

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ТОЧНОСТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОКАЛБРОВАНИХ АЦП

Азаров О.Д., Архипчук О.А.

Вінницький національний технічний університет,
кафедра обчислювальної техніки

E-mail: azarov@lili.vstu.vinnica.ua, arhip@svitonline.com

Abstract

Azarov O.D., Arkhipchuk O.A. Parametric syntheses of the self-calibration AD convertors error parameters. The dependence of the AD conversion error from the self-calibration parameters using weight redundancy, namely division for "accurate" and "non-accurate" bits, base of the number system and maximum deviation of the bit weights, is analyzed in the article. The analytical dependences allowing to determine optimal parameters of self-calibration procedure are derived. Graphical results of self-calibration and AD conversion modeling are also presented.

На сучасному етапі розвитку техніки перетворення інформації основними вимогами, що висуваються до аналого-цифрових перетворювачів є високі точність або швидкодія, стабільність метрологічних характеристик, як під час змінювання умов навколишнього середовища (температури, тиску), так і в часі, тощо. Найбільш розповсюдженими принципами вирішення цих проблем є покращення технології та уведення надлишковості: структурної, алгоритмічної, інформаційної [1, 2]. Під час використання структурної надлишковості у пристрій вводяться додаткові аналогові та цифрові вузли. При цьому в ряді випадків додаткові аналогові вузли та блоки повинні мати досить високі метрологічні характеристики, що передбачає використання дороговартісної елементної бази. До того ж це досить часто призводить до ускладнення алгоритмів та зменшення швидкості перетворення. Можливості технологій також мають свої фундаментальні обмеження.

Іншим перспективним напрямком покращення метрологічних характеристик АЦП є використання інформаційної надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [3, 4], в яких вага кожного наступного розряду завжди менше суми ваг молодших розрядів:

$$Q_i < \sum_{j=0}^{i-1} Q_j, \quad (1)$$

де Q_i - вага i -го розряду, i - номер розряду.

Вагова надлишковість проявляється в наявності ненульової додатної різниці між сумою ваг молодших розрядів і поточним i -м розрядом:

$$\sum_{j=0}^{i-1} Q_j - Q_i > 0. \quad (2)$$

Для двійкових систем числення ця різниця завжди менше нуля.

В основу підвищення точності порозрядних АЦП, побудованих на низькоточних аналогових вузлах, покладено принцип визначення реальних ваг розрядів, що базується на використанні математичних співвідношень між вагами розрядів НПСЧ, і не вимагає використання взірцевих мір та приладів. Причому функціонування пристрою при цьому передбачає два режими: самокалібрування та основного перетворення. В режимі самокалібрування відбувається визначення кодів (цифрових еквівалентів) реальних ваг

$K(Q_i)$ розрядів перетворювача, зсуву нуля $K(\Delta A_0)$, а для вимірювальних АЦП - і масштабного коефіцієнта $K(M)$. Як взірець при цьому використовується рекурентні співвідношення, наприклад, $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2}$, $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} + Q_{i-3}$ і тому подібне [5]. Невиконання цих співвідношень свідчить про наявність відхилень ваг розрядів від ідеальних значень. Причому застосування спеціальних процедур (самокалібрування) із урахуванням цих співвідношень дає можливість отримати інформацію про значення цих відхилень [3].

Метою статті є аналіз ефективності процедури самокалібрування ваг розрядів з використанням вагової надлишковості та вибір параметрів процедури самокалібрування, що дозволяють отримати мінімальну похибку АЦ перетворення.

Основним критерієм оцінювання ефективності процедури самокалібрування є кінцева похибка АЦ перетворення. Причому ця похибка буде функцією, яка залежить від багатьох чинників:

$$\xi = f(\alpha, \delta Q, n, k). \quad (3)$$

Розглянемо детальніше як виникає похибка, пов'язана з наявністю первинних похибок елементів, що викликає відхилення ваг розрядів. Оскільки реальна вага розряду Q_i

відрізняється від ідеальної Q_i' , то при включенні розряду отримуємо абсолютну похибку $\Delta Q_i = Q_i - Q_i'$. Оскільки $\Delta Q_i = \delta Q_i \cdot Q_i'$, де δQ_i - відносна похибка, а $Q_i' = \alpha^i \cdot Q_0$ то похибка пов'язана з включенням i -го розряду дорівнюватиме:

$$\Delta Q_i = \delta Q_i \cdot \alpha^i \cdot Q_0. \quad (4)$$

Під час врівноваження похибки включених розрядів підсумовуються в результаті чого отримаємо:

$$\xi' = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot \delta Q_i \cdot \alpha^i \cdot Q_0, \quad (5)$$

де a_i розрядні коефіцієнти з множини $\{0,1\}$ вихідного коду.

Під час самокалібрування визначаються дійсні ваги розрядів, але жодне самокалібрування не може повністю усунути похибку. Тому під час врівноваження за допомогою відкаліброваних розрядів також виникає похибка:

$$\xi'' = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot \xi_i, \quad (6)$$

де ξ_i похибка визначення дійсної ваги розряду після закінчення процедури самокалібрування.

Окрім похибок, що пов'язані з відхиленням ваг розрядів, існує ще похибка квантування $\xi_{кв}$, усунути яку неможливо. Вона має рівномірний закон розподілу з діапазоном $0 \div 1кв$. Усунути цю похибку неможливо, але можна зменшити, віднявши $0.5кв$ від результату врівноваження.[6]

Оскільки, як для методів самокалібрування „знизу-догори”, так і для „згори-донизу” розрядна сітка розбивається на k „точних” та $n - k$ „неточних” розряди [5], то кінцева похибка АЦ врівноваження буде складатися з похибки квантування та похибок

некаліброваних та каліброваних розрядів, тобто:

$$\xi = \xi_{\text{кв}} + \xi' + \xi'' = \xi_{\text{кв}} + \sum_{i=0}^{k-1} a_i \cdot \delta Q_i \cdot \alpha^i \cdot Q_0 + \sum_{i=k}^{n-1} a_i \cdot \xi_i, \quad (7)$$

Якщо під час самокалібрування було усунуто похибку масштабу та зміщення нуля, то ξ_i буде похибкою лінійності. Особливістю похибки лінійності є те, що похибки будуть мати різні знаки и в сумі дорівнювати нулю. Тому найбільша похибка матиме місце, коли включити всі розряди, похибки яких мають однаковий знак.

Проаналізувавши рівняння (7) можна стверджувати, що похибка АЦ перетворення буде залежати від вихідного коду, який в свою чергу залежить від рівня вхідного аналогового сигналу $A_{\text{вх}}$. Щоб отримати повну уяву про похибку перетворення в АЦП, необхідно послідовно виміряти її на всьому діапазоні значень вхідного сигналу. Для цього скористаємося моделюванням процесу АЦ врівноваження за допомогою ЕОМ, яке показує залежність рівня похибки АЦ перетворення від рівня вхідного сигналу для конкретного АЦП рис. 1. Зазначимо, що в кожного конкретного АЦП ця залежність буде мати свій вигляд.

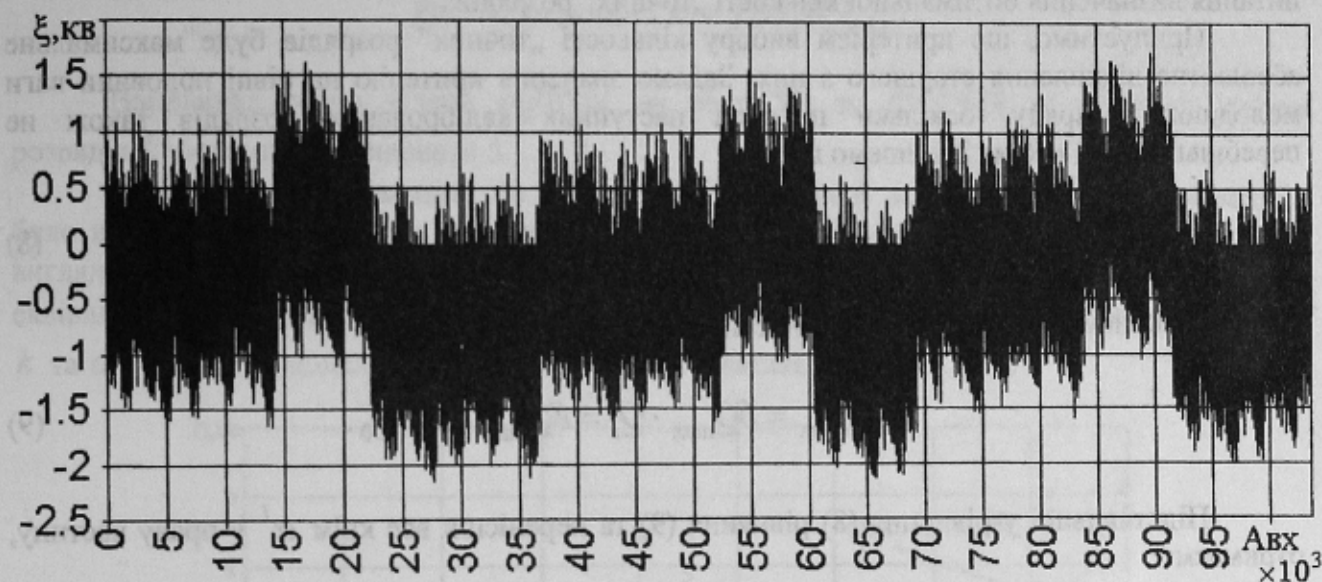


Рис. 1 Залежність похибки $\xi = f(A_{\text{вх}})$ АЦ перетворення від рівня вхідного сигналу.

З рис.1 видно, що похибка АЦ перетворення має імовірнісний характер, тому для оцінки ефективності тої чи іншої процедури самокалібрування пропонується використовувати статистичні характеристики: закон розподілу, математичне сподівання M та середньо квадратичне відхилення σ . Для визначення цих характеристик скористаємось гістограмами розподілу похибок АЦ перетворення, що отримані за допомогою моделювання на ЕОМ. Похибки беруться для всього діапазону перетворення (від 0 до A_{max}), при цьому обчислюється математичне сподівання M та середньо квадратичне відхилення σ . Приклад гістограми наведено на рис.2.

З рис. 2 видно, що розподіл похибок має вигляд нормального. Пояснюється це тим, що на значення похибки впливають багато незалежних чинників, а згідно з теорією імовірності відомо, що така випадкова величина має нормальний розподіл. Враховуючи, що математичне сподівання M можна ввести як поправку в результат врівноваження, то оцінювати похибку доцільно по величині середньо квадратичного відхилення σ .

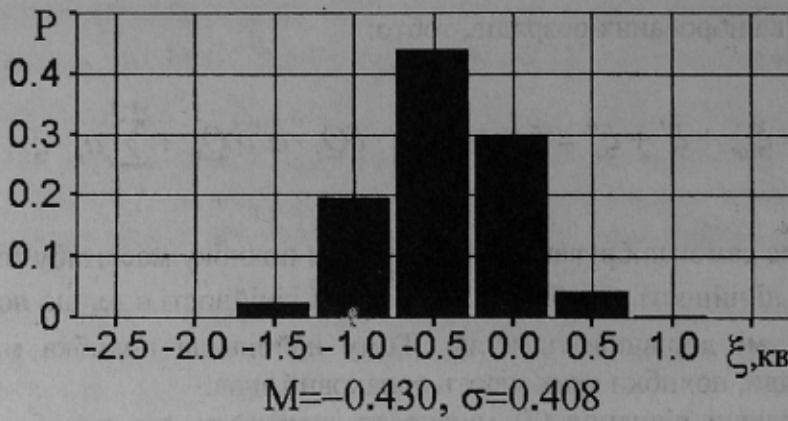


Рис. 2 Приклад гістограми розподілу похибок АЦ перетворення.

З рівняння (7) видно, що один з чинників, що впливає на значення похибки, це є кількість „точних” розрядів k . При збільшені k збільшується похибка, що вноситься „точними” розрядами, але зменшується похибка, що вноситься розрядами, що калібруються, і навпаки. До того ж кількість „точних” розрядів впливає на час калібрування. Тому постає питання визначення оптимальної кількості „точних” розрядів.

Припустимо, що критерієм вибору кількості „точних” розрядів буде максимальне абсолютне відхилення старшого з них. Задамо значення критерію на рівні половини ваги молодшого розряду, оскільки похибка наступних каліброваних розрядів також не перебільшує цей рубіж. Запишемо це:

$$\Delta Q_{i \max} \leq 0.5 \cdot Q_0. \tag{8}$$

Розкриємо ліву частину нерівності:

$$\Delta Q_{i \max} = \delta Q_{\max} \cdot Q_i = \delta Q_{\max} \cdot \alpha^i \cdot Q_0. \tag{9}$$

Підставивши у рівняння (8) рівняння (9) та перенісши все крім α^i у праву частину, отримаємо:

$$\alpha^i \leq \frac{1}{2 \cdot \delta Q_{\max}}. \tag{10}$$

Щоб отримати номер старшого „точного” розряду візьмемо логарифм по α від обох частин нерівності. Оскільки i це ціле число, то округлимо результат в меншу сторону до найближчого цілого:

$$i = \left\lfloor \log_{\alpha} \frac{1}{2 \cdot \delta Q_{\max}} \right\rfloor. \tag{11}$$

Оскільки нумерація розрядів починається з нуля, додамо одиницю, щоб отримати кількість „точних” розрядів.:

$$k = \left\lfloor \log_{\alpha} \frac{1}{2 \cdot \delta Q_{\max}} + 1 \right\rfloor. \tag{12}$$

Для зручності аналізу k на рис.3 наведено графічне зображення залежності $k = f(\alpha, \delta Q_{\max})$.

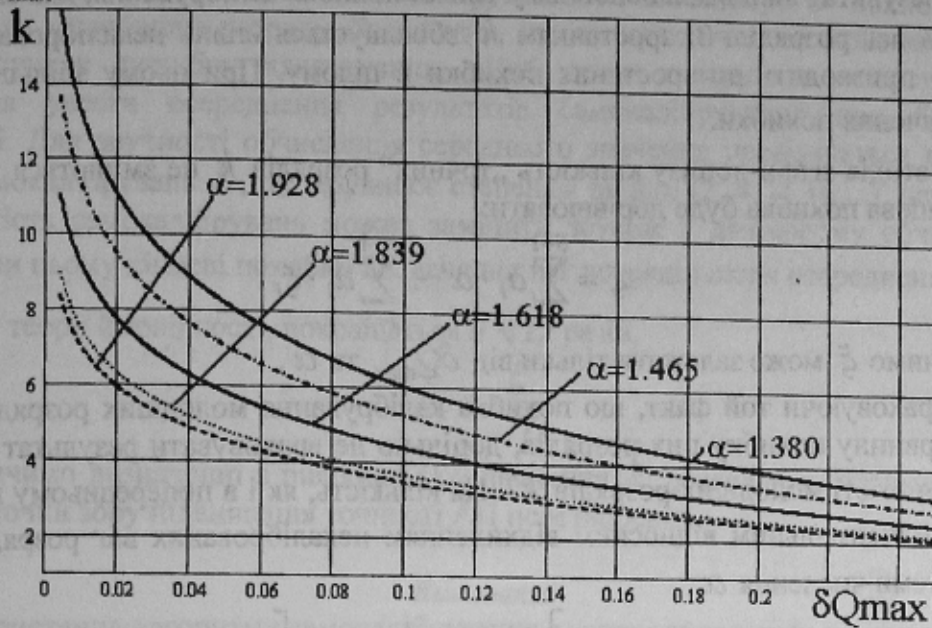


Рис. 3 Залежність $k = f(\alpha, \delta Q_{\max})$.

Наприклад, якщо задана δQ_{\max} на рівні 5% та $\alpha = 1,618$ то кількість точних розрядів k повинна дорівнювати 5.

Для аналізу припущення, що оптимальне значення k визначається по формулі (12), було виконано моделювання за допомогою ЕОМ для накопичення статистичних даних у вигляді середньо квадратичного відхилення σ похибки врівноваження. Кількість розрядів n еквівалентна 20 двійковим, кількість варіантів АЦП - 500, змінюються параметри δQ_{\max} , k та α . Результат моделювання при $\alpha = 1.618$ наведено на рис.4.

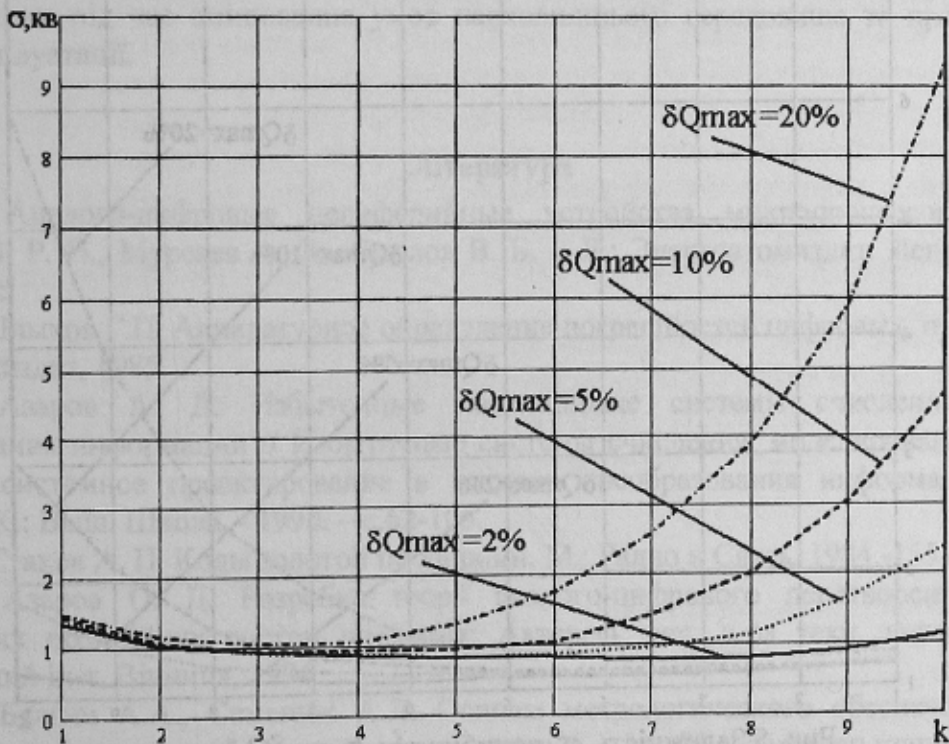


Рис. 4 Залежність σ похибки від k та δQ_{\max} при $\alpha = 1.618$.

Як бачимо з рис.4 при малому значенні k похибка слабо залежить від δQ_{\max} , оскільки на результат впливає в основному тільки похибка калібрування, яка слабо залежить від відхилень ваг розрядів. Зі зростанням k збільшується вплив некаліброваних „точних” розрядів, що призводить до зростання похибки в цілому. При цьому збільшується вплив δQ_{\max} на значення похибки.

Для методів згори-донизу кількість „точних” розрядів k не змінюється і дорівнює s , тому з (7) кінцева похибка буде дорівнювати:

$$\xi = \sum_0^{s-1} a_i \cdot \alpha^i + \sum_{i=s}^{n-1} a_i \cdot \xi_i. \quad (13)$$

Як бачимо ξ може залежати тільки від δQ_{\max} та α .

Але враховуючи той факт, що похибка калібрування молодших розрядів може бути більша за первинну похибку цих розрядів, доцільно не враховувати результат калібрування для певної кількості молодших розрядів k' . Ця кількість, як і в попередньому випадку, буде визначатися максимальним відносним відхиленням некаліброваних ваг розрядів δQ_{\max} та основою системи числення α :

$$k' = \left\lceil \log_a \frac{1}{2 \cdot \delta Q_{\max}} + 1 \right\rceil. \quad (14)$$

Для знаходження k' зручніше користуватись, графічним представленням. Оскільки аналітичний вираз k' співпадає з k , відповідно графік залежності $k' = f(\alpha, \delta Q_{\max})$ буде ідентичний рис. 3.

Для аналізу було виконано моделювання за допомогою ЕОМ для накопичення статистичних даних у вигляді середньо квадратичного відхилення σ похибки врівноваження. Кількість розрядів n еквівалентна 20 двійковим, кількість варіантів АЦП - 500, змінюються параметри δQ_{\max} , k та α . Результат наведено на рис.5.

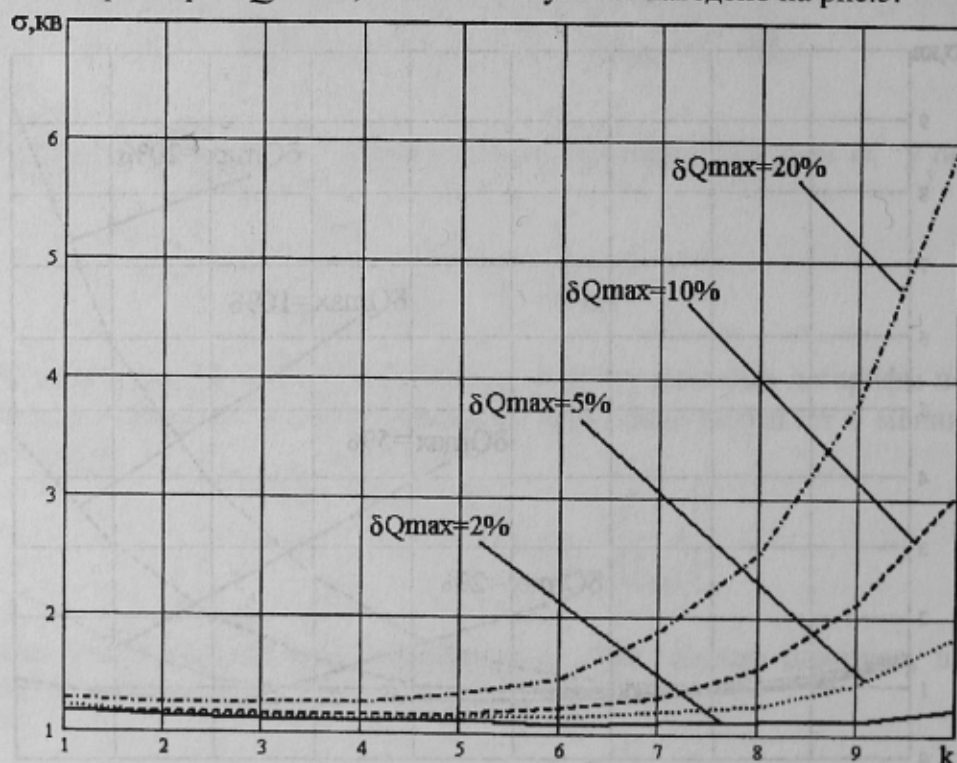


Рис. 5 Залежність σ похибки від k та δQ_{\max} при $\alpha = 1.618$ для метода „згори-донизу”.

Проаналізувавши рис.5 бачимо, що при великій кількості розрядів, навіть при використанні оптимальних значень k , калібрування не забезпечує σ похибки менше ніж половина ваги молодшого розряду. Зазначимо, що це практично не можливо, оскільки не можливо усунути похибку квантування. Щоб дещо покращити показники точності пропонується увести осереднення результатів самокалібрування при багатократному калібруванні. Для зручності обчислення середнього значення пропонується встановлювати кількість самокалібрувань L , що дорівнює степеням двійки (2, 4, 8, 16 ...), оскільки ділення на цю кількість самокалібрувань можна замінити зсувом у двійковому обчислювальному пристрої. При цьому кінцеві похибки визначення ваг розрядів після осереднення ξ_c , згідно з положенням теорії ймовірності, покращаться в \sqrt{L} разів.

$$\xi_c = \frac{\xi}{\sqrt{L}}$$

Як бачимо визначенні з рівняння (12) значення k дозволяють отримати найкращий результат з точки зору підвищення точності АЦ перетворення.

Висновки:

Використання алгоритму самокалібрування з запропонованими параметрами дозволяє отримати найкращі можливі результати для процедур самокалібрування з використанням вагової надлишковості.

Моделювання за допомогою ЕОМ підтвердило ефективність процедур самокалібрування з використанням вагової надлишковості.

В свою чергу використання процедур самокалібрування з ваговою надлишковістю дозволяє:

- використовувати низькоточну елементну базу;
- спростити технологію виготовлення;
- знизити вартість;
- за рахунок періодичного проведення самокалібрування стабілізувати метрологічні характеристики під час змінювання умов навколишнього середовища та протягом всього терміну експлуатації.

Література

1. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Смоллов В. Б. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989, - 160 с.
2. Шлыков Г.П. Аппаратурное определение погрешностей цифровых приборов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Азаров А. Д. Избыточные позиционные системы счисления в технике преобразования информации // Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации. Учебное пособие. – К.: Выш. Школа. - 1990. – с.62-105.
4. Стахов А. П. Коды золотой пропорции. М.: Радио и Связь, 1984.-155 с.
5. Азаров О. Д. Розробка теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: Автореф. дис. д-ра техн. наук: Вінницький політехнічний ін-т. Вінниця, 1994.
6. Брагин А.А., Семенюк А.Л. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 165 с.