

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх**

**ВИСОКОЛІНІЙНЕ НАДЛИШКОВЕ  
ЦИФРОАНАЛОГОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ З  
ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ НА ОСНОВІ  
ГЕНЕРАТОРІВ ОДНАКОВИХ СТРУМІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2022

УДК 621.3  
А 35

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 27 жовтня 2022 року)

Рецензенти:

**В. М. Кичак**, доктор технічних наук, професор

**О. Н. Романюк**, доктор технічних наук, професор

**Азаров, О. Д.**

А 35 Високочастотне надлишкове цифроаналогове перетворення з ваговою надлишковістю на основі генераторів однакових струмів : монографія / О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 156 с.

ISBN 978-966-641-915-9

У монографії розглянуто питання підвищення точності багаторозрядних струмових ЦАП за рахунок дотримання принципу суперпозиції у діапазоні вихідного сигналу, а також подальшого розвитку отримали методи підвищення точності двотактних підсилювачів постійного струму та буферів напруги, термостабільних джерел постійного струму та напруги. Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються розробкою аналогових вузлів високоточних аналого-цифрових перетворювачів.

УДК 621.3

ISBN 978-966-641-915-9

© О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, 2022

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ, ЩОДО ПОБУДОВИ АНА–ЛОГОВОЇ ЧАСТИНИ БАГАТОРОЗРЯДНИХ СТРУМОВИХ ЦАП.....	8
1.1 Методи структурно-функціональної організації аналогової частини сучасних ЦАП.....	8
1.1.1 ЦАП на основі резистивних матриць в прямому та інверсному вмиканні .....	18
1.1.2 ЦАП на основі генераторів розрядних струмів .....	20
1.2 Перетворювачі струм-струм і напруга-струм на основі ППС.....	24
1.3 Існуючі методи побудови термокомпенсованих джерел постійного струму і напруги.....	35
1.4 Аналіз методів побудови буферів напруги .....	40
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ВИСОКО– ЛІНІЙНИХ СТРУМОВИХ ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ.....	44
2.1 Математичні моделі похибок лінійності багаторозрядних ЦАП із підсумовуванням однакових струмів у вузлах резистивної матриці драбинкового типу .....	44
2.2 Метод підвищення лінійності багаторозрядних ЦАП на базі генераторів однакових струмів за рахунок дотримання принципу суперпозиції у діапазоні вихідного сигналу .....	48
2.3 Математичні співвідношення у резистивних матрицях із заданою ваговою надлишковістю для багаторозрядних ЦАП.....	62
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПОБУДОВИ АНАЛОГОВИХ ВУЗЛІВ БАГАТО– РОЗРЯДНИХ ВИСОКОЛІНІЙНИХ СТРУМОВИХ ЦАП.....	75
3.1 Високолінійні двотактні перетворювачі струм-струм і напруга-струм.....	75
3.2 Швидкодіючі двотактні буфери напруги .....	106
3.3 Термокомпенсовані джерела постійного струму і напруги кільцевого типу .....	114

РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ БАГАТОРОЗРЯДНИХ ВИСОКОЛІНІЙНИХ СТРУМОВИХ ЦАП ТА СИСТЕМ НА ЇХ БАЗІ .....	125
4.1 Аналогова частина багаторозрядних струмових ЦАП із ваговою надлишковістю .....	125
4.2 Високोलінійний ЦА-нагромаджувач із ваговою надлишковістю на неточних елементах для генерування низькочастотних сигналів .....	129
4.3 Рекомендації з комп'ютерного моделювання аналогових вузлів ЦАП із ваговою надлишковістю .....	134
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	140

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

ППС - підсилювач постійного струму

ДОН - джерело опорної напруги

ДОС - джерело опорного струму

ПВЗ - пристрій вибірки зберігання

ОП - операційний підсилювач

ТКН - температурний коефіцієнт напруги

ПНС - перетворювач напруга-струм

ПСС - перетворювач струм-струм

ВДК - вхідний двотактний каскад

ДПК - двотактний підсилювальний каскад

ДППС - двотактний підсилювач постійного струму

ВС - відбивач струму

ДБН - двотактний буфер напруги

## ВСТУП

Аналого-цифрові перетворювачі та цифроаналогові перетворювачі утворюють клас перетворювачів форми інформації, вони використовуються в різних сферах людської діяльності. На теперішній час перетворювачі форми інформації застосовуються у складі різних систем, у системах з цифровими обчислювальними пристроями реалізують функції зв'язку з об'єктом, функції аналого-цифрових контролерів, аналого-цифрових інтерфейсів, аналого-цифрових спецпроцесорів, підсистем тестування, випробовування та регулювання параметрів і характеристик, збирання й оброблення вимірювальної інформації, аналізу і синтезу сигналів, тощо. До характеристик перетворювачів форми інформації висуваються серйозні вимоги – основні це точність і швидкодія. Вирішенням проблем підвищення точності і швидкодії плідно займалися наукові школи [1]-[8] А. І. Кондалєва, В. Б. Смолова, Є. І. Гітіса, П. П. Орнатського, Б. І. Швецького, О. П. Стахова, В. М. Шляндина, Ю. М. Туза та інші.

Традиційний спосіб вирішення проблеми підвищення точності і швидкодії перетворювачів форми інформації – застосування більш досконалої елементної бази. Перетворювачі форми інформації містять вхідні або вихідні канали перетворення аналогового сигналу, які включають в себе підсилювачі, аналогові комутатори та пристрої вибірки-зберігання. Дослідження в сфері підвищення їх точності та швидкодії посідають важливу роль в вирішенні вказаної проблеми. Також важливу роль займають дослідження в області підвищення точності і стабільності джерел опорного струму та напруги, які виступають в якості універсальної міри в перетворювачах форми інформації. Також значну нішу посідають дослідження, пов'язані з вирішенням проблем комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в проектовані пристрої надлишковості у формі надлишкових позиційних систем числення. Актуальність досліджень у цій галузі підтверджується позитивними практичними результатами, отриманими, наприклад, в Вінницькому національному темничному університеті науковими школами О. П. Стахова та О. Д. Азарова. Актуальність теми дисертаційного дослідження відповідає основним напрямкам розвитку науки затвердженим Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 16.01.2016 № 2623-14.

Метою дослідження викладеного в цій роботі було підвищення лінійності багаторозрядних надлишкових ЦАП на базі генераторів однакових струмів за рахунок дотримання принципу суперпозиції ваг розрядів у діапазоні вихідного сигналу, а також використання інших аналогових вузлів з підвищеною лінійністю (двотактних підсилювачів постійного струму та двотактних буферів напруги, термостабільних джерел постійного струму та напруги).

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ, ЩОДО ПОБУДОВИ АНАЛОГОВОЇ ЧАСТИНИ БАГАТОРОЗРЯДНИХ СТРУМОВИХ ЦАП

### 1.1 Методи структурно-функціональної організації аналогової частини сучасних ЦАП

Перетворення між аналоговими й цифровими величинами – основна операція в обчислювальних і керуючих системах, оскільки фізичні параметри, такі як температура, переміщення, напруга, аудіо і т.п., є аналоговими, а методи обробки, обчислення й прийняття керуючих рішень – цифровими. ЦАП і АЦП є важливою частиною технологій, що стали доступними й широко поширилися в епоху цифрової революції. Іншими словами сучасна технічна система повинна зчитувати інформацію, що приходить із навколишнього світу і перебуває в аналоговій формі, та перетворювати її в цифровий вигляд. У цифровому вигляді інформація обробляється, перетворюється, та приймаються керуючі рішення. Потім інформація знову перетворюється в аналогові величини здатні впливати на навколишній світ або сприйматися людиною.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – пристрій для перетворення цифрового (звичайно двійкового) коду в аналоговий сигнал (струм, напругу та ін.).

Цифро-аналоговий перетворювач виконує функцію, зворотну функції АЦП. Кожному вхідному кодовому слову  $k$ , ставиться у відповідність однозначно зв'язане з ним значення вихідного аналогового сигналу  $A(k)$ . Якщо вхідне слово представлене у формі позиційного двійкового коду, то номінальну функцію перетворення ЦАП можна записати у вигляді [9]

$$A(k) = Q \cdot \sum_{i=1}^n a_i 2^{i-1}, \quad (1.1)$$

де  $Q$  - коефіцієнт (чутливість) перетворення;  $n$  - розрядність вхідного кодового слова;  $a_i \in \{0,1\}$  – значення  $i$ -го розряду кодового слова;  $2^{i-1}$  – ваги розрядів кодового слова. Даний вираз може застосовуватись тільки до лінійних ЦАП.



Цифро-аналогові перетворювачі являють собою клас пристроїв, що мають надзвичайно широкий спектр застосувань. Тут особливо варто відзначити використання ЦАП як функціонального блоку АЦП, де він відіграє значною мірою роль аналогового сигналу, що перетворюється, який керується кодом, сформованим на виході АЦП, і розташовується в ланцюзі зворотного зв'язку. Як самостійне обладнання ЦАП широко використовуються у вимірювальній і обчислювальній техніці, системах передачі, зберігання й відображення інформації (телебачення, радіозв'язок і радіомовлення, телефонія, відеозапис і звукозапис тощо), а також у системах керування технологічними процесами.

У теперішній час ЦАП в основному створюються з використанням таких принципів рис. 1.1:

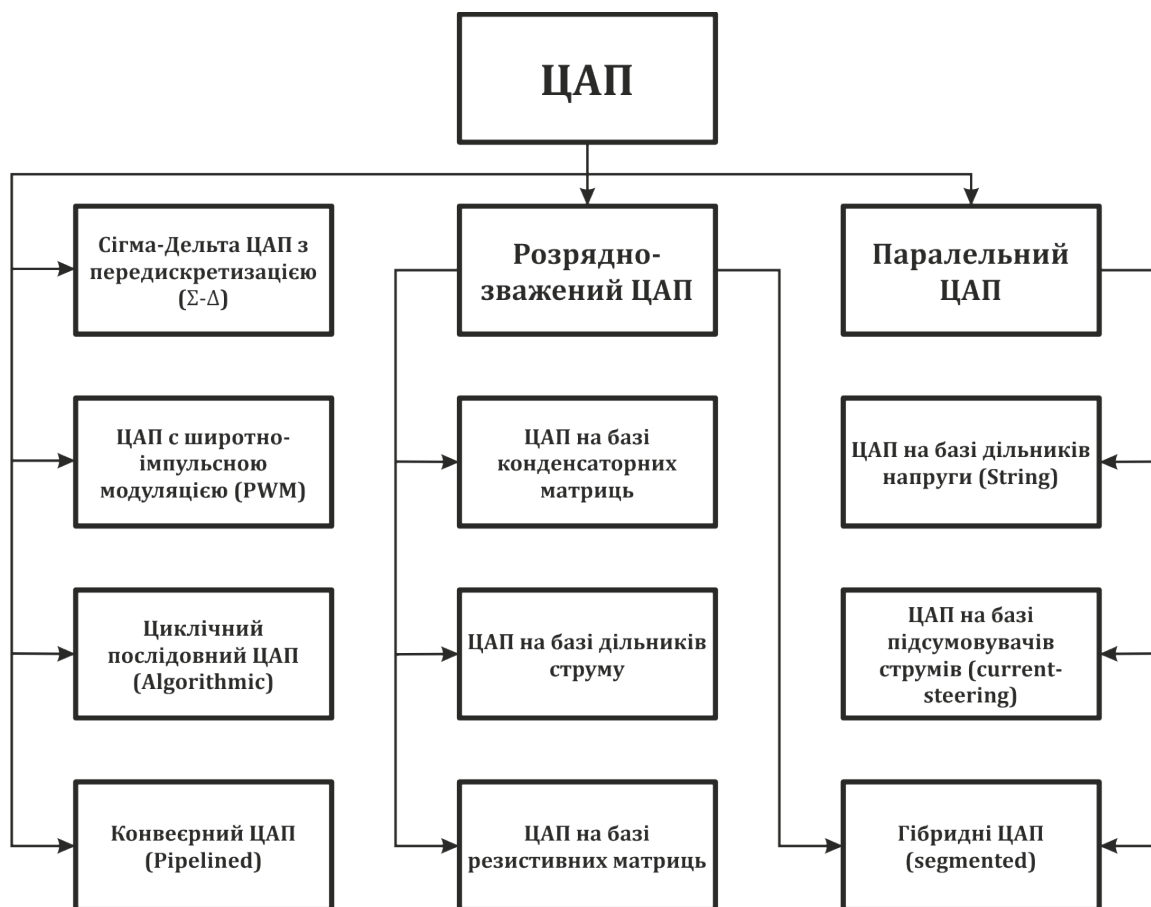


Рисунок 1.1 – Класифікація ЦАП

**Паралельні ЦАП** можуть будуватися як дільники опорної напруги або як суматори одиничних струмів. Паралельний ЦАП на рис. 1.2 а містить резистивний сходовий дільник для формування кожного можливого значення напруги на виході ЦАП,  $n$ -розрядна версія цього ЦАП

складається з  $2n$  однакових послідовно з'єднаних резисторів ( $R$ ) для формування  $2n$  значень напруги й  $2n$  ключів для підключення їх до виходу ЦАП. За допомогою дешифратора потрібне значення напруги підключається на вихід ЦАП. Ця архітектура відрізняється гарною монотонністю й лінійністю, а також у зв'язку з тим, що в момент перемикання працюють тільки два ключі, у такій архітектурі рідко відбуваються викиди, крім того, викиди не залежать від коду.

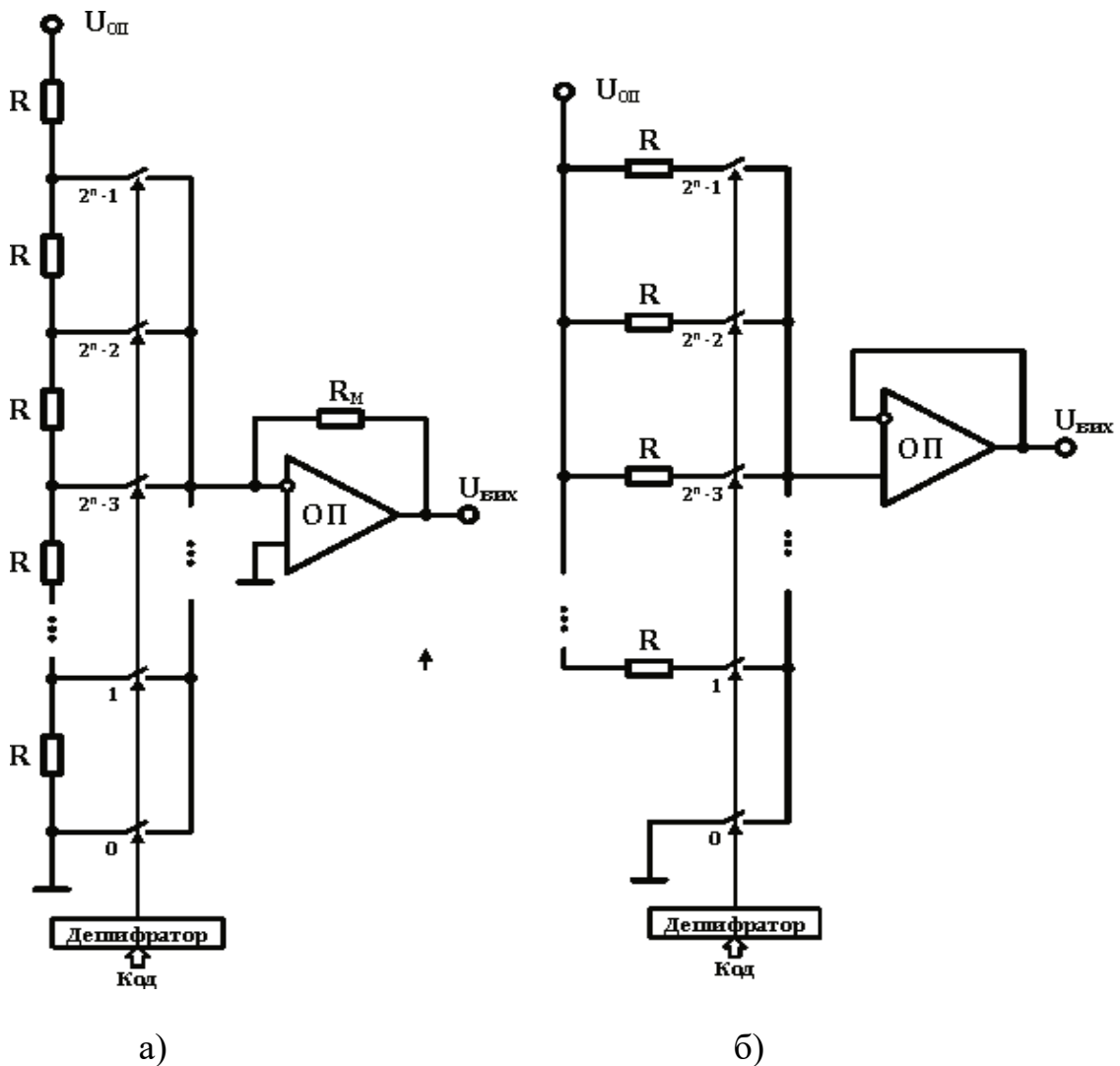


Рисунок 1.2 – Паралельний ЦАП на основі: а) дільника напруги; б) суматора струмів

Паралельний ЦАП на рис. 1.2 б містить набір одиничних джерел струму.  $n$ -розрядна версія цього ЦАП складається з  $2n$  однакових джерел струму, реалізованих за допомогою резисторів ( $R$ ) і  $2n$  ключів для підключення їх до виходу ЦАП. За допомогою дешифратора потрібна кількість джерел струму підключається на вихід ЦАП. Ширше

використовується варіант такого ЦАП з перемиканням струму між двома лініями, одна з яких або заземлена або використовується як вихід, що інвертує, тому що перемикання струму між двома виходами не перериває його й тому рідше викликає викиди. Проте, час установлення таких ЦАП сильно різниться для початкового й кінцевого значень кодів. Іноді такі ЦАП називають струнними, строковими або термометричними. Це швидка й високоточна архітектура. Основний недолік паралельного ЦАП полягає у великій кількості резисторів і ключів, необхідних для досягнення високої роздільної здатності.[9], [10]

**Розрядно-зважений ЦАП** містить окремі вагові електричні компоненти для кожного біта коду, підключені до точки підсумовування, зазвичай до операційного підсилювача. Кожний компонент має значення ступеня  $\alpha$ , де  $\alpha = U_i/U_{i-1}$  – співвідношення ваг двох сусідніх вагових компонентів, з найбільшим струмом або напругою в самому старшому розряді. Сума цих точних вагових напруг або струмів дає вихідне значення аналогової величини. Це один з найшвидших методів перетворення, але він характеризується значними похибками через високу точність, необхідну для формування кожної окремої вагової напруги або струму. Це найбільше широко розповсюджена архітектура ЦАП.

Найчастіше розряднозважені ЦАП будуються з використанням резистивних матриць (рис. 1.3). Резистивні матриці показані в прямому включенні, електронні ключі перемикають напруги. Найпростішою резистивною матрицею є матриця зважених резисторів, показана на рис. 1.3 а. Номінали вагових резисторів  $R_{P_i}$  й кінцевого резистора  $R_\infty$  будуть становити [11], [12]:

$$R_{P_i} = \alpha^{n-i} \cdot R, \quad R_\infty = \alpha^{n-i} \cdot (\alpha - 1) \cdot R. \quad (1.2)$$

У випадку  $\alpha=2$  (двійкова система числення):

$$R_{P_i} = 2^{n-i} \cdot R, \quad R_\infty = 2^{n-i} \cdot R. \quad (1.3)$$

Перевагами матриць даного типу є простота й відсутність взаємовпливу між резисторами і як наслідок простота підстроювання, а недоліком резистивних матриць даного типу є великий діапазон необхідних номіналів резисторів, співвідношення номіналів для двійково-зваженої матриці буде становити  $R_{P_1}/R_{P_N}=2^{n-1}$ , наприклад для 8-ми розрядного ЦАП це співвідношення буде становити 128, а для 16-ти розрядного 32768, у рамках інтегральної технології такий діапазон

номіналів резисторів неможливо реалізувати [13]-[15]. Таким чином матриця зважених резисторів може використовуватися тільки для реалізації ЦАП невисокої розрядності.

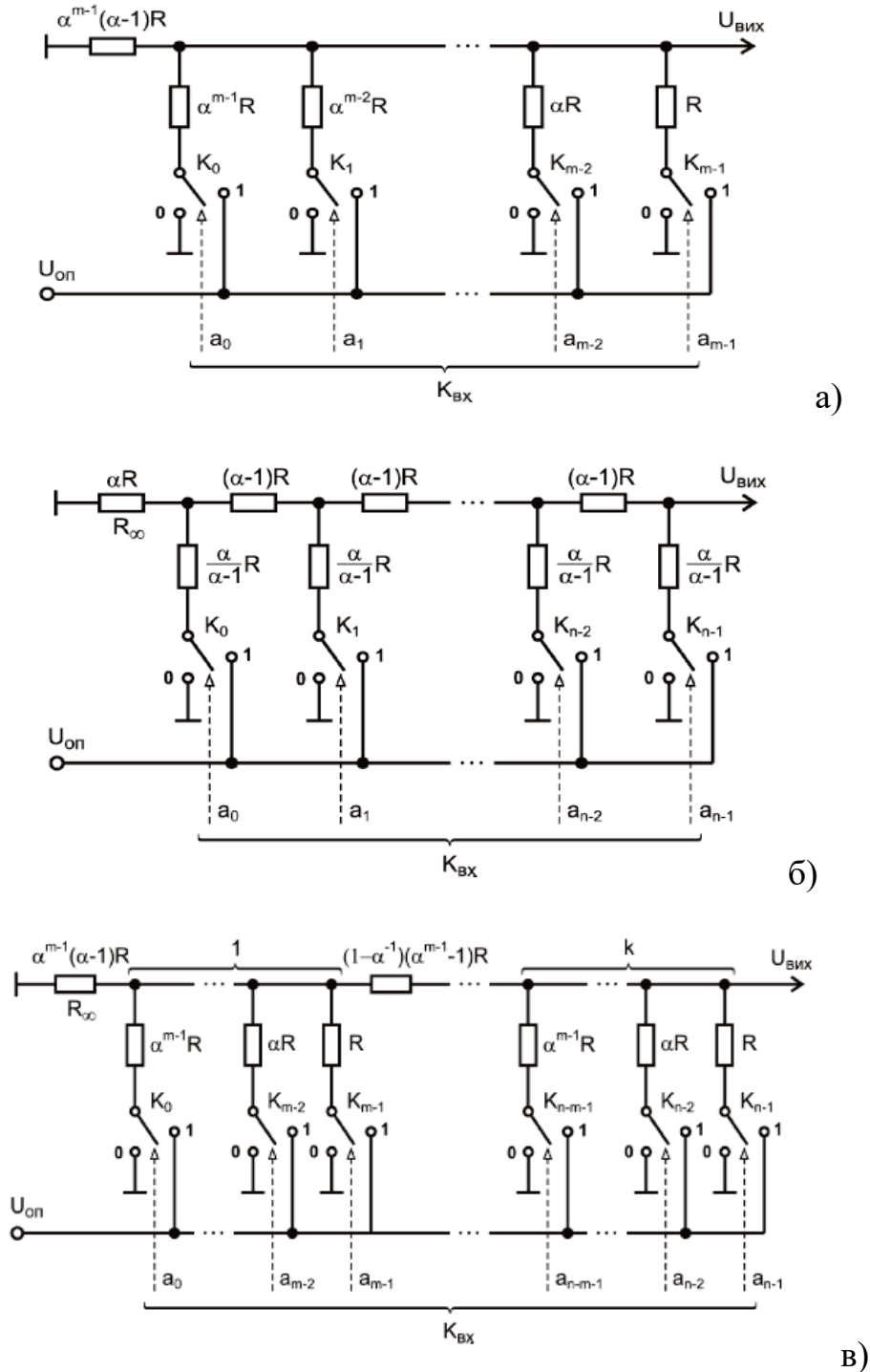


Рисунок 1.3 – ЦАП з дільником напруги на основі резистивних матриць у прямому включенні: а) вагового типу; б)  $R-\alpha R$ ; в) секційного типу

Іншим варіантом резистивної матриці є матриця сходового типу, наведена на рис. 1.3 б. Номінали розрядних резисторів  $R_P$ , резисторів зв'язку  $R_{ЗВ}$  і кінцевого резистора  $R_\infty$  будуть становити [11], [12]:

$$R_P = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \cdot R \quad R_{ЗВ} = (\alpha - 1) \cdot R \quad R_\infty = \alpha \cdot R. \quad (1.4)$$

У випадку  $\alpha=2$  (двійкова система числення):

$$R_P = 2 \cdot R \quad R_{ЗВ} = R \quad R_\infty = 2 \cdot R. \quad (1.5)$$

Такий тип матриці називається R-2R і вона легко будується за допомогою резисторів одного номіналу й займає дуже невелику площу кристала. Недоліком ЦАП на базі матриці типу R-2R є вплив похибок у кожному резисторі на похибки всіх ваг розрядів, що ускладнює налаштування.

Комбінацією двох попередніх способів побудови резистивних матриць є матриця секційного типу, представлена на рис. 1.3 в. Вона складається із  $k$  секцій по  $m$  зважених резисторів. Номінали розрядних резисторів  $R_{Pi}$ , резисторів зв'язку  $R_{ЗВ}$  і кінцевого резистора  $R_\infty$  будуть становити [11], [12]:

$$R_{Pi} = \alpha^{m-i} \cdot R \quad R_{ЗВ} = \frac{(\alpha - 1)}{\alpha} \cdot (\alpha^m - 1) \cdot R \quad R_\infty = \alpha^{m-1} \cdot (\alpha - 1) \cdot R. \quad (1.6)$$

У випадку  $\alpha=2$  (двійкова система числення):

$$R_{Pi} = 2^{m-i} \cdot R \quad R_{ЗВ} = \frac{(2^m - 1)}{2} \cdot R \quad R_\infty = 2^{m-1} \cdot R. \quad (1.7)$$

Матриці цього типу поєднують у собі ряд вигід двох попередніх типів, зокрема невеликий діапазон необхідних номіналів резисторів і більшу простоту підстроювання матриці.

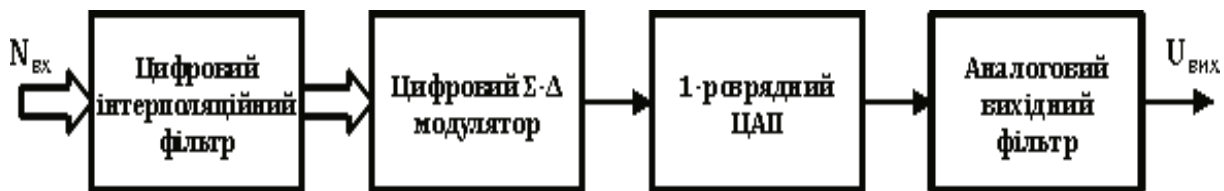
Також розряднозважені ЦАП можуть створюватися з використанням конденсаторних матриць [16]. Структури таких матриць аналогічні показаним на рис. 1.3, тільки замість резисторів використовуються конденсатори. Робота таких ЦАП основана на процесах перерозподілу зарядів. Їх недоліком є поступовий розряд конденсаторної матриці і виникнення похибки, що збільшується з часом, тому вони використовуються переважно в складі АЦП.

Також можлива побудова розряднозважених ЦАП на базі дільників струму, коли базовий струм ділиться навпіл, потім один з отриманих таким

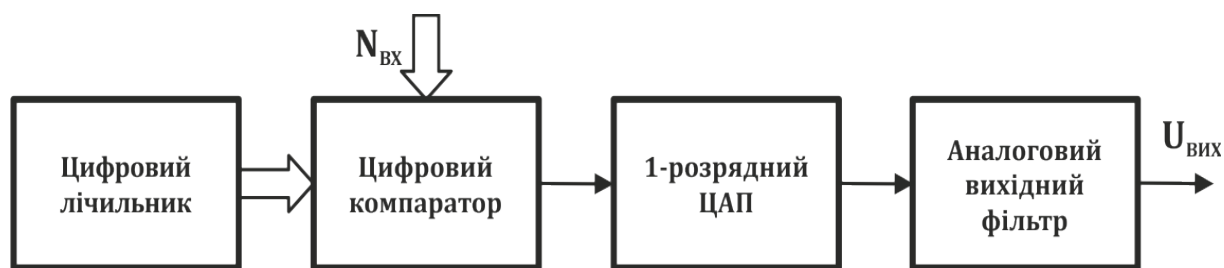
чином струмів знову ділиться навпіл і так далі, що дозволяє отримати набір двійковозважених струмів. Такі дільники можуть будуватися за допомогою біполярних або польових транзисторів.

Також широкого поширення нині набули так звані **сегментовані ЦАП**, коли в одному ЦАП комбінуються два, чи більше ЦАП одного або різних типів. На практиці один ЦАП працює зі старшими розрядами, інший з молодшими, а їх виходи підсумовуються. Найрозповсюдженішим є підхід, коли старші розряди формуються за допомогою паралельного струмового ЦАП, а молодші – двійково-зваженого струмового ЦАП на базі джерел та дільників струмів на польових транзисторах [9].

ЦАП з передискретизацією або **дельта-сигма ЦАП** показаний на рис. 1.4 а.



а)



б)

Рисунок 1.4 – Схеми ЦАП: а) однорозрядний  $\Sigma$ - $\Delta$  ЦАП;  
б) ЦАП з ШІМ

Цей ЦАП складається з «інтерполяційного фільтра» (цифрова схема, яка приймає дані з низькою швидкістю, вставляє нулі з високою швидкістю, а потім застосовує алгоритм цифрового фільтра й виводить дані з високою швидкістю),  $\Sigma$ - $\Delta$  модулятора (який ефективно діє як фільтр нижніх частот для сигналу, але як фільтр верхніх частот для шуму квантування, і перетворює отримані дані у високошвидкісний потік бітів), та 1-бітного ЦАП, вихід якого перемикається між однаковими додатною й від'ємною опорними напругами. Вихідний сигнал фільтрується в зовнішньому аналоговому ФНЧ. Через високу частоту передискретизації складність ФНЧ

набагато менша, чим у випадку традиційної операції Найквіста. Такі ЦАП дозволяють досягати високої роздільної здатності в 24 розряди й співвідношення сигнал-шум в 110дБ [10], [16].

**Широтно-імпульсний модулятор** – найпростіший тип ЦАП. Стабільне джерело струму або напруги періодично вмикається на час, пропорційний цифровому коду, що перетворюється, далі отримана імпульсна послідовність фільтрується аналоговим фільтром нижніх частот. Такий спосіб часто використовується для управління швидкістю електромоторів. Схема ШІМ показана на рис. 1.4 б. Вона складається з циклічного лічильника, компаратора, який порівнює код на виході лічильника з вхідним кодом, співвідношення тривалості високого та низького логічного рівня на виході компаратора пропорційне вхідному коду, та 1-бітного ЦАП, вихід якого перемикається між однаковими додатною й від'ємною опорними напругами, Вихідний сигнал фільтрується в зовнішньому аналоговому ФНЧ [10].

**Циклічний, або алгоритмічний ЦАП** схема якого наведена на рис. 1.5 а.

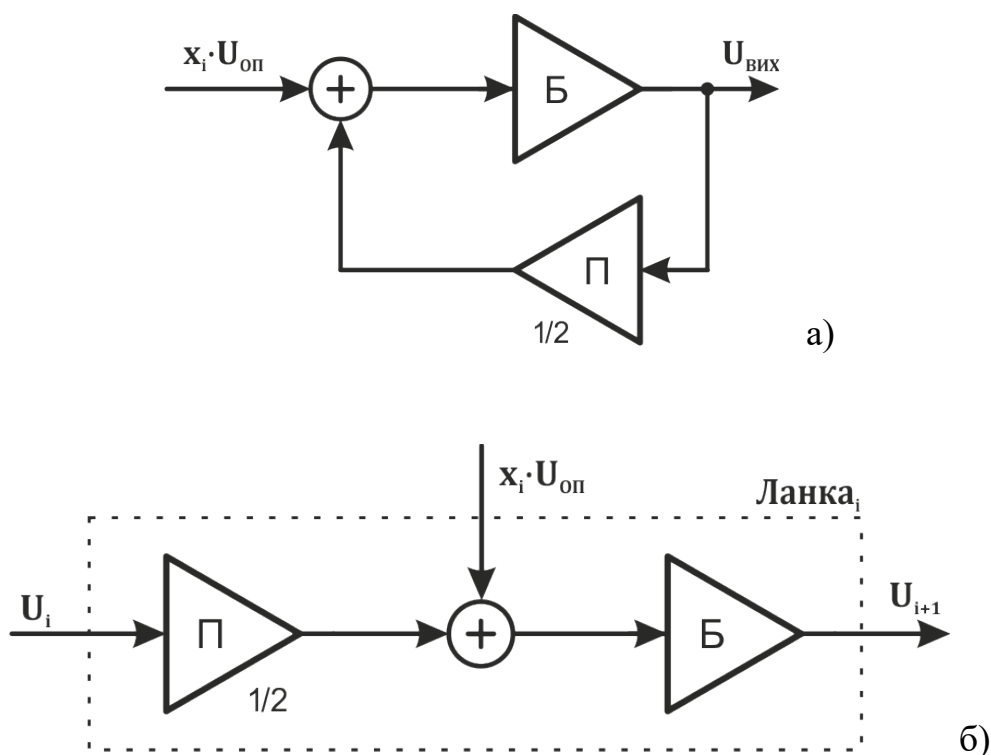


Рисунок 1.5 – Схеми ЦАП: а) циклічний ЦАП; б) конвеєрний ЦАП.

Цикл перетворення становить  $n$  кроків, де  $n$  – розрядність коду. Спочатку значення вихідного сигналу дорівнює нулю, перетворення починається з молодших розрядів. В кожному циклі попереднє значення

вихідного сигналу масштабується з коефіцієнтом 0,5 та підсумовується з  $x_i \cdot U_{\text{оп}}$ , де  $x_i$  – значення  $i$ -го біту вхідного коду, та запам'ятовується. Перевагою такого ЦАП є простота конструкції. Різновидом такого перетворювача є **конвеєрний ЦАП**, який складається з  $n$  ланок (рис. 1.5 б) і в якому одночасно перетворюється  $n$  різних кодів [9], [10].

На рис. 1.6 відображено положення традиційних архітектур ЦАП на діаграмі частота роботи – співвідношення сигнал/шум.

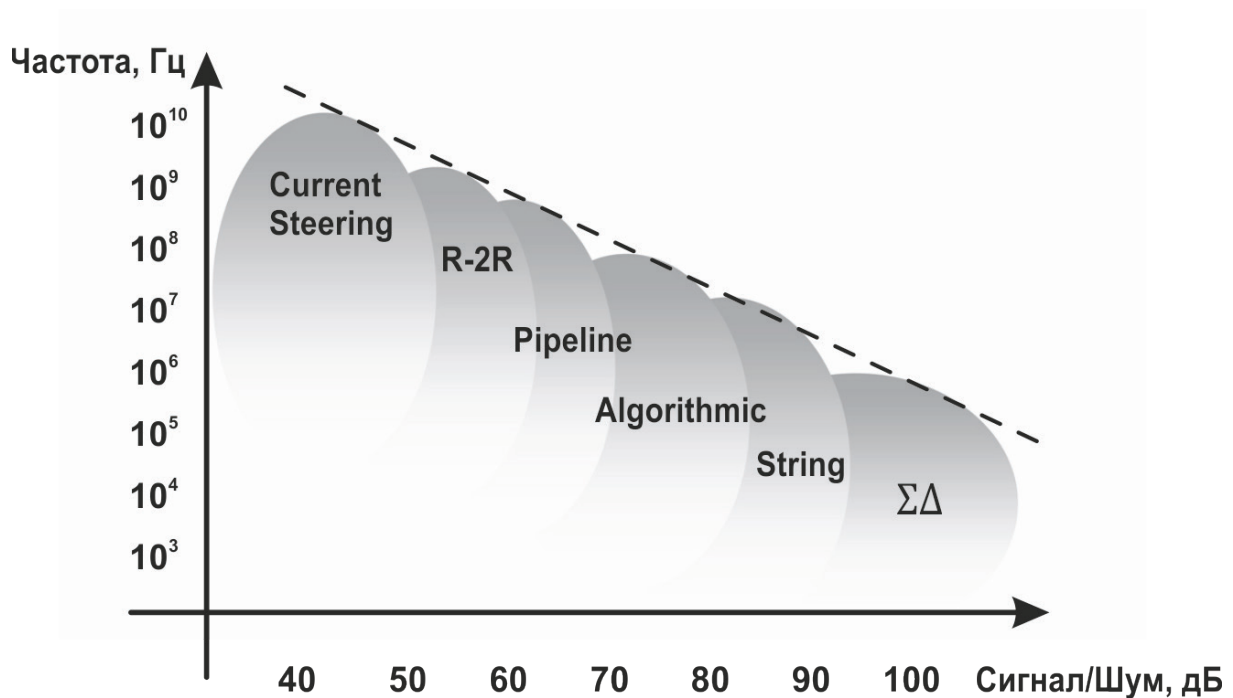


Рисунок 1.6 – Архітектури ЦАП на діаграмі частота роботи – співвідношення сигнал/шум

Функціонально-структурна організація сучасних розрядно-зважених ЦАП [17]-[25] показана на рис. 1.7:

БК – блок керування. Керує роботою всіх вузлів ЦАП.

ДОН – джерело опорної напруги. Точність опорної напруги прямо впливає на точність ЦАП. По суті  $U_{\text{оп}}$  прямо впливає на похибку масштабу, і її похибка повинна бути менше 0,5 МЗР або  $U_{\text{оп}}/2^{n+1}$ . Тому багато ЦАП містять внутрішні прецизійні джерела опорної напруги.

АК – аналоговий комутатор. Ряд ЦАП використовується для виводу сигналу по багатьом незалежним аналоговим каналам. АК являє собою набір ключів, що підключають вихід пристрою до потрібного каналу. Ключі повинні вносити як можна менші статичні й динамічні похибки.



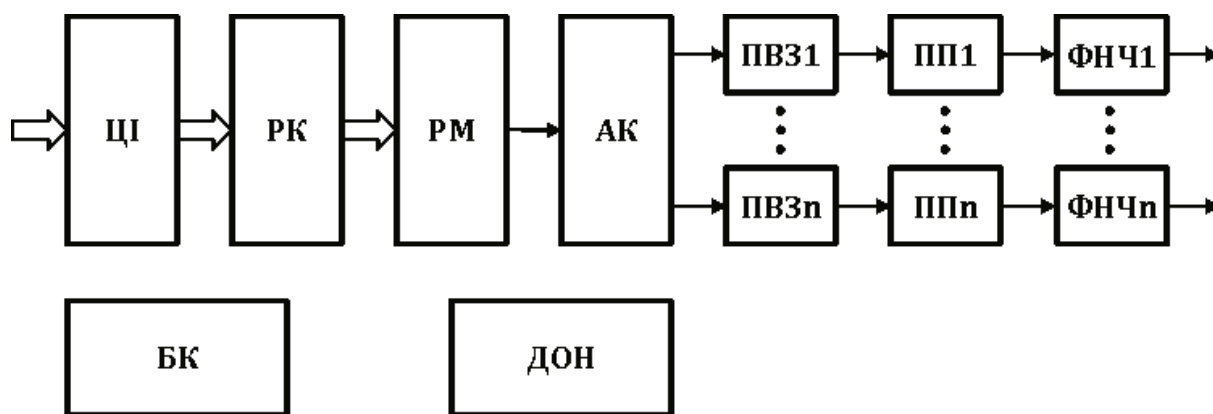


Рисунок 1.7 – Функціонально-структурна організація сучасних розрядно-зважених ЦАП

ФНЧ – фільтр нижніх частот. На виході ЦАП присутній східчасто мінливий сигнал або шум дискретизації. Помилкові частотні компоненти сигналу (відсутні в спектрі ідеального сигналу) отримали назву *alias* (неправильна частота, побічна частотна складова). Для придушення помилкових спектральних компонентів сигнал на вихід ЦАП, повинен бути пропущений через фільтр нижніх частот.

ПВЗ – пристрій вибірки зберігання. На виході ЦАП при поданні на його вхід нового цифрового коду спостерігаються перехідні процеси, що часто мають вид викидів – глітчів. Для запобігання потрапляння глітчів на вихід пристрою ПВЗ запам'ятовує значення на виході ЦАП після завершення перехідних процесів в останньому.

ПП – програмований підсилювач. У деяких випадках потрібно підсилювати сигнали, що надходять на вихід ЦАП. Звичайно для цього використовуються операційні підсилювачі (ОП). Також на базі ОП можуть будуватися буферні елементи.

РМ – резистивна матриця. Являє собою матрицю резисторів або конденсаторів, що формує зважені еталони струмів або напруг і підсумовує їх залежно від вхідного цифрового коду.

РПП(РК) – регістр послідовно наближення (регістр коду). Цифровий регістр або пам'ять, де зберігається вхідний код ЦАП.

ЦІ – цифровий інтерфейс. У сучасну епоху цифрова техніка масово поширилася в багатьох сферах. Тому ЦАП повинні мати стандартні вузли сполучення й реалізовувати стандартні протоколи взаємодії із цифровою технікою. Це різко підвищує їхню універсальність і зручність застосування і є вже необхідністю.

### 1.1.1 ЦАП на основі резистивних матриць в прямому та інверсному вмиканні

Найпростішими варіантами ЦАП, побудованими на основі резистивних матриць, є ЦАП, що використовують пряме або інверсне включення матриць [11], [26], [13], [27]. Варіанти ЦАП, що використовують пряме включення резистивних матриць показані на рис. 1.3, резистивні матриці в даних схемах функціонують як дільники напруги, схеми мають вихід по напрузі. У даних схемах ключові елементи  $K_1 \dots K_n$  в залежності від значення вхідного коду  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , де  $a_i \in \{0,1\}$  – значення  $i$ -го розряду кодового слова, перемикають виходи розрядних резисторів між потенціалами землі і  $U_{ОП}$ . Для матриці двійковозважених резисторів буде вірним такий вираз:

$$U_{ВИХ} \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i}{2^{n-i} \cdot R} + \frac{1}{2^{n-1} \cdot R} \right) = (U_{ОП} - U_{ВИХ}) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^{n-i} \cdot R}, \quad (1.8)$$

звідки:

$$U_{ВИХ} = \frac{U_{ОП}}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^{n-i} \cdot R}. \quad (1.9)$$

Для матриць типу R-2R і секційного типу вихідна напруга буде визначатися цієї ж формулою.

Ці схеми – це схеми з перемиканням напруги. Ключі в таких схемах вимагають високої амплітуди керуючих напруг ( $\geq U_{ОП}$ ), що також призводить до зменшення швидкодії таких ЦАП.

Варіанти ЦАП, що використовують інверсне включення резистивних матриць показані на рис. 1.8, резистивні матриці в даних схемах функціонують як формувачі зважених струмів, схеми мають вихід за струмом.

В даному включенні резистивних матриць в точку, де в попередньому випадку формувалося значення  $U_{ВИХ}$  підключається  $U_{ОП}$ , а виходи розрядних резисторів, що перемикаються ключами  $K_1 \dots K_n$  між шиною землі і виходом схеми, мають також нульовий потенціал (зазвичай вихід схеми підключається до входу, який ОП має потенціал квазінуля) . Струм, що протікає через  $i$ -тий резистор, становитиме:

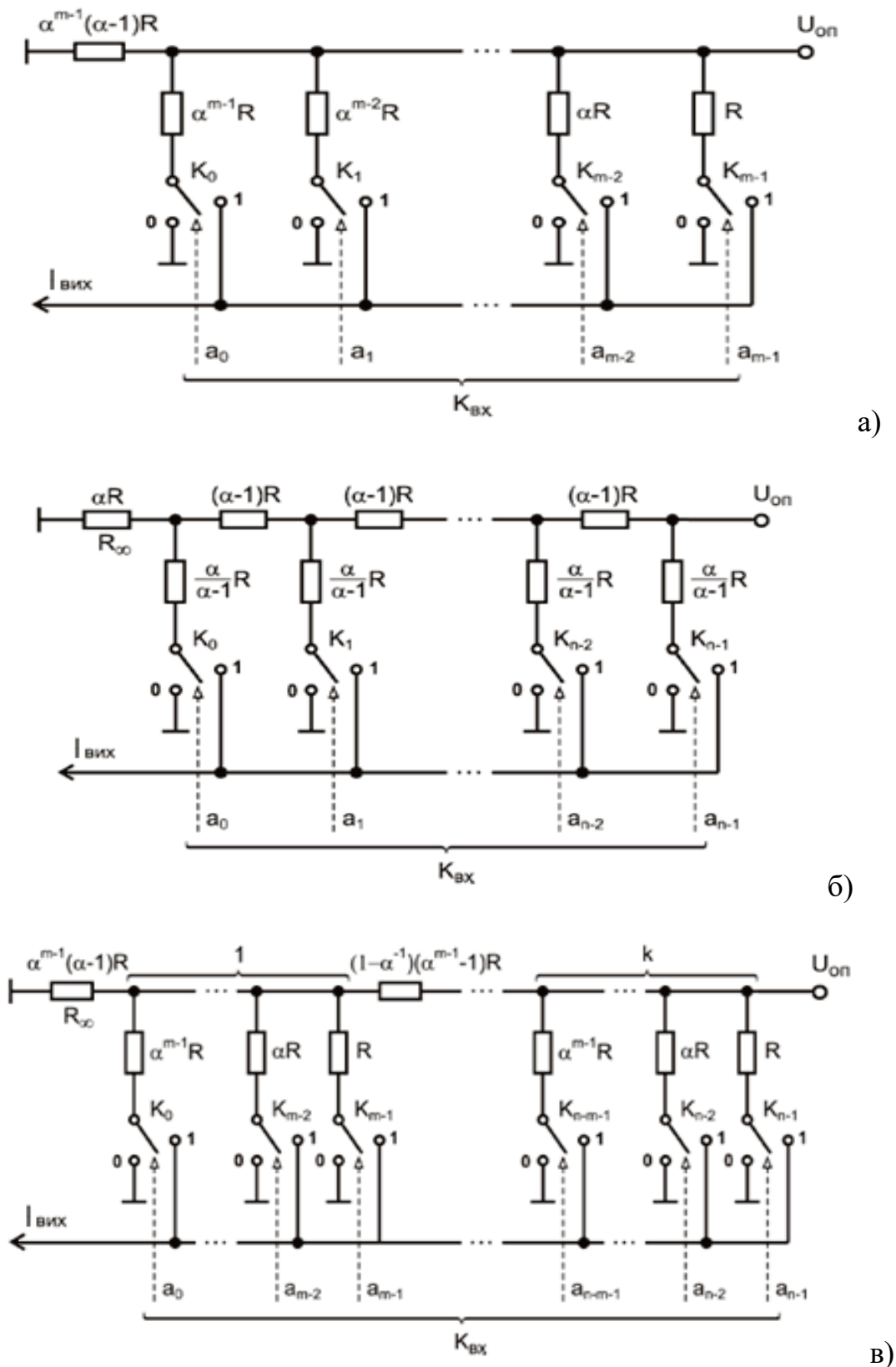


Рисунок 1.8 – ЦАП з підсумовуванням розрядних струмів на основі резистивних матриць в інверсному включенні:  
 а) вагового типу; б) R-2R; в) секційного типу

$$I_i = a_i \cdot \frac{U_{OP}}{2^{n-i} \cdot R}, \quad (1.10)$$

де  $a_i \in \{0,1\}$  – значення  $i$ -го розряду кодового слова. Вихідний струм буде дорівнювати:

$$I_{ВИХ} = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \frac{U_{OP}}{2^{n-i} \cdot R} = \frac{U_{OP}}{R} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^{n-i}}. \quad (1.11)$$

Такі схеми – це схеми з перемиканням струмів. Ключі в таких схемах потребують значно меншої амплітуди керуючих напруг, крім того струм через матрицю не змінюється, ключі лише перемикають його між шиною землі і виходом схеми, ці фактори призводять до збільшення швидкодії таких ЦАП.

У ЦАП на основі матриць в прямому і інверсному включенні використовуються, як правило, МОН-ключі мають у відкритому стані опір (50-100 Ом) [13], [26], [28], що призводить до падіння деякої напруги на відкритому ключі і виникнення похибок розрядних струмів. Для їх мінімізації збільшується номінал резистивної матриці, величина базового опору  $R$  в таких матрицях вибирається досить великою порядку 10кОм, що призводить до збільшення площі кристала і паразитних ємностей і як наслідок постійних часу схеми. Також потрібно подальше підстроювання матриці, опір самих ключів в різних розрядах може завдаватися різним. Ці недоліки обмежують точність таких ЦАП на рівні 10 двійкових розрядів.

### 1.1.2 ЦАП на основі генераторів розрядних струмів

Іншими варіантами ЦАП, побудованими на основі резистивних матриць, є ЦАП, що використовують генератори розрядних струмів. Такі генератори легко реалізуються на основі біполярної технології. При використанні генераторів струму внаслідок їх високого вихідного опору вплив ключів, що перемикають струми, буде вкрай незначно. Крім того використання принципу перемикання струмів дозволяє досягти високої швидкодії.

ЦАП, побудований на основі генераторів розрядних струмів з використанням матриці двійковозважених резисторів, показаний на рис. 1.9 а [2], [14], [15], [29], [30]-[34], [40]. Необхідний колекторний струм через джерело струму на базі транзистора VT0 примусово задається за

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- [1] А. П. Стахов, *Введение в алгоритмическую теорию измерения*. Москва, СССР: «Сов. Радио», 1977.
- [2] П. П. Орнатский, *Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые)*. 5-е изд. перераб. и доп. Киев, СССР: Вища школа, 1986.
- [3] Б. И. Швецкий, *Электронные цифровые приборы*. 2-е изд., перераб. и доп. Киев, СССР: Техника, 1991.
- [4] А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, и В. А. Фабричев, *Высокопроизводительные преобразователи формы информации*. Киев, СССР: Наукова думка, 1987.
- [5] В. Б. Смоллов, *Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации*. Ленинград, СССР: Энергия, 1975.
- [6] Э. И. Гитис, *Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств*. Изд. 3-е, перераб. Москва, СССР: Энергия, 1975.
- [7] Ю. М. Туз, *Структурные методы повышения точности измерительных устройств*. Киев, СССР: Высшая школа, 1976.
- [8] В. М. Шляндин, *Цифровые электроизмерительные приборы*. Москва, СССР: Энергия, 1972.
- [9] В. А. Никамин, *Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи*. Справочник. Москва, Россия: «Альтекс-А», 2003.
- [10] У. Кестер, *Аналого-цифровое преобразование*. Москва, Россия: Техносфера, 2007.
- [11] У. Титце, и К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника*. 12-е изд., Том II. Пер. с нем. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2007.

[12] О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, та Н. О. Біліченко, *Швидкодійні двотактні підсилювачі постійного струму з балансним зворотним зв'язком: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.

[13] Ю. Р. Гнатек, *Справочник по цифроаналоговым и аналого-цифровым преобразователям: Пер. с англ.* Москва, СССР: Радио и связь, 1982.

[14] А. Б. Гребен, *Проектирование аналоговых интегральных схем. Пер с англ.* Москва, СССР: «Энергия», 1976.

[15] A. B. Grebene, *Bipolar and MOS analog integrated circuit design*, Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2003.

[16] Oversampling Interpolating DACs by Walt Kester. Analog Devices, Inc., 2009. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/ru/training-seminars/tutorials/MT-017.pdf>.

[17] DACx0501 16-Bit, 14-Bit, and 12-Bit, 1-LSB INL, Voltage-Output DACs With Precision Internal Reference. Texas Instruments, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac80501.pdf>.

[18] AD5761/AD5721 Multiple Range, 16-/12-Bit, Bipolar/Unipolar, Voltage Output DACs, Analog Devices, Inc., 2018. [Online]. Available: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5761\\_5721.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5761_5721.pdf)

[19] DACx0502, Dual, 16-Bit, 14-Bit, and 12-Bit, 1-LSBINL, Voltage-Output DACs With Precision Internal Reference, Texas Instruments, 2020. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac80502.pdf>.

[20] DACx1001 20-Bit, 18-Bit, and 16-Bit, Low-Noise, Ultra-Low Harmonic Distortion, Fast-Settling, High-Voltage Output, Digital-to-Analog Converters (DACs), Texas Instruments, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac11001a.pdf>.

[21] DACx0508 Octal, 16-, 14-, 12-Bit, SPI, Voltage Output DAC with Internal Reference, Texas Instruments, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac80508.pdf>.

[22] DACx1001 20-Bit, 18-Bit, and 16-Bit, Low-Noise, Ultra-Low Harmonic Distortion, Fast-Settling, High-Voltage Output, Digital-to-Analog Converters (DACs), Texas Instruments, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac11001a.pdf>.

[23] LTC2662 Five-Channel, 300mA Current-Source-Output 16-/12-Bit Soft Span DACs, Analog Devices, 2019. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC2662.pdf>.

[24] AD5413 Single-Channel, 14-Bit Voltage and Current Output DAC with HART Connectivity, Analog Devices, 2020. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5413.pdf>.

[25] AD5600 High Temperature, 16-Bit, Unbuffered Voltage Output DAC, SPI Interface, Analog Devices, 2020. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5600.pdf>.

[26] В. Б. Топильский, *Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. Учебное издание.* Москва, Россия: ТЕХНОСФЕРА, 2014.

[27] R. J. van de Plassche, *High-speed and high-resolution analog-to-digital and digital-to-analog converters.* Eindhoven, The Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 1992.

[28] Г. Д. Бахтияров, В. В. Малмнин, и В. П. Школин, *Аналого-цифровые преобразователи.* Москва, СССР: Советское радио, 1980.

[29] У. Титце, К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем.* Москва, СССР: Мир, 1982.

- [30] Дж. Коннели, *Аналоговые интегральные схемы. Элементы, схемы, системы и применение*. Москва, СССР: Мир, 1977.
- [31] B. Razavi, *Principles of Data Conversion System Design*. New York, USA:IEEE Press, 1995.
- [32] R. van der Plassche, *CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters. 2nd Edition*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [33] G. Manganaro, *Advanced Data Converters*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [34] W. Kesler, *The Data Conversion HandBook*. Burlington, USA: Newnes, 2005.
- [35] С. Соклоф, *Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ.* Москва, СССР: Мир, 1988.
- [36] Н. Н. Прокопенко, и А. С. Будяков, *Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: монография*. Шахты, Россия: Изд-во ЮРГУЭС, 2006.
- [37] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Т. Г. Сапсай, та В. П. Тарасенко, *Теоретичні основи комп'ютерних напівпровідникових електронних компонентів : навчальний посібник*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
- [38] В. Л. Шило, *Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. 2-е изд., перераб. и доп.* Москва, СССР: Сов. радио, 1979.
- [39] Б. И. Горошков, *Радиоэлектронные устройства: Справочник*. Москва, СССР: Радио и связь, 1984.
- [40] Б. И. Швецкий, *Электронные цифровые приборы. 2-е изд., перераб. и доп.* Киев, СССР: Тэхніка, 1991.
- [41] А. Г. Алексеев, и Г. В. Войшвилло, *Операционные усилители и их применение*. Москва, СССР: Радио и связь, 1989.



[42] М. Х. Джонс, *Электроника – практический курс*. Москва, Россия: Техносфера, 2006.

[43] G. J. Frye, "Push-pull amplifier with current mirrors for determining the quiescent operating point", *United States Patent 3852678*, Dec. 3, 1974

[44] Y. Okabe, "Single ended push-pull amplifier", *United States Patent 4274059*, Jun. 16, 1981

[45] M. V. Hoover, "Class ab push-pull amplifiers", *United States Patent 4335360*, Jun. 15, 1982

[46] J. W. Wright, "Linear amplifier with transient current boost", *United States Patent 4833424*, May 23, 1989

[47] K. Lehmann, "Unity gain amplifier with high slew rate and high bandwidth", *United States Patent 5003269*, Mar. 26, 1991

[48] K. Lehmann, "Unity gain amplifier with high slew rate and high bandwidth other publications", *United States Patent 5177451*, Jan. 5, 1993

[49] N. Yoshioka, "Operational amplifier", *United States Patent 5515005*, May 7, 1996

[50] B. Harvey, "Current-feedback amplifier exhibiting reduced distortion", *United States Patent 6535064*, Mar. 18, 2003

[51] J. Weiss, "Differential amplifier with common mode regulator", *United States Patent 5557238*, Sep. 17, 1996.

[52] N. Gibson, and T. Hagan, "Ultra linear high speed operational amplifier output", *United States Patent 6794943*, Sep. 21, 2004

[53] A. L. Wennerberg, and A. F. Martz, "Bidirectional direct current transistor amplifier", *United States Patent 3332029*, July 18, 1967

[54] S. Yee, "Complementary emitter follower amplifier based for class a operation", *United States Patent 3418589*, Dec. 24, 1968

[55] L. K. Hill, "Class b amplifier circuit", *United States Patent 3529254*, Sept. 15, 1970

[56] У. Титце, К. Шенк *Полупроводниковая схемотехника. 12<sup>е</sup> изд. Том I: Пер. с нем.* Москва, Россия: ДМК Пресс, 2008.

[57] G. J. Frye, "Push-pull amplifier with current mirrors for determining the quiescent operating point", *United States Patent 3852678*, 12.10.1976.

[58] С. М. Зи, *Физика полупроводниковых приборов, Т. 1.* Москва, СССР: Мир, 1984.

[59] B. Duncan, *High Performance Audio Power Amplifiers.* Burlington, USA: Newnes, 1996.

[60] Уин Палмер, «Быстродействующий прецизионный усилитель-преобразователь сопротивлений», *Электроника*, №1, с.77-82, 1988.

[61] О. Д. Азаров, та В. А. Гарнага, *Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються: монографія.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011.

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

[63] А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, А. Е. Рафалюк, и В. В. Лысюк, «Входное устройство схемы сравнения токов», *А.с. 1363452 СССР*, 01.09.87.

[64] А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко, и М. И. Демин, «Входное устройство схемы сравнения токов», *А.с. 1450098 СССР*, 07.01.89.

[65] А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко, и В. П. Марценюк, «Входное устройство схемы сравнения токов», *А.с. 1455387 СССР*, 30.01.89.

[66] А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Марценюк, и В. П. Волков, «Двухтактный усилитель мощности», *А.с. 1497713 СССР*, 30.07.89.

[67] А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, Ю. М. Степайко, и Л. В. Крупельницкий, «Входное устройство схемы сравнения токов», *А.с. 1529434 СССР*, 15.12.89.

[68] А. Д. Азаров, Ю. М. Степайко, Е. М. Арапова, и Т. А. Савчук, «Усилитель тока», *А.с. 1739476 СССР*, 07.06.92.

[69] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, О. О. Решетник, та О. О. Лукашук, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 18599 Україна*, 15.11.2006.

[70] О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. О. Лукашук, С. В. Богомолов, та Л. В. Крупельницький, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 22671 Україна*, 25.04.2007.

[71] О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, О. О. Лукашук, та О. М. Тарасова, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 23898 Україна*, 11.06.2007.

[72] О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, О. О. Решетник, та В. А. Гарнага, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 26493 Україна*, 25.09.2007.

[73] О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, Л. В. Крупельницький, О. О. Решетник, та В. А. Гарнага, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 26771 Україна*, 10.10.2007.

[74] О. Д. Азаров, М. Ю. Шабатура, та С. В. Богомолов, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 41857 Україна*, 10.06.2009.

[75] О. Д. Азаров, С. О. Мельник, С. В. Богомолов, та І. К. Ходжаніязов, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 42149 Україна*, 25.06.2009.

[76] О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, та Д. О. Кириченко, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 52764 Україна*, 10.09.2010.

[77] О. Д. Азаров, І. К. Ходжаніязов, С. В. Богомоллов, та С. О. Мельник, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 53416 Україна*, 11.10.2010.

[78] О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, та Л. В. Крупельницький, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 53917 Україна*, 25.10.2010.

[79] О. Д. Азаров, С. О. Мельник, С. В. Богомоллов, та М. Ю. Шабатура, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 58787 Україна*, 26.04.2011.

[80] О. Д. Азаров, В. Є. Яцик, М. Ю. Теплицький, та В. А. Гарнага, «Двотактний симетричний підсилювач струму», *Пат. 61272 Україна*, 11.07.2011.

[81] О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, та В. Я. Стейскал, «Похибки лінійності передатної характеристики вхідного каскаду двотактних підсилювачів струму», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 19, № 3, с. 4-12, 2010.

[82] О. Д. Азаров, та С. В. Богомоллов, «Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 21, № 2, с. 4-11, 2011.

[83] L. T. Harrison, *Current Sources & Voltage References*, Burlington, USA:Newnes, 2005.

[84] Fluke Corporation, A practical approach to maintaining DC reference standards, 2000. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/>

[85] K. R. Saller, and K. R. Rentel, "Offset reduction in unity gain buffer amplifiers", *United States Patent 4639685*, Jul.18, 1985.

[86] D. M. Monticelli, and J. W. Wright, "High speed current amplifier buffer circuit", *United States Patent 4791383*, Dec. 13, 1988.

[87] W. H. Gross, “Buffer amplifier”, *United States Patent 4827223*, May 2, 1989.

[88] S. O. Smith; and K. A. Thompson, “Wideband buffer amplifier with high slew rate”, *United States Patent 5049653*, Sep. 17, 1991.

[89] D. R. Frey, and J. W. Pierdomenico, “Input buffer with reduced offset for operational amplifiers or the like”, *United States Patent 5212457*, May 18, 1993.

[90] J. E. Bales, “Class ab complementary transistor output stage having large output swing and large output drive”, *United States Patent 5786731*, Jul. 28, 1998.

[91] K. W. Murray; and J. M. Halbert, “Bias rail buffer circuit method”, *United States Patent 6297699*, Oct. 2, 2001.

[92] О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, О. О. Лукашук, «Буферний каскад», *Пат. 15896 Україна*, 17.07.2006.

[93] О. Д. Азаров, О. О. Лукашук, та С. В. Богомолов, «Буферний каскад», *Пат. 21553 Україна*, 15.03.2007.

[94] О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, О. О. Лукашук, та Л. В. Крупельницький, «Буферний каскад», *Пат. 22794 Україна*, 25.04.2007.

[95] О. Д. Азаров, О. В. Кадук, В. В. Ратнюк, та Л. В. Крупельницький, «Буферний каскад», *Пат. 23906 Україна*, 11.06.2007.

[96] О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, О. О. Лукашук, Л. В. Крупельницький, та О. М. Тарасова, «Буферний каскад», *Пат. 24882 Україна*, 25.07.2007.

[97] О. Д. Азаров, М. О. Притула, О. В. Головатюк, та Л. В. Крупельницький, «Буферний каскад», *Пат. 38423 Україна*, 12.01.2009.

[98] О. Д. Азаров, М. О. Притула, О. В. Головатюк, та Л. В. Крупельницький, «Буферний каскад», *Пат. 38424 Україна*, 12.01.2009.

[99] О. Д. Азаров, І. К. Ходжаніязов, С. В. Богомолів, та С. О. Мельник, «Буферний каскад», *Пат. 49578 Україна*, 26.04.2010.

[100] О. Д. Азаров, О. В. Дудник, С. В. Богомолів, та О. В. Кадук, «Буферний каскад», *Пат. 51014 Україна*, 25.06.2010.

[101] О. Д. Азаров, та С. В. Богомолів, «Прецизійні буферні пристрої на базі двотактних симетричних структур», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3, с. 4-12, 2011.

[102] Н. Т. Chang, "Low-Power High-Performance SAR ADC with Redundancy and Digital Background Calibration", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2013.

[103] О. Д. Азаров, *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія*, Вінниця, Україна:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010.

[104] 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.

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

[106] 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.

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

[108] О. Д. Азаров, О. В. Кадук, та О. В. Дудник, «Кориговані і некориговані похибки багаторозрядних ПФІ, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2, с.99-109, 2009.

[109] О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, С. М. Захарченко, О. О. Лукашук, та О. М. Харьков, «Формування нерозривних передатних характеристик ЦАП і АЦП на основі вагової надлишковості», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3(7), с.7-14, 2006.

[110] О. Азаров, М. Обертюх, С. Кирилашук, Резистивні матричні дільники струму для багаторозрядних цап із ваговою надлишковістю, *ІТКІ*, 2019, vol 2, № 45, с. 33-39, DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2019-45-2-33-39>

[111] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, Резистивні дільники струму для багаторозрядних надлишкових ЦАП, *Матеріали конференції «XLIX Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2020)»*, Вінниця, 2020, Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2020>.

[112] А. И. Лебедев, *Физика полупроводниковых приборов*, Москва, Россия: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

[113] Intersil Corporation™, HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models, 1994. [Online]. Available: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>

[114] О. Азаров, та М. Обертюх, “Генератори однакових струмів із високими вихідними опорами для багаторозрядних ЦАП”, *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 3, № 46, с. 33-39, 2019. doi: 10.31649/1999-9941-2019-46-3-28-38

[115] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Генератори однакових розрядних струмів із високими вихідними опорами для ЦАП», на *XII Міжнародній науково-практичній конференції «ІНТЕНЕТ-ОСВІТА НАУКА» (ІОН-2020)*, Вінниця : ВНТУ, 2020, с. 99-101.

[116] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Високолінійні спеціалізовані струмові дзеркала з давачами рівня сигналу», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3(40), с. 30-36, 2017.

[117] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Двотактні перетворювачі напруга–струм і струм–струм змінного напрямку», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6(135), с. 128-134, 2017.

[118] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Спеціалізовані двотактні підсилювачі струму для перетворювачів аналогових сигналів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1(136), с. 117-125, 2018.

[119] О. Д. Азаров, С. Ш. Кацев, та М. Р. Обертюх, «Двотактні перетворювачі струм-струм і напруга-струм із комутацією вихідного сигналу», *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, №1, с. 1-8, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/533/524>

[120] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, С. А. Кирилащук, «Струмове дзеркало», *Патент на корисну модель 134333 Україна*, 10.05.2019.

[121] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, Л. Є. Азарова, «Струмове дзеркало», *Патент на корисну модель 134332 Україна*, 10.05.2019.

[122] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, Л. Є. Азарова, «Струмове дзеркало», *Патент на корисну модель 134331 Україна*, 10.05.2019.

[123] О. Д. Азаров, С. В. Павлов, М. Р. Обертюх, «Генератор струму зсуву нуля», *Патент на корисну модель 135997 Україна*, 25.07.2019.

[124] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, «Генератор струму зсуву нуля», *Патент на корисну модель 136566 Україна*, 27.08.2019.



[125] О. Д. Азаров, Р. М. Медяний, М. Р. Обертюх, С. Ш. Кацев, «Відбивач струму», *Патент на корисну модель 136282 Україна*, 12.08.2019.

[126] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, О. О. Лукашук, «Двотактний підсилювач постійного струму», *Патент на корисну модель 140168 Україна*, 10.02.2020.

[127] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Високолінійні спеціалізовані струмові дзеркала для аналогової частини багатоканальних АЦП», на *XLVII Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)*, Вінниця, 2018, с. 962-964. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/index/pages/view/zbirn2018>.

[128] И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев, *Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. изд. 9-е стереотипное*, Москва, СССР: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1962.

[129] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Спеціалізовані двотактні підсилювачі струму для аналогової частини багатоканальних АЦП», на *XLVIII Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2019)*, Вінниця, 2019, с. 629-634. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/index/pages/view/zbirn2019>.

[130] 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.

[131] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, Д. В. Лизогуб, «Буфер напруги», *Патент на корисну модель 140196 Україна*, 10.02.2020.

[132] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. Я. Стахов, Д. В. Лизогуб, «Буфер напруги», *Патент на корисну модель 140786 Україна*, 10.03.2020.

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

[134] И.П. Степаненко, *Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп.*, Москва, Россия: Лаборатория базовых знаний, 2001.

[135] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Двотактні балансні буфери напруги для систем ЦА-накопичення інформації», на *L Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2021)*, Вінниця, 2021, с. 403-407. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2021>

[136] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та М. Р. Обертюх, «Термокомпенсовані двополюсні джерела постійного струму кільцевого типу», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1(130), с. 78-84, 2017.

[137] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та М. Р. Обертюх, «Джерело опорної напруги на основі генератора термостабільного струму», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1(38), с. 41-47, 2017.

[138] О.Д. Азаров, В.А. Гарнага, М.Р. Обертюх, «Джерело опорної напруги», *Патент на корисну модель 117377 Україна*, 26.06.2017.

[139] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Є. В. Грабовський, М. Р. Обертюх, «Двополюсне джерело струму», *Патент на корисну модель 120314 Україна*, 25.10.2017.

[140] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Д. А. Моторнюк, М. Р. Обертюх, «Двополюсне джерело струму», *Патент на корисну модель 120289 Україна*, 25.10.2017.

[141] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, О. О. Гудименко, М. Р. Обертюх, «Відбивач струму», *Патент на корисну модель 120580 Україна*, 10.11.2017.

[142] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, О. М. Тарасова, «Джерело стабілізованої напруги», *Патент на корисну модель 123753 Україна*, 12.03.2018.

[143] О. Д. Азаров, С. В. Павлов, М. Р. Обертюх, «Джерело опорної напруги», *Патент на корисну модель 123758 Україна*, 12.03.2018.

[144] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, М. Р. Обертюх, «Джерело опорної напруги», *Патент на винахід 117711 Україна*, 10.09.2018.

[145] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, С. А. Кирилащук, «Джерело струму змінного напрямку», *Патент на корисну модель 135998 Україна*, 25.07.2019.

[146] О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, Л. В. Крупельницький, «Джерело струму змінного напрямку», *Патент на корисну модель 136276 Україна*, 12.08.2019.

[147] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Джерела стабільного струму для багаторозрядних АЦП і ЦАП», на *Шостій Міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації»*, Вінниця, 2017, с. 143-145.

[148] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, «Двополюсні джерела термостабільного постійного струму», на *XLVI Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2017)*, Вінниця, 2017, с. 883-884. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/index/pages/view/zbirn2017>.

[149] Olexiy D. Azarov, Maxim R. Obertyukh, Patryk Panas, Piotr Kisała, Gulzhan Kashaganova, Saltanat Amirgaliyeva, “Analogue part of multichannel highly productive analog-digital system on converters and switches of current”, *Przeegląd elektrotechniczny*, R. 95, NR. 4, pp. 116-120, 2019. doi:10.15199/48.2019.04.20

[150] М. А. Амелина, С. А. Амелин, *Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10*, Смоленск, Россия: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012.

[151] І. В. Хом'юк, М. Р. Обертюх, «Деякі аспекти організації роботи студентів на заняттях з вищої математики», на *Міжнародній науково-методичній Інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності»*, Вінниця, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/pmovc/pmovc/paper/view/5616>.

*Наукове видання*

**Азаров Олексій Дмитрович  
Обертюх Максим Романович**

**Високолінійне надлишкове цифроаналогове  
перетворення з ваговою надлишковістю  
на основі генераторів однакових струмів**

Монографія

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

Підписано до друку 9.12.2022 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 5,54.  
Наклад 14 пр. Зам. № В2022-09.

Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
**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.