

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**АНАЛОГОВІ ТА АНАЛОГО-ЦИФРОВІ
ПРИСТРОЇ СИСТЕМНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ**

Підручник

Вінниця
ВНТУ
2024

УДК 621.3

А 64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 27 березня 2024 р.)

Автори:

О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, Л. В. Крупельницький, М. Р. Обертюх

Рецензенти:

Р. Н. Квєтний, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та інтелектуальних технологій Вінницького національного технічного університету.

Л. З. Мичуда, доктор технічних наук, професор кафедри безпеки інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

С. І. Мельничук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу.

Аналогові та аналого-цифрові пристрої системних перетворювачів форми інформації : підручник / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, Л. В. Крупельницький, М. Р. Обертюх. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 316 с.

ISBN 978-966-641-958-6

В підручнику викладено призначення, принципи дії, схеми, параметри, методи аналізу, проектування та застосування аналогових й аналого-цифрових пристроїв системних перетворювачів форми інформації, якими є сучасні аналого-цифрові та цифроаналогові перетворювачі. Розглянуто специфіку побудови пристроїв перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. Книга розрахована на здобувачів вищої освіти зі спеціальності «Комп'ютерна інженерія» та буде корисною для студентів, інженерів і науковців споріднених технічних спеціальностей.

УДК 621.3

ISBN 978-966-641-958-6

© ВНТУ, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЇХ ПРИСТРОЇВ	11
1.1 Функціонально-архітектурні рішення системних перетворювачів форми інформації.....	11
1.2 Компоненти системних перетворювачів форми інформації	17
1.3 Аналіз статичних і динамічних похибок аналогових пристроїв у перетворювальних трактах	33
1.4 Контрольні запитання до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ КОМПОНЕНТИ СПФІ	40
2.1 Теоретичні відомості та розрахункові відношення в біполярних транзисторах.....	40
2.1.1 Статичні характеристики	46
2.1.2 Аналіз статичних характеристик біполярних транзисторів із використанням керованих і функціональних генераторів струму.....	51
2.1.3 Моделі АЧХ і ФЧХ інтегральних біполярних транзисторів на основі схем заміщення з керованими генераторами струму	61
2.1.4 Складені транзистори	74
2.2 Теоретичні відомості та розрахункові співвідношення в польових транзисторах.....	76
2.3 Контрольні запитання до розділу 2	82
РОЗДІЛ 3 ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	84
3.1 Найпростіші джерела постійного струму	86
3.2 Відбивачі струму	97
3.3 Схеми джерел струму на базі підсилювачів постійного струму	112
3.4 Двополюсні кільцеві джерела постійного струму з термокомпенсацією	117
3.5 Контрольні запитання до розділу 3	124

РОЗДІЛ 4 ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ.....	125
4.1 Найпростіші джерела напруги.....	126
4.2 Джерела напруги та опорної напруги, побудовані на активних елементах.....	132
4.3 Джерело опорної напруги, що визначається шириною забороненої зони.....	140
4.4 Джерела напруги з використанням підсилювачів постійного струму.....	147
4.5 Джерело опорної напруги на основі генератора термостабільного струму.....	156
4.6 Інтегральні схеми в приладах стабілізації напруги живлення.....	162
4.7 Джерело напруги з активною температурною компенсацією.....	163
4.8 Контрольні запитання до розділу 4.....	165
 РОЗДІЛ 5 ПІДСИЛЮВАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	 167
5.1 Теоретичні відомості та розрахункові співвідношення.....	167
5.2 Найпростіші підсилювачі постійного струму.....	172
5.2.1 Найпростіші підсилювачі постійного струму на біполярному транзисторі.....	172
5.2.2 Найпростіші підсилювачі на польових транзисторах.....	177
5.3 Диференційні підсилювачі.....	182
5.3.1 Диференційний підсилювальний каскад із резисторним навантаженням.....	183
5.3.2 Диференційний підсилювальний каскад з активним навантаженням.....	189
5.3.3 Диференційний підсилювач на польових транзисторах.....	192
5.4 Операційні підсилювачі напруги та струму.....	197
5.4.1 Основні відомості про операційні підсилювачі.....	197
5.4.2 Вплив від'ємного зворотного зв'язку на параметри й характеристики ОП.....	207
5.4.3 Практичні схеми операційних підсилювачів.....	210
5.4.4 Основні схеми застосування ОП.....	215

5.5 Двотактні підсилювачі струму.....	222
5.5.1 Двотактні підсилювачі струму з параметричним заданням робочих точок.....	222
5.5.2 Двотактні підсилювачі струму з автобалансуванням робочих точок.....	226
5.6 Контрольні запитання до розділу 5	228
РОЗДІЛ 6 БУФЕРНІ ПРИСТРОЇ	230
6.1 Двотактні буферні пристрої напруги	230
6.2 Методи схемної організації високолінійних буферних пристроїв на базі двотактних структур	232
6.2.1 Схемна організація і моделі передатних характеристик ядер двотактних буферних пристроїв.....	232
6.2.2 Методи зменшення похибок та підвищення навантажувальної здатності буферних пристроїв	237
6.3 Контрольні запитання до розділу 6	242
РОЗДІЛ 7 ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СТРУМ-НАПРУГА, НАПРУГА-НАПРУГА ТА СТРУМ-СТРУМ.....	244
7.1 Методи схемної організації перетворювачів струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму	244
7.2 Мінімізація похибок лінійності і зсуву нуля перетворювачів струм-напруга, напруга-напруга	250
7.3 Методи схемної організації перетворювачів струм-струм і напруга-струм із комутацією вихідного струму.....	252
7.4 Контрольні запитання до розділу 7	260
РОЗДІЛ 8 ЦИФРОАНАЛОГОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	261
8.1 Статичні й динамічні параметри ЦАП.....	261
8.2 ЦАП з підсумовуванням еталонних величин.....	265
8.2.1 ЦАП з використанням ланцюгів резисторів	266
8.2.2 Струмові ключі.....	272
8.2.3 ЦАП з використанням ланцюгів конденсаторів	274

8.3 Паралельні ЦАП на базі резистивних дільників.....	277
8.4 ЦАП с проміжним перетворенням цифрового коду у часовий інтервал	278
8.5 Послідовний ЦАП	279
8.6 Контрольні запитання до розділу 8	280
РОЗДІЛ 9 АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	281
9.1 Параметри АЦП.....	281
9.2 Алгоритми аналого-цифрового перетворення	284
9.3 АЦП непрямого перетворення.....	285
9.3.1 Перетворювачі напруги в частоту.....	285
9.3.2 Інтегрувальні АЦП.....	286
9.3.3 АЦП з двотактним інтегруванням.....	288
9.3.4 АЦП зі врівноваженням заряду	290
9.4 Сигма-дельта АЦП.....	291
9.5 АЦП послідовної лічби.....	292
9.6 АЦП послідовного наближення.....	295
9.6.1 Найпростіші АЦП послідовного наближення	295
9.6.2 Конвеєрні АЦП.....	296
9.7 Паралельні АЦП	298
9.8 Аналого-цифрові системи на основі самокаліброваних АЦП і ЦАП.....	299
9.9 Контрольні запитання до розділу 9	308
ВИСНОВКИ.....	309
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	310

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АІ	–	аналоговий інтерфейс;
АК	–	аналоговий комутатор;
АОП	–	аналоговий обчислювальний пристрій;
АЦМП	–	аналого-цифровий мікропроцесор;
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач;
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика;
БТ	–	біполярний транзистор;
ВАХ	–	вольт-амперна характеристика;
ВДК	–	вхідний двотактний каскад;
ВЗЗ	–	від'ємний зворотний зв'язок;
ВП	–	вимірювальні (первинні) перетворювачі;
ВІС	–	вимірювально-інформаційна система;
ВС	–	відбивач струму;
ГС	–	генератор сигналу;
ДБН	–	двотактний буфер напруги;
ДВК	–	двотактний вихідний каскад;
ДОН	–	джерело опорної напруги;
ДОС	–	джерело опорного струму;
ДП	–	диференційний підсилювач;
ДПК	–	двотактний підсилювальний каскад;
ДППС	–	двотактний підсилювач постійного струму;
ДПС	–	джерело постійного струму;
ЕРС	–	електрорушійна сила;
ЗЗ	–	зворотний зв'язок;
ІВС	–	інформаційно-вимірювальна система;
ІОС	–	інформаційно-обчислювальна система;
ІС	–	інтегральна схема;
КГС	–	керований генератор струму;
КЗЗ	–	коло зворотного зв'язку;

КС	–	компенсувальний суматор;
ЛІС	–	лінійна інтегральна схема;
МДН	–	метал-діелектрик-напівпровідник;
МПП	–	мікропроцесор з пам'яттю;
НВІС	–	надвелика інтегральна схема;
НП	–	нормувальний підсилювач;
ОВ	–	об'єкт вимірювань;
ОП	–	операційний підсилювач;
ПВЗ	–	пристрій вибирання-зберігання;
ПК	–	пристрій керування;
ПНН	–	перетворювач напруга-напруга;
ПНС	–	перетворювач напруга-струм;
ППС	–	підсилювач постійного струму;
ПР	–	підсилювач різниці;
ПС	–	підсилювач струму;
ПСН	–	перетворювач струм-напруга;
ПСС	–	перетворювач струм-струм;
ПФІ	–	перетворювач форми інформації;
САЦП	–	системний АЦП;
СК	–	струмовий конвеєр;
СПФІ	–	системний перетворювач форми інформації;
СЦАП	–	системний ЦАП;
ТКН	–	температурний коефіцієнт напруги;
ТКС	–	температурний коефіцієнт струму
ФГС	–	функціональний генератор струму;
ФЧХ	–	фазочастотна характеристика;
ЦАП	–	цифроаналоговий перетворювач;
ЦОМ	–	цифрова обчислювальна машина;
ЦОП	–	цифровий обчислювальний пристрій;
ЦОС	–	цифрова обробка сигналів;
ЦІ	–	цифровий інтерфейс.

ВСТУП

В підручнику викладено призначення, принципи дії, схеми, параметри, методи аналізу, проєктування та застосування аналогових та аналого-цифрових пристроїв системних перетворювачів форми інформації (СПФІ), якими є сучасні аналого-цифрові та цифроаналогові перетворювачі (АЦП та ЦАП). Розглянуто специфіку побудови пристроїв перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [1–5].

Матеріал підручника побудований таким чином, що розділи є тематично закінченими, але прослідковується тісний зв'язок між ними. Поряд із теоретичними питаннями наводяться конкретні приклади, що ілюструють можливі варіанти технічної реалізації. Потрібно відзначити, що підручник не містить матеріали фізичних і фізико-технологічних основ напівпровідникових приладів, оскільки ці питання висвітлені в відомих зарубіжних [6–9] та інших авторських публікаціях [10–11]. Автори обмежуються описом тих зовнішніх характеристик електронних компонентів, які практично використовуються при розрахунку в розглянутих схемах. Підходи, які можуть виявитись корисними при проєктуванні та дослідженні, відзначаються в загальних положеннях, а найбільш важливі з обчислювальних процедур ілюструються прикладами макетування та комп'ютерного моделювання схем. Так, в матеріалах першого розділу наведені відомості, які необхідні для розуміння загальної концепції побудови й використання аналогових та аналого-цифрових пристроїв в СПФІ, а наступні розділи присвячені конкретним питанням побудови цих пристроїв. Підручник виділяється значною часткою матеріалів авторів, отриманих ними в процесі тривалих наукових досліджень.

Підручник допоможе здобувачам освіти глибше засвоїти тематику дисциплін бакалаврату («Комп'ютерна електроніка», «Електроніка комп'ютерних систем», «Аналогові та аналого-цифрові пристрої»), магістратури («Перетворювачі форми інформації з ваговою надлишковістю», «Аналого-цифрові системи»), аспірантури («Аналого-цифрові пристрої комп'ютерних систем», «Моделювання та оптимізація компонентів комп'ютерних систем») спеціальності «Комп'ютерна інженерія» та споріднених дисциплін суміжних спеціальностей технічних університетів.

Весь матеріал розбито на розділи таким чином. У розділі 1 описано загальні теоретичні відомості та основні положення щодо побудови й використання аналогових і аналого-цифрових пристроїв у СПФІ. Розділ 2

присвячено напівпровідниковим компонентам СПФІ, їх моделям, статичним і динамічним характеристикам, параметрам та особливостям застосування в базових схемах перетворювачів. У розділах 3 і 4 більш докладно розглядаються джерела струму і напруги, відповідно, а також деякі основні схеми їх побудови, принципи використання, проєктування й розрахунку. Зокрема, виділяються питання побудови відбивачів струму та термокомпенсованих джерел стабільної опорної напруги, які є важливими при проєктуванні СПФІ. Розділ 5 присвячено підсилювачам постійного струму (ППС), дається повний перегляд схемних рішень та їх функціонування. Досліджується внутрішня структура різноманітних схем підсилювачів на біполярних та польових транзисторах. У розділі 6 увагу приділено симетричним схемам вихідних буферних струмових каскадів з компенсацією статичних похибок. У розділі 7 аналізуються актуальні методи побудови та характеристики високоточних швидкодійних перетворювачів струм-напруга, напруга-напруга, струм-струм. Розділи 8 і 9 присвячені ЦАП та АЦП, їх основним параметрам і способам перетворення. Наведені основні схемні рішення, що застосовуються при реалізації традиційних ЦАП та АЦП і ПФІ на основі НПСЧ, відзначаються особливості аналого-цифрових систем, створених на їх базі.

Автори висловлюють подяку всім, хто допомагав їм у підготовці цього підручника, особливо допитливим і зацікавленим студентам, питання яких підштовхували нас шукати прості та зрозумілі пояснення.

ВИСНОВКИ

Успішна розробка й експлуатація сучасних комп'ютерних систем різного призначення неможливі без глибоких знань основ побудови їх аналогових та цифрових компонентів. Системні перетворювачі форми інформації виділяються підвищеними вимогами до параметрів точності та швидкодії, що зумовлює певну специфіку аналогових і цифрових компонентів. Наявність вмонтованих обчислювальних пристроїв у складі системних перетворювачів дозволяє реалізовувати досить складні алгоритми самокалібрування вимірювальних каналів та самокоригування більшої частини похибок аналогових компонентів.

Застосування в процесі аналого-цифрового та цифроаналогового перетворень надлишкових позиційних систем числення дає можливість застосовувати оригінальні та ефективні схемотехнічні рішення аналогових пристроїв. Причому, значна частина таких схем може бути побудована на струмовому принципі підсилення, який забезпечує потенційно більшу швидкодію на однаковій елементній базі.

Автори підручника, маючи значний професійний і викладацький досвід намагались викласти матеріал, що поєднує загальні поняття та означення зі спеціалізованими знаннями в кожному з розділів. Залежно від рівня, якого бажає досягнути читач, він може обрати для себе відповідний рівень вивчення матеріалу. Тому підручник буде корисний здобувачам ступеней як бакалавра, так і магістра. Також матеріал, викладений в другій частині кожного розділу, містить більше результатів наукових досліджень авторів, тому буде корисний аспірантам та науковцям в галузі комп'ютерної інженерії й споріднених спеціальностей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2004. 257 с.
2. Крупельницький Л. В., Азаров О. Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія ; під заг. ред. О. Д. Азарова. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 167 с. ISBN 966-641-126-1.
3. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення з ваговою надлишковістю : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 232 с. ISBN 978-966-641-354-6.
4. Азаров О. Д., Богомолів С. В. Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 142 с. ISBN 966-641-547-2.
5. Азаров О. Д., Обертюх М. Р. Високолінійне надлишкове цифроаналогове перетворення з ваговою надлишковістю на основі генераторів однакових струмів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2022. 156 с. ISBN 978-966-641-915-9.
6. Joseph D. Greenfield. Experiments in Practical Transistors and Linear Integrated / John Wiley & Sons Canada, Limited, 1988, 160 с. ISBN: 978-0136823377.
7. Tietze U., Schenk Ch. Electronic Circuits – Handbook for Design and Applications. Edition 2nd. 2008. 1544 pages, 1771 figures, with CD-ROM ISBN 978-3-540-00429-5.
8. The Art of Electronics by Paul Horowitz, Winfield Hill / Cambridge University / Press 3rd, rev. ed. Repr. 2015, 1220 pages, ISBN 9780521809269.
9. The Data Conversion Handbook, Edited by Walt Kester, Newnes, 2005, 953 pages, ISBN 0-7506-7841-0. Also published as Analog-Digital Conversion, Analog Devices, Inc.
10. Азаров О. Д., Байко В. В., Суприган О. І. Комп'ютерна електроніка. Основи теорії транзисторів та транзисторних схем. Вінниця : ВНТУ, 2004. 130 с.
11. Теоретичні основи комп'ютерних напівпровідникових електронних компонентів : навчальний посібник / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Сапсай Т. Г., Тарасенко В. П. Вінниця : ВНТУ, 2015. 135 с.

12. Основи метрології та електричні вимірювання : навч. посібник / Дорожовець М. М. та ін. ; за ред. д-ра техн. наук Б. І. Стадника. Львів : Видавництво «Львівської політехніки», 2011. 372 с. ISBN 978-617-607-037-5.
13. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем : підручник / Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. та ін. ; за ред. чл.-кор. НАН України В. П. Бабака ; Вид. 2-е вид., перероб. і доп. К. : Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. 496 с. ISBN 978-966-932-027-8.
14. Миронцева В. І. Кондалев Андрій Іванович. Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба та ін.; НАН України, НТШ. К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2014. Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-4683>.
15. Романов В. О. Теорія, методи побудови і технічна реалізація мікропроцесорних перетворювачів форми інформації з підвищеною надійністю та продуктивністю : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.13.05. Київ, 1994. 34 с.
16. Стейскал В. Я. Швидкодіючі аналого-цифрові перетворювачі, що самокоригуються, для високоякісного цифрового магнітного запису : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. 05.13.05. Київ, 1987. 24 с.
17. Goodenough, «Interpolators Put 10-Bit 75 MHz A-D Converters on 8-bit Digital Process», *Electronic Design*, Dec. 14, 1989, pp. 29–30.
18. Walt Kester. ANALOG-DIGITAL CONVERSION. ADI : Central Application Department, March 2004. – 1127 p., ISBN 978-0916550271.
19. Азаров О. Д., Гарнага В. А. Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2011. 156 с. ISBN 978-966-641-435-2.
20. Азаров О. Д., Богомолів С. В., Гарнага В. В., Решетник О. О. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму. *Наукові праці ВНТУ*. 2007. № 1. С. 1–8. Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html>.
21. Богомолів С. В., Азаров О. Д., Гарнага В. А. Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2008. № 4. С. 20–24.

22. Win Palmer. High-speed precision amplifier-resistance converter. *Electronics. Series: methods, diagrams, equipment*. 1988. No. 1. P. 77–82.
23. Walter G. Jong. Op Amp applications handbook. *Analog Devices series*. 2004. 895 p., ISBN 978-0750678445
24. Богомолів С. В., Азаров О. Д. Високолінійні аналогові пристрої для багаторозрядних аналого-цифрових систем. *Проблеми інформатизації та управління*. 2011. № 4(36). С. 6–18.
25. Азаров О. Д., Кадук О. В. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія. Вінниця, 2010. 150 с., ISBN 978-966-641-369-0.
26. Franz Monssen. OrCAD PSpice with Circuit Analysis. Prentice Hall, 2001, 384 pages, ISBN 0130170356.
27. Micro-Cap 12 Analog/Digital Simulator / Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software, 1982-2020. 712 pages.
28. Attia John. PSPICE and MATLAB for electronics: An integrated approach. Edition second. CRC Press, 2010. 382 pages ISBN 9780429191930.
29. Grebene A. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design. 2003. 879 p., ISBN 978-0471430780.
30. Рибалко М. П., Есауленко В. О., Костенко В. І. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола : підручник. Донецьк : Новий світ, 2003. 513 с.
31. HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models: Application Note, Intersil, 1994. 5 p.
32. United States Patent № 3852678 George Joseph Frye Push-pull amplifier with current mirrors for determining the quiescent operating point Dec. 3, 1974.
33. Дубовик В. П., Юрик І. І. Вища математика: У 3 частинах: Ч. 1 : навч. посібник. Харків : Веста, 2008. 200 с., ISBN 966-539-320-0.
34. А. С. 1256147, МПК H03F 3/45. Джерело струму / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Марценюк, С. М. Шушляпін (СРСР). № 3863416/24-09 ; заявл. 04.03.1985 ; опубл. 07.09.1986, Бюл. № 33.
35. А. С. 1397892, МПК G05F 1/56. Джерело постійного струму / А. Д. Азаров, В. Я. Стейскал, В. П. Волков, А. Е. Рафалюк (СРСР). № 4137865/24-07 ; заявл. 04.06.1986 ; опубл. 23.05.1988, Бюл. № 19.
36. Brokaw P. A Transistor Voltage Reference, and What the Band-Gap Has To Do With It Video. *University Video Communications*. 1989.

37. Soclof S. Design and Application of Analog Integrated Circuits. Prentice Hall, 1996. 820 p., ISBN 0137376855
38. Азаров О. Д., Богомоллов С. В., Гарнага В. А., Решетник О. О. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму. *Наукові праці ВНТУ*. 2007. № 1. С. 1–8. Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html>.
39. Азаров О. Д., Богомоллов С. В., Гарнага В. А. Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2008. № 4. С. 20–24.
40. Азаров О. Д., Богомоллов С. В. Прецизійні буферні пристрої на базі двотактних симетричних структур. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 3(22). С. 4–12.
41. Азаров О. Д., Богомоллов С. В., Стейскал В. Я. Похибки лінійності передатної характеристики вхідного каскаду двотактних підсилювачів струму. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2010. № 3(19). С. 4–12.
42. Буферний каскад : пат. 51014 Україна ; МПК (2009) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. № u201000934 ; заявл. 29.01.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12, 3 с.
43. Азаров О. Д., Богомоллов С. В. Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 2(21). С. 4–11.
44. Азаров О. Д., Богомоллов С. В. Схемна організація вхідного комплементарного каскаду двотактного симетричного підсилювача постійного струму. *Проблеми інформатизації та управління*. 2009. № 3(27). С. 6–13.
45. Двотактний симетричний підсилювач-комутатор струму: пат. 48282 Україна, МПК Н03К 5/22, G05В 1/00. № a200909909 ; заявл. 28.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5, 6 с.
46. Двотактний симетричний підсилювач струму: пат. 50876 Україна, МПК (2009) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. № u200913704 ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12, 6 с.
47. Азаров О. Д., Обертюх М. Р. Високолінійні спеціалізовані струмові дзеркала з давачами рівня сигналу. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Вінниця : ВНТУ, 2017. № 3(40). С. 30–36.
48. Алгоритмізація, програмування, числові та символні обчислення в пакеті MathCAD : навч. пос. / Я. С. Паранчук, Я. С., Маляр А. В., Паранчук Р. Я., Головач І. Р. Львів : Видавництво «Львівської політехніки», 2008. 164 с.

49. Обертюх М. Р. Метод і апаратні засоби високолінійного надлишкового цифроаналогового перетворення на основі генераторів однакових струмів : дис. ... д-ра філософії : за спец. 123 – комп'ютерна інженерія. / Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2022. 206 с. ISBN: 978-617-607-181-5. Захищена 24.02.2022. Режим доступу : https://ida.vntu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/10/dis_Obertyukh_skor.pdf
50. Азаров О. Д., Біліченко Н. О., Захарченко С. М. Високолінійні порозрядні АЦП із перерозподілом заряду з ваговою надлишковістю, що самокалібруються : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2016. 140 с., ISBN 978-966-641-665-3.
51. Мичуда Л. З. Теорія та практика аналого-цифрових функціональних перетворювачів на комутованих конденсаторах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.13.05. Львів, 2019. 40 с.
52. Гуменюк Р. С. Методи та засоби оперативного оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю : дис. ... д-ра філософії : за спец. 123 – комп'ютерна інженерія / Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2021. 160 с. Режим доступу : http://inmad.vntu.edu.ua/PhD/dis_Humeniuk.pdf.
53. Stakhov A. P. The Mathematics of Harmony. From Euclid to Contemporary Mathematics and Computer Science / International Publisher «World Scientific» (New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai), 2009. 748 p., ISBN-13. 978-9812775825.
54. Азаров О. Д., Гарнага В. А., Крупельницький Л. В., Позняк Д. Ю. Полігармонійні методи вимірювання частотних характеристик звукових каналів і трактів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2015. № 2. С. 23–29.
55. Azarov A., Zakharchenko S., Arkhipchuk A. New method of reduction of a methodical error of self-calibration for ADC on the basis of redundant positional number systems. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering 4425*. 2001. P. 22–26.
56. Azarov O. D., Dudnyk O. V., Kaduk O. V. Vinnytsia National Technical Univ. (Ukraine); Smolarz A., Lublin Univ. of Technology (Poland); Burlibay A., Kazakh National Research Technical Univ. (Kazakhstan) Method of correcting of the tracking ADC with weight redundancy conversion characteristic. *Published in Proceedings Volume 9816: Optical Fibers and Their Applications 2015*, December 2015.

57. Азаров О. Д., Крупельницький Л. В., Снігур А. В., Решетник О. О., Гарнага В. А. Коригування статичних похибок вимірювального каналу ІВС, який містить АЦП із ваговою надлишковістю. *Проблеми інформатизації та управління*. 2007. № 2. С. 5–9.
58. Азаров О. Д., Крупельницький Л. В., Теплицький М. Ю. Двотактні підсилювачі струму для цифрового аналізатора параметрів звукових трактів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. № 4 (48). С. 5–13.
59. Крупельницький Л., Куций Д. Ітераційний метод самокалібрування передатних характеристик вимірювальних каналів біомедичної аналогово-цифрової системи : матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції «*Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання*», м. Івано-Франківськ, 15–20 травня 2017 року. Івано-Франківськ : п. Голіней О. М., 2017. С. 282–285.
60. STM32F407VE -High-performance foundation line, ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU, 512 Kbytes Flash, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC / ST Microelectronics [Електронний ресурс]. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407ve.html>.
61. Крупельницький Л. В. Характеристики і структури багатоканальних АЦ-систем, що самокоригуються, для аналізу аудіосигналів : тези доповідей П'ятої міжнародної науково-практичної конференції «*Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації*». Вінниця, Україна. 19–21 квітня 2016. Вінниця : ВНТУ, 2016. С. 129–133.
62. Спеціалізоване і вимірювальне обладнання власної розробки і виробництва для телерадіомовлення: Каталог НТЦ «Аналого-цифрові системи» ВНТУ / Азаров О. Д., Крупельницький Л. В., Стейскал В. Я., Білосконь О. А. Вінниця, 2015. 40 с.
63. Звіт про науково-дослідну роботу «Високопродуктивні багатоканальні аналого-цифрові самокалібровані системи моніторингу й синхронного опрацювання низькочастотних сигналів» / наук. кер. Азаров О. Д., відп. викон. Крупельницький Л. В. / ВНТУ, Вінниця, 2022 р., № держ. реєстрації 0120U002205. 308 с.

Навчальне видання

Олексій Дмитрович Азаров
Сергій Віталійович Богомоллов
Леонід Віталійович Крупельницький
Максим Романович Обертюх

**АНАЛОГОВІ ТА АНАЛОГО-ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ
СИСТЕМНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ФОРМИ ІНФОРМАЦІЇ**

Підручник

Рукопис оформлено *Л. Крупельницьким*

Редактор *В. Дружиніна*

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

Підписано до друку 12.06.2024.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 18,96.
Наклад 20 пр. Зам. № 2024-019.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: irvc.ed.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009.