

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
А35

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.

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. Hajimiri // 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. Конвєсрні 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 обробляння 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.