

- R.L. Kautz // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1995. – 44223-5.
25. Monaco R. Enhanced AC Josephson effect / R. Monaco // J. Appl. Phys. – 1990. – 68. – P. 679–687.
26. Present status of AC Josephson voltage metrology at PTB / J. Niemeyer, O. Kieler, F. Müller

[et al.] [Електронний ресурс] // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія–2012”, 9–11 жовтня 2012 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Електрон. дан. – Харків, ННЦ “Інститут метрології”, 2012. – С. 12–15. – 1 CD-ROM.

УДК 621.317.7

МЕТОДОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ В ПІДСИСТЕМІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ САМОПЕРЕВІРКИ АЦП

Р.В.Кочан, кандидат технічних наук, доцент Національного університету “Львівська політехніка”



Описано метод формування тестових сигналів для визначення інтегральної нелінійності АЦП у тестовій точці за допомогою вимірювального перетворювача на базі багаторезисторного подільника напруги з усередненням спадів напруги

на всіх резисторах. Доведено, що такий перетворювач є нечутливим до опорів та систематичних похибок резисторів. Проаналізовано похибку визначення нелінійності АЦП, зумовлену зміною кривизни функції перетворення в околі тестової точки. Запропоновано метод збільшення кількості тестових точок – “базовий” метод та методологію побудови методів формування тестових точок, що забезпечують більш рівномірний їх розподіл за діапазоном.

It was presented the method of testing signal generation for ADC's integral nonlinearity identification in testing point using measuring converter based on multi-resistors voltage divider with averaging voltages of all resistors. It was proved that such converter is insensitive to resistances and systematic errors of the resistors. It was analyzed the error of ADC's nonlinearity identification caused by changing the curvature of ADC's conversion function in the neighborhood of testing point. It was proposed method of testing point incrementing as “basic” method and methodology of development methods of testing point generation, which provides more evenly distribution of testing points via the range in comparison with “basic” method.

Вступ

Розвиток технологій мікроелектроніки привів до широкого використання методів цифрового опрацювання даних у вимірювальних системах (ВС) [1]. Їхніми необхідними компонентами є аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що виготовляються пере-

важно у вигляді інтегральної схеми або компонента системи на кристалі. Постійне збільшення кількості ВС різного функціонального призначення веде до того, що збільшується і кількість АЦП, що підлягають державному метрологічному контролю [2]. Ключова вимога цього контролю – єдність результатів вимірювань, яка забезпечується організаційно-технічними засобами, зокрема, періодичними повірками. Але широкомасштабне виробництво та використання АЦП, що вимагають повірки, зважаючи на її високу трудомісткість та обмежені ресурси уповноважених метрологічних лабораторій, вступає у протиріччя з вимогою забезпечення єдності результатів вимірювань. Слід відзначити, що це протиріччя існувало завжди, однак експлуатація відносно невеликої кількості АЦП та їхня концентрація на великих підприємствах полегшували його вирішення. На сьогодні це неактуально і цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, що входять до складу ВС автомобілів) випадають із поля зору державної метрологічної служби, що потенційно призводить до втрати єдності вимірювань. Особливо це актуально для прецизійних АЦП.

Метою роботи є аналіз методів та засобів, які забезпечують ефективну повірку прецизійних АЦП, що працюють із сигналами електричної напруги.

1. Відомі методи забезпечення єдності результатів аналого-цифрового перетворення

Під час експлуатації АЦП єдність їхніх результатів перетворення забезпечується шляхом проведення періодичних повірок, процедуру яких строго регламентовано нормативними документами [2, 3]. У них визначено засоби вимірювальної техніки, зокрема АЦП, що повинні проходити повірку в уповноважених метрологічних лабораторіях. Метою повірки є встановлення придатності засобів вимірювальної техніки до застосування шляхом визначення їхніх дійсних похибок і порівняння останніх з допустимими межами. Вимоги до повірки власне АЦП регламентуються у [4–8], де всі АЦП поділяються на дві групи:

1) АЦП з неперервною функцією систематичної похибки;

2) АЦП з функцією систематичної похибки, що може мати розриви.

Представниками першої групи АЦП є інтегруючі перетворювачі, зокрема, прецизійні сигма-дельта – АЦП. Представниками другої групи є АЦП порозрядного зрівноваження та конвейєрні АЦП. У цій статті розглянуто питання самоперевірки АЦП лише першої групи.

У зв'язку з тим що найточнішими на сьогодні є сигма-дельта – АЦП [9], розглянемо вимоги до їх перевірки. Ключовими вимогами є кількість та розміщення точок перевірки, їх повинно бути не менше п'яти [4–8]. Згідно з [4, 6], напруги точок перевірки таких АЦП вибираються за формулами $X_1=(0,1\dots0,15)X_D$; $X_2=(0,2\dots0,3)X_D$; $X_3=(0,4\dots0,6)X_D$; $X_4=(0,7\dots0,8)X_D$; $X_5=(0,9\dots1,0)X_D$, де X_D – діапазон перетворення АЦП. Згідно з [5], напруги точок перевірки АЦП $X_2\dots X_5$ вибираються аналогічно до [4, 6], змінено тільки значення точки $X_1=(0,0\dots0,1)X_D$. Отже, основні вимоги щодо перевірки АЦП з неперервною функцією систематичної похибки є ustalеними протягом понад тридцяти років. Усього нормативними документами передбачено два методи перевірки – порівняння (зрівняння) та калібрування. Часто їх називають методами зразкового приладу та зразкового сигналу.

Пропозиції включення до складу програмного забезпечення ВС підсистеми, що забезпечує метрологічне супроводження [10–12], не вирішують проблеми, пов'язаної з відсутністю у складі системи відповідних зразкових засобів. Пропозиції включення до складу системи відповідних зразкових засобів, що забезпечують автоматичну перевірку [13–15], зважаючи на складність таких зразкових засобів та необхідність їхнього власного метрологічного обслуговування, не можуть вирішити проблему перевірки АЦП з прийнятною економічною ефективністю.

Як показано в [16], операції встановлення нуля та калібрування є необхідними, але недостатніми для проведення самоперевірки АЦП, оскільки вони приховують метрологічну відмову через зростання нелінійної складової похибки перетворення. В [16] запропоновано включити до складу АЦП підсистему його самоперевірки, що визначає інтегральну нелінійність АЦП за допомогою багаторезисторного подільника напруги та забезпечує бездемонтажну перевірку АЦП у процесі експлуатації.

2. Визначення інтегральної нелінійності АЦП за допомогою багаторезисторного подільника напруги

Згідно з [17], інтегральна нелінійність АЦП являє собою відхилення дійсної функції перетворення від прямої лінії. Визначити це відхилення можна за допомогою багаторезисторного подільника напруги. Нехай подільник напруги, що складається з N резисторів R_1, \dots, R_N , підключено до

джерела напруги калібрування АЦП U_{REF} (рис. 1). У такому випадку, згідно з II законом Кірхгофа, можна записати

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

де $U_{Ri} = I \cdot R_i = (U_{REF} / \sum_{i=1}^N R_i) R_i$, $i = \overline{1, N}$, – спади напруги на відповідних резисторах подільника.

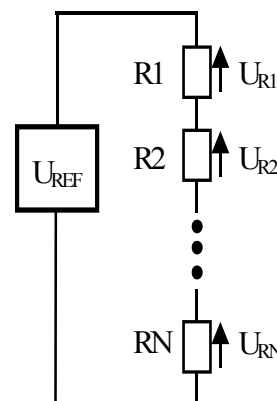


Рис. 1. Схема подільника напруги

Математичне сподівання спадів напруги на всіх резисторах \bar{U} визначається як

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

Підставивши (1) в (2), отримаємо

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

Це означає, що математичне сподівання спадів напруги на всіх резисторах подільника \bar{U} не залежить від спадів напруги на окремих резисторах подільника. Якщо врахувати закон Ома, то згідно з (1) і (2) опори окремих резисторів подільника не впливають на \bar{U} . Через те що N – натуральне число, відносна похибка $\delta_{\bar{U}}$ буде

$$\delta_{\bar{U}} = \delta_{REF},$$

де δ_{REF} – похибка джерела напруги живлення подільника, у нашому випадку – напруги калібрування АЦП.

Таким чином, багаторезисторний подільник напруги, якщо за вихідний сигнал брати математичне сподівання спадів напруги на всіх резисторах подільника \bar{U} , є вимірювальним перетворювачем, нечутливим до опорів резисторів. Він не видає:

- використання прецизійних резисторів;
- перевірки, тобто власного метрологічного обслуговування (для перевірки правильності його функціонування достатньо апробації).

Саме ці властивості багаторезисторного подільника напруги пропонується використати для визначення інтегральної нелінійності АЦП. Разом із установленням нуля та калібруванням, ці власти-

вості можуть бути основою підсистеми самопівірки АЦП.

У результаті аналого-цифрового перетворення вхідної напруги U отримуємо код результату перетворення C :

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

де C_0 – результат аналого-цифрового перетворення для каналу встановлення нуля; C_{REF} – результат аналого-цифрового перетворення для каналу калібрування (коли на вхід АЦП подається напруга калібрування U_{REF}); $f(U)$ – нелінійна складова функції перетворення АЦП.

При аналого-цифровому перетворенні спадів напруги на резисторах подільника R_1, \dots, R_N (рис. 1) отримуємо

$$C_{Ri} = C_0 + \frac{C_{REF} - C_0}{U_{REF}} U_{Ri} + f(U_{Ri}), \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

де C_{Ri} – результат аналого-цифрового перетворення, що відповідає напрузі U_{Ri} .

При аналого-цифровому перетворенні напруги калібрування U_{REF} отримуємо

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

де C_{REF} – результат аналого-цифрового перетворення, що відповідає напрузі калібрування U_{REF} ; $f(U_{REF})$ – нелінійна складова функції перетворення АЦП, яка для напруги калібрування приймається рівною нулю, тобто $f(U_{REF})=0$.

Враховуючи (4), (5) та (2), залежність (3) можна записати як

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{Ri} - C_0 - f(U_{Ri})}{C_{REF} - C_0} U_{REF} = \\ = \frac{1}{N} \frac{C_{REF} - C_0 - f(U_{REF})}{C_{REF} - C_0} U_{REF}. \end{aligned} \quad (6)$$

Спростивши (6) та враховуючи, що $f(U_{REF})=0$, отримуємо

$$\sum_{i=1}^N (C_{Ri} - C_0 - f(U_{Ri})) = C_{REF} - C_0. \quad (7)$$

Математичне сподівання значення функції нелінійності в точках повірки $\overline{f(U_{Ri})}$ можна обчислити як

$$\overline{f(U_{Ri})} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U_{Ri}). \quad (8)$$

Якщо (8) підставити в (7) і знайти звідти $\overline{f(U_{Ri})}$, то отримуємо

$$\begin{aligned} \overline{f(U_{Ri})} &= \frac{C_{REF} - C_0 - f(U_{REF}) - \sum_{i=1}^N (C_{Ri} - C_0)}{N} = \\ &= \frac{C_{REF} - C_0 - \sum_{i=1}^N (C_{Ri} - C_0)}{N}. \end{aligned}$$

Математичне сподівання $\overline{f(U_{Ri})}$ є значенням інтегральної нелінійності АЦП, що повіряють, у точці повірки $\overline{U} = U_{REF} / N$.

3. Аналіз інструментальної похибки визначення інтегральної нелінійності АЦП

У загальному випадку $\overline{f(U_{Ri})} \neq f(\overline{U_{Ri}})$, тому виникає інструментальна похибка самопівірки Δ_I , зумовлена впливом нелінійності функції перетворення АЦП, що повіряють, на результати власної самопівірки. Похибку Δ_I можна визначити як

$$\Delta_I = \overline{f(U_{Ri})} - f(\overline{U_{Ri}}),$$

де U_{Ri} – випадкова величина із законом розподілу, аналогічним до закону розподілу індивідуальних відхилень δ_i .

Максимального значення Δ_I досягає, коли функція нелінійності $f(\overline{U_{Ri}})$ має локальний екстремум в околі точки $\overline{U_{Ri}}$, і цей екстремум попадає в діапазон зміни U_{Ri} від U_{RMIN} до U_{RMAX} . Саме цю ситуацію у збільшеному вигляді наведено на рис. 2. Значення Δ_I , взявши за основу точку U_{RMIN} , можна оцінити як

$$|\Delta_I| \leq |\Delta_{IMAX}| = \left| f(\overline{U_{Ri}}) - \frac{f(U_{RMIN}) + f(U_{RMAX})}{2} \right|, \quad (9)$$

де Δ_{IMAX} – максимальне значення інструментальної похибки від нелінійності АЦП, яка досягається при максимальному відхиленні спадів напруги U_{Ri} на резисторах подільника від середнього значення, тобто для U_{RMIN} (напруга на резисторі з мінімальним опором) та U_{RMAX} (напруга на резисторі з максимальним опором).

Значення $f(\overline{U_{Ri}})$ можна оцінити як

$$f(\overline{U_{Ri}}) \leq f(U_{RMIN}) + f'(U_{RMIN}) \cdot (\overline{U} - U_{RMIN}), \quad (10)$$

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

Аналогічно можна записати

$$f(U_{RMAX}) \leq f(U_{RMIN}) + f'(\overline{U}) \cdot (U_{RMAX} - U_{RMIN}), \quad (11)$$

де $f'(\overline{U})$ – похідна функції нелінійності АЦП у точці \overline{U} .

Крім того, з рис. 2 видно, що

$$|\overline{U} - U_{RMIN}| \leq |U_{RMAX} - \overline{U}| \leq \frac{|\Delta_{MAX}|}{R} \cdot \frac{U_{REF}}{N}, \quad (12)$$

де Δ_{MAX} – допустиме відхилення опору резисторів від номінального.

Враховуючи (10)–(12) і те, що за основу взято точку U_{RMIN} , запишемо (9) як

$$|\Delta_I| \leq \frac{\Delta_{MAX}}{R} \cdot \frac{U_{REF}}{N} \cdot |f'(U_{RMIN}) - f'(\overline{U})|. \quad (13)$$

Слід відзначити, що вираз $\Delta_{MAX}/R \cdot (U_{REF}/N)$, що входить в (13), являє собою максимальне абсолютне відхилення спаду напруги на окремих резисторах подільника. Це відхилення визначається максимальним відносним відхиленням опору резисторів

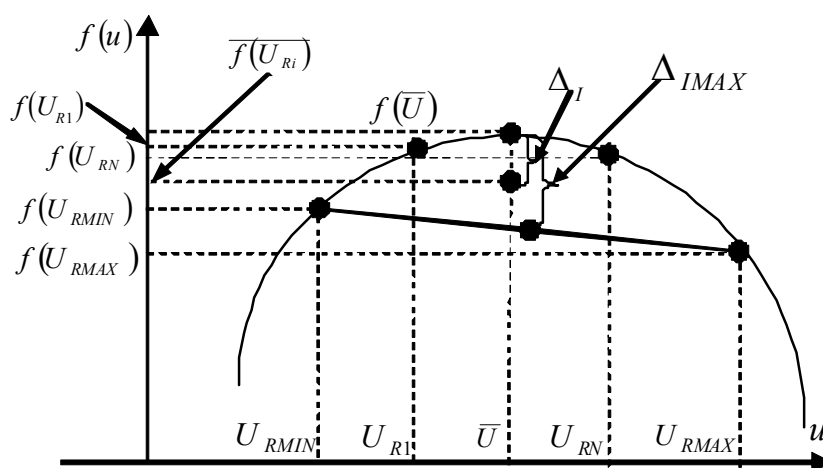


Рис. 2. Виникнення інструментальної похибки при визначенні інтегральної нелінійності АЦП

подільника від їхнього середнього значення. Якщо резистори подільника R_1, \dots, R_N мають однакові номінальні значення опору з допустимим відхиленням δ_R , то $\Delta_{MAX}/R \leq \delta_R$. Таким чином, (13) можна записати як

$$|\Delta_I| \leq \delta_R \cdot \frac{U_{REF}}{N} \cdot |f'(U_{RMIN}) - f'(\bar{U})|. \quad (14)$$

Вираз (14) служить основою для оцінки інструментальної похибки визначення інтегральної нелінійності АЦП, але він містить різницю похідних функції нелінійності. Функція нелінійності АЦП, зазвичай, нормується тільки максимально допустимим значенням, що не дозволяє зробити висновки про характер як самої функції нелінійності, так і похідної. Тому оцінка інструментальної похибки Δ_I вимагає дослідження характеру функції нелінійності, властивій конкретному виду АЦП. Оцінку меж Δ_I можна зробити, виходячи з таких припущень:

1) нехай АЦП за параметрами аналогічний АЦП типу AD7714 [18], тобто:

- його діапазон перетворення 2,5 В;
- його розрядність – 24 двійкові розряди;
- максимальне допустиме значення його нелінійності 0,0015 %, що приблизно відповідає нелінійності 250 квантів;

2) функція нелінійності цього АЦП носить квадратичний характер [19];

3) оцінку похибки Δ_I введемо для точок повірки 1,25 і 0,625 В, що відповідає половині та чверті діапазону перетворення цього АЦП;

4) максимальне відносне відхилення опору резисторів подільника від номінального значення не перевищує $\pm 1\%$.

Функцію нелінійності такого АЦП $f(u)$ у квантах від вхідної напруги u опишемо залежністю $f(u) = 400u - 160u^2$, а її похідну – залежністю $f'(u) = 400u - 320u$. Підставимо їх у (18) і отримаємо $|\Delta_I| \leq 0,01 \times (2,5/2) \cdot |(400 - 320 \cdot 1,25) - (400 - 320 \cdot 1,25 \cdot 0,99)| = 0,05$ і $|\Delta_I| \leq 0,01 \cdot (2,5/4) \cdot |(400 - 320 \cdot 0,625) - (400 - 320 \cdot 0,625 \times 0,99)| = 0,0125$, тобто інструментальна похибка визначення нелінійності АЦП для половини діа-

пазону $\Delta_{0,5} \leq 0,05$ кванта, а для чверті діапазону – $\Delta_{0,25} \leq 0,0125$ кванта. Таким чином, запропонований підхід до визначення інтегральної нелінійності АЦП забезпечує інструментальну похибку самоперевірки, яка задовольняє вимоги АЦП найвищої точності.

4. Методологія побудови багаторезисторних подільників напруги для повірки АЦП

Як видно із викладеного, багаторезисторний подільник напруги забезпечує визначення інтегральної нелінійності АЦП з високою точністю без використання прецизійних резисторів. На його основі запропоновано “базовий” метод визначення інтегральної нелінійності АЦП. Його суть полягає в тому, що живлення подільника здійснюється напругою калібрування АЦП, а збільшення кількості точок визначення нелінійності здійснено шляхом перетворення m спадів напруги на k послідовно з’єднаних резисторах багаторезисторного подільника напруги, що складається з $N = m \cdot k$ резисторів. N вибирають так, щоб мати потрібну множину натуральних чисел $\{m_1, \dots, m_t\}$ – дільників N , тоді існує множина натуральних чисел $\{k_1, \dots, k_t\}$, що задовольняють умову $N = m_i \cdot k_i$. Це дозволяє одним подільником отримати t точок визначення інтегральної нелінійності АЦП:

$$\bar{U}_i = \frac{U_{REF}}{N} m_i, \quad i = \overline{1, t}.$$

Отже, вибираючи відповідну кількість резисторів подільника, можна збільшити кількість точок визначення інтегральної нелінійності АЦП. Недоліком “базового” методу є те, що всі точки визначення інтегральної нелінійності АЦП розміщено нерівномірно – в нижній половині діапазону перетворення АЦП. Таким чином, “базовий” метод не забезпечує виконання викладених вище вимог нормативних документів [4–8] до розміщення точок повірки за діапазоном перетворення АЦП.

Для усунення цього недоліку пропонується така методологія:

1) корекція інтегральної нелінійності АЦП та виділення ділянок діапазону перетворення АЦП з малою похибкою самоперевірки і їх використання для прецизійного вимірювання напруги на деяких резисторах та їхніх комбінаціях з наступним розрахунком значень напруги на інших комбінаціях, що попадають у ділянки діапазону з великою похибкою;

2) використання “базового” методу на двох діапазонах АЦП, вибраних так, щоб точки перевірки верхнього діапазону були розміщені у верхній половині нижнього;

3) багатократне використання “базового” методу на різних діапазонах перетворення АЦП таким чином, щоб на заданому діапазоні забезпечити потрібний розподіл точок визначення нелінійності АЦП;

4) вибір напруги калібрування вищою за діапазон перетворення АЦП та використання однієї з точок визначення нелінійності для калібрування АЦП;

5) заміна порядку ввімкнення резисторів подільника під час визначення нелінійності.

Використання запропонованих підходів та їхніх комбінацій дало можливість синтезувати шість нових методів формування точок визначення інтегральної нелінійності АЦП [16, 20–23]. Деякі з них, разом із процедурами встановлення нуля та калібрування, забезпечують перевірку АЦП з неперервною функцією систематичної складової похибки перетворення згідно з діючими стандартами.

Висновки

Як видно з викладеного, похибка вихідного сигналу вимірювального перетворювача на базі багаторезисторного подільника напруги, зумовлена відхиленнями опору його резисторів від номінального, а також змінами цього опору в процесі експлуатації, при усередненні спадів напруги на всіх його резисторах, довівнює нулю. Тому такий подільник не вимагає використання прецизійних резисторів, а його перевірка зводиться до апробації. Ця властивість робить такий вимірювальний перетворювач перспективним для побудови підсистеми перевірки прецизійних АЦП. Розроблена методологія дозволяє будувати подільники, що формують необхідну кількість точок перевірки з використанням однозначної міри напруги, причому похибка цих точок довівнює похибці міри напруги. Це забезпечує визначення інтегральної нелінійності АЦП у заданих нормативними документами точках перевірки, що разом із результатами встановлення нуля та калібрування повністю характеризує похибку перетворення АЦП під час перевірки.

Реалізація запропонованих методів самоперевірки АЦП дозволить забезпечити єдність вимірювань та підвищити метрологічну надійність результатів аналого-цифрового перетворення у вимірювальних системах.

Список літератури

1. *Бабак В.П.* Обробка сигналів: підручник / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.
2. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність від 15.06.2004 № 1765-IV // Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К.: Парлам. вид-во, 2004. – 22 с. – (Бібліотека офіційних видань).
3. Метрологія. Перевірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 2708:2006. – [Чинний від 2006-07-01]. – (Національний стандарт України). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу http://www.metrology.in.ua/downloads/gost/DSTU2708_2006.pdf.
4. Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові. Загальні технічні умови: ДСТУ 3744-98. – [Чинний від 2000-07-01]. – К.: Держстандарт України, 1998. – 10 с. – (Національний стандарт України).
5. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 14014-91. – [Дата введения 1993-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 14 с. – (Межгосударственный стандарт).
6. Преобразователи измерительные напряжения и тока цифровые. Общие технические условия: ГОСТ 30605-98. – [Дата введения 2004-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 10 с. – (Межгосударственный стандарт).
7. Методика поверки цифровых вольтметров и аналого-цифровых преобразователей: МИ 118-78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 22 с.
8. ГСИ. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки: МИ 1202-86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 25 с.
9. *Fowler K.* Part 7: Analog-to-digital conversion in real-time systems / K. Fowler // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2003. – Vol. 6, Issue 3. – P. 58–64.
10. *Кондрашов С.І.* Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах тестових впливів: автореф. дис.... д.т.н. / С.І. Кондрашов. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – 38 с.
11. *Балєв В.М.* Методи та засоби контролю похибок вимірювальних каналів автоматизованих систем контролю та керування: автореф. дис.... к.т.н. / В.М. Балєв. – Харків: НТУ “ХПІ”, 1999. – 23 с.
12. *Соболев В.С.* Метрологическое автосопровождение результатов измерений в интеллектуальных измерительных системах: Автореф. дис.... д.т.н. / В.С. Соболев. – СПб.: СПГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 36 с.
13. *Яцук В.* Інформаційно-енергетичний підхід до оцінювання коефіцієнта якості засобів вимірю-

- вальної техніки / В. Яцук // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – Вип. 68. – С. 224–228.
14. *Микитин М.* Метрологічна перевірка інтелектуального термометра / М. Микитин, Б. Стадник // *Методи і засоби вимірювань фізичних величин: IX Міжнар. наук.-техн. конф. “Температура-2012”*, 25–28 вересня 2012 р., Львів: тези доп. – Львів, 2012. – С. 121–122.
 15. *Микийчук М.М.* Актуальні питання метрологічної надійності промислових ЗВТ / М.М. Микийчук [Електронний ресурс] // *Методи та прилади контролю якості*. – 2009. – № 23. – Електрон. дан. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/metody/2009_23/09mmmpz.pdf.
 16. *Кочан Р.В.* Прецизійні аналого-цифрові перетворювачі з бездемонтажною метрологічною самоперевіркою: монографія / Р.В. Кочан. – Львів: Вид-во “Львівської політехніки”, 2012. – 252 с.
 17. *Кестер У.* Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер. – М: Техносфера, 2007. – 1016 с.
 18. 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>.
 19. *Махнанов В.Д.* Устройства частотного и времязаимпульсного преобразования / В.Д. Махнанов, Н.Т. Милохин. – М: Энергия, 1970. – 128 с.
 20. *Кочан Р.В.* Метод метрологічної перевірки (повірки) аналого-цифрових перетворювачів однозначною мірою / Р.В.Кочан // *Український метрологічний журнал*. – 2011. – № 1. – С. 51 – 56.
 21. *Кочан Р.В.* Визначення інтегральної нелінійності аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2007. – № 2, т. 2. – С. 159–162.
 22. *Кочан Р.В.* Спосіб визначення інтегральної нелінійності характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів / Р.В. Кочан, О.В. Кочан // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2008. – № 68. – С. 55–59.
 23. *Кочан Р.В.* Лінеаризація характеристики перетворення аналого-цифрових перетворювачів з високою роздільною здатністю / Р.В.Кочан // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2009. – № 2. – С. 7–12.
 24. Пат. 200703921 Україна, МПК 7H01H51/00. 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.