

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

ТЕПЛИЦЬКИЙ МИХАЙЛО ЮХИМОВИЧ



УДК 621.375:004.3

**ДВОТАКТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БАЛАНСНИМ  
ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ДЛЯ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ  
ЦАП**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця - 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор, заслужений працівник освіти України  
**Азаров Олексій Дмитрович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
декан факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Багацький Валентин Олексійович,**  
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України,  
м. Київ, провідний науковий співробітник відділу перетворювачів форми інформації;

кандидат технічних наук, доцент  
**Мичуда Леся Зиновіївна,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри автоматизації теплових та хімічних процесів.

Захист відбудеться «03» 07 2015 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

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

Автореферат розісланий «29» травня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С. М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

Останнім часом в комп'ютерних системах збирання і кодування даних, цифрового опрацювання сигналів, у тестових вимірювальних і комунікаційних системах, спеціалізованих процесорах цифрового оброблення аналогових сигналів активно застосовуються методи прямого цифрового синтезу аналогових сигналів (direct digital synthesis – DDS). Ці методи також використовуються в медичних засобах візуалізації, оптичних комунікаційних мережах, радарях, сонарах та фазованих антенних решітках, в оптичних каналах із розділенням по довжині хвилі, в опорних генераторах із фазовим автоналаштуванням частоти, в генераторах сигналів для аналізу мереж, а також у вузлах передавання даних по оптоволоконному кабелю у пристроях височастотного зв'язку.

Водночас слід зазначити, що статичні і динамічні характеристики сигналів, що синтезуються, визначаються у першу чергу аналогічними характеристиками ЦАП паралельної дії, а також їх вихідних підсилювачів. При цьому використовуються багаторозрядні ЦАП (12-18 розрядів), а також швидкодіючі підсилювачі постійного струму (ППС), які мають не тільки широку смугу пропускання на рівні десятків і сотень МГц, а іноді і ГГц, а також і високу швидкість наростання вихідного сигналу ( $10^3$ – $10^4$  В/мкс) та широку смугу повної неспотвореної потужності. Слід додати, що вказані підсилювачі повинні мати також низьку адитивну похибку, а також високу лінійність статичної передатної характеристики (похибка лінійності на рівні  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  %). Такі статичні і динамічні характеристики можуть мати двотактні підсилювачі постійного струму (ДППС). Серійні моделі деяких вказаних пристроїв випускаються фірмами Analog Devices, Texas Instruments, Intersil, Linear Technology, Cirrus Logic, ON Semiconductor та ін.

Варто зазначити, що можливості покращення точносних і швидкісних характеристик існуючих ДППС далеко не вичерпано. Так, у ВНТУ з дев'яностих років минулого століття під керівництвом професора Азарова О. Д. здійснюються дослідження та розробки швидкодіючих високолінійних ДППС із балансовим зворотним зв'язком. Вказані пристрої цілком можуть застосовуватися у системах прямого цифрового синтезу. Водночас, ці дослідження є досить специфічними й оригінальними і до того ж недостатньо розкритими в науково-технічній літературі, тому тема дисертаційної роботи є актуальною.

### Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, результати яких показано в цій дисертаційній роботі, проводилися здобувачем протягом 2010-2014 років згідно з науковим напрямком кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, а також як виконавцем науково-дослідних програм «Методи, пристрої та елементна база високопродуктивного, відмовостійкого аналого-цифрового перетворення» (номер державної реєстрації 0111U001114)

та «Компоненти та пристрої системних багаторозрядних перетворювачів форми інформації з ваговою надлишковістю» (номер державної реєстрації 0113U003137). Вказані дослідження виконувались також в рамках функціонування спільної науково-дослідної лабораторії відмово стійких 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 задачі дослідження.** Метою досліджень є покращення статичних і динамічних характеристик ДППС для багаторозрядних ЦАП паралельної дії шляхом застосування запропонованих методів структурно-функціональної організації із використанням балансного зворотного зв'язку для підвищення швидкодії підсилювачів та лінійності їх передатної характеристики, а також зменшення адитивної похибки.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати відомі методи побудови підсилювачів постійного струму та їх характеристики для багаторозрядних ЦАП паралельної дії, а також їх переваги і недоліки. Визначити перспективні напрямки застосування цих пристроїв, зокрема, для прямого цифрового синтезу аналогових сигналів.

2. Удосконалити існуючий метод структурно-функціональної організації ДППС, який би дозволив покращити їх швидкодію, зокрема, швидкість наростання та смугу повної неспотвореної потужності, а також лінійність передатної характеристики.

3. Запропонувати й проаналізувати новий метод коригування вхідного струму зсуву нуля ДППС і його температурного дрейфу, а також пристрої, що його реалізують. Крім того, запропоновані ДППС повинні мати можливість використовуватися не тільки для виконання функції підсилення потужності, а і як активний фільтр низьких частот замість пасивного в задачах прямого цифрового синтезу.

4. Скласти математичні моделі статичної передатної характеристики, а також малосигнальних коефіцієнтів передачі по струму ДППС із балансним зворотним зв'язком. Передбачити під час вибору і моделювання вказаних пристроїв використання керованих і функціональних генераторів струму з метою порівняння параметрів ідеальних і реальних варіантів схем.

5. Запропонувати і вибрати функціональні і принципіві схеми ДППС для багаторозрядних ЦАП із найкращими статичними і динамічними характеристиками, зокрема, з максимальною швидкістю наростання вихідної напруги, мінімальними похибками лінійності та адитивною похибкою.

6. Промоделювати і проаналізувати динамічні характеристики запропонованих ДППС такі як: АЧХ, ФЧХ, швидкість наростання вихідної напруги та смуга повної неспотвореної потужності, а також коефіцієнт гармонік вихідного сигналу в діапазоні частот.

7. Викласти рекомендації щодо практичної реалізації швидкодіючих ДППС із високою лінійністю та низькими адитивними похибками і мінімальним температурним дрейфом, які доцільно було б використовувати у

багаторозрядних ЦАП, а також спеціалізованих системах прямого цифрового синтезу, що містять їх у своєму складі.

8. Розглянути приклади застосування розроблених ДППС для багаторозрядних ЦАП паралельної дії у складі аналізатора параметрів звукових трактів (АПЗТ). Оцінити характеристики розглянутого пристрою.

*Об'єктом досліджень* є процес функціонування запропонованих швидкодіючих двотактних підсилювачів постійного струму для багаторозрядних ЦАП паралельної дії.

*Предметом досліджень* є методи структурно-функціональної організації, двотактних підсилювачів постійного струму та пристрої, що їх реалізують.

**Методи дослідження** базуються на використанні: теорії лінійних інтегральних схем та підсилювачів для аналізу можливості покращення статичних і динамічних характеристик двотактних підсилювачів постійного струму; теорії електричних і магнітних кіл, а також теорії систем зі зворотним зв'язком для розроблення моделей статичної передатної характеристики та моделей малосигнальних коефіцієнтів передачі в діапазоні частот; комп'ютерного моделювання для аналізу параметрів запропонованих схем підсилювачів та оцінювання можливості їх застосування в системах прямого цифрового синтезу, а також для перевірки отриманих теоретичних положень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

1) вперше запропоновано новий метод коригування вхідного струму зсуву нуля та зменшення рівня його температурного дрейфу для швидкодіючих високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму шляхом застосування структурної надлишковості у вигляді давача струму зсуву нуля, а також блока, який генерує компенсаційний струм. Це дозволяє істотно (у 10-20 разів) зменшити адитивну похибку підсилювача, а також знизити його температурний дрейф при роботі, коли змінюються умови навколишнього середовища, а також умови експлуатації (зокрема, напруга живлення);

2) вперше отримано математичні моделі передатної характеристики контуру балансного зворотного зв'язку, який реалізується на базі двонаправленого відбивача струму. Це дозволяє оцінити похибки лінійності як для інтегрованих, так і роздільних проміжних каскадів попереднього підсилення, та відповідно побудувати ДППС із мінімальною похибкою лінійності передатної характеристики із заданою конфігурацією каналів підсилення;

3) подальшого розвитку отримав метод структурно-функціональної організації швидкодіючих високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму для багаторозрядних ЦАП, який відрізняється від існуючих введенням контурів балансного зворотного зв'язку, а також спеціалізованих двотактних відбивачів струму (СпВС). Крім того на етапі моделювання метод передбачає застосування керованих і функціональних генераторів струму, що дозволяє оцінити потенційні статичні і динамічні характеристики запропонованих ДППС. У сукупності це дає змогу отримати високу лінійність статичної

передатної характеристики ДППС при мінімальній кількості підсилювальних каскадів, а також досягти високої швидкості наростання вихідного сигналу і розширення смуги пропускання;

4) подальшого розвитку отримав метод побудови двотактних спеціалізованих відбивачів струму, який відрізняється від існуючих можливість враховувати вимоги щодо їх вхідних і вихідних опорів і використовувати ці відбивачі у передкінцевих або вихідних каскадах ДППС. Це дозволяє досягти максимальної швидкодії підсилювачів із різноманітною конфігурацією проміжних каскадів підсилення, побудованих на комбінаціях p-p-n і p-n-p транзисторів. Доведено, що застосування таких СпВС дають змогу у 1,5 рази розширити смугу пропускання ДППС порівняно із застосуванням відбивачів Уілсона.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що отримані теоретичні положення дозволили:

- запропонувати схеми генераторів компенсаційного струму для параметричного коригування струму зсуву нуля ДППС;

- схеми високолінійних швидкодіючих ППС із смугою пропускання, наближеною до граничних частот підсилення біполярних транзисторів, на рівні 100 МГц-1 ГГц, швидкістю наростання вихідної напруги - 1000-2000 В/мкс;

- схеми високолінійних швидкодіючих ДППС із низьким вхідним струмом на рівні 10-100 нА та малим температурним дрейфом порядку 1-5 нА/°С, в яких застосовано запропонований метод

- покращити характеристики аналізатора параметрів звукових трактів (АПЗТ), зокрема, такі як: смуга робочих частот, рівень визначення коефіцієнта нелінійних спотворень за рахунок застосування в ЦАП, що входять до складу пристрою, розроблених високолінійних швидкодіючих ДППС.

Основні наукові результати та практичні рекомендації впроваджено на Державному підприємстві «Національна радіокомпанія України», зокрема, методи підвищення лінійності та швидкодії аналогових пристроїв на основі двотактних симетричних підсилювачів постійного струму (ППС) для високоякісних аудіо ЦАП та рекомендації щодо особливостей їх застосування для відтворення та вимірювання звукових сигналів у радіомовленні, а також у навчальний процес на кафедрі обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету в рамках викладання дисциплін «Комп'ютерна електроніка», «Комп'ютерна схемотехніка», «Лінійні інтегральні схеми», «Аналого-цифрова техніка».

**Особистий внесок здобувача** в роботах, виконаних у співавторстві: запропоновано використання функціональних генераторів струму для моделювання режимів роботи двонаправлених відбивачів струму [1], запропоновано використання керованих генераторів струму для побудови ідеалізованої схеми підсилювача і складання моделі його передатної характеристики [2], запропоновано метод оцінки лінійності буферних пристроїв напруги [3], запропоновано схеми двоступеневих спеціалізованих відбивачів

струму та їх схеми заміщення [4], запропоновано конфігурації проміжних каскадів підсилення, а також модель малосигнальних коефіцієнтів передачі [5], запропоновано методи зменшення нелінійних спотворень підсилювачів постійного струму [6], запропоновано схему підсилювача для ЦАП, що використовується в аналізаторі параметрів звукових трактів [7], запропоновано блок генерування компенсувального сигналу для зменшення вхідного струму зсуву нуля і його температурного дрейфу [8], запропоновано метод оцінки похибки лінійності двотактних підсилювачів постійного струму [9], запропоновано схеми заміщення основних транзисторних каскадів [10], запропоновано метод балансування робочих точок проміжних каскадів підсилення [11], запропоновано схеми спеціалізованих відбивачів струму з низьким вхідним опором [12], запропоновано структури швидкодіючих підсилювачів з високою швидкістю наростання вихідного сигналу [13], запропоновано схеми підсилювачів з низькими нелінійними спотвореннями [14], запропоновано схеми проміжних каскадів для збільшення коефіцієнта передачі [15-17], запропоновано схему вихідного каскаду для підвищення швидкодії [18], запропоновано схеми відбивачів струму для зменшення вхідного опору [19-21], запропоновано схеми двоступеневих проміжних підсилювальних каскадів [22-23].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи було апробовано у доповідях на 11 науково-технічних конференціях: III та IV Міжнародних конференціях «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації» (м. Вінниця, ВНТУ, 2011, 2013 роки); I, III та IV Міжнародних конференціях «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» (м. Вінниця, ВНТУ, 2010, 2012, 2014 роки); IV Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)»; II Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС — 2013)»; Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області у 2009-2015 роках.

**Публікації.** За підсумками наукових досліджень опубліковано 39 наукових праць, включаючи 8 статей у наукових журналах, що входять до переліку періодичних фахових видань, з них 2 статті входять до наукометричної бази РІНЦ, 1 стаття у науковому журналі, що входить до наукометричної бази Index Scopus, 19 патентів на корисну модель, 11 тез доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, що містять 75 рисунків і 14 таблиць, висновків, списку використаних джерел (150 найменувань) і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 155 сторінок. Основний текст складас 127 сторінок.

синтезу у складі аналізатора параметрів звукових трактів (АПЗТ). Оцінено доцільність такого застосування з метою покращення метрологічних характеристик АПЗТ. Показано, що запропонований підхід дозволяє покращити такі характеристики АПЗТ, як ширину частот дослідження звукових трактів, а також точність визначення нелінійних спотворень у діапазоні частот.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою досліджень опубліковано 39 наукових праць, основними з яких є:

1. Теплицький М.Ю. Двотактні підсилювачі постійного струму на базі двонаправлених відбивачів струму / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький, В.А. Гарнага // Проблеми інформатизації та управління. – 2011. – № 2 (34). – С. 15-22. – ISSN 2073-4751

2. Теплицький М.Ю. Модель передатної характеристики двотактного підсилювача струму з вибіркоким зворотним зв'язком [Електронний ресурс] / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2012. – №3. – С. 1-11. Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2333/2597>

3. Теплицький М.Ю. Метод підвищення навантажувальної здатності високолінійних двотактних буферних пристроїв напруги / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький, С.В. Богомолів, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 3 (25). – С. 47-54. – ISSN 2078-6387

4. Теплицький М.Ю. Спеціалізовані відбивачі струму з парафазними входами для двотактних підсилювальних схем / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький, В. Є. Яцик // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – № 1 (26). – С. 45-53. – ISSN 2078-6387

5. Теплицький М.Ю. Динамічні характеристики двотактних підсилювачів постійного струму із роздільними каналами перетворення сигналів / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2013. – №4. С. 89-96. – ISSN 1997-9266

6. Теплицький М.Ю. Нелінійні спотворення двотактних підсилювачів постійного струму з вибіркоким зворотним зв'язком / О.Д. Азаров, Л.В. Крупельницький, М.Ю. Теплицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №4. – С. 79-87. – ISSN 1997-9266

7. Теплицький М.Ю. Двотактні підсилювачі струму для цифрового аналізатора параметрів звукових трактів / О.Д. Азаров, Л.В. Крупельницький, М.Ю. Теплицький // Проблеми інформатизації та управління. – 2014. – №4 (48). – С.5-13. – ISSN 2073-4751

8. Теплицький М.Ю. Метод неперервного коригування струму зсуву нуля двотактних підсилювачів постійного струму / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №1. – С. 129-135. – ISSN 1997-9266



9. Teplytskyi Mykhailo Linearity errors of the push-pull current amplifiers with separate intermediate cascade / Oleksiy Azarov, Mykhailo Teplytskyi, Natalya Bilichenko // Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy. Electrical Engineering. Power Engineering, Electronics – Romania, 2014 – Tome LX (LXIV), Fasc. 1 – pp. 47-58. – ISSN 1223-8139.

10. Теплицький М.Ю. Аналіз частотних характеристик біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму / О.Д. Азаров, В.А. Гарнага, М.Ю. Теплицький // IV міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» СПРТП-2009, 8-10 жовтня 2009 року. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – С. 28.

11. Теплицький М.Ю. Побудова двотактних підсилювачів постійного струму з розділеними каналами підсилення / В.С. Яцик, М.Ю. Теплицький // Міжнародна науково-технічна конференція «Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації», 20-22 квітня 2011 року. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 229-230.

12. Теплицький М.Ю. Методи розширення смуги пропускання двотактних підсилювачів постійного струму / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький // Міжнародна науково-технічна конференція «Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації», 23-25 квітня 2013 року. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 225-226.

13. Теплицький М.Ю. Двотактні симетричні підсилювачі постійного струму із покращеними динамічними характеристиками / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький // Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2013)», 29-30 жовтня 2013 року. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 98-100.

14. Теплицький М.Ю. Моделювання нелінійних спотворень двотактних підсилювачів постійного струму / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький // Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», 28-30 травня 2014 року. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 284-286.

15. Патент України на корисну модель № 66030, (51) МПК (2011.01), Н03К 5/19 (2006.01), G05B 1/00. Двотактний симетричний підсилювач струму / О.Д. Азаров, Л.В. Крупельницький, М.Ю. Теплицький, М.В. Пономарьова; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201105552; заявл. 04.05.2011 р.; опубл. 26.12.2011 р., Бюл. № 24.

16. Патент України на корисну модель № 68720, (51) МПК, Н03К 5/22 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01), Н03F 3/26 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький, М.В. Пономарьова; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201110892; заявл. 12.09.2011 р.; опубл. 10.04.2012 р., Бюл. № 7.

17. Патент України на корисну модель № 69740, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Двотактний симетричний підсилювач струму / О.Д. Азаров, В.С. Яцик, М.Ю. Теплицький, С.В. Павлов; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201112871; заявл. 02.11.2011 р.; опубл. 10.05.2012 р., Бюл. № 9.

18. Патент України на корисну модель № 84381, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Підсилювач постійного струму / О.Д. Азаров, С.В. Павлов, М.Ю. Теплицький, В.М. Попенко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201301362; заявл. 05.02.2013 р.; опубл. 25.10.2013 р., Бюл. № 20.

19. Патент України на корисну модель № 88148, (51) МПК (2014.01), H03K 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Відбивач струму / О.Д. Азаров, С.В. Богомолів, М.Ю. Теплицький, В.С. Яцик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201214501; заявл. 18.12.2012 р.; опубл. 11.03.2014 р., Бюл. № 5.

20. Патент України на корисну модель № 88149, (51) МПК (2014.01), H03K 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Відбивач струму / О.Д. Азаров, С.В. Богомолів, М.Ю. Теплицький, В.С. Яцик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201214503; заявл. 18.12.2012 р.; опубл. 11.03.2014 р., Бюл. № 5.

21. Патент України на корисну модель № 89363, (51) МПК (2014.01), H03K 5/22 (2006.01), G05B 1/00. Відбивач струму / О.Д. Азаров, М.Ю. Теплицький, М.В. Пономарьова; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201301358; заявл. 05.02.2013 р.; опубл. 25.04.2014 р., Бюл. № 8.

22. Патент України на корисну модель № 89364, (51) МПК, G05B 1/01 (2006.01). Підсилювач постійного струму / О.Д. Азаров, В.Я. Стейскал, М.Ю. Теплицький, М.В. Діденко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201301361; заявл. 05.02.2013 р.; опубл. 25.04.2014 р., Бюл. № 8.

23. Патент України на корисну модель № 91385, (51) МПК, H03K 5/24 (2006.01), G05B 1/01 (2006.01). Підсилювач постійного струму / О.Д. Азаров, С.В. Богомолів, М.Ю. Теплицький, С.І. Павлович; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201303343; заявл. 19.03.2013 р.; опубл. 10.07.2014 р., Бюл. № 13.

## АНОТАЦІЯ

Теплицький М. Ю. Двотактні підсилювачі постійного струму з балансним зворотним зв'язком для багаторозрядних паралельних ЦАП. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2015.

Дисертацію присвячено дослідженню та розробці методів побудови двотактних підсилювачів постійного струму з покращеними статичними і динамічними характеристиками, що можуть використовуватись в багаторозрядних паралельних ЦАП та системах прямого цифрового синтезу аналогових сигналів. В роботі наведено аналітичні вирази для статичної передатної характеристики та малосигнальних коефіцієнтів передачі запропонованих схем в діапазоні частот. Також запропоновано структурно-функціональні та принципіві схеми швидкодіючих високолінійних ДППС з одно- та багатоступеневими проміжними каскадами підсилення. Показано, що застосування балансного зворотного зв'язку та спеціалізованих відбивачів струму з низьким вхідним опором дозволяє значно розширити смугу пропускання підсилювачів та підвищити швидкість наростання вихідного сигналу. У роботі проведено порівняльний аналіз існуючих і запропонованих схем, який показав, що двотактні підсилювачі постійного струму мають кращі статичні і динамічні характеристики порівняно з відомими аналогами. Доведено, що застосування таких аналогових пристроїв дає змогу покращити параметри багаторозрядних паралельних ЦАП, а також систем перетворення форм інформації, в яких вони використовуються.

Ключові слова: двотактний підсилювач постійного струму, двонаправлений відбивач струму, багаторозрядні паралельні ЦАП, балансний зворотний зв'язок, прямий цифровий синтез, нелінійні спотворення.

## АННОТАЦИЯ

Теплицкий М. Е. Двухтактные усилители постоянного тока с балансной обратной связью для многоразрядных параллельных ЦАП. – 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, 2015.

Диссертация посвящена исследованию и разработке методов построения двухтактных усилителей постоянного тока с улучшенными статическими и динамическими характеристиками, которые могут использоваться в многоразрядных параллельных ЦАП и системах прямого цифрового синтеза аналоговых сигналов.

В работе проанализированы существующие подходы к построению усилителей постоянного тока, как на базе дифференциальных усилителей, так и на базе двухтактных структур, и показаны их недостатки. Также проведен анализ известных методов уменьшения входного тока смещения нуля усилителя и его температурного дрейфа, который показал их недостаточную

эффективность. Это позволило определить направление и сформулировать задачи исследований.

Предложена схема идеализированного усилителя, построенная на управляемых и функциональных генераторах тока. Выведены аналитические выражения для статической передаточной характеристики и малосигнальных коэффициентов передачи по току в диапазоне частот и входного сигнала, которые позволяют оценить максимальные потенциальные характеристики. Проведена оценка погрешности линейности статической передаточной характеристики рассматриваемых схем и предложены методы ее уменьшения. Также в работе проанализировано влияние балансной обратной связи на характеристики двухтактных усилителей обратного тока, а также выделены параметры для регулирования ее глубины. Рассмотрены варианты реализации двунаправленных отражателей тока и возможные режимы их работы, получены формулы, описывающие их передаточные характеристики. Показано, что такие токовые зеркала позволяют выравнивать коэффициенты передачи по верхнему и нижнему каналу усиления, несмотря на использование в них транзисторов разных типов проводимости.

В ходе исследований предложены структуры и принципиальные схемы усилителей с одно- и многоступенчатыми промежуточными каскадами усиления, а также проанализированы их АЧХ и ФЧХ. Проанализированы переходные характеристики таких схем, которые описываются схемными функциями 1-2 порядков и показывают одинаковую длительность переднего и заднего фронтов, а также высокую скорость нарастания выходного сигнала (на уровне 1000-2000 В/мкс).

Разработаны схемы специализированных отражателей тока с низким входным сопротивлением, которые позволяют значительно (в 1,5-2 раза) расширить полосы пропускания и полной неискаженной мощности таких устройств. Проведен анализ коэффициента нелинейных искажений преобразователей ток-напряжение, результаты которого подтверждают эффективность предложенной структурно-функциональной организации усилителей и низкий коэффициент гармоник на уровне  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  %.

Также проанализирован новый метод корректирования аддитивной погрешности усилителя (погрешности смещения входного тока нуля), который имеет эффективность на порядок-два большую, чем известные подходы. Он предполагает наличие двух одинаковых усилителей в интегральном исполнении, один из которых есть генератором компенсирующего сигнала.

Рассмотрены рекомендации для компьютерного схемотехнического анализа двухтактных усилителей постоянного тока в пакете Microcap, показано влияние параметров анализа, таких как точность и шаг по времени на его результаты. Также приведены схемы входных каскадов с низким входным сопротивлением, которое необходимо для минимизации влияния входных емкостей. Показано, что специфическим назначением входного каскада является расщепление входного тока на противофазные составляющие, которые дальше поступают на каскады промежуточного усиления.

Проанализированы статические и динамические параметры предложенных принципиальных схем, которые показывают их превосходство над существующими серийными аналогами.

Обоснована невозможность использования классического операционного усилителя в системах прямого цифрового синтеза в связи с ограниченным быстродействием. Составлена компьютерная модель генератора синусоидальных сигналов методом прямого цифрового синтеза с двухтактным усилителем постоянного тока на выходе вместо фильтра низких частот. Показана эффективность такого подхода, которая позволяет регулировать мощность и амплитуду выходного сигнала.

Также рассмотрены характеристики макетного образца многоуровневого параллельного ЦАП с выходным устройством на основе двухтактного усилителя постоянного тока.

Результаты диссертационных исследований подтверждаются соответствующими актами внедрения.

Ключевые слова: двухтактный усилитель постоянного тока, двунаправленный отражатель тока, многоуровневые параллельные ЦАП, балансная обратная связь, прямой цифровой синтез, нелинейные искажения.

## ABSTRACT

Teplytskyi M. Push-pull DC amplifiers with balancing feedback for multi-bit parallel DAC. – The manuscript.

The thesis for a Ph.D. science degree by specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2015.

The thesis is devoted to the research and development of constructing methods of push-pull dc amplifier with improved static and dynamic characteristics that can be used in parallel multi-bit DAC and for direct digital synthesis systems of analog signals. In this paper the analytical expressions for the static transfer characteristic and small-signal transfer coefficients in the frequency range for proposed schemes were obtained. Also structural-functional and schematic diagrams of high-speed push-pull DC amplifiers with increased linearity with single- and multi-stage intermediate amplification cascades were proposed. It is shown that the use of balance feedback and specialized current mirrors with low input resistance can significantly extend the amplifier's bandwidth and increase the slew rate of the output signal. In this paper, a comparative analysis of the existing and proposed schemes showed that push-pull DC amplifiers have better static and dynamic properties compared with the known analogs. It is proved that the use of such analog devices allows improving parameters of multi-bit parallel DAC and systems for converting information form in which they are used.

Keywords: push-pull DC amplifier, bi-directional current mirror, multi-bit parallel DAC, balancing feedback, direct digital synthesis, harmonic distortion.

Підписано до друку 26.05.2015 р. Формат 29.7×42 ¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2015-069  
Відруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59