

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**О. Д. Азаров, О. Я. Стахов, М. Р. Обертюх**

**ВИСОКОПРОДУКТИВНІ АЦП  
КОМБІНОВАНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ  
ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2023

УДК 621.3  
А35

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 29 листопада 2022 року)

Рецензенти:

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

**А. Я. Кулик**, доктор технічних наук, професор

**Азаров, О. Д.**

А35 Високопродуктивні АЦП комбінованого врівноваження із ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, О. Я. Стахов, М. Р. Обертюх. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 130 с.

ISBN 978-966-641-920-3

Побудова багаторозрядних швидкодіючих АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю є складною задачею. Великі можливості покращення динамічних характеристик перетворювачів відкриваються поєднанням методів порозрядного кодування і безпосереднього зчитування. Побудова таких високопродуктивних комбінованих перетворювачів є надзвичайно важливою для створення ефективних багато-розрядних швидкодіючих АЦ-систем, що і зумовлює актуальність наукових досліджень, виконаних у цій роботі.

УДК 621.3

**ISBN 978-966-641-920-3**

© О. Д. Азаров, О. Я. Стахов, М. Р. Обертюх, 2023

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ .....	9
1.1 Огляд існуючих методів підвищення швидкодії багаторозрядних АЦП із застосуванням інформаційної та структурної надлишковості .....	9
1.2 Методи підвищення точності засобів слідкувального АЦ перетворення з ваговою надлишковістю .....	15
1.3 Методи побудови аналого-цифрових перетворювачів комбінованого врівноваження .....	24
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ПОБУДОВИ І ЗАСОБИ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ПОРОЗРЯДНО-СЛІДКУВАЛЬНОГО АЦ-ПЕРЕТВОРЕННЯ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ .....	41
2.1 Метод побудови високопродуктивного порозрядно- слідкувального АЦП із ваговою надлишковістю. ....	41
2.2 Вибір базової системи числення для АЦП та ЦАП із ваговою надлишковістю. ....	48
2.3 Моделі АЧХ і ФЧХ широкосмугових двотактних підсилювачів постійного струму для високопродуктивних АЦП .....	59
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ СХЕМНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИСОКОЛІНІЙНИХ АНАЛОГОВИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АЦ І ЦА- СИСТЕМ НА БАЗІ ДВОТАКТНИХ СТРУКТУР .....	66
3.1 Методи схемної організації високолінійних буферних пристроїв на базі двотактних структур.....	66
3.2 Методи побудови високолінійних двотактних буферних пристроїв напруги з параметричною компенсацією зсуву нуля.....	74
3.3 Методи функціональної організації багатоканальної швидкодійної АЦ-ЦА-системи на базі високолінійних перетворювачів струм-струм .....	80

РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЄКТУВАННЯ АНАЛОГОВИХ ВУЗЛІВ ДЛЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ПОРОЗРЯДНО - СЛІДКУВАЛЬНИХ АЦП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ ТА АЦ-СИСТЕМ.....	93
4.1 Система цифрової реєстрації аналогових сигналів із підвищеною стабільністю метрологічних характеристик .....	93
4.2 Високошвидкісний буферний пристрій на базі двотактного підсилювача струму .....	104
4.3 Двотактний підсилювач постійного струму з низьким температурним дрейфом на базі перетворювачів струм-струм .....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АК – аналоговий комутатор
- АЦ – аналого-цифровий
- АЦЗ – апарат цифрового запису
- АЦМЗ – апарат цифрового магнітного запису
- БАН – блок автокоригування нуля
- БК – блок керування
- БН – буфер напруги
- БНЗ – блок напруг зміщення
- БПВ–ЦАП – блок порозрядного врівноваження та цифро-аналогового перетворювання
- ВДК – вхідний двотактний каскад
- ВС – відбивач струму
- ДВК – двотактний вихідний каскад
- ДВС – двонаправлений відбивач струму
- ДЗС – джерело зарядного струму
- ДППС – двотактний підсилювач постійного струму
- ЗЗ – зворотний зв'язок
- ІВС – інформаційно-вимірювальна система
- К – комутатор
- КЛ – ключовий елемент
- КГС – керований генератор струму
- КЗЗ – канал зворотного зв'язку
- КНС – коефіцієнт нелінійних спотворень
- КС – компенсатор струму
- ОП – операційний підсилювач
- ПВЗ – пристрій вибірки зберігання
- ПКН – перетворювач код-напруга
- ПКС – перетворювач код-струм

ПНН – перетворювач напруга-напруга

ПНС – перетворювач напруга-струм

ППК – проміжний підсилювальний каскад

ППС – підсилювач постійного струму

ПСН – перетворювач струм-напруга

ПСС – перетворювач струм-струм

ПФІ – перетворювач форми інформації

ПФР – підсилювач-фазорозщеплювач

РПН – реєстр послідовного наближення

СК – струмовий конвеєр

СЦОП – спеціалізований цифровий обчислювальний пристрій

СЦР – система цифрової реєстрації

СЧ – системи числення

СЧВН – системи числення з ваговою надлишковістю

ТДОН – термостатоване джерело опорної напруги

ТДОС – термостатоване джерело опорного струму

ХП – характеристика перетворення

## ВСТУП

Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі утворюють групу перетворювачів форми інформації, які набули широкого поширення в різних галузях людської діяльності. Базовими параметрами, що характеризують продуктивність ПФІ, є число розрядів та кількість перетворень за секунду. З цієї точки зору найвищу продуктивність має АЦП зчитування, оскільки в ньому весь діапазон вхідного сигналу ( $n$ -розрядів) перетворюється на код всього за один такт. Таким чином, цей АЦП має найвищу швидкодію і, відповідно, мінімальний час перетворення. Водночас, спроба збільшити кількість розрядів при такому методі перетворення призводить до різкого зростання кількості обладнання і споживаної потужності. Варто зазначити, що досить поширеним у техніці перетворення форми інформації є АЦП порозрядного врівноваження. Проте, він дозволяє отримати результат кодування за  $n$ -тактів і тому істотно поступається АЦП зчитування.

Оцінювання продуктивності ПФІ є нестандартною задачею. Методи оцінювання залежать від засобу та способу використання, під який проводиться вибір ПФІ. Вирішенням питання підвищення продуктивності та швидкодії перетворювачів форми інформації займалися наукові школи О. Д. Азарова [1–7], А. І. Кондалєва [8–11], П. П. Орнатського [12, 13], Б. Й. Швецького [14]. Варто відзначити, що покращенням метрологічних характеристик ПФІ, а також систем, до яких вони входять, займалися Ю. М. Туз [15], Є. Т. Володарський [16–18]. Загальні принципи побудови та покращення характеристик АЦП досліджували В. Б. Смолів, Е. І. Гітис [19–21] та ін. Крім того, питаннями покращення характеристик порозрядних АЦП займалися відомі закордонні науковці, зокрема: F. Goodenough, W. Kester, Z. Boyacioglu, S. Soclof, M. Rizenman, J. Brubaker, Rudy J. van de Plassche, Hans J. Schouwenaars, S. Tan, D. L. Watson, S. Sehat, P. R. Gray, Jiangpeng Wang, Wing-Shan Tam, Chi-Wah Kok, Kong-Pang Pun, A. B. Grebene, M. Hesener, T. Eichler, A. Hanneberg, D. Herbison, F. Kuttner, H. Wenske, T. Ogawa, H. Kobayashi, M. Hotta, Y. Takahashi, H. San, N. Takai, T. Sundström, L. Ricci [22–39].

В останні десятиліття з'явився інтерес до АЦП із ваговою надлишковістю, що, порівняно з АЦП загального призначення, мають додаткові апаратні витрати на побудову ЦАП, схеми порівняння, блока керування та перетворювача кодів, проте спрощується схема для самокалібрування.

Варто зазначити, що побудова багаторозрядних (12–18 двійкових розрядів) швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю є досить складною задачею. Це пов'язано з тим, що вага молодшого розряду такого АЦП повинна бути досить малою. До того ж, значний вплив на їх роботу мають динамічні похибки першого та другого роду, а також шуми [1–7].

Великі можливості покращення динамічних характеристик перетворювачів відкриваються при поєднанні методів порозрядного кодування і безпосереднього зчитування [1]. Причому, як правило, цифри перших розрядів вихідної величини визначаються способом безпосереднього зчитування, а цифри останніх розрядів – способом порозрядного кодування. Пояснюється це тим, що перетворювач із безпосереднім зчитуванням, який містить велику кількість компараторів, будується простіше для сигналів великих рівнів, які мають місце в перших тактах кодування. Спосіб порозрядного перетворення забезпечує потрібні характеристики і досить просто реалізується у пристроях із різними класами точності і діапазонами зміни вхідної величини. Тому він забезпечує прості рішення, правда, за рахунок подовження часу перетворення при визначенні кодів останніх розрядів, коли застосування способу безпосереднього зчитування призвело б до значного ускладнення схеми через необхідність застосування високочутливих і стабільних компараторів.

Побудова таких високопродуктивних комбінованих перетворювачів є надзвичайно важливою для створення ефективних багаторозрядних швидкодіючих АЦ-систем, разом із тим, вона є мало вивченою та в інформаційних джерелах висвітлена слабко, що і зумовлює актуальність наукових досліджень, виконаних у цій роботі.



## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БАГАТОРОЗРЯДНИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

#### 1.1 Огляд існуючих методів підвищення швидкодії багаторозрядних АЦП із застосуванням інформаційної та структурної надлишковості

Підвищення продуктивності багаторозрядних аналого-цифрових перетворювачів забезпечується комплексним підходом у напрямках зростання як швидкодії, так і точності.

Залежно від потрібної швидкодії і точності використовуються різні підходи щодо побудови СП. Проблема досягнення високої точності аналого-цифрового перетворення з приведеною відносною похибкою не більше 0,05% і роздільністю не менше 12 розрядів успішно вирішується для АЦП інтегруючого типу. Проте недоліком таких пристроїв традиційно є низька частота відліків ( $f_{\text{відл}}$ ), що, як правило, не перевищує десятки і сотні Гц [30]. Для одержання більш високої швидкості перетворення використовуються АЦП порозрядного врівноваження і паралельно-послідовні АЦП. При цьому перші мають середню ( $f_{\text{відл}} = 10^0 - 10^2$  кГц), а другі – високу швидкодію ( $f_{\text{відл}} = 10^1 - 10^4$  кГц). Зі збільшенням швидкодії виникає проблема збереження низького рівня похибок зазначених пристроїв. Причому необхідно відзначити, що на шляху досягнення високої точності за рахунок удосконалювання характеристик елементної бази стоять фундаментальні обмеження, зумовлені як можливостями технології виготовлення, так і властивостями застосовуваних матеріалів. Притаманні перетворювачам інформації середньої і високої швидкодії відхилення ваг розрядів від потрібних значень часто-густо коригуються в процесі виробництва шляхом лазерного припасування номіналів резисторів або конденсаторів ЦАП паралельної дії, які є складовою частиною цих АЦП. При цьому потрібне збільшення площі внутрікристалльних компонентів і кристала в цілому, а

також виникає проблема видалення матеріалів кристала в ході припасування. Ці процеси порушують структуру матеріалів компонентів і зменшують не тільки тимчасову стабільність елементів, наприклад, резисторів, але і температурну стабільність усієї схеми [28]. Зазначений підхід створює серйозні труднощі одержання точності, що відповідає більш, ніж 12-бітній роздільності [31].

У більшості випадків традиційне поліпшення одного показника, наприклад, точності, призводило до погіршення швидкодії. Зменшення кількості обладнання, спрощення пристрою погіршувало точність або швидкодію і т. п. Водночас уведення в розроблювані пристрої надлишковості у вигляді НПСЧ дозволяє в певній мірі вирішувати проблеми комплексного удосконалювання одночасно декількох характеристик аналого-цифрового перетворення. Такий підхід дає можливість при подовженні розрядної сітки пристрою (це призводить, зокрема, до збільшення кількості тактів при порозрядному врівноважуванні) з одного боку, підвищувати точність АЦП середньої і високої швидкодії, реалізованих на грубих аналогових вузлах, а з іншого боку, підвищувати швидкодію високоточних АЦП, що використовують аналогову елементну базу середньої швидкодії.

Підвищення швидкодії багаторозрядних АЦП досягається двома шляхами. Перший орієнтується на використання більш досконалої елементної бази. Другий шлях пов'язано з уведенням у проєктовані пристрої надлишковості. Причому «найстарішим» підходом у цьому напрямку є використання структурної надлишковості. Суть його насамперед відображається паралельно-послідовним принципом перетворення. Структурну схему двоступеневого паралельно-послідовного АЦП зображено на рис. 1.1 а). Тут: АЦП1 – перетворювач аналог-код з розрядністю  $n'$ ; АЦП2 – із розрядністю  $n''$ ; ЦАП – високоточний перетворювач із розрядністю  $n'$ ; ДП – диференціальний підсилювач різниці  $\Delta A = A_{\text{вх}} - A_{\text{к}}$ ; СМ – суматор; БК – блок керування, що забезпечує функціонування пристрою. Принцип дії АЦП є таким.

Вхідний сигнал  $A_{\text{вх}}$  на першому такті перетворюється в код А в АЦП1 (першого ступеня). Різниця сигналів  $\Delta A$  на другому такті підсилюється ДП і надходить на вхід АЦП2 (другого ступеня), на виході якого формується код В. Коди А та В подаються на вхід СМ, на виході якого з'являється сума  $C := A + V$ . У такий спосіб результат перетворення  $A_{\text{вх}}$ , формується за два такти у вигляді коду С як сума кодів А (старші розряди) і В (молодші розряди).

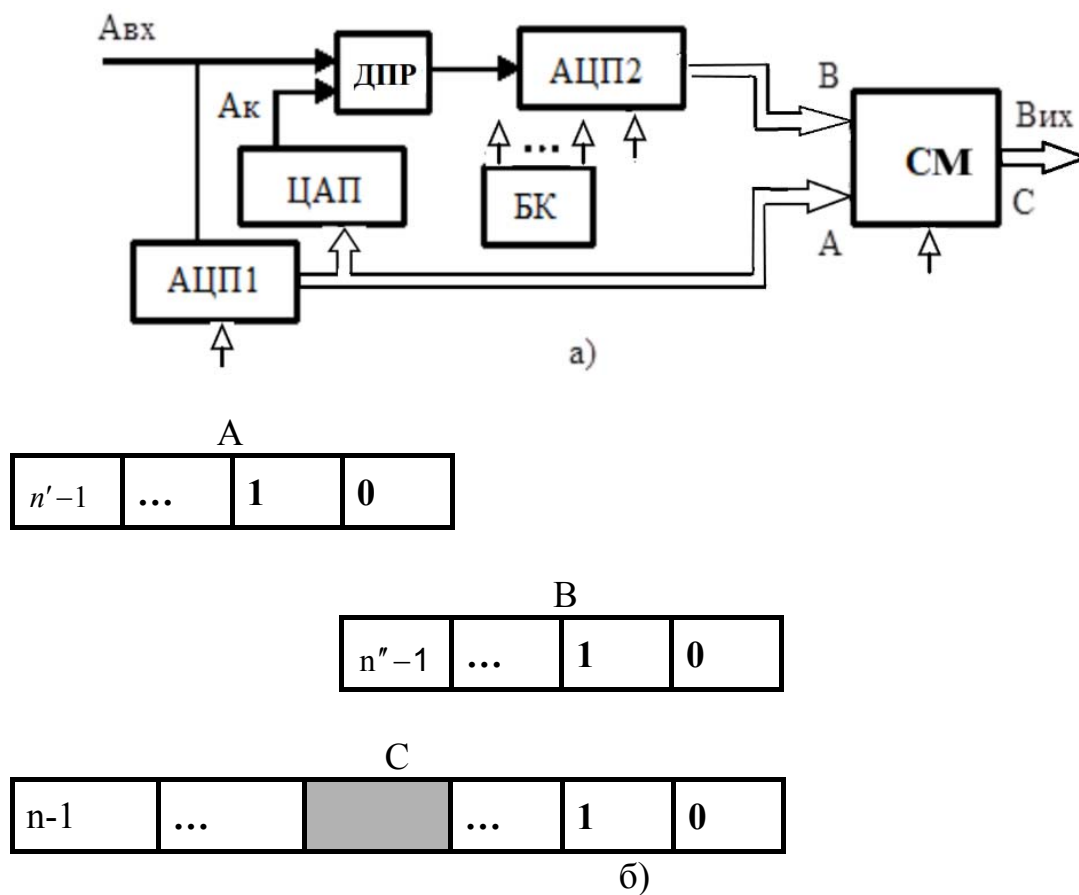


Рисунок 1.1 – Двоступінчастий паралельно-последовний АЦП:  
а) структурна схема; б) метод формування результату

Варто відзначити, що безпосереднім стикуванням вихідних кодів не можна одержати точність, що відповідає  $n=n'+n''$ -розрядам. Це пов'язано з тим, що  $\Delta A$  складається не тільки із залишку неврайонованої частини  $A_{вх}$ , але і похибки, що виникають через неідеальність АЦП1 і ДП. Тому для формування правильного результату (рис. 1.1, б) застосовується метод перекриття шкал [27, 32]. Для корекції ЦАП, статична похибка якого повинна відповідати  $n$ -розрядному перетворенню, може застосовуватися допоміжний ЦАП і ПЗП з таблицею поправок, а також ОЗП і мікропроцесор [33]. Паралельно-последовний принцип використовується при 12-14 розрядному аналого-цифровому кодуванні з частотою відліків 1-20 мГц. Недолік його полягає в ускладненні схеми аналогової частини, значних апаратних витратах, високому енергоспоживанні і низькій завадостійкості. Певним компромісом у цьому плані можуть служити структури паралельно-последовних АЦП із числом ступенів врівноваження більше двох, розроблених у науковій школі професора О. Д. Азарова [1, 6]. У середині 80-х років широко почав застосовуватися метод перетворення, заснований на введенні інформаційної надлишковості і відомий як сігма-

дельта дискретизація з частотою, що істотно перевищує частоту за Котельниковим (Найквистом) [23–25].

Наприкінці 70-х і в 80-х роках для підвищення швидкодії при порозрядному аналого-цифровому перетворенні починають застосовуватися надлишкові позиційні системи числення. Першим серійним виробом, що використовує цей підхід, був 14-розрядний АЦП ICL 7115 фірми Intersil [34]. Структурну схему такого пристрою, виготовленого за КМОН-технології, наведено на рис. 1.2.

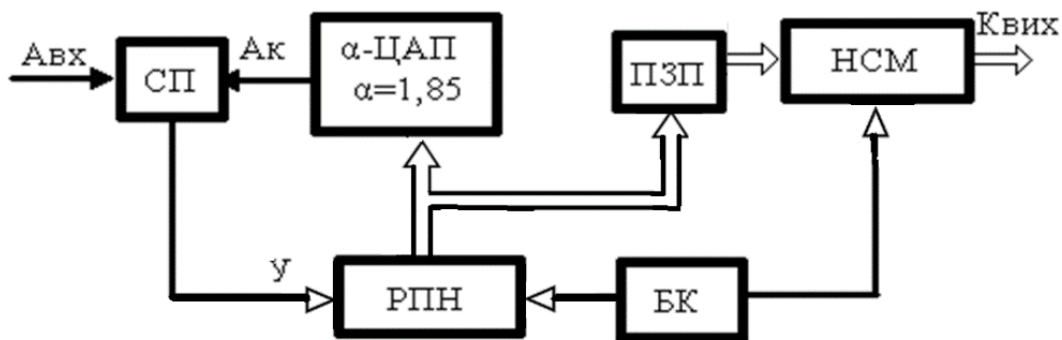


Рисунок 1.2 – Структурна схема швидкодіючого програмно-каліброваного АЦП ICL 7115

Тут: СП – схема порівняння, РПН-регістр послідовного наближення, НСМ – нагромаджуючий суматор, БК – блок керування. Особливістю такого програмно-каліброваного АЦП є застосування надлишкового (відносно двійкового) 17-розрядного ЦАП з відношенням ваг  $\alpha=1,85$ . Це дозволило здійснювати автоматичну компенсацію динамічних похибок, що виникають у процесі врівноваження, і досягти часу перетворення  $\leq 40$  мкс.

Діапазон перетворення ICL 7115 на 18% більше, ніж для двійкового при значно меншій точності виготовлення резисторів ЦАП. Відхилення ваг розрядів від ідеальних значень визначаються після виготовлення кристалу і штучного його старіння, а потім у вигляді двійкових еквівалентів заносяться в ПЗП. Вихідний 14-розрядний двійковий код  $K_{вих}$  по мірі врівноваження послідовно формується в НСМ. Цифровий еквівалент вхідного коду  $K_{вих}$  відображає компенсуючу величину  $A_k$ , значення якої пропорційне:

$$K_{вих} = \sum_0^{n-1} a_i K_i,$$

де  $a_i \in \{0,1\}$  – двійковий коефіцієнт  $i$ -го розряду надлишкового ЦАП;  $K_i$  – цифровий двійковий еквівалент реальної ваги  $i$ -го-розряду.

Проте виграш по швидкодії, що досягається в цьому випадку, є невисоким (біля двох разів) унаслідок низького рівня надлишковості, що вводить. Крім того, програмне калібрування ваг розрядів, коди яких занесено в ПЗП, є неефективним під час змінення умов зовнішнього середовища, оскільки це призводить до зміни ваг розрядів.

У Вінницькому національному технічному університеті під керівництвом О. Д. Азарова розроблено і впроваджено високоточні самокалібровані швидкодіючі АЦП на основі НПСЧ [1, 2]. При цьому слід зауважити, що «повільнодіючі» самокалібровані АЦП на основі НПСЧ можна перетворити на «швидкодіючі» шляхом незначного ускладнення цифрової частини [2].

Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі знакорозрядної НПСЧ, що наведена на рис. 1.3, містить два цифро-аналогових перетворювачі: додатний (ЦАП «+») і від'ємний (ЦАП «-»); реєстри послідовного наближення РПН1 та РПН2, суматор аналогових сигналів ( $\Sigma$ ), цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП), блок пам'яті (БП), схему порівняння (СП) і блок керування (БК). АЦП працює в двох режимах: самокалібрування й основного перетворення.

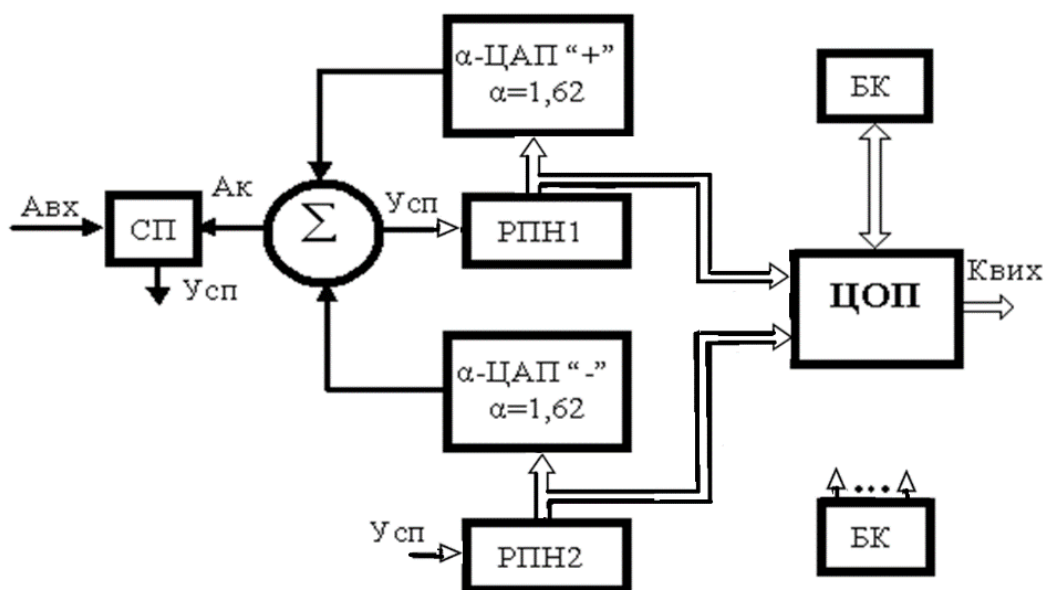


Рисунок 1.3 – Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі НПСЧ (1, -1)

У процесі самокалібрування визначаються коди реальних ваг розрядів ЦАП «+», ЦАП «-» і  $\Delta A_{зм}$ , що фіксуються в БП. У режимі основного перетворення прискорене аналого-цифрове врівноваження здійснюється за рахунок автокомпенсації динамічних похибок. При цьому

мінімальна припустима тривалість такту перетворення визначається рівнем надлишковості використовуваної НПСЧ. У розроблених пристроях відношення ваг розрядів НПСЧ  $\alpha \approx 1,62$  (золота пропорція), що дозволяє підвищити швидкодію в порівнянні з двійковим АЦП у 5-8 разів. Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі НПСЧ (0,1), яку наведено на рис. 1.4, містить: аналоговий комутатор (АК), блок допоміжних сигналів (БДС), блок елементів АБО, регістр зсуву та ін. [2].

У режимі самокалібрування визначаються коди реальних ваг розрядів  $\alpha$ -ЦАП і  $\Delta A_{зм}$ . Причому значення додаткових аналогових сигналів, що формуються БДС, можуть задаватися з низькою точністю. Прискорене врівноважування здійснюється з використанням на кожному  $l$ -му такті аналогових сигналів, що форсують і генеруються молодшими ( $i < l$ ) розрядами ЦАП. У разі перетворення вимірювальних сигналів у схеми вводиться прецизійне джерело опорної напруги (струму), за допомогою якого коригується масштабний коефіцієнт  $M$ .

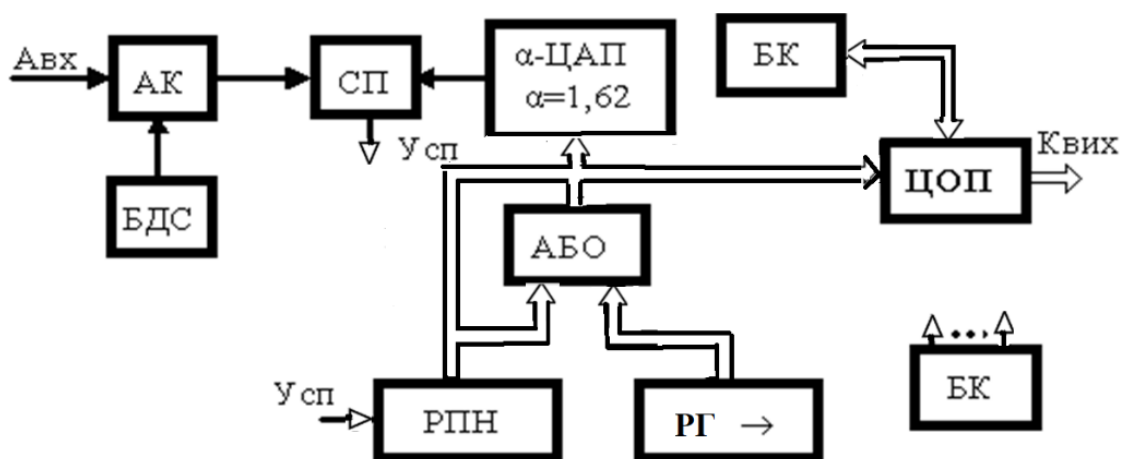


Рисунок 1.4 – Структурна схема швидкодіючого самокаліброваного АЦП на основі НПСЧ (0, 1)

Варто зазначити, що введення інформаційної надлишковості у формі НПСЧ, дозволяє організувати процедуру самокалібрування і компенсації динамічних похибок ваг розрядів АЦП і використовувати ці принципи для побудови високоточних швидкодіючих перетворювачів аналог-код, точнісні характеристики яких не погіршуються під час змінення умов зовнішнього середовища і функціонуванні протягом тривалих проміжків часу [1, 2, 57 – 59].

У теперішній час для розробки масових закордонних АЦП порозрядного кодування для цифрових аудіо-систем широко застосовується технологія комутованих конденсаторів [35–37, 60]. У таких схемах широко

застосовується цифрова корекція ємнісного ЦАП і зсуву нуля [38–39]. Під керівництвом О. Д. Азарова також розроблено структури самокаліброваних АЦП як на резистивних ЦАП, так і на комутованих конденсаторах [6, 61, 62], у т.ч. підвищеної швидкодії. Застосування НПСЧ у таких ПП, побудованих на неточних елементах, дозволяє підвищувати і точність, і швидкодію. Проте розвиток такого напрямку в Україні стримується невідповідністю технологічної бази. Для підвищення швидкості порозрядного аналого-цифрового врівноваження застосовуються також структурні і схемні методи [3, 4].

Проте недоліком їх є обмежені можливості, тому що відсутня, зокрема, можливість під час врівноваження, компенсації змінення вхідного сигналу.

## **1.2 Методи підвищення точності аналого-цифрових перетворювачів слідкувального типу із ваговою надлишковістю**

Основними джерелами статичних похибок багаторозрядних АЦП слідкувального типу є відхилення параметрів аналогових елементів від своїх номінальних значень (головним чином параметрів ЦАП). Це пов'язано з фундаментальними обмеженнями на завдання їхніх параметрів, недосконалістю технології виготовлення та впливом природних чинників у процесі експлуатації, зокрема: зміна температури навколишнього середовища, старіння елементів аналогових вузлів, впливом радіації тощо. При цьому варто відмітити, що всі багаторозрядні (14 і більше двійкових розрядів) ЦАП без вживання спеціальних заходів, по суті, є неточними, оскільки їхня кінцева похибка перетворення не відповідає заявленій роздільній здатності [58].

Традиційно в АЦП різноманітних типів, зокрема, порозрядного наближення, послідовно-паралельних АЦП для підвищення точності, у тому числі лінійності ХП, використовують різноманітні методи калібрування та коригування [2]. Водночас перенесення вказаних підходів на АЦП слідкувального типу, що побудований на неточних елементах, зокрема, неточному ЦАП, є недоцільним. Це пояснюється тим, що в АЦП слідкувального типу на основі двійкової системи числення процедуру коригування похибок ХП необхідно проводити на кожному такті перетворення, а це значно знижує швидкість перетворення [2]. Це призвело до поступового витіснення двійкових АЦП слідкувального типу

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. О. Д. Азаров, *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення* : Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
2. О. Д. Азаров, *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю* : Монографія. Вінниця, Україна : ВНТУ, 2010.
3. О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та О. О. Решетнік, *Високопродуктивні АЦП із ваговою надлишковістю зі змінними тривалостями тактів порозрядного кодування* : монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012.
4. О. Д. Азаров, та О. В. Дуднік, *Методи та засоби високоточного слідкувального аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю*: монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014.
5. О. Д. Азаров, та М. Ю. Теплицький, та Н. О. Біліченко, *Швидкодійні двотактні підсилювачі постійного струму з балансним зворотним зв'язком*: монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.
6. О. Д. Азаров, Н. О. Біліченко, та С. М. Захарченко, *Високолінійні порозрядні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються* : монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.
7. О. Д. Азаров, О. Г. Муращенко, та О. І. Черняк, *Генерування високолінійних пилкоподібних сигналів на базі ЦАП з низькогітчевим кодуванням* : монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2021.
8. А. И. Кондалев, *Преобразователи формы информации компьютерного типа*. Киев, СССР : Знание, 1990.
9. А. И. Кондалев, А. Ю. Вонятыцкий, *Статистические модели ЦАП на источниках тока*. Киев, СССР: институт кибернетики им. В. М. Глушкова, 1988.
10. А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, и В. А. Фабричев, *Высокопроизводительные преобразователи формы информации*. Киев, СССР: Наукова думка, 1987.
11. А. И. Кондалев, В. А. Романов, В. А. Багацкий, и П. С. Клочан, «Вклад Украины в развитие системных преобразователей формы информации», на *Международ. симпозиуме «Компьютеры в Европе. Прошлое, настоящее и будущее»*, Киев, 1998, с. 130.
12. П. П. Орнатский, *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. Киев, СССР: Вища школа, 1983.



13. П. П. Орнатский, *Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые)*. Киев, СССР : Вища школа, 1986.
14. Б. И. Швецкий, *Электронные цифровые приборы*. Киев, СССР: Техника, 1991.
15. Ю. М. Туз, Ю. С. Шумков, та О. В. Козир, *Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв: монографія*. Київ, Україна: «Корнійчук», 2014.
16. Є. Т. Володарський, М. В. Добролюбова, та Л. О. Кошева, «Інформаційно-вимірювальні системи та невизначеність», *Український метрологічний журнал*, 2020. doi:10.24027/2306-7039.3A.2020.
17. E. Volodarsky, Z. Warsza, L. A. Kosheva, and A. Idzkowski, “Method of upgrading the reliability of measurement inspection”, *Advances in Intelligent Systems and Computing* no.393, pp. 431-438, 2016.
18. E. Volodarsky, Z. Warsza, L. A. Kosheva, and A. Idzkowski, “Precautionary Statistical Criteria in the Monitoring Quality of Technological Process”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, no. 543, pp. 740-750, 2017.
19. В. Б. Смоллов, и Е. А. Смирнов, *Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи*. Ленинград, СССР: Энергия, 1967.
20. В. Б. Смоллов, Е. А. Чернявский, и А. В. Минаев, *Системы автоматизированного проектирования средств ИИТ*. Ленинград, СССР: ЛЭТИ, 1988.
21. Э. И. Гитис и др., *Автоматизация проектирования аналого-цифровых устройств*. Москва, СССР: Энергоатомиздат, 1987.
22. Ф. Гудинаф, «Новые области применения аналого-цифровых преобразователей с высоким разрешением», *Электроника*, № 7. с. 89–96, 1991.
23. W. Kester, “Drive Circuitry is Critical to High-Speed Sampling ADCs”, *Electronic Design Special Analog Issue*, no. 7, pp. 43–50, 1994.
24. W. Kester, *Analog-digital conversion*. USA:ADI Central Department, 2004.
25. W. Kesler, *The Data Conversion HandBook*. Burlington, USA: Newnes, 2005.
26. S. Soclof, *Analog Integrated Circuits. Prentice-Hall Series in Solid State Physical Electronics, 0th Edition*. 1984.
27. Z. Boyaciglller, and S. Soclof, “Increase analog-system accuracy with a 14-bit monolithic ADC”, *EDN*, pp 137–143, 1982.
28. J. Brubaker, Z. Boyaciglller, and P. Bradshaw, “14-bit DAC ates with uPs, settles in less than 1 uS”, *Electronic design*, pp. 147–151, Apr. 1981.

29. R. J. Van De Plassche, and H. J. Schouwenaars, “Monolithic 14 Bit A/D Converter”, *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. SC-17, no. 6. pp. 1112–1117, 1982.

30.S. Tan, *High-Speed Analog-to-Digital Converters in CMOS*. Lund University: Lund University. Faculty of Engineering. 2020.

31. D. L. Watson, “16-bit monolithic DAC attains modular performance”, *Electronic Design*. no. 30(23), pp. 121–130, Jan. 1982.

32.S. Sutarja, and P. R. Gray, “250 KS/S 13-bit pipelined A/D converter”, *IEEE Int. Solid State Circuits Conf*, Febr. 1988.

33.J. Wang, W. ShanTam, C. WahKok, and K. PangPun, “A 5-bit 500MS/s flash ADC with temperature-compensated inverter-based comparators”. *Solid State Electronics Letters*, vol. 2, pp. 1–9. December, 2020.

34.Alan B. Grebene, *Bipolar and MOS analog integrated circuit design*. New Jercy, USA: Whiley Classic Library, 2002.

35.M. Hesener, T. Eichler, A. Hanneberg, D. Herbison, F. Kuttner, and H. Wenske, “A 14b 40MS/s Redundant SAR ADC with 480MHz Clock in 0.13µm CMOS”, *Tech. Digest of ISSCC*, Feb. 2007.

36.T. Ogawa, H. Kobayashi, M. Hotta, Y. Takahashi, H. San, and N. Takai, “SAR ADC Algorithm with Redundancy”, in *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Macao, pp. 268-271, 2008.

37.T. Ogawa, H. Kobayashi, Y. Takahashi, N. Takai, M. Hotta, H. San, T. Matsuura, A. Abe, K. Yagi, and T. Mori, “SAR ADC Algorithm with Redundancy and Digital Error Correction”, *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E93-A, no.2, Feb. 2010.

38.T. Sundström, “Design of High-Speed Analog-to-Digital Converters using Low-Accuracy Components”, *Linköping Studies in Science and Technology Dissertations*, no. 1367, 2011.

39.L. Ricci, *Design of a 12-bit 200-MSps SAR Analog-to-Digital converter*. Stockholm, Sweden, 2020.

40.О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Я. Стахов, «АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 49. № 3. с. 37–44, 2020. doi:10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44.

41.О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, та О. Я. Стахов, «Багатоканальна швидкодіюча система АЦП-ЦАП на базі високолінійних перетворювачів струм-струм», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 50, № 1, с. 69-79, 2021.. doi:10.31649/1999-9941-2021-50-1-69-79\_

42. О. Азаров, та О. Стахов, «Моделі АЧХ і ФЧХ двотактних підсилювачів постійного струму», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т.53, № 1, с. 77 – 83, 2022. doi:10.31649/1999-9941-2022-53-1-77-83.

43. О. Азаров, С. Богомолів, та О. Стахов, «Високолінійні двотактні буферні пристрої напруги з параметричною компенсацією зсуву нуля», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т.53, №1, с.69–76, 2022. doi:10.31649/1999-9941-2022-53-1-69-76.

44. О. Д. Азаров, та О. Я. Стахов, «Двотактні буферні пристрої напруги на біполярних транзисторах», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4, с. 18–23, 2022. DOI:10.31891/2307-5732-2022-311-4-18-23.

45. O. D. Azarov, S. V. Bogomolov, S. A. Kyrylashchuk, O. J. Stakhov, M. Duk, and Y. Amirgaliyev, «High speed buffer devices on the base of push-pull current amplifiers», *Proceedings of SPIE 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*, vol. 11176, pp. 1760–1767, Nov.2019. doi:10.1117/12.2536902.

46. A. D. Azarov, S. A. Kyrylashchuk, S. V. Bogomolov, O. Y. Stakhov, A. Kotyra, and O. Mamyrbaev, “Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy”, *Proceedings of SPIE 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments*, vol. 11176, pp. 1809 – 1815, Nov.2019. doi:10.1117/12.2537197.

47. О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, та О. О. Лукашук, «Двотактний підсилювач постійного струму», *Патент на корисну модель 140168 Україна*, 10.02.20.

48. О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, та О. Я. Стахов, «Генератор струму зсуву нуля», *Патент на корисну модель 136566 Україна*, 27.08.19.

49. О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, та Д. В. Лизогуб, «Буфер напруги», *Патент на корисну модель 140196 Україна*, 10.02.20.

50. О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, та Д. В. Лизогуб, «Буфер напруги», *Патент на корисну модель 140786 Україна*, 10.03.20.

51. О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, та Д. В. Лизогуб, «Буфер напруги», *Патент на корисну модель 141391 Україна*, 10.04.2020.

52. О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, та О. Я. Стахов, «Багатоканальна швидкодіюча система АЦП-ЦАП на базі високолінійних перетворювачів струм-струм», на *L Науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2021/paper/view/12308/10262>. Дата звернення: Сер.20, 2022.

53. О. Stakhov, “Numeral systems with irrational bases for mission – critical applications. The basic concepts and scientific results”, на *Шостій Міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації»*, Вінниця, 2017, с. 16–20.

54. О. Я. Стахов, «Високолінійний послідовно-паралельний АЦП на базі ЦАП із ваговою надлишковістю», на *XLVII науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2018/paper/view/5351/4368>. Дата звернення: Сер.20, 2022.

55. О. Я. Стахов, «Методи зменшення похибок струму зсуву нуля у двотактних широкосмугових підсилювачах постійного струму», на *II Міжнародній науковій конференції «Комплексний підхід до модернізації науки: методи, моделі та мультидисциплінарність»*, Чернівці, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://archive.mcmd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/26.08.2022>. Дата звернення: Сер.20, 2022.

56. О. Стахов, «Методи побудови високопродуктивних АЦП із застосуванням структурної та інформаційної надлишковості», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, с. 73–79, 2022. doi:10.31891/2219-9365-2022-70-2-10.

57. Л. В. Крупельницький, та О. Д. Азаров, *Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.

58. О. Д. Азаров, та О. В. Кадук, *Багаторозрядні АЦП і ЦАП, із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.

59. О. Д. Азаров, та О. О. Коваленко, *Обчислювальні АЦП і ЦАП, що самокалібруються, для систем цифрового оброблення аналогових сигналів: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2006.

60. High Speed, High Accuracy, 14-Bit, 16-Bit, and 18-Bit PulSAR ADCs. Analog Devices офіційний сайт. [Online]. Available: <http://www.analog.com/static/imported-files/overviews/PulSAR.pdf>. Accessed on: Nov. 16, 2020.

61. О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, та О. А. Архипчук, *Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів : монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.

62. О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, та О. М. Харьков, *Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.

63. Г. М. Петров, *Преобразование информации в аналого-цифровых вычислительных устройствах и системах*. Москва, СССР: Машиностроение, 1973.

64. В. В. Островерхов, *Динамические погрешности аналого-цифровых преобразователей*. Ленинград, СССР: «Энергия», 1975.

65. О. Д. Азаров, М. Ю. Шабатура, та О. Г. Муращенко, «Динамічні похибки II роду в АЦП прискореного порозрядного наближення з ваговою надлишковістю», *Наукові праці ВНТУ*, №3. с.10, 2010.

66. О. Д. Азаров, О. І. Черняк, «Обмеження адитивних співвідношень при порозрядній потоковій обробці в АМ-системах числення», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №3(31), с. 67–71, 2014.

67. О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко, «Порозрядне додавання в АМ-системах числення на основі адитивних перетворень», *Проблеми інформатизації та управління*, №1(45), с.1421, 2014.

68. Olexiy D. A., S. V. Pavlov, O. I. Chernyak, I. D. Ivasyuk, W. Wójcik, and A. Syzdykpayeva, “Principles of fast count in modified Fibonacci numerical system”, *Proc. SPIE 10808. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, no.1080829, Oct.2018. doi:10.1117/12.2501565.

69. А. П. Стахов, *Коды золотой пропорции*. Москва, СССР: Радио и связь, 1984.

70. A. D. Azarov, A. I. Chernyak, and P. A. Chernyak, “The class of numerical systems for pipeline bit sequential development of multiple optoelectronic data streams”, *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, no.4425, pp.406 – 409, 2001.

71. А.Р. Stakhov, “The golden section in the measurement theorem”, *Computers & Mathematics with Applications*, no.4, pp. 613 – 638, 1989.

72. А. П. Стахов и др., *Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления: учебное пособие*. Киев, СССР: УМК ВО, 1988.

73. А. Stakhov, “The golden section and modern harmony mathematics”, *Applications of Fibonacci numbers*, pp. 393 – 399, 1998.

74. О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Г. Муращенко, «Інформаційні аспекти лічби у модифікованій фібоначчівій системі числення», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №1(38). с.48–52, 2017.

75. О. Азаров, О. Черняк, та О. Муращенко, «Методи перенесення і запозичення у швидкодіючих Фібоначчєвих лічильниках», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2(42). с.55–63, 2018.

76. О. Д. Азаров, та В. А. Гарнага, *Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011.

77. М. Я. Выгодский, *Справочник по высшей математике*. Москва, Россия: АСТ Астрель, 2005.

78. О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Високолінійні двотактні балансні буфери напруги на біполярних транзисторах», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1(41). с.34–41, 2018.

79. Г. Д. Бахтиаров, В. В. Малинин, и В. П. Школин, *Аналого-цифровые преобразователи*. Москва, СССР : Советское радио, 1980.

80. О. Д. Азаров, та С. В. Богомоллов, *Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем : монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013.

81. О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та В. Є. Яцик, «Відбивачі струму для аналогових пристроїв із покращеними статичними і динамічними характеристиками», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с.48–55, 2012.

82. И. П. Степаненко, *Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 3-е, перераб. и доп.* Москва, СССР : «Энергия», 1973.

83. HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models, Intersil Corporation™. [Online]. Available: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>. Accessed on: Aug. 23, 2022.

84. О. Д. Азаров, та С. В. Богомоллов, «Прецизійні буферні пристрої на базі двотактних симетричних структур», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №3(22), с. 4–12, 2011.

85. О. Д. Азаров, О. В. Дудник, С. В. Богомоллов, та О. В. Кадук, «Буферний каскад», *Патент України № 51014*, 25.06.10.

86. А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев, «Аналого-цифровые преобразователи на основе избыточных систем счисления. Помехоустойчивые коды (Компьютер Фибоначчи)», *Радиоэлектроника и связь*, №9, с. 64, 1989.

87. А. Д. Азаров, В. П. Марценюк, В. И. Моисеев и др., «Устройство для аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования», *а.с.1474824 СССР*, 23.04.1989.

88. А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал и др., «Цифроаналоговый преобразователь», *а.с. 1538254 СССР*, 23.01.1990.
89. А. Д. Азаров, Е. А. Коваленко, В. Я. Стейскал и др., «Цифроаналоговый преобразователь», *а.с. 1790030 СССР*, 23.01.1993.
90. U. Tietze, Ch. Schenk, *The semiconductor circuitry. Volume 2*. Book on Demand Ltd, 2018.
91. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, та Є. С. Генеральницький, «Двотактний підсилювач постійного струму», *Пат. на корисну модель 140843 Україна*, 10.03.2020.
92. A. V. Grebene. *Analog integrated circuits*. US: Krieger Publishing Co., 2019.
93. О. Д. Азаров, та Є. С. Генеральницький, «Статичні й динамічні характеристики перетворювачів струм-струм на базі двотактних підсилювачів струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5(63), с.63–70, 2020. doi:10.31649/1997-9266-2020-152-5-63-70.
94. Л. И. Ридико, «Прямой цифровой синтез частоты», *Компоненты и технологии*, № 1, с.1–5, 2001..
- О. Д. Азаров, та М. Ю. Теплицький, «Метод непрерывного коригування струму зсуву нуля двотактних підсилювачів постійного струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с.129–135, 2015.
95. А. Д. Азаров, та В. А. Гарнага, «Систематизация балансных двухтактных усилителей постоянного тока по критерию входного сопротивления», *Проблемы управления и информатики*, № 5, с.115–122, 2016.
96. В. Л. Шило, *Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре*. Москва, СССР: Советское радио, 1979.
97. О. Д. Азаров, Р. М. Медяний, А. П. Ткачук, «Метод зменшення температурного дрейфу струму зсуву нуля у двотактних підсилювачах струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4. с.15–22, 2018.

*Наукове видання*

**Азаров Олексій Дмитрович**  
**Стахов Олексій Ярославович**  
**Обертюх Максим Романович**

**Високопродуктивні АЦП  
комбінованого врівноваження  
із ваговою надлишковістю**

Монографія

Оригінал-макет підготовлено в *редакційно-видавничому  
відділі ВНТУ*

Підписано до друку 5.01.2023 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 7,51.  
Наклад 14 пр. Зам. № В2023-01.

Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 65-18-06.  
**press.vntu.edu.ua**  
*email: irvc.vntu@gmail.com*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.,  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.