**Реферат  
роботи «Методи та засоби відмовостійкого багаторозрядного аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю» авторів Кадука О.В., Гарнаги В. А., Богомолова С.В.**

Застосування багаторозрядних цифро-аналогових (ЦАП) та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) послідовного наближення як пристроїв зв’язку комп’ютерів з об’єктами, зокрема, в інформаційно-вимірювальних системах, багатоканальних системах збору даних, системах управління та інших вимагає відповідності їх метрологічних характеристик заданим нормам протягом всього циклу експлуатації, а також при роботі у складних умовах. Слід відзначити, що за таких вимог під час функціонування у вказаних пристроях можуть виникати три види відмов: катастрофічні, збої і часткові параметричні. Катастрофічні відмови і збої порушують роботу схеми перетворювача через вихід з ладу аналогових вузлів і не є характерними для багаторозрядних перетворювачів форми інформації (ПФІ). Разом з тим, у процесі експлуатації через старіння і під впливом чинників навколишнього середовища характеристики елементів будуть змінюватися, що викликає появу додаткових похибок і відповідно появу часткових параметричних відмов. При цьому властивість багаторозрядних АЦП і ЦАП утримувати похибку перетворення у заданих межах, незважаючи на змінення протягом циклу експлуатації параметрів аналогових вузлів під дією чинників, що впливають, будемо називати відмовостійкістю ПФІ. Багато розробників ПФІ для зменшення похибки перетворення протягом циклу експлуатації пропонують використовувати різні методи самокоригування і самокалібрування, що до того ж сприяє підтриманню відмовостійкості. Водночас, незважаючи на десятиліття наукових досліджень у галузі ПФІ, питання відновлення часткових параметричних відмов у багаторозрядних ЦАП і АЦП розглянуто недостатньо.

Для побудови багаторозрядних ПФІ, як правило, використовують двійкові системи числення. Проте, такі перетворювачі, зокрема, АЦП порозрядного врівноваження мають при цьому ряд недоліків. Так, у двійкових АЦП, що самокоригуються, зменшується швидкодія перетворення, оскільки в даному випадку під час основного перетворення для кожного розряду розраховується коригувальна поправка і витрачається час на її розрахунок і введення. Тому було запропоновано використовувати для їх побудови системи числення з ваговою надлишковістю (СЧВН), оскільки в даному випадку з’являється можливість підвищувати точність АЦП, побудованого на неточних елементах, шляхом врахування відхилень ваг розрядів, а також підтримувати заданий рівень похибок перетворення під час експлуатації при зміненні умов навколишнього середовища, а саме: температури, вологості, тобто забезпечувати відмовостійкість до часткових параметричних відмов. Крім того, у ПФІ з ваговою надлишковістю є можливість у комплексі з підтриманням відмовостійкості підвищувати швидкодію АЦП порозрядного кодування в 5-10 разів за рахунок компенсації динамічних похибок, що виникають під час врівноваження.

Водночас, у процесі визначення ваг розрядів під час самокалібрування має місце накопичення методичної похибки. Тому виникла потреба у розробці нових методів самокалібрування для підтримання відмовостійкості багаторозрядних ПФІ. Слід також відзначити, що і до теперішнього часу не розглядалися питання визначення міжкалібрувального інтервалу для ПФІ із ваговою надлишковістю.

Частину похибок перетворювачів форми інформації не вдається скоригувати структурно-алгоритмічними методами, тобто з використанням процедур самокалібрування. Такі похибки усуваються схемотехнічними шляхом як на етапі виготовлення, так і в процесі експлутації. В існуючих аналогових вузлах не передбачено такої можливості. Тому необхідно розробити нові методи для побудови аналогових вузлів. Таким чином, наукова задача, пов’язана зі створенням нового класу відмовостійких багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю та їх вузлів, є актуальною.

**Метою роботи** є забезпечення відмовостійкості багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю шляхом самокалібрування як ваг розрядів, так і характеристики перетворення в цілому. Це дозволяє підтримувати точність перетворення в межах норми, незважаючи на те, що як основні, так і додаткові похибки елементної бази, що виникають внаслідок появи часткових параметричних відмов аналогових вузлів, перевищують значення, які визначаються роздільною здатністю пристрою.

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

- вперше запропоновано метод підтримання відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю, побудованих на неточних і нестабільних аналогових вузлах, що базується на використанні цифрового самокалібрування як ваг розрядів, так і характеристики перетворення в цілому, зокрема, із застосуванням процедури осереднення на розгортках;

- вперше отримано аналітичні вирази для оцінювання міжкалібрувального інтервалу багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю. Наявність таких оцінок дозволить забезпечити відмовостійкість роботи вказаних пристроїв протягом циклу експлуатації при зміненні умов навколишнього середовища і старінні елементної бази;

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

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

- подальшого розвитку отримали моделі статичних похибок каналів АЦ- і ЦА-перетворення до і після самокалібрування, що дозволило визначити складові похибок вказаних каналів і вичленити кориговані, частково кориговані і некориговані похибки. Доведено також, що характеристика квантування ПФІ на основі СЧВН із природним базисом є нерівномірною, а крок квантування є багатозначним;

- подальшого розвитку отримали аналітичні вирази для порівняння ефективності відомого і запропонованого методів самокалібрування за критерієм максимального зменшення похибки перетворення порівняно з інструментальними похибками елементної бази. Це дозволяє вибирати необхідний метод самокалібрування залежно від потрібних точносних характеристик багаторозрядних АЦП і ЦАП.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом результатів, отриманих аналітичними методами, з результатами комп’ютерного моделювання й експериментальних досліджень.

**Практична значимість** одержаних результатів полягає в тому, що отримані теоретичні положення дозволили:

- запропонувати структурні схеми відмовостійких багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, і які можуть функціонувати в умовах змінення температури навколишнього середовища і протягом тривалого терміну експлуатації, а точність перетворення при цьому не погіршується;

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

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

- визначати міжкалібрувальний інтервал, якого треба дотримуватися в процесі експлуатації запропонованих ПФІ з ваговою надлишковістю для забезпечення відмовостійкості за умови дії впливових чинників, зокрема змінення температури навколишнього середовища;

- розробити і виготовити апаратуру контролю якості звукових каналів на основі багаторозрядних АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю, зокрема, аналізатор параметрів звукових трактів АПЗТ-02, що дозволяє покращити якість трансляції програм;

- розробити рекомендації щодо використання програмного забезпечення для моделювання процедур самокалібрування характеристики перетворення багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю.

Основні положення наукової роботи опубліковано у 142 працях, із яких 2 монографії, 27 статті у міжнародних науково-технічних журналах, що входять до переліку ВАК України, 7 патентів України на винахід, 91 патент України на корисну модель, 2 авторські свідоцтва. У рамках роботи захищено 2 дисертації на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук. Усі праці видані за темою наукової роботи. Загальна кількість посилань на членів авторського колективу наукової праці у пошуковій системі <http://scholar.google.com/> складає 20.

Проблема виходу похибки перетворення за зону допуску для багаторозрядних ПФІ проявляється у невідповідності декларованої роздільної здатності реальному значенню похибки перетворення. Наприклад, найкращі сучасні АЦП, що серійно випускаються провідними фірмами світу, зокрема, AnalogDevices, Intersil, MaximIntegratedProducts, TexasInstruments, NationalSemiconductor не дають абсолютної точності перетворення більше 12 двійкових розрядів у широкому діапазоні температур і протягом життєвого циклу. При цьому вихід похибки ПФІ за межі допуску асоціюється з параметричною відмовою пристрою вцілому.

У роботі було розроблено методи та пристрої відмовостійкого багаторозрядного перетворення форми інформації в системах числення з ваговою надлишковістю. Так, зокрема, для підтримання відмовостійкості багаторозрядних ЦАП і АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю було розроблено методи цифрового самокалібрування як ваг розрядів, так і характеристики перетворення.

Самокалібрування може виконуватися в АЦП (ЦАП), побудованому на основі СЧВН. Використання спеціальних взірцевих мір або еталонних сигналів у цьому випадку не потрібне. При цьому на відміну від самокоригування, що використовується в серійних ПФІ, поправка вводиться у цифровій формі, що не впливає на швидкодію роботи перетворювача інформації.

Розроблені методи самокалібрування дають змогу забезпечувати похибку

інтегральної та диференційної лінійності в межах ±1 кванта для 14-16-ти розрядних АЦП протягом всього циклу їх експлуатації та при зміні параметрів навколишнього середовища, що забезпечує точність перетворенняу 2-3 рази кращу аніж у серійних моделей АЦП, що випускаються провідними фірмами світу.

Водночас, існують похибки багаторозрядних ПФІ, які неможливо скоригувати структурно-алгоритмічних методами. Такі похибки можуть бути усунені лише схемотехнічним шляхом. У зв’язку з цим було розроблено рекомендації щодо схемотехнічної реалізації аналогових вузлів для багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються із застосуванням двотактних симетричних структур. Вперше запропоновано новий метод, який дозволяє досягти покращення статичних і динамічних характеристик підсилювачів постійного струму (ППС), не зважаючи на використання підсилювальних каналів, які побудовано на транзисторах різних типів провідності. На основі вказаного методу та рекомендацій розроблено схемотехнічні рішення щодо реалізації: двотактних симетричних ППС, буферних каскадів, вхідних пристроїв схеми порівняння струмів. Показано, що побудова аналогових вузлів на базі двотактних симетричних структур дозволяє підвищити швидкодію, зменшити похибку лінійності, а також вирішується проблема завдання режиму по постійному струму підсилювальних каскадів. Розроблені аналогові вузли мають статичні і динамічні характеристики у 3-5 разів кращі, ніж у аналогічних вузлів, що виготовляються провідними фірмами світу такими, як: AnalogDevices, Intersil, MAXIM, Phillips.

Розроблені двотактні ППС забезпечують коефіцієнт підсилення на рівні 100-120 дБ, похибку лінійності на рівні 0.001-0.002 %, симетричність наростання фронтів на рівні 1500-2500 В/мкс.

З використанням вказаних підходів було розроблено 16-розрядний АЦП порозрядного наближення, що може підтримувати похибку перетворення в межах допуску протягом всього циклу експлуатації, а також при роботі в складних умовах. Час перетворення вказаного АЦП складає 2 мкс, похибка інтегральної лінійності ±1 квант, похибка диференційної лінійності ±1 квант.

Розроблені пристрої доцільно використовувати в інформаційно-вимірювальних системах, багатоканальних системах збору даних, апаратурі для контролю статичних і динамічних характеристик систем теле- й радіомовлення, аерокосмічній галузі, системах контролю метрологічних характеристик електронних схем, апаратурі для сейсморозвідки й отримання сейсмограм, вимірювальних системах метрологічної атестації аналого-цифрових систем, пристроях для високоточного перетворення фізичних величин, акустичних вимірювань. Вказані системи вимагають відповідності метрологічних характеристик їх вузлів заданим нормам протягом всього циклу експлуатації.

Зокрема, використання вищезгаданого АЦП в аналізаторі параметрів звукових трактів АПЗТ, що розроблений за участю авторів у науково-технічному центрі «Аналого-цифрові системи ВНТУ», м. Вінниця дозволило з високою точністю проводити вимірювання цілого комплексу параметрів трактів передачі даних та замінити більше 15 звичайних вимірювальний приладів, а саме вольтметр, аналізатор спектру, вимірювач амплітудо-частотної характеристики, низькочастотний генератор, вимірювач частот та ін.

**Автори роботи:**

кандидат технічних наук,

доцент кафедри

обчислювальної техніки Вінницького

національного технічного університету О. В. Кадук

кандидат технічних наук,

старший викладач кафедри

обчислювальної техніки Вінницького

національного технічного університету В. А. Гарнага

аспірант кафедри обчислювальної

техніки Вінницького національного

технічного університету С. В. Богомолов