

## КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 681.3:621.375

### Структурна організація АЦП з прогресуючими тривалостями тактів порозрядного наближення

*Азаров О.Д., Решетник О.О., Мураченко О.Г., Теплицький М.Ю.*

Анотація: Проаналізовано принципи структурної організації пристроїв прискореного аналого-цифрового наближення для СЧВН  $\{0, 1\}$  та  $\{1, -1\}$ . Запропоновано структури АЦП порозрядного наближення із прогресуючими тривалостями тактів врівноваження з ваговою надлишковістю. Показано, що для побудови ЦАП із ваговою надлишковістю для таких АЦП можна використовувати серійні двійкові ЦАП. Запропоновано підхід щодо побудови АЦП з ваговою надлишковістю.

Аннотація: Проанализированы принципы структурной организации устройств ускоренного аналого-цифрового приближения для СИВИ  $\{0, 1\}$  и  $\{1, -1\}$ . Предложены структуры АЦП поразрядного приближения с прогрессирующими длительностями тактов уравнивания с весовой избыточностью. Показано, что для создания ЦАП с весовой избыточностью для таких АЦП можно использовать существующие двоичные ЦАП. Предложен подход к построению АЦП с весовой избыточностью.

Abstract: Structures of devices for fast analog to digital conversion for NSWR  $\{0, 1\}$  and  $\{1, -1\}$  are analyzed. Structures of SAR ADC with variable tact durations with weight redundancy are shown. Serial binary DACs can be used for uilding of DACs with weight redundancy. The method of building ADC with weight redundancy are prposed.

Ключові слова: АЦП, ЦАП, вагова надлишковість, прогресуючі тривалості тактів

### Вступ

Переважна більшість сучасних порозрядних АЦП врівноваження будується на основі двійкової системи числення, а процес послідовного наближення організовано з постійною тривалістю тактів врівноваження. Багаторозрядні (14 – 18 розрядів) порозрядні АЦП відносять до пристроїв середньої швидкодії [1]. Водночас побудова АЦП порозрядного наближення з прогресуючими тривалостями тактів врівноваження на основі систем числення з ваговою надлишковістю дозволяє значно збільшити швидкодію цього класу пристроїв без значного збільшення апаратних затрат [2]. Чим відрізняється від відомого підходу на основі вагової надлишковості з використанням однакових тактів порозрядного врівноваження.

### Актуальність

У теперішній час серед розробників перетворювачів форми інформації (ПФІ) зростає інтерес до використання вагової надлишковості в АЦП порозрядного наближення, з метою підвищення точності пристроїв, побудованих на неточних елементах. Перші публікації в цьому напрямку в колишньому СРСР і за кордоном з'явилися наприкінці 70-х на початку 80-х років минулого століття [2, 7]. Останнім часом кількість публікацій у США [7-9] у цьому напрямку значно зросла. Водночас, в Україні у Вінницькому національному технічному університеті дослідження у цьому напрямку продовжується з 90-х років двадцятого століття [2-6] і з'явилися нові вагомі результати [10, 11]. Зокрема, реалізується комплексний підхід до одночасного підвищення точності та швидкодії ПФІ на неточних елементах. Особливо слід відзначити порозрядні АЦП з прогресуючими тривалостями тактів врівноваження, але такий підхід є новим і ще не відпрацьованим, тому аналіз структурних схем АЦП на основі систем числення з ваговою надлишковістю (СЧВН) є актуальним.

### Мета

Метою досліджень є аналіз запропонованого методу структурно-функціональної організації АЦП із прогресуючим набором тривалостей тактів прискореного порозрядного наближення з ваговою надлишковістю.

### Задачі

1. Аналіз підходів щодо структурно-функціональної організації схем АЦП для СЧВН  $\{0, 1\}$  та  $\{1, -1\}$ .
2. Аналіз можливостей реалізації компонентів АЦП.
3. Розглянути можливість побудови аналогових вузлів, зокрема, ЦАП на серійній елементній базі.

### Розв'язання задач

Завдяки застосуванню прогресуючого набору тривалостей тактів врівноваження можна досягти значного скорочення загального часу врівноваження порівняно з порозрядним врівноваженням з однаковими тривалостями тактів врівноваженн. Наявність вагової надлишковості дозволяє застосовувати під час порозрядного врівноваження операцію порівняння з регульованою чутливістю, що дає

можливість різко (на 1-2 порядки) зменшити тривалість старших тактів та зменшити тривалість врівноваження у цілому.

Суть вагової надлишковості проявляється в тому, що сума ваг молодших розрядів більша або в крайньому випадку дорівнює вазі старшого розряду (вагова надлишковість проявляється таким чином як у системах із природнім базисом, так і в системах із штучним базисом):

$$\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j \geq Q_i ,$$

де  $Q_i$  - значення фізичної величини ваг розрядів (струм або напруга).

При цьому абсолютна вагова надлишковість визначається як:

$$\Delta Q_i = \sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i ,$$

Поняття відносної вагової надлишковості визначає можливий сумарний рівень відхилень ваг розрядів, при якому характеристика перетворення залишається нерозривною:

$$\delta Q_i = \frac{\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i}{\sum_{j=0}^{j=i} Q_j} .$$

За умови постійності  $\alpha$  для систем числення із природнім базисом справедливе таке співвідношення:

$$\delta Q_i \approx \frac{2 - \alpha}{\alpha} .$$

Коли мають місце короточасні зміни ваги розряду в процесі врівноваження, використовується поняття приведеної відносної вагової надлишковості [2]:

$$\tilde{\delta} Q_i = \frac{\sum_{j=0}^{j=i-1} Q_j - Q_i}{Q_i} .$$

Динамічна похибка першого роду існує короткий відрізок часу (протягом одного або декількох тактів) [2].

На рис. 1 наведено діаграму порозрядного аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю та звичайного двійкового порозрядного врівноваження з постійними тривалостями тактів. При цьому навіть для малого числа двійкових розрядів вигаш по швидкодії є істотним.

Додатково підвищити швидкодію, тобто зменшити час перетворення можна за рахунок організації аналого-цифрового перетворення із прогресуючим набором тривалостей тактів врівноваження. На рис. 2. наведено діаграму врівноваження для прискореного [2] аналого-цифрового перетворення із прогресуючим набором тривалостей тактів з основою системи числення  $\alpha = 1,618$  і числом розрядів  $n = 7$ . У цьому випадку на старших тактах врівноваження різниця між вхідним  $A_{ex}(t)$  та компенсуючим  $A_k(t)$  сигналами  $\Delta A_{ex}(t) = A_{ex}(t) - A_k(t)$  потенційно може бути великою. На молодших же тактах значення цієї різниці зменшується. Відповідно чутливість схеми порівняння повинна поступово зростати від старших тактів ((n-1), (n-2), . . .) до молодших (. . ., 1, 0). Такий принцип регулювання чутливості схеми порівняння в АЦП дозволяє на старших тактах перетворення мати низьку чутливість, а високу швидкодію. Водночас на молодших тактах перетворення чутливість є високою, а швидкодія низькою

Структурна реалізація АЦП з прогресуючими тривалостями тактів порозрядного наближення з ваговою надлишковістю залежить від того, чи покращується точність чи швидкодія, від алгоритму за яким працює АЦП та від елементної бази. Узагальнивши увесь попередній досвід побудови АЦП із ваговою надлишковістю можна запропонувати такий підхід щодо структурно-функціональної організації таких АЦП [2, 14].

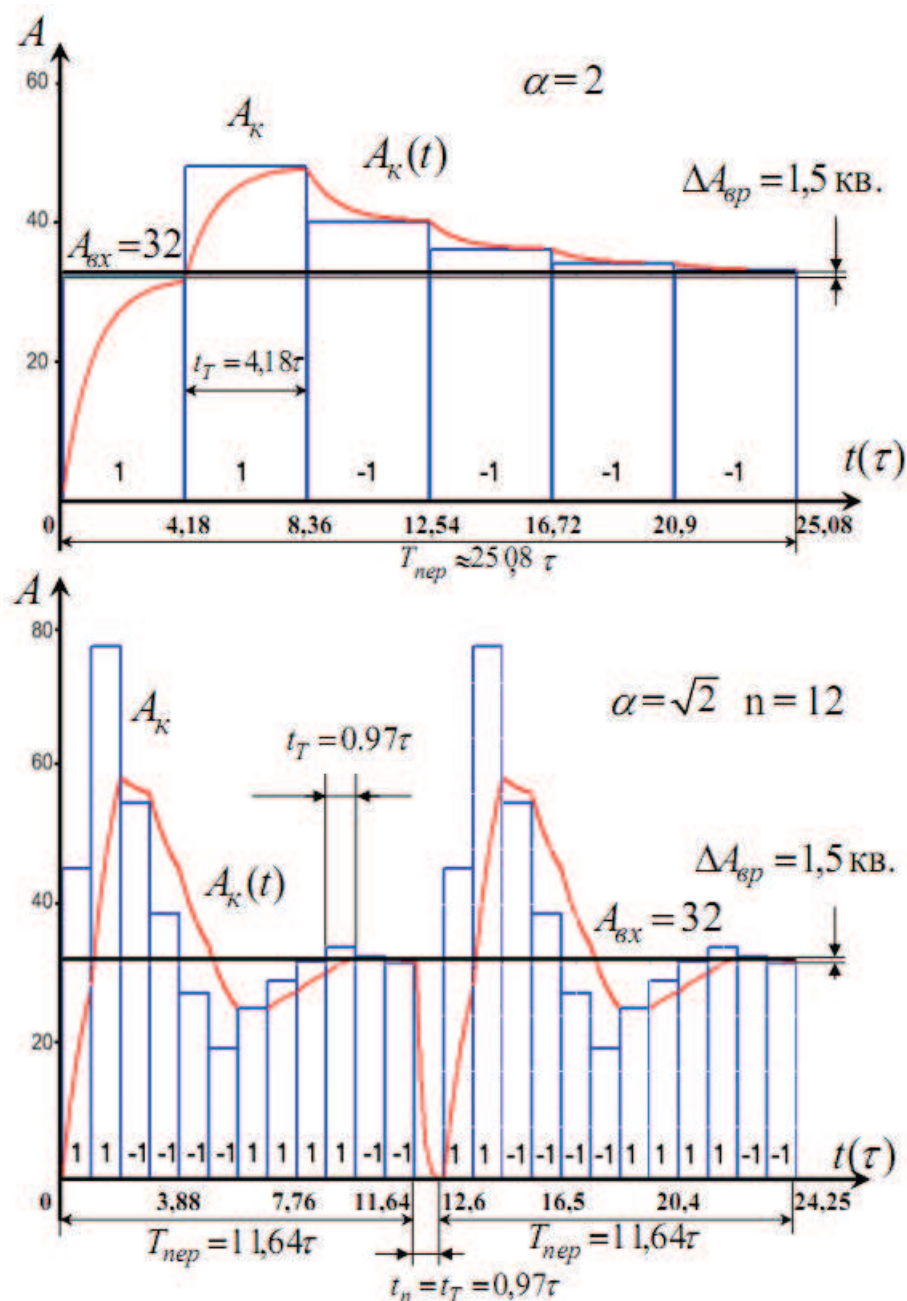


Рисунок 1 – Часова діаграма А-Ц перетворення: а) класичне  $\alpha = 2$ , б) прискорене  $\alpha = \sqrt{2}$

Підхід щодо структурно-функціональної організації схем високопродуктивних порозрядних АЦП з ваговою надлишковістю.

1. Обираємо базис робочої системи числення [15]:
  - а) якщо обрано систему числення з природним базисом, то необхідно використовувати спеціальний надлишковий ЦАП для цієї системи числення;
  - б) якщо обрано систему числення із штучним базисом на основі двійкових рядів, то надлишковий ЦАП можна побудувати на базі декількох двійкових ЦАП.
2. Обираємо розрядні коефіцієнти системи числення:
  - а) якщо обрано систему  $\{1, 0\}$ , то необхідно використовувати лише один надлишковий ЦАП, але обов'язково обирати алгоритм врівноваження з форсуючими сигналами та увести до структури блок форсуючих сигналів (БФС).
  - б) якщо обрано систему  $\{1, -1\}$ , то необхідно використовувати два надлишкових ЦАП, що мають вихідні сигнали протилежної полярності.

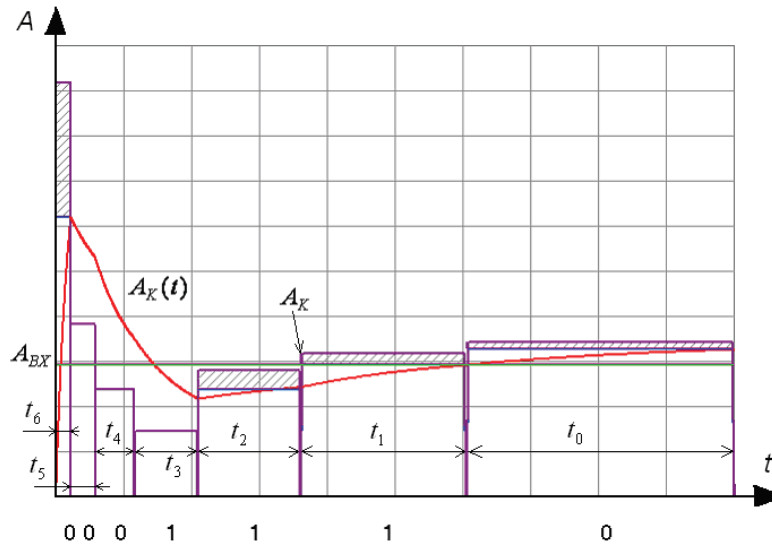


Рисунок 2 – Часова діаграма форсованого А-Ц перетворення із змінною тривалістю тактів врівноваження

3. Обираємо алгоритм врівноваження за яким працює пристрій, причому алгоритм врівноваження з форсуючими сигналами потребує спеціального блоку форсуючих сигналів:
  - а) для системи числення  $\{1, -1\}$  можна використовувати алгоритми:
    - 1) тільки вмикання (антиглітчеве кодування).
    - 2) прискорений з форсуючими сигналами.
  - б) для системи числення  $\{0, 1\}$  можна використовувати алгоритми:
    - 1) прискорений з форсуючими сигналами.
    - 2) адаптивний з форсуючими сигналами
4. Обираємо режим формування тривалостей тактів врівноваження.
  - а) якщо обрано врівноваження з постійними тривалостями тактів, то використовуються звичайний компаратор з постійною чутливістю та тактовий генератор для керування регістром послідовного наближення.
  - б) якщо обрано прогресуючий набір тривалостей тактів врівноваження, то необхідно використовувати схему порівняння з регульованою чутливістю та спеціальний тактовий генератор для генерації прогресуючого набору тривалостей тактів врівноваження.
5. Обираємо варіанти застосування СЧВН
  - а) якщо необхідно підвищити точність перетворення пристрою побудованого на неточних елементах, то необхідно використовувати спеціальну процедуру самокалібрування ваг розрядів.
  - б) якщо необхідно підвищити швидкодію, то самокалібрування не використовується.

Незалежно від того які варіанти було обрано під час проектування, пристрій повинен містити стандартний набір елементів, притаманний порозрядним АЦП: регістр послідовного наближення, блок керування, перетворювач коду для перетворення робочого коду у двійковий код.

Для прикладу розглянемо структурну схему швидкодіючого АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю з прогресуючим набором тривалостей тактів врівноваження, який функціонує на базі СЧВН  $\{0, 1\}$  (рис. 3 а)). Пристрій містить: ТГ – тактовий генератор для генерування тактових імпульсів прогресуючої тривалості, БК – блок керування, а-ЦАП – ЦАП на основі системи числення з ваговою надлишковістю, БФС – блок форсуючих сигналів, РПН – регістр послідовного наближення, ”+” – суматор аналогових сигналів, СП – схема порівняння з регульованою чутливістю (змінними порогами порівняння) для організації процесу перетворення з прогресуючим набором тривалостей тактів врівноваження, ПК – перетворювач надлишкового коду  $N_p$  в двійковий код  $N_2$ . Більшість сучасних аналого-цифрових систем використовує двійкову систему числення. Таким чином АЦП на базі вагової надлишковості здійснює процес перетворення з використанням надлишкових систем числення та спеціальних алгоритмів перетворення, а інформація про результат перетворення передається на інші підсистеми як двійковий код.

АЦП для СЧВН  $\{1, -1\}$  відрізняється тим, що замість одного а-ЦАП використовуються +а-ЦАП та -а-ЦАП (рис. 3 б)).



Таблиця 1

Структурний склад АЦП з ваговою надлишковістю

Вид АЦП	СП	ТГ	РПН	а-ЦАП	-а-ЦАП	БФС	ПК	Σ	БК
На базі СЧВН {0, 1}	+	-	+	+	-	+	+	+	+
На базі СЧВН {1, -1}	+	-	+	+	+	-	+	+	+
На базі СЧВН {1, -1} прискорений	+	-	+	+	+	+	+	+	+
На базі СЧВН {0, 1} з прогресуючим набором тривалостей тактів	+	+	+	+	-	+	+	+	+
На базі СЧВН {1, -1} з прогресуючим набором тривалостей тактів	+	+	+	+	+	-	+	+	+
На базі СЧВН {1, -1} прискорений з прогресуючим набором тривалостей тактів	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Слід відзначити, що двійковий ЦАП може мати розриви на характеристиці перетворення [2], якщо ваги розрядів мають відхилення. ЦАП із ваговою надлишковістю, як правило, має нерозривну передатну характеристику (рис. 4).

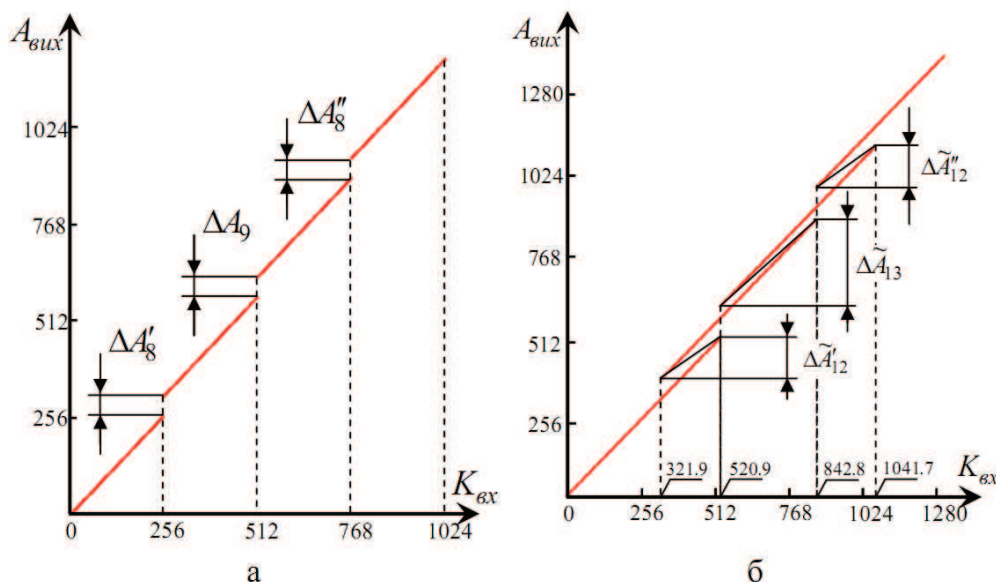


Рисунок 4 – Характеристики перетворення ЦАП за наявності статичних відхилень ваг розрядів у двох старших розрядах: а)  $\alpha = 2$  і  $n = 10$ ; б)  $\alpha = 1.618$  і  $n = 14$

Водночас методи побудови надлишкових ЦАП на базі двійкових ЦАП розділяються на чотири категорії:

- 1) ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП з використанням суматора [13];
- 2) ЦАП на базі двох однакових двійкових ЦАП з використанням суматора і блока масштабування;
- 3) комбінований ЦАП на базі  $m$  однакових двійкових ЦАП з використанням суматора і блоків масштабування;
- 4) комбінований ЦАП на базі кількох однакових (або лише одного) двійкових ЦАП з використанням комутаційної схеми.

Для остаточного прийняття рішення про вибір якогось з них треба оцінити їх ефективність. При цьому виходимо з таких міркувань: порівняно з двійковою в надлишковій системі числення подовжується розрядна сітка [2]. Для рядів із сталим відношенням між сусідніми членами ступінь подовження визначається коефіцієнтом подовження:

$$\gamma_n = \frac{\ln 2}{\ln \alpha}$$

Проте дана формула має обмеження. Її недоцільно використовувати при наближенні  $\alpha$  до 1.0, а при  $\alpha = 1.0$  її використання буде некоректним оскільки  $\ln 1 = 0$ . При цьому треба використовувати співвідношення:

$$\gamma_n = \frac{2^n}{n}.$$

Якщо ж відношення між сусідніми членами ряду не є сталим, то коефіцієнт подовження розрядної сітки можна визначити як відношення відповідної кількості надлишкових розрядів до кількості двійкових розрядів за умови однаковості діапазонів зображення чисел [2].

Ефективність застосування СЧВН можна оцінити через питому вагову надлишковість, яка враховує збільшення кількості обладнання, тобто відношення рівня вагової надлишковості до коефіцієнту подовження розрядної сітки:

$$E = \frac{\ln \alpha \left( \sum_0^{n-2} Q_i - Q_{n-1} \right)}{\ln 2 \sum_0^{n-1} Q_i}.$$

За результатами досліджень, найкраще значення ефективності використання вагової надлишковості  $E=0,206$  для надлишкового ряду ваг розрядів з постійною основою  $\alpha = \sqrt{2}$ . Для інших варіантів значення  $E$  є меншими. Залежність відносної вагової надлишковості, коефіцієнту подовження розрядної сітки та питомої вагової надлишковості від основи системи числення  $\alpha$  наведено на рис. 5. Причому криву коефіцієнту розрядної сітки нормовано по 0,1 по осі абсцис, тобто значення на графіку 0,2 відповідає коефіцієнту 2.

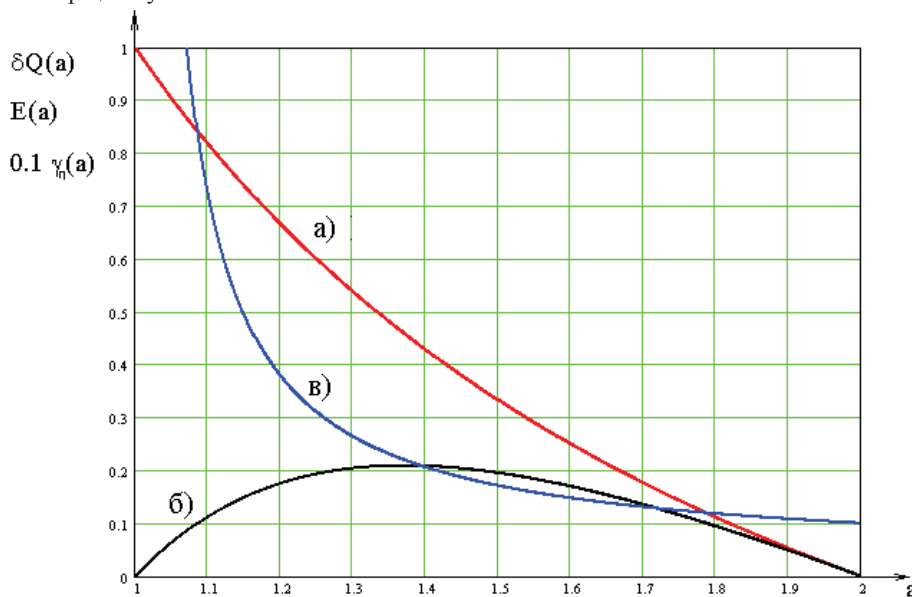


Рисунок 5 – Функціональні залежності: а)  $\delta Q(\alpha)$ , б)  $E(\alpha)$ , в)  $\gamma_n(\alpha)$

### Висновки

1. Запропоновано узагальнений підхід щодо структурно-функціональної організації схем АЦП порозрядного врівноваження для СЧВН  $\{0, 1\}$  та  $\{1, -1\}$ . В рамках запропонованого підходу можна синтезувати структурні схеми АЦП для організації процесу порозрядного врівноваження з прогресуючими тривалостями тактів зокрема.

2. Показано, що порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю можна будувати на основі серійних мікросхем (блоків). Уцілому аналогова та цифрова частини АЦП з ваговою надлишковістю простіші порівняно з аналогічними високопродуктивними двійковими АЦП. Це пов'язано з тим, що зменшуються вимоги до точності формування ваг розрядів ЦАП.

3. Для отримання максимальної ефективності від застосування вагової надлишковості при побудові АЦП і ЦАП доцільно створити спеціалізовану елементну базу. Водночас навіть при

використанні для реалізації пристроїв серійної елементної бази можна отримати значний вииграш швидкодії та підвищення точності порівняно з сучасними двійковими ПФІ та ПФІ з ваговою надлишковістю та постійною тривалістю тактів.

#### Список літератури

1. Analog-digital conversion / Edited by Walt Kester / Analog Devices Inc. 2004. 1230 pages.
2. Азаров О.Д. Аналого-цифрове перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю. Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 232 с.: ил/
3. Кадук О. В. Стратегії самокалібрування характеристики перетворення АЦП порозрядного кодування з ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Кадук О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1 (76). – С. 102–110
4. Кадук О. В. Методи побудови АЦП порозрядного наближення, що самокалібруються / Азаров О. Д., Кадук О. В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 56–66.
5. Азаров О. Д., Решетнік О. О., Гарнага В. А., Ратнюк В. В. Моделі форсуючих сигналів для прискореного порозрядного аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології: 2006, №2.- С. 3-39с
6. Азаров О. Д., Решетнік О.О. Математична модель компаратора з регульованою чутливістю для швидкодіючого багаторозрядного АЦП із ваговою надлишковістю // Наукові праці Вінницького національного технічного університету.– 2008.– №1. Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-1/uk.htm>
7. Patent 4336526, USA, H 03 K 13/05. Successive approximation analog-to-digital converter using non-binary series / Basil Wair. – Published Jun. 22, 1982.
8. Patent 7528761, USA, H 03 m 1/12. Analog/digital conversion using successive approximation and redundant weighting / Dieter Draxelmayr. – Published May. 5, 2009.
9. Patent 7046178, USA, H 03 m 1/10. Method and device for the calibration of a weighted network / Dieter Draxelmayr. – Published May. 16, 2006.
10. Азаров О. Д., Решетнік О. О., Крупельницький Л.В. Математичні моделі динамічних похибок І-го роду для швидкодіючих порозрядних АЦП із ваговою надлишковістю // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: 2009, №2.- С. 8-14с
11. Азаров О. Д., Решетнік О. О., Шабатура М. Ю. Похибки усталення при аналого цифровому перетворенні з прогресуючими тривалостями тактів порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: 2009, №3.- С. 5-12 с.
12. Analog Devices inc. Dual, 12-/14-/16-bit, 1.0 GSPS D/A Converter AD9776/AD9778/AD9779. One Technology Way, P.O. Box, 9106, Norwood, MA 02062-9106, USA. 2005. – 56 p
13. Азаров О. Д., Решетнік О.О., Захарченко С.М., Лукашук О.О., Харьков О.М. Формування нерозривних передатних характеристик ЦАП і АЦП на основі вагової надлишковості // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.– 2006.– N3(7).– С. 7-15с
14. Азаров О. Д., Кадук О. В., Дудник О. В., Муращенко О. Г. Пряме і зворотне перетворення «робочий код – цифровий еквівалент» в АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю // Проблеми інформатизації та управління. – 2010. – №2. – С. 6-13.

#### Відомості про авторів

Азаров Олександр Дмитрович – д. т. н., професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки; ВНТУ, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021; тел. 58-02-25; e-mail: [azarov1@vstu.vinnica.ua](mailto:azarov1@vstu.vinnica.ua)

Решетнік Олександр Олександрович – аспірант кафедри обчислювальної техніки, ВНТУ, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021; тел. +380979693316; e-mail: [de\\_gratnik@rambler.ru](mailto:de_gratnik@rambler.ru)

Муращенко Олександр Геннадійович - аспірант кафедри обчислювальної техніки; ВНТУ, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021; тел. 58-02-25; e-mail: [oleksandr.g.m@gmail.com](mailto:oleksandr.g.m@gmail.com)

Теплицький Михайло Юхимович - магістрант кафедри обчислювальної техніки; ВНТУ, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021; тел. 0966555199; e-mail: [misha\\_pirate@mail.ru](mailto:misha_pirate@mail.ru)

Вінницький національний технічний університет.