

Азаров О.Д., д.т.н.,
Кадук О.В., к.т.н.,
Дудник О.В.

СТАТИЧНІ ПОХИБКИ АЦП СЛІДКУВАЛЬНОГО ТИПУ ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

Вінницький національний технічний університет

Проведено аналіз статичних похибок багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ваговою надлишковістю (ВН). Складено математичні моделі статичних похибок вищезгаданих перетворювачів без та з самокалібруванням. Доведено, що застосування самокалібрування в АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ВН, дає змогу істотно (на 2-3 порядки) підвищити початкову точність перетворення таких пристроїв.

Вступ

АЦП слідкувального типу відносяться до компенсаційних перетворювачів форми інформації (ПФІ) і призначені для кодування аналогових сигналів, що змінюються повільно. Водночас відносно нешвидка реакція такого типу АЦП на швидкі зміни вхідного сигналу роблять їх непридатними для багатьох галузей застосування, зокрема, в багатоканальних системах перетворення, реєстрування й опрацювання аналогових величин [1]. Проте варто відзначити, що даний тип АЦП має й свої переваги – код на виході такого перетворювача доступний на кожному такті перетворення. Дана властивість особливо важлива для перетворювачів сельсин-код та резольвер-код, саме в яких, переважним чином, і застосовуються АЦП слідкувального типу. Іншою цінною характеристикою таких АЦП є те, що швидкі перехідні процеси на вході перетворювача викликають зміну вихідного коду лише на одиницю молодшого розряду. Це досить важливо при наявності шумів у системі [2].

Актуальність

Основними джерелами статичних похибок багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП, є відхилення параметрів аналогових елементів від своїх номінальних значень. Це пов'язано з фундаментальними обмеженнями на завдання їх параметрів, недосконалістю технології виготовлення та впливом природних чинників у процесі експлуатації, зокрема: змінення температури навколишнього середовища, старіння елементів аналогових вузлів, впливом радіації тощо.

Разом з тим, побудова багаторозрядних АЦП слідкувального типу на основі неточного ЦАП із ВН дозволяє значно підвищити точність такого перетворювача за рахунок використання самокалібрування (СК) [3].

Водночас, у науково-технічній літературі принципи побудови таких АЦП, а також їх статичні похибки практично не розглянуто. Тому тема статті, що присвячена дослідженню статичних похибок АЦП слідкувального типу із ваговою надлишковістю є актуальною.

Мета

Метою досліджень є підвищення точності багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточних ЦАП із ВН. Це дозволить знизити вимоги до елементної бази і спрости технологію виготовлення таких пристроїв.

Постановка задач

1. Аналіз складових статичних похибок багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ВН.
2. Складення математичних моделей статичних похибок таких АЦП без та з застосуванням СК.
3. Визначення критерію й оцінювання ефективності запропонованих методів СК багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ВН.

Розв'язання задач

В АЦП слідкувального типу (рис. 1) вхідний аналоговий сигнал (A_{BX}) врівноважується компенсувальним аналоговим сигналом (A_K), що формується ЦАП, увімкненим у коло зворотного зв'язку тракту врівноваження. Пристрій містить СП – схему порівняння, БК

блок керування, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, Рв.Лч – реверсивний лічильник.

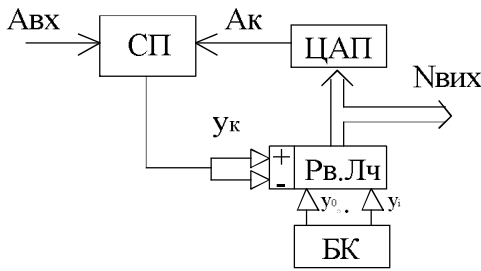


Рис. 1. Узагальнена структурна схема АЦП слідкувального типу

Варто відзначити, що в АЦП слідкувального типу цифровий еквівалент $K(A_K)$ саме компенсуючого сигналу A_K вважається результатом перетворення A_{BX} :

$$N_{BIX} = K(A_K) \approx K(A_{BX}).$$

Водночас відхилення ваг розрядів неточно-го ЦАП від їх номінальних значень внаслідок змінення умов навколишнього середовища, зокрема, температури, вологості, тиску та

інших чинників, а також у процесі старіння призводять до спотворення характеристики перетворення АЦП, що, зокрема, проявляється у появі на ній зон стрибкоподібності та як наслідок зниження точності перетворення [4, 5].

У даному випадку під точним розуміється ЦАП, у якому похибки відповідають нормативним значенням. Неточними вважаються такі багаторозрядні ЦАП, первинні похибки аналогових елементів яких перевищують кінцеву похибку перетворення. Варто також зауважити, що всі багаторозрядні (14 і більше двійкових розрядів) ЦАП без вживання спеціальних заходів, по суті, є неточними, оскільки їхня кінцева похибка перетворення не відповідає заявленій роздільній здатності [5]. Застосування технологічних прийомів для забезпечення точності ЦАП в широкому діапазоні температур і протягом циклу експлуатації дозволяє створювати лише 12-розрядні перетворювачі [6, 7]. У табл. 1 наведено статичні характеристики типових багаторозрядних ЦАП, що випускаються провідними фірмами світу, зокрема, *Analog Devices*, *Texas Instruments Incorporated*, *Linear Technology Corporation* [8-12].

Таблиця 1.

Характеристики багаторозрядних ЦАП провідних фірм світу

Модель	Розрядність	Інтегральна нелінійність, одиниць молодшого кванту (ОМК)	Диференційна нелінійність, ОМК	Діапазон робочих температур, °С
AD5453	14	-	від -1 до +2	-40 до +125
AD5446	14	-	від -1 до +2	-40 до +125
LTC2611/ 2611-1	14	±16	±1	-40 до +85
LTC2601/ LTC2601-1	16	±6	±4	-40 до +85
DAC7731E	16	±6	±2	-40 до +105
DAC7664Y	16	±4	±3	-40 до +85

Аналізуючи елементи, що входять до структури АЦП слідкувального типу із ВН (рис. 1), та характер їх впливу на результат перетворення, можна запропонувати модель складових похибок каналу АЦП слідкувального типу із ВН, що представлена на рис. 2. Тут $\Delta_{др}$ – похибка дрейфу нуля СП, η' – зона нечутливості порогового елементу (ПЕ), $\Delta\eta'$ – похибка зони нечутливості ПЕ, α -ЦАП – ЦАП із ВН, Δ_0 – зміщення нуля α -ЦАП, α -РЛЧ – лічильник у СЧВН, δ_Q – приведені значення похибки завдання ваг розрядів α -ЦАП [3].

Оскільки результатом перетворення A_{BX} вважається цифровий еквівалент $K(A_K)$ саме компенсуючого сигналу A_K , то і оцінювання похибки АЦП слідкувального типу доцільно здійснювати через аналіз похибок A_K [13].

Так, умова статичної рівноваги АЦП слідкувального типу:

$$|A_{BX} + \Delta_{др} - A_K| \leq \eta' + \Delta\eta'.$$

При цьому:

$$A_K = A(N_{BIX}) + A(N_{BIX}) \cdot \delta_Q + \Delta_0$$

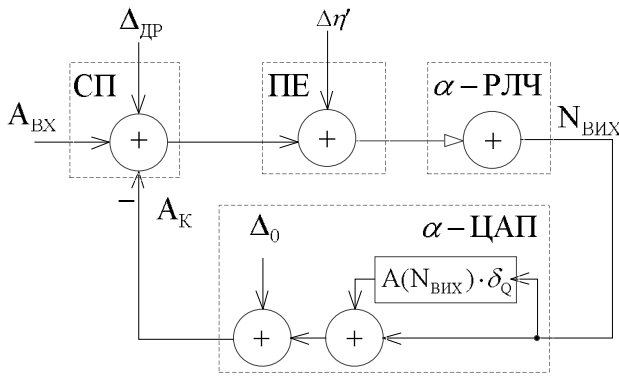


Рис. 2. Модель складових похибки АЦП слідкувального типу без СК

$$|A_{BX} + \Delta_{DP} - A(N_{BIX}) - A(N_{BIX}) \cdot \delta_Q - \Delta_0| \leq \eta' + \Delta\eta'$$

$$|A_{BX} + \Delta_{DP} - A(N_{BIX}) \cdot (1 + \delta_Q) - \Delta_0| \leq \eta' + \Delta\eta'$$

або ж $A(N_{BIX}) \leq \frac{A_{BX} + \Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_Q}$.

Абсолютне значення похибки можна визначити як:

$$\Delta A(N_{BIX}) = |A(N_{BIX})_{i0} - A(N_{BIX})|,$$

$$\Delta A(N_{BIX}) = \left| A_{BX} - \frac{A_{BX} + \Delta_{DP} - \Delta \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_Q} \right| = \left| A_{BX} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \delta_Q} \right] + \frac{\Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_Q} \right|$$

Отриманий вираз дає можливість оцінити характер та ступінь впливу основних складових похибки на кінцевий результат перетворення АЦП слідкувального типу без СК.

Водночас, використання систем числення із ВН (СЧВН) та СК в АЦП слідкувального типу дає можливість значно покращити точні-

де $A(N_{BIX})$ – номінальне значення компенсуючого аналогового сигналу:

$$A(N_{BIX}) = \sum_0^{n_\alpha-1} a_i \cdot Q_{i0},$$

де Q_{i0} – аналогова величина, що відповідає номінальній вазі i -го розряду α -ЦАП, a_i – розрядні коефіцієнти N_{BIX} , n_α – розрядність α -ЦАП.

З урахування викладеного маємо:

де $A(N_{BIX})_{i0}$ – результат перетворення при відсутності похибок у каналі перетворення.

Уважаючи, що $A(N_{BIX})_{i0} = A_{BX}$ маємо:

сні та вартісні характеристики таких перетворювачів [3].

Вибір того чи іншого методу СК залежить від призначення АЦП і похибок, що усуваються. Методи СК АЦП слідкувального типу із ВН, що розглядаються, орієнтовано на усунення похибок лінійності [5, 14].

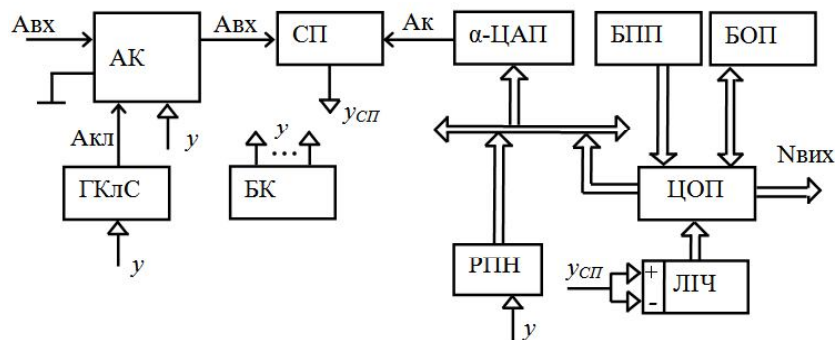


Рис. 3. Структурна схема АЦП слідкувального типу, що самокалібрується, з ВН

Розглянемо структуру багаторозрядного АЦП слідкувального типу із ВН, що самокалі-

брується (рис. 3) [15]. Проаналізувавши похибки окремих елементів, що входять до стру

тури на рис. 3, та характер їх впливу на результат перетворення, можна запропонувати модель складових похибок, що наведена на рис. 4.

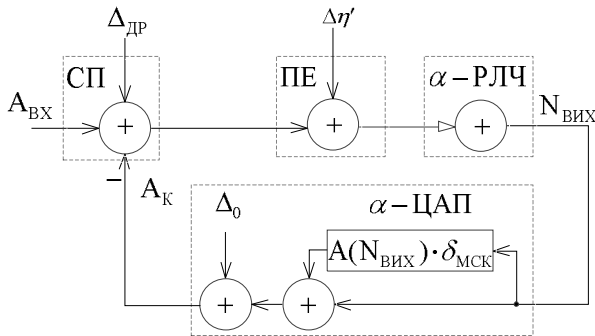


Рис. 4. Модель складових похибки АЦП слідкувального типу, що самокалібується, з ВН

$$\left| A_{BX} + \Delta_{DP} - A(N_{BHX}) - A(N_{BHX}) \cdot \delta_{MCK} - \Delta_0 \right| \leq \eta' + \Delta\eta',$$

$$\left| A_{BX} + \Delta_{DP} - A(N_{BHX}) \cdot (1 + \delta_{MCK}) - \Delta_0 \right| \leq \eta' + \Delta\eta',$$

$$\text{або } A(N_{BHX}) \leq \frac{A_{BX} + \Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_{MCK}}.$$

$$\Delta A'(N_{BHX}) = \left| A_{BX} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \delta_{MCK}} \right] + \frac{\Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_{MCK}} \right|. \quad (2)$$

Даний вираз дає можливість оцінити характер та величини впливу основних складових похибки на кінцевий результат перетворення АЦП слідкувального типу з СК.

Варто відзначити, оскільки у виразах (1) та (2) складова $\Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')$ має досить мале значення, а $\delta_{MCK} \ll \delta_Q$ [16, 17], то у результаті застосування СК відбувається значне зменшення похибки перетворення АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ВН:

$$\Delta A'(N_{BHX}) \ll \Delta A(N_{BHX}).$$

Ефективність запропонованих методів підвищення точності АЦП можна визначити як відношення абсолютної похибки перетворення без та з СК ((1), (2)):

$$E = \frac{\Delta A(N_{BHX})}{\Delta A'(N_{BHX})} =$$

На рис. 3 та рис. 4 АК – аналоговий комутатор, ГКЛС – генератор калібрувального сигналу, БПП та БОП блоки постійної та оперативної пам'яті, ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій, РПН – регістр послідовного наближення, ЛПЧ – лічильник, δ_{MCK} – методична похибка СК.

Умова статичної рівноваги АЦП на рис. 3 має вигляд:

$$\left| A_{BX} + \Delta_{DP} - A_K \right| \leq \eta' + \Delta\eta',$$

де $A_K = A(N_{BHX}) + A(N_{BHX}) \cdot \delta_{MCK} + \Delta_0$. З урахування наведеного маємо:

Абсолютне значення похибки при цьому визначається як:

$$\begin{aligned} &= \frac{A_{BX} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \delta_{MCK}} \right] + \frac{\Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_Q}}{A_{BX} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \delta_{MCK}} \right] + \frac{\Delta_{DP} - \Delta_0 \pm (\eta' + \Delta\eta')}{1 + \delta_{MCK}}} \approx \\ &\approx \frac{1 - \frac{1}{1 + \delta_Q}}{1 - \frac{1}{1 + \delta_{MCK}}}. \end{aligned}$$

У табл. 2 та табл. 3 наведено результати комп'ютерного моделювання багаторозрядних АЦП слідкувального типу із ВН на основі системи числення з $\alpha=1,618$ та допуском на елементну базу $\delta_Q=3\%$ та $\delta_Q=10\%$. У табл. 2, та табл. 3 дані у стовпцях під номерами I та II відповідають АЦП слідкувального типу без та з СК. Аналіз наведених даних підтверджує, що застосування СК в АЦП слідкувального типу з ВН дає можливість значного зменшення похибки перетворення.

Похибки інтегральної та диференціальної лінійностей слідкувального АЦП, побудова-

для 100 різних базисів ваг розрядів ЦАП із ВН. Оцінювання результатів моделювання проводилось відповідно до методики обробки експериментальних даних [18, 19].

Таблиця 4.

Ефективність методів СК АЦП слідкувального типу

Кількість розрядів $n_2(n_{\alpha})$	δQ	$E'(ИНЛ)$	$E'(ДНЛ)$
16 (23)	10%	180,21	358,02
14 (20)		48,97	110,67
12 (18)		21,90	32,58
16 (23)	3%	227,36	233,18
14 (20)		61,61	56,57
12 (18)		25,81	23,60

Таблиця 2.

Статистичні оцінки ИНЛ АЦП слідкувального типу, що самокалібрується, із ВН

Кількість розрядів $n_2(n_{\alpha})$	δQ	M(ИНЛ)		σ (ИНЛ)	
		I	II	I	II
16 (23)	10%	1375,07	2,014	867,58	0,43
14 (20)		300,72	1,76	188,72	0,35
12 (18)		115,21	1,62	60,77	0,32
16 (23)	3%	422,90	1,86	248,78	0,30
14 (20)		99,20	1,61	57,51	0,26
12 (18)		38,21	1,48	21,51	0,24

Таблиця 3.

Статистичні оцінки ДНЛ АЦП слідкувального типу, що самокалібрується, із ВН

Кількість розрядів $n_2(n_{\alpha})$	δQ	M(ДНЛ)		σ (ДНЛ)	
		I	II	I	II
16 (23)	10%	698,14	1,27	524,35	0,21
14 (20)		211,39	1,23	101,92	0,17
12 (18)		62,56	1,19	47,26	0,17
16 (23)	3%	277,49	1,19	137,50	0,17
14 (20)		65,63	1,16	35,41	0,15
12 (18)		26,44	1,12	12,18	0,13

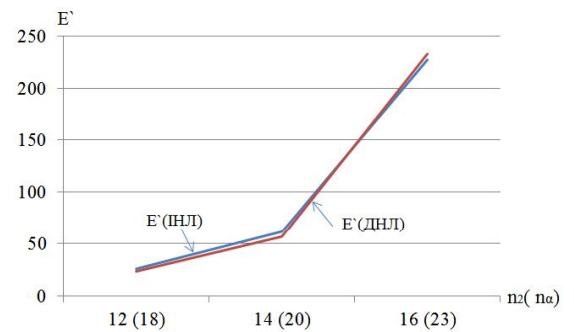
У табл. 4 наведено статистичні оцінки ефективності вищерозглянутих методів генерування компенсувального сигналу, де критерієм ефективності вибрано зменшення значень математичного сподівання ИНЛ та ДНЛ із табл. 1 та табл. 2, а саме:

$$E'(\Delta) = \frac{M(\Delta_{II})}{M(\Delta_I)}$$

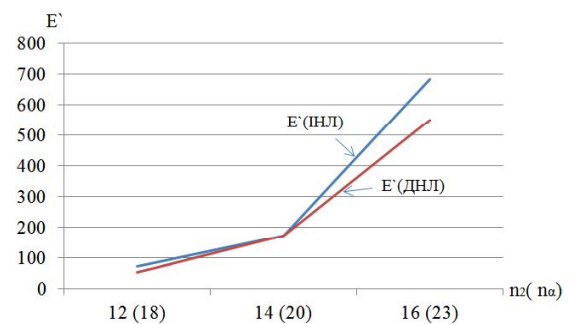
де $M(\Delta_{II})$ – математичне сподівання відповідної похибки згідно даних із стовпця II, $M(\Delta_I)$ – математичне сподівання відповідної похибки згідно даних із стовпця I.

Аналіз наведених даних показує, що порядок зменшення статичних похибок АЦП слідкувального типу із ВН, що самокалібрується, збільшується із збільшенням розрядності перетворювача.

На рис. 5 наведено графічне зображення статистичних оцінок ефективності самокалібрування для різної розрядності АЦП слідкувального типу із ВН.



а)



б)

Рис. 5. Графік залежності ефективності методів СК від розрядності АЦП: а) при $\delta Q = 3\%$; б) при $\delta Q = 10\%$

Висновки

1. Проаналізовано статичні похибки багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ВН. Показано, що всі багаторозрядні ЦАП без вживання спеціальних заходів калібрування і коригування є неточними.

2. Складено математичні моделі статичних похибок багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточному ЦАП із ВН без та з застосуванням СК. Це дозволило оцінити абсолютну похибку перетворення даних пристроїв та оцінити ефективність запропонованих методів підвищення точності.

3. Доведено, що застосування СК в АЦП слідкуваль

неточному ЦАП із ВН, дає змогу істотно (на 2-3 порядки) підвищити початкову точність перетворення таких пристроїв. Показано, що ефективність запропонованих методів підвищення точності АЦП слідкувального типу зростає зі зростанням розрядності перетворювача.

Список літератури

1. Арховский В.Ф.. Структурные способы повышения динамической точности АЦП следающего типа / Региональный научно-технический семинар по статистическому анализу, моделированию и автоматизации контроля объектов с конструктивно сложной структурой Таганрогского радиотехнического института. 1972. – № 6. – С. 25-30.

2. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / пер. с англ. Володина Е.Б. – М.: Техносфера, 2007. – 1019 с.

3. Азаров О.Д. Статичні похибки генераторів компенсуючого сигналу для АЦП слідкувального типу із ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Дудник О.В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 1 (23). – С. 5-15.

4. Азаров О. Д. Методи цифрового калібрування відмовостійких ЦАП із ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Кадук О.В., Дудник О.В., Росошук А.В. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія – Вінниця: ВНТУ, – 2011 – № 1. – С. 4-14.

5. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов. Монографія / О.Д. Азаров, О.В. Кадук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, – 2010. – 150 с.

6. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смолов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 160 с.

7. Rombouts P. Comments on «Interstage Gain-Proration Technique for Digital-Domain Multistep ADC Calibration» / Rombouts P., Weyten L. // IEEE Trans. Circuit Syst. II. – August 1999. – Vol. CAS-46. – P. 1114-1116.

8. AD5450/AD5451/AD5452/AD5453: 8-/10-/12-/14-Bit High Bandwidth Multiplying DACs with Serial Interface / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу: <http://www.analog.com/static/imported->

[files/data_sheets/AD5450_5451_5452_5453.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5450_5451_5452_5453.pdf).

9. AD5444/AD5446: 12-/14-Bit High Bandwidth Multiplying DACs with Serial Interface / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5444_5446.pdf.

10. LTC2601/LTC2611/LTC2621: 16-/14-/12-Bit Rail-to-Rail DACs in 10-Lead DFN / Linear Technology // офіційний сайт. Режим доступу: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/2601fb.pdf>.

11. DAC7731: 16-Bit, Single Channel, Digital-to-Analog Converter W/ Internal +10V Reference and Serial I/F / Texas Instruments // офіційний сайт. Режим доступу: <http://www.ti.com/product/dac7731>.

12. DAC7664: Digital to Analog Converter, Quad, 16 Bit, 12uS Settling Time, +/- 1 LSB DNL / Texas Instruments // офіційний сайт. Режим доступу: <http://www.ti.com/product/dac7664>.

13. Муттер В.М. Аналого-цифровые следящие системы / Муттер В.М. – Л.: Энергия, 1974. – 184 с.

14. Азаров О.Д. Основы теории аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260 с.

15. Азаров О.Д. Генератори компенсуючого сигналу для АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що самокалібруються / Азаров О. Д., Дудник О.В. // Вісник вінницького політехнічного інституту – В.ВНТУ, – 2011. – № 6. – С. 202- 210.

16. AD5063: 16-Bit, ± 1 LSB DNL, 333kSPS unbuffered voltage-output DAC [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5063.pdf.

17. AD8468: 16-Bit, fast comparator fabricated on XFCB2.0 [Електронний ресурс] / Analog Devices // офіційний сайт. Режим доступу: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8468.pdf.

18. Статистические методы в инженерных исследованиях. Под редакцией Г.К. Круга. – М.: Высшая школа, 1983. – 216 с.

19. Рого К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений. – К.: Техніка, 1987. –