

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

Кочан Роман Володимирович



УДК 621.317.7

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МЕТРОЛОГІЧНОЇ САМОПЕРЕВІРКИ  
ПРЕЦИЗІЙНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У  
ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів 2013

*Дисертацією є рукопис*

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант – доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Романов Володимир Олександрович,**  
завідувач відділу перетворювачів форми інформації  
Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова  
Національної академії наук України, м. Київ

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор

**Азаров Олексій Дмитрович,**  
завідувач кафедри обчислювальної техніки  
Вінницького національного технічного університету  
Міністерства освіти і науки України, м. Вінниця

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Монастирський Зеновій Ярославович,**  
завідувач відділу електричних і магнітних вимірювань  
Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ

доктор технічних наук, професор

**Сурду Михайло Миколайович,**  
заступник директора НДІ прецизійних вимірювань  
Державного підприємства «Всеукраїнський державний  
науково-виробничий центр стандартизації, метрології,  
сертифікації та захисту прав споживачів»  
(ДП «Укрметртестстандарт»), м. Київ

Захист відбудеться «27» вересня 2013 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.08 при Національному університеті «Львівська політехніка»  
(79013, м. Львів-13, вул. С.Бандери 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету  
«Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська 1).

Автореферат розісланий « 20 » серпня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., проф.



Луцик Я.Т.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Цифрова обробка даних, зважаючи на доступність обладнання і високу ефективність, широко застосовується в сучасних вимірювальних системах (ВС), але більшість первинних вимірювальних перетворювачів (давачі, сенсори) цих систем залишилися аналоговими. Тому вимірювальні канали таких ВС обов'язково містять аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), навіть давачі з цифровим вихідним сигналом часто мають вбудовані АЦП. Отже, АЦП є важливим компонентом сучасних ВС.

Завдяки досягненням мікроелектроніки точність, чутливість, габарити, вартість, та інші параметри АЦП істотно покращилися. Зокрема, фірми Analog Devices і Texas Instruments серійно випускають 24 розрядні багатодіапазонні сигма-дельта АЦП серії AD77xx та 31 розрядні сигма-дельта АЦП ADS1281. Більшість мікроконтролерів, що тиражуються багатомільйонними партіями, сьогодні мають вбудовані АЦП. Хоча переважно у них низькі (8 – 12 розрядів) та не нормовані метрологічні параметри (похибка, температурні та часові дрейфи), але є й такі, що спеціально проектувалися як базові вузли прецизійних ВС – наприклад, серії мікроконверторів ADuC-8xx та ADuC-7xxx виробництва Analog Devices, сімейство мікроконтролерів MSP430 виробництва Texas Instruments. Деякі типи поєднують прецизійні 24 розрядні багатодіапазонні сигма-дельта АЦП з популярними мікроконтролерами.

Розробленням прецизійних АЦП займалися фірми Analog Devices, Texas Instruments, Burt-Brown, Fluke, National Instruments, ВНИИЭП (Ленінград), Інститут кібернетики (Київ), Вінницький НТУ, НДКІ ЕЛВІТ і СКБ МП (Львів). Крім того, прецизійні цифрові вольтметри розробляли ЗІП (Краснодар) і МАИ (Москва).

Результати перетворення АЦП потрібні для прийняття різноманітних рішень, тому важливо, щоби вони адекватно відображали фізичні величини, які у вигляді електричних сигналів надходять на вхід АЦП. Така вимога тісно пов'язана з проблемою встановлення, зберігання та відтворення фізичних величин з відповідною точністю, тому АЦП зазвичай є метрологічно значущим вузлом, а його метрологічні характеристики підлягають атестації. Однією з фундаментальних вимог метрології є вимога єдності вимірювань, яка, за ДСТУ 2681-94, визначається як такий стан вимірювань, за якого їх результати виражають в узаконених одиницях і похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю. Щодо АЦП єдність вимірювань полягає в тому, що їх функція перетворення (ФП) відповідає вимогам стандартів. Допустимі відхилення ФП задають границями основної та додаткової допустимої похибок результату перетворення під час експлуатації в нормальних і робочих умовах відповідно. Такий порядок нормування зумовлений необхідністю забезпечити метрологічну надійність АЦП, тобто задану ймовірність того, що границі допустимих похибок результатів перетворення АЦП не будуть перевищені. Тому показник якості АЦП – похибка перетворення – контролюється як під час його виробництва, так і в процесі експлуатації.

Розробленням методів метрологічного забезпечення АЦП займалися NIST, Fluke (США), ВНИИЭП і ВНИИМ (Ленінград), НТУУ “КПІ” (Київ), ННЦ “Метрологія” (Харків), ДНДІ “Система” (Львів).

Аналіз нормативних документів, стандартів та інструкцій з експлуатації різних

ВС і практики їх експлуатації дав змогу виявити протиріччя щодо метрологічного забезпечення прецизійних АЦП під час їх масового випуску: між трудомісткістю випуску АЦП (групові технології) та трудомісткістю їх перевірок (індивідуально перевіряють окремі кристали), тобто за рахунок перевірок вартість кристалів АЦП зростає на 40-50 відсотків; між необхідністю перевірки АЦП та її трудомісткістю з погляду користувачів (для цього треба зупинити ВС, демонтувати АЦП, доставити в метрологічну лабораторію, провести перевірку, повернути і вмонтувати АЦП у ВС та запустити її експлуатацію); між перевіркою АЦП та втратами через затримку експлуатації ВС (можуть істотно перевищувати затрати на перевірку); між збільшенням інтервалу між перевірками АЦП (ухилянням від повірки) та зменшенням метрологічної надійності (зростання небезпеки техногенних катастроф); між кількістю АЦП в експлуатації та кваліфікацією (з погляду метрологічного забезпечення) обслуговуючого персоналу. Внаслідок цих протиріч цілі групи АЦП не охоплені з метрологічним наглядом (наприклад, АЦП, вбудовані у ВС автомобілів).

Як впливає з викладеного, масовий випуск АЦП створює або загострює цілий ряд протиріч. Вони тісно пов'язані між собою, вирішення одного з них істотно не покращує ситуацію. Отже, наведений вище комплекс протиріч створює науково-технічну проблему, яку можна сформулювати як проблему забезпечення єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах масового виробництва та використання АЦП. Ця проблема потребує комплексного вирішення і має ряд аспектів – наукові, технічні, організаційні, економічні. Насамперед треба вирішити її наукові аспекти. Проведений аналіз показав, що перспективним напрямом вирішення вказаної проблеми є оснащення кожного АЦП системою метрологічної самоперевірки. Основні вимоги до неї – надійність (як функціональна, так і метрологічна); технічна ефективність (достатня точність у робочих умовах експлуатації АЦП); економічна ефективність (малі собівартість та трудомісткість метрологічного обслуговування); можливість виконати самоперевірку не перериваючи функціонування АЦП у складі ВС.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в межах: держбюджетної теми кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету “Львівська політехніка” “Вдосконалення теорії проектування NoC з матричною топологією” (2012 р. № держ. реєстр. 0112U006717); держбюджетної науково-дослідної роботи за планом Міносвіти України “Динамічно репрограмований мережевий прикладний процесор, здатний працювати в Інтернеті” (2007 р. № держ. реєстр. 0107U005985); спільного науково-дослідного українсько-італійського проекту № М/79-2004 “Розробка Web-базованої вимірювальної системи з розподіленим інтелектом”, що виконувався відповідно до Виконавчої програми співробітництва в галузі освіти, культури та науки на 2004-2006 рр.; грантів фонду цивільних досліджень та розвитку США (US Civilian Research & Development Foundation) – “Dynamically reprogrammable network capable application processor with Internet capability” (2007 – 2008 рр. № UKC2-005073-KV-07), та “Investigation of the Intelligent Properties of Re-Configurable Network Capable Application Processor in Adaptive Distributed Instrumentation and Control Systems” (2004 – 2006 рр. № UE2-2534-TE-03); гранту НАТО за програмою Cooperative

Science and Technology – “Development of Intelligent Precision System for Thermal Objects Control” (2003 – 2005 p. № PST.CLG.977647).

**Мета і завдання дослідження.** Розроблення теорії та методів підтримки єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах широкомасштабного виробництва та використання аналого-цифрових перетворювачів у вимірювальних системах.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати прийняті методи і засоби метрологічного обслуговування АЦП на всіх етапах життєвого циклу.
2. Сформулювати необхідні та достатні вимоги до системи автоматичного метрологічного обслуговування АЦП в процесі експлуатації, що відповідають чинним нормативним документам.
3. Створити та дослідити методи визначення похибки нелінійності прецизійних АЦП для побудови систем їх метрологічної самоперевірки та корекції похибок.
4. Дослідити характер нелінійності функції перетворення прецизійних сигма-дельта АЦП, а також особливості їх метрологічної самоперевірки та корекції похибок.
5. Розробити концепцію побудови систем бездемонтажної метрологічної самоперевірки АЦП в процесі експлуатації та проаналізувати особливості її впровадження в системи, в яких використовуються прецизійні АЦП.
6. Дослідити особливості ВС, у яких використовуються прецизійні АЦП з метрологічною самоперевіркою в процесі експлуатації.

**Об'єкт дослідження.** Процес забезпечення єдності вимірювання та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення.

**Предмет дослідження.** Система метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП у процесі експлуатації.

**Методи дослідження.** Методи аналізу та синтезу електричних кіл, теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки та метрології, математичного та імітаційного моделювання, статистичної обробки даних, цифрової обробки сигналів.

**Наукова новизна одержаних результатів .** Вперше:

1. Доведено, що середнє арифметичне значення спадів напруги на всіх резисторах багаторезисторного подільника напруги строго дорівнює вхідній напрузі подільника, поділеній на кількість резисторів, і не залежить від значень опорів цих резисторів, що дає змогу сформулювати прецизійну точку визначення нелінійної складової похибки АЦП без використання прецизійних резисторів, оскільки багаторезисторний подільник напруги вносить лише теплові шуми своїх резисторів у похибку цієї точки.
2. Запропоновано базовий метод формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП. Суть методу полягає у аналого-цифровому перетворенні спадів напруги на групах послідовно з'єднаних резисторів багаторезисторного подільника напруги, який складається з  $N$  резисторів (кількість резисторів у групі змінюється для кожної сформованої точки і становить  $\{k_1, \dots, k_T\}$  резисторів, де  $\{k_1, \dots, k_T\}$  – дільники  $N$ ). Подільник під'єднано до джерела напруги калібрування АЦП. Це дає змогу сформулювати  $T$  точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, причому похибка формування цих точок відповідає п.1.
3. Доведено, що в разі корекції нелінійної складової похибки АЦП на кожному з

відрізків між точками визначення його нелінійної складової похибки, максимальне значення невиключеної похибки пропорційне до довжини цього відрізка. Це дало змогу виділити частини діапазону перетворення (нижню та верхню), які після корекції нелінійної складової похибки АЦП згідно з базовим методом мають різну точність перетворення.

4. Запропоновано методологію формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП у вигляді узагальненого набору правил, яка дала змогу запропонувати нові методи формування цих точок, розміщених рівномірніше (порівняно з базовим методом) на діапазоні перетворення АЦП.
5. Запропоновано сім методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що забезпечують, згідно із запропонованою методологією, прецизійне формування 3 ... 31 таких точок з рівномірнішим (порівняно з базовим методом) розподілом на діапазоні перетворення АЦП:
  - метод 1, який передбачає формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП для нижчого діапазону перетворення АЦП як спадів напруги на послідовно з'єднаних резисторах багаторезисторного подільника напруги, виміряних у нижній частині вищого діапазону перетворення АЦП, де висока точність забезпечується корекцією похибок базовим методом;
  - метод 2, який передбачає використання базового методу на вищому і нижчому діапазонах перетворення АЦП та калібрування нижчого діапазону за результатом вимірювання на вищому діапазоні перетворення АЦП спаду напруги на послідовно з'єднаних резисторах багаторезисторного подільника напруги;
  - метод 3, який ґрунтується на тому, що точки визначення нелінійної складової похибки АЦП, сформовані згідно з методом № 2, доповнюються точками, сформованими за методом № 1;
  - метод 4, який відрізняється від базового методу тим, що напругу прецизійного джерела живлення багаторезисторного подільника вибирають у декілька разів вищою, ніж діапазон перетворення АЦП, а напруга калібрування АЦП формується як одна з точок визначення нелінійної складової похибки АЦП такого подільника;
  - метод 5, оснований на використанні базового методу для корекції похибки нелінійності АЦП у нижній половині діапазону перетворення та передбачає формування  $N-1$  точок визначення нелінійної складової похибки АЦП як спадів напруги на послідовно з'єднаних резисторах багаторезисторного подільника, починаючи від першого і до  $N-1$  - го, з яких: напруга  $N/2$  сформованих точок (з меншими значеннями напруги) безпосередньо вимірюється АЦП, а напруга решти сформованих точок розраховується як сума двох результатів безпосередніх вимірювань спадів напруги на резисторах: починаючи від першого до  $N/2$  -го, та від  $N/2+1$  -го;
  - метод 6, який ґрунтується на формуванні точок визначення нелінійної складової похибки АЦП комутацією порядку увімкнення резисторів багаторезисторного подільника матричним комутатором і ввімкненні всіх можливих комбінацій резисторів з  $N$  по  $k$  (де  $k$  – кількість резисторів, на яких вимірюється спад напруги);

- метод 7, який передбачає використання чотирьох резисторного подільника напруги та формування точок 25 і 50 % діапазону перетворення згідно з базовим методом, а також попарне перемикання послідовності увімкнення резисторів з метою дослідження всіх можливих комбінацій резисторів з чотирьох по три для формування точки 75 % діапазону перетворення.
6. Створено імітаційну модель однобітних сигма-дельта модуляторів, яка дає змогу задавати параметри його компонентів та досліджувати вплив цих параметрів на параметри модулятора загалом. Це дало змогу дослідити характер нелінійної складової функції перетворення АЦП на базі модуляторів першого, другого та третього порядків, сформулювати рекомендації щодо оптимізації параметрів компонентів таких модуляторів для того, щоби підвищити ефективність корекції нелінійної складової функції перетворення АЦП і показати, що їх нелінійність визначається лише нелінійністю першого інтегратора.
  7. Запропоновано концепцію бездемонтажної метрологічної самоперевірки АЦП в процесі експлуатації шляхом поєднання необхідних і достатніх процедур – встановлення нуля, калібрування та визначення нелінійної складової похибки АЦП за допомогою розроблених методів формування відповідних точок, а також запропоновано метод опрацювання результатів цієї самоперевірки, що дає змогу адекватно оцінити похибку поточного результату перетворення з врахуванням процедур корекції адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки АЦП, зводить метрологічне обслуговування АЦП до періодичної заміни джерела напруги калібрування, забезпечує єдність вимірювань, підвищує метрологічну надійність результатів перетворення, зменшує навантаження на метрологічні лабораторії.
  8. Отримав подальший розвиток метод заміщення за рахунок поширення його на вимірювальні канали, в яких використовуються АЦП, для чого визначено критерії придатності таких АЦП, запропоновано метод дослідження їх придатності та оцінено похибку результатів вимірювань за методом заміщення із застосуванням АЦП, що дало змогу підвищити точність результату вимірювання такими каналами загалом.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Досліджено:
  - оцінку впливу зразкового обладнання на похибку визначення нелінійної складової похибки АЦП гістограмним методом та часу її визначення, що дало змогу зробити висновок про непридатність цього методу для метрологічної самоперевірки прецизійних багаторозрядних АЦП;
  - залежність похибки вимірювання опору за методом заміщення від нелінійної складової похибки прецизійних АЦП, що дало змогу цілеспрямовано вибирати структуру та параметри перехідної міри опору під час синтезу вимірювального каналу;
  - залежності невиключеної похибки самонагрівання термометрів опору струмом від співвідношення робочих струмів та їх значення під час корекції цієї похибки, що дало змогу оцінити величину цієї похибки та цілеспрямовано вибрати режим роботи вимірювальної схеми;

- залежність форми функції нелінійної складової похибки однобітних сигма-дельта модуляторів від співвідношення струмів заряджання та розряджання інтеграторів, що дало змогу цілеспрямовано вибрати значення такого співвідношення, щоб спростити цю функцію та підвищити ефективність корекції нелінійної складової похибки однобітних сигма-дельта модуляторів.
- 2. Сформульовано критерій визначення лінійного режиму роботи однобітних сигма-дельта модуляторів, що дає змогу розраховувати параметри компонентів модулятора для заданого діапазону перетворення.
- 3. Розроблено:
  - алгоритм та програму, що реалізує імітаційну модель однобітного сигма-дельта модулятора з довільною кількістю контурів зворотного зв'язку, що дало змогу дослідити вплив параметрів компонентів модулятора на його похибку;
  - декілька систем метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП, що дало змогу підвищити їх метрологічну надійність;
  - методику вимірювання опору за методом заміщення за допомогою АЦП, що дало можливість сформулювати вимоги до цих АЦП та оцінити похибку результату перетворення;
  - алгоритми та програми оброблення результатів перетворення, що реалізують запропоновані методи формування точок метрологічної самоперевірки АЦП.

Отримані результати використано у: ВАТ ЛьвівОРГРЕС, ВП «Вагонне депо Клепарів» Державного галузевого об'єднання «Львівська залізниця», Інституті електродинаміки НАН України, а також в навчальному процесі кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету «Львівська політехніка», а саме в курсах: «Інформаційно-вимірювальні обчислювальні системи», «Дослідження та проектування вбудованих комп'ютерних систем», дипломному проектуванні, магістерських роботах та дослідженнях аспірантів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, подані в дисертації, автор отримав особисто. В наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: у [2, 3, 40] реалізація вимірювального каналу; [5, 42] реалізація програмного забезпечення мікроконтролерів, яка орієнтована на використання у ВС; [6, 34, 39, 41, 50, 55, 61] обґрунтування, формальний опис та методика дослідження запропонованого методу; [7] реалізація програмного забезпечення контролера вимірювального каналу; [37] реалізація системи дослідження похибки; [30, 31, 32, 36, 37, 38, 43, 44] реалізація апаратного та програмного забезпечення, що забезпечує дистанційне перепрограмування мікроконтролерів; [45, 46] розроблення імітаційної моделі модулятора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, наукові результати та практичні розробки дисертації доповідались та обговорювались на національних і міжнародних конференціях та презентувалися у збірниках наукових праць: IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (Sophia, Bulgaria, 2005; Dortmund, Germany, 2007; Cosenza, Italy, 2009; Prague, Czech Republic, 2011); IEEE Sensors Applications Symposium (Houston, USA, 2006); International Conference «Modern problems of radio



engineering, telecommunications and computer science» (Lviv – Slavske, Ukraine, 2006, 2010, 2012); 23-rd IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC/2006 (Sorento, Italy, 2006); IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications – MeMeA 2007 (Warsaw, Poland, 2007); 6-th International Conference on Electrical and Control Technologies (Kaunas, Lithuania, 2011); 1-st International Workshop “Critical Infrastructure Safety and Security (Kirovograd, Ukraine, 2011); 12-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" (Kostryna, Ukraine, 2011); Міжнародної науково-практ. конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” (Хмельницький, 2007); XV Міжнародного семінару метрологів “Методи і техніка перетворення сигналів при фізичних вимірюваннях” (Жешув – Львів, 2007); Міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах” (Вінниця, 2008, 2010, 2012); Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні комп’ютерні системи та мережі: розробка та використання” (Львів, 2009, 2011); науково-технічної конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації” (Львів, 2010, 2012); Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Харків, 2010, 2012); 4 Всеукраїнської науково-технічної конференції “Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ” (Львів, 2011); Міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління” (Бучач, 2011, 2012); 18 Міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика – 2011” (Львів, 2011); Всеукраїнської школа-семінару молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (Тернопіль, 2011, 2012); IX Міжнародної науково-технічної конференції “Методи і засоби вимірювань фізичних величин – Температура-2012” (Львів, 2012); на наукових семінарах: відділу перетворювачів форми інформації Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова Національної академії наук України, відділу електричних і магнітних вимірювань Інституту електродинаміки Національної академії наук України, Західного наукового центру Національної Академії Наук України.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 72 наукові праці (9 входять в міжнародну наукометричну базу SCOPUS), з них: одна монографія, одна стаття у науковому журналі, 28 статей у фахових наукових виданнях України (з них 21 одноосібна), 3 статті у закордонних періодичних наукових виданнях, 4 патенти на винаходи, 35 доповідей в тезах та матеріалах міжнародних та національних конференцій.

**Структура та обсяг роботи:** дисертація складається з вступу, шести розділів та висновків, викладених на 321 сторінці, містить 133 рисунки і 15 таблиць, перелік посилань і додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, мету та задачі дослідження. Показано зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано наукову новизну отриманих результатів та їхню практичну цінність, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У першому розділі, зважаючи на зростання виробництва АЦП як окремих мікросхем та оснащення АЦП більшості мікроконтролерів, сформульовано наукову проблему, яку вирішено у дисертації, проаналізовано похибки АЦП і методи їх визначення, вказано непридатність цих методів для побудови системи вбудованої метрологічної самоперевірки АЦП і запропоновано напрями вирішення проблеми.

Широкомасштабне тиражування АЦП, особливо в складі мікроконтролерів та вбудованих систем (систем на кристалі, System on Chip), суперечить із:

1. Вимогами забезпечення єдності вимірювань та їх метрологічної надійності через збільшення кількості АЦП, що повинні пройти метрологічну перевірку, та обмеженими ресурсами уповноважених метрологічних лабораторій. Автоматизація цієї перевірки є капіталомісткою і загострює інші протиріччя.
2. Трудомісткістю метрологічної перевірки АЦП з погляду користувачів (для її проведення треба призупинити експлуатацію ВС, демонтувати АЦП, доставити в метрологічну лабораторію, виконати перевірку, доставити назад, вмонтувати АЦП у ВС та запустити її в експлуатацію). Як впливає з цього, трудомісткість самої метрологічної перевірки АЦП з погляду користувача є невеликою частиною загальної трудомісткості метрологічного обслуговування АЦП.
3. Неперервним характером багатьох сучасних технологічних процесів, через що втрати користувача від затримки експлуатації ВС можуть значно перевищувати витрати на метрологічну перевірку АЦП.
4. Метрологічною надійністю вимірювань і вибором максимального інтервалу між метрологічними перевірками (ухилянням від метрологічного обслуговування), що підвищує аварійність та небезпеку техногенних катастроф.
5. Очікуваним потоком АЦП, що повинні проходити метрологічну перевірку, та дійсними потребами в ресурсах уповноважених лабораторій. Враховуючи вказані вище протиріччя, коректно оцінити кількість АЦП, що потребують перевірки, практично неможливо.
6. Експлуатацією щоразу складніших ВС фахівцями невисокої кваліфікації з погляду метрології, які не оцінюють адекватно наслідків метрологічної відмови.
7. Кількістю фірм, що випускають АЦП та ВС, і увагою, до їх метрологічного забезпечення. Багато виробників АЦП характеризують їх параметри недостатньо, наприклад, для АЦП у мікроконтролерах основна увага приділена типу і функціям інтерфейсу.
8. Розробленням ВС фахівцями які, в технічній документації плутають точність з розрядністю та не враховують дії впливних величин, або фахівцями з програмного забезпечення, які не звертають уваги на метрологічні параметри.

Відповідно до перелічених протиріч цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, що входять у вбудовані ВС автомобілів) не охоплені метрологічним наглядом. Для деяких з цих груп протиріччя між необхідністю метрологічного обслуговування АЦП і ризиком виникнення аварій та техногенних катастроф різко загострюється (зокрема, для ВС, що впливають на здоров'я та безпеку людей) і може призводити до кримінальної відповідальності за недотримання правил техніки безпеки.

Отже, масовий випуск АЦП створює або загострює цілий ряд протиріч. Вони тісно взаємопов'язані, вирішення одного з них не дає змоги істотно покращити ситуацію. Цей комплекс протиріч створює проблему, яку можна сформулювати як

забезпечення єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах масового виробництва та використання АЦП. Ця проблема потребує комплексного вирішення і має цілий ряд аспектів – наукові, технічні, організаційні, економічні. У дисертації вирішуються наукові та технічні аспекти цієї проблеми. Основним напрямом вирішення проблеми вибрано оснащення прецизійних АЦП вбудованою системою метрологічної самоперевірки в процесі експлуатації (без переривання їх експлуатації).

Насамперед, проаналізовано відомі методи визначення похибки АЦП у процесі експлуатації. Виявлено, що методи встановлення нуля та калібрування (ВНТК) для системи метрологічної самоперевірки АЦП необхідні, але не достатні. Показано, що: (i) у разі деградації АЦП і елементів, що його супроводжують може зростати також нелінійна складова похибки функції перетворення (ФП) АЦП, яку процедури встановлення нуля та калібрування приховують; (ii) без аналізу нелінійної складової похибки неможливо зробити обґрунтований висновок про доцільність ВНТК (рис. 1). Тому треба доповнити процедури ВНТК процедурами визначення похибки АЦП у середині діапазону перетворення. Згідно з вимогами чинних стандартів ВНТК необхідно доповнити, як мінімум, трьома точками визначення нелінійної складової похибки (для АЦП з неперервною функцією систематичної похибки).



Рис. 1. Зміни похибки ФП АЦП при ВНТК

Аналіз показав, що відомі методи визначення нелінійності ФП АЦП для побудови систем самоперевірки прецизійних АЦП непридатні для використання (зокрема, гістограмний метод, рекомендований стандартом IEEE-1241, потребує низького рівня гармонік і є надто повільним). Для вирішення проблеми запропоновано

використати багаторезисторний подільник напруги (БРПН), під'єднаних до джерела напруги калібрування (ДНК) АЦП.

У другому розділі для побудови системи метрологічної самоперевірки АЦП запропоновано методологію використання БРПН, підключеного до ДНК АЦП, як вимірювального перетворювача для формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП.

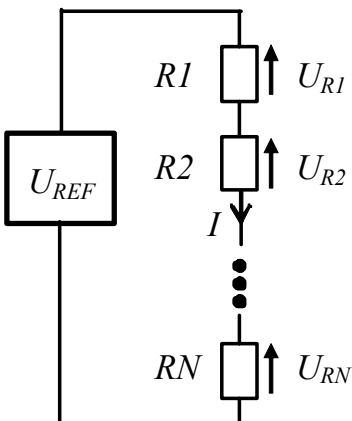


Рис. 2. Схема БРПН

**Твердження 1.** Коефіцієнт передачі подільника напруги, що складається з послідовно ввімкнених  $N$  резисторів, якщо брати середнє арифметичне спадів напруги на всіх резисторах, строго дорівнює  $1/N$ .

**Доведення.** Нехай подільник напруги, що складається з  $N$  резисторів  $R_1, \dots, R_N$ , підімкнено до ДНК АЦП  $U_{REF}$  (рис. 2). Згідно із другим законом Кірхгофа можна записати

$$U_{REF} = \sum_{i=1}^N U_{Ri} \quad (1)$$

де  $U_{Ri}$  – спад напруги на резисторах  $R_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Середнє арифметичне спадів напруги  $\bar{U}$  на всіх резисторах визначається як

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{Ri} \quad (2)$$

Підставивши (1) в (2), отримаємо

$$\bar{U} = \frac{1}{N} U_{REF} \quad (3)$$

що і треба було довести. Аналогічний результат одержано в дисертації також іншим способом. Висновки з твердження 1:

1. Значення опорів резисторів подільника не впливають на середнє арифметичне спадів напруги на всіх резисторах подільника.
2. Враховуючи, що  $N$  – натуральне число, відносна похибка  $\delta_{\bar{U}}$  середнього арифметичного прямує до похибки ДНК АЦП  $\delta_{REF}$

$$\delta_{\bar{U}} = \delta_{REF} + \delta_{RND} \quad (4)$$

де  $\delta_{RND}$  – випадкова похибка напруги подільника, що визначається тепловими шумами резисторів подільника, яка для смуги частот прецизійних АЦП за вихідного опору подільника 1 кОм не перевищує 5 нВ (відповідає похибці дискретності для АЦП з розрядністю 29 бітів). Це дає підстави стверджувати, що вимірювальний перетворювач на базі БРПН з усередненням спадів напруг на всіх резисторах є практично ідеальним вимірювальним перетворювачем з метрологічного погляду.

3. БРПН, якщо брати середнє арифметичне спадів напруги на всіх резисторах, є вимірювальним перетворювачем, для метрологічної перевірки якого достатньо опробування.

Наслідки з твердження 1:

1. Похибка масштабного вимірювального перетворювача на базі БРПН дає змогу створити систему метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП.
2. Похибка такої метрологічної перевірки пов'язана, передусім, з похибкою ДНК.
3. Єдність результатів аналого-цифрового перетворення забезпечує метрологічне обслуговування ДНК, що дає змогу отримати зв'язок з еталоном напруги згідно зі схемою повірки;
4. Досягнути необхідної точності метрологічної самоперевірки можливо вибравши відповідний ДНК;
5. Необхідно дослідити вплив АЦП на похибку самоперевірки.

Розглянемо механізм впливу похибки АЦП на похибку самоперевірки. Якщо не враховувати випадкової складової похибки АЦП, то в результаті аналого-цифрового перетворення вхідної напруги  $U$  на код одержимо результат  $C$

$$C = C_0 + \frac{C_{REF} - C_0}{U_{REF}} U + f(U) \quad (5)$$

де  $C_0$  – результат перетворення каналу встановлення нуля;  $C_{REF}$  – результат перетворення каналу калібрування (на вхід АЦП подається напруга  $U_{REF}$  ДНК);  $f(U)$  – нелінійна складова ФП АЦП.

Результат перетворення  $C_{Ri}$  спадів напруги на резисторах подільника  $R_i$  буде

$$C_{Ri} = C_0 + \frac{C_{REF} - C_0}{U_{REF}} U_{Ri} + f(U_{Ri}), \quad i = \overline{1, N} \quad (6)$$

У разі перетворення напруги ДНК  $U_{REF}$  отримаємо

$$C_{REF} = C_0 + \frac{C_{REF} - C_0}{U_{REF}} U_{REF} + f(U_{REF}) , \quad (7)$$

де  $f(U_{REF})$  – нелінійна складова ФП АЦП, для напруги калібрування  $f(U_{REF}) = 0$  .

Враховуючи (6), (7) та прирівнюючи (2) до (3), можна записати

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{Ri} - C_0 - f(U_{Ri})}{C_{REF} - C_0} U_{REF} = \frac{1}{N} \frac{C_{REF} - C_0 - f(U_{REF})}{C_{REF} - C_0} U_{REF} . \quad (8)$$

Спростивши (8) та враховуючи, що  $f(U_{REF}) = 0$  , отримаємо

$$\sum_{i=1}^N (C_{Ri} - C_0 - f(U_{Ri})) = C_{REF} - C_0 . \quad (9)$$

Середнє арифметичне значень функції нелінійності в точках метрологічної перевірки  $\overline{f(U_{Ri})}$  можна обчислити як  $\overline{f(U_{Ri})} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U_{Ri})$  .

Якщо (9) підставити у (8) і знайти звідти  $\overline{f(U_{Ri})}$  , то одержимо

$$\overline{f(U_{Ri})} = \frac{C_{REF} - C_0 - f(U_{REF}) - \sum_{i=1}^N (C_{Ri} - C_0)}{N} = \frac{C_{REF} - C_0 - \sum_{i=1}^N (C_{Ri} - C_0)}{N} . \quad (10)$$

Середнє арифметичне  $\overline{f(U_{Ri})}$  є значенням інтегральної нелінійності АЦП, що перевіряють, в точці перевірки  $\overline{U} = \frac{U_{REF}}{N}$  . Для нелінійних функцій  $\overline{f(U_{Ri})} \neq f(\overline{U})$  виникає інструментальна похибка  $\Delta_I$  самоперевірки АЦП, яка дорівнює

$$\Delta_I = \overline{f(U_{Ri})} - f(\overline{U}) . \quad (11)$$

Максимуму  $\Delta_{IMAX}$  інструментальної похибки  $\Delta_I$  буде досягнуто, коли функція нелінійності  $f(U)$  має локальний екстремум в точці  $\overline{U}$  (така ситуація зображена на рис. 3). Значення  $\Delta_{IMAX}$  , якщо взяти за основу точку  $U_{RMIN}$  , оцінимо як

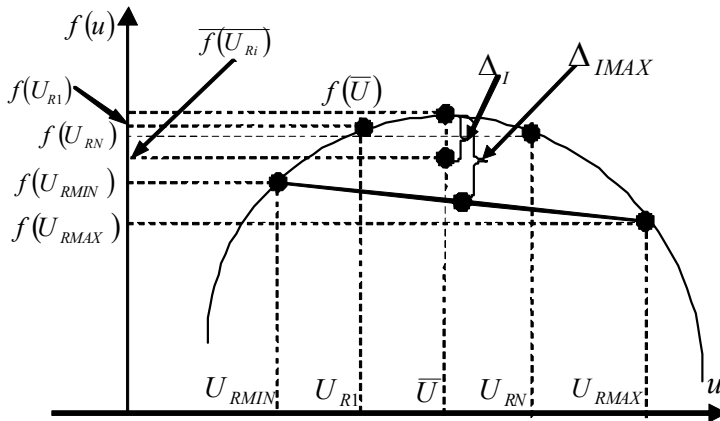


Рис. 3. Виникнення інструментальної похибки під час визначення інтегральної нелінійності АЦП

$$|\Delta_I| \leq |\Delta_{IMAX}| = \left| f(\overline{U}) - \frac{f(U_{RMIN}) + f(U_{RMAX})}{2} \right| , \quad (12)$$

де  $U_{RMIN}$  ,  $U_{RMAX}$  – напруги на резисторах з мінімальним та максимальним опором відповідно.

Значення  $f(\overline{U})$  оцінимо як

$$f(\overline{U}) \leq f(U_{RMIN}) + f'(U_{RMIN}) \cdot (\overline{U} - U_{RMIN}) , \quad (13)$$

де  $f'(U_{RMIN})$  – похідна функції нелінійності АЦП в точці  $U_{RMIN}$  .

Аналогічно можна записати

$$f(U_{RMAX}) \leq f(U_{RMIN}) + f'(\overline{U}) \cdot (U_{RMAX} - U_{RMIN}) , \quad (14)$$

де  $f'(\overline{U})$  – похідна функції нелінійності АЦП у точці  $\overline{U}$  . Крім того, з рис.3 видно, що

$$|\overline{U} - U_{RMIN}| \leq |U_{RMAX} - \overline{U}| \leq \frac{|\Delta_{MAX}|}{R} \cdot \frac{U_{REF}}{N} , \quad (15)$$

де  $\Delta_{MAX}$  – максимальне відхилення опору резисторів від середнього значення.

Відносно точки  $U_{RMIN}$  вираз (15), враховуючи (12) – (14), можна записати як

$$|\Delta_{IMAX}| \leq \frac{\Delta_{MAX}}{R} \cdot \frac{U_{REF}}{N} \cdot |f'(U_{RMIN}) - f'(\bar{U})| \quad (16)$$

Вираз  $\frac{\Delta_{MAX}}{R} \cdot \frac{U_{REF}}{N}$ , що входить у (16), є максимальним абсолютним відхиленням спаду напруги на резисторах БРПН, яке визначається максимальним відносним відхиленням опору резисторів БРПН від їх середнього значення. Якщо резистори БРПН  $R_1, \dots, R_N$  мають однакові номінальні значення опору з допустимим відхиленням  $\delta_R$ , то  $\frac{\Delta_{MAX}}{R} \leq \delta_R$ . Отже, (16) можна записати як

$$|\Delta_{IMAX}| \leq \delta_R \cdot \frac{U_{REF}}{N} \cdot |f'(U_{RMIN}) - f'(\bar{U})| \quad (17)$$

Оцінка  $\Delta_{IMAX}$  для АЦП з неперервною функцією похибки показала, що вона менша за похибку дискретності прецизійних АЦП, отже, нею можна нехтувати.

На основі твердження 1 запропоновано так званий базовий метод формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП. Його суть полягає у збільшенні кількості точок визначення нелінійності перетворенням  $m$  спадів напруги на  $k$  послідовно з'єднаних резисторах БРПН (рис. 4), що складається з  $N = m \times k$  резисторів.  $N$  вибирають так, щоби мати множину натуральних чисел  $\{m_1, \dots, m_T\}$  – дільників  $N$ , тоді існує множина натуральних чисел  $\{k_1, \dots, k_T\}$ , що задовольняють умові  $N = m_i \times k_i; i = \overline{1, T}$ .

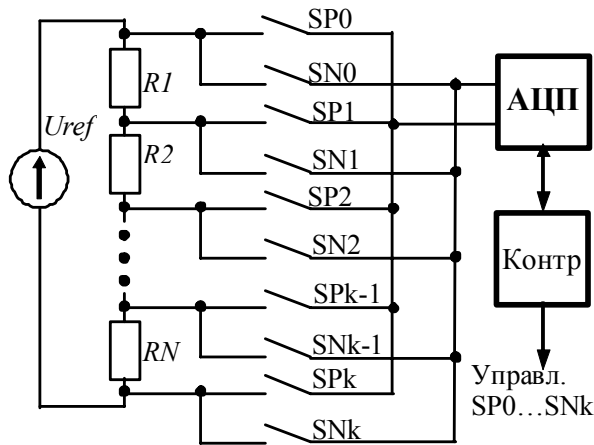


Рис. 4. Структурна схема реалізації базового методу формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

Це дає змогу отримати  $T$  точок визначення нелінійної складової похибки АЦП одним подільником

$$\bar{U}_i = \frac{U_{REF}}{N} m_i; \quad i = \overline{1, T} \quad (18)$$

Для  $N = 12$  базовий метод дає п'ять точок визначення нелінійності ФП АЦП (рис. 5). Кількість точок можна збільшити, вибираючи  $N$ . Згідно з (4) похибка  $\bar{U}_i$  мала і визначена в явному вигляді, тому доцільно її коригувати.

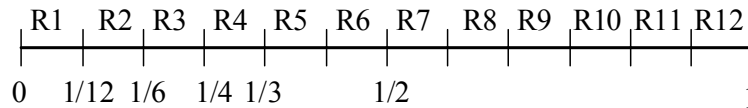


Рис. 5. Розміщення сформованих точок визначення нелінійної складової похибки АЦП за базовим методом

Для дослідження базового методу розроблено методику, яка передбачає:

1. Задання випадкових відхилень опорів резисторів БРПН від номінального, а також шуму АЦП у заданих межах, що відповідають нормованим значенням.
2. Задання інтегральної нелінійності ФП АЦП як випадкових відхилень у точках її визначення та перевірку на неперевіщення нормованого значення у 100 точках.
3. Формування дійсної ФП АЦП (з урахуванням заданих значень адитивної,

мультиплікативної та нелінійної складових похибки перетворення).

4. Імітацію встановлення нуля та калібрування АЦП з урахуванням шуму АЦП.
5. Імітацію визначення похибки нелінійності ФП АЦП згідно з одним із запропонованих методів з урахуванням шуму АЦП.
6. Розрахунок коефіцієнтів коригувального полінома (згідно з пп. 4, 5).
7. Імітацію результатів перетворення АЦП у 100 точках діапазону (згідно з п. 3).
8. Корекцію результатів перетворення АЦП (згідно з п. 6).
9. Визначення та збереження невиключеної похибки АЦП у цих точках діапазону.

Приклади імітованих функцій похибки нелінійності АЦП та максимальні додатні та від'ємні їх значення представлено на рис. 6.



Рис. 6. Приклади функцій, що імітують інтегральну нелінійність АЦП

Дослідження впливу розкиду опору резисторів БРПН на максимальну невиключену похибку визначення нелінійності ФП АЦП показало, що за розкиду опору резисторів  $\pm 1\%$  вона не перевищує 0,27 кванта, тому нею можна нехтувати.

Дослідження впливу шуму АЦП на невиключену похибку визначення похибки нелінійності ФП АЦП для базового методу, за шуму  $\pm 6$  квантів і максимальної нелінійності  $\pm 250$  квантів показали, що базовий метод для всього діапазону (рис. 7) неефективний. Невиключена похибка різко зростає саме там, де густина точок визначення похибки нелінійності ФП АЦП мала. Для нижньої половини діапазону (де сконцентровані точки визначення похибки нелінійності ФП АЦП базовим методом) невиключена похибка співмірна з шумом АЦП і перевищує його лише в околі точки 5/12 діапазону, де немає точки визначення похибки нелінійності ФП АЦП (рис. 8). Отже, ефективність базового методу для нижньої половини діапазону перетворення АЦП висока. Тому необхідно дослідити залежність невиключеної похибки від розміщення точок визначення нелінійності.

**Твердження 2.** Максимальне значення невиключеної похибки нелінійності АЦП на деякому відрізку між точками її визначення пропорційне до довжини відрізка.

**Доведення.** Похибку від невиключеної нелінійності  $f(x)$  можна визначити як

$$f(x) = g(x) - h(x),$$

де  $g(x)$  – дійсна нелінійність ФП АЦП;  $h(x)$  – функція нелінійності АЦП, апроксимована за значеннями  $g(x)$ , одержаними в деякій множині з  $T$  точок визначення нелінійності  $X_i^{ТВН}$ ,  $i = \overline{1, T}$ , кожна з яких отримана під час метрологічної

перевірки з використанням твердження 1.

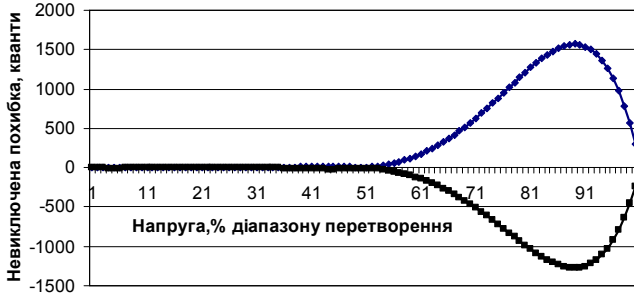


Рис. 7. Максимальна невиключена похибка для базового методу, шум АЦП  $\pm 6$  квантів

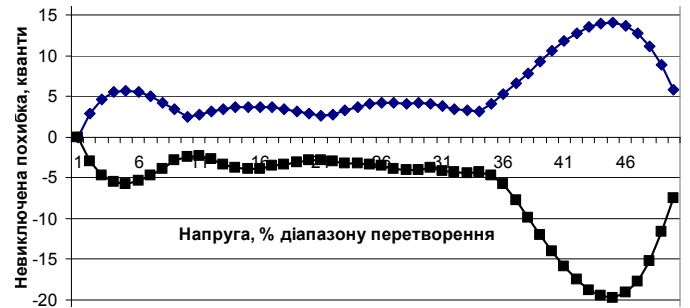


Рис. 8. Максимальна невиключена похибка в нижній половині діапазону АЦП для базового методу, шум АЦП  $\pm 6$  квантів

Згідно з твердженням 1,  $h(X_i^{TBH}) \rightarrow g(X_i^{TBH})$ ,  $i = \overline{1, T}$ , отже,  $f(X_i^{TBH}) \rightarrow 0$ ,  $i = \overline{1, T}$ . Тоді для відрізка між точками визначення нелінійності  $[X_i^{TBH}, X_{i+1}^{TBH}]$ ,  $i = \overline{1, T-1}$  можна оцінити як

$$\begin{cases} |f(x)| \geq f(X_i^{TBH}) \\ |f(x)| \geq f(X_{i+1}^{TBH}) \end{cases} x \in (X_i^{TBH}, X_{i+1}^{TBH}), i = \overline{1, T-1}, \quad (19)$$

тобто функція  $f(x)$  має локальний екстремум  $f_{MAX}(x)$  на кожному з відрізків між точками визначення нелінійності АЦП. Його максимальне значення становить

$$f_{MAX}(x) \leq f'_{MAX}(x) \cdot (X_{i+1}^{TBH} - X_i^{TBH}), i = \overline{1, T-1}, \quad (20)$$

де  $f'_{MAX}(x)$  – максимальне значення похідної від функції  $f(x)$  у діапазоні  $[X_i^{TBH}, X_{i+1}^{TBH}]$ ,  $i = \overline{1, T-1}$ . Що і треба було довести.

Крім того, згідно з апроксимаційною теоремою Вейерштрасса, збільшення кількості точок визначення нелінійності підвищує точність апроксимації на кожному відрізку, що також зменшує  $f'_{MAX}(x)$ , яка в граничному випадку дорівнює нулю. Тому збільшення кількості точок визначення нелінійності не тільки зменшує довжину відрізків апроксимації, а і зменшує  $f'_{MAX}(x)$  для кожного відрізка, тобто, згідно з (20), зменшує невиключену нелінійність  $f(x)$ .

Згідно з твердженням 1 БРПН забезпечує точне визначення нелінійності АЦП без використання прецизійних елементів. Але базовим методом не виконуються вимоги нормативних документів до розміщення точок метрологічної перевірки АЦП. А згідно з твердженням 2, невиключена похибка перевірки та/або корекції нелінійності залежить від розміщення точок перевірки. Тому запропоновано методологію вдосконалення базового методу для створення точок метрологічної самоперевірки у верхній частині діапазону перетворення АЦП. Вона передбачає такі підходи:

1. Виділення ділянок діапазону перетворення АЦП з малою похибкою та їх використання для прецизійного вимірювання напруги на комбінаціях резисторів подільника з подальшим розрахунком значень напруги на інших комбінаціях, що потрапляють у ділянки діапазону перетворення АЦП з великою похибкою.
2. Використання базового методу на двох діапазонах перетворення АЦП, розташованих так, щоби деякі точки верхнього діапазону містились у верхній



половині нижнього діапазону.

3. Багатократне використання базового методу на різних діапазонах перетворення АЦП так, щоб на потрібному діапазоні забезпечити розподіл точок відповідно до чинних вимог.
4. Вибір напруги калібрування вищої за діапазон перетворення АЦП та використання однієї з точок визначення нелінійності для калібрування АЦП.
5. Зміна послідовності ввімкнення резисторів БРПН під час визначення нелінійності.
6. Комбінування різних підходів, перелічених у пп. 1 – 5.

**У третьому розділі**, згідно з розробленою методологією, синтезовано сім методів визначення нелінійності ФП АЦП і досліджено залежність їхньої невиключеної похибки від розкиду опору резисторів подільника та шуму АЦП. Для цього використано методику, аналогічну до методики дослідження базового методу.

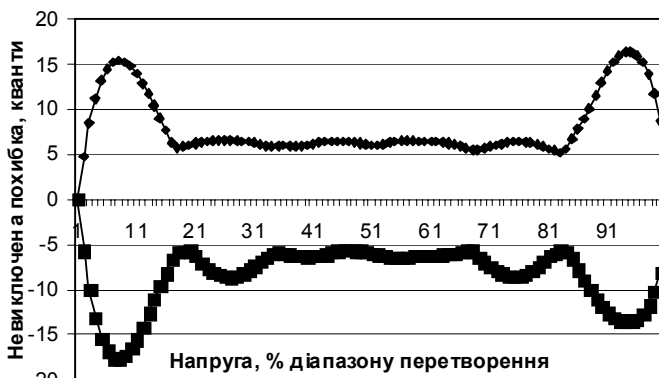
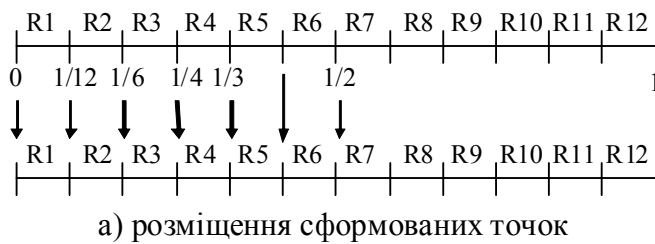


Рис. 9. Метод 1 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

дещо більша порівняно з базовим методом, але вона стосується всього діапазону перетворення АЦП.

Згідно з пп. 2, 3, 6 методології запропоновано метод 2 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що реалізується для  $N$ , кратного 6, і зводиться до використання базового методу для визначення спаду напруги на  $N/2$  послідовно з'єднаних резисторах БРПН, з переходом на вдвічі нижчий діапазон і повторною реалізацією базового методу (спад напруги на  $N/2$  резисторах БРПН буде напругою калібрування на нижчому діапазоні перетворення). Для  $N=12$  буде сформована точка визначення нелінійності, що дорівнює  $2/3$  нижнього діапазону АЦП (рис. 10), що є перевагою методу. Він має також вищу точність порівняно з методом 1, але нерівномірний розподіл точок визначення нелінійності АЦП у діапазоні. Максимальна невиключена похибка від шуму АЦП майже вдвічі більша,

Згідно з пп. 1, 2, 6 методології запропоновано метод 1 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що зводиться до використання базового методу для корекції похибки нелінійності АЦП в нижній частині основного діапазону перетворення та визначенні дійсних спадів напруги на резисторах БРПН від першого до  $N/b$ . Тоді, після переходу на нижчий у  $b$  разів діапазон АЦП, ці дійсні спади напруги на резисторах БРПН використовують як взірцеві для визначення нелінійності ФП АЦП на нижчому діапазоні. Це забезпечує рівномірний розподіл точок визначення нелінійності на нижньому діапазоні (рис. 9 – для  $b=2$ ). Дослідження невиключеної похибки від шуму АЦП показало, що максимальна похибка

ніж за базовим методом, причому чітко видно, що максимум похибки виникає там, де густина сформованих точок визначення нелінійності ФП АЦП найменша.

Згідно з пп. 1, 2, 3, 6 методології запропоновано метод 3 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що відрізняється від методу 2 тим, що точка 5/6 нижнього діапазону АЦП формується додатково, як у методі 1. Тоді розподіл точок визначення нелінійності на нижньому діапазоні (рис. 11) рівномірний. Як бачимо, додаткова точка визначення нелінійності ФП АЦП (5/6 діапазону) значно зменшує невиключену похибку методу 3 порівняно з методом 2, а її розподіл на діапазоні стає подібним на базовий метод.

Згідно з п. 4 методології запропоновано метод 4 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що відрізняється від базового методу тим, що напругу ДНК вибрано в декілька разів вищою, ніж діапазон перетворення АЦП. Тоді напруга калібрування АЦП формується як одна з точок визначення нелінійної складової похибки АЦП. Для  $N=12$  (рис. 12) отримуємо три рівномірно розміщені на діапазоні точки визначення нелінійності ФП АЦП. Дослідження показало, що цей метод забезпечує мінімальний вплив шуму АЦП на невиключену похибку на всьому діапазоні перетворення, а її максимальне значення не перевищує шуму. Недолік методу – мінімально допустима згідно зі стандартами кількість точок визначення похибки нелінійності АЦП.

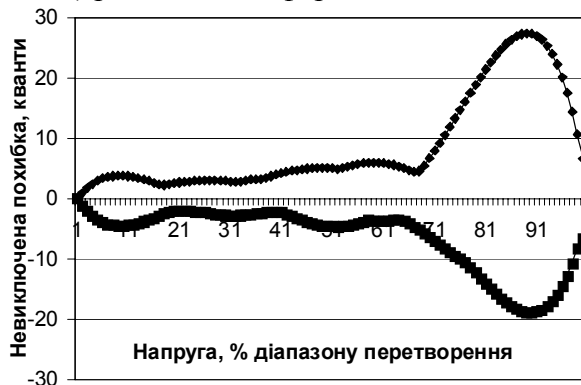


Рис. 10. Метод 2 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП



Рис. 11. Метод 3 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

Згідно з п. 1 методології запропоновано метод 5 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що зводиться до використання базового методу для визначення похибки нелінійності АЦП у нижній частині діапазону перетворення, корекції похибок АЦП та безпосередньому вимірюванні спадів напруги на резисторах БРПН від першого до  $N/2$ -го, а також від  $(N/2+1)$ -го до  $(N-1)$ -го. Точки визначення нелінійної складової похибки АЦП формуються як

результати безпосередніх вимірювань спадів напруги на послідовно з'єднаних резисторах від першого до  $N/2$ -го та як результати обчислення підсумуванням двох результатів безпосередніх вимірювань спадів напруги від першого до  $N/2$ -го та від  $(N/2+1)$  до  $(N-1)$ -го. Це дає змогу отримати рівномірний розподіл точок визначення нелінійності ФП АЦП на діапазоні перетворення та їх високу точність – АЦП використано лише в нижній половині діапазону, де базовий метод забезпечив високу точність. Цей метод забезпечує максимум точок визначення нелінійності ФП АЦП –  $N-1$  (рис. 13). Максимальне значення невиключеної похибки від шуму АЦП подібне до базового методу та методу 3, але кількість сформованих точок визначення нелінійності більш ніж вдвічі перевищує вимоги стандартів і дає змогу апроксимувати нелінійність ФП АЦП складнішими функціями.



Рис. 12. Метод 4 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

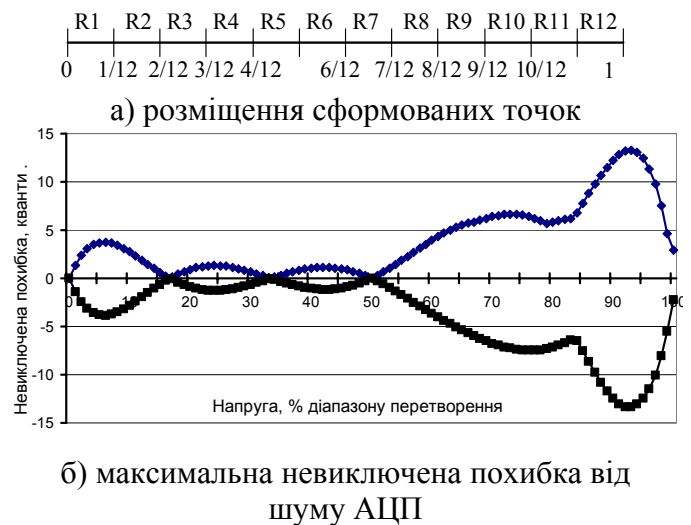


Рис. 13. Метод 5 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

Згідно з пп. 5 методології запропоновано метод 6 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що передбачає перекомутацію послідовності увімкнення резисторів БРПН з допомогою матричного комутатора для увімкнення всіх комбінацій з  $N$  по  $k$ . Тому схема реалізації шостої модифікації складніша (рис. 14), але дає змогу отримати велику кількість точок визначення нелінійності ФП АЦП за рахунок зміни  $N$ . Однак ця модифікація не забезпечує високої точності через вплив опору ключів у колі струму, тому в роботі її не досліджено.

Зменшивши кількість точок визначення нелінійності до трьох та використовуючи ключі з перемиканням, можна спростити схему (рис. 15) і підвищити точність вимірюючи та враховуючи спади напруги на ключах комутатора. Метод 7 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП також забезпечує рівномірний розподіл точок визначення нелінійності АЦП по діапазону (рис. 16). Він за невиключеною похибкою подібний до методу 4 та має аналогічний недолік – мінімально допустиму кількість точок визначення похибки нелінійності АЦП.

Для всіх запропонованих методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП оцінено похибки, які вносять елементи схеми. Показано, що похибка від вхідного струму АЦП  $I_{ADC}$  і його вхідного опору  $R_{ADC}$  для АЦП AD7714

( $I_{ADC} \leq 100 nA$  і  $R_{ADC} \geq 1 G\Omega$ ) і резисторів БРПН  $R_1 \dots R_N = 300 \Omega$  (оптимальних щодо мінімуму цієї похибки) менша за  $\delta_{R+I} \leq 10^{-4} \%$ . Похибка від струмів витоку для високоякісних ключів комутатора фірми Analog Devices не більша за  $\delta_{IKM} \leq 2 \cdot 10^{-5} \%$ . Для схеми рис. 15 сумарна похибка від розкиду опорів ключів комутації резисторів БРПН, залежно від методу її корекції, не перевищує  $\delta_{SUM} \leq 6 \cdot 10^{-5} \dots 12 \cdot 10^{-5} \%$ .

Основні параметри всіх запропонованих методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП зведено у табл. 1. Як видно з неї, ці методи істотно різняться і не завжди складніші методи забезпечують вищу точність. Тому доцільно вибрати найперспективніші методи.

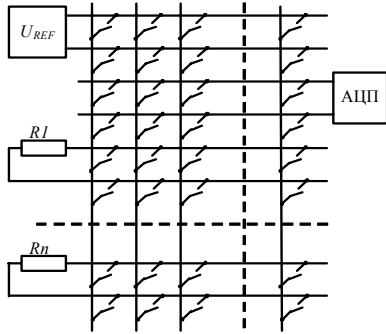


Рис. 14. Структурна схема реалізації методу 6 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

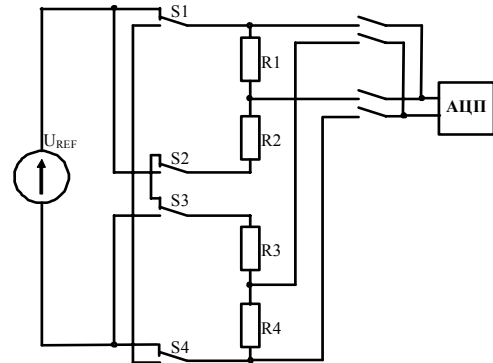
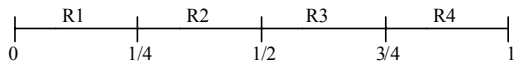
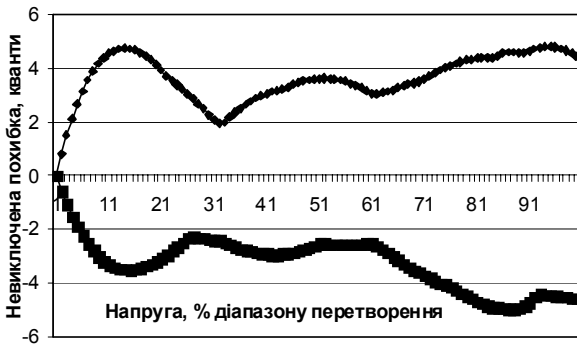


Рис. 15. Структурна схема формування точки 3/4 діапазону для методу 7



а) розміщення сформованих точок



б) максимальна невиключена похибка від шуму АЦП

Рис. 16. Метод 7 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

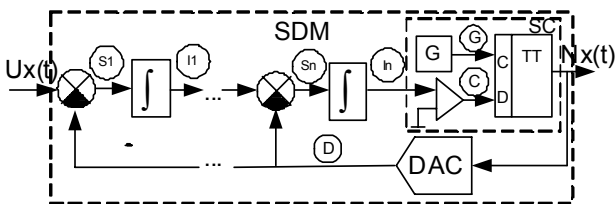


Рис. 17. Узагальнена структурна схема однобітного багатоконтурного СДМ

узагальнену структурну схему подано на рис. 17. Для її дослідження розроблено імітаційну математичну модель, що складається з лінійної моделі, топологічне

Найбільший коефіцієнт зменшення нелінійності АЦП дає метод 4, він простий у реалізації, але має мінімально допустиму кількість точок визначення похибки нелінійності АЦП. Тому він перспективний для АЦП, в яких домінують квадратична і кубічна складові похибки нелінійності. Аналогічні властивості має метод 7. Ці методи мінімально чутливі до шумів, тому їх доцільно використати для визначення та корекції похибки нелінійності прецизійних АЦП, наприклад, двотактного інтегрування. Для визначення та корекції похибки нелінійності прецизійних АЦП зі складнішою формою функції похибки найкращим є метод 5.

У четвертому розділі досліджено характер нелінійної складової прецизійних АЦП (найточніших сьогодні), оснований на однобітному сигма-дельта модуляторі (СДМ) з 1 – 3 контурами зворотного зв'язку. Їх

рівняння якої представлено системою рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{S1}(t) = U_X(t) - U_D(t) \\ U_{Si}(t) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^t U_{Si}(t) dt; i = \overline{1, n} \\ U_{Si}(t) = U_{I(i-1)}(t) - U_D(t); i = \overline{2, n} \\ U_C(t) = \begin{cases} 1, U_{In}(t) > 0 \\ 0, U_{In}(t) \leq 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_G(t) = \begin{cases} 1, t \in [k \times T, (k+0,5) \times T] \\ 0, t \in ((k+0,5) \times T, (k+1) \times T) \end{cases} \\ N_X(t) = \begin{cases} U_C(t), (U_G(t) = 1) \wedge (U_G(t - \Delta t) = 0) \\ N_X(t - \Delta t) \end{cases} \\ U_D(t) = \begin{cases} E, N_X(t) = 1 \\ -E, N_X(t) = 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (21)$$

де  $U_{S1} \dots U_{Sn}, U_{I1} \dots U_{In}, U_C, U_G, U_D$  – напруги у відповідних точках СДМ;  $U_X$  – вхідна напруга;  $N_X$  – послідовність вихідних імпульсів, які відповідають напрузі  $U_X$ ;  $\tau_i$  – стала часу інтегратора;  $T$  – період генератора тактових імпульсів;  $k$  – ціле число;  $\Delta t \rightarrow 0$  – крок часу моделювання;  $E$  – значення напруги цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) ДАС зворотного зв'язку.

Вихідний сигнал СДМ синхронний і дискретний, тому результат перетворення

$$n = \sum_{i=l}^{l+M} N_X(i \cdot T), \quad (23)$$

де  $t_l$  та  $l = t_l / T$  – час та кількість відліків перехідного процесу перезарядження конденсатора інтегратора (не враховуються у результат вимірювання);  $M = 2^K$  – максимальна кількість квантів АЦП (визначається його розрядністю  $K$ ).

Табл. 1. Параметри запропонованих методів визначення нелінійності ФП АЦП

	Базовий метод	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4	Метод 5	Метод 7
Кількість резисторів подільника $N$	12	12	12	12	12	12	4
Кількість точок визначення нелінійної складової похибки АЦП	5	5	4	5	3	11	3
Кількість перетворень	27	32	54	55	25	54	14
Кількість каналів комутатора	26	26	26	26	26	26	12
Кількість ключів подільника	Нема	Нема	Нема	Нема	Нема	Нема	4
Наявність точок у верхній половині діапазону перетворення АЦП	Ні	Так *	Так *	Так *	Так	Так	Так
Збіг точок зі стандартом	Ні	Так *	Ні	Так *	Так	Так	Так
Рівномірне розміщення точок на діапазоні	Ні	Так *	Ні	Так *	Так	Так	Так
Невиключена похибка від розкиду опорів ключів подільника	Нема	Нема	Нема	Нема	Нема	Нема	10q
Невиключена похибка від струму витоку ключів комутатора	1,8q	1,8q	1,8q	1,8q	1,8q	1,8q	q
Невиключена похибка від розкиду опорів резисторів подільника	0,03q	1,6q	0,5q	2,5q	0,5q	0,03q	0,02q
Невиключена похибка від шуму АЦП	$3,5n_{NZ}$	$3n_{NZ}$	$4n_{NZ}$	$2n_{NZ}$	$n_{NZ}$	$2,5n_{NZ}$	$n_{NZ}$
Сумарна невиключена похибка	22q	20q	25q	15q	7q	16q	16q
Коефіцієнт зменшення нелінійності АЦП AD7714	11	12,5	10	17	35	16	16

q – квант (одиниця молодшого розряду) 24 розрядного АЦП;  $n_{NZ}$  – кількість квантів шуму (випадкової похибки) АЦП; \* – для нижчого діапазону перетворення.

Вхідну напругу АЦП за результатами перетворення можна розрахувати як

$$U'_x = 2 \times E \left( \frac{n}{M} - 0,5 \right) . \quad (24)$$

Залежності (22) ... (24) є математичною моделлю однобітного СДМ. На її основі розроблено лінійну імітаційну модель, орієнтовану на аналіз у часовій області, яка реалізує принцип асинхронного інкрементного моделювання зі сталим кроком дискретизації. Її аналіз показав, що для стійкої роботи в лінійному режимі необхідне виконання умови

$$U_{I_{MAX}i} < E, \quad i = \overline{1, n-1} , \quad (25)$$

де  $U_{I_{MAX}i}$  – максимальна напруга на виході  $i$ -го інтегратора наприкінці такту інтегрування, коли напруга на виході попереднього інтегратора є максимальною та протилежної полярності до вихідної напруги ЦАП ДАС (див. рис. 17).

Умову (25), згідно з (22), можна записати як

$$\begin{cases} U_x = U_{X_{MAX}} > 0, \quad U_D = -E \\ U_{I1}(t) = \frac{1}{\tau_1} \int_0^t (U_{X_{MAX}} + E) dt < E \\ U_{Ii}(t) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^t (U_{I_{i-1}} + E) dt < E; \quad i = \overline{2, n-1} \end{cases} , \quad (26)$$

де  $U_{X_{MAX}}$  – допустима вхідна напруга інтегратора в лінійному режимі.

Загалом умовою лінійного режиму роботи однобітного СДМ  $n$ -го порядку є

$$\sum_{i=1}^m \left( \frac{T^{m-i+1}}{(m-i+1)!} \prod_{j=i}^m \frac{1}{\tau_j} \right) < \frac{1-K}{1+K}; \quad m = \overline{1, n-1} , \quad (27)$$

де  $K = U_{X_{MAX}} / E$  .

Залежності (26) і (27) дають змогу для відомих параметрів схеми СДМ та робочого діапазону інтеграторів розраховувати та вибирати їх сталі часу.

Верифікацію розробленої лінійної імітаційної моделі виконано за аналізом її параметрів та порівнянням з відомими даними. Проведені дослідження показали, що ФП розробленої імітаційної моделі СДМ є ступінчатою функцією в діапазоні  $[-U_{X_{MAX}}, U_{X_{MAX}}]$ , яку можна лінеаризувати відрізком прямої, що проходить через початок координат, а похибка лінеаризації не перевищує одиниці молодшого розряду. Якщо компоненти “ідеалізовані” нелінійність ФП імітаційної моделі СДМ дорівнює нулю на всьому діапазоні перетворення. Отже, передавальна функція розробленої імітаційної моделі АЦП на базі СДМ відповідає ідеальному АЦП відповідної розрядності.

Для дослідження впливу параметрів компонентів на параметри СДМ вихідний сигнал компонента змінюється на значення, зумовлене впливом досліджуваного параметра. Такі дослідження дали підставу зробити висновок, що на нелінійність ФП СДМ майже виключно впливає нелінійність першого інтегратора в колі прямого поширення сигналу, при цьому ця нелінійність зумовлена передусім обмеженим коефіцієнтом підсилення підсилювача першого інтегратора на високій частоті.

Показано, що нелінійність інтеграторів доцільно моделювати як лінійну зміну сталої часу інтегратора від вихідної напруги

$$\tau = \tau_0 (1 + s \cdot k_r \cdot U_2') , \quad (28)$$

де  $\tau_0$  – початкове значення сталої часу інтегрування;  $s = \begin{cases} -1, & U_2' > 0 \\ +1, & U_2' < 0 \end{cases}$  – множник, що

забезпечує симетричні зміни значення сталої часу інтегрування для від'ємних і додатних напруг;  $k_r$  – відносна зміна сталої часу інтегрування в діапазоні допустимої вихідної напруги інтегратора;  $U_2'$  – вихідна напруга інтегратора на попередньому кроці інтегрування.

Верифікацію коректності імітації нелінійності інтегратора проведено для квадратичної складової його похибки. На рис. 18 подано отриману вихідну напругу інтегратора, яка є фрагментом параболи, що підтверджує адекватність моделі. На рис. 19 представлені залежності нелінійності ФП СДМ першого порядку від вхідної напруги для нелінійностей 0,1; 0,3 та 1 %. Залежності для нелінійності ФП СДМ другого та третього порядків з різними діапазонами перетворення наведено на рис. 20. З їх вигляду можна зробити висновок, що вони мають складний детермінований характер, отже, для перевірки та/або корекції необхідна достатньо велика кількість точок визначення нелінійної похибки ФП АЦП. Для СДМ вищого, ніж перший, порядку максимум нелінійності ФП обернено пропорційний діапазону. Можна зменшити невиключену похибку перевірки та/або корекції збільшенням вихідного струму ЦАП для істотного підвищення ефективності запропонованих методів – невиключена похибка буде в декілька разів меншою (особливо для СДМ третього порядку).

На рис. 21 у подвійному логарифмічному масштабі представлено залежність максимуму похибки нелінійності СДМ за нелінійності інтегратора від 0,01 % до 10 % для поданих на рис. 20 СДМ. З рис. 21 можна оцінити коефіцієнт ослаблення нелінійності першого інтегратора СДМ

$$K = \frac{\Delta_{U1} \cdot \delta_{NL}}{\Delta_{NL} \cdot 100\%} , \quad (29)$$

де  $\Delta_{U1}$  – розмах вихідної напруги інтегратора;  $\delta_{NL}$  – відносне значення похибки нелінійності інтегратора;  $\Delta_{NL}$  – нелінійність ФП СДМ.

На рис. 22 подано залежність коефіцієнта ослаблення  $K$  від нелінійності інтегратора. Як бачимо, для нелінійностей інтегратора, вищих за 0,03 %,  $K$  сталий (8...10), і чим нижчий діапазон, тим менший  $K$ . Для нелінійностей, менших за 0,03%, коефіцієнт  $K$  змінюється, що пояснюється дискретністю моделі СДМ.

Дослідження впливу нелінійності інших інтеграторів на результат перетворення показали, що для нелінійностей 0,03...10 % їх вплив по діапазону перетворення не перевищує похибки дискретності моделі для СДМ другого та третього порядків, тобто менший у  $\leq 5000$  разів від першого інтегратора, ним можна нехтувати.

Апроксимація нелінійності СДМ кусково-нелійними функціями дає змогу у 35...190 разів зменшити похибку, зумовлену нелінійністю ФП СДМ.

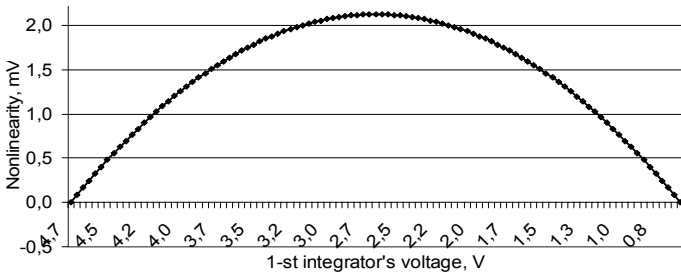


Рис. 18. Нелінійність вихідної напруги інтегратора під час верифікації

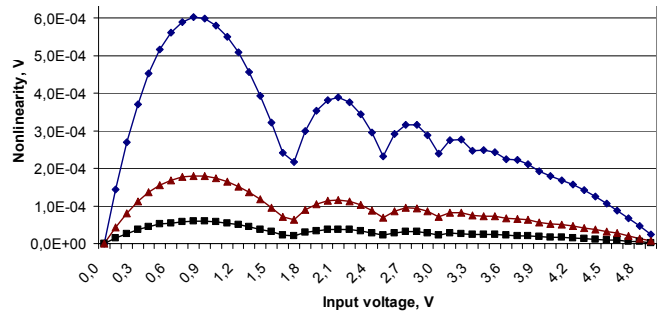
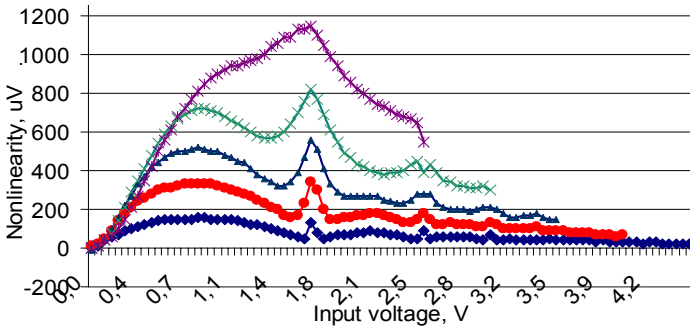
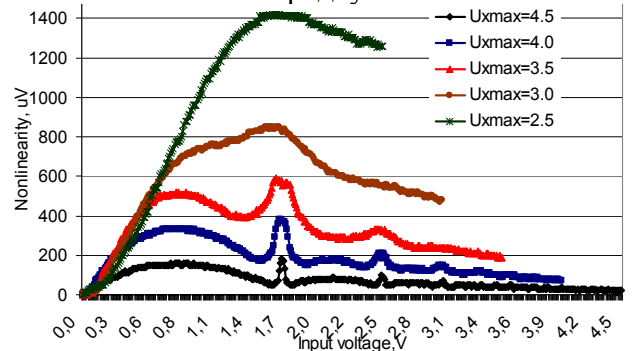


Рис. 19. Нелінійність ФП СДМ першого порядку

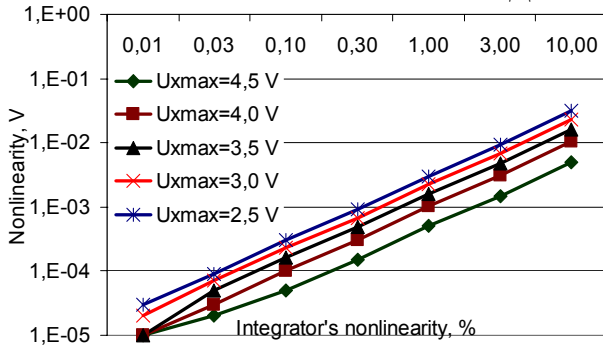


а) СДМ другого порядку

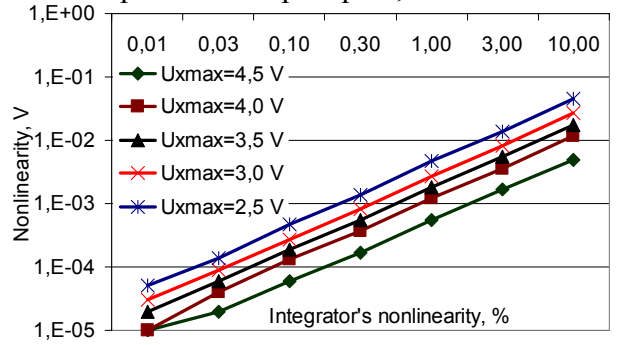


б) СДМ третього порядку

Рис. 20. Нелінійність ФП СДМ за нелінійності першого інтегратора 0,3 %

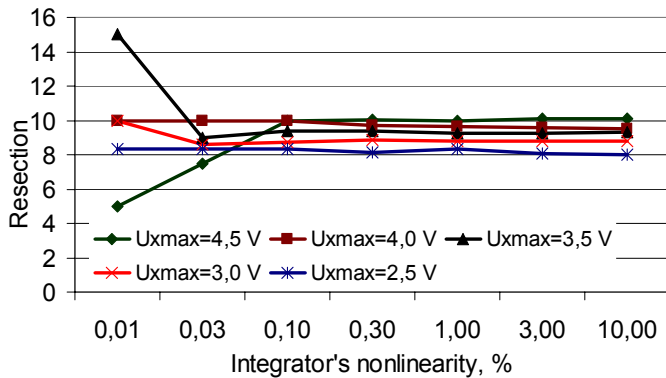


а) СДМ другого порядку

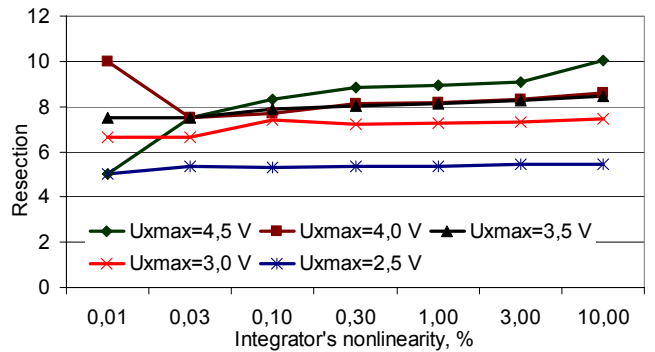


б) СДМ третього порядку

Рис. 21. Залежність максимальної нелінійності ФП СДМ від нелінійності першого інтегратора



а) СДМ другого порядку



б) СДМ третього порядку

Рис. 22. Коefіцієнт ослаблення нелінійності першого інтегратора в СДМ

У п'ятому розділі проаналізовано вимоги до вбудованих систем метрологічної самоперевірки АЦП у процесі експлуатації і запропоновано концепцію їх побудови.

Діюча система періодичних метрологічних перевірок не гарантує відповідності метрологічних параметрів АЦП нормованим упродовж інтервалу між перевірками.



Успішно виконавши періодичну перевірку АЦП можна стверджувати, що: а) АЦП, з великою імовірністю (але не 100 %), за минулий інтервал мав метрологічні параметри, що відповідають нормованим за нормальних умов експлуатації (як АЦП функціонував в робочих умовах, традиційна перевірка відповіді не дає); б) прогнозується, що АЦП матиме метрологічні параметри, що відповідають нормованим за нормальних умов упродовж майбутнього інтервалу між перевірками (як він працюватиме в робочих умовах, перевірка відповіді не дає); в) чому в АЦП неможлива метрологічна відмова перед кінцем інтервалу між перевірками, відповіді теж не має; г) який час пройде після метрологічної відмови до моменту її виявлення, традиційна перевірка відповіді теж не дає.

Основні вимоги до вбудованої системи самоперевірки такі: а) висока функціональна і метрологічна надійність – методичні та інструментальні похибки методів самоперевірки цих систем повинні мало залежати від більшості похибок її компонентів і впливних величин; б) технічна ефективність – мінімум прецизійних елементів, простота схеми, методів і засобів налагодження, функціонування в робочих умовах експлуатації, мала тривалість самоперевірки та невисока складність алгоритмів обробки даних, нескладне перепроєктування ВС під час впровадження; в) низька трудомісткість метрологічного обслуговування – неможливо обійтись без нього цілком через необхідність передавання значення еталону до АЦП; г) можливість використання для корекції похибок АЦП; д) економічна ефективність. Ця система має забезпечити високу метрологічну надійність – гарантію придатності АЦП до подальшої експлуатації з нормованими метрологічними характеристиками з ризиками споживача і виробника, не гіршими, ніж у системі метрологічного обслуговування. Ці вимоги можна виконати лише за умови періодичної метрологічної самоперевірки АЦП у процесі експлуатації.

Розроблена концепція ґрунтується на поєднанні відомих методів (встановлення нуля і калібрування) із запропонованими та дослідженими в другому і третьому розділах методами формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП. БРПН в цих методах є практично ідеальним вимірювальним перетворювачем, тому згідно з твердженням 1 похибка метрологічної самоперевірки визначається похибками ДНК та самого АЦП. У такому разі метрологічна перевірка проводиться безпосередньо у АЦП, а метрологічне обслуговування зводиться до заміни ДНК АЦП (міри). Якщо ДНК має електронний паспорт, який зчитується АЦП, то трудомісткість метрологічного обслуговування мінімальна – АЦП сам її реалізує та адаптує інтервал між перевірками до швидкості зміни складових похибки АЦП. Показано, що в таких прецизійних АЦП доцільно окремо нормувати похибку міри та похибку АЦП, причому остання визначатиметься передусім якістю вбудованої системи метрологічної самоперевірки АЦП. У результаті самоперевірки такий АЦП може: а) здійснювати корекцію своєї похибки; б) оцінювати свою поточну похибку та супроводжувати нею результат перетворення. Але такі властивості потребують обчислювальних ресурсів, що, як правило, перевищують ресурси поширених мікроконтролерів. Запропонована дистанційна заміна програмного забезпечення мікроконтролерів нижнього ієрархічного рівня ВС у процесі роботи дає змогу мікроконтролеру зберігати в пам'яті даних і програми лише поточні задачі. Тоді можливий динамічний перерозподіл задач між ієрархічними рівнями системи

відповідно до поточного методу самоперевірки та адаптивного інтервалу між ними.

Але таке рішення доцільне для АЦП, які входять у розроблювані ВС. Для систем, що вже існують доцільні інші рішення: а) оснащення їх додатковим модулем, що містить ДНК, подільник і комутатор, вихід комутатора підмикають до вільного каналу АЦП, а результати обробляють на вищому ієрархічному рівні ВС (тоді основні доопрацювання будуть в програмному забезпеченні вищого рівня); б) оснащення АЦП входом для під'єднання зовнішнього блока самоперевірки, який сам її проводить (це рішення потребує мінімального доопрацювання ВС).

Основними операціями метрологічної самоперевірки, аналогічно до лабораторної, будуть ВНТК, контроль напруги живлення, опробування та визначення похибки. В результаті отримуємо похибки: адитивну  $\Delta_{\text{АДИТ}}$ , мультиплікативну  $\Delta_{\text{МУЛ}}$ , випадкову  $\Delta_{\text{ВИП}}$ , а також нелінійності  $\Delta_{\text{НЕЛ}}$  для всіх точок метрологічної самоперевірки згідно з вибраною модифікацією базового методу (рис. 23). Також задано похибку ДНК  $\Delta_{\text{ДНК}}$ . Якщо корекція похибки АЦП не передбачена, то додають максимальні абсолютні значення цих похибок у всіх точках самоперевірки. Границя допустимої похибки АЦП дорівнює максимальному значенню отриманої суми. Якщо похибку АЦП нормувати за двочленною формулою, то треба поступово зменшувати адитивну складову, поки одержана пряма не досягне значення сумарної похибки в іншій точці самоперевірки. За такою прямою розраховують коефіцієнти  $c_1$  і  $d_1$  двочленної формули. Якщо за результатами самоперевірки здійснюють корекцію похибок АЦП, то додають не похибки, а їх невиключені залишки (рис. 23). Ці залишки оцінюють за отриманими значеннями  $\Delta_{\text{ВИП}}$  та результатами метрологічної атестації, визначивши їх за вибраним методом формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП (див. рис. 7 – 13, 16 та табл. 1). Коли похибку ДНК нормують окремо, її треба врахувати як додаткову мультиплікативну складову ( $\Delta_{\text{ДНК}}$  на рис. 23). Коефіцієнти

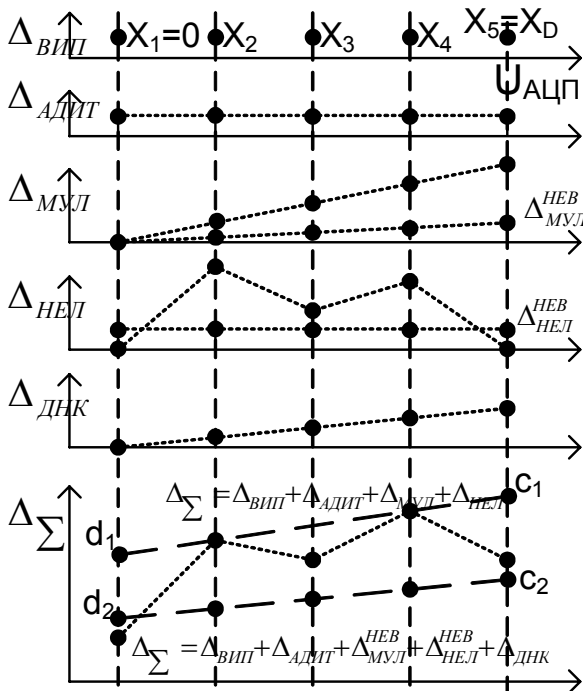


Рис. 23. Опрацювання результатів метрологічної самоперевірки АЦП

$c_2$  і  $d_2$  двочленної формули розраховують як і раніше. У разі корекції похибок точність АЦП істотно зростає (див. табл. 1)

Отримані коефіцієнти двочленної формули дають змогу розрахувати дійсну приведену похибку кожного поточного результату перетворення АЦП.

Як приклад запропоновано три схеми системи метрологічної самоперевірки 24 розрядного сигма-дельта АЦП типу AD7714 на восьми діапазонах за методом 4 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП (потребує приблизно 2500 резисторів подільника та 5000 ключів), на восьми діапазонах за методом 7 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП (рис. 24), для якого потрібно 10 резисторів подільника та 16

ключів, а також на будь-якому одному діапазоні за методом 5 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП (рис. 25), який потребує 12 резисторів подільника та 26 ключів. Система метрологічної самоперевірки за методом 4 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП передбачає самоперевірку в 19 точках, що забезпечує по п'ять точок самоперевірки на всіх восьми діапазонах перетворення. Система метрологічної самоперевірки за методом 7 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП (рис. 24) передбачає самоперевірку за п'ятьма точками на основному діапазоні 2,5 В і за трьома точками на решти діапазонах (на них фактично перевіряють лише вхідний підсилювач).

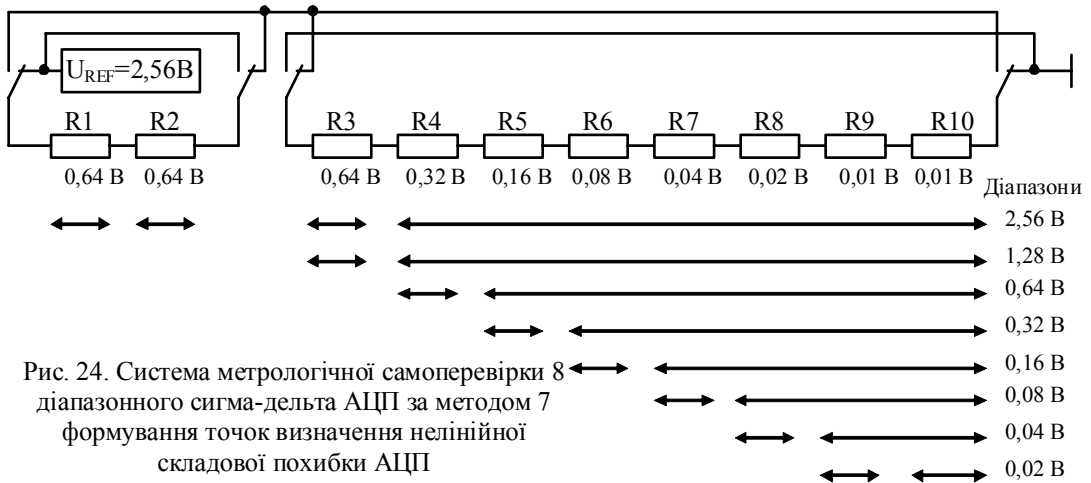


Рис. 24. Система метрологічної самоперевірки 8 діапазонного сигма-дельта АЦП за методом 7 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

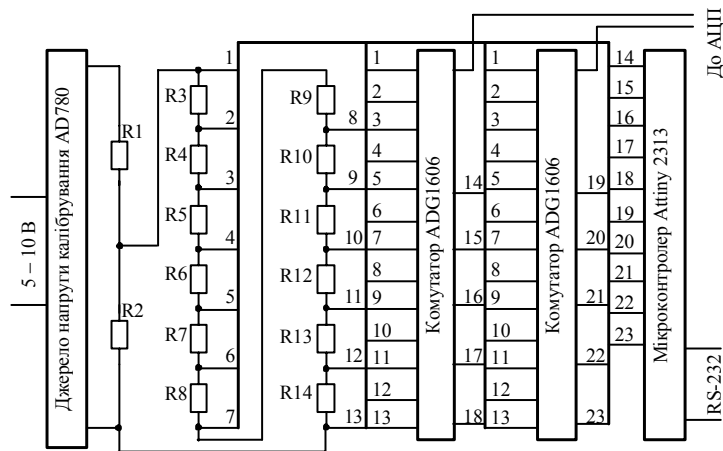


Рис. 25. Система метрологічної самоперевірки сигма-дельта АЦП за методом 5 формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП

Запропоновано також метод контролю метрологічної надійності системи метрологічної самоперевірки поєднанням різних методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, адже запропоновані методи мають подібне апаратне забезпечення, а відрізняються переважно алгоритмом опрацювання результатів вимірювання.

У шостому розділі розглянуто використання АЦП з вбудованою підсистемою метрологічної самоперевірки та корекції нелінійної складової похибки ФП АЦП для реалізації методу заміщення. Досліджено необхідні та достатні умови застосування методу заміщення у вимірювальних каналах на базі АЦП, виведено критерії придатності АЦП для використання у таких каналах і виведено формулу для оцінки

похибки методу заміщення  $\delta_{MZ}$  у разі використання АЦП з гладкою ФП

$$\delta_{MZ} = 4\delta_{NEL} \frac{U_X - U_N}{U_N} = 4\delta_{NEL} \frac{\Delta U_X}{U_X} . \quad (30)$$

де  $\delta_{NEL}$  – похибка нелінійності АЦП;  $U_N$  і  $U_X$  – результати перетворення спаду напруги на мірі та на об'єкті вимірювання.

У такому випадку похибку результату перетворення  $\delta_{X-MZ}$  можна оцінити як

$$\delta_{X-MZ} = \delta_N + 4\delta_{NEL} \frac{U_X - U_N}{U_N} + \delta_{NZN} + \delta_{NZX} . \quad (31)$$

де  $\delta_{NZN}$  і  $\delta_{NZX}$  – похибки, спричинені шумом АЦП.

Синтезовано і досліджено вимірювальний канал прецизійної ВС температури, що використовує термометри опору, перехідну міру та метод заміщення. Оскільки, згідно з (30) і (31), похибка методу заміщення прямо пропорційна до похибки нелінійності АЦП, використання запропонованих методів визначення похибки нелінійності АЦП для її корекції дає змогу знизити вимоги до перехідної міри – для найточніших вимірювань достатньо двохдекадної перехідної міри.

За умови корекції похибки нелінійності 24 розрядні сигма-дельта АЦП разом з дводекадною перехідною мірою (за умови використання відповідної міри опору) забезпечують настільки високу точність вимірювання опору термометра, що домінує така складова похибки вимірювання температури, як похибка самонагрівання термометра робочим струмом  $\delta_{SN}$ . Щоб її зменшити виведено формулу розрахунку оптимального робочого струму термометра  $I_{TO}$ , що забезпечує мінімум сумарної похибки за заданої напруги шумів АЦП  $U_{NZ}$ , потужності  $P_{SN}^{ST}$  нагрівання термометра на задану похибку самонагріву  $\Delta_{SN}^{ST}$ , опорі термометра  $R_{TO}$  та його чутливості  $S_{TO}$ ,

$$I_{TO} = 3 \sqrt{\frac{U_{NZ} P_{SN}^{ST}}{\Delta_{SN}^{ST} R_{TO}^2 S_{TO}}} . \quad (32)$$

Однак вибір оптимального робочого струму за (32) з використанням термометра з  $R_{TO} = 100 \text{ Ом}$  і прецизійного 24 розрядного сигма-дельта АЦП типу AD7714 дає змогу досягнути похибки самонагрівання  $\delta_{SN} \leq 0,5 \text{ мК}$ . Додатково зменшити похибку самонагрівання запропоновано її коригувати за результатами вимірювання температури при різних робочих струмах. Дійсну температуру об'єкта вимірювання  $T_{OB}$  тоді можна визначити, розв'язавши систему з двох рівнянь виду

$$T_{OB} = T_{TO} - \Delta_{SN} = T_{TO} - K \cdot I_{TO}^2 \cdot R_{TO} , \quad (33)$$

де  $T_{TO}$  – виміряна температура термометра опору (за дії його самонагрівання).

Тоді, за вказаних вище засобів, похибка самонагрівання  $\delta_{SN} \leq 0,32 \text{ мК}$ , що неістотно менше від попередньої. Кращі результати можна отримати, використавши надлишкові результати вимірювання спаду напруги на термометрі опору за різних струмів і коригуючи похибку самонагрівання методом найменших квадратів. У роботі виведено формули оброблення результатів вимірювань мікроконтролером з обмеженими обчислювальними ресурсами та досліджено залежності похибки

самонагрівання від комбінації струмів термометра опору для чотирьох і п'яти струмів у межах від 1 до 10 мА та рівня шумів АЦП 0,2 мК і 0,5 мК. У результаті отримано невиключену похибку самонагрівання для чотирьох струмів на рівні 0,1...0,2 мК та для п'яти струмів на рівні 0,05 мК. зауважимо, що вимірювати опір термометра після зміни робочого струму можна тільки за таких умов: а) температура об'єкта вимірювання стабільна упродовж всіх вимірювань (зміна результатів вимірювання не перевищує шуму АЦП), інакше виникає похибка корекції через накладання зміни температури об'єкта на самонагрівання. Для контролю стабільності температури об'єкта можна використати інший термометр опору або замкнений цикл вимірювання (запам'ятати результати вимірювання температури об'єкта перед зміною струму та порівняти їх з результатами вимірювання температури об'єкта після процедури визначення коефіцієнтів полінома корекції. Якщо результати відрізняються більше, ніж на подвійне значення шумів АЦП, то результати обчислення коефіцієнтів полінома корекції хибні); б) вимірювати опір термометра треба після закінчення перехідного процесу самонагрівання, інакше виникає додаткова похибка, яка може повністю спотворити результати визначення коефіцієнтів полінома корекції. Час очікування має бути не меншим за 20 сталих часу термометра опору, його можна визначити за поточними змінами вимірюваної температури.

Умовою високої точності корекції похибки самонагрівання термометра опору є малі відносні похибки вимірювання опору за різних умов. Власне використання методу заміщення дає змогу забезпечити малу відносну похибку вимірювання опору за різних струмів під час визначення коефіцієнтів полінома корекції. Навіть при використанні як міри не взірцевої котушки опору, а резистора порівняно невисокої точності (наприклад, С5-61), відносна похибка вимірювання опору термометра за різних струмів буде, у разі використання дводекадної перехідної міри, нехтовно малою.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу науково-технічну проблему – забезпечення єдності вимірювань та метрологічної надійності результатів аналого-цифрового перетворення в умовах масового виробництва та використання АЦП.

1. У результаті аналізу наслідків масового виробництва та використання АЦП у вимірювальних системах сформульовано комплекс протиріч, пов'язаних із відповідним зростанням трудомісткості їх метрологічного обслуговування, особливо під час експлуатації, що, за обмежених ресурсів метрологічних лабораторій, знижує рівень метрологічної надійності АЦП і результатів їх перетворення і загрожує порушенням єдності вимірювань. Цей комплекс протиріч призводить до виникнення проблеми, яка потребує комплексного вирішення – зокрема, оснащенням АЦП вбудованою системою метрологічної самоперевірки в процесі експлуатації. Доведено, що для створення цієї системи необхідні та достатні операції встановлення нуля, калібрування та визначення нелінійної складової похибки АЦП. Але відомі методи і засоби визначення нелінійної складової похибки АЦП поки що не дають змоги побудувати системи метрологічної самоперевірки, що мають прийнятні техніко-економічні показники

та не суперечать вимогам чинних стандартів.

2. Теоретично, на основі закону Ома та другого закону Кірхгофа, доведено твердження про те, що багаторезисторний подільник напруги з усередненням спадів напруги на всіх резисторах, які входять до його складу, є вимірювальним перетворювачем з коефіцієнтом передачі, оберненим до кількості резисторів. Такий вимірювальний перетворювач, нечутливий до відхилення опорів резисторів від середнього значення і під'єднаний до джерела напруги калібрування АЦП, дає змогу створювати ефективні за метрологічними, технічними та економічними показниками засоби визначення нелінійної складової похибки АЦП в точці, що відповідає середньому значенню спадів напруги на всіх резисторах.
3. На основі сформульованого і доведеного твердження запропоновано та досліджено базовий метод формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що передбачає вимірювання та опрацювання спадів напруги на групах послідовно з'єднаних резисторів багаторезисторного подільника напруги зі змінною кількістю резисторів у групі для формування кожної точки. Запропонований метод, у поєднанні з встановленням нуля та калібруванням, забезпечує метрологічну самоперевірку прецизійних АЦП (з неперервною функцією систематичної похибки) в процесі експлуатації (без зупинки вимірювальної системи) та корекцію результатів перетворення у нижній половині діапазону перетворення з максимальною невиключеною похибкою (без урахування похибки джерела напруги калібрування), що перевищує напругу шумів АЦП не більше ніж в 3,5 разу (для 12 резисторного подільника). Всі сформовані точки визначення нелінійної складової похибки АЦП розміщені в нижній половині діапазону перетворення, тому корекція нелінійної складової похибки АЦП у верхній половині діапазону перетворення за допомогою базового методу є неефективною.
4. Теоретично, на основі аналізу приростів функцій нелінійності АЦП та її корекції, доведено інше твердження про те, що невиключена похибка корекції нелінійної складової похибки АЦП пов'язана з кількістю та густиною розміщення точок визначення цієї нелінійної складової, а її максимальне значення пропорційне до довжини відрізка між точками визначення нелінійної складової похибки АЦП. Це, в поєднанні з базовим методом, вперше дало змогу створити методологію синтезу нових методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, що забезпечують, порівняно з базовим методом, рівномірніший розподіл цих точок на діапазоні перетворення АЦП.
5. Згідно з створеною методологією запропоновано та досліджено сім методів формування 3 ... 31 точок визначення нелінійної складової похибки АЦП. Аналіз похибок запропонованих методів показав їх придатність для побудови вбудованих систем метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП, як тих, що випускаються серійно, так і розроблених. Показано, що на похибку самоперевірки максимально впливає випадкова похибка (шум) АЦП, а після здійснення самоперевірки та корекції похибок максимальна невиключена похибка результатів перетворення (без урахування похибки джерела напруги калібрування) перевищує напругу шумів АЦП у 1...4 рази (для 12 резисторного подільника).
6. Для оцінки невиключеної похибки метрологічної самоперевірки досліджено

характер нелінійності однобітних сигма-дельта модуляторів з 1 ... 3 контурами зворотного зв'язку, які сьогодні є основою побудови прецизійних АЦП, що забезпечують найвищу розрядність і найнижчий рівень шумів. Для цього створено математичну модель сигма-дельта модуляторів, яка дає змогу задавати параметри компонентів модуляторів і досліджувати вплив цих параметрів на параметри модулятора загалом. Дослідження сигма-дельта модуляторів з допомогою створеної моделі показало, що:

- нелінійність функції перетворення другого та третього інтеграторів сигма-дельта модуляторів практично не впливає на нелінійність сигма-дельта АЦП;
- нелінійна складова похибка сигма-дельта модуляторів пов'язана складною залежністю із вхідною напругою, що обмежує можливості корекції цієї похибки сигма-дельта АЦП;
- функцію корекції нелінійної складової похибки сигма-дельта АЦП можна задати як набір поліномів 2 ... 9 порядку, що потребує великої кількості точок визначення нелінійності;
- збільшення мінімального відношення струму розряджання до струму заряджання першого інтегратора до значення  $1/3$  веде до спрощення характеру функції нелінійної складової похибки сигма-дельта АЦП, що забезпечує підвищення точності її корекції на всьому діапазоні перетворення з використанням полінома меншого степеня.

7. На основі запропонованих методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП, у поєднанні з встановленням нуля та калібруванням, запропоновано концепцію бездемонтажної метрологічної самоперевірки прецизійних АЦП в процесі експлуатації, що дало змогу синтезувати структурні схеми АЦП із системою метрологічної самоперевірки, метрологічне обслуговування яких у процесі експлуатації зводиться до метрологічного обслуговування джерела напруги калібрування. Показано, що в такому випадку доцільне окреме нормування похибок джерела напруги калібрування та АЦП. Синтезовані структурні схеми систем метрологічної самоперевірки можуть або входити до складу вимірювальних систем (тоді потрібен лише один додатковий вимірювальний канал), або бути вбудованими в АЦП.
8. Розроблено методику опрацювання результатів метрологічної самоперевірки АЦП у процесі експлуатації, яка дає змогу коректно оцінити похибку поточного результату перетворення з урахуванням процедур корекції адитивної, мультиплікативної та нелінійної складових похибки функції перетворення, та адаптувати інтервал між метрологічними перевірками до швидкості зміни складових похибок на діапазоні, що забезпечує довгострокову високу метрологічну надійність результатів перетворення. Також запропоновано метод підвищення метрологічної надійності самоперевірки поєднанням різних методів формування точок визначення нелінійної складової похибки АЦП.
9. Показано переваги використання АЦП, оснащених системою метрологічної самоперевірки та корекції його нелінійності у разі вимірювання опору за методом заміщення, зокрема вимірювання температури платиновими термометрами опору. Аналіз похибок вимірювання температури показав, що для таких АЦП

достатня дводекадна перехідна міра опору, тоді джерелом домінуючої складової похибки буде самонагрівання термометра опору робочим струмом. Методом заміщення можна коригувати похибку від самонагрівання термометра, навіть якщо порівняно велика систематична похибка вимірювання опору. Аналіз показав, що невиключена похибка самонагрівання в разі використання методу найменших квадратів для чотирьох струмів у межах від 1 до 10 мА та еквівалентного рівня шумів АЦП 0,2 мК і 0,5 мК, становить 0,1...0,2 мК, а для п'яти струмів – 0,05 мК.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кочан Р.В. Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з бездемонтажною метрологічною самоперевіркою: монографія / Р.В. Кочан. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 252 с.
2. Стародуб М.Ф. Використання біосенсорів для експрес-діагностики гострих вірусних інфекцій і мікотоксикозів / М.Ф. Стародуб, В.О. Романов, Р.В. Кочан, А.О. Саченко, О.В. Кочан // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2006. – № 6. – С. 223–226.
3. Груша В.М. Веб-базована розподілена система вимірювання / В.М. Груша, О.Р. Осолінський, Р.В. Кочан, А.О. Саченко, В.О. Турченко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2006. – № 5(85). – С. 115–119.
4. Кочан Р.В. Визначення інтегральної нелінійності аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2007. – №.2 Т.2. – С. 159–162.
5. V. Hrusha. Distributed On-Line Temperature Measurement & Control System / V. Hrusha, O. Osolinskiy, A. Sachenko, R. Kochan. // Комп'ютинг: міжн. науково-техн. журнал. – Тернопіль. – 2007. – Том 6, Вип. 2. – С. 62–67.
6. Кочан Р.В. Спосіб визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан, О.В. Кочан // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів. – №68. – 2008. – С. 55–59.
7. Кочан О.В. Мікроконтролерний метод керування профілем температурного поля / Р.В. Кочан, О.В. Кочан // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Комп'ютерні системи та мережі». – Львів. – 2008. – № 630. – С. 67–75.
8. Кочан Р.В. Лінеаризація характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів з високою роздільною здатністю / Р.В. Кочан // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця. – 2009. – № 2. – С. 7–12
9. Кочан Р.В. Метод корекції інтегральної нелінійності характеристики перетворення прецизійних аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів. – 2009. – № 70. – С. 18–26.
10. Кочан Р.В. Спосіб лінеаризації перетворювачів напруга-код з неперервною функцією похибки / Р.В. Кочан // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Комп'ютерні системи та мережі». – Львів. – 2009. – № 658. – С. 54–59.
11. Кочан Р.В. Аналіз впливу опору перемикачів на похибку корекції інтегральної нелінійності аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя. – Тернопіль. –



2010. – Т.-15, № 2. – С. 127–134.
12. Кочан Р.В. Спосіб повірки аналого-цифрових перетворювачів з неперервною функцією похибки / Р.В. Кочан // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – Харків. – 2010. – № 5. – С. 224–229.
  13. Кочан Р.В. Використання АЦП для прецизійних вимірювань за методом заміщення / Р.В. Кочан // *Український метрологічний журнал*. – Харків. – 2010. – № 3. С. 11–16.
  14. Кочан Р.В. Концепція самоповірки аналого-цифрових перетворювачів в процесі експлуатації / Р.В. Кочан // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – Львів. – 2010. – № 71. – С. 25–33.
  15. Кочан Р.В. Дослідження методичної похибки при визначенні нелінійності аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // *Вісник Національного університету «Львівська Політехніка». «Теплоенергетика, інженерія довкілля, автоматизація»*. – Львів. – 2010. – № 677. – С. 93–97.
  16. Кочан Р.В. Вплив параметрів інтеграторів на нелінійність сигма-дельта модулятора високого порядку / Р.В. Кочан // *Відбір та обробка інформації*. – Львів. – 2010. – вип. 33(109). – С. 52–59.
  17. Кочан Р.В. Аналіз властивостей гістограмного методу оцінки нелінійності характеристики перетворення прецизійних АЦП / Р.В. Кочан // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Комп'ютерні системи та мережі»*. – Львів. – 2010. – № 688. – С. 138–147.
  18. Кочан Р.В. Метод метрологічної перевірки (повірки) аналого-цифрових перетворювачів однозначною мірою / Р.В. Кочан // *Український метрологічний журнал*. – Харків. – 2011. – № 1. – С. 51–56.
  19. Кочан Р.В. Вплив параметрів інтегратора на нелінійність дельта-сигма модулятора / Р.В. Кочан // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – Вінниця. – 2011. – № 5. – С. 172–177.
  20. Кочан Р.В. Метод експериментальних досліджень ефективності корекції похибки нелінійності прецизійних АЦП / Р.В. Кочан, Г.В. Сапожник // *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. – Тернопіль. – 2011. – Том 16, № 1. – С. 145–153.
  21. Кочан Р.В. Похибка методу корекції інтегральної нелінійності АЦП з допомогою багаторезистивного подільника / Р.В. Кочан // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Комп'ютерні системи та мережі»*. – Львів. – 2011. – № 717. – С. 69–75.
  22. Кочан Р.В. Дослідження інтегральної нелінійності сигма-дельта модулятора третього порядку / Р.В. Кочан // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – Харків. – 2012. – № 5 (57). – С. 107–113.
  23. Кочан Р.В. Похибка методу корекції нелінійності функції перетворення АЦП з використанням методу відношення / Р.В. Кочан // *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти*. – Чернівці. – 2012. – Том 3, випуск 2. – С. 23–30.
  24. Кочан Р.В. Метрологічне забезпечення АЦП, оснащених підсистемою метрологічної самоповірки / Р.В. Кочан // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – Львів. – 2012. – № 73. – С. 11–18.

25. Кочан Р.В. Прецизійне вимірювання опору з допомогою АЦП на базі методу заміщення / Р.В. Кочан // Український метрологічний журнал. – Харків. – 2012. – № 3. – С. 25–30.
26. Кочан Р.В. Дослідження інтегральної нелінійності сигма-дельта модулятора другого порядку / Р.В. Кочан // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Комп'ютерні системи та мережі». – Львів. – 2012. – № 745. – С. 104–112.
27. Кочан Р.В. Методологія побудови подільника напруги для метрологічної перевірки АЦП / Р.В. Кочан // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2013. – №1(197) – С. 148–154.
28. Кочан Р.В. Методологія використання подільника напруги в підсистемі метрологічної самоперевірки АЦП / Р.В. Кочан // Український метрологічний журнал. – Харків. – 2013. – № 1. – С. 13–18.
29. Кочан Р. Дослідження інтегральної нелінійності однобітного сигма-дельта модулятора третього порядку / Р.В. Кочан, О.М. Нечай // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів. – 2013. – № 751. – С. 68–77.
30. Майків І.М. Сетевой прикладной процессор, реализованный на программируемой логической матрице / І.М. Майків, Р.В. Кочан, В.В. Кочан, А.О. Саченко, І.В. Турченко // Вестник Брестского государственного технического университета, серия физика, математика, информатика. – Брест. – 2005. – № 5. – С. 70–78.
31. Kochan R.. Approach to improving network capable application processor based on IEEE 1451 Standard / R. Kochan, V. Kochan, K. Lee, A. Sachenko // Computer Standards & Interfaces, Volume 28, Issue 2, December 2005. – p. 141–149.
32. Maykiv I. Software–hardware method of serial interface controller implementation / I. Maykiv, A. Stepanenko, D. Wobschall, R. Kochan, V. Kochan, A. Sachenko // Computer Standards & Interfaces. Volume 34, Issue 6, November 2012. – p. 509–516.
33. Kochan R. Linear Mode of Single Bit High Order Sigma-Delta Modulator / R. Kochan // Computer Problems of Electrical Engineering. – Львів. – 2012. – №2. – С. 65–68.
34. Пат. 97465 Україна, МПК H03M1/10. Пристрій визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан, О.В. Кочан. Заявл. 10.04.2007, опубл. 27.02.2012 бюл. № 4.
35. Пат. 86987 Україна, МПК G01R27/00. Комутатор сигналів низького рівня / О.В. Кочан, Р.В. Кочан, В.В. Кочан, Г.І. Барило. Заявл. 13.10.2006, опубл. 10.06.2009 бюл. № 11.
36. Пат. 91244 Україна, МПК G06F7/00. Мережевий модуль обробки даних з дистанційною реконфігурацією / І.М. Майків, І.В. Турченко, Р.В. Кочан, В.В. Кочан. Заявл. 13.05.2008, опубл. 12.07.2010 бюл. № 13.
37. Пат. 90766 Україна, МПК G06F7/00. Програмно-апаратний контролер інтерфейсу / І.М. Майків, Р.В. Кочан. Заявл. 25.05.2008, опубл. 25.05.2010 бюл. №10.
38. Kochan R. Development of a Minimal IEEE1451.1 Model for 8051-compatible Microcontrollers / R. Kochan, A. Stepanenko, K. Lee, V. Kochan, A. Sachenko // Proc. of 2006 IEEE Sensors Applications Symposium. February 2006, Houston, Texas, USA. – P. 88–93.
39. Kochan R. Integral Nonlinearity of ADC's Conversion Characteristic Identification / R.

- Kochan, O.Kochan // Proc. of International Conference TCSET'2006. February 28 – March 04, 2006, Lviv-Slavske. – P. 178–180.
40. Starodub M.F. Implementation of SPR-Biosensors for Express-Diagnostics of Acute Viral Infection and Mycotocsicosis / M.F. Starodub, V.O. Romanov, R.V. Kochan, A.O. Sachenko, O.V. Kochan // Proc. of IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications-MeMeA 2007, Warsaw, Poland, May 4 – 5, 2007. – P.1–3.
  41. Kochan R. Method of ADC's Nonlinearity Identification / R. Kochan, O. Kochan // Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007), Dortmund, Germany, September 6 – 8, 2007. – P. 14–17.
  42. Hrusha V. Development of Measurement System with Remote Access Based on Internet / V. Hrusha, O. Osolinskiy, R. Kochan // Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007), Dortmund, Germany, September 6 – 8, 2007. – P. 126–128.
  43. Mayikiv I. Remote Reprogrammable NCAPs: Issues and Approaches / I. Mayikiv, A. Stepanenko, D. Wobschall, R. Kochan, V. Kochan, A. Sachenko, N. Vasylykiv // Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007), Dortmund, Germany, September 6 – 8, 2007. – P. 109–113.
  44. Wobschall D. A multi-port Serial NCAP using the IEEE 1451 Smart Transducer Standard / D. Wobschall, A. Stepanenko, I. Mayikiv, R. Kochan, A. Sachenko, V. Kochan // Proc. of 2009 IEEE Sensors Applications Symposium. 17 – 19 February 2009, New Orleans, LA, USA. – P. 293–297.
  45. Kochan R. Simulation Model of Delta-Sigma Modulator / R. Kochan, H. Klym // Proc. of X-th International Conference «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science» TCSET'2010. February 23 – 27, 2010, Lviv-Slavske. – P. 44.
  46. Kochan R. Simulation Model of Delta-Sigma Modulator / R. Kochan, H. Klym // CD of X-th International Conference «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science» TCSET'2010. February 23 – 27, 2010, Lviv-Slavske. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 98, 2000, XP; Adobe Reader X. – Назва з контейнера.
  47. Kochan R. ADC Testing Using Single Channel Reference Source / R. Kochan // Proc. of 6-th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT2011). May 5 – 6, 2011, Kaunas, Lithuania. – P. 82–87.
  48. Kochan R. Method of multi-range ADC testing / R. Kochan // Proc. of first International Workshop Critical Infrastructure Safety and Security (CrISS-DESSERT'11). Ukraine, Kirovograd, 11 – 13 May 2011. Volume 2. – P. 402–409.
  49. Kochan R. Linear mode of single bit high order Sigma-Delta Modulator / R. Kochan // Proc. of 12-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" (CPEE'2011). Kostryna, Trans-Carpatian region, Ukraine. September 5 – 7, 2011. – P. 22.
  50. Kochan R. Investigation of Histogram Method Implementation for High Resolution ADC Testing / R. Kochan, O.Kochan // Proc. of 6-th IEEE International Conference on

- Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2011). 15-17 September 2011, Prague, Czech Republic. – P.43–49.
51. Kochan R. Investigation of Integral Nonlinearity of Second Order Sigma-Delta Modulator / R. Kochan // Proc. of XI-th International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET'2012), February 21 – 24, 2012, Lviv-Slavske. – P. 121.
  52. Кочан Р.В. Визначення інтегральної нелінійності аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // Реферативний зб. наук. праць за результатами міжнародної науково-практичної конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів”. Хмельницький, 17 – 19 травня 2007. – С. 44.
  53. Кочан Р.В. Спосіб визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // Зб. тез XV міжнародного семінару метрологів “Методи і техніка перетворення сигналів при фізичних вимірюваннях”. Жешув-Львів, 24 – 27 вересня 2007. – С. 89.
  54. Кочан Р.В. Лінеаризація характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів з високою роздільною здатністю / Р.В. Кочан // Матеріали IX-ї Міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2008), Секція 2 “Перспективні методи і технічні засоби систем контролю і управління”, підсекція 2.3 “Обробка сигналів, зображень”. Вінниця, 21-24 жовтня 2008. –С. 23.
  55. Нагрибецький І.М. Метод корекції похибки нелінійності прецизійних аналого-цифрових перетворювачів / І.М. Нагрибецький, Р.В. Кочан // Матеріали 13-ї наукової конференції Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, 26 – 28 квітня, 2009. – С. 96–97.
  56. Кочан Р.В. Структурно-алгоритмічний метод підвищення лінійності перетворювачів напруга-код з неперервною функцією похибки / Р.В. Кочан // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні комп’ютерні системи та мережі: розробка та використання», Львів, 9 – 11 листопада, 2009. – С. 230–233.
  57. Кочан Р.В. Вплив параметрів інтеграторів на нелінійність дельта-сигма модулятора високого порядку / Р.В. Кочан // Зб. праць наук. техн. конф. ”Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”, Львів, 7 – 8 жовтня 2010 р. – С. 203–206.
  58. Кочан Р.В. Метод метрологічної перевірки (повірки) аналого-цифрових перетворювачів однозначною мірою / Р.В. Кочан // Зб. праць VII міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 2010)», Харків, 12 – 14 жовтня 2010, т. 2. – С. 303–306.
  59. Кочан Р.В. Вплив параметрів інтегратора на нелінійність дельта-сигма модулятора / Р.В. Кочан // Тези доповідей X-ї Міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2010). Вінниця, 19 – 21 жовтня 2010. – С. 130.
  60. Кочан Р.В. Вплив нелінійності інтегратора на нелінійність сигма-дельта модулятора / Р.В. Кочан // Матеріали міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління” (ПНМК-2011). Бучач, 17 – 20 травня 2011. – С. 96–100.
  61. Левицький В.С. Дослідження методу корекції похибки нелінійності прецизійних

- аналого-цифрових перетворювачів / В.С. Левицький, Р.В. Кочан // Матеріали І Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2011). Тернопіль, 20-21 травня 2011. – С.76-78.
62. Кочан Р.В. Лінійний режим роботи однобітного багатоконтурного сигма-дельта модулятора / Р.В. Кочан // Матеріали 18-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика – 2011). Львів, 28 – 30 вересня 2011. – С. 384–385.
63. Кочан Р.В. Метод перевірки АЦП на базі резистивного подільника / Р.В. Кочан // Матеріали 5-ї міжнародної наук.-техн. конференції “Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання”. Львів, 29 вересня – 01 жовтня 2011. – С. 235–239.
64. Кочан Р.В. Дослідження інтегральної нелінійності сигма-дельта модулятора другого порядку / Р.В. Кочан // Зб. наук. праць міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції “Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління” (ПНМК-2012). 7 – 10 червня 2012, Бучач. – С. 101–109.
65. Кочан Р.В. Концепція бездемонтажної метрологічної самоперевірки АЦП / Р.В. Кочан // Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «Методи і Засоби Вимірювань Фізичних Величин – Температура-2012», 25 – 28 вересня 2012, Львів. – С. 185–186.
66. Кочан Р.В. Методологія використання подільника напруги в підсистемі метрологічної самоперевірки АЦП / Р.В. Кочан // Зб. праць ІХ міжн. наук.-техн. конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 2012)», Харків, 9 – 11 жовтня 2012. – С. 605–610.
67. Кочан Р.В. Дослідження інтегральної нелінійності сигма-дельта модулятора третього порядку / Р.В. Кочан // Тези доповідей ХІ Міжнародної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2012). Вінниця, 9 – 11 жовтня 2012. – С. 22.
68. Кочан Р.В. Вплив інтеграторів на нелінійність багатоконтурних однобітних сигма-дельта модуляторів / Р.В. Кочан // Зб. праць ІІ-ї наук. техн. конф. ”Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”, Львів, 4 – 5 жовтня 2012 р. – С. 93–97.

### АНОТАЦІЯ

**Кочан Р.В. Методи та засоби метрологічної самоперевірки прецизійних аналого-цифрових перетворювачів у процесі експлуатації. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України. Львів, 2013.

У дисертації вирішено науково-технічну проблему забезпечення єдності вимірювань і метрологічної надійності результатів перетворення прецизійних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з обмеженням трудомісткості їх метрологічного обслуговування. Для цього запропоновано оснастити їх системою метрологічної самоперевірки, яка ґрунтується на встановленні нуля, калібруванні та визначенні інтегральної нелінійності АЦП (необхідні та достатні процедури).

Остання використовує багаторезисторний подільник напруги під'єднаний до джерела напруги калібрування АЦП. Доведено, що у разі усереднення спадів напруги на всіх резисторах подільник є вимірювальним перетворювачем з нехтуючи малою похибкою. Це дозволило запропонувати базовий метод визначення інтегральної нелінійності АЦП і методику його модифікації, яка дала змогу розробити сім нових методів. Показано, що шум АЦП (основне джерело невиключеної похибки) спричиняє похибку меншу за 0,0002 %. Досліджено придатність методів для визначення/корекції інтегральної нелінійності сигма-дельта АЦП. Запропоновано і досліджено концепцію побудови систем метрологічної самоперевірки АЦП. Показано переваги використання таких АЦП у системах вимірювання температури за методом заміщення (похибка менша за 1 мК).

**Ключові слова:** метрологічна самоперевірка, повірка, аналого-цифровий перетворювач, інтегральна нелінійність, сигма-дельта модулятор.

#### ANNOTATION

**Kochan R.V. Methods and equipment of metrology self-testing of precision analogue to digital converters during exploitation. – Manuscript.**

**Thesis for the doctoral degree in technical science on 05.11.05 – Equipment and methods of electrical and magnetic quantities measurements – Lviv Polytechnic National University of Ministry of education and science of Ukraine, Lviv, 2013.**

There is solved an scientific and technical problem of uniformity the measurements and providing metrological reliability of the conversion results of analog to digital converters (ADCs) with limited complexity of their metrological support. It is proposed to embed the metrology self-testing system into ADC. This metrological self-testing system is based on null setting, calibration and nonlinearity identification (these procedures are necessary and sufficient). The nonlinearity identification procedure is based on multi-resistors voltage divider connected to ADC calibration source. It is proved that this voltage divider, in the case of averaging voltages on all resistors, is a converter with negligible small error. It provides development basic method of ADC's integral nonlinearity identification and methodology of this method modification. It gives opportunity to develop new seven methods. It is showed that noise of ADC is the main source of residual error and it brings error less than 0,0002 %. There is investigated the compatibility of the proposed methods for nonlinearity identification and correction of precision sigma-delta ADC. There is proposed and investigated the conception of development of metrology self-verification system of ADC. There is proved the utility of ADC implementation in temperature measurement systems using replacement method (error less than 1 mK).

**Key words:** metrological self-verification, verification, analogue to digital conversion, integral non-linearity, sigma-delta modulator.

#### АННОТАЦИЯ

**Кочан Р.В. Методы и средства самоповерки прецизионных аналого-цифровых преобразователей в процессе эксплуатации. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.11.05 – приборы и методы измерения электрических и магнитных величин. Национальный университет “Львівська політехніка” Министерства образования и науки Украины. Львов, 2013.

В диссертации решена важная научно-техническая проблема обеспечения единства измерений и метрологической надежности результатов преобразования аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с одновременным уменьшением трудоемкости их метрологического обслуживания. Предложено оснастить АЦП системой самоповерки, базирующейся на установке нуля, калибровке и определении интегральной нелинейности АЦП (эти процедуры необходимы и достаточны). Последняя основана на использовании многорезисторных делителей, подключенных к источнику напряжения калибровки АЦП. Доказано, что при усреднении падений напряжения на всех резисторах делитель является измерительным преобразователем с пренебрежимо малой погрешностью. На этой основе предложен базовый метод формирования точек поверки (определения интегральной нелинейности АЦП), недостатком которого является размещение точек поверки в нижней половине диапазона преобразования АЦП. Для преодоления этого недостатка создана методология модификации базового метода, позволившая предложить еще семь методов формирования точек определения нелинейности. Предложенные методы обеспечивают формирование 3 ... 31 точек определения нелинейности. Показано, что основным источником неисключенной погрешности всех предложенных методов является случайная погрешность АЦП (шум), вызывающий, при поверке 24 разрядных АЦП с амплитудой шума не более шести квантов, погрешность менее 0,0002 %.

Исследована пригодность предложенных методов для формирования точек определения нелинейной составляющей погрешности прецизионных сигма-дельта АЦП, для чего создана имитационная модель однобитных сигма-дельта модуляторов первого, второго и третьего порядков, позволившая также выявить практическую независимость нелинейности модулятора от нелинейности второго и третьего интеграторов и сформулировать рекомендации для повышения эффективности определения и/или коррекции интегральной нелинейности АЦП.

На основе проведенных исследований показаны недостатки традиционной периодической лабораторной поверки и разработана концепция самоповерки АЦП в процессе эксплуатации, определены требования к системам самоповерки АЦП и их компонентам, а также вопросы их метрологического обслуживания путем замены источника напряжения калибровки АЦП. Разработаны варианты структуры этих систем для разных измерительных систем и предложен метод самоповерки многодиапазонных сигма-дельта АЦП.

Доказано возможность измерения с помощью АЦП с использованием метода замещения и показано целесообразность коррекции интегральной нелинейности АЦП, поскольку инструментальная погрешность результатов таких измерений определяется остаточной нелинейностью АЦП. Исследована зависимость этой инструментальной погрешности от структуры переходной меры и показано, что увеличение количества декад больше двух нецелесообразно. Разработан метод коррекции самонагрева термометров сопротивления рабочим током и спроектирована система измерения температуры с помощью платиновых термометров сопротивления с погрешностью менее 1 мК.

**Ключевые слова:** самоповерка, поверка, аналого-цифровой преобразователь, интегральная нелинейность, сигма-дельта модулятор.

