

УДК 621.317.7.089.6

Р. Кочан¹, канд. техн. наук; Г.Сапожник², канд. іст. наук

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
²Тернопільський національний економічний університет

МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ КОРЕКЦІЇ ПОХИБКИ НЕЛІНІЙНОСТІ ПРЕЦИЗІЙНИХ АЦП

Резюме. Досліджено особливості реалізації методу експериментальних досліджень ефективності корекції похибки нелінійності АЦП, похибка нелінійності яких менша 0,003%. Запропонований метод дозволяє доволі суттєво (в 10...100 разів) зменшити вимоги до взірцевих засобів, які необхідні для проведення експериментального дослідження похибки нелінійності таких прецизійних АЦП, а також визначити ефективність засобів корекції цієї похибки.

Ключові слова: нелінійність АЦП, прецизійний АЦП, ефективність корекції похибки, залишкова похибка інтегральної нелінійності, коефіцієнт ефективності корекції.

R. Kochan, G. Sapognyk

EXPERIMENTAL RESEARCH METHOD OF CORRECTION OF ERRORS PRECISION ADC NONLINEARITY

The summary. The article explores the peculiarities of the method of experimental research the effectiveness of error correction of nonlinearity of ADC nonlinearity error of less than 0.003%. The method allows quite significantly (10 ... 100 times) reduce the requirements for exemplary facilities necessary to conduct experimental research nonlinearity errors such precision ADC and also to determine the effectiveness of correcting this error.

Key words: non linear ADC, ADC precision, efficiency error correction, the residual integral nonlinearity error, coefficient of efficiency correction.

Умовні позначення

N_{X1} – вихідний код АЦП;

U_X – вхідна напруга АЦП;

K – коефіцієнт перетворення АЦП;

$f(U_X)$ – нелінійна складова похибки ФП АЦП;

N_{X1}^K – вихідний код АЦП після корекції нелінійної складової похибки ФП АЦП за відсутності додаткової відомої нелінійності;

$f^K(U_X)$ – залишкова похибка інтегральної нелінійності ФП АЦП після корекції;

N_{X2}^K – вихідний код АЦП після корекції нелінійної складової похибки ФП АЦП за наявності додаткової відомої нелінійності;

$f^{\nabla K}(U_X)$ – залишкова похибка інтегральної нелінійності ФП АЦП після корекції введеної додаткової нелінійності;

$f^{\nabla}(U_X)$ – введена додаткова нелінійність;

K_{KOR} – коефіцієнт ефективності корекції.

Вступ. Одним із найважливіших компонентів цифрових систем опрацювання аналогових сигналів є аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) [1]. Їх похибка перетворення повністю входить у похибку вимірювального каналу, тому питанню точності АЦП приділяється багато уваги [2]. Як показано в [3], трудомісткість контрольно-вимірювальних операцій при виготовленні АЦП складає до 50 % часу і до

60–70 % собівартості, тому інтегральні АЦП з нормованими метрологічними характеристиками є найбільш трудомісткими виробами мікроелектроніки.

Систематичну похибку функції перетворення (ФП) АЦП можна розділити на адитивну, мультиплікативну та нелінійну складові [2, 4]. Методи боротьби з адитивною та мультиплікативною похибками – автоматичне встановлення нуля і калібрування, відомі [4, 5] та широко використовуються [2]. Наприклад, в 24-розрядних АЦП серії AD77xx (див., наприклад, AD7714 [6]) автоматичне встановлення нуля і калібрування є вбудованими функціями, вони вимагають тільки програмного виклику від пристрою, який приймає результати перетворення.

Щодо нелінійної складової, то, як сказано в [2], “не існує простого та зручного методу корекції нелінійної складової похибки АЦП”. Тому для прецизійних АЦП зменшення нелінійності є актуальною задачею. Наприклад, незважаючи на те, що АЦП AD7714 [6] є 24-розрядними, їх максимальне значення похибки інтегральної нелінійності в нормальних умовах експлуатації досягає 0,0015%, що відповідає 16-му розряду. Це означає, що похибка від нелінійності таких АЦП не дозволяє реалізувати їх потенційні можливості.

Найперспективнішим методом зменшення впливу похибки нелінійності на результат перетворення є її корекція. Для проведення такої корекції необхідно розв’язати задачу поточного визначення дійсного значення похибки інтегральної нелінійності в умовах експлуатації. В [7, 8] запропоновано методи визначення похибки інтегральної нелінійності, що базуються на методі відношення. Вони забезпечують, згідно з дослідженнями [9...12], можливість корекції похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП із залишковою похибкою не більше 0,0001%, що підтверджує високу ефективність запропонованих методів корекції. Під ефективністю в даному випадку будемо розуміти відношення похибки перетворення АЦП без корекції нелінійної складової ФП АЦП (хоча після проведення корекції адитивної та мультиплікативної похибок шляхом встановлення нуля і калібрування) до похибки перетворення АЦП із корекцією нелінійної складової ФП АЦП (також після встановлення нуля і калібрування).

Однак дослідження методів [7, 8] проведено в [11, 12] шляхом імітаційного моделювання. Достовірність таких досліджень залежить від адекватності моделей, використаних під час моделювання. Водночас, при похибках на рівні 0,001...0,0001% навіть другорядні ефекти, зокрема, завади, можуть відігравати вирішальну роль. Тому важливою є теж експериментальна перевірка методів корекції похибки нелінійності. Вона не тільки дозволить впевнитися в коректності проведених імітаційних досліджень, а й виявити джерела залишкових похибок корекції інтегральної нелінійності ФП АЦП, на які при імітаційному моделюванні не було звернуто увагу.

Але прямі експериментальні дослідження методів корекції похибки нелінійності ФП прецизійних АЦП шляхом їх повірки, з використанням відомих методів, зокрема, зрівняння і калібрування, вимагають засобів вимірювання, похибки яких хоча б у 3 рази менші від самої залишкової похибки, тобто не перевищують 0,00003...0,00004%. Вимірювальне обладнання такої точності є малодоступним, вимагає спеціальних умов експлуатації та має дуже високу ціну. Наприклад, прецизійний калібратор 5720А фірми Fluke [13], хоча і забезпечує на діапазонах перетворення 11 і 22 В невизначеність не більше 0,00045% (тобто має приблизно в 10 разів меншу точність, ніж потрібно), коштує 40...50 тисяч доларів США, залежно від комплекту поставки.

Слід відзначити, що самі відхилення ФП АЦП від лінійної, а також залишкову похибку корекції інтегральної нелінійності не обов’язково треба визначати шляхом повірки АЦП. Можна використати метод відношення, який в даному випадку реалізується шляхом калібрування АЦП з допомогою того ж взірцевого приладу, з допомогою якого буде досліджуватися нелінійність ФП цього АЦП. Тоді

мультиплікативна похибка взірцевого засобу і АЦП не будуть впливати на результат дослідження нелінійності ФП АЦП і калібратор 5720А може забезпечити дослідження залишкової похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП на діапазонах перетворення 11 і 22 В з похибкою не більше 0,00015...0,0002% [13]. Але цей шлях залишається надто дорогим, тому доцільним є розроблення спеціального методу експериментального дослідження ефективності методів корекції похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП, вільного від вказаних недоліків.

Метою статті є розроблення такого методу експериментального дослідження ефективності методів корекції похибки інтегральної нелінійності ФП прецизійних АЦП, що не вимагає для реалізації складного та взірцевого обладнання, а також розроблення відповідного стенда, що реалізує цей метод.

Обґрунтування методу. Можливість зниження вимог до взірцевого обладнання при використанні пропонованого методу базується на методі відношення. Його основна ідея полягає в тому, що ефективність методів корекції похибки інтегральної нелінійності ФП прецизійних АЦП слабо залежить від самого максимального значення (амплітуди) похибки інтегральної нелінійності. А ось складність дослідження залишкової похибки інтегральної нелінійності ФП прецизійних АЦП різко зростає зі зменшенням цієї похибки. Це означає, що ефективність методів корекції похибки інтегральної нелінійності ФП експериментально вигідно визначати при її корекції для АЦП, які мають значну нелінійність. Однак АЦП низької точності мають також відносно малу розрядність, а також вищий рівень шумів, що впливає на досліджувану ефективність. Крім того, через особливості ФП різних типів АЦП, експериментальні дослідження ефективності методу корекції похибки інтегральної нелінійності слід проводити на базі того типу АЦП, в якому даний метод буде використаний. Тільки тоді результати експериментальних досліджень можна вважати достовірними. Тому пропонуємо під час експериментальних досліджень саме ефективності методів корекції похибки нелінійності ФП АЦП “зіпсувати” досліджуваний прецизійний АЦП, штучно збільшивши похибку нелінійності його ФП відомим чином. Таке введення додаткової відомої нелінійності можна виконати як апаратним шляхом (за допомогою додаткового цифро-аналогового перетворювача), так і програмним шляхом (за допомогою програми, яка додає до вихідного коду АЦП відповідне значення). Тоді можна дослідити ефективність застосованого методу корекції похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП, тобто знайти відношення похибки перетворення АЦП без корекції нелінійності до похибки перетворення АЦП із корекцією нелінійності.

Слід відзначити, що при експериментальному дослідженні з допомогою пропонованого методу проведення корекції адитивної та мультиплікативної похибок шляхом встановлення нуля і калібрування згідно з [4, 5] є обов’язковим. У такому випадку ФП досліджуваного АЦП (без введеної додаткової відомої нелінійності) можна представити як

$$N_{x1} = K \cdot U_x + f(U_x), \quad (1)$$

де N_{x1} – вихідний код АЦП; U_x – вхідна напруга АЦП; K – коефіцієнт перетворення АЦП; $f(U_x)$ – нелінійна складова похибки ФП АЦП.

Після введення додаткової відомої нелінійності $f^\nabla(U_x)$ ФП досліджуваного АЦП можна представити як

$$N_{x2} = K \cdot U_x + f(U_x) + f^\nabla(U_x). \quad (2)$$

Після корекції похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП, для першого випадку, прайз відсутності додаткової відомої нелінійності, згідно з (1), запишемо

$$N_{x1}^K = K \cdot U_x + f^K(U_x), \quad (3)$$

де N_{x1}^K – вихідний код АЦП після корекції нелінійної складової похибки ФП АЦП за відсутності додаткової відомої нелінійності; $f^K(U_x)$ – залишкова похибка інтегральної нелінійності ФП АЦП у першому випадку.

Аналогічно, після корекції похибки інтегральної нелінійності ФП АЦП, для другого випадку, за наявності додаткової відомої нелінійності та відсутності перехресних спотворень, згідно з (2), запишемо

$$N_{x2}^K = K \cdot U_x + f^K(U_x) + f^{\nabla K}(U_x), \quad (4)$$

де N_{x2}^K – вихідний код АЦП після корекції нелінійної складової похибки ФП АЦП за наявності додаткової відомої нелінійності; $f^{\nabla K}(U_x)$ – залишкова похибка інтегральної нелінійності ФП АЦП у першому випадку.

Різниця похибок інтегральної нелінійності ФП АЦП, отриманих в обох експериментах, згідно з (1) і (2), до корекції нелінійності повинна відповідати введеній додатковій нелінійності $f^\nabla(U_x)$

$$N_{x2} - N_{x1} = f^\nabla(U_x). \quad (5)$$

Якщо рівність (5) не виконується, а відхилення перевищують подвійну випадкову похибку, то це означає або наявність перехресних спотворень (що виключає коректність оцінювання ефективності корекції нелінійної складової ФП досліджуваного АЦП з допомогою пропонованого методу), або некоректність проведення експериментальних досліджень чи опрацювання їх результатів.

Якщо рівність (5) виконується, то різниця похибок інтегральної нелінійності ФП АЦП, отриманих при обох експериментах, згідно з (3) і (4), після корекції нелінійності повинна відповідати залишковій похибці від введеної додаткової нелінійності $f^\nabla(U_x)$

$$N_{x2}^K - N_{x1}^K = f^{\nabla K}(U_x). \quad (6)$$

В такому випадку коефіцієнт ефективності корекції K_{KOR} , тобто відношення максимального значення похибки інтегральної нелінійності ФП досліджуваного АЦП до її корекції до максимального значення залишкової похибки цієї нелінійності після її корекції для даної точки діапазону можна визначити як відношення (5) до (6)

$$K_{KOR} = \frac{f^\nabla(U_x)}{f^{\nabla K}(U_x)} = \frac{|N_{x2}| - |N_{x1}|}{|N_{x2}^K| - |N_{x1}^K|}. \quad (7)$$

При дослідженні ефективності методу корекції інтегральної нелінійності ФП АЦП по всьому діапазону для оцінювання коефіцієнта ефективності корекції K_{KOR} слід брати максимальні відхилення від лінійної ФП по всьому діапазону

$$K_{KOR} = \frac{f_{MAX}^\nabla(U_x)}{f_{MAX}^{\nabla K}(U_x)} = \frac{(|N_{x2}| - |N_{x1}|)_{MAX}}{(|N_{x2}^K| - |N_{x1}^K|)_{MAX}}. \quad (8)$$

Слід відзначити, що (7) і (8) не враховують нелінійності взірцевого засобу, з допомогою якого проводять експериментальні дослідження. Вплив його нелінійності $f_N(U_x)$ на результат досліджень можна б було врахувати при написанні (1) і (2). В результаті (7) можна переписати як

$$K_{KOR} = \frac{|N_{x2}| - |N_{x1}| + |f_N(U_x)|}{|N_{x2}^K| - |N_{x1}^K| + |f_N(U_x)|}. \quad (9)$$

Якщо виконати умови $f^\nabla(U_X) \gg f(U_X)$ і $f^\nabla(U_X) \gg f_N(U_X)$, то вплив $f_N(U_X)$ у чисельнику (9) малий. Однак у знаменнику (9) вплив $f_N(U_X)$ може бути суттєвим – він може значно зменшити отримане в результаті досліджень значення K_{KOR} . Власне через допустиме зменшення K_{KOR} можна оцінити допустиму нелінійність взірцевого засобу. Очевидно, що відносну похибку δ_K визначення коефіцієнта ефективності корекції K_{KOR} можна оцінити за формулою

$$\delta_K \approx \left(\frac{|N_{X2}| - |N_{X1}| + |f_N(U_X)|}{|N_{X2}^K| - |N_{X1}^K| + |f_N(U_X)|} - \frac{|N_{X2}| - |N_{X1}|}{|N_{X2}^K| - |N_{X1}^K|} \right) \cdot 100\% \Bigg/ \frac{|N_{X2}| - |N_{X1}|}{|N_{X2}^K| - |N_{X1}^K|} \approx \left(1 - \frac{|N_{X2}^K| - |N_{X1}^K|}{|N_{X2}^K| - |N_{X1}^K| + |f_N(U_X)|} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

З (10) бачимо, що при умові $f^K(U_X) \approx f_N(U_X)$ коефіцієнт K_{KOR} буде занижений приблизно в два рази. Таким чином, згідно з (10), використовуючи при дослідженні K_{KOR} , наприклад, потенціометрів Р363-1 класу 0,001, широко розповсюджених в органах Держкомспоживстандарту, при дослідженні 24-розрядного АЦП АД7714 [6], максимальне заниження коефіцієнта K_{KOR} не буде перевищувати 40%, а при використанні дещо менш розповсюджених компараторів-калібраторів Р3003 (максимальна похибка нелінійності 0,0005 %) максимальне заниження коефіцієнта K_{KOR} не буде перевищувати 25%. Оцінка коефіцієнта ефективності корекції K_{KOR} з такими похибками цілком допустима, адже на цю оцінку будуть мати також значний вплив випадкові похибки досліджуваного АЦП, а при дослідженнях залишкової похибки на рівні 0,001...0,0001% їх вплив як на саму ефективність процедури корекції нелінійної складової систематичної похибки досліджуваного АЦП, так і на оцінку коефіцієнта ефективності корекції K_{KOR} буде суттєвий. Слід відзначити, що вплив на оцінку коефіцієнта ефективності корекції K_{KOR} випадкових похибок досліджуваного АЦП при використанні пропонованого методу буде знижено приблизно у $f^\nabla(U_X)/f(U_X)$ разів. Пропонований метод особливо ефективний, коли необхідно дослідити та порівняти ефективність різних методів корекції похибки нелінійності ФП АЦП. В такому випадку заниження коефіцієнта K_{KOR} практично не буде впливати на результат дослідження, адже, згідно з (10), при використанні різних методів корекції заниження коефіцієнта K_{KOR} буде функцією тільки залишкової похибки від корекції введеної додаткової нелінійності $f^\nabla(U_X)$, що цілком не заважає виявленню кращого методу.

Основними труднощами, які виникають при реалізації пропонованого методу, є необхідність максимального зменшення дії завод на компоненти схеми під час експериментальних досліджень.

Стенд експериментальних досліджень ефективності корекції похибки нелінійності АЦП

Як було вказано вище, випадкові похибки досліджуваного АЦП, при залишковій похибці на рівні 0,001...0,0001%, будуть мати значний вплив на результати експериментальних досліджень. Рівень випадкових похибок визначається як параметрами самого досліджуваного АЦП, так і умовами його роботи. Тому необхідно створити при експериментальних дослідженнях такі умови роботи АЦП, які максимально знизять дію зовнішніх факторів. Основними з цих факторів є:

1. Шуми джерела напруги, яку подають на вхід досліджуваного АЦП (взірцевого при калібруванні або допоміжного при звірянні).
2. Залишкова дія завод нормального та загального виду.
3. Вплив джерела живлення досліджуваного АЦП.

Вплив першого фактора зменшують відповідним вибором обладнання. Наприклад, компаратор-калібратор Р3003 має шуми на рівні 0,00002% при вихідній напрузі 1...10 В, що достатньо для досліджень ефективності корекції похибки нелінійності сучасних прецизійних АЦП.

Вплив залишкової дії завод нормального виду можна зменшити як конструктивно-технологічними методами (екранування, фільтрування завади з допомогою конденсаторів, збільшення відстані до джерел завод), так і структурно-алгоритмічними методами. Прецизійні АЦП, зокрема, сігма-дельта, мають добру заводостійкість – у діапазоні частот завади (50±1) Гц коефіцієнт придушення завади є не меншим 80 дБ [6]. Прецизійні АЦП двотактного інтегрування мають коефіцієнти придушення завод на рівні 60...100 дБ [9]. Вплив завод загального виду можна зменшити шляхом гальванічної розв'язки інформаційних сигналів з допомогою оптронів та екранування трансформатора живлення [14, 15]. Однак такі традиційні заходи виявляються недостатніми для досягнення рівня випадкової похибки, потрібного для дослідження методів корекції систематичних похибок, зокрема, ефективності корекції похибки нелінійності прецизійних АЦП. Наприклад, при під'єднанні до входу АЦП джерела вхідної напруги, яке живиться від іншої фази мережі живлення 220 В, ніж АЦП, максимальна амплітуда завади загального виду може досягнути 540 В [16]. У такому випадку, навіть при дуже великому коефіцієнті придушення завади, що дорівнює 160 дБ, отримаємо залишкову випадкову похибку 5,4 мкВ, що при корекції нелінійної складової похибки на діапазоні 2,5 В складає 5 розрядів для 24-розрядного АЦП.

Вплив шумів джерела живлення досліджуваного АЦП на його випадкову похибку досить малий через невисокий рівень цих шумів і значний коефіцієнт придушення впливу напруги живлення на вихідний код для прецизійних АЦП. Однак саме джерело живлення досліджуваного АЦП від мережі живлення 220 В значною мірою визначає рівень завод загального виду і, тим самим, випадкову похибку АЦП. У зв'язку з викладеним прийнято рішення використати акумуляторне індивідуальне живлення компонентів розробленого стенда.

Структурна схема розробленого стенда експериментальних досліджень ефективності корекції похибки нелінійності прецизійних АЦП зображена на рис. 1. До її складу входять вузли, оформлені як незалежні уніфіковані модулі:

1. Джерело напруги калібрування ДНК.

2. Під'єднаний до виходу ДНК резисторний подільник напруги для корекції нелінійності АЦП згідно з [7, 8].

3. Досліджуваний АЦП.

4. Комутатор, що під'єднує до входу АЦП виходи подільника.

5. Цифроаналоговий перетворювач ЦАП (включається до складу стенда тільки при аналоговому способі задавання додаткової відомої нелінійності, наприклад, при дослідженні АЦП, в яких опрацювання сигналу здійснюється вбудованим обчислювальним засобом, доступу до програмного забезпечення якого немає).

Персональний комп'ютер IBM PC служить для керування процесом експериментальних досліджень, а також збору й опрацювання їх результатів. Кожним модулем (крім ДНК) керує мікроконтролер (МК1...МК3) типу AT89S52. Мікроконтролери МК1...МК3 та IBM PC об'єднані в мережу на базі модифікованого інтерфейсу RS-232C [17]. Усі мікроконтролери оснащені гальванічною розв'язкою сигналів інтерфейсу на базі оптронів PC817, які забезпечують середні прохідний опір 100 ГОм і прохідну ємність 0,6 пФ.

Вплив на результат експериментальних досліджень похибки і дрейфу (часового та температурного) джерела напруги калібрування усувається за рахунок калібрування досліджуваного АЦП з допомогою ДНК безпосередньо перед і після проведення експерименту, а також виявлення дрейфу досліджуваного АЦП за час проведення експерименту (замкнений цикл вимірювання). Однак, для зменшення випадкової складової похибки результатів перетворення АЦП, ДНК побудовано на базі прецизійного стабілізатора AD780 [18], низькочастотні шуми якого не перевищують 4 мкВ і додатково зменшені фільтром на вході АЦП. Комутатор виконано на базі КМОН ключів ADG431 [19], виводи яких, для зменшення рівня паразитних термо-е.р.с., покриті теплоізоляційним компаундом. Мікроконтролер МК3, що керує ключами комутатора, має додаткові виходи, які можна задіяти для керування перемикачами в самому подільнику, наприклад, при реалізації методу корекції нелінійної похибки АЦП, запропонованого в [7]. Через те, що до допустимого опору контактів у цьому випадку ставляться досить жорсткі вимоги, перемикання проводиться чотирма герконовими реле РГК-15 з додатковими термовирівнювачами. Для керування ними передбачено транзисторні ключі.

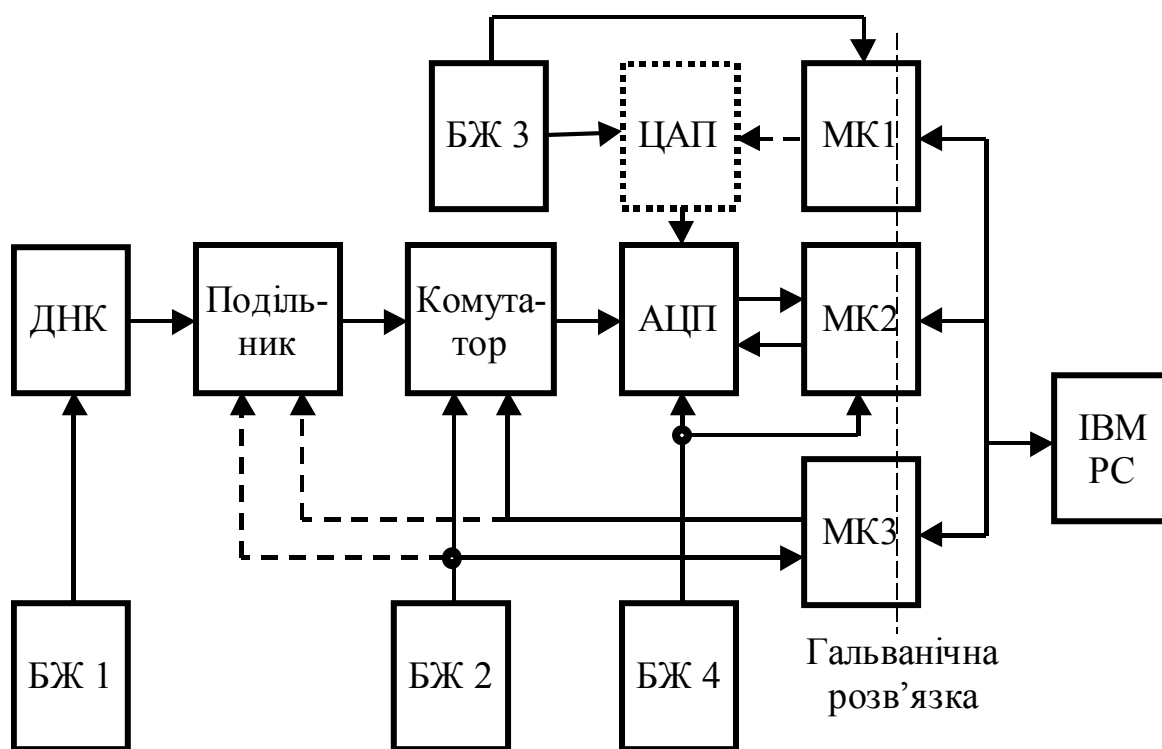


Рисунок 1. Структурна схема розробленого стенда експериментальних досліджень ефективності корекції похибки нелінійності прецизійних АЦП

У зв'язку з тим, що максимальне значення додаткової відомої нелінійності, яка вводиться з допомогою ЦАП, відносно мала (менше 0,02...0,1%), до його точності великі вимоги не ставляться. Однак при залишковій похибці на рівні 0,001...0,0001% необхідно використовувати ЦАП з розрядністю не менше 14 і вихідним підсилювачем з малим рівнем шумів. У стенді використано ЦАП типу AD5640 [20]. Перевагою цього ЦАП є можливість роботи при низькій однополярній напрузі живлення.

Як було вказано вище, у зв'язку з необхідністю мінімізації впливу на результат аналого-цифрового перетворення завад загального виду, використано акумуляторне живлення компонентів розробленого стенда, реалізоване блоками живлення БЖ1...БЖ4. Їх основними компонентами є літій-іонні акумулятори від мобільних телефонів з вихідною напругою 3,6 В. При цьому до складу БЖ1 входить один акумулятор, до складу БЖ2...БЖ4 – по два акумулятори. БЖ3 і БЖ4 оснащені додатковими стабілізаторами типу ADP3335 [21] з вихідною напругою 5 В. У БЖ3 вихідна напруга стабілізатора служить опорною напругою ЦАП, а в БЖ4 – напругою живлення АЦП і МК2.

Висновки. Запропонований метод експериментального дослідження ефективності корекції похибки нелінійності ФП прецизійних АЦП дозволяє значно, в 10...100 разів, знизити вимоги до вірцевого обладнання, яке необхідне для проведення цих експериментальних досліджень. Таким чином, для дослідження АЦП найвищої точності можна використовувати доступне в Україні вірцеве обладнання. Розроблений стенд підтвердив працездатність розробленого методу експериментальних досліджень. У подальшому передбачено опублікувати результати експериментального дослідження ефективності корекції похибки нелінійності ФП прецизійних АЦП, які використовують запропоновані в [7, 8] методи корекції.

Література

1. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы / М.П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
2. Уолт Кестлер. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестлер. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.
3. Федорков Б.Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. Б.Г.Федорков, В.А. Телец. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
4. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М.А.Земельман. – М., Изд-во стандартов, 1972. – 247с.
5. Земельман М.А. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах // М.А. Земельман // Измерительная техника. – 1964. – №9.
6. AD7714: CMOS, 3V/5V, 500 μ A, 24-BIT SIGMA-DELTA, SIGNAL CONDITIONING ADC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/ad-converters/ad7714/products/product.html>.
7. Пат. 200703921 Україна, МПК 7H01H51/00. Пристрій визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів / Кочан Р.В., Кочан О.В. Заявл. 10.04.2007.
8. Пат. 200805621 Україна, МПК 7H01H51/00 Спосіб перевірки аналого-цифрових перетворювачів на місці експлуатації / Кочан Р.В., Кочан О.В. Заявл. 29.04.2008.
9. Кочан Р.В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем: Дис. ... кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.16 – “Інформаційно-вимірювальні системи” / Р.В. Кочан. – Львів, 2005.
10. Кочан Р. Прецизійний блок збору даних з дистанційним перепрограмуванням / Р.Кочан, О.Кочан // Міжн. науково-техн. журнал “Комп’ютинг”. – 2004. – Т.3, № 3. – С. 82–92.
11. Кочан Р. Лінеаризація характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів з високою роздільною здатністю / Р.Кочан // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 2. – С.7–12.
12. Кочан Р.В. Метод корекції інтегральної нелінійності характеристики перетворення прецизійних аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2009. – Вип.70. – С. 18–25.
13. Fluke Corporation 5720A (Multifunction Calibrator) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.telogyk.com/display_model.aspx?bm-FLU\(5720A\)](http://www.telogyk.com/display_model.aspx?bm-FLU(5720A)).
14. [http://www.telogyk.com/display_model.aspx?bm-FLU\(5720A\)](http://www.telogyk.com/display_model.aspx?bm-FLU(5720A)).
15. Швецький Б.Й. Электронные цифровые приборы. – 2-е изд. перераб. и доп./ Б.Й. Швецький. – К.:Техніка, 1991.
16. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства: учеб. пособие для вузов / В.Ю.Кончаловский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 358.
17. Kochan R. Development of the integrating analog to digital converter for distributive data acquisition systems with improved noise immunity // Kochan R., Berezky O., Karachka A., Wojko O., Maruschak I. / IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51, №1. – P. 96 – 101.
18. Патент 25609А України, МПК G06F 15/00. Двопровідна локальна обчислювальна мережа, повторювач сигналу та інвертор для використання в ній / В.В.Кочан, В.О.Тимчишин (Україна). – №97105295; заявл. 30.10.97; видано 30.10.98.
19. AD780: 2.5 V/3.0 V Ultrahigh Precision Bandgap Voltage Reference Product Description [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.analog.com/en/other/militaryaerospace/ad780/products.html.
20. ADG431: LC2MOS Precision Quad SPST Switch. <http://www.analog.com/en/switchesmultiplexers/analog-switches/adg431/products/product.html>.
21. AD5640: Single, 14-Bit nanoDAC® Converter with 5 ppm/°C On-Chip Reference in S0T-23 <http://www.analog.com/en/digital-to-analog-converters/da-converters/ad5640/products/product.html>.
22. ADP3335: High Accuracy Ultralow Quiescent Current, 500mA, anyCAP® Low Dropout. [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://www.analog.com/en/power-management/linear-regulators/adp3335/products/product.html>.

Отримано 08.01.2011