

УДК 618.3

С. М. Захарченко, канд. техн. наук., доц.;

М. Г. Захарченко;

О. В. Бойко, асп.

## МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ АЦП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

*Розглянуто принципи функціонування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю, проаналізовано вплив інструментальних похибок на характеристику перетворювача. Запропоновано новий метод калібрування АЦП із ваговою надлишковістю, який базується на аналізі зон багатозначного представлення у кодувальній характеристиці.*

### Вступ

Аналого-цифрові перетворювачі широко використовуються в різноманітних системах, зокрема в системах збору та обробки інформації, системах зв'язку, системах керування технологічними процесами. АЦП послідовного наближення (ПН) належать до такого класу перетворювачів, які з одного боку мають високу точність, а з іншого — досить високу швидкодію, що пояснює інтерес фахівців до цих пристроїв.

Одним із видів АЦП ПН є алгоритмічні (циклічні) АЦП, які мають просту структуру, низьку потужність споживання і займають малу площу на кристалі. Крім того такі АЦП є розрядно-незалежними, тобто збільшення розрядної сітки перетворювача не веде за собою збільшення або ускладнення апаратного забезпечення. Циклічні АЦП широко використовуються для побудови конвеєрних перетворювачів, проте їх характеристики суттєво залежать від точності виконання перетворення на кожному циклі.

Переважає більшість сучасних перетворювачів форми інформації (ПФІ), в тому числі циклічні АЦП, реалізуються із використанням класичної двійкової системи числення. Принциповим недоліком використання двійкової системи числення в ПФІ є те, що наявність інструментальних статистичних похибок приводить до появи в передатній характеристиці ЦАП зон, в яких вихідну аналогову величину не можна подати жодною кодовою комбінацією. Такі зони називаються розривами кодувальної характеристики, а в АЦП за такої причини виникають пропуски кодів. Для реалізації АЦП ПН без пропусків коду можна використовувати ЦАП з ваговою надлишковістю, який не має розривів передатної характеристики. Крім того цей підхід спрощує калібрування ваг розрядів і дозволяє здійснювати його виключно в цифровій формі.

Для традиційних АЦП послідовного наближення з ВН існують розроблені методи калібрування в той час, як для циклічних АЦП такі дослідження не проводились.

### Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка методу підвищення точності циклічних АЦП за рахунок використання техніки самокалібрування із застосуванням вагової надлишковості.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розглянути принципи функціонування двійкових циклічних АЦП та циклічних АЦП із ваговою надлишковістю;
- дослідити процес утворення розривів у кодувальній характеристиці циклічних АЦП;
- розробити та дослідити метод калібрування;
- продемонструвати роботу методу на прикладі.

### Принципи функціонування циклічного АЦП

Робота циклічного АЦП базується на алгоритмі МакЧарльза [1], структура якого показана на рис. 1. Цей алгоритм дозволяє будувати АЦП, підсумковий код якого отримується послідовно розряд за розрядом. Під час першого циклу перетворення вхідний сигнал  $U_{ВХ}$  проходить через пристрій вибірки—зберігання, множиться на 2 і порівнюється з опорною напругою  $U_{ОП}$ .

Якщо  $2U_{ВХ} \geq U_{ОП}$ , то старший біт встановлюється в «1», а  $U_{ОП}$  віднімається від подвоєної вхідної напруги і отримане значення передається на наступний цикл. У тому випадку, коли  $2U_{ВХ} < 0$ , то старший біт встановлюється в «0», а значення подвоєної вхідної напруги передається на наступний цикл. Аналогічним чином визначаються й інші розряди вихідного коду. Перевагами цього виду АЦП є проста структура і розрядонезалежність. Хоча алгоритмічні АЦП мають низку переваг, але їх точність значно залежить від точності виконання кожним блоком, що входить до АЦП, своїх функцій, тому що похибки накопичуються і циркулюють від циклу до циклу. Отже, залишкові напруги зсуву на операційних підсилювачах і конденсаторах, шум і інжекція заряду через МОН-ключі, а також точність коефіцієнта множення є дуже критичними факторами.

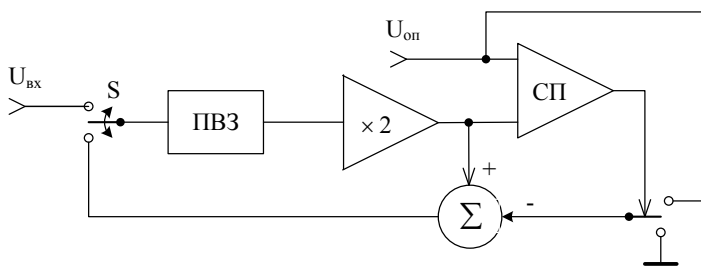


Рис. 1. Структура циклічного АЦП

Напругу, що формується за допомогою алгоритму МакЧарльза на  $(i + 1)$ -му кроці, можна подати за допомогою співвідношення

$$U_{i+1} = 2U_i + a_i U_{оп}, \tag{1}$$

де  $a_i \in \{0, 1\}$  — двійкове значення  $i$ -го розряду вихідного коду.

Проте, рівність (1) описує ідеальний процес перетворення двійкового циклічного АЦП (кодувальну характеристику  $K_{вих} = f(A_{вх})$  показано на рис. 2а), однак на практиці вираз набуває вигляду [2]

$$U_{i+1} = (2 + \Delta_1)U_i + (1 + \Delta_2)a_i U_{оп}, \tag{2}$$

де  $\Delta_1$  — похибка блока множення;  $\Delta_2$  — похибка блока додавання.

Похибка  $\Delta_2$  призводить до зміни нахилу кодувальної характеристики і не впливає на лінійність перетворювача (рис. 2б). Похибка  $\Delta_1$  впливає на лінійність перетворювача і призводить до появи пропуск кодів (рис. 2в) у кодувальній характеристиці двійкового АЦП.

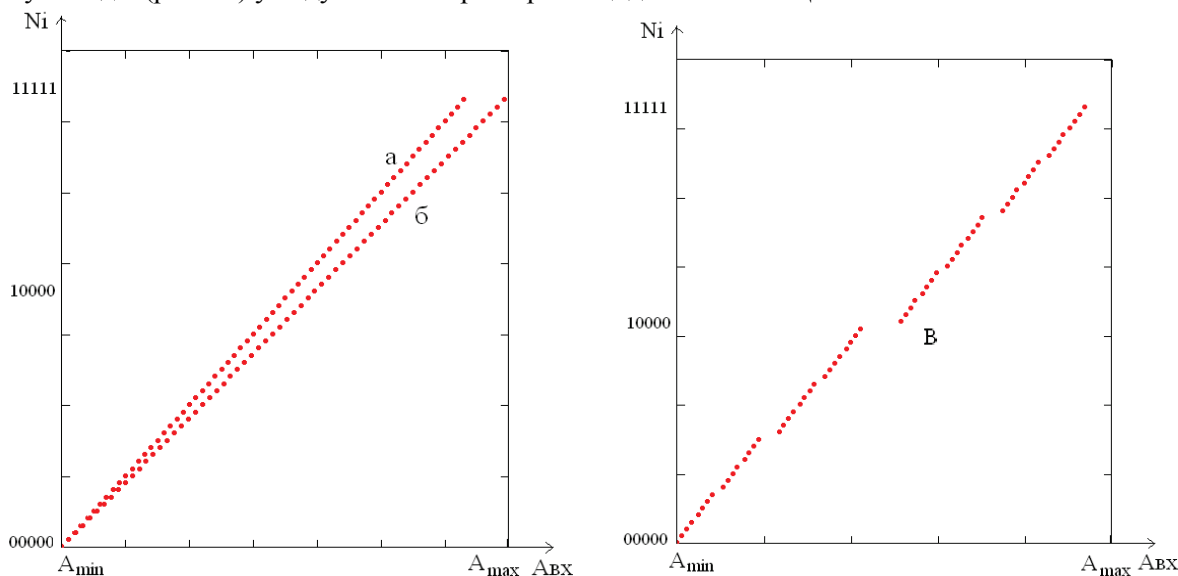


Рис. 2. Характеристика вхід—вихід АЦП з основою системи числення  $\alpha = 2$ :

а — АЦП з ідеальними вагами розрядів; б — АЦП із  $\Delta_2 = 0,1$ ;

в — АЦП із  $\Delta_1 = 0,2$

Наявність похибки  $\Delta_1$ , яка впливає на лінійність перетворювача, не дає змоги проводити корекцію безпосередньо кінцевого результату перетворення. Таким чином, використовуючи двійкову систему числення, нелінійність кодувальної характеристики може бути усунена тільки аналоговою або цифроаналоговою корекцією самого процесу аналого-цифрового врівноваження. Тобто, процес калібрування в цьому випадку передбачає введення поправки на етапі підсилення напруги

пристроєм множення на 2. Уникнути зазначеної ситуації дозволяє застосування вагової надлишковості.

Побудова самокаліброваних АЦП з використанням ВН надає низку переваг, зокрема, можливе калібрування ваг розрядів зі значними відхиленнями, що істотно знижує вимоги до низки аналогових вузлів перетворювачів. Цей же чинник дозволяє під час використання процедури самокалібрування забезпечити високі метрологічні характеристики перетворювачів у широкому діапазоні температур і протягом тривалого часу.

Реалізація функціонування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю базується на використанні такого співвідношення:

$$U_{i+1} = (\alpha + \Delta_1)U_i + (1 + \Delta_2)a_i U_{on}. \quad (3)$$

Вираз (3) переходить у вираз (2), якщо основа системи числення  $\alpha = 2$ . Кодувальну характеристику циклічного АЦП із ваговою надлишковістю за наявності і відсутності відхилень ваг розрядів показано на рисунку 3а та 3б.

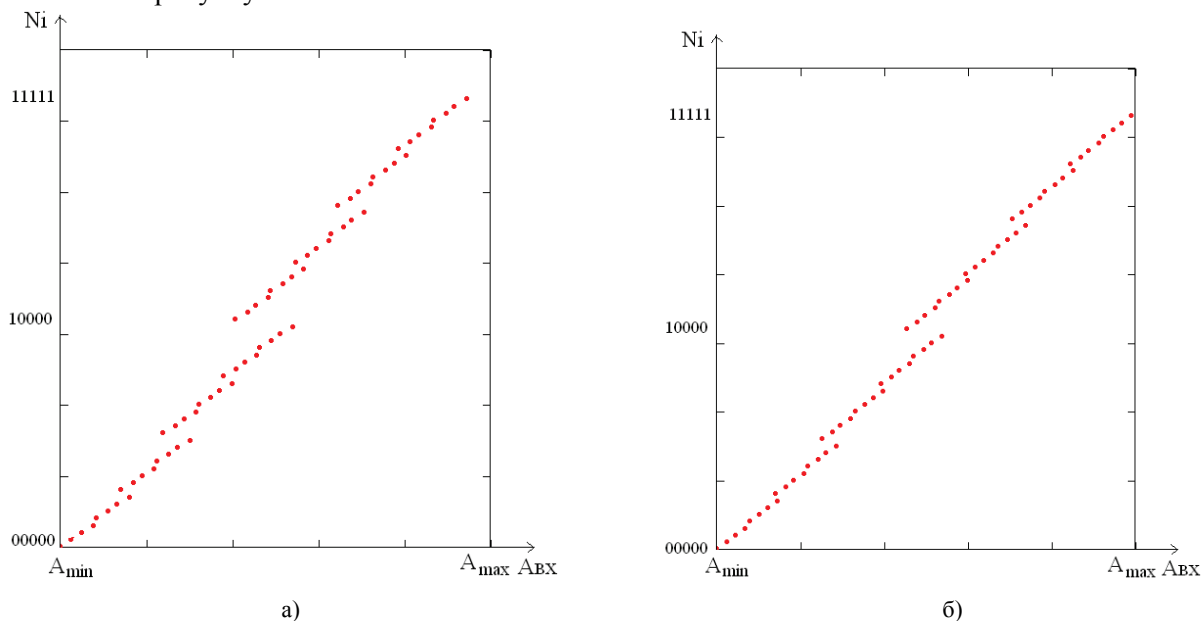


Рис. 3. Характеристика вхід—вихід АЦП з основою системи числення:

а)  $\alpha = 1,7; \Delta_1 = 0, \Delta_2 = 0$ ; б)  $\alpha = 1,7, \Delta_1 = 0,2, \Delta_2 = 0,1$

Неважко побачити, що неідеальність ваг розрядів надлишкового перетворювача не призводить до появи пропусків коду. Таким чином, навіть за наявності суттєвих відхилень ваг розрядів вхідний сигнал може бути врівноважений із достатньою точністю, а дійсне значення еквівалента може бути отримане шляхом цифрової обробки результату перетворення.

### Аналіз кодувальної характеристики циклічних АЦП із ВН

Відмінною особливістю АЦП з ВН є те, що під  $K_{\text{вих}}$  розуміють не просто номер поточної кодової комбінації  $N_{\text{вих}}$ , а її цифровий еквівалент, що обчислюється з формули

$$K_{\text{вих}} = \sum_0^{n-1} a_i Q_i, \quad (4)$$

де  $Q_i$  — двійковий еквівалент ваги  $i$ -го розряду.

В системах числення з ваговою надлишковістю одній аналоговій величині може відповідати кілька кодових еквівалентів [3]. Передатну характеристику 6-ти розрядного АЦП наведено на рис. 4. Остання містить декілька зон багатозначного представлення вхідного сигналу. Зонаю  $(n - 1)$ -го рівня будемо називати зону, в середині якої відбувається переключення старшого,  $(n - 1)$ -го розряду, з «0» в «1» (центральна зона). Зона  $(n - 2)$ -го рівня — зона, в якій відбувається переключення  $(n - 2)$ -го розряду, і т. д. (рис. 4). Причому, зі зменшенням значення основи системи числення збільшується надлишковість, тобто збільшується кількість таких зон і кількість точок, які в них пот-

рапляють. Слід звернути увагу, що зона  $(n - 1)$ -го рівня — одна,  $(n - 2)$ -го — дві і т. д.

Особливістю АЦП ПН є те, що процес врівноваження відбувається від старших розрядів до молодших, крім того, якщо деяка аналогова величина матиме декілька цифрових еквівалентів, то в кодувальну характеристику входить та комбінація, в якій увімкнено старший розряд. Таким чином, частина кодових комбінацій, які потрапляють у зону багатозначного представлення, не будуть використовуватись і в подальшому ці комбінації будемо називати забороненими, тобто ці комбінації не повинні зустрічатись під час роботи перетворювача. А кодові комбінації, між якими знаходяться заборонені, будемо називати граничними точками.

### Метод калібрування циклічних АЦП

Як вище зазначалось, саме похибка  $\Delta_1$  є найкритичнішою, оскільки впливає на лінійність перетворювача. Виходячи з виразу (3), очевидно, що  $\Delta_1$  змінює значення основи системи числення циклічного АЦП. Таким чином, процес калібрування полягає у визначенні реальної основи системи числення.

Основна ідея запропонованого методу калібрування полягає у визначенні реального значення системи числення циклічного АЦП, яке можна знайти за допомогою аналізу зон багатозначного представлення у кодувальній характеристиці.

Особливістю кодувальної характеристики циклічних АЦП є перехід від однієї граничної точки до іншої. Нехай  $N_{2^{n-1}-k}$  та  $N_{2^{n-1}}$  (рис. 4) дві граничні точки, між якими знаходиться  $k$  точок, що відповідають забороненим комбінаціям.

З рис. 4 видно, що для зони  $(n - 1)$ -го рівня справедлива нерівність

$$A(N_{2^{n-1}-k+1}) > A(N_{2^{n-1}}) > A(N_{2^{n-1}-k}). \quad (5)$$

Таким чином, для визначення діапазону основи системи числення  $\alpha$  необхідно розв'язати дану нерівність. Відповідно максимальне і мінімальне значення  $\alpha$  можна знайти, розв'язавши такі рівняння:

$$A(N_{2^{n-1}-k}) = A(N_{2^{n-1}}); \quad (6)$$

$$A(N_{2^{n-1}-k+1}) = A(N_{2^{n-1}}). \quad (7)$$

Для визначення реальної системи числення необхідно з отриманого коду виділити  $\alpha$ .

Наприклад, якщо між граничними точками знаходиться одна точка, яка потрапила в зону багатозначного представлення, то відповідні коди матимуть таке представлення:

$$N_{2^{n-1}} = 10..00, \quad A(N_{2^{n-1}}) = \alpha^{n-1}; \quad (8)$$

$$N_{2^{n-1}-1} = 01..11, \quad A(N_{2^{n-1}-1}) = \sum_{i=0}^{n-2} \alpha^i; \quad (9)$$

$$N_{2^{n-1}-2} = 01..10, \quad A(N_{2^{n-1}-2}) = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha^i. \quad (10)$$

Підставивши (8—10) в (6—7), отримаємо вирази для розрахунку діапазону допустимих значень  $\alpha$

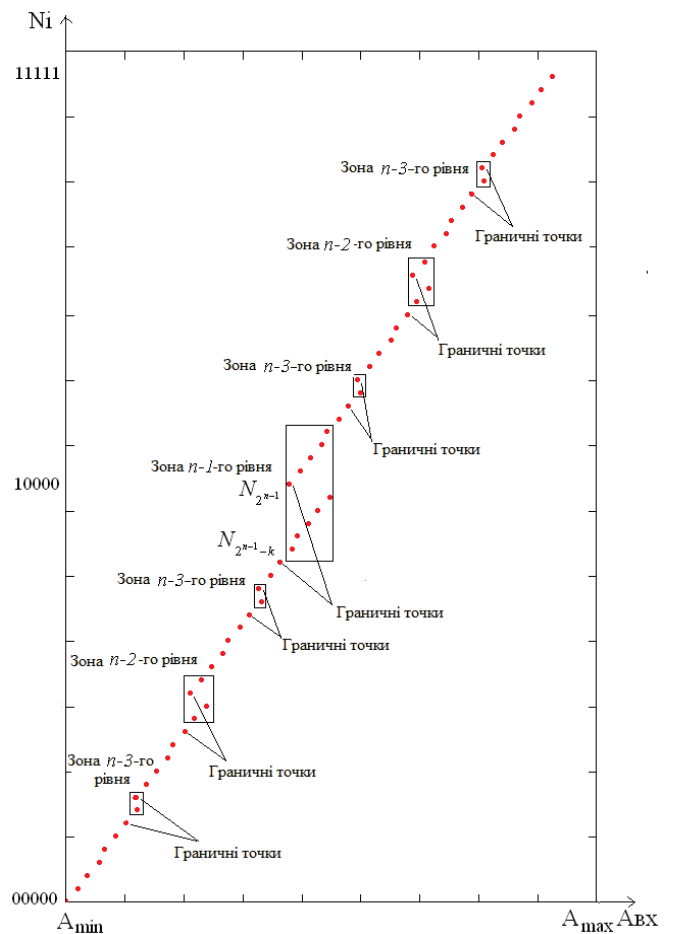


Рис. 4. Передатна характеристика 6-ти розрядного АЦП із основою системи числення  $\alpha = 1,8$

$$\alpha_{\max}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} \alpha_{\max}^i ;$$

$$\alpha_{\min}^{n-1} = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha_{\min}^i . \quad (11)$$

Для знаходження реальної основи системи числення необхідно розв'язати останні співвідношення відносно  $\alpha$ , а результат осереднити:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\min} + \alpha_{\max}}{2} . \quad (12)$$

У випадку наявності  $k$  заборонених комбінацій вирази (10—11) набувають вигляду

$$\alpha_{\max}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} a_i \alpha_{\max}^i , \quad (13)$$

де  $a_i$  — розряди коду  $N_{2^{n-1-k}}$ ;

$$\alpha_{\min}^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-2} b_i \alpha_{\min}^i , \quad (14)$$

де  $b_i$  — розряди коду  $N_{2^{n-1-k-1}}$ .

Як зазначалося вище, кодувальна характеристика АЦП із використанням вагової надлишковості містить декілька зон багатозначного представлення, тому для точнішого визначення  $\alpha$  пропонується розрахувати значення реальної системи числення на всіх зонах багатозначного представлення, а результати, отримані під час розрахунків, осереднити.

Запропонований метод калібрування передбачає наявність актуальної інформації про перелік заборонених комбінацій. Цю інформацію можна отримати або під час спеціальної фази калібрування, протягом якої генератор вхідного аналогового сигналу подає лінійно зростаючий вхідний сигнал від мінімально-допустимого до максимального значення. Другий підхід щодо дослідження кодувальної характеристики передбачає аналіз вихідних кодів, що генеруються АЦП в процесі основного перетворення. Цей підхід дещо ускладнює цифрову частину, але дозволяє уникнути окремої фази калібрування та використання додаткового генератора аналогових сигналів.

### Приклад калібрування шестирозрядного циклічного АЦП

У табл. 1 наведено передатну характеристику 6-ти розрядного циклічного АЦП із основою системи числення  $\alpha = 1,7$ . У табл. 2 представлено заборонені комбінації даного АЦП.

Розрахуємо основу системи числення за співвідношеннями (6—7), використовуючи нижню граничну точку і першу заборонену комбінацію у всіх зонах багатозначного представлення.

Зона 5-го рівня:  $\alpha^5 = \alpha^4 + \alpha^3 \rightarrow \alpha_{5\min} = 1,618$ ;

$$\alpha^5 = \alpha^4 + \alpha^3 + \alpha^0 \rightarrow \alpha_{5\max} = 1,705$$
;

Усереднивши результати, отримаємо:  $\alpha_5 = (\alpha_{5\min} + \alpha_{5\max})/2 = (1,618 + 1,705)/2 = 1,661$ .

Зона 4-го рівня:  $\alpha^4 = \alpha^3 + \alpha^2 \rightarrow \alpha_{4\min} = 1,618$ ;

$$\alpha^4 = \alpha^3 + \alpha^2 + \alpha^0 \rightarrow \alpha_{4\max} = 1,735$$
;

Усереднивши результати, отримаємо:  $\alpha_4 = (\alpha_{4\min} + \alpha_{4\max})/2 = (1,618 + 1,735)/2 = 1,686$ .

Зона 3-го рівня:  $\alpha^3 = \alpha^2 + \alpha^1 \rightarrow \alpha_{3\min} = 1,618$ ;

$$\alpha^3 = \alpha^2 + \alpha^1 + \alpha^0 \rightarrow \alpha_{3\max} = 1,839$$
;

Усереднивши результати, отримаємо:  $\alpha_3 = (\alpha_{3\min} + \alpha_{3\max})/2 = (1,618 + 1,839)/2 = 1,729$ .

Реальну основу системи числення АЦП визначаємо шляхом усереднення отриманих результатів у всіх зонах багатозначного представлення:  $\alpha = (\alpha_5 + \alpha_4 + \alpha_3)/3 = 1,692$ .

Передатна характеристика шестирозрядного циклічного АЦП із основою системи числення  $\alpha = 1,7$ 

Таблиця 1

Таблиця 2

$A_{вх}$ (ОМР)	Код	№ кодової комбінації	Ознака до- зволена/ заборонена	№ зони (для забороненої комбінації)	$A_{вх}$	Код	№ кодової комбінації	Ознака до- зволена/ заборонена	№ зони (для забороненої комбінації)
0	000000	0	Дозволена	—	14,19	100000	32	Дозволена	—
1	000001	1	Дозволена	—	15,19	100001	33	Дозволена	—
1,7	000010	2	Дозволена	—	15,89	100010	34	Дозволена	—
2,7	000011	3	Дозволена	—	16,89	100011	35	Дозволена	—
2,89	000100	4	Дозволена	—	17,08	100100	36	Дозволена	—
3,89	000101	5	Дозволена	—	18,08	100101	37	Дозволена	—
4,59	000110	6	Дозволена	—	18,78	100110	38	Дозволена	—
—	000111	7	Заборонена	3	—	100111	39	Заборонена	3
4,91	001000	8	Дозволена	—	19,11	101000	40	Дозволена	—
5,91	001001	9	Дозволена	—	20,11	101001	41	Дозволена	—
6,61	001010	10	Дозволена	—	20,81	101010	42	Дозволена	—
7,61	001011	11	Дозволена	—	21,81	101011	43	Дозволена	—
7,8	001100	12	Дозволена	—	22,0	101100	44	Дозволена	—
—	001101	13	Заборонена	4	—	101101	45	Заборонена	4
—	001110	14	Заборонена	4	—	101110	46	Заборонена	4
—	001111	15	Заборонена	4	—	101111	47	Заборонена	4
8,35	010000	16	Дозволена	—	22,55	110000	48	Дозволена	—
9,35	010001	17	Дозволена	—	23,55	110001	49	Дозволена	—
10,05	010010	18	Дозволена	—	24,25	110010	50	Дозволена	—
11,05	010011	19	Дозволена	—	25,25	110011	51	Дозволена	—
11,24	010100	20	Дозволена	—	25,44	110100	52	Дозволена	—
12,24	010101	21	Дозволена	—	26,44	110101	53	Дозволена	—
12,94	010110	22	Дозволена	—	27,14	110110	54	Дозволена	—
—	010111	23	Заборонена	3	—	110111	55	Заборонена	3
—	011000	24	Дозволена	—	27,46	111000	56	Дозволена	—
—	011001	25	Заборонена	5	28,46	111001	57	Дозволена	—
—	011010	26	Заборонена	5	29,16	111010	58	Дозволена	—
—	011011	27	Заборонена	5	30,16	111011	59	Дозволена	—
—	011100	28	Заборонена	5	30,35	111100	60	Дозволена	—
—	011101	29	Заборонена	5	31,35	111101	61	Дозволена	—
—	011110	30	Заборонена	5	32,05	111110	62	Дозволена	—
—	011111	31	Заборонена	5	33,05	111111	63	Дозволена	—

## Висновки

У роботі розглянуто принципи функціонування циклічних АЦП із ваговою надлишковістю, проаналізовано вплив інструментальних похибок на характеристику перетворювача. Запропоновано принципово новий метод калібрування циклічних АЦП, який базується на аналізі кодувальної характеристики і дозволяє визначити реальне значення робочої основи системи числення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. European patent application. Publication number: 0126337 A2. Application number: 84104767.3. Int. Cl. H 03 G 3/20, H 03 G 1/00. Data of filling: 27.04.84. Switched-capacitor ADC system.
2. Мулявка Я. Схеми на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами : пер. с польск. / Я. Мулявка. — М. : МИ. — 1992. — 416 с.
3. Захарченко С. М. Самокалібровані АЦП з накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення : моног. / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков. — Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. — 235 с.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки

Стаття надійшла до редакції 8.04.11  
Рекомендована до друку 11.05.11

**Захарченко Сергій Михайлович** — доцент, **Захарченко Михайло Григорович** — старший викладач, **Олександр Володимирович Бойко** — аспірант.

Кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця