

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. Д. Азаров, Н. О. Біліченко, С. М. Захарченко

**ШВИДКОДІЙНІ ВИСОКОТОЧНІ АЦП
ІЗ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ
З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ,
ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.375:004.3

ББК 32.971.31-041

A35

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 31.03.2016 р.)

Рецензенти:

Р. Н. Кветний, доктор технічних наук, професор

Є. Т. Володарський, доктор технічних наук, професор

Азаров, О. Д.

Швидкодійні високоточні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, Н. О. Біліченко, С. М. Захарченко. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 140 с.

ISBN 978-966-641-665-3

У монографії детально розглянуто принципи комплексного підвищення точності швидкодії АЦП із перерозподілом заряду, що базуються на використанні вагової надлишковості та застосуванні цифрового самокалібрування. Використання конденсаторних матриць драбинкового та комбінованого типів дозволило значно збільшити швидкодію перетворювача за рахунок зменшення тривалості перехідних процесів. Запропоновано низку оригінальних рішень як на рівні структур та алгоритмів, так і на рівні реалізації окремих аналогових вузлів.

УДК 621.375:004.3

ББК 32.971.31-041

ISBN 978-966-641-665-3

© О. Азаров, Н. Біліченко, С. Захарченко, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНІКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ З ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ	7
1.1 Сучасні методи побудови АЦП із перерозподілом заряду	7
1.2 Огляд традиційних шляхів покращення характеристик АЦП з перерозподілом заряду	16
1.3 Аналіз шляхів використання інформаційної надлишковості для покращення характеристик АЦП на комутованих конденсаторах	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АЦП ПОРОЗРЯДНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ ІЗ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ	36
2.1 Математичні моделі перехідних процесів у конденсаторних матрицях на основі НПСЧ	36
2.2 Перехідні процеси в конденсаторній матриці вагового типу	46
2.3 Математична модель процесу порозрядного врівноваження для АЦП із перерозподілом заряду на основі НПСЧ.....	54
РОЗДІЛ 3 ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ПОХИБКИ ШВИДКОДІЙНИХ АЦП З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ ІЗ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ	67
3.1 Статичні режими роботи АЦП із перерозподілом заряду.....	67
3.2 Аналіз статичних похибок конденсаторних матриць драбинкового та комбінованого типів.....	75
3.3 Вплив відхилень номіналів конденсаторів на похибки формування ваг розрядів.....	86
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ШВИДКІСНИХ ВИСОКОТОЧНИХ АЦП ІЗ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ	96
4.1 Методи підвищення точності АЦП із перерозподілом заряду на основі НПСЧ.....	96
4.2 Реалізація самокаліброваних АЦП із перерозподілом заряду на основі НПСЧ	99
4.3 Реалізація самокаліброваних АЦП із перерозподілом заряду на основі НПСЧ з розрядними коефіцієнтами $\{1, \bar{1}\}$	107
4.4 Рекомендації щодо проектування аналогових вузлів АЦП із перерозподілом заряду	114
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124

ВСТУП

Світ, що нас оточує, є джерелом аналогових сигналів. До аналогових сигналів відносять інтенсивність звуку, тиск, температуру тощо. Аналогові сигнали є безперервною функцією часу. Однак сучасні процесори можуть обробляти здебільшого цифрові сигнали, які є дискретними у часі. Електронні аналогові обчислювачі характеризуються значно меншою гнучкістю і функціональністю. Саме тому більшість сучасних систем обробки інформації мають у своєму складі аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП). Найбільш важливими проблемами, які були і залишаються для цих пристроїв є підвищення точності та швидкодії, зменшення споживаної потужності, забезпечення якісної роботи в широкому діапазоні температур та протягом тривалого часу експлуатації.

Серед сучасних перетворювачів форми інформації (ПФІ) можна виділити клас пристроїв, що реалізований з використанням техніки комутованих конденсаторів. Відмітною рисою цих пристроїв є те, що практично всі етапи аналого-цифрового або цифро-аналогового перетворення являють собою процес перерозподілу заряду, який відповідає рівню вхідного сигналу. Такий підхід має низку беззаперечних переваг. По-перше, відпадає необхідність у використанні схеми вибірки та зберігання, оскільки ця функція є вбудованою для будь-якого перетворювача на комутованих конденсаторах. По-друге, для побудови цих пристроїв використовується обмежене коло компонентів: конденсатори, ключові елементи, операційні підсилювачі та компаратори. Завдяки сучасному розвитку технології всі вищезгадані пристрої досить легко реалізуються в інтегральному виконанні. По-третє, сам принцип функціонування таких пристроїв передбачає значно менше споживання потужності порівняно з АЦП, що використовують ЦАП резистивного типу.

За останні п'ять років було досягнуто значних успіхів у галузі субмікронних КМОН технологій, на основі яких виготовляються сучасні аналогові інтегральні мікросхеми. Ці технології прийшли на зміну більш дорогим, з меншою повторюваністю параметрів, БіКМОН тех-

нологіям. Фактично сучасна КМОН технологія є реальною основою для створення нового покоління високоякісних перетворювачів.

Важливою перевагою КМОН-структур є те, що ця технологія дозволяє простим способом реалізувати конденсатор, який є одним з основних елементів АЦП на комутованих конденсаторах. Крім того, точність виконання конденсаторів за КМОН-технологією значно краща за точність виконання резисторів. Так відносна похибка під час виготовлення конденсаторів у типових МОН-технологіях майже в 7 разів менша за похибку виготовлення інтегральних резисторів за дифузійною технологією, та вдвічі менша порівняно з технологією іонної імплантації, а температурний коефіцієнт інтегрального конденсатора майже в 100 разів менший порівняно з аналогічним показником дифузійних резисторів, та майже в 20 разів менший порівняно з резисторами, що виконані за технологією іонної імплантації [1].

Серед головних недоліків перетворювачів цього класу слід відзначити дещо меншу швидкодію порівняно з біполярними пристроями. Крім того для отримання високої роздільної здатності виникає необхідність у реалізації інтегральних конденсаторів великої ємності [2].

Найпоширенішими різновидами АЦП на комутованих конденсаторах є АЦП порозрядного врівноваження із перерозподілом заряду (ПЗ) [3], сігма-дельта АЦП [4–8], циклічні АЦП [9–13], послідовно-паралельні або багатокрокові флеш-АЦП [14, 15]. Значна кількість продукції світових лідерів аналого-цифрової техніки фірм *Texas Instruments* та *Analog Devices* є пристроями, що реалізовані за технологією комутованих конденсаторів [16–20]. Питаннями створення АЦП цього класу займалися наукові школи В. М. Шляндіна [10, 21, 22] (АЦП на основі генераторів градуйованих імпульсів), Б. І. Швецького [23–25] (АЦП на основі експонентних струмів), А. І. Кондалєва, В. О. Романова [26–39]. Крім того, загальні принципи побудови та покращення характеристик АЦП досліджувались та розроблялись у наукових школах В. Б. Смолова [40–51], Е. І. Гітіса [52–55], П. П. Орнатського [56–60], М. В. Аліпова [61–63]. Однак, їх розробки не знайшли широкого розповсюдження через технологічні обмеження. Слід також відзначити роботи, присвячені побудові логарифмічних АЦП на комутованих конденсаторах [64, 65].

Питання підвищення точності та швидкодії АЦП на комутованих конденсаторах на сьогоднішній день є дуже актуальними. Це пояснюється широким застосуванням цих пристроїв у різноманітних системах збору та обробки інформації, цифрових системах звуко- та відеозапису, сучасній медичній апаратурі тощо. Технологічні шляхи розв'язання цієї задачі мають принципові обмеження. Так використання лазерного припасування елементів крім суттєвого збільшення вартості виробництва, додатково спричиняє погіршення температурних параметрів, зменшує надійність пристроїв.

Інший підхід щодо покращення характеристик АЦП та ЦАП свого часу було запропоновано О. Д. Азаровим. Особливістю цього підходу є те, що він дає принципову можливість побудови високоточних АЦП та ЦАП на неточній елементній базі. Низькоточними аналоговими вузлами (елементами) вважаються такі, первинні похибки яких перевищують (іноді значно, на один, два порядки) підсумкову похибку перетворення. Низькоточні вузли є більш технологічними і дешевими. Таким чином усувається пряма залежність між точністю пристроїв та рівнем технологічного розвитку виробництва. Такий підхід базується на використанні інформаційної надлишковості у вигляді надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [66–82].

На сьогоднішній день проведено низку наукових досліджень у цьому напрямку [66, 71, 72]. Значну кількість розроблених рішень було запатентовано ще в колишньому СРСР [83–91]. Застосування НПСЧ для покращення характеристик АЦП на комутованих конденсаторах є відносно новим напрямом досліджень. Найбільш вагомими роботами в цьому напрямку є [92, 93]. Однак в цих роботах майже не приділено уваги дослідженню динамічних характеристик АЦП на комутованих конденсаторах, а методи підвищення точності АЦП із перерозподілом заряду обмежуються пристроями, побудованими на основі матриць вагового типу.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНІКИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ З ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ

1.1 Сучасні методи побудови АЦП із перерозподілом заряду

Сучасні інтегральні схеми АЦП реалізуються з використанням п'яти основних архітектур:

- порозрядного врівноваження (ПВ) на основі регістру послідовних наближень (SAR);
- дельта-сігма ($\Delta\Sigma$) АЦП;
- інтегруючі АЦП на основі керованого інтегратора (dual-slope / multi-slope);
- паралельні (flash) АЦП;
- паралельно-послідовні (subranging, two-flash, pipeline).

На рис. 1.1 згідно з [92] показано розташування АЦП, реалізованих за різними архітектурами в координатах «роздільна здатність / частота вибірки».

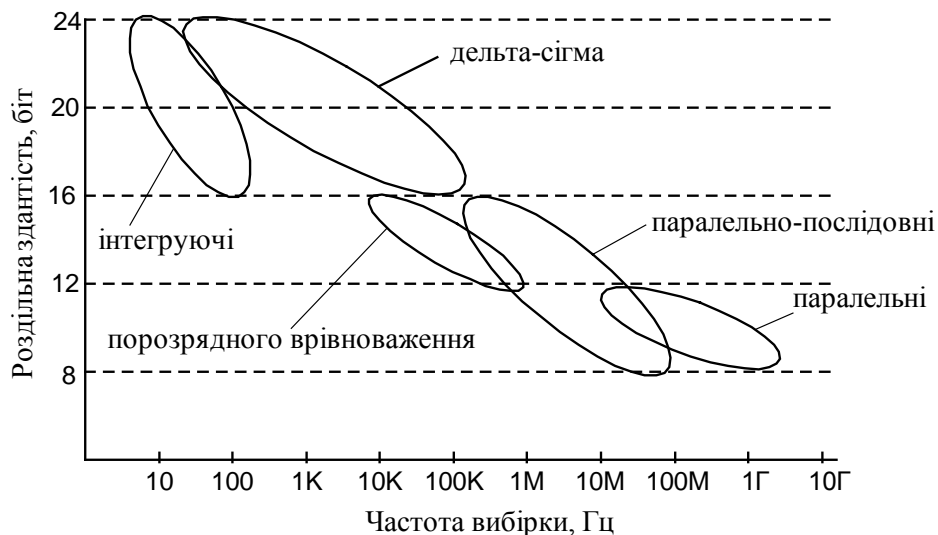


Рисунок 1.1 – Можливі архітектури АЦП в координатах «роздільна здатність і частота вибірки»

Центральне місце в прямому і непрямому сенсі займають АЦП порозрядного врівноваження. Бурхливий розвиток технології виготовлення інтегральних схем, структурних та схмотехнічних рішень щодо

покращення параметрів АЦП ПВ наблизив ці пристрої за швидкістю до паралельно-последовних АЦП, а за точністю і роздільною здатністю – до інтегруючих АЦП. З іншого боку за схмотехнічною складністю, а як наслідок, і за споживчою потужністю ці пристрої суттєво виграють порівняно з паралельно-последовними і тим більш паралельними АЦП.

Структурну схему типового АЦП ПВ [92] наведено на рис. 1.2.

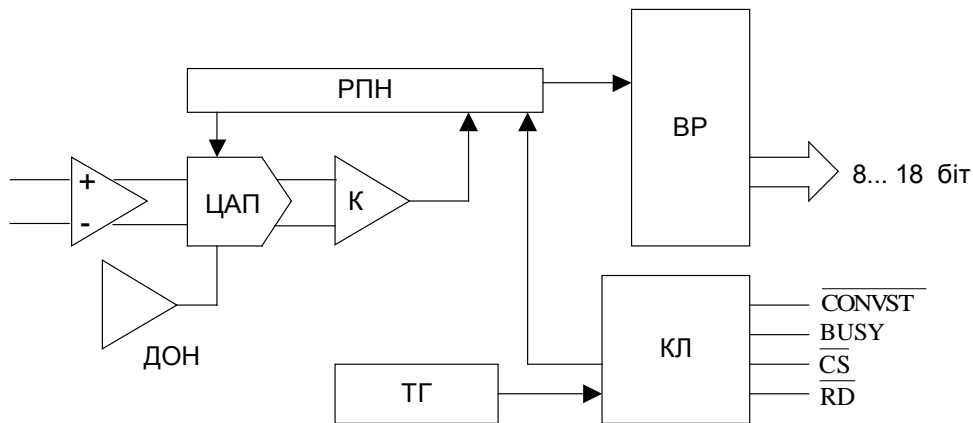


Рисунок 1.2 – Структурна схема типового АЦП ПВ

До складу пристрою входять буферний диференційний підсилювач, цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), компаратор (К), регістр последовних наближень (РПН), тактовий генератор (ТГ), керуюча логіка (КЛ) та вихідний регістр (ВР). Слід зауважити, що останнім часом в ІС АЦП ПВ все частіше використовується більш технологічний ЦАП ємнісного типу (Capacitive DAC), в якому вагові напруги формуються за допомогою перерозподілу заряду, а також забезпечується вбудована функція вибірки-зберігання. Саме такий підхід реалізовано в структурній схемі на рис. 1.2. Вхідний сигнал з виходу буферного підсилювача потрапляє на багатофункціональний ЦАП, який на першому етапі виконує функцію вибірки-зберігання. Далі за допомогою РПН та К здійснюється послідовне зважування розрядів від молодших до старших і формування вихідного коду. Слід зауважити, що для отримання n -розрядного вихідного коду за допомогою такого АЦП необхідно n тактів. Детальні принципи побудови та функціонування АЦП на основі конденсаторних ЦАП будуть розглянуті нижче.

Крім високої швидкодії (час перетворення сучасних 14–18 розрядних АЦП становить одиниці мікросекунд) до переваг таких пристроїв слід віднести невеликий розмір кристалу, низьку споживчу потужність, простоту використання.

Слід зауважити, що загальна точність та лінійність АЦП послідовного наближення безпосередньо визначаються параметрами внутрішнього ЦАП. До недавнього часу для досягнення високої точності використовувалась технологія лазерного припасування тонкоплівкових резисторів. Однак цей процес спричиняє суттєве збільшення вартості перетворювача, крім того параметри резисторів на тонких плівках є чутливими до механічних стресів, що відбуваються під час лакування кристалу (розміщення кристалу в корпус).

Саме тому технології комутованих конденсаторів є все більш популярними в сучасних АЦП послідовного наближення. Перевага ЦАП на комутованих конденсаторах полягає в тому, що точність і лінійність здебільшого визначаються високоточною фотолітографією, яка дозволяє точно задавати площу конденсатора та забезпечує високий рівень узгодження. Крім того паралельно з основними конденсаторами можуть бути розташовані конденсатори малої ємності, які за рахунок комутації на етапі автокалібрування дозволяють досягти високої точності та лінійності без потреби лазерного припасування.

Розбіжність температурних параметрів комутованих конденсаторів може бути меншою ніж $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, таким чином легко забезпечити високий рівень температурної стабільності.

Залежно від структури цифро-аналогового перетворювача, що покладений в основу АЦП із перерозподілом заряду, виділяють АЦП на базі ЦАП вагового, драбинкового та комбінованого типу. Розглянемо детальніше ці структури.

Структуру n-розрядного АЦП із перерозподілом заряду на основі конденсаторної матриці вагового типу [3] зображено на рис. 1.3. Вона складається зі схеми порівняння СП, матриці конденсаторів, що є двійково-зваженими, одного додаткового конденсатора, ємність якого збігається з ємністю конденсатора наймолодшого розряду, а також ключових елементів, що комутують конденсатори згідно з визначеним алгоритмом. Перетворення здійснюється послідовно в три етапи: дискретизації, перехідної фази та врівноваження.

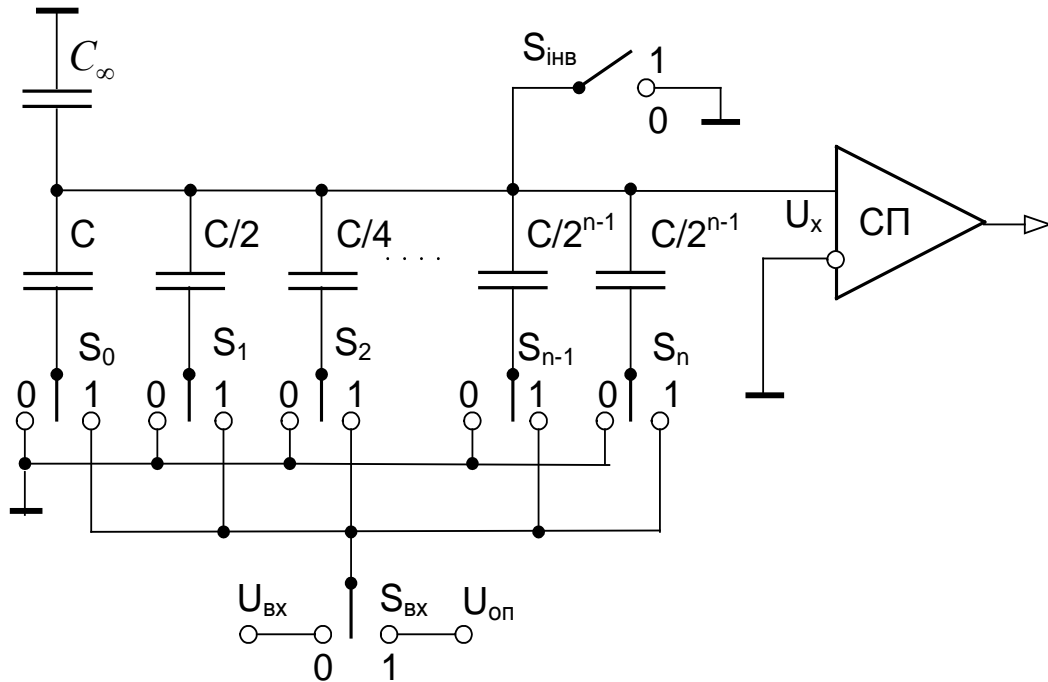


Рисунок 1.3 – АЦП з перерозподілом заряду на основі конденсаторної матриці вагового типу

На етапі дискретизації верхні обкладинки конденсаторної матриці замкнені на «землю», а на нижні обкладинки подається вхідна напруга $U_{вх}$. Для цього $S_{інв}$ та $S_{вх}$ перемикається у стан 0, а $S_0 - S_n$ – у стан 1. На етапі перехідної фази всі ключові елементи перемикаються в протилежний стан, тобто $S_{інв}$ та $S_{вх}$ в 1, $S_0 - S_n$ – в 0. В результаті цієї дії вхідна напруга компаратора дорівнюватиме $-U_{вх}$. Далі виконується операція врівноваження: спочатку перевіряється старший двійковий розряд шляхом подавання на конденсатор C опорної напруги (ключ S_0 у стані 1). При цьому схема є дільником напруги між двома конденсаторами однакової ємності. Таким чином, напруга U_x на цьому кроці

$$U_x = -U_{вх} + U_{оп} / 2.$$

Схема порівняння визначає знак напруги U_x . На виході СП установлюється 0, коли $U_x < 0$ ($U_{вх} > U_{оп} / 2$). Це означає, що старший двійковий розряд дорівнює 1. Стан 1 на виході компаратора з'являється тоді, коли $U_x > 0$ ($U_{вх} < U_{оп} / 2$), тобто старший двійковий розряд дорівнює 0. Вихідний сигнал компаратора записується в

регістр, або безпосередньо подається на вихід перетворювача. Крім того, у випадку, коли старший двійковий розряд дорівнює нулю, ключ S_0 перекомутується на «землю».

Аналогічно отримуються значення інших розрядів, які є результатами перетворення. На етапі визначення останнього (наймолодшого) розряду вхідна напруга компаратора

$$U_x = -U_{вх} + b_{n-1} \cdot \frac{U_{on}}{2} + b_{n-2} \cdot \frac{U_{on}}{4} + \dots + b_1 \cdot \frac{U_{on}}{2^{n-1}} + \frac{U_{on}}{2^n},$$

де $b_i \in \{0,1\}$ – розрядні коефіцієнти, отримані на попередніх тактах врівноваження.

Слід відзначити, що на кінцевому етапі перетворення всі конденсатори, що реалізують коефіцієнт «0», розряджені, а заряд, що був попередньо накопичений і відповідає вхідній напрузі, розподілений між конденсаторами, що реалізують «одиниці».

Характерною рисою розглянутої структури є те, що ні паразитні ємності ключів $S_0 - S_n$, ні паразитні ємності верхніх обкладинок конденсаторної матриці фактично не впливають на точність перетворення. Перше пояснюється тим, що ємність ключа або розряджається до «землі», або заряджається до рівня U_{on} , але ніколи не абсорбує заряд із верхньої обкладинки. Цей факт дає змогу реалізувати ключі на транзисторах із досить широким каналом і забезпечити високу швидкість. Відсутність впливу паразитних ємностей верхніх обкладинок пояснюється алгоритмом функціонування перетворювача. Справа в тому, що напруга U_x в кінці перетворення дорівнює 0, тобто збігається із значенням U_x на етапі вибирання вхідного сигналу. Як наслідок, заряд на цій паразитній ємності в кінці перетворення такий самий, як і на етапі вибірки, тобто заряд похибки практично відсутній.

Слід також відзначити, що початкове значення U_x не обов'язково повинно дорівнювати 0. Цей факт дозволяє усунути вплив зсуву нуля конденсатора, запам'ятавши значення зсуву нуля на конденсаторній матриці в режимі вибірки.

АЦП із перерозподілом заряду на основі ЦАП вагового типу має один суттєвий недолік, пов'язаний з його інтегральною реалізацією.

Оскільки номінал ємності конденсатора пропорційний його площі, то при реалізації n -розрядного АЦП відношення площ наймолодшого та найстаршого конденсаторів дорівнюватиме 2^{n-1} , тобто при $n = 14$ приблизно дорівнює 10000. З цього приводу виникають дві проблеми. Перша пов'язана з обмеженою площею кристалу. Реалізація конденсаторів великої ємності за багат шаровою технологією має суттєві недоліки. Друга проблема – абсолютна точність виготовлення конденсаторів. Навіть при використанні прецизійної технології існування крайових ефектів, підтравлення маски та ін. призводить до того, що абсолютна похибка реалізації конденсаторів великої ємності може в кілька разів і навіть десятків разів бути більшою, ніж ємність наймолодшого конденсатора. Шляхи вирішення цих проблем в АЦП на основі ЦАП вагового типу будуть розглянуті нижче. Крім того, для зменшення діапазону ємностей конденсаторів, що використовуються для побудови ЦАП, можна скористатися структурами на основі конденсаторних матриць драбинкового [103] та комбінованого типу, які наведені відповідно на рис. 1.4 та рис. 1.5.

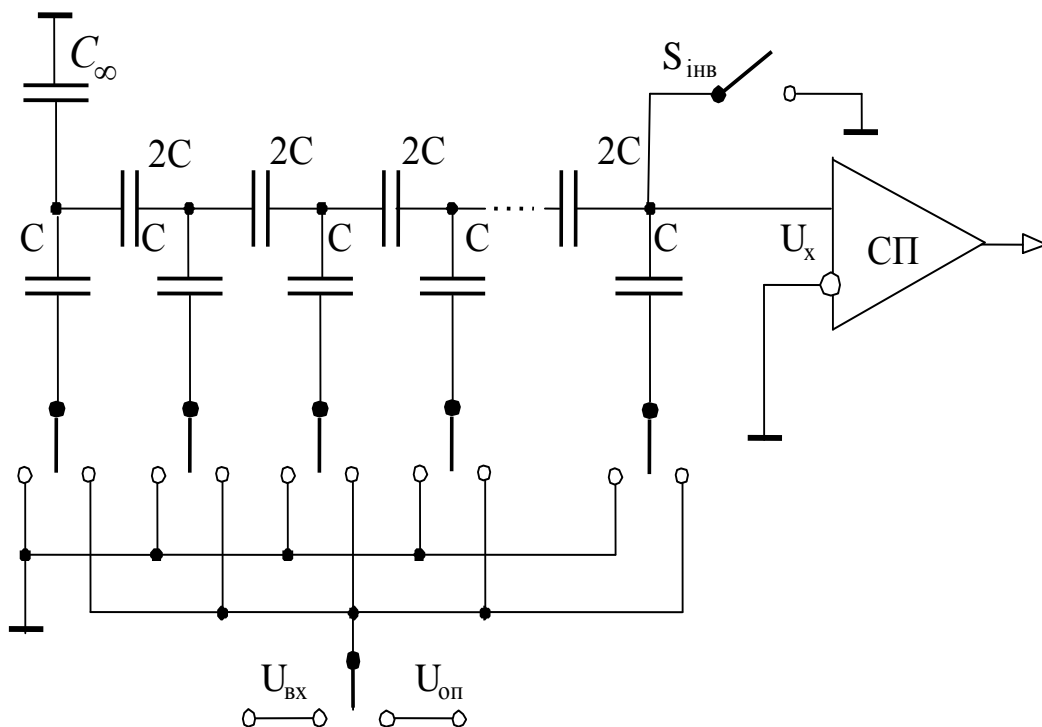


Рисунок 1.4 – АЦП з перерозподілом заряду на основі конденсаторної матриці драбинкового типу

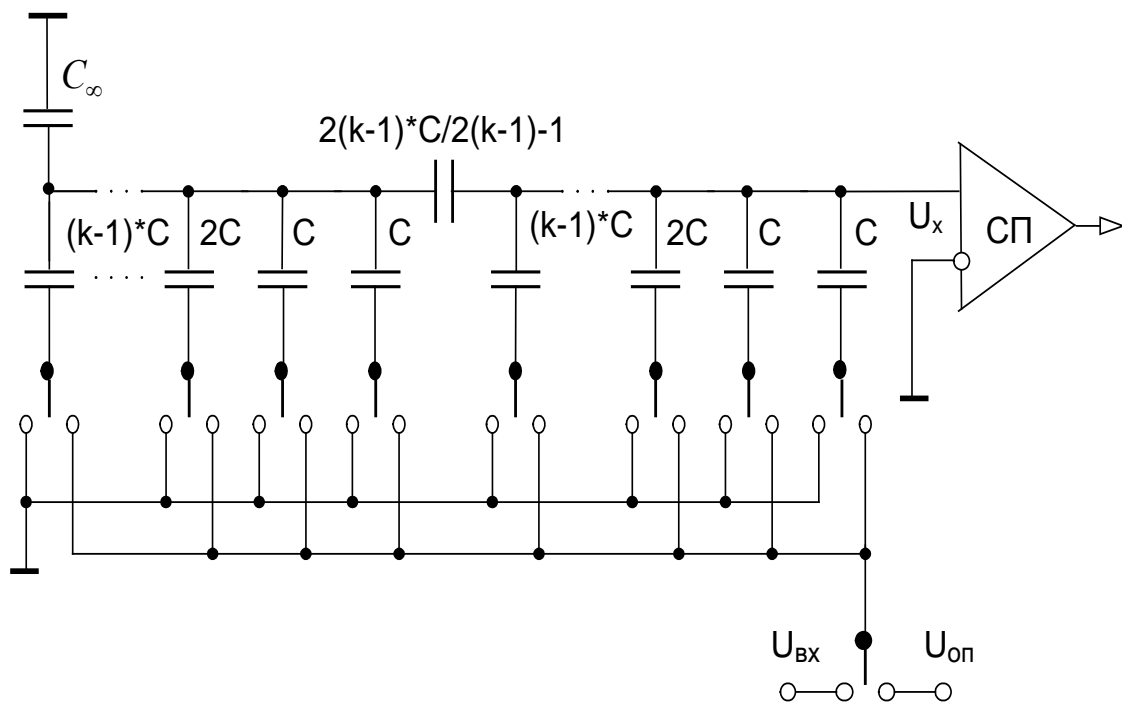


Рисунок 1.5 – АЦП з перерозподілом заряду на основі конденсаторної матриці комбінованого типу

Перетворювачі порозрядного врівноваження складають більшу частину номенклатури 14...18 розрядних інструментальних пристроїв фірми Analog Devices в діапазоні частоти вибірки 0,1–1 МГц. Оптова ціна 16-розрядних пристроїв визначається в діапазоні від 6\$ (без підстроювання нелінійності в процесі виготовлення) до 33\$ (з лазерним припасуванням). Деякі з них мають вхідний комутатор. Більшість сучасних АЦП цього класу реалізуються на основі ємнісного ЦАП з функцією пристрою вибірки-зберігання ПВЗ і випускаються під торговою маркою PulSAR. Один з найновіших пристроїв AD 7674 (2003 р.) має роздільну здатність 18 біт при інтегральній нелінійності 5 молодших значущих розрядів (МЗР) і диференційній нелінійності 2,75 МЗР. Для цього його оснащено схемою калібрування, робота якої, на жаль, не наводиться в довідкових матеріалах на ІС. В діапазоні температур -40..85 °С похибка коефіцієнта передавання складає $\pm 0,048\%$ повної шкали, а зсув нуля не перебільшує ± 85 МЗР. Повний час циклу перетворення в нормальному режимі становить 1,5 мкс.

На рис. 1.6 наведено функціональну схему AD 7674.

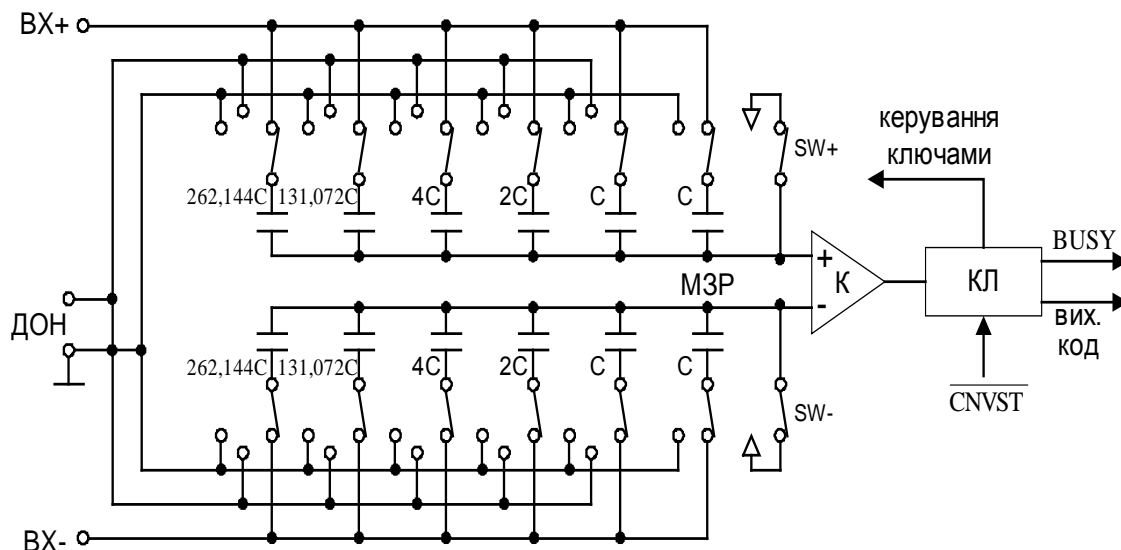


Рисунок 1.6 – Функціональна схема AD 7674

Під час такту вибірки входи компаратора під'єднано до аналогової загальної шини за допомогою ключів SW+ і SW-, а всі інші ключі під'єднано до аналогових входів. Тобто матриці конденсаторів виконують роль запам'ятовувальних конденсаторів ПВЗ (час вибірки 0,25 мкс, апертурна затримка 2 нс), заряджаючись до значень вхідної напруги на аналогових диференційних входах.

Після завершення фази вибірки починається фаза перетворення, і ключі SW+ і SW- позмикаються. Далі обидві матриці конденсаторів від'єднуються від входів і під'єднуються до загальної шини. Таким чином напруга поміж інвертуючим та неінвертуючим входами АЦП, яку було запам'ятовано в кінці фази вибірки, прикладається до входів компаратора і викликає його розбалансування. Врівноваження полягає в послідовному під'єднанні кожного конденсатора вагової матриці, починаючи зі старших розрядів, до входу джерела опорної напруги (ДОН). Найбільш швидкодійним з АЦП серії PulSAR – AD 7677 забезпечує час перетворення 1 мкс при рівні інтегральної нелінійності всього 2 МЗР завдяки лазерному припасуванню на кристалі. Характеристики деяких перетворювачів послідовного наближення фірми Analog Devices наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Мікросхеми АЦП послідовного врівноваження фірми Analog Devices

Тип	Роздільна здатність, біт	Інтегральна нелінійність (МЗР)	Макс. частота вибірки, кГц	Кількість вхідних каналів	Діапазон вхідної напруги, В	Формат вихідних даних	Напруги живлення, В	Розсіювана потужність, мВт	Тактовий генератор
AD7674	18	2,5	800	1	дифф. 5	посл./ пар.	+5	120(тип.)	внутрішній
AD7679	18	2,5	570	1	дифф. 5	посл./ пар.	+5	93(тип.)	внутрішній
AD7678	16	2,5	100	1	дифф. 5	посл./ пар.	+5	15(тип.)	внутрішній
AD677	16	1,5	100	1	дифф. 10	посл.	+5, +12,	480/630	зовнішній
AD676	16	1,5	100	1	дифф. 10	пар.	+5, +12,	480	зовнішній
AD7651	16	6	100	1	однополярна	посл./ пар.	+5	25	внутрішній
AD7660	16	3	100	1	однополярна	посл./ пар.	+5	25	внутрішній
AD7675	16	1,5	100	1	дифф.	посл./ пар.	+5	25	внутрішній
AD7680	16	4	100	1	однополярна	посл.	+2,7	16	внутрішній
AD7683	16	3	100	1	однополярна	посл.	+2,7 або +5	6	внутрішній
AD7684	16	3	100	1	дифф.	посл.	+2,7 або +5	6	внутрішній
AD976/ AD977	16	3	100	1	біполярна	пар./ посл.	+5	100	внутрішній
AD7677	16	1	1000	1	дифф. 5	посл./ пар.	+5	130	внутрішній
AD7655	16	6	1000	4	однополярна	посл./ пар.	+5	120	внутрішній
AD974	16	3	200	4	біполярна	посл.	+5	120	внутрішній

Іншим виробником АЦП послідовного наближення є фірма Intersil. Характеристики деяких пристроїв, що виготовляються цією фірмою, наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Мікросхеми АЦП ПВ фірми Intersil

Тип	Розряд-ність, біт	Інтегральна нелінійність, %	Макс. частота вибірки, кГц	Діапазон вхідної напруги, В	Формат вихідних даних	Напруга живлення, В	ДОН	Технологія
HI674A	12	0,5	-	однополярна, 20; біполярна, ± 10	пар., 8/12/16	$\pm 12 \dots \dots \pm 15$	зовн./внутр.	біполярна
HI5812	12	1	50	5	посл.	3...6	зовн.	КМОП
HI774/ 883	12	1	100	однополярна, 10; біполярна, ± 5	пар.	до ± 15	зовн./внутр.	біполярна

Маючи високу популярність, АЦП послідовного врівноваження від фірми Texas Instruments поставляються з широкою гамою роздільних здатностей, частот дискретизації, опцій введення-виведення, конструктивної реалізації і вартісних показників. Загалом Texas Instruments виготовляє більш ніж 120 серій АЦП послідовного врівноваження. В табл. 1.3 представлено АЦП ПВ, що готуються до виробництва, або що надійшли в серійне виготовлення протягом 2005-го року. Повний список АЦП цього типу є на сайті виробника [104].

Один з АЦП ПВ, 18-розрядний ADS 8381 гарантує відсутність пропусків кодів в промисловому температурному діапазоні при непоганих метрологічних параметрах: напруга зсуву не більше ± 750 мкВ і похибка коефіцієнта передавання не більше $\pm 0,075$ % повної шкали. Час вибірки АЦП складає 300 нс, апертурна затримка – 4 нс, апертурна невизначеність – 15 нас, повний цикл перетворення займає не більше 1,4 мкс.

1.2 Огляд традиційних шляхів покращення характеристик АЦП з перерозподілом заряду

Типовий АЦП з перерозподілом заряду в процесі своєї роботи проходить 3 фази – дискретизації, перехідної фази та врівноваження.

Таблиця 1.3 – АЦП ПВ від фірми Texas Instruments

Серія	Роздільна здатність (біт)	Частота дискретизації (KBPS)	Кількість вхідних каналів	Інтерфейс	Вх. сигнал (В)	ДОН	Лінійність (%)	Споживана потужність (мВт)	Сигнал/шум і спотворення SINAD (dB)
ADS8380	18	580	1 SE	Serial, SPI	VREF	Int / Ext	0,0018	90	100
ADS8382	18	580	1 Diff	Serial, SPI	$\pm VREF(4.1V)$ at 12 VREF	Int / Ext	0,0018	95	100
ADS8381	18	580	1 SE	P8/P16/P18	VREF	Ext	0,0018	88	100
ADS8411	16	2000	1 SE	P8/P16	(VREF) +4.1V	Int	0,00375	87	155
ADS8412	16	2000		P8/P16	$\pm VREF(4.1V)$ at 12 VREF	Int	0,00375	90	155
ADS8371	16	750	1 SE	P8/P16	+4.2V (VREF)	Ext	0,003	87	110
ADS7891	14	3000	1 SE	P8/P14	2.5	Int	0,009	78	90
ADS7890	14	1250	1 SE	Serial, SPI	2.5	Int	0,009	78	90
ADS7881	12	4000	1 SE	P8/P12	2.5	Int	0,024	71,5	110
ADS7869	12	1000		Serial, SPI/P12	± 2.5 at +2.5	Int / Ext	0,048	—	175
ADS7886	12	1000	1 SE	Serial, SPI	VDD (2.5V to 5.25V)	Ext	0,024	70	11
ADS7866	12	200	1 SE	Serial, SPI	VDD (1.2V to 3.6V)	Ext	0,024	70	0,25
ADS7887	10	1000	1 SE	Serial, SPI	VDD (2.5V to 5.25V)	Ext	0,05	61	11
ADS7867	10	200	1 SE	Serial, SPI	VDD (1.2V to 3.6V)	Ext	0,05	61	0,25
ADS7888	8	1000	1 SE	Serial, SPI	VDD (2.5V to 5.25V)	Ext	0,1	50	11
ADS7868	8	200	1 SE	Serial, SPI	VDD (1.2V to 3.6V)	Ext	0,1	50	0,25
ADS7830	8	75	8 SE/4Diff	Serial, 12C	VREF	Int / Ext	0,19	50	0,675

На етапі дискретизації заряд, що відповідає рівню вхідного сигналу, накопичується на конденсаторній матриці. Перехідна фаза полягає у інвертуванні сигналу на вході схеми порівняння. Фаза врівноваження налічує кількість кроків, що відповідає розрядності вихідного коду. Перша і остання фази роботи є найтривалішими і фактично визначають тривалість аналого-цифрового перетворення.

Так 18-ти розрядний перетворювач фірми Analog Devices AD7674 характеризується часом дискретизації $t_D = 0,25$ мкс, а час врівноваження $t_B = 1,25$ мкс. Тобто час дискретизації становить приблизно 20 % від часу врівноваження, або 16 % часу перетворення. Це співвід-

ношення може дещо змінюватись при зміні роздільної здатності АЦП як в бік збільшення, так і в бік зменшення.

Очевидно, що головним резервом підвищення швидкодії АЦП з перерозподілом заряду є зменшення тривалості часу врівноваження. Час врівноваження, в свою чергу, складається із низки кроків перерозподілу заряду, тривалість кожного з яких загалом визначається постійною часу τ , яка в першому наближенні розраховується як:

$$\tau = R_{KE} \cdot C_{\Sigma},$$

де R_{KE} – опір відкритого ключового елемента; C_{Σ} – сумарна ємність конденсаторної матриці.

Традиційними шляхами збільшення швидкодії досить природно є шляхи, спрямовані на зменшення τ . При цьому слід зауважити, що досягти суттєвого зменшення R_{KE} є досить проблематичним, оскільки передбачає суттєве збільшення ширини каналу польового транзистора. Враховуючи, що для забезпечення незалежності опору КЕ від прикладеної напруги, КЕ реалізовується у вигляді двох паралельно ввімкнених польових транзисторів з каналами p і n типу [1, 93], а також, враховуючи необхідність використання двопозиційних ключів на кожний розряд, згаданий підхід приведе до суттєвого збільшення загальної площі ключових елементів і зведе нанівець отриманий вигреш у швидкодії. Таким чином найбільш реальним шляхом зменшення тривалості перехідних процесів в конденсаторній матриці є зменшення C_{Σ} .

Використання двійково-зважених конденсаторних матриць для побудови ЦАП вперше було запропоновано ще в 1974 р. [3]. Оскільки загальна ємність матриці експонентно зростає зі збільшенням кількості розрядів, точність класичних двійково-зважених ЦАП як правило обмежується 8–10 розрядами. З іншого боку, великий діапазон номіналів конденсаторів породжує проблему точності молодших конденсаторів. Першим кроком, який було зроблено для подолання згаданих обмежень, була реалізація двокаскадної двійково-зваженої конденсаторної матриці [105], де конденсаторна матриця складається з двох двійково-зважених матриць, з'єднаних між собою узгоджувальним конденсатором. Якщо загальна ємність n -розрядної двійково-зваженої

конденсаторної матриці дорівнює $2^{n+1} \cdot C_0$, де C_0 – ємність наймолодшого конденсатора, то у випадку побудови двокаскадної матриці загальна ємність становитиме:

$$C_{\Sigma} = 2 \cdot 2^{\frac{n}{2}+1} \cdot C_0.$$

Подальшим розширенням ідеї багатокаскадних конденсаторних матриць є так звана матриця драбинкового типу С-2С [103] (див. рис. 1.4). В цьому випадку загальна ємність становитиме:

$$C_{\Sigma} = n \cdot 3C_0.$$

Особливістю такої реалізації є використання усього двох номіналів конденсаторів C_0 та $2C_0$, що дозволяє забезпечити високий рівень узгодженості їх параметрів [106]. В табл. 1.4 наведено результати розрахунку загальної ємності конденсаторної матриці для різних значень n за умови, що ємність C_0 дорівнює 1 пФ.

Таблиця 1.4 – Результати розрахунку ємності конденсаторної матриці

Структура	n	C_{Σ} (пФ)
двійково-зважена	8	512
	10	2048
	12	8192
двокаскадна двійково-зважена	8	64
	10	128
	12	256
С-2С	8	24
	10	30
	12	36

Не важко побачити, що у випадку двокаскадної матриці, а тим більше С-2С, загальна ємність зменшується в десятки і сотні разів, і як результат, постійна часу значно зменшується. Однак використання багатокаскадних, зокрема С-2С матриць для побудови ЦАП і АЦП має певні недоліки. Перший із них пов'язаний із порушенням принципу суперпозиції. В даному випадку вага окремого розряду АЦП визначається значеннями усіх конденсаторів матриці і відхилення номі-

налу одного з конденсаторів призведе фактично до зміни ваг усіх розрядів перетворювача. Цей факт суттєво ускладнює, а в деяких випадках робить практично неможливою процедуру самокалібрування ваг розрядів, що, в свою чергу, обмежує роздільну здатність АЦП рівнем 10–12 двійкових розрядів без можливості врахування температурних та часових змін.

Іншим недоліком С-2С структури є наявність паразитних ємностей на внутрішніх вузлах С-2С драбини, як це показано на рис. 1.7.

Вказані паразитні ємності погіршують лінійність схеми. Існують різні підходи для мінімізації цього паразитного ефекту. Один з шляхів передбачає використання тришарових конденсаторів для реалізації 8-бітової та 13-бітової матриці. Однак цей метод дуже складний для реалізації і навіть ігноруючи ускладнення технології не дозволяє повністю усунути вплив згаданого ефекту.

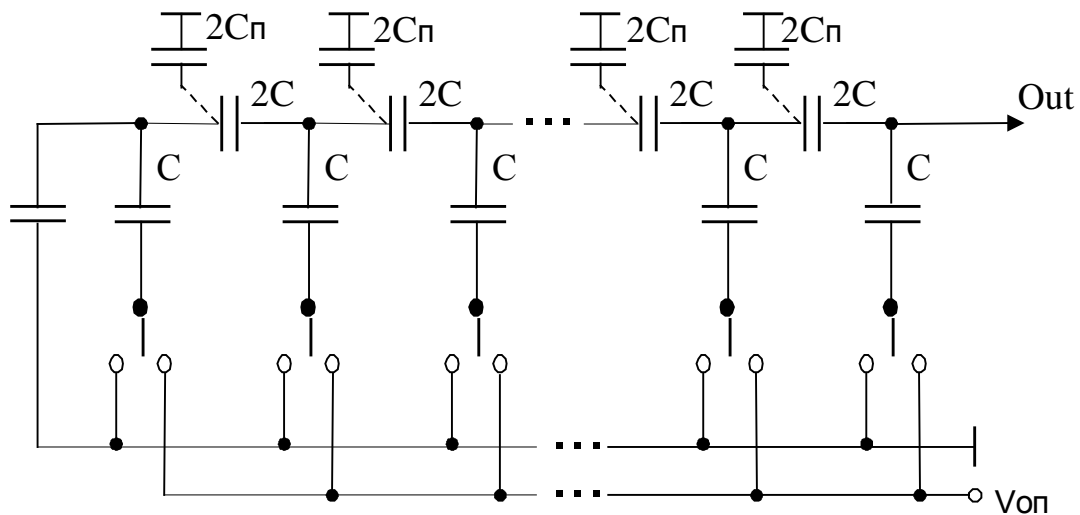


Рисунок 1.7 – С-2С матриця з паразитними ємностями

Інший підхід базується на врахуванні цих паразитних ємностей на рівні моделі конденсаторної матриці [107]. В цьому випадку відповідно до теореми Тевеніна (Thevenin) матриця на рис. 1.7 трансформується в еквівалентну драбинкову структуру, показану на рис. 1.8.

Головна ідея – це заміна С-2С матриці на С-2 α С матрицю і підбір такого співвідношення α в матриці, щоб збалансувати паразитний ефект і досягти необхідної точності. Кожний конденсатор С в еквівалентній матриці на рис. 1.8 є комбінацією ємності відповідної гілки С

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мулявка Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами / Ян Мулявка – М. : Мир, 1992. – 253 с.
2. Aparicio R. Capacity limits and matching properties of integrated Capacitors / R. Aparicio, A. Najmieri // IEEE J. Solid-State Circuits. – 2002. – V. 37, № 3. – P. 384–393.
3. McCreary J. L. All-MOS charge redistribution analog-to-digital conversion techniques – Part 1 / J. L. McCreary, P. R. Gray // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1975. – V. 10. – P. 371–379.
4. Bernhard E. Boser. The design of sigma-delta modulation analog-to-digital converters / Bernhard E. Boser, Bruce A. Wooley // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1988. – V. 23, № 6. – P. 35–37.
5. Гудинаф Ф. Интегральные аналого-цифровые преобразователи для диапазона звуковых частот / Фрэнк Гудинаф // Электроника. – 1989. – № 9. – С. 75–78.
6. Norsworthy S. R. A 14-bit 80-kHz sigma-delta A/D converter modeling, design and performance evaluation / S. R. Norsworthy, I. G. Post, H. S. Fetterman // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1989. – V. 24, № 2. – P. 256–266.
7. Hurst P. Delta-sigma ADC with Reduced Sensitivity to on AMP Noise and Gain / P. Hurst, R. Levinson // IEEE Int. Symp. Circuits and Syst. – 1989. – V. 1. – P. 34–39.
8. Гудинаф Ф. 20-разрядные дельта-сигма АЦП для измерительной аппаратуры / Фрэнк Гудинаф // Электроника. – 1991. – № 8. – С. 41–45.
9. Webb R.W. 12-bit A/D converter / R. W. Webb, F. R. Cooper, R. W. Randlet // ISSCC Dig. Tech. Papers. – 1980. – P. 54–55.
10. Шляндин В. М. Цифровые измерительные устройства : учеб. для вузов / Виктор Михайлович Шляндин. – М. : Высшая школа, 1981. – 335 с.

11. Lee C. C. A new switched-capacitor realization for cyclic analog-to-digital converter / C. C. Lee // Proc. ISCAS'83, Newport, CA. – 1983. – P. 1261–1265.
12. Li P. W. A ratio independent algorithmic analog-digital conversion technique / P. W. Li, M. Chin, P. R. Gray // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1984. – V. 19. – P. 828–836.
13. McCharles R. Charge circuits for analog LSI / R. McCharles, D. A. Hodges // IEEE Trans. Circuits Syst. – 1987. – V. 25. – P. 490–497.
14. Kerth D. A. A 12-bit 1-MHz two-step flash ADC / D. A. Kerth, N. S. Souch, E. J. Swanson // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1989. – V. 24, № 2. – P. 250–255.
15. Bang-Sup Song. A 10-bit 15-MHz CMOS recycling two-step A/D converter / Bang-Sup Song, Seung-Hoon Lee, Michael F. Tompset // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1990. – V. 25, № 6. – P. 1328–1338.
16. Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа : справочник / под ред. А. В. Перебаскина. – М. : Додэка, 1996. – 384 с.
17. Аналого-цифровые преобразователи. Информационный бюллетень фирмы Analog Devices // Электронные компоненты и системы. – 2000. – № 7 (35). – С. 19–30.
18. Kester W. Analog-Digital Conversion / W. Kester. – USA : Analog Devices Inc., 2004.
19. Mixed Signal Products 1996/97, Burr-Brown Corporation.
20. Analog Devices. WorldWide Headquarters. – USA, Norwood, 1993. – 160 p.
21. Цифровые электронно-измерительные приборы / Виктор Михайлович Шляндин, Владимир Викторович Богданов, Александр Александрович Богородицкий [и др.]. – М. : Энергия, 1972. – 400 с.
22. Шляндин В. М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы / Виктор Михайлович Шляндин. – М. : Высшая школа, 1973. – 280 с.

23. Швецкий Б. И. Электронные цифровые приборы / Б. И. Швецкий. – К. : Техника, 1981. – 247 с.
24. Швецкий Б. И. Электронные цифровые приборы / Б. И. Швецкий. – К. : Техника, 1991. – 191 с.
25. Швецкий Б. И. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом / Б. И. Швецкий. – К. : Техника, 1970. – 268 с.
26. Вопросы проектирования преобразователей информации / под общ. ред. А. И. Кондалева. – К. : Наукова думка, 1977. – 242 с.
27. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев. – К. : Наукова думка, 1982. – 312 с.
28. Высокопроизводительные преобразователи формы информации / А. И. Кондалев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев. – К. : Наукова думка, 1987. – 280 с.
29. Романов В. А. Аналого-цифровые микропроцессоры в информационно-вычислительных и управляющих системах / Владимир Александрович Романов. – К. : Знание, 1984. – 16 с.
30. Преобразователи формы информации с обработкой данных / под общ. ред. А. И. Кондалева. – К. : Наукова думка, 1992. – 264 с.
31. Кондалев А. И. Преобразователи формы информации для контрольно-измерительных систем и вычислительных комплексов / А. И. Кондалев, П. С. Ключан, В. Н. Лаврентьев // Проблемы создания преобразователей формы информации. – К. : Наук. думка, 1980. – Ч. 2. – С. 12–20.
32. Кондалев А. И. Комбинированный аналого-цифровой преобразователь / А. И. Кондалев, М. Е. Овчарук, М. П. Сиверский // Устройства и элементы систем автоматизации научного эксперимента. – Новосибирск : Изд-во СибГУ, 1970. – С. 331–335.
33. Вклад Украины в развитие системных преобразователей формы информации / А. И. Кондалев, В. А. Романов, В. А. Багацкий, П. С. Ключан // “Компьютеры в Европе. Прошлое, настоящее и буду-

щее” : труды Междунар. симпозиума. – К. : ИК НАН Украины. – 1998. – С. 34–39.

34. Багацкий В. А. Современные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи / В. А. Багацкий. – К. : Знання, 1980. – 21 с.

35. Вонятыцкий А. Ю. Статистические модели ЦАП на источниках тока/ А. Ю. Вонятыцкий, А. И. Кондалев. – К. : 1988. – 21 с. – Препр. – АН УССР, Ин-т кибернетики; 88–64.

36. Кондалев А. И. Преобразователи формы информации компьютерного типа / А. И. Кондалев – К. : 1990. – 45 с. – Препр. – АН УССР, Ин-т кибернетики; 90–19.

37. Багацкий В. А. Теория построения, проектирование и практическая реализация аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей общего применения : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.13.08 / Багацкий Валентин Алексеевич ; Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины. – К., 1994. – 35 с.

38. Фабричев В. А. Теория и практика создания методов и средств электромагнитной совместимости устройств преобразования формы информации : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.13.05 / Фабричев Вячеслав Анатольевич ; Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины. – К., 1994. – 38 с.

39. Романов В. А. Теория, методы построения и техническая реализация микропроцессорных преобразователей формы информации с повышенной надежностью и производительностью : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.13.05 / Романов Владимир Александрович ; Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины. – К., 1994. – 34 с.

40. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смоллов. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.

41. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации. / В. Б. Смоллов, Е. П. Угрюмов,

В. К. Шмидт [и др.] ; под ред. В. Смолова. – Л. : Энергия, 1976. – 336 с.

42. Смолов В. Б. Вычислительные преобразователи с цифровыми управляемыми сопротивлениями / В. Б. Смолов. – М. : Госэнергоиздат, 1961. – 135 с.

43. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи / под ред. В. Смолова и Н. Смирнова. – Л. : Энергия, 1967. – 312 с.

44. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с.

45. Вопросы построения интегральных преобразователей напряжения в код / В. Б. Смолов, В. К. Шмидт, Н. Н. Варлинский [и др.]. // Вопросы преобразования информации. – Таганрог : 1972. – Вып. 6. – С. 3–9.

46. Мурсаев А. Х. Точные ключи, операционные устройства и устройства запоминания напряжений на канальных транзисторах / А. Х. Мурсаев, В. Б. Смолов, Е. П. Угрюмов. – Л. : ЛДНТП, 1972. – 30 с.

47. Угрюмов Е. П. Время-импульсные вычислительные устройства / Е. П. Угрюмов. – М. : Радио и связь, 1983. – 139 с.

48. Смолов В. Б. Функциональные преобразователи информации / В. Б. Смолов. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 247 с.

49. Системы автоматизированного проектирования средств ИИТ : учеб. пособие / Е. А. Чернявский, В. Б. Смолов, А. В. Минаев. – Л. : ЛЭТИ, 1988. – 58 с.

50. Аналого-цифровые комплексы : учеб. пособие / В. Б. Смолов, А. В. Анисимов, Р. Ш. Исмаилов [и др.]. – Л. : ЛЭТИ, 1980. – 96 с.

51. Чернявский Е. А. Аналого-цифровые измерительно-вычислительные преобразователи / Е. А. Чернявский, Чье Ен Ун. – СПб. : Энергоатомиздат, 1994. – 139 с.

52. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств / Э. И. Гитис. – М. : Энергия, 1970. – 400 с.

53. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств / Э. И. Гитис. – М. : Энергия, 1975. – 448 с.
54. Гитис Э.И. Аналого-цифровые преобразователи / Э. И. Гитис, Е. А. Пискулов. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 360 с.
55. Автоматизация проектирования аналого-цифровых устройств / Э. И. Гитис, Б. Л. Собкин, А. Н. Подколзин [и др.]. ; под ред. Э. И. Гитиса. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 182 с.
56. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1973. – 395 с.
57. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1976. – 418 с.
58. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1980. – 560 с.
59. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1983. – 455 с.
60. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский. – К. : Вища школа, 1986. – 504 с.
61. Орнатский П. П. Измерительный эксперимент : учебное пособие / П. П. Орнатский, Н. Ф. Пономаренко. – К. : КПИ, 1979. – 112 с.
62. Алипов Н. В. Помехоустойчивые алгоритмы функционирования преобразователей формы информации / Н. В. Алипов // Проблемы создания преобразователей формы информации : V Всесоюзный симпозиум : сборник тезисов докл. – К. : Наук. думка. – 1984. – Ч. 1. – С. 107–109.
63. Алипов Н. В. Алгоритмы функционирования параллельно-последовательных преобразователей формы информации, корректирующих динамические ошибки / Н. В. Алипов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков : Вища школа. – 1985. – С. 57–64.

64. Мичуда З. Р. Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі – АЦП майбутнього / З. Р. Мичуда. – Львів : Простір, 2002. – 242 с.

65. Дудикевич В. Б. Аналогові функціональні перетворювачі на основі перерозподілу заряду / В. Б. Дудикевич, З. Р. Мичуда, Л. З. Мичуда // Вимірювальна техніка і метрологія : міжвідомчий наук.-техн. збірник. – Л. : Вища школа, 1996. – Вип. 52. – С. 78–82

66. Азаров А. Д. Разработка теории аналого-цифрового преобразования на основе избыточных позиционных систем счисления : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.11.16 / Азаров Алексей Дмитриевич ; Винницкий политехнический институт. – Винница, 1994. – 44 с.

67. Захарченко С. М. Нові методи цифрового самокалібрування для АЦП з перерозподілом заряду / С. М. Захарченко, Н. О. Біліченко, О. Д. Азаров. // Приборостроение – 2000 : міжнар. наук.-техн. конф. : зб. праць – Симеіз, 2000. – С. 233–237.

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

69. Стахов А. П. Избыточные двоичные позиционные системы счисления / А. П. Стахов. // Однородные цифровые вычислительные и интегрирующие структуры. – 1974. – № 2. – С. 5–41.

70. Захарченко С. М. Високоточні АЦП з перерозподілом заряду для систем контролю та керування / С. М. Захарченко, Н. О. Біліченко. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 4. – С. 65–67.

71. Методи побудови ЦАП із ваговою надлишковістю на базі двійкових ЦАП / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага, Л. В. Крупельницький // Проблеми інформатизації та управління. – К. : НАУ, 2006. – № 3(18). – С. 5–11.

72. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія /

О. Д. Азаров, О. В. Кадук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 150 с.

73. Азаров О. Д. Характеристика перетворення порозрядного АЦП, що самокалібрується, побудованого на неточному ЦАП із ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Кадук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – № 3(10). – С. 8–18.

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

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

76. Азаров О. Д. Високопродуктивні АЦП із ваговою надлишковістю зі змінними тривалостями тактів порозрядного кодування / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 161 с.

77. Азаров О. Д. Методи та засоби високоточного слідкувального аналого-цифрового перетворення з ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, О. В. Дудник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 120 с.

78. Азаров О. Д. Методи та засоби підвищення точності циклічних АЦП на основі вагової надлишковості : монографія / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. В. Бойко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013. – 132 с.

79. Похибки квантування в АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, О. О. Решетнік, О. В. Кадук / Вісник Вінницького політехнічного інституту –2007. – № 3. – С. 67–73

80. Natalya Bilichenko. Linearity errors of the push-pull current amplifiers with separate intermediate cascade / Oleksiy Azarov, Mykhailo Teplytskyi, Natalya Bilichenko // Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics. – Romania, 2014 – Tome LX (LXIV), Fasc. 1. – P. 47–58. – ISSN 1223-8139.

81. Азаров А. Д. Исследование принципов построения и разработка преобразователей информации на основе кодов с иррациональными основаниями : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.11.16 / Азаров Алексей Дмитриевич ; ХИРЭ. – Харьков, 1980. – 16 с.

82. Захарченко С. М. Исследование и разработка самокалибрующихся АЦП с накопителем заряда на основе избыточных позиционных систем счисления : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.08 / Захарченко Сергей Михайлович ; Винниц. гос. техн. ун-т. – Винница, 1997. – 16 с.

83. А. с. 1277396 СССР, МКИ Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. Д. Азаров, А. П. Стахов, В. П. Волков (СССР) – № 3883962/24 ; заявлено 15.04.85 ; опубл. 15.12.86, Бюл. № 46. – 5 с.

84. А. с. 1197079 СССР, МКИ Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. Д. Азаров, А. П. Стахов, В. П. Волков (СССР) – № 3745021/24 ; заявлено 18.04.84 ; опубл. 07.12.85, Бюл. № 45. – 4 с.

85. А.с. 750721 СССР, МКИ Н 03 К 13/02. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, М. Е. Бородянский (СССР). – №2573391/24 ; заявлено 31.01.78 ; опубл. 23.07.80, Бюл. № 27. – 4 с.

86. А. с. 928832 СССР, МКИ Н 03 К 13/02. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, Ю. А. Петросюк (СССР). – №2971246/24 ; заявлено 04.08.80 ; опубл. 15.05.82, Бюл. № 18. – 5 с.

87. А. с. 947956 СССР, МКИ Н 03 К 13/02. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. А. Лужецкий (СССР). – №2716506/24 ; заявлено 22.01.79 ; опубл. 30.07.82, Бюл. № 28. – 4 с.

88. А. с. 1221750 СССР, МКИ Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, В. И. Моисеев, А. Д. Азаров,

В. Я. Стейскал, Т. Н. Васильева (СССР). – № 1221750/24 ; заявлено 15.08.84 ; опубл. 30.03.86, Бюл. № 12. – 10 с.

89. А. с. 1231609 СССР, МКИ Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, О. В. Конючевский (СССР). – № 3790665/24 ; заявлено 18.09.84 ; опубл. 15.05.86, Бюл. № 18. – 6 с.

90. А. с. 1474824 СССР, МКИ Н 03 М 1/26. Устройство для аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования / А. Д. Азаров, В. П. Марценюк, В. И. Моисеев, В. Я. Стейскал, Н. И. Коваль (СССР). – № 4178341/24 ; заявлено 09.01.87 ; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15. – 18 с.

91. А. с. 1513619 СССР, МКИ Н 03 М 1/26. Аналого-цифровой преобразователь / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев, В. П. Марценюк, В. Я. Стейскал, Ю. П. Орлович, В. В. Лысюк, Т. Н. Васильева, А. Е. Рафалюк (СССР). – № 4257835/24; заявлено 07.05.87 ; опубл. 07.10.89, Бюл. № 37. – 12 с.

92. Біліченко Н. О. Високоточні аналого-цифрові перетворювачі з перерозподілом заряду на основі інформаційної надлишковості : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.05 / Біліченко Наталія Олександрівна ; Вінницький державний технічний ун-т. – Вінниця, 2001. – 16 с.

93. Захарченко С. М. Самокалібровані АЦП із накопиченням заряду на основі надлишкових позиційних систем числення / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 235 с.

94. Захарченко С. М. Підвищення точності циклічних АЦП за рахунок використання надлишкових позиційних систем числення / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков // Наука и предпринимательство – 2005 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Ялта, 2005. – С. 61–63.

95. Дослідження постійних часу перехідних процесів в конденсаторних матрицях АЦП з перерозподілом заряду / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков, Ю. В. Тележкіна // Автоматика-2006 :

матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця, 2006.

96. Захарченко С. М. Дослідження часових параметрів АЦП із перерозподілом заряду / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси, 2006. – Спецвипуск. – С. 153–155.

97. Конденсаторні матриці для ЦАП на основі НПСЧ / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага [та ін.] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, 2006. – № 2. – С. 6–18.

98. Математична модель перехідних процесів при порозрядному врівноваженні в АЦП із перерозподілом заряду / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков, Ю. В. Тележкіна. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, 2006. - № 2. – С. 19–27.

99. Інструментальні похибки конденсаторних матриць драбинкового типу / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, О. М. Харьков [та ін.] // Проблеми інформатизації та управління. – 2006. – С. 35 – 40.

100. Буферний елемент : деклараційний патент на корисну модель № 16968, Україна / О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, В. А. Гарнага, С. М. Захарченко, О. М. Харьков. заявлено 15.12.05 ; опублік. 15.09.2006, Бюл. № 9.

101. Пат. 21203 UA, МПК Н 03F 3/26. Підсилювач постійного струму / О. Д. Азаров, О. О. Лукашук, В. Г. Огнєв, О. Г. Муращенко, О. М. Харьков (Україна). – № u200605106 ; заявл. 10.05.2006 ; опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3. – 6 с. : кресл.

102. Данилов А. Микросхеми інструментальних АЦП / А. Данилов // Электронные компоненты. – Украина. – 2005. – № 3/4. – С. 8–19.

103. Singh S.P. C-2C ladder voltage dividers for application in all-MOS A/D converters / S. P. Singh, A. Prabhakar, A. B. Bhattachary // Electronics Letters. – 1982. – V. 18, № 12. – P. 537–538.

104. Single Supply, Low Power Triple Video Amplifier / Analog Devices // Офіційний сайт. – Режим доступу : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD813.pdf>.

105. Yee Y. S. A two-stage weighted capacitor network for D/A, A/D conversion / Y. S. Yee, L. M. Terman, L. G. Heller // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1979. – V. 14, № 4. – P. 778–781

106. Mc. Creary J. L. Matching properties and voltage and temperature dependence of MOS capacitors / J. L. Mc. Creary // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1981. – V. 16. – P. 608–616.

107. L. Cong. Pseudo C-2C Ladder Based Data Converter Technique / Cong L. // IEEE Transactions on circuits and systems. – 2001. – V. 48, № 10. – P. 927–929.

108. Hadidi K. An 8-b 1,3 MHz Successive Approximation A/D Converter / K. Hadidi, S. Vincent, Gabor C. Temes // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1990. – V. 25, № 3. – P. 880–885.

109. Patent 4409608 USA, H01L 27/02. Recessed interdigitated integrated capacitor / Yoder M. N. – US 06/258, 345 ; Fil. 28.04.1981 ; Publ. 11.10.1983. – 6 p.

110. Fractal capacitors / H. Samavati, A. Hajimiri, A. R. Shanani [та ін.] // IEEE Solid-State Circuits. – 1998. – V. 33. – P. 2035–2041.

111. Patent 4399426 USA, H03K 13/02. On board self-calibration of analog-to-digital and digital-to-analog converters / K. S. Tan – US 06/260, 435 ; Fil. 04.05.1981 ; Publ. 16.08.1983. – 14 p.

112. Hae-Seung Lee. Self-calibration technique for A/D converters / Hae-Seung Lee, David A. Hodges // IEEE Transactions on circuits and systems. – 1983. – V. 30, № 3. – P. 188–190.

113. Hae-Seung Lee. A Self-calibrating 15-bit CMOS A/D Converter / Hae-Seung Lee, David A. Hodges, Paul R. Gray. // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1984. – V. 19, № 6. – P. 813–817

114. Cheng-Chung Shin. Ratio independent cyclic A/D and D/A conversion using a recirculating reference approach / Cheng-Chung Shin, Ping

Wai Li, P. Gray // IEEE Trans. on Circuits and Systems. – 1983. – V. 30, № 10. – P. 772–774.

115. Harlan Ohara. A CMOS programmable self-calibrating 13-bit eight-channel data acquisition peripheral / Harlan Ohara, Hung W. Ngo, M. J. Armstrong // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1987. – V. 22, № 6. – P. 930–938.

116. Hidetoshi Onodera. A cyclic A/D converter that does not require ratio-matched components / Hidetoshi Onodera, Tetsuo Tateishi. Keikichi Tamaru // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1988. – V. 23, № 1. – P. 152–158.

117. Ginetti B. RSD cyclic analogue-to-digital converter / B. Ginetti, A. Vandemculebroecke, P. Jespers // Proceedings of Symposium on VSLI Circuits. – Tokyo, 1988.

118. Bergman G. A. Number system with an irrational base / G. A. Bergman // Mathematics Magazine. – 1957. – № 3. – P. 98–119.

119. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення / О. Д. Азаров – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2004. – 260 с.

120. Стахов А. П. Введение в алгоритмическую теорию измерения. / А. П. Стахов – М. : Сов. радио, 1977. – 288 с.

121. Стахов А. П. Алгоритмическая теория измерений и основания компьютерной арифметики / А. П. Стахов // Измерение, контроль, автоматизация. – 1988. – № 2. – С. 64–89.

122. Стахов А. П. Машинная арифметика ЦВМ в кодах Фибоначчи и «золотой» пропорции : предварительная публикация / А. П. Стахов, В. А. Лужецкий. – М. : Академия Наук СССР, 1981. – 64 с.

123. Стахов А. П. Высокопроизводительные преобразователи информации на основе избыточных систем счисления / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. П. Марценюк. – К. : УМКВО, 1988. – С. 42–50.

124. Моисеев В. И. Разработка и исследование высокоточных АЦП и ЦАП на основе избыточных измерительных кодов : автореф.

дис... канд. техн. наук : 05.13.05 / В. И. Моисеев ; РИО ИК АН УССР. – К., 1984. – 16 с.

125. Марценюк В. П. Разработка и исследование высокопроизводительных АЦП для прецизионных систем весоизмерения : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.05 / В. П. Марценюк ; РИО ИК АН УССР. – К., 1985. – 16 с.

126. Стейскал В. Я. Быстродействующие самокорректирующиеся аналого-цифровые преобразователи для высококачественной цифровой магнитной записи : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.05 / В. Я. Стейскал ; РИО ИК АН УССР. – К., 1988. – 16 с.

127. Коваленко Е. А. Разработка и исследование самокалибрующихся вычислительных АЦП и ЦАП для систем цифровой обработки аналоговой информации : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.05 / Е. А. Коваленко ; Винниц. гос. техн. ун-т. – Винница, 1997. – 16 с.

128. Крупельницкий Л. В. Аналоговые устройства самокорректирующихся АЦП для систем измерения и обработки низкочастотных сигналов : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.11.13 / Л. В. Крупельницкий ; Винниц. политех. ин-т. – Винница, 1994. – 16 с.

129. Ракитянська Г. Б. Моделювання та оптимізація швидкодії та алгоритмічної надійності надлишкових АЦП порозрядного врівноваження : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.05 / Г. Б. Ракитянська ; Вінниц. держ. техн. ун-т. – Вінниця, 1998. – 16 с.

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

131. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації і оброблення сигналів / О. Д. Азаров, О. А. Архипчук, С. М. Захарченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 125 с.

132. Азаров А. Д. Семнадцатиразрядный самокорректирующийся АЦП / А. Д. Азаров, В. И. Моисеев, В. П. Марценюк // Приборы и системы управления. – 1986. – № 1. – С. 34–42.

133. Стахов А. П. Высокоточный АЦП, сопряженный с микро-ЭВМ / А. П. Стахов, А. Д. Азаров, В. И. Моисеев // Управляющие системы и машины. – 1985. – № 5. – С. 56–63.

134. Стахов А. П. Высокоточный самокорректирующийся микро-процессорный преобразователь САЦП-МКЗ / А. П. Стахов, В. И. Моисеев, В. Я. Стейскал // Информационный листок №88-006 о научно-техническом достижении. – Винница : МТЦНТИ, 1988. – С. 3–6.

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

136. Біліченко Н. О. Самокалібрування надлишкових АЦП з перерозподілом заряду / Н. О. Біліченко, С. М. Захарченко, О. Д. Азаров // Реєстрація, зберігання та обробка інформації. – 2000. – Т. 2, № 1 – С. 67–74.

137. Біліченко Н. О. Дослідження похибок самокаліброваних АЦП на основі надлишкових позиційних систем числення / Н. О. Біліченко, С. М. Захарченко, О. Д. Азаров // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 1. – С. 59–63.

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

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

140. Атабеков Г. И. Основы теории цепей / Г. И. Атабеков. – М. : Энергия, 1969. – 424 с.

141. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / Под ред. В. Б. Смолова. – Л. : Энергия, 1976. – 336 с.

142. Khen-Sang Tan. Error correction techniques for high-performance differential A/D Converters / Khen-Sang Tan, Sami Kiriaki, Michiel de Wit // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1990. – V. 25, № 6. – P. 1318–1327.

143. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы / С. Соклоф – М. : Мир, 1988. – 583 с.

144. Достал И. Операционные усилители / И. Достал – М. : Мир, 1982. – 512 с.

145. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство / У. Титце, К. Шенк – М. : Мир, 1982. – С. 82–84.

146. Пат. 108294 UA, МПК H03M 1/26. Аналого-цифровий перетворювач / С. М. Захарченко (Україна). - № а201309943 ; заявл. 09.08.2013 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. - 10 с. : кресл.

147. Пат 94779 UA, МПК H03M 1/12. Спосіб аналого-цифрового перетворення і пристрій для його реалізації / С. М. Захарченко, О. Д. Азаров, М. Г. Захарченко (Україна) – № а200906396 ; заявл. 19.06.2009 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11. – 8 с.

148. Захарченко С. М. Метод підвищення швидкодії АЦП із перерозподілом заряду за рахунок використання вагової надлишковості / С. М. Захарченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 1. – С. 14–18.

149. Захарченко С. М. Підвищення точності АЦП із перерозподілом заряду за рахунок використання вагової надлишковості / С. М. Захарченко // Вісник вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 57–62.

150. Захарченко С. М. Структури інтегральних конденсаторів як основа побудови конденсаторних матриць для АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю / С. М. Захарченко // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 4. – Режим дост. до журн. : [http: // praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/163](http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/163).

Наукове видання

**Азаров Олексій Дмитрович
Біліченко Наталія Олександрівна
Захарченко Сергій Михайлович**

**ШВИДКОДІЙНІ ВИСОКОТОЧНІ АЦП
ІЗ ПЕРЕРОЗПОДІЛОМ ЗАРЯДУ
З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ,
ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Н. Біліченко

Підписано до друку 19.05.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-12

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

publish.vntu.edu.ua; *email*: kivc.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.