФЧХ

У **третьому розділі** проаналізовано запропоновані методи побудови високолінійних буферних пристроїв на базі двотактних симетричних структур. Показано, що застосування стабілізації напруг переходів колектор-емітер, дозволяє істотно (на  $1\div 2$  порядки) покращити метрологічні характеристики схем.

Для того, щоб забезпечити високу лінійність передатної характеристики ядра пропонується декілька варіантів їх схемно-функціональної організації (рис. 7):

1. Уведення до складу ядра каскодів, побудованих на польових транзисторах.
2. Побудова каскодів ядра на складених транзисторах Шиклаї.
3. Використання параметричної стабілізації напруг живлення транзисторних каскадів.

Здійснено порівняльний аналіз статичних похибок передатних характеристик відомих і запропонованих структур двотактних буферних пристроїв. Показано, що запропонований підхід дозволяє значно (на порядок і більше) зменшити похибку зсуву нуля і лінійності при збереженні заданого рівня швидкодії.

Розглянуто структурно-функціональну організацію високолінійного буферного пристрою з підвищеною навантажувальною здатністю (рис. 8). Доведено, що запропонований підхід дозволяє зменшити вихідний опір на  $2\div 3$  порядки.

Проаналізовано запропонований метод структурно-функціональної організації двотактних ППС, в якому використовуються входні каскади із низьким, середнім та високим входними опором (рис. 9). Це дозволяє будувати ПСН та ПНН із заданими характеристиками перетворення.

Виведено аналітичні співвідношення, що дозволяють описати передатні характеристики ПСН та ПНН із урахуванням параметрів підсилювача, зовнішніх кіл та опору навантаження. Отримано вирази, що дозволяють визначити похибки лінійності передатних характеристик ПСН та ПНН із урахуванням параметрів внутрішніх елементів підсилювача, зовнішніх кіл та опору навантаження. Це дає можливість точніше оцінити значення похибок передатних характеристик.

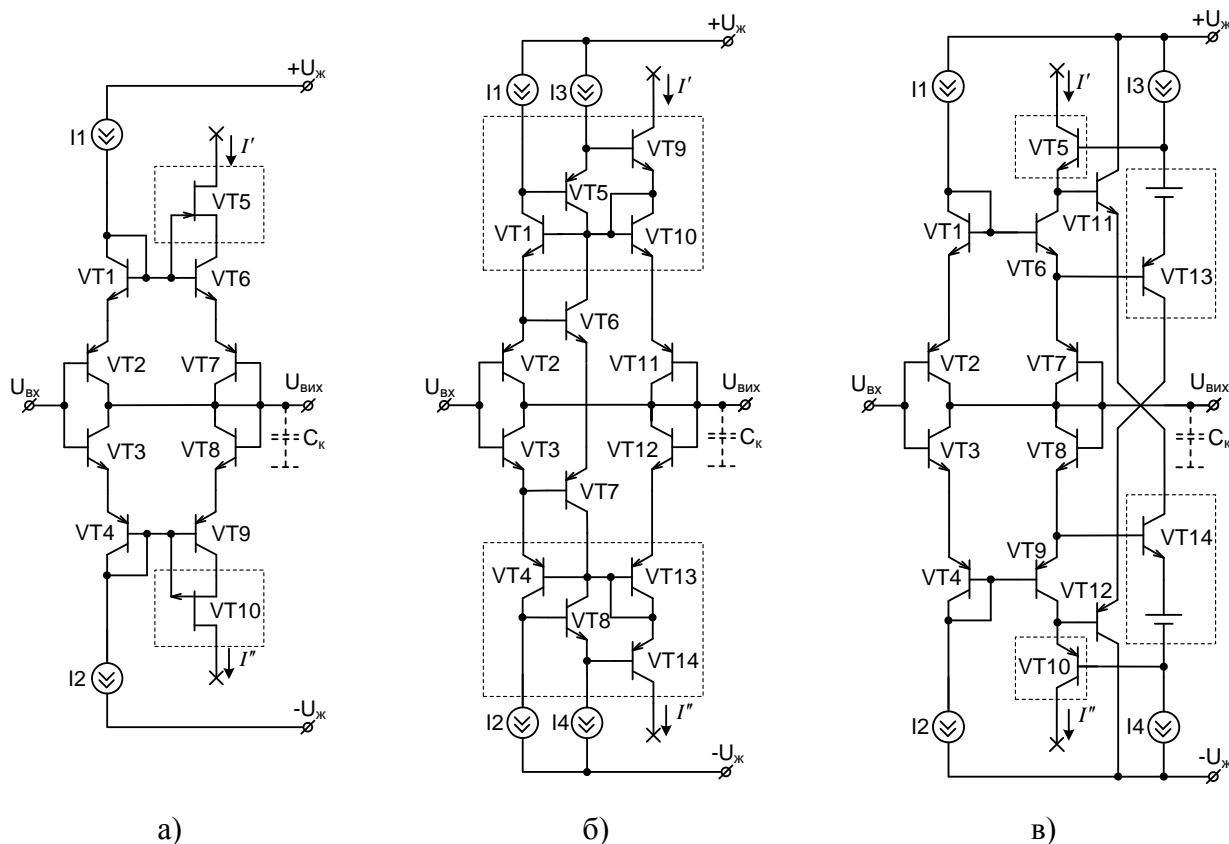


Рисунок 7 – Схемно-функціональна організація входних кіл високолінійних буферних пристроїв: а) з каскодами на польових транзисторах; б) з відбивачами струмів на складених транзисторах Шиклаї; в) з параметричною стабілізацією напруг колектор-емітер вихідних каскадів

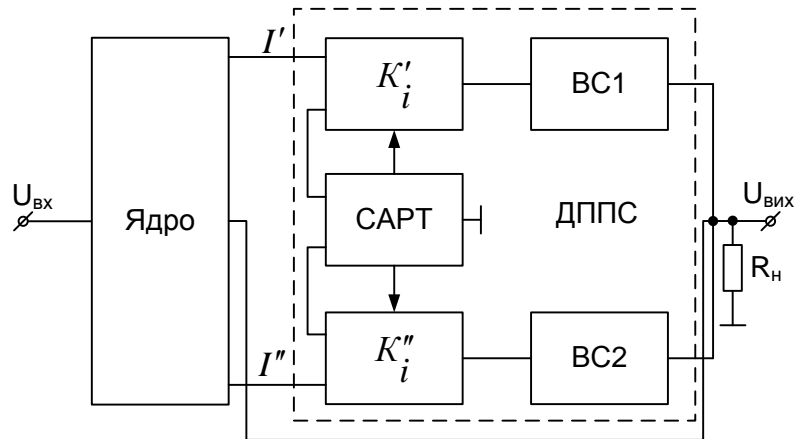


Рисунок 8 – Узагальнена структурно-функціональна схема високолінійного буферного пристрою на базі двотактної симетричної структури

Досліджено вплив параметрів зовнішніх і внутрішніх кіл підсилювача та опору навантаження на похибки високолінійних ПСН та ПНН. Доведено, що лінійність ДПС можна покращити, використовуючи входні каскади із низьким входним опором.

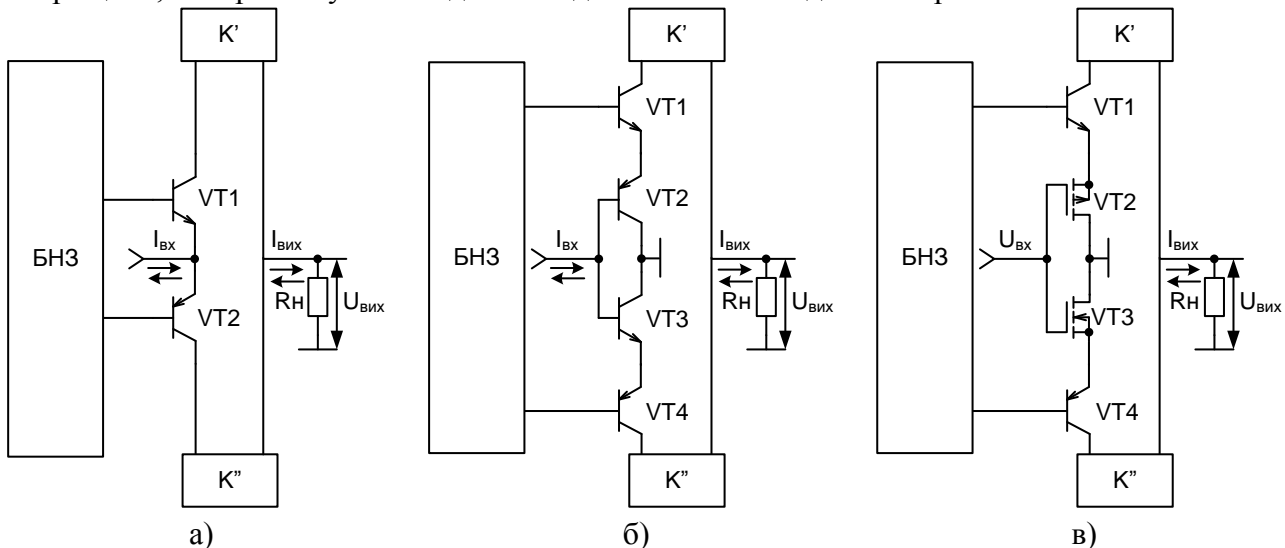


Рисунок 9 – Структурно-функціональна організація входних каскадів ДППС із: а) низьким; б) середнім; в) високим входними опором

У **четвертому розділі** розглянуто структурну і схемну організацію та проаналізовано системні вимоги щодо статичних і динамічних характеристик аналогових вузлів для аналізатора параметрів звукових трактів (АПЗТ). Показано, що високі показники точності можуть бути досягнуті лише при низькому рівні некоригованих похибок аналогових пристроїв, що входять до складу системи. Досягнення цієї умови в розроблених пристроях здійснюється структурним і схемотехнічним шляхом.

Розроблено структурні і принципові схеми аналогових пристроїв для багаторозрядних аналого-цифрових систем, зокрема: двотактних підсилювачів постійного струму, високолінійних перетворювачів струм-напруга і напруга-напруга з параметричним коригуванням зсуву нуля, буферних пристроїв напруги з двотактною організацією, підсилювачів різницевого струму для високочутливого компаратора, які захищено патентами України. Використання запропонованих високолінійних і швидкодіючих схем аналогових пристроїв дозволить покращити їх статичні і динамічні характеристики (на 1-2 порядки) та багаторозрядних аналого-цифрових систем (у 2-5 разів) у цілому.

Розроблено і виготовлено аналогову частину АПЗТ та запропоновано рекомендації щодо використання високолінійних аналогових вузлів, побудованих за двотактною структурою у його складі. Це дозволило досягти високого рівня точності роботи пристрою у процесі експлуатації. Зовнішній вигляд АПЗТ і аналого-цифрової плати наведено на фотографіях на рис. 10 та рис. 11 відповідно.



Рисунок 10 – Зовнішній вигляд АПЗТ

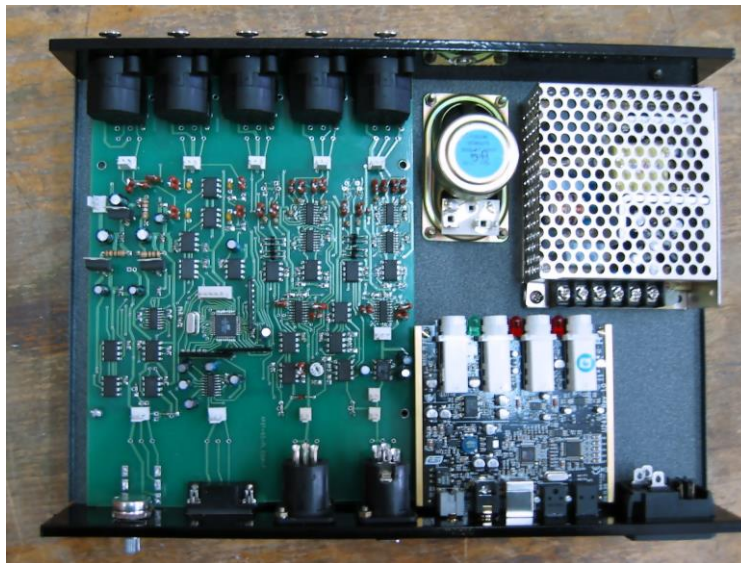


Рисунок 11 – Плата аналого-цифрової частини АПЗТ

Використання АПЗТ для аналізу параметрів звукових трактів дозволяє замінити більше 15 звичайних вимірювальних приладів, а саме вольтметр, аналізатор спектру, вимірювач АЧХ, низькочастотний генератор, вимірювач частот та інші.

У додатках наведено документи, що підтверджують впровадження результатів наукових досліджень.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано і досліджено підходи щодо побудови високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур із покращеними статичними і динамічними характеристиками. Ці аналогові пристрої використовуються для побудови багаторозрядних АЦП і ЦАП та багаторозрядних аналого-цифрових систем на їх основі. Основні результати досліджень є такими:

1. Здійснено аналіз методів побудови відомих високолінійних аналогових пристроїв для багаторозрядних аналого-цифрових систем, а також похибок, що виникають у каналах аналого-цифрового і цифроаналогового перетворення. Це дозволило сформулювати напрям і задачі дослідження.

2. Уперше отримано аналітичні співвідношення для статичної передатної характеристики вхідних каскадів двотактних підсилювачів струму, що дало змогу оцінити рівень похибок лінійності цих каскадів, а також підсилювачів у цілому.

3. Подальшого розвитку отримали математичні моделі динамічних характеристик вхідних каскадів двотактних підсилювачів струму, зокрема АЧХ і ФЧХ, що дозволило оцінити нелінійні спотворення передатної характеристики у діапазоні частот і довести можливість мінімізації похибки лінійності.

4. Подальшого розвитку отримали методи схемно-функціональної організації високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур, зокрема: двотактних підсилювачів постійного струму, високолінійних буферних пристроїв з двотактною організацією, перетворювачів струм-напруга і напруга-напруга, підсилювачів різницевого струму для високочутливого компаратора, що дозволило мінімізувати похибки лінійності передатної характеристики (у 3-5 разів).

5. Подальшого розвитку отримав метод параметричної компенсації зсуву нуля високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур, зокрема: двотактних підсилювачів постійного струму, високолінійних перетворювачів струм-напруга і напруга-напруга, буферних пристроїв напруги із двотактною організацією, підсилювачів різницевого струму для високочутливого компаратора, що дозволяє зменшити загальну похибку перетворення (у 5-10 разів).

6. Надано рекомендації з проектування аналогових пристроїв на базі двотактних структур. Застосування запропонованих аналогових вузлів дозволяє зменшити у 2-5 разів некориговану похибку інтегральної лінійності багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються або самокоригуються, а також багаторозрядних аналого-цифрових систем у цілому.

7. Розроблено і виготовлено аналогову частину аналізатора параметрів звукових трактів, а саме: підсилювачі постійного струму, високолінійні буферні пристрої, перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних структур. Досліджено статичні і динамічні характеристики розроблених пристроїв шляхом як комп'ютерного моделювання, так і макетування, що підтвердило достовірність основних наукових положень.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою досліджень опубліковано 134 наукових праці, основними з них є:

1. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму : [ Електронний ресурс ] / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, В. А. Гарнага, О. О. Решетнік. // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – №1. – С. 1-8. – Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html>.

2. Богомолів С. В. Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, В. А. Гарнага. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – №4. – С. 20-24.

3. Богомолів С. В. Схемна організація вхідного комплементарного каскаду двотактного симетричного підсилювача постійного струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В. // Проблеми інформатизації та управління. Національний авіаційний університет. – 2009. – №3(27). – С. 6-13. – ISSN 2073-4751.

4. Моделі АЧХ і ФЧХ інтегральних біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, С. Ш. Качив та інш. // Проблеми інформатизації та управління. Національний авіаційний університет. – 2009. – №4(28). – С. 5–15. – ISSN 2073-4751.

5. Богомолів С. В. Динамічні характеристики вхідного комплементарного каскаду двотактного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, В. А. Гарнага. // Проблеми інформатизації та управління. Національний авіаційний університет. – 2010. – №3(31). – С. 5–13. – ISSN 2073-4751.

6. Богомолів С. В. Похибки лінійності передатної характеристики вхідного каскаду двотактних підсилювачів струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, В. Я. Стейкскал // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. – №3 (19). – С. 4-12. – ISSN 1999-9941.



7. Богомолов С. В. Нелінійні спотворення вхідних каскадів двотактних підсилювачів струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, І. В. Абрамчук. // Проблеми інформатизації та управління. Національний авіаційний університет. – 2011. – №2(34). – С. 6–14. – ISSN 2073-4751.

8. Богомолов С. В. Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №2 (21). – С. 4-11.

9. Богомолов С. В. Прецизійні буферні пристрої на базі двотактних симетричних структур / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №3 (22). – С. 4-12. – ISSN 1999-9941.

10. Богомолов С. В. Високочастотні аналогові пристрої для багаторозрядних аналого-цифрових систем / Азаров О. Д., Богомолов С. В. // Проблеми інформатизації та управління. Національний авіаційний університет. – 2011. – №4(36). – С. 6-18. – ISSN 2073-4751.

11. Богомолов С. В. Похибки лінійності прецизійних перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – №1 (23). – С. 24-30. – ISSN 1999-9941.

12. Богомолов С. В. Принципи схемотехнічної організації вхідних комплементарних підсилювальних каскадів для підсилювачів постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009): міжнар. наук.-техн. конф., 8-10 жовт. : тези допов. – Вінниця, 2009. – С. 67.

13. Богомолов С. В. Схемна організація вхідного комплементарного каскаду двотактного симетричного підсилювача постійного струму / С. В. Богомолов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: міжнар. наук.-техн. конф.; 19–21 трав. : тези допов. – Вінниця, 2010. – С. 397-398.

14. Богомолов С. В. АЧХ і ФЧХ вхідного комплементарного каскаду двотактного підсилювача постійного струму / О. Д. Азаров, С. В. Богомолов. // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: III міжнар. наук.-техн. конф., 20-22 квіт. : тези допов. – Вінниця, 2011. – С. 212-213.

15. Богомолов С. В. / Прецизійні аналогові вузли на базі підсилювачів струму С. В. Богомолов. // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації: III міжнар. наук.-техн. конф., 20-22 квіт. : тези допов. – Вінниця, 2011. – С. 226.

16. Пат. на винахід 91923 Україна, МПК (2009) Н 03 К 5/22, Н 03 F 3/26. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомолов С. В., Гарнага В. А. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № а200900486 ; заявл. 23.01.2009 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17.

17. Пат. на винахід 92963 Україна, МПК (2009) Н 03 F 3/34. Буферний каскад / Азаров О. Д., Богомолов С. В. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № а200903013 ; заявл. 30.03.09 ; опубл. 27.12.10, Бюл. № 24.

18. Пат. на винахід 96650 Україна, МПК Н 03 К 5/22 (2006.01), G 05 В 1/01(2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомолов С. В. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № а201002056 ; заявл. 25.02.2010 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.

19. Пат. на корисну модель 21954 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22. Буферний елемент / Азаров О. Д., Богомолов С. В., Гарнага В. А., Лукашук О. О., Решетнік О. О. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200611431; заявл. 30.10.06 ; опубл. 10.04.07, Бюл. № 4.

20. Пат. на корисну модель 25471 Україна, МПК (2006) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Вхідний пристрій схеми порівняння струмів / Азаров О. Д., Кадук О. В., Богомолов С. В., Гарнага В. А., Решетнік О. О. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200703563 ; заявл. 02.04.2007 ; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12.

21. Пат. на корисну модель 41316 Україна, МПК (2009) Н 03 F 3/26. Підсилювач постійного струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Крупельницький Л. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200900492; заявл. 23.01.2009; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9.

22. Пат. на корисну модель 49578 Україна, МПК (2009) Н 03 F 3/26. Буферний каскад / Азаров О. Д., Ходжаніязов І. К., Богомолів С. В., Мельник С. О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200912325; заявл. 30.11.09; опубл. 26.04.10, Бюл. № 8.

23. Пат. на корисну модель 51014 Україна, МПК (2009) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Буферний каскад / Азаров О. Д., Дудник О. В., Богомолів С. В., Кадук О. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u201000934; заявл. 29.01.10; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.

24. Пат. на корисну модель 69743 Україна, МПК (2012.01) Н 03 К 5/22 (2006.01), G 05 В 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / Азаров О. Д., Богомолів С. В., Росощук А. В.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u201112877; заявл. 02.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

### АНОТАЦІЯ

Богомолів С. В. Високолінійні аналогові пристрої на базі двотактних структур для багаторозрядних аналого-цифрових систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2012.

Дисертацію присвячено побудові високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних структур для багаторозрядних аналого-цифрових систем. У роботі досліджуються запропоновані методи та структури відповідних двотактних схем. Наведено аналітичні співвідношення для статичної передатної характеристики вхідних двотактних каскадів та похибок лінійності, а також математичні моделі їх динамічних характеристик. У роботі проведено порівняльний аналіз існуючих і запропонованих методів побудови високолінійних аналогових пристроїв для багаторозрядних аналого-цифрових систем, і показано, що двотактні підсилювачі та пристрої на їх основі мають кращі характеристики порівняно з відомими аналогами. Доведено, що застосування таких аналогових пристроїв, дозволяє зменшити похибку інтегральної лінійності багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються або самокоригуються, а також багаторозрядних аналого-цифрових систем в цілому.

Ключові слова: двотактна структура, двотактний підсилювач постійного струму, вхідний двотактний каскад, високолінійні аналогові пристрої, багаторозрядна аналого-цифрова система.

### АННОТАЦИЯ

Богомолів С. В. Высоколинейные аналоговые устройства на базе двухтактных структур для многоразрядных аналого-цифровых систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2012.

Диссертация посвящена разработке и анализу методов структурно-функциональной организации высоколинейных аналоговых устройств на базе двухтактных структур для многоразрядных аналого-цифровых систем. В работе исследуются предложенные методы и структуры аналоговых устройств, в частности: двухтактных усилителей постоянного тока, высоколинейных преобразователей ток-напряжение и напряжение-напряжение, буферных устройств напряжения с двухтактной организацией, усилителей разностных токов для

высококочувствительного компаратора с минимизированными погрешностями линейности передаточной характеристики.

Приведены аналитические соотношения для статической передаточной характеристики входных каскадов двухтактных усилителей тока, которые позволяют оценить уровень погрешностей линейности этих каскадов, а также усилителей в целом. Получены математические модели динамических характеристик входных каскадов, в частности АЧХ и ФЧХ, позволяющий оценить нелинейные искажения передаточной характеристики в диапазоне частот.

Проведен сравнительный анализ существующих и предлагаемых методов построения высоколинейных аналоговых устройств для многоразрядных аналого-цифровых систем, результаты которого свидетельствуют, что двухтактные симметричные усилители и устройства на их основе имеют лучшие характеристики по сравнению с известными двухтактными и одноктактными аналогами. Доказано, что применение таких аналоговых устройств, позволяет уменьшить погрешность интегральной линейности многоразрядных АЦП и ЦАП, самокалибрирующихся или самокорректирующихся, а также многоразрядных аналого-цифровых систем в целом.

Приведен метод параметрической компенсации смещения нуля высоколинейных аналоговых устройств на базе двухтактных структур, что позволяет уменьшить общую погрешность преобразования. Предложены методы схемно-функциональной организации высоколинейных аналоговых устройств на базе двухтактных структур, в частности высоколинейных буферных устройств, преобразователей ток-напряжение и напряжение-напряжение.

Разработано и изготовлено аналоговую часть анализатора параметров звуковых трактов, а именно: усилители постоянного тока, высоколинейные буферные устройства, преобразователи ток-напряжение и напряжение-напряжение на базе двухтактных структур.

Результаты диссертационных исследований подтверждаются соответствующими актами внедрения.

Ключевые слова: двухтактная структура, двухтактный усилитель постоянного тока, входящий двухтактный каскад, высоколинейные аналоговые устройства, многоразрядная аналого-цифровая система.

## ABSTRACT

Bogomolov S. V. High-linear analog devices based on push-pull structures for multibit analog-digital systems. – Manuscript.

The thesis for a Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – Computer System and Components. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2012.

The dissertation is devoted to construction high-linear analog devices based on push-pull structures for multibit analog-digital systems. The methods and proposed structure appropriate push-pull circuits were described. Analytical relations for the static transfer characteristic input push-pull stages and linearity errors, as well as mathematical models of dynamic characteristics were obtained. In this paper, a comparative analysis of the existing and proposed methods of construction precision analog devices for multibit analog-digital systems, and show that the push-pull amplifiers and devices based on them have a better performance compared to the known analogs. The application of such analog devices, allows decreasing the integral linearity error multibit ADC and DAC and multibit analog-digital systems in general.

Keywords: push-pull structure, direct current push-pull amplifier, input push-pull stage, precision analog devices, multibit analog-digital system.

Підписано до друку 09.11.2012 р. Формат 29.7×42 ¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2012-172  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59