

**Голові спеціалізованої Вченої Ради  
05.052.010 у Вінницькому Національному  
технічному університеті, доктору  
технічних наук, професору, професору  
кафедри обчислювальної техніки  
Вінницького Національного технічного  
університету Мартинюк Тетяні Борисівні**

**ВІДГУК**  
офіційного опонента Мичуди Лесі Зиновіївни  
на дисертаційну роботу Обертюха Максима Романовича  
«Метод і апаратні засоби високолінійного надлишкового цифроаналогового  
перетворення на основі генераторів однакових струмів», що подана на  
здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні  
технології» за спеціальністю 123 «Комп’ютерна інженерія»

**Актуальність обраної теми.** Аналого-цифрові перетворювачі та цифроаналогові перетворювачі утворюють клас перетворювачів форми інформації, вони використовуються в різних сферах людської діяльності. На теперішній час перетворювачі форми інформації застосовуються у складі різних систем, у системах з цифровими обчислювальними пристроями реалізують функції зв'язку з об'єктом, функції аналого-цифрових контролерів, аналого-цифрових інтерфейсів, аналого-цифрових спецпроцесорів, підсистем тестування, випробовування та регулювання параметрів і характеристик, збирання й оброблення вимірювальної інформації, аналізу і синтезу сигналів, тощо. До характеристик перетворювачів форми інформації висуваються серйозні вимоги – основні це точність і швидкодія.

Традиційний спосіб вирішення проблеми підвищення точності і швидкодії перетворювачів форми інформації – застосування більш досконалої елементної бази. Перетворювачі форми інформації містять вхідні або вихідні канали перетворення аналогового сигналу, які включають в себе підсилювачі, аналогові комутатори та пристройи вибірки-зберігання. Дослідження у сфері підвищення їх точності та швидкодії посідають важливу роль у вирішенні зазначененої проблеми. Також суттєвими є дослідження в області підвищення точності і стабільності джерел опорного струму та напруги, які виступають універсальними мірами в перетворювачах форми інформації. Окрім варто відзначити дослідження, пов'язані з вирішенням проблем комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в проектовані пристройи надлишковості у формі надлишкових позиційних систем числення. Актуальність досліджень у цій галузі підтверджується позитивними практичними результатами, отриманими, наприклад, у Вінницькому національному технічному університеті науковими школами О. П. Стакова та О. Д. Азарова. Актуальність теми дисертаційного дослідження відповідає основним напрямкам розвитку науки затвердженим Законом України «Про пріоритетні напрямами розвитку науки і

техніки» від 16.01.2016 № 2623-14.

### **Структура та зміст дисертації**

Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 206 сторінок, з яких основний зміст викладений на 153 сторінках друкованого тексту, містить 67 рисунків, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 151 найменувань та включає 3 додатки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, обґрунтовано вибір теми дослідження, відображені застосовані методи дослідження, висвітлено наукову новизну отриманих результатів та практичну цінність. Наведено інформацію про опублікування результатів роботи та особистий внесок здобувача в публікаціях зі співавторами.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проаналізовано сучасні методи побудови двійково-зважених ЦАП з використанням резистивних матриць. Відзначені основні джерела похибок лінійності і суперпозиції ваг розрядів. Сформульована задача побудови надлишкових ЦАП на базі резистивних матриць з використанням генераторів однакових струмів з підвищеною навантажувальною здатністю для зменшення похибок суперпозиції ваг розрядів. Проаналізовано сучасні методи побудови підсилювачів постійного струму на базі двотактних структур. Відзначені причини похибок лінійності, дрейфу нуля та невисокої швидкодії підсилювачів постійного струму. Сформульована задача побудови двотактних підсилювачів постійного струму зі зворотним зв'язком по струму з поліпшеними характеристиками лінійності, дрейфу нуля і навантажувальної здатності. Проаналізовано методи побудови термостабільних джерел опорної напруги з використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника. Сформульована задача побудови джерел опорної напруги і струму з використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника з більш високою термостабільністю. Проаналізовано методи побудови буферів напруги. Сформульована задача створення швидкодіючих буферів напруги з високим вхідним і низьким вихідним опором на основі двотактних структур.

У **другому розділі** дисертаційної роботи побудована математична модель для розрахунку значення похибки вихідного струму ЦАП, що побудовані з використанням резистивних матриць і генераторів однакових розрядних струмів, які комутуються у вузли матриці, яка виникає через порушення принципу суперпозиції ваг його розрядів. Запропоновано метод підвищення лінійності багаторозрядних струмових ЦАП за рахунок дотримання принципу суперпозиції ваг розрядів в діапазоні вихідного сигналу шляхом використання генераторів розрядних струмів з високим і надвисоким вихідним опором. Запропоновано метод побудови таких генераторів однакових розрядних струмів. Розроблено методику визначення значень номіналів резисторів для матриць секційного типу, в яких

використовують різні типи надлишкових систем числення для представлення ваг розрядів. Визначено критерії вибору рівня надлишковості для ЦАП, побудованих з використанням резистивних матриць і генераторів розрядних струмів, залежно від специфіки їх застосування, зокрема, в АЦП чи ЦА системах.

У третьому розділі дисертаційної роботи запропоновано метод побудови двотактних підсилювачів постійного струму із внутрішнім балансним зворотним зв'язком. Доведено, що вказані пристрої мають кращі характеристики: лінійності і навантажувальної здатності ніж однотактні схеми. Запропоновано метод побудови двотактних буферів напруги з високим вхідним опором і малими вхідними струмами. Доведено, що використання двотактних підсилювачів постійного струму в вихідних каскадах буферів напруги призводить до зменшення їх вихідного опору (пропорційно власному коефіцієнту підсилення двотактних підсилювачів постійного струму). Запропоновано методи побудови джерел опорної напруги і струму з підвищеною термостабільністю з використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника і струмових дзеркал. Розглянуто варіанти побудови джерел опорної напруги і струму, що дозволяють здійснювати значно кращу температурну компенсацію.

У четвертому розділі дисертаційної роботи розроблені структурні і принципові схеми: багаторозрядного надлишкового ЦАП на базі генераторів одинакових струмів з високими та надвисокими вихідними опорами, що комутуються вузли резистивних матриць, двотактних підсилювачів постійного струму, двотактних буферів напруги і термостабільних джерел опорної напруги. Розглянуто алгоритми функціонування і самокалібрування перетворювача. Розроблено метод побудови ЦА накопичувача з ваговою надлишковістю на неточних елементах для запису, зберігання та генерування низькочастотних сигналів.

У висновках сформульовано основні результати виконаних досліджень

У додатах наведено акти впровадження результатів досліджень, лістинг математичного моделювання елементів двотактних перетворювачів струм-струм та список публікацій здобувача.

**Наукова новизна роботи.** Основні результати, отримані дисертантом, мають наступну наукову новизну:

1. Вперше запропоновано метод побудови багаторозрядних ЦАП із ваговою надлишковістю з комутацією одинакових струмів у вузли резистивної матриці, в яких застосовуються генератори розрядних струмів із високими та надвисокими вихідними опорами, що дозволяє дотримуватися принципу суперпозиції ваг розрядів в діапазоні вихідного сигналу та істотно зменшити похибку диференційної нелінійності характеристики перетворення.

2. Удосконалено математичну модель для розрахунку секційних резистивних матриць ЦАП залежно від типу конфігурації та характеристик надлишкової системи числення, яка використовується, що дозволяє проводити розрахунки секційних матриць для довільних надлишкових

систем числення.

3. Отримали подальшого розвитку методи підвищення точності широкосмугових високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму за рахунок застосування складених транзисторів, принципу підсилення струмів та зворотних зв'язків по струму, що дозволяє збільшити їх лінійність та навантажувальну здатність і двотактних буферів напруги за рахунок застосування складених транзисторів та внутрішніх балансних зворотних зв'язків, що дозволяє збільшити їх вхідний опір.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено структурні та принципові електричні схеми багаторозрядних (14-20 двійкових розрядів) струмових ЦАП із ваговою надлишковістю, що використовуються для генерування високолінійних сигналів.

2. Розроблено структурні та принципові електричні схеми високоомних генераторів розрядних струмів (виходний опір  $10^7$ - $10^9$  Ом) для надлишкових ЦАП, завдяки чому зберігається принцип суперпозиції ваг розрядів в діапазоні виходного сигналу під час їх перемикання.

3. Розроблено структурні та принципові електричні схеми широкосмугових високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму з балансними зворотними зв'язками (нелінійність виходного струму  $10^{-8}$  А в діапазоні виходного сигналу  $\pm 1$  мА), а також структурні та принципові електричні схеми двотактних буферів напруги (виходний опір 1-10 ГОм).

4. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету під час викладання дисциплін «Аналого-цифрові системи», «Лінійні інтегральні схеми», «Аналого-цифрові пристрої комп'ютерних систем».

5. Результати дисертаційної роботи впроваджено в ТОВ МАЙТЕК ПЛЮС.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій та достовірність отриманих результатів.**

**Обґрунтованість** наукових положень дисертації забезпечується коректністю постановки і вирішення завдань дослідження, чітким формулюванням мети і вибору методів дослідження, коректним використанням основних положень теорії цифроаналогового перетворення, коректним застосуванням теорії теорія лінійних інтегральних схем та теорія електричних кіл і сигналів, застосуванням методів побудови двотактних буферів напруги, двотактних підсилювачів постійного струму, термостабільних джерел постійного струму і напруги, застосуванням методів математичного та імітаційного моделювання характеристик перетворення ЦАП та інших аналогових вузлів.

**Достовірність** отриманих в роботі положень та наукових результатів визначається їх теоретичним обґрунтуванням та експериментальним підтвердженням за допомогою програм імітаційного та математичного

моделювання, збіжністю результатів математичного і імітаційного моделювання, а також впровадженням результатів досліджень в ТОВ МАЙТЕК ПЛЮС.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи.** Розроблені автором метод підвищення лінійності багаторозрядних надлишкових ЦАП на базі генераторів однакових струмів за рахунок дотримання принципу суперпозиції ваг розрядів у діапазоні вихідного сигналу, та розвинуті методи побудови інших аналогових вузлів з підвищеною лінійністю можуть бути використані для вдосконалення існуючих струмових ЦАП. Крім того розроблені методи побудови двотактних підсилювачів постійного струму із балансними зворотними зв'язками, двотактних буферів напруги, термостабільних джерел опорного струму та напруги можуть бути використані в інших технічних системах та приладах.

**Повнота викладення основних матеріалів в опублікованих працях.**

Результати наукових досліджень, які отримані автором, опубліковано у 17-ми публікаціях, в тому числі в 9-х виданнях, що входять до переліку фахових видань України, одному періодичному іноземному виданні та в 7-х публікаціях за матеріалами міжнародних та всеукраїнських конференцій. Отримано 18 патентів України на корисну модель та 2 патенти України на винахід. Всі основні положення, що виносяться на захист висвітлено в публікаціях.

**Оцінка змісту дисертації, н завершеність в цілому, відповідність встановленим вимогам оформлення дисертацій.**

Дисертаційна робота написана з використанням сучасної наукової термінології. Роботу виконано на належному науковому рівні, вона є завершеною науковою працею, має практичне значення та відображає рішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення лінійності багаторозрядних надлишкових ЦАП на базі генераторів однакових струмів. Оформлення дисертації відповідає вимогам, висвітленим в наказі МОН № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017.

**Зауваження до дисертаційної роботи**

1. У розділах 2 при розробці методу підвищення лінійності багаторозрядних ЦАП, як основні викристовуються параметри інтегральних транзисторів NUHFARRY та PUHFARRY. З тексту дисертації незрозуміло, чи може бути використаним запропонований метод для пристройів на інших транзисторах і який тоді матиме місце ефект.

2. На стор.86 у таблиці 2.2 параметри покращених генераторів розрядних струмів доцільно наводити за назвами, а не за номерами рисунків, на яких вони наведені.

3. У розділах 3 і 4 наведені результати комп'ютерного моделювання, але не акцентовано, чи проводилися дослідження фізичних моделей.

4. У розділі 4 при розгляді налаштувань динамічного моделювання на рис.4.6 зазначено температуру 27, однак не конкретизовано, чи моделювання проводилося для сталого значення температури, чи для

певного і якого саме діапазону.

5. У пункті 4.2 вказано, проте не розкрито можливість виконання операцій з сигналами за допомогою розроблених схем.

6. Не усі запропоновані схеми багаторозрядного струмового ЦАП та цифроаналогового накопичувача захищенні патентами.

7. Є помилки у підписах рисунків: на рис. 2.9 двічі вказаній рис. в), на рис. 3.11 двічі вказаній рис. а)

8. У тексті дисертації трапляються орфографічні та пунктуаційні помилки, зокрема: стор. 26 «комп'ютерне моделювання », пропущений апостроф; стор. 25 «складається із вступу», треба використовувати прийменник «зі»; стор. 3 «в дисертаційній роботі», треба використовувати прийменник «у»; стор. 40 «оскільки розрядні струми різні це буде вносити похибку», пропущена кома; стор. 26 «сучасних підходів, щодо побудови» лишня кома та інші, а також русизми у розділі 2 «токі» замість «струмів».

Зазначені зауваження не зменшують теоретичної та практичної цінності рівня рецензованої дисертації.

## Висновки

Дисертація Обертюха Максима Романовича, подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 - «Комп'ютерна інженерія», виконана на достатньому науковому рівні, є завершеною науковою працею та має практичне значення. В дисертації міститься рішення важливої науково-прикладної задачі в галузі техніки цифроаналогового перетворення.

За актуальністю теми, мірою обґрунтованості наукових положень, достовірністю, новизною, теоретичною та практичною цінністю одержаних результатів вважаю, що дисертаційна робота відповідає «Тимчасовому порядку присудження ступеня доктора філософії», що затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 167 від 6 березня 2019 р. (зі змінами № 608 від 09.06.2021 р.), а її автор - Обертюх Максим Романовича заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 - «Комп'ютерна інженерія».

Офіційний опонент,  
професор кафедри безпеки інформаційних  
технологій Національного університету  
«Львівська політехніка», доктор  
технічних наук, доцент

Л.З. Мичуда

Підпис д.т.н. Мичуди Л.З. завіряю:

Вчений секретар  
Національного університету «Львівська  
політехніка»



Р.Б.Брилинський