

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

О. Д. Азаров

**АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПОРОЗРЯДНЕ  
ПЕРЕТВОРЕННЯ  
НА ОСНОВІ СИСТЕМ ЧИСЛЕННЯ  
З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2010

УДК 681.325; 681.335  
ББК 32.971; 32.972

A35

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 26.11.2009 р.)

Рецензенти:

**В. О. Романов** доктор технічних наук, професор

**Р. Н. Квєтний** доктор технічних наук, професор

A35 **Азаров, О. Д.**  
Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 232 с.

ISBN 978-966-641-354-6

У монографії розглянуто основи теорії порозрядного аналого-цифрового перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю. Описано принцип комплексного вирішення проблеми підвищення як швидкодії, так і точності аналого-цифрових перетворювачів, побудованих на низькоточній елементній базі.

Книгу розраховано на науковців, аспірантів, студентів та фахівців, які займаються проектуванням і розробкою багаторозрядних високоточних АЦП прискореної швидкодії, а також інформаційно-вимірювальних систем, систем цифрового реєстрування й оброблення аналогових сигналів.

**УДК 681.325; 681.335**

**ББК 32.971; 32.972**

**ISBN 978-966-641-354-6**

© О. Д. Азаров, 2010

# ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1 НАПРЯМКИ Й ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СЧВН У БАГАТОРОЗРЯДНИХ ПФІ .....	9
1.1 Арифметико-числові властивості СЧВН, що застосову- ються у ПФІ.....	9
1.2 Особливості побудови багаторозрядних ЦАП паралель- ної дії на основі СЧВН .....	18
1.3 Напрямки застосування СЧВН при багаторозрядному прискореному аналого-цифровому порозрядному перет- воренні.....	33
2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ БАГАТОРОЗРЯД- НИХ АЦП ПОРОЗРЯДНОГО НАБЛИЖЕННЯ, ПОБУДО- ВАНИХ НА НЕТОЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ.....	51
2.1 Метод аналізу нерозривності характеристики претво- рення АЦП на основі СЧВН в «особливих точках».....	51
2.2 Самокалібрування характеристики перетворення бага- торозрядних високоточних АЦП на основі СЧВН(0,1) і СЧВН( $\bar{1}$ , 1) .....	60
2.3 Методичні похибки й ефективність самокалібрування.....	71
3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ АЦП ПОРОЗРЯД- НОГО НАБЛИЖЕННЯ НА ОСНОВІ СЧВН .....	82
3.1 Метод складення рівнянь балансу на основі аналізу при- пустимих похибок усталення у «критичних точках».....	82

3.2	Прискорене форсоване АЦ-перетворення на основі СЧВН( $\bar{1}, 1$ ). Форсуючі сигнали .....	101
3.3	Математичні моделі похибок усталення при АЦ-перетворенні на основі СЧВН( $\bar{1}, 1$ ).....	114
3.4	Прискорене АЦ-перетворення на основі СЧВН (0,1) із форсуванням компенсуючого сигналу .....	126
4	АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДОДАТКОВИХ ЧИННИКІВ НА РЕЖИМ ПРИСКОРЕНОГО ПОРОЗРЯДНОГО АЦ-ПЕРЕТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ СЧВН.....	142
4.1	Математичні моделі похибок усталення компенсуючого сигналу за умови багатократного прискореного врівноваження .....	142
4.2	Прискорене АЦ-перетворення при коливальному характері формування компенсуючого сигналу .....	153
4.3	Прискорене врівноваження за умови змінення рівня вхідного сигналу .....	166
5	РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ НА БАЗІ АЦП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ .....	186
5.1	Вибір оптимальної СЧВН під час проектування АЦП системного застосування з підвищеними точністю і швидкістю.....	186
5.2	Проектування високоточних швидкодійних цифрових систем реєстрування й оброблення аналогових сигналів.....	198
	ЛІТЕРАТУРА .....	218

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦ – перетворення – аналого-цифрове перетворення;  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;  
БК – блок керування;  
БПВ – блок порозрядного врівноваження;  
ДНЛ – диференційна нелінійність;  
ДСТ – державний стандарт;  
ІВС – інформаційно-вимірювальні системи;  
ІНЛ – інтегральна нелінійність;  
ІОС – інформаційно-обчислювальна система;  
НСМ – нагромаджувальний суматор;  
ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;  
ПВЗ – пристрій вибірки-зберігання;  
ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій;  
ПІ – перетворювач інформації;  
ПК – пристрій керування;  
ПФІ – перетворювачі форми інформації;  
РПН – реєстр послідовного наближення;  
САЦП – системний аналого-цифровий перетворювач;  
СП – схема порівняння;  
СПІ – системні перетворювачі інформації;  
СЦАП – системний цифроаналоговий перетворювач;  
СЦР – система цифрової реєстрації;  
СЧ – система числення;  
СЧВН – система числення з ваговою надлишковістю;  
ЦАП – цифроаналоговий перетворювач;  
ЦОМ – цифрова обчислювальна машина;  
ЦОП – цифровий обчислювальний пристрій;  
ЦФ – цифровий фільтр.

## ВСТУП

Аналого-цифрові перетворювачі сукупно з цифроаналоговими перетворювачами утворюють клас перетворювачів форми інформації, що широко застосовуються в різних сферах людської діяльності. Параметри і характеристики ПФІ залежать від галузі використання і складності розв'язуваних задач. У теперішній час набуло поширення використання ПФІ разом із ЦОП у складі різноманітних систем. При цьому АЦП і ЦАП розглядаються як системні перетворювачі інформації. Причому СПІ, у свою чергу, виконують роль аналого-цифрових підсистем [1], які залежно від призначення систем реалізують функції зв'язку з об'єктом, а саме аналого-цифрових контролерів, аналого-цифрових інтерфейсів, аналого-цифрових спецпроцесорів, підсистем тестування, випробовування та регулювання параметрів і характеристик виробів, що виготовляються, збирання й оброблення вимірювальної інформації, аналізу і синтезу сигналів і т. п. Особливо серйозні вимоги висуваються до характеристик СПІ, що входять до складу інформаційно-вимірювальних систем. У першу чергу це точність і швидкодія. Удосконалення зазначених характеристик є центральним напрямком досліджень у галузі одержання, перетворення й оброблення аналогових сигналів.

Вирішенням проблем підвищення точності і швидкодії протягом тривалого часу плідно займалися наукові школи А. І. Кондалєва, В. О. Романова, В. О. Багацького [1–7], В. Б. Смолова [8–11], Е. І. Гітиса [12–14], П. П. Орнатського [15–19], Б. І. Швецького [20–22], О. П. Стахова [23–25], В. М. Шляндина [26–28], Ю. М. Туза [29], Є. Т. Володарського [30], М. П. Цапенка [31] та інших. На жаль, багато оригінальних ідей учених України і країн колишнього СРСР так і не було впроваджено в практику внаслідок орієнтації політики колишнього керівництва міністерств і відомств СРСР, що відповідали за засоби електронізації, вимірювальну й обчислювальну техніку, на копіювання закордонних підходів і зразків, аж до копіювання інтегральних схем. Це обумовило серйозне відставання рівня техніки у цій галузі, зокрема, в Україні. Проте запропоновані ідеї ряду наукових колективів не тільки не втратили своєї актуальності в сучасних умовах,

але й створюють передумови для проектування і розроблення ІВС і засобів перетворення інформації, що за своїми параметрами і характеристиками не поступаються кращим закордонним зразкам. При цьому орієнтація на передову технологію й особливо нанотехнологію дозволила б налагодити розроблення, виготовлення і впровадження таких виробів у народне господарство України.

Традиційно проблеми підвищення точності і швидкодії ПІ вирішувалися і частково вирішуються за рахунок застосування досконалішої елементної бази. Проте за умов, коли можливості технології на певному етапі вичерпані, потрібні принципово інші підходи, що базуються, зокрема, на введенні надлишковості на різних рівнях проектування пристроїв і систем: функціонально-алгоритмічному, інформаційному і структурно-схемотехнічному.

Слід зазначити, що перший і третій напрямки вже досить тривалий період мають місце в теоретичних дослідженнях і практичних розробках низки наукових шкіл і дали свої позитивні результати. Проте зазначені підходи в основному дозволяють вирішувати тільки одну з проблем: або підвищення точності, або – швидкодії. Так, наприклад, підвищення швидкості високоточного аналого-цифрового перетворення може здійснюватися структурно-схемотехнічним шляхом (паралельно-послідовні структури) або функціонально-алгоритмічним (багатокрокові інтегруючі АЦП). Підвищення ж точності, що досягається за допомогою цих підходів, орієнтованих на різні методи коригування статичних похибок, як правило, призводить до зниження швидкодії перетворювачів. У цьому зв'язку певну нішу посідають дослідження, пов'язані з вирішенням проблем комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в проєктовані пристрої окремого виду надлишковості, а саме, у формі систем числення з ваговою надлишковістю (СЧВН).

Застосування СЧВН у техніці АЦП і ЦАП розпочалося в СРСР з кінця 70-х років спочатку у науковій школі професора О. П. Стахова, згодом і автора цієї монографії, незалежно від аналогічних робіт, що розгорнулися водночас у США (фірма Intersil Inc.). На першому етапі (до середини 80-х років) в основному вирішувалася проблема підвищення точності. У результаті цього, зокрема, у практичному плані були створені високоточні багаторозрядні (14–17-розрядів) АЦП, що са-

мокалібруються з середньою швидкістю (час перетворення 50–500 мкс, основна похибка – 0,006–0,02%). На другому етапі (з середини 80-х років) почала вирішуватися проблема комплексного підвищення точності і швидкості аналого-цифрового перетворення. Актуальність досліджень у цій галузі підтверджується позитивними практичними результатами. Водночас слід зазначити, що СЧВН, що використовується у СПП, у загальному випадку варто розглядати як внутрішню (робочу) стосовно основної (двійкової) системи числення, в якій функціонують цифрові обчислювальні пристрої, що входять до структури різноманітних ІВС.

У 2004 році було видано першу монографію автора [32] у цьому напрямку. В подальшому у 2005, 2006 і 2008 роках було опубліковано ще низку наукових праць [33–38] з цієї тематики. У цих роботах детальніше розкрито питання: побудови спеціалізованих ПФІ, а також використання їх в ІВС; методи підвищення точності конденсаторних АЦП і ЦАП; особливості проектування аналогових вузлів для вказаного класу пристроїв.

У цій монографії не ставилося за мету кардинальне змінення матеріалу першої монографії з урахуванням останніх публікацій. Водночас, окремі наукові положення з першої монографії зазнали низки доопрацювань, деякі розділи детальніше структуровано й доповнено.

Метою другого видання монографії є подальша систематизація основ теорії аналого-цифрового перетворення на основі СЧВН. Центральною задачею висувається комплексне вирішення таких аспектів проблеми: з одного боку – підвищення (у 5–10 разів) швидкодії АЦП за рахунок можливості компенсації істотних (20–50%) похибок усталення, що виникають під час формування компенсуючого сигналу; з іншого боку – істотне (на 1–2 порядки) підвищення точності (лінійності) ПФІ, побудованих на неточних елементах, шляхом самокалібрування характеристики перетворення. Причому це все здійснюється «розміном» вагової надлишковості на компенсацією динамічних похибок I і II роду, а також на цифрове коригування статичних похибок елементної бази.

Автор буде вдячний за відгуки на монографію, а також поради, що стосуються подальшого розвитку досліджень.



# 1 Напрямки й особливості застосування СЧВН у багаторозрядних ПФІ

У цьому розділі розглянуто загальні положення теорії багаторозрядного прискореного аналого-цифрового порозрядного перетворення на основі СЧВН. Аналізуються можливості комплексного вирішення проблеми підвищення точності АЦП і ЦАП, побудованих на неточних елементах, а також підвищення швидкодії АЦП порозрядного врівноваження. Розглядаються арифметико-числові властивості СЧВН, що застосовуються у ПФІ. Описуються особливості побудови ЦАП паралельної дії з ваговою надлишковістю.

## 1.1 Арифметико-числові властивості СЧВН, що застосовуються у ПФІ

СЧВН формують окрему гілку так званих вагомозначних систем числення і відносяться до класу позиційних систем числення, до яких у свою чергу, зокрема, належать поширені у теперішній час двійкова і десяткова. Вагова надлишковість проявляється у декількох аспектах, аналіз яких буде розглянуто нижче. Окремим питанням при цьому є формування базису. Останній може бути природним і штучним. Природним є базис, який являє собою набір ваг розрядів, значення яких формуються як зростаюча геометрична прогресія чисел  $\alpha^0, \alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^{n-1}$ . Причому, оскільки при цьому відношення ваг сусідніх розрядів є постійним числом  $\alpha$ , то саме воно вважається **основою** системи числення. Прикладом природних слугують базиси:

$2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{n-1}$  – з основою  $\alpha = 2$ ;  $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^{n-1}$  – з основою  $\alpha = 10$ , відповідно, двійкової і десяткової систем числення.

У випадку класичної «золотої пропорції»  $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,618$  маємо базис, який складається з сукупності чисел: 1; 1,618; 2,618; 4,236; ...;  $1,618^{n-1}$ . Якщо  $\alpha = \sqrt{2} \approx 1,414$ , то має місце послідовність: 1; 1,414; 2; 2,828; 4; ...;  $1,414^{n-1}$ .

У системах числення з природним базисом і цілочисловим  $\alpha$  будь-яке ціле число  $N$  може бути абсолютно точно зображено у формі:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot \alpha^i, \quad (1.1)$$

де  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$  – номер розряду;  $a_i \in \{0, 1\}; \{\bar{1}, 1\}; \{\bar{1}, 0, 1\}$  – двійкова цифра в  $i$ -му розряді або алфавіт;  $\alpha = 1; 2; 3; \dots; 10$  – основи системи числення;  $\alpha^i$  – вага  $i$ -го розряду;  $(n-1)$  – номер старшого розряду.

У загальному випадку алфавіт може бути двійковим, трійковим, вісімковим, десятковим і т. д. Якщо ж  $\alpha$  є дробовим ірраціональним числом, наприклад, «золотою»  $p$  або  $S$ -пропорцією [32], то дійсне число точно зображується у вигляді

$$D = \sum_{i=-\infty}^{n-1} a_i \cdot \alpha^i.$$

Оскільки така форма зображення передбачає використання нескінченно довгої розрядної сітки, то для ПФІ вона є нереальною. У цьому випадку доцільно перейти від дійсних чисел до натуральних. Причому, показано [25], що, наприклад, для золотих  $p$ -пропорцій, будь-яке натуральне число зображується у вигляді

$$N = \sum_{i=-n}^{n-1} a_i \cdot \alpha_p^i,$$

де  $\alpha_p^i = \alpha_p^{i-1} + \alpha_p^{i-p-1}$  –  $i$ -й степінь золотої  $p$ -пропорції.

Значення золотої  $p$ -пропорції [24] розраховується як дійсний додатний корінь полінома  $x^{p+1} - x^p - 1 = 0$ . Тут для окремих значень  $p$  маємо такі  $\alpha$ :

$p$	0	1	2	3	4	5	6	...	$\infty$
$\alpha_p$	2	1,618	1,465	1,380	1,324	1,285	1,256	...	1

Для золотих  $S$ -пропорцій значення  $\alpha$  обчислюються з полінома

$$x^{S+1} - \sum_0^S x^i = 0.$$

Відповідно отримаємо:

$S$	0	1	2	3	4	5	...	$\infty$
$\alpha_S$	1	1,618	1,839	1,928	1,966	1,9	...	2

Враховуючи, що  $\alpha_p$  і  $\alpha_S$  є дробовими раціональними числами крім випадків, коли  $p$  і  $S$  дорівнюють нулю або нескінченності, то можна стверджувати, що зображення цілих чисел у формі (1.1) у переважній більшості випадків будуть наближеними. При цьому методична похибка  $\Delta N$  такого зображення залежить від набору алфавіту  $a_i$ . Якщо  $a_i \in \{0, 1\}$ , то  $\Delta N \leq 1,0$ . У цьому випадку така система називається СЧВН (0,1). При  $a_i \in \{\bar{1}, 1\}$   $\Delta N \leq 2,0$  і маємо СЧВН ( $\bar{1}$ ,1). Якщо  $a_i \in \{\bar{1}, 0, 1\}$   $\Delta N \leq 1,0$  і має місце СЧВН ( $\bar{1}$ , 0,1).

Слід зазначити, що наявність методичної похибки в зображенні чисел у формі ( $\bar{1}$ , 1) не є чимось критичним для ПФІ. Це пов'язано з тим, що в останніх завжди мають місце як інструментальні, так і методичні похибки, наприклад похибка квантування, сумірна із значенням молодшого кванта на рівні  $0 \leq \Delta_{кв} < 1,0$  для СЧВН (0,1) або  $0 \leq \Delta_{кв} < 2,0$  для СЧВН ( $\bar{1}$ , 1). Певним компромісом у цьому плані може слугувати використання замість виразу (1.1) зображення  $N$  у вигляді:

$$N_d = \sum_{i=-d}^{n-1} a_i \cdot \alpha_p^i, \quad (1.2)$$

де  $d$  – число додаткових молодших розрядів, що примусово збільшують роздільну здатність ПФУ.

У системах числення зі штучним базисом ваги розрядів формуються в рамках послідовності цілих чисел  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1}$ . Причому, зв'язок між вагою  $i$ -го розряду формується у вигляді певної суми молодших розрядів:

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \varphi_{i-2} + \dots + \varphi_{i-k}.$$

Прикладами наборів таких чисел можуть слугувати  $p$ -числа Фібоначчі [25], числа Коца та інші. Ще одним прикладом штучного базису є ваги розрядів так званих тетрадно-десяткових кодів [17]. Причому

базиси 2, 4, 2, 1 і 5, 1, 2, 1 рекомендовані стандартом СРСР (ГОСТ 12814-67) для перетворювачів аналог-код і код-аналог. Водночас слід відзначити, що специфікою останніх вагових наборів є збереження співвідношень тільки в рамках тетради розрядів.

Зображення цілих чисел у системах числення зі штучним базисом здійснюється у вигляді

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot \varphi_i,$$

де  $a_i$  – розрядний коефіцієнт в  $i$ -му розряді;  $i$  – номер розряду;  $\varphi_i$  – вага  $i$ -го розряду, що є цілим числом.

Узагальнюючи поняття природного і штучного базисів доцільно вагу будь-якого  $i$ -го розряду розглядати у вигляді  $Q_i = \alpha^i$  – для дробових основ і  $Q_i = \varphi_i$  – для цілочислового набору ваг розрядів. При цьому зображення чисел в узагальненому базисі має вигляд:

$$N_d = \sum_{i=-d}^{n-1} a_i \cdot Q_i, \quad (1.3)$$

причому для цілочислового базису  $d=0$ , а в іншому випадку значення  $d$  вибирається з умови мінімізації похибки  $\Delta N$ .

Поняття вагова надлишковість асоціюється в першу чергу з наявністю надлишкового співвідношення між вагами розрядів. Основною ознакою цього є перевищення суми ваг молодших розрядів над сусіднім старшим, тобто:

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

Вагова надлишковість має місце практично у всіх СЧ як із природними, так і штучними базисами на основі  $p$  і  $S$  золотих пропорцій,  $p$  і  $S$  чисел Фібоначчі, тетрадных базисах двійково-десяткових кодів.

Абсолютна вагова надлишковість для  $i$ -го розряду визначається як

$$\Delta \tilde{Q}_i = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i. \quad (1.4)$$

При цьому відносна вагова надлишковість

$$\delta\tilde{Q}_i = \frac{\Delta\tilde{Q}_i}{Q_i}. \quad (1.5)$$

У випадку природного базису маємо:

$$\delta\tilde{Q}_i = \frac{\sum_{j=0}^{i-1} \alpha^j - \alpha^i}{\alpha^i} = \frac{2 - \alpha}{\alpha - 1} - \frac{\alpha^{-i}}{\alpha - 1}.$$

Із зростанням  $i$  останній член швидко зменшується, і, враховуючи, що  $\alpha$  є постійне число, можна вважати, що

$$\delta\tilde{Q}_i \approx \frac{2 - \alpha}{\alpha - 1}. \quad (1.6)$$

Для деяких  $\alpha$  маємо такі значення  $\delta\tilde{Q}$ :

$\alpha$	2,00	1,90	1,80	1,70	1,618	1,60	1,50	1,40
$\delta\tilde{Q}, \%$	0	11,1	25,0	42,9	61,8	66,7	100	150

Слід зазначити, що в СЧВН має місце подовження розрядної сітки порівняно з класичною двійковою СЧ. Рівень такого подовження можна оцінити таким чином. По-перше, діапазони перетворення для різних систем числення повинні бути однаковими. По-друге, у СЧВН треба вибрати такий діапазон, щоб повністю зберігалася вагова надлишковість. При цьому для двійкової СЧ маємо:

$$D_2(n) = 2^n - 1.$$

Для СЧВН відповідно –  $D_\alpha(n_\alpha) = \alpha^{n_\alpha} - 1$ . У цих формулах  $n$  означає вибране число розрядів для двійкової системи,  $n_\alpha$  – число розрядів СЧВН за умови однаковості діапазонів. Прирівнюючи  $D_2(n)$  і  $D_\alpha(n_\alpha)$  маємо:

$$2^n = \alpha^{n_\alpha}.$$

Спрощуючи і логарифмуючи ліву і праву частини, маємо:

$$n \cdot \ln 2 = n_\alpha \cdot \ln \alpha.$$

При цьому доцільно ввести коефіцієнт подовження розрядної сітки у вигляді

$$\gamma_n = \frac{n_\alpha}{n} = \frac{\ln 2}{\ln \alpha} \approx \frac{0,693}{\ln \alpha}. \quad (1.7)$$

Для окремих  $\alpha$  коефіцієнт  $\gamma_n$  має такі значення:

$\alpha$	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,41	1,4
$\gamma_n$	1,00	1,08	1,18	1,31	1,48	1,71	2,00	2,06

Графік залежності  $\gamma_n = f(\alpha)$  наведено на рисунку 1.1.

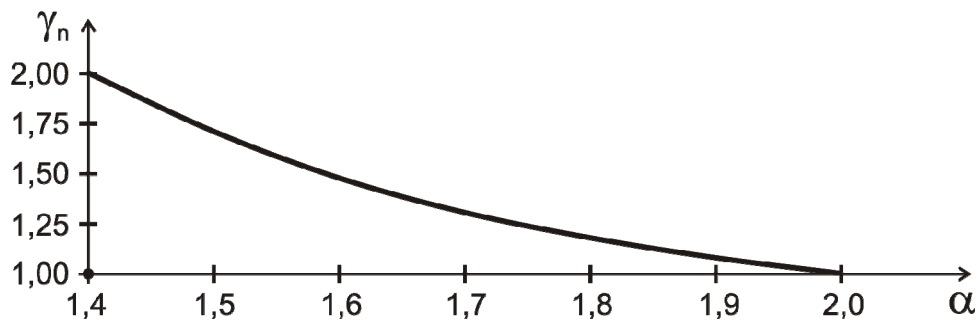


Рисунок 1.1 – Залежність  $\gamma_n = f(\alpha)$

На основі (1.6) можна розрахувати для СЧВН число розрядів  $n_\alpha = n \cdot \gamma_n$ . Причому, якщо значення  $\gamma_n$  і  $n_\alpha$  не є цілими, то для коректності шукане  $n_\alpha$  треба округлити у більший бік до найближчого цілого.

Формула (1.7) є простою, але має обмеження. Так при наближенні  $\alpha$  до 1,0 нею користуватися недоцільно, а при  $\alpha = 1,0$  її використання буде некоректним, оскільки  $\ln 1 = 0$ . При цьому

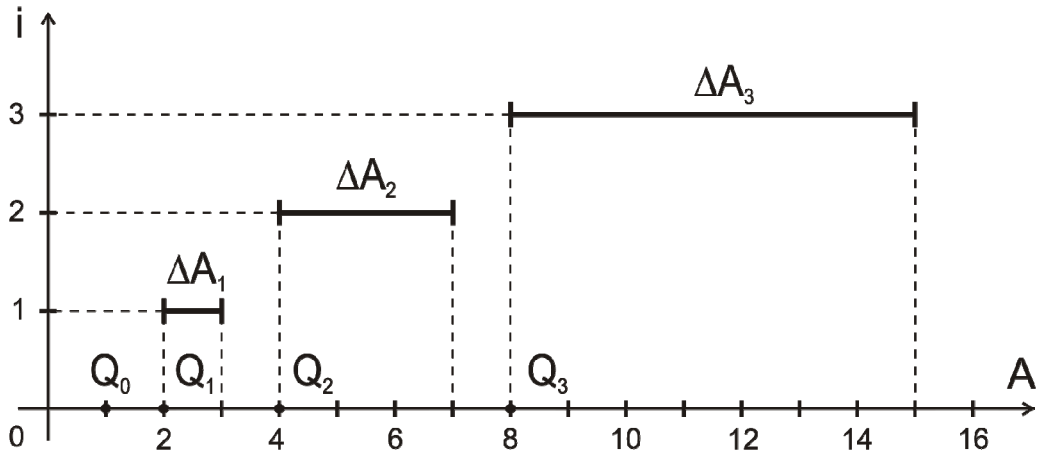
$$\gamma_n = \frac{2^n}{n}.$$

Слід відзначити, що наявність вагової надлишковості в рамках ПФІ істотно змінює характер перетворювальної шкали порівняно із двійковою СЧ. На рисунку 1.2 наведено діаграми формування перетворювальних шкал для розрядних сіток ЦАП на основі двійкової СЧ і СЧ із базисом Фібоначчі ( $p = 1$ ). Тут:

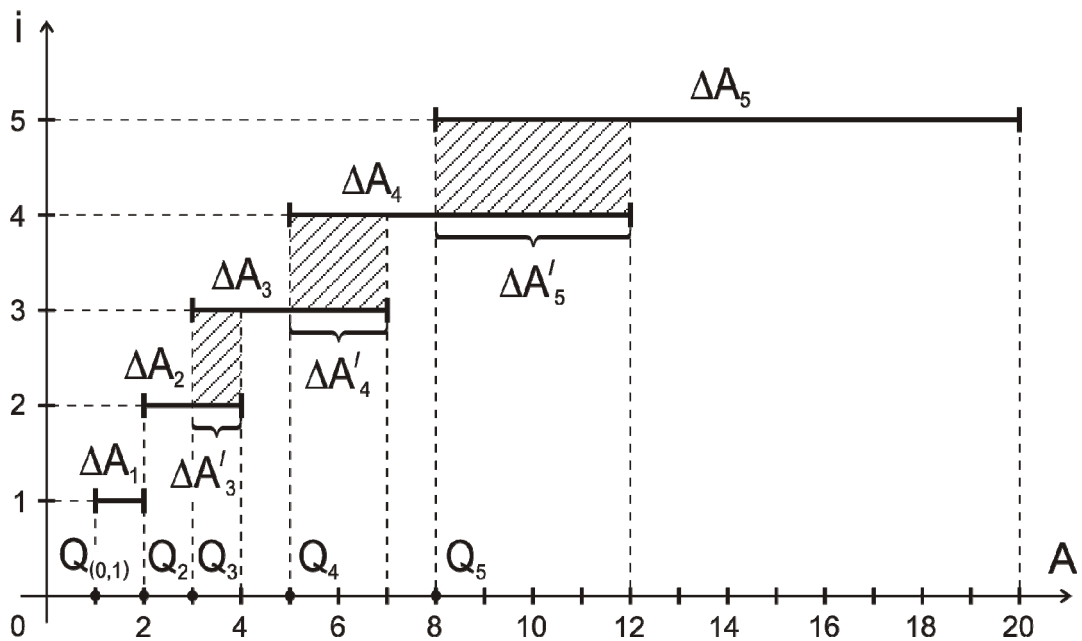
$$\Delta A_i = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j \text{ – діапазон перетворювальної шкали для } i\text{-го розряду;}$$

$$\Delta A'_i = \sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i = \Delta \tilde{Q}_i - \text{ширина зони перекриття або абсолютна}$$

вагова надлишковість для  $i$ -го розряду



а



б

Рисунок 1.2 – Перетворювальні шкали:

а) двійкової СЧ; б) СЧВН – Фібоначчі

Аналіз діаграм перетворювальних шкал показує, що у випадку двійкової СЧ перекриття відсутні. Це виникає внаслідок її нульової

вагової надлишковості. У випадку СЧВН із базисом Фібоначчі ( $p = 1$ ) для  $i = 3, 4, 5$  відповідно має місце:

$$\Delta A'_3 = 1; \Delta A'_4 = 2; \Delta A'_5 = 4.$$

Аналогічно можна побудувати діаграми перетворювальних шкал як для СЧ із цілочисловими, так і дробовими вагами розрядів.

Слід зазначити, що між межами розрядних перетворювальних шкал для двійкової СЧ мають місце розривні зони, ширина яких дорівнює значенню молодшого розряду  $Q_0 = 1$ . Саме ця обставина є причиною того, що у випадку наявності в реальних приладах статичних похибок формування ваг розрядів їх характеристика перетворення буде мати зони розривів, ширина яких буде більшою  $Q_0$ , а це може бути неприпустимим. Вище буде показано, що поява в АЦП порозрядного врівноваження динамічних похибок (I роду) призведе до порушення режиму врівноваження, що також є неприпустимим.

Другим аспектом вагової надлишковості є багатозначність зображення чисел. Так, наприклад, число 9 може бути зображено в базисі Фібоначчі ( $p = 1$ ) такими кодовими комбінаціями:

Номери розрядів	5	4	3	2	1	0
Ваги розрядів	8	5	3	2	1	1
9 =	1	0	0	0	1	0
	0	1	1	0	1	0
	0	1	1	0	0	1
	0	1	0	1	1	1

У випадку наявності між вагами розрядів структурованого зв'язку, наприклад, як для базису  $p$ -чисел Фібоначчі типу:

$$\varphi_p(l) = \varphi_p(l-1) + \varphi_p(l-p-1)$$

або золотих  $p$ -пропорцій

$$\alpha_p^i = \alpha_p^{i-1} + \alpha_p^{i-p-1}$$

над розрядами кодів, зображених у таких СЧВН можна виконувати операції згортання і розгортання. При цьому згортання полягає в заміні нуля в  $i$ -му і одиниць у  $(i-1)$ -му і  $(i-p-1)$ -му розряді їхніми інверсіями. Розгортання – операція, зворотна згортанню.



Зображення початкового відрізка натуральних чисел у СЧВН із базисом на основі золоті пропорції зручно здійснювати за допомогою операцій згортання і розгортання, зокрема у вигляді:

<i>ваги розрядів</i>	$\alpha^3$	$\alpha^2$	$\alpha^1$	$\alpha^0$	$\alpha^{-1}$	$\alpha^{-2}$	$\alpha^{-3}$	$\alpha^{-4}$
0=	0	0	0	0	0	0	0	0
1=	0	0	0	1	0	0	0	0
2=	0	0	0	0	1	1	0	0
3=	0	0	1	1	0	1	0	0
4=	0	1	0	0	0	1	0	0
5=	0	1	0	1	0	1	0	0
	0	1	0	0	1	1	1	1
	0	1	0	1	1	1	1	1
	0	1	1	0	1	0	0	1
	1	0	0	0	1	0	0	1

На відміну від класичної двійкової системи числення, представлення чисел у НПСЧ у СЧВН із базисами, основою яких є дробове  $\alpha$ , призводить до нерівномірної дискретизації на числовій осі. Так, наприклад, у золотому базисі зображення чисел початковим набором кодів має вигляд:

<i>ваги</i>	$\alpha^4$	$\alpha^3$	$\alpha^2$	$\alpha^1$	$\alpha^0$	$A_{екв}$	$\Delta A_{дк}$
	0	0	0	0	0	0,000	
	0	0	0	0	1	1,000	1,000
	0	0	0	1	0	1,618	0,618
	0	0	1	0	0	2,618	1,000
<i>коди</i>	0	0	1	0	1	3,618	1,000
	0	1	0	0	0	4,236	0,618
	0	1	0	0	1	5,236	1,000
	0	1	0	1	0	5,854	0,618
	1	0	0	0	0	6,854	1,000

де  $A_{екв}$  – цифровий еквівалент кодів;  $\Delta A_{дк}$  – крок дискретизації.

Зображення чисел СЧВН з алфавітом  $(\bar{1}, 1)$  є специфічним. Символ  $\bar{1}$  позначає  $-1$ . У цих системах числення, так само, як і в двійковій, від'ємні числа можна зображувати, не використовуючи спеціального символу знака. Діапазон чисел, які можна представити  $n$  розрядами з символами  $(\bar{1}, 1)$ , удвічі більший, ніж діапазон чисел із символами  $(0, 1)$ . Проте дискретність зображення чисел у такій системі також удвічі більша. Зображення початкового відрізка натуральних чисел у СЧВН  $(\bar{1}, 1)$  також, як і в системі  $(0, 1)$ , зручно здійснювати за допомогою операцій згортання і розгортання:

<i>ваги розрядів</i>	$\alpha^3$	$\alpha^2$	$\alpha^1$	$\alpha^0$	$\alpha^{-1}$	$\alpha^{-2}$	$\alpha^{-3}$	$\alpha^{-4}$	$\alpha^{-5}$
0=	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	1	1
2=	$\bar{1}$	1	1	1	1	1	$\bar{1}$	1	1
4=	1	$\bar{1}$	1	1	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	1	1
6=	1	1	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	1	1
8=	1	1	1	1	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{1}$

Доцільно відзначити, що в розглянутій системі числення можна представляти парні числа, двократні  $\alpha^0 = 1$ .

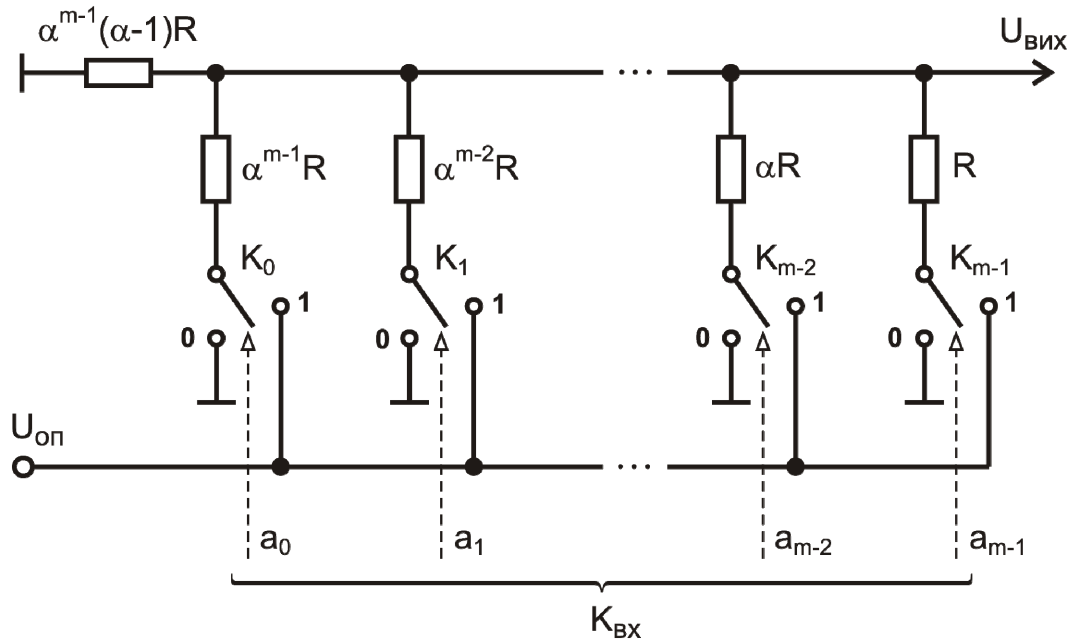
## 1.2 Особливості побудови багаторозрядних ЦАП паралельної дії на основі СЧВН

Слід зазначити, що структурні відмінності побудови ЦАП на основі СЧВН і традиційної двійкової системи є незначними. Проте існують деякі специфічні особливості, що в першу чергу визначаються вибраним базисом.

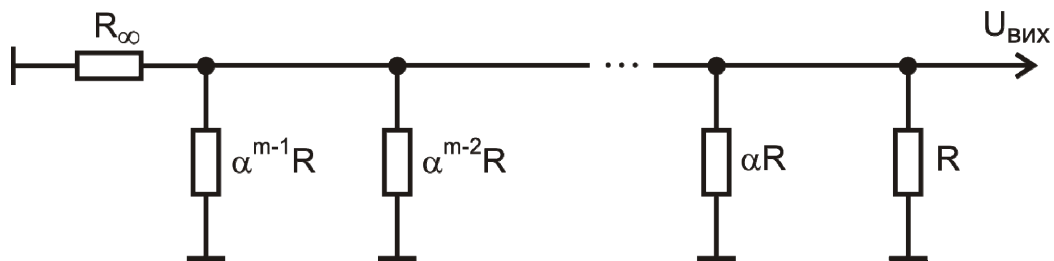
Розглянемо існуючі принципи побудови ЦАП паралельної дії у вигляді перетворювачів код–напруга (ПКН) і код–струм (ПКС). ПКН

традиційно реалізуються на основі резистивних і конденсаторних [39–40] матриць. Структурно ці матриці поділяються на різновиди: вагового, драбинкового і комбінованого типів.

ПКН на основі  $m$ -розрядної резистивної матриці вагового типу наведено на рисунку 1.3. Пристрій (рисунок 1.3а) містить матрицю з набором із  $m$  вагових резисторів із номіналами  $R, \alpha R, \dots, \alpha^{m-2}R, \alpha^{m-1}R$ , ключових елементів  $K_0, K_1, \dots, K_{m-2}, K_{m-1}$ , і джерело опорної напруги  $U_{оп}$ .



а



б

Рисунок 1.3 – ПКН на основі резистивної матриці вагового типу:  
а) функціональна схема; б) схема заміщення

Тут  $\alpha$  – основа СЧВН із природним базисом. Значення розрядного коефіцієнта  $a_i = 0$   $K_{ex}$  відповідає нульовому положенню  $i$ -го ключового елемента, а  $a_i = 1$  – одиничному положенню. Номінал кінцевого ре-

зистора  $R_\infty$  може бути оцінений як паралельне з'єднання нескінченно довгого ланцюга резисторів із номіналами  $R_\infty = \alpha^m \cdot R \parallel \alpha^{m+1} \cdot R \parallel \alpha^{m+2} \cdot R \parallel \dots \parallel \alpha^\infty \cdot R$ .

Замінюючи  $R_\infty$  на провідність і здійснюючи перетворення, маємо:

$$\gamma_\infty = \frac{1}{R \cdot \alpha^{-(m-1)} \cdot (\alpha - 1)^{-1}}.$$

Переходячи знову до резистора, отримаємо

$$R_\infty = R \cdot \alpha^{m-1} \cdot (\alpha - 1).$$

З урахуванням номіналів резисторів, вихідна напруга на виході ПКН

$$U_{вих} = U_{он} \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} a_i \cdot \alpha^{i-(m-1)}, \quad (1.8)$$

де  $a_i$  – значення  $i$ -го розряду вхідного коду  $K_{ex}$ .

Слід зазначити, що недоліком матриці вагового типу є значний діапазон розкидів номіналів резисторів, тому їх складно реалізувати в мікроелектронному виконанні. До того збільшення значень резисторів у молодших розрядах збільшує сталу часу і значно погіршує швидкість дію.

Певною мірою цих недоліків позбавлений ПКН на основі матриці драбинкового типу, схему якого наведено на рисунку 1.4.

Розрахунок  $R_\infty$  може бути здійснено на основі схеми заміщення, наведеної на рисунку 1.4б. Вважаємо, що  $R_\infty$  це – вихідний опір, еквівалентний опору резистивного кола нескінченної довжини. При цьому відношення  $U_{вих}$  до  $U_{он}$  повинно задовольняти співвідношення

$$\frac{U_{вих}}{U_{он}} = \frac{\alpha^{n-1}}{\sum_{i=-\infty}^{n-1} \alpha^i} = \frac{\alpha - 1}{\alpha}.$$

25. Стахов А. П. Коды золотой пропорции / Стахов А. П. – М. : Радио и связь, 1984. – 152 с.
26. Шляндин В. М. Цифровые электроизмерительные приборы / Шляндин В. М. – М. : Энергия, 1972.
27. Шляндин В. М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы / Шляндин В. М. – М. : Высшая школа, 1973. – 280 с.
28. Шляндин В. М. Цифровые измерительные устройства: учебник для вузов / Шляндин В. М. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1981. – 335 с.
29. Туз Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Туз Ю. М. – К. : Высшая школа, 1976. – 256 с.
30. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навчальний посібник / Володарський Є. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Сердюк Г. Б. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.
31. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы. : учеб. пособие для вузов / Цапенко М. П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
32. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія / Азаров О. Д. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 260 с.
33. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д., Архипчук О. А., Захарченко С. М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 125 с.
34. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокалібруються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія / під заг. ред О. Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.
35. Захарченко С. М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія / Захарченко С. М., Азаров О. Д., Харков О. М.; під заг. ред О. Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 235 с.

36. Азаров О. Д. Конвеєрні аналого-цифрові перетворювачі з ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д., Шапошніков О. В., Захарченко С. М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 157 с.

37. Азаров О. Д. Обчислювальні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів: монографія / Азаров О. Д. Коваленко О. О.; під заг. ред О. Д. Азарова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 147 с.

38. Азаров О. Д. Багатоканальні ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів на базі АЦП із ваговою надлишковістю: монографія / Азаров О. Д, Снігур А. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 138 с.

39. Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: учеб. пособие / В. А. Поджаренко, А. Д. Азаров, В. А. Власенко, И. И. Коваленко. – К. : Вища школа, 1990.

40. Конденсаторні матриці для ЦАП на основі НПСЧ / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага і др. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – №2. – С. 6–18.

41. А. с. 1246378 СССР, Н 03 М 1/66. Преобразователь код-ток / А. Д. Азаров, А. П. Стахов, В. Я. Стейскал (СССР). – № 3860515; заявл. 10.12.1984; опубл. 23.05.1986, Бюл. № 11 – 5 с.

42. Boyacigiller Z. Increase analog system accuracy with a 14-bit monolithic ADC / Boyacigiller Z., Sockolov S. // EDN. – 1982. – August. – №18. – P. 137–144.

43. А. с. 1179533 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 3684369; заявл. 04.01.1984; опубл. 15.09.1985, Бюл. № 34 – 4 с.

44. А. с. 1223368 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 3774406; заявл. 01.08.1984; опубл. 07.04.1986, Бюл. № 13 – 8 с.

45. А. с. 1226664 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 3760223; заявл. 21.04.1984; опубл. 23.04.1986, Бюл. № 15 – 9 с.

46. А. с. 1288913 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Марценюк и др. (СССР). – № 3925661; заявл. 08.07.1985; опубл. 07.02.1987, Бюл. № 5 – 4 с.

47. А. с. 1288914 СССР, Н 03 М 1/26. Устройство аналого-цифрового преобразования / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 3927378; заявл. 08.07.1985; опубл. 07.02.1987, Бюл. № 5 – 12 с.

48. А. с. 1304172 СССР, Н 03 М 1/26. Способ аналого-цифрового преобразования / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 3941981; заявл. 08.07.1985; опубл. 15.04.1987, Бюл. № 14 – 3 с.

49. А. с. 1474824 СССР, Н 03 М. Устройство для аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования / А. Д. Азаров, В. П. Марценюк, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 4178341; заявл. 09.01.1987; опубл. 23.04.1989, Бюл. № 15 – 14 с.

50. А. с. 1513619 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 4257835; заявл. 07.05.1987; опубл. 07.10.1989, Бюл. № 37 – 7 с.

51. А. с. 1591182 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / Л. В. Крупельницкий, В. Я. Стейскал, А. Д. Азаров и др. (СССР). – № 4604001; заявл. 09.11.1988; опубл. 07.09.1990, Бюл. № 33 – 6 с.

52. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем / Сигорский В. П., Петренко А. И.. – К. : Техника, 1967. – 610 с.

53. А. с. 1381706 СССР, Н 03 М 1/42. Конвейерный аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, С. М. Арапов, А. Д. Азаров и др. (СССР). – № 4014504; заявл. 28.01.1986; опубл. 15.03.1988, Бюл. № 10 – 5 с.

54. А. с. 1495993 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 4260607; заявл. 15.06.1987; опубл. 23.07.1989, Бюл. № 27 – 7 с.

55. А. с. 1279064 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал др. (СССР). – № 3882939; заявл. 12.04.1985; опубл. 23.12.1986, Бюл. № 47 – 8 с.

56. Азаров А. Д. К вопросу об оценке надежности преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями / Азаров А. Д. // Методы построения алгоритмических моделей сложных систем. Выпуск 4. – Таганрог: ТРТИ, 1979. – С. 146–149.

57. Азаров А. Д. Преобразователи информации в кодах с иррациональными основаниями / Азаров А. Д., Крютченко Е. В., Моисеев В. И. – Серпухов, 1979. – 13 с. – (Препринт: ОЭА 17-184 / Ин-т физики высоких энергий).

58. Стахов А. П. О возможности создания надежных преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями / Стахов А. П., Азаров А. Д., Рубин А. Г. // Управляющие системы и машины. – 1980. – С. 49–53.

59. Патент 2498031 Франция, МКИ Н 03 К. Преобразователь р-кодов в аналоговую величину / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – 16 с.

60. Патент 1165889 Канада, МКИ Н 03 К. Преобразователь р-кодов в аналоговую величину / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – 16 с.

61. Патент 2090490 Англия, МКИ Н 03 К. Преобразователь р-кодов в аналоговую величину / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – 16 с.

62. А. с. № 758510 СССР, Н 03 К 13/02. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. А. Лужецкий (СССР). – № 2624305; заявл. 07.06.1978; опубл. 23.08.1980, Бюл. № 31 – 4 с.

63. А. с. № 947955 СССР, Н 03 К 13/02. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев (СССР). – № 2917810; заявл. 21.07.1980; опубл. 13.03.1982, Бюл. № 8 – 4 с.

64. А. с. 864548 СССР, Н 03 К 13/02. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 2853222; заявл. 17.12.1979; опубл. 14.05.1981, Бюл. № 34 – 4 с.



65. Азаров О. Д. Підвищення точності та швидкодії аналого-цифрових перетворювачів методами інформаційної надлишковості / Азаров О. Д., Захарченко С. М., Кравцов М. О. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №2. – С. 78–83.

66. Азаров О. Д. Розробка самокаліброваної системи цифрової реєстрації аналогової інформації / Азаров О. Д., Скрипник О. С., Шапошников О. В. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №2. – С. 73–78.

67. Азаров О. Д. Самокалібрування надлишкових АЦП з перерозподілом заряду / Азаров О. Д., Біліченко Н. О., Захарченко С. М. // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 1999. – Т. 2, № 1. – С. 67–74.

68. Азаров О. Д. Дослідження високопродуктивного аналого-цифрового перетворення на основі НПСЧ / Азаров О. Д., Шапошников О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 4. – С. 76–80.

69. Азаров О. Д. Самокалібровані аналого-цифрові перетворювачі на основі надлишкових позиційних систем числення / Азаров О. Д., Снігур А. В. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: збірник наукових праць. – Хмельницький: ТУП, 2002. – Т. 2. – С. 18–20.

70. Азаров О. Д. Системи цифрового оброблення аналогових сигналів на базі самокаліброваних АЦП / Азаров О. Д., Войтун О. Г. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: збірник наукових праць. – Хмельницький: ТУП, 2002. – Т. 2. – С. 21–23.

71. Азаров О. Д. Метод самокалібрування похибок порозрядних АЦП з ваговою надлишковістю / Азаров О. Д., Захарченко С. М., Архипчук О. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 6. – С. 5–8.

72. Мулявка Я. Схеми на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами: пер. с польск. / Мулявка Я. – М. : Мир, 1992.

73. Goodenough F. 'Dual 18-bit ADC chip grabs 20-kHz audio / Goodenough F. // Electronic Design. – 1989. – Vol. 14.

74. Naylor J. Zwei 18-bit-AD-Umsetzer auf einem chip / Naylor J., Metzger J. // Electronic Industrie. – 1989. – №9.

75. Mosley LD. Self-calibrating 16-bit A/D converter quarantees no missing codes to 50 kHz / Mosley LD. // EDN. – 1987. – Vol. 32, №2.

76. А. с. 1277396 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. Д. Азаров, А. П. Стахов, В. П. Волков (СССР). – № 3883962; заявл. 15.04.1985; опубл. 15.12.1986, Бюл. № 46 – 9 с.

77. А. с. 1197079 СССР, Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Волков и др. (СССР). – № 3745021; заявл. 18.04.1984; опубл. 07.12.1985, Бюл. № 45 – 14 с.

78. Азаров О. Д. Нові методи цифрового самокалібрування для АЦП з перерозподілом заряду / Азаров О. Д., Захарченко С. М., Біліченко Н. О. // 35 праць міжнародної науково-технічної конференції «Приборостроение-2000». – Вінниця-Симеіз, 2000. – С. 233–237.

79. Азаров О. Д. Підвищення точності швидкодіючих АЦП конвеєрного типу методом інформаційної надлишковості / Азаров О. Д., Шапошніков О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 5. – С. 68–73.

80. Азаров О. Д. Оптимізація надлишкових АЦП порозрядного врівноваження за реалізаційно-часовими витратами / Азаров О. Д., Ракитянська Г. Б. // Матеріали IV міжн. наук.- техн. конф. : Контроль і управління в технічних системах. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 1997. – Т. I.

81. Захарченко С. М. Розробка і дослідження конденсаторних АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.08 – обчислювальні машини, системи та мережі, елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування / Захарченко С. М. – Вінниця, 1997.

82. Біліченко Н. О. Високоточні аналого-цифрові перетворювачі з перерозподілом заряду на основі інформаційної надлишковості: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.08 –

обчислювальні машини, системи та мережі, елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування / Біліченко Н. О. – Вінниця, 2001. – 19 с.

83. Пешков А. П. Использование избыточного кодирования для компенсации динамической погрешности аналого-цифрового преобразователя / Пешков А. П., Твердохлеб А. И. // Автоматика и вычислительная техника: Респ. сб. Вып. 13. – Минск: Высшая школа, 1983. – С. 99–102.

84. Погосов А. Ю. Методы повышения быстродействия прецизионных интегральных АЦП поразрядного уравнивания / Погосов А. Ю., Полонников Д. Е. // Микроэлектроника. Вып. 5. – 1986. – Т. 15. – С. 431–433.

85. Повышение быстродействия БИС аналого-цифровых преобразователей последовательного приближения / Федорков Б. Г., Рябов Е. А., Сотский Д. В. и др. // Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов: тез. докл. науч. техн. конф. – Рига: ИЭВТ АН Латв. ССР, 1983. – Т. I. – С. 70–73.

86. Бохонко Б. А. Быстродействующий микроэлектронный аналого-цифровой преобразователь с цифровой коррекцией динамической погрешности / Бохонко Б. А. // Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов: тез. докл. науч. техн. конф. – Рига: ИЭВТ АН Латв. ССР, 1983. – Т. I. – С. 30–33.

87. Гребен А. Б. Проектирование аналоговых интегральных схем: пер. с англ. / Гребен А. Б. – М. : Энергия, 1976. – 256 с.

88. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре / Шило В. Л. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Сов. радио, 1979. – 368 с.

89. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. / Соклоф С. – М. : Мир, 1988. – 583 с.

90. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС: руководство по анализу и расчету: пер. с англ. / Гринфилд Дж. – М. : Мир, 1992. – 560 с.

91. Иванов В. Е Проектирование аналоговых систем на специализированных БИС / Иванов В. Е, Иванов В. В. – Л. : ЦНИИ РУМБ, 1988. – 140 с.

92. Разевиг В. Д. Применение программы P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / Разевиг В. Д. – В 4 выпусках. Вып. 4. Моделирование цифровых и смешанных устройств – М. : Радио и связь, 1992. – 71 с.

93. Азаров А. Д. Моделирование быстродействующих алгоритмов аналого-цифрового преобразования на основе избыточных систем счисления / Азаров А. Д. // Техн. конф. стран СНГ: Контроль и управление в технических системах: тез. докл. – Винница: Винницкий политехнический институт, 1982. – С. 148–149.

94. Азаров А. Д. Проектирование самокорректирующихся быстродействующих преобразователей информации на основе оптимальных избыточных систем счисления / Азаров А. Д. // Тез. докл. 7-го симпозиума: Проблемы создания преобразователей формы информации. – К., 1992. – С. 9–10.

95. Азаров А. Д. Высоколинейный АЦП для цифровой звукозаписи / Азаров А. Д., Стейскал В. Я., Коваленко Е. А. // XII Всесоюзн. конф. : Перспективы развития техники радиовещательного приема, радиовещания, звукоусиления и акустики. – Ленинград, 1988. – С. 134.

96. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления: учеб. пособие / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Марценюк и др. – К. : УМК ВО, 1988. – 180 с.

97. Анисимов Б. В. Основы теории и проектирования цифровых вычислительных машин / Анисимов Б. В., Четвериков В. Н. – М. : Машиностроение, 1965. – 486 с.

98. Азаров А. Д. Исследование принципов построения и разработка преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями: автореф. дис. на получение научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления / Азаров А. Д. – Харьков, 1980, – 24 с.

99. Азаров О. Д. Розробка теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.11.16 – інформаційно-вимірювальні системи / Азаров О. Д. – Вінниця, 1995, – 48 с.

100. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №29467. Моделювання процедури самокалібрування багаторозрядних АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. В. Дудник. – Опубл. 15.07.2009.

101. Островерхов В. В. Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей / Островерхов В. В. – Л. : Энергия, 1975. – 176 с.

102. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. – 13-е изд. – М. : Наука, 1986. – 544 с.

103. Аладьев В. З. Вычислительные задачи на персональном компьютере / Аладьев В. З., Гершгорн Н. А. – К. : Техника, 1991. – 245 с.

104. Азаров О. Д. Прискорене аналого-цифрове перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення / Азаров О. Д. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1993. – №1. – С. 22–27.

105. А. с. 1388985 СССР, Н 03 М 1/26. Способ аналого-цифрового преобразования / В. Я. Стейскал (СССР). – № 4113965; заявл. 05.09.1986; опубл. 15.04.1988, Бюл. № 14 – 7 с.

106. Щушков Е. К. Многоканальные аналого-цифровые преобразователи / Щушков Е. К., Цодиков М. Б. – Л. : Энергия, 1975. – 160 с.

107. Достал И. Операционные усилители: пер. с англ. / Достал И. – М. : Мир, 1982. – 512 с.

108. А. с. 1450098 СССР, Н 03 К 5/24, G 05 В 1/01. Входное устройство схемы сравнения токов / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко и др. (СССР). – № 4204509; заявл. 02.03.1987; опубл. 07.01.1989, Бюл. № 1 – 4 с.

109. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство: пер. с нем. / Титце У., Шенк К. – М. : Мир, 1982.

110. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В. С. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. – 255 с.

111. Азгальдов Г. Г. О квалиметрии / Азгальдов Г. Г., Райхман Э. И. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 17 с.

112. Аналого-цифровые преобразователи на основе избыточных систем счисления / Стахов А. П., Азаров А. Д., Моисеев В. И. и др. // Помехоустойчивые коды (Компьютер Фибоначчи). Сер. Радиоэлектроника и связь. – №9. – М. : Знание, 1989. – 64 с.

113. Высокоточный самокорректирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе кодов с иррациональными основаниями / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. – К. : ИК АН УССР, 1982. – 35 с.

114. Семнадцатиразрядный самокорректирующийся АЦП / Стахов А. П., Азаров А. Д., Моисеев В. И. и др. // Приборы и системы управления. – 1986. – №1. – С. 17–18.

115. Высокоточный АЦП, сопряженный с микроЭВМ / Стахов А. П., Марценюк В. П., Азаров А. Д. и др. // Управляющие системы и машины. – 1985. – №5. – С. 23–27.

116. А. с. 1200422 СССР, Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 3706544; заявл. 04.01.1984; опубл. 23.12.1985, Бюл. № 47 – 4 с.

117. А. с. 1216829 СССР, Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 3783033; заявл. 06.07.1984; опубл. 07.03.1986, Бюл. № 9 – 16 с.

118. А. с. 1138949 СССР, Н 03 М 1/66. Дифференциальный цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, В. П. Марценюк, А. Д. Азаров (СССР). – № 3653610; заявл. 24.10.1983; опубл. 07.05.1985, Бюл. № 5 – 5 с.

119. А. с. 1221754 СССР, Н 03. М 1/66. Устройство цифроаналогового преобразования / А. П. Стахов, В. И. Моисеев, А. Д. Азаров и др. (СССР). – № 3782904; заявл. 15.08.1984; опубл. 30.03.1986, Бюл. № 12 – 7 с.

120. А. с. 1221755 СССР, Н 03 М 1/66. Устройство цифроаналогового преобразования / А. П. Стахов, В. И. Моисеев, А. Д. Азаров и др. (СССР). – № 3785416; заявл. 24.08.1984; опубл. 30.03.1986, Бюл. № 12 – 8 с.

121. А. с. 1248072 СССР, Н 03 М 1/66. Устройство для цифроаналогового преобразования / А. П. Стахов, В. И. Моисеев, А. Д. Азаров и др. (СССР). – № 3788847; заявл. 11.09.1984; опубл. 30.07.1986, Бюл. № 28 – 8 с.

122. А. с. 1257847 СССР, Н 03 М 1/66. Устройство цифроаналогового преобразования / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Марценюк (СССР). – № 3806281; заявл. 29.10.1984; опубл. 15.09.1986, Бюл. № 34 – 4 с.

123. А. с. 1257848 СССР, Н 03 М 1/66. Устройство цифроаналогового преобразования / А. П. Стахов, В. И. Моисеев, А. Д. Азаров и др. (СССР). – № 3811432; заявл. 29.10.1984; опубл. 15.09.1986, Бюл. № 34 – 8 с.

124. А. с. 1312739 СССР, Н 03 М 1/66. Устройство цифроаналогового преобразования / А. Д. Азаров, Т. Н. Васильева, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 3954615; заявл. 19.19.1985; опубл. 23.05.1987, Бюл. № 19 – 5 с.

125. А. с. 1319280 СССР, Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 3925079; заявл. 08.07.1985; опубл. 23.06.1987, Бюл. № 23 – 10 с.

126. А. с. 1325704 СССР, Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. Д. Азаров, В. И. Моисеев, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 3990247; заявл. 16.12.1985; опубл. 23.07.1987, Бюл. № 27 – 3 с.

127. А. с. 1405117 СССР, Н 03 М 1/66. Устройство цифроаналогового преобразования / А. Д. Азаров, В. И. Моисеев, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 4115307; заявл. 16.06.1986; опубл. 23.06.1988, Бюл. № 23 – 7 с.

128. А. с. 1474824 СССР, Н 03 М 1/2. Устройство для аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования / А. Д. Азаров,

В. П. Марценюк, В. И. Моисеев и др. (СССР). – № 4178341; заявл. 09.01.1987; опубл. 23.04.1989, Бюл. № 15 – 14 с.

129. А. с. 1538254 СССР, Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 4178664; заявл. 12.01.1987; опубл. 23.01.1990, Бюл. № 3 – 5 с.

130. А. с. 1790030 СССР, Н 03 М 1/66. Цифроаналоговый преобразователь / А. Д. Азаров, Е. А. Коваленко, В. Я. Стейскал и др. (СССР). – № 4822528; заявл. 03.05.1990; опубл. 23.01.1993, Бюл. № 3 – 15 с.

131. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Баранов Л. А. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.

132. Сентурия С. Электронные схемы и их применение / Сентурия С., Уэдлок Б. – М. : Мир, 1977. – 434 с.

133. А. с. 1485309 СССР, G 11 С 27/00. Аналоговое запоминающее устройство / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, А. П. Голубев и др. (СССР). – № 4314608; заявл. 08.10.1987; опубл. 07.06.1989, Бюл. № 21 – 4 с.

134. А. с. 1552231 СССР, G 11 С 27/00. Аналоговое запоминающее устройство / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, А. П. Голубев и др. (СССР). – № 4465600; заявл. 26.07.1988; опубл. 23.03.1990, Бюл. № 11 – 4 с.

135. А. с. 1256147 СССР, Н 03 F 3/45. Источник тока / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Марценюк и др. (СССР). – № 3765619; заявл. 01.10.1984; опубл. 11.09.1986, Бюл. № 32 – 2 с.

136. А. с. 1397892 СССР, П 05 А 1/56. Источник постоянного тока / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Волков и др. (СССР). – № 4084627; заявл. 24.04.1986; опубл. 14.05.1988, Бюл. № 19 – 4 с.

137. А. с. 1534440 СССР, G 05, F 1/55. Стабилизатор постоянного тока / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Волков и др. (СССР). – № 4144615; заявл. 29.10.1987; опубл. 23.12.1989, Бюл. № 33 – 3 с.



Наукове видання

**Азаров Олексій Дмитрович**

**АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПОРОЗРЯДНЕ  
ПЕРЕТВОРЕННЯ  
НА ОСНОВІ СИСТЕМ ЧИСЛЕННЯ  
З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено автором

Підписано до друку 8.04.2010 р.  
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 13,4  
Наклад 100 прим. Зам № 2010-057

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.