

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ВИСОКОЛІНІЙНІ СИСТЕМИ ЦИФРОВОЇ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛІВ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2024

УДК 681.325, 681.335

В-53

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 30.05.2024 р.)

Автори:

О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, М. Р. Обертюх, А. С. Фігас

Рецензенти:

Л. З. Мичуда, доктор технічних наук, доцент

О. Н. Романюк, доктор технічних наук, професор

В-53 **Високолінійні системи цифрової реєстрації сигналів** : монографія / О. Д. Азаров, С. В. Богомоллов, М. Р. Обертюх, А. С. Фігас. — Вінниця : ВНТУ, 2024. — 124 с.

ISBN 978-966-641-959-3

У монографії розглянуто питання підвищення лінійності характеристики відтворення в системах цифрової реєстрації аналогових сигналів на базі АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю. Наведено дослідження наявних методів реєстрації сигналів і вузлів цих систем, а також вивчається можливість поліпшення лінійності за допомогою запропонованих нових методів. Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються розробкою високолінійних систем цифрової реєстрації сигналів.

УДК 681.325, 681.335

ISBN 978-966-641-959-3

© О. Азаров, С. Богомоллов, М. Обертюх, А. Фігас, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОЇ РЕЄСТРАЦІЇ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ ТА ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ.....	8
1.1 Огляд існуючих методів побудови систем цифрової реєстрації і відтворення аналогових сигналів та визначення перспективних напрямків досліджень	8
1.2 АЦП прискореного порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю на базі ЦАП на неточних елементах	15
1.3 Методи побудови багаторозрядних ЦАП із ваговою надлишковістю з нерозривною характеристикою перетворення	23
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ЦИФРОВОЇ РЕЄСТРАЦІЇ З ВИСОКОЛІНІЙНИМ ВІДТВОРЕННЯМ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ НА БАЗІ АЦП І ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ.....	33
2.1 Високолінійна система реєстрації сигналів на базі АЦП прискореного порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю	33
2.2 Метод побудови багаторозрядного ЦАП із нерозривною характеристикою перетворення з ваговою надлишковістю на неточних елементах	39
2.3 Похибки характеристики відтворення системи реєстрації аналогової інформації на неточних елементах.....	49

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПОБУДОВИ АНАЛОГОВИХ ВУЗЛІВ АЦП ПРИСКОРЕНОГО ПОРОЗРЯДНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ І ЦАП ІЗ ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ.....	58
3.1 Двотактний високолінійний буфер напруги на базі відбивачів струму	58
3.2 Високолінійний перетворювач струм-струм на базі двотактного балансного підсилювача постійного струму	67
3.3 Високолінійні відбивачі струму з високим та надвисоким вихідними опорами	75
 РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЄКТУВАННЯ АНАЛОГОВИХ ВУЗЛІВ АЦП І ЦАП ДЛЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЇ РЕЄСТРАЦІЇ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ	84
4.1 Система аналог-код-аналог на неточних елементах із нерозривною характеристикою перетворення	84
4.2 Джерело опорної напруги на базі генератора струму з компенсацією температурного дрейфу	88
4.3 Методологія комп'ютерного моделювання аналогових вузлів системи аналог-код-аналог із нерозривною характеристикою перетворення	95
4.4 Широкосмугові двотактні балансні підсилювачі постійного струму для високолінійних систем аналог-код-аналог	101
ЛІТЕРАТУРА	112

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БН	–	буфер напруги
ВДК	–	вхідний двотактний каскад
ВС	–	відбивач струму
ДБН	–	двотактний буфер напруги
ДОН	–	джерело опорної напруги
ДОС	–	джерело опорного струму
ДПК	–	двотактний підсилювальний каскад
ДППС	–	двотактний підсилювач постійного струму
ДПС	–	джерело постійного струму
МН	–	масштабатор напруги
МПС	–	масштабатор-підсилювач струму
НПСЧ	–	надлишкові позиційні системи числення
ОП	–	операційний підсилювач
ПВЗ	–	пристрій вибірки зберігання
ПНС	–	перетворювач напруга-струм
ППС	–	підсилювач постійного струму
ПСС	–	перетворювач струм-струм
СЦР	–	системи цифрової реєстрації
ТКН	–	температурний коефіцієнт напруги

ВСТУП

У першій половині ХХ ст. під час реєстрації й опрацювання інформації використовувалися електронні пристрої аналогового типу, що функціонували в реальному масштабі часу. З розвитком цифрової обчислювальної техніки ситуація кардинально змінилася. Цифрові методи реєстрування і опрацювання сигналів є досконалішими і точнішими. Це стало настільки важливим, що цифрове опрацювання аналогових сигналів вже стало виробничим стандартом.

Базові постулати теорії, у межах якої було доведено можливість відновлення неперервної функції за її дискретними відліками, було сформульовано у першій половині ХХ століття відомими науковцями: К. Шенноном, Г. Найквістом, В. О. Котельниковим [1]–[3]. Саме ці постулати доводять практичну можливість створення систем цифрової реєстрації аналогових сигналів. Подальший розвиток у теорію дискретизації відновлення аналогових сигналів доклали N. Ahmed, Christopher L. Bennett, Jonathan M. Blackledge, James D. Broesch, Hari K. Garg, P. Gaydecki, S. Doug, Monson H. Hayes, A. Khan, Paul A. Lynn, V. Madisetti, James H. McClellan, B. Mulgrew, Alan V. Oppenheim, B. Porat, John G. Proakis, Lyons G. Richard, M. Kuo Sen, K. Steiglitz, Charles A. Schuler, Steven W. Smith, Jonathan Y. Stein, S. Stergiopoulos, Joyce Van De Vegte [4]–[27].

Практичний внесок у створення вказаних СЦР зробили W. Hoeg, T. Lauterbach, H.-D. Wuttig, A. Potamianos, C. Neti, G. Gravier, M. Parker, H. Benoit, J. G. Proakis, D. G. Manolakis, U. Zölzer, R. C. Gonzalez, R. E. Woods [28]–[34].

Важливим аспектом реалізації таких систем є наявність пристроїв, за допомогою яких здійснюються процедури дискретизації і відновлення аналогових сигналів, до яких належать АЦП і ЦАП. Варто зазначити, що найважливішим їх параметром є розрядність. Саме цей параметр намагаються збільшити для покращення відношення сигнал/шум. Не менш важливим параметром АЦП є час перетворення вхідної величини у вихідний код із відповідним числом квантів. Варто зазначити, що отримати водночас високу швидкість перетворення і

велику розрядність є надскладною задачею, для вирішення якої було розроблено велику кількість АЦП.

У цьому плані варто згадати вітчизняних науковців: А. І. Кондалева, В. О Романова., П. П. Орнатського, Б. Й. Швецького [35]–[39].

Школа професора Азарова О. Д. з кінця 80-х років минулого століття займається побудовою АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю з покращеними статичними і динамічними характеристиками [40]–[42]. Застосування таких АЦП і ЦАП у системах цифрової реєстрації, безумовно, має низку переваг, порівняно з двійковими АЦП і ЦАП, оскільки такий підхід до кодування і декодування аналогових величин гарантує високу лінійність характеристики відтворення аналогових сигналів у СЦР. Водночас, запропонований підхід, незважаючи на свою перспективність, є недостатньо поширеним під час створення таких СЦР, що і зумовлює актуальність подальших наукових досліджень.

Метою роботи, описаної в монографії, є підвищення лінійності характеристики відтворення в системах цифрової реєстрації аналогових сигналів на базі АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю.

Автори будуть вдячні за відгуки на монографію, а також за побажання щодо подальшого розвитку досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise", *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol. 37, no.1, pp. 10–21, Jan. 1949.
2. H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory", *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, Feb. 2002.
3. H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," *Trans. AIEE*, vol. 47, pp. 617—644, Apr. 1928.
4. N. Ahmed, and K. R. Rao, *Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing*. New York, USA: Springer-Verlag, 1975.
5. Christopher L. Bennett, *Digital Audio Theory: A Practical Guide Paperback*. Focal Press, 2020.
6. Jonathan M. Blackledge, and Martin Turner, *Digital Signal Processing: Mathematical and Computational Methods, Software Development and Applications*. Horwood Publishing, 2006.
7. James D. Broesch, *Digital Signal Processing Demystified*, Newnes, 1997.
8. Hari K. Garg, *Digital Signal Processing Algorithms*, CRC Press, 1998.
9. P. Gaydecki, *Foundations Of Digital Signal Processing: Theory, Algorithms And Hardware Design*, Institution of Electrical Engineers, 2004.
10. S. Doug, *Digital Signal Processing Technology: Essentials of the Communications Revolution*, American Radio Relay League, 2001.
11. Monson H. Hayes, *Statistical digital signal processing and modeling*. John Wiley & Sons, 2009.

12. Paul A. Lynn, and W. Fuerst, *Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications*, John Wiley & Sons, 1998.
13. V. Madisetti, and Douglas B. Williams, *The Digital Signal Processing Handbook*, CRC Press, 1998.
14. James H. McClellan, Ronald W. Schafer, and Mark A. Yoder, *Signal Processing First*, Prentice Hall, 2003.
15. B. Mulgrew, P. Grant, and J. Thompson, *Digital Signal Processing – Concepts and Applications*, Palgrave Macmillan, 2002.
16. Alan V. Oppenheim, and Ronald W. Schafer, *Discrete-Time Signal Processing*. London, UK: Prentice-Hall International Limited, 2001.
17. B. A. Porat, *Course in Digital Signal Processing*, Wiley, 1996.
18. John G. Proakis, and D. Manolakis *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications, 4th ed.*, Pearson, 2006.
19. John G. Proakis, *A Self-Study Guide for Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 2019.
20. Lyons G. Richard, *Understanding Digital Signal Processing*, Prentice Hall, 2010.
21. M. Kuo Sen, and Gan Woon-Seng, *Digital Signal Processors: Architectures, Implementations, and Applications*, Prentice Hall, 2004.
22. K. A. Steiglitz, *Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music*. Dover Publications, 2020.
23. Charles A. Schuler, *Digital Signal Processing: A Hands-On Approach*. UK: McGraw-Hill, 2018.
24. Steven W. Smith, *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes, 2002.

25. Jonathan Y. Stein, *Digital Signal Processing, a Computer Science Perspective*. Wiley, 2000.
26. S. Stergiopoulos, *Advanced Signal Processing Handbook: Theory and Implementation for Radar, Sonar, and Medical Imaging RealTime Systems*. CRC Press, 2000.
27. Joyce Van De Vegte, *Fundamentals of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 2001.
28. Hoeg, W., Lauterbach, T., & Wuttig, H.-D. (2003). *Digital Audio and Video Broadcasting*. Springer.
29. Potamianos, A., Neti, C., & Gravier, G. (2006). *Digital Speech Processing: Speech Coding, Synthesis, and Recognition*. Wiley-IEEE Press.
30. Parker, M. (2014). *Digital Video Processing for Engineers: A Foundation for Embedded Systems Design*. Springer.
31. Benoit, H. (2007). *Digital Television: Technology and Standards*. Springer.
32. Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2013). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Pearson.
33. Zölzer, U. (2008). *Digital Audio Signal Processing*. John Wiley & Sons.
34. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2017). *Digital Image Processing*. Pearson.
35. А. І. Кондалєв, Перетворювачі форми інформації комп'ютерного типу. Київ, Україна : Знання, 1990.
36. А. І. Кондалєв, В. А. Багацький, В. А. Романов, та В. А. Фабричев, Високопродуктивні перетворювачі форми інформації. Київ, Україна: Наукова думка, 1987.

37. О. І. Кондалев, В. А. Романов, В. А. Багацький, та П. С. Клочан, “Внесок України у розвиток системних перетворювачів форми інформації”, на Міжнар. симпозіумі «Комп'ютери у Європі. Ми- нуле, сьогодення та майбутнє», Київ, Україна : 1998, с. 130.
38. П. П. Орнатський, Автоматичні вимірювання та прилади (анало- гові та цифрові). Київ, Україна : Вища школа, 1986.
39. Б. І. Швецький, Електронні цифрові прилади. Київ, Україна: Техніка, 1991.
40. О. Д. Азаров, *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на ос- нові надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю : Монографія*. Вінниця, Україна : ВНТУ, 2010.
41. О. Д. Азаров, *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : Монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
42. Л. В. Крупельницький, та О. Д. Азаров, *Аналого-цифрові при- строї систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія*. Вінниця, Украї- на:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
43. О. Азаров, та А. Фігас, “Термостабільні джерела опорного струму і напруги для високолінійної системи аналог-код-аналог”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4, с. 24–28, 2022. doi: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-24-28.
44. О. Азаров, та А. Фігас, “Високолінійна система аналог-код- аналог з ваговою надлишковістю на базі перетворювачів струмів”, *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2(54), с. 68–73, 2022. doi: 10.31649/1999-9941-2022-54-2-68-73

45. О. Азаров, Є. Генеральницький, та А. Фігас, “Високолінійні двотактні масштабатори-перетворювачі струмів на базі високоомних струмових дзеркалах”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 3(52), с. 60–69, 2021. doi:10.31649/1999-9941-2021-52-3-60-69.
46. О. Д. Азаров, Р. М. Медяний, та А. С. Фігас, “Відбивачі струму з високим і надвисоким вихідним опором на біполярних транзисторах”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 58-64, 2019. doi:10.31649/1997-9266-2019-142-1-58-64.
47. О. Д. Азаров, Р. М. Медяний, та А. С. Фігас, “Високолінійні буфери й масштабатори напруги на біполярних транзисторах із низьким вхідним струмом”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 1(44), с. 17–26, 2019. doi:10.31649/1999-9941-2019-44-1-17-26.
48. Л. Крупельницький, С. Грабчак, А. Фігас, “Метод та аналого-цифрові засоби пасивного акустичного сканування внутрішніх органів людини”, на *Шостій Міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації»*, Вінниця, 2017. с. 128–130.
49. О. Д. Азаров, М. Р. Обертюх, та А. С. Фігас, “Двотактний підсилювач постійного струму”, *Патент на корисну модель 148609 Україна*, 26.08.2021.
50. О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, І. В. Стягайло, та А. С. Фігас, “Двотактний підсилювач постійного струму”, *Патент на корисну модель 127376 Україна*, 25.07.2018.

51. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, Є. В. Грабовський, та А. С. Фігас, “Підсилювач постійного струму”, *Патент на корисну модель 126401 Україна*, 25.06.2018.
52. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, І. О. Душко, та А. С. Фігас, “Джерело опорної напруги”, *Патент на корисну модель 127377 Україна*, 25.07.2018.
53. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, К. В. Поліщук, та А. С. Фігас, “Двополюсне джерело струму”, *Патент на корисну модель 127212 Україна*, 25.07.2018.
54. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, А. М. Щуровська, та А. С. Фігас, “Двополюсне джерело струму”, *Патент на корисну модель 127213 Україна*, 25.07.2018.
55. А. Фігас, “Багаторозрядний ЦАП із ваговою надлишковістю з виходом по струму”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 80–87. 2022. doi:10.31891/2219-9365-2022-70-2-11.
56. А. С. Фігас, “Багатоканальні аналого-цифрові системи, що самокоригуються для опрацювання акустичних сигналів”, на *Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи»*. 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/view/3587>. Дата звернення: Сер. 26, 2022.
57. А. С. Фігас, “Відбивачі струму на біполярних транзисторах із підвищеним вихідним опором”, на *Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи»*, 2020. [Електронний ресурс]. Режим дос-

- тупу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/view/9134/8624>. Дата звернення: Сер. 26, 2022.
58. А. С. Фігас, “Метод побудови підсилювача постійного струму”. на *L науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця. 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2021/paper/view/11972/10000>. Дата звернення: Сер. 26, 2022.
59. Сайт Державного університету «Житомирська політехніка». Перетворення аналогових сигналів на цифрові. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/188720/mod_resource/content/0/%d0%9f%d0%b5%d1%80%d0%b5%d1%82%d0%b2%d0%be%d1%80%d0%b5%d0%bd%d0%bd%d1%8f%20%d0%b0%d0%bd%d0%b0%d0%bb%d0%be%d0%b3%d0%be%d0%b2%d0%b8%d1%85%20%d1%81%d0%b8%d0%b3%d0%bd%d0%b0%d0%bb%d1%96%d0%b2%20%d0%bd%d0%b0%20%d1%86%d0%b8%d1%84%d1%80%d0%be%d0%b2%d1%96.pdf. Дата звернення: Сер. 26, 2022.
60. Meehan, E. J. (1982). *Microelectronic Analog-Digital Conversion Techniques*. McGraw-Hill.
61. Analog Devices Inc. Engineers. (2005). *Data Conversion Handbook*. Newnes.
62. Spitznagel, E. F. Jr., & Brown, C. A. (1995). *Precision Measurement and Calibration: Selected Methods for Testing and Calibrating Instrumentation*. Springer.
63. Committee on Analog and Digital Instrumentation for Nuclear Power Plants, National Research Council. (1983). *Digital Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants*. National Academies Press.

64. H. T. Chang, “Low-Power High-Performance SAR ADC with Redundancy and Digital Background Calibration”, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2013.
65. W. Kesler, *The Data Conversion Handbook*. Burlington, USA: Newnes, 2005.
66. U. Tietze, and Ch. Schenk, *The semiconductor circuitry. Volume 1*. Book on Demand Ltd., 2018.
67. 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.
68. Alan B. Grebene, *Analog integrated circuits*. United States: Krieger Publishing Co., Inc., 2019.
69. Alan B. Grebene, *Bipolar and MOS analog integrated circuit design*. New Jersey, USA: Wiley Classic Library. 2002
70. 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.
71. U. Tietze, and Ch. Schenk, *The semiconductor circuitry. Volume 2*. Book on Demand Ltd., 2018.
72. B. Razavi. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. McGraw-Hill Education, 2016. 928 p., ISBN 978-0072524932.
73. B. Razavi, *Principles of Data Conversion System Design*. New York, USA:IEEE Press, 1995.
74. R. van der Plassche, *CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters. 2nd Edition*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.

75. G. Manganaro, *Advanced Data Converters*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
76. W. Kester, *Data Conversion Handbook (Analog Devices), 1st edition*. USA: Newnes, 2004.
77. 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.*
78. Bronshtein, I. N., Semendyaev, K. A., Musiol, G., & Muehlig, H. (2007). *Handbook of mathematics for engineers and students in technical universities (5th ed.)*. Berlin, Germany: Springer.
79. О. Азаров, та М. Обертюх, “Генератори однакових струмів із високими вихідними опорами для багаторозрядних ЦАП”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, т. 3, № 46, с. 33-39, 2019. doi: 10.31649/1999-9941-2019-46-3-28-38
80. О. Д. Азаров, О. О. Решетнік, С. М. Захарченко, О. О. Лукашук, та О. М. Харьков, “Формування нерозривних передатних характеристик ЦАП і АЦП на основі вагової надлишковості”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 3(7), с.7-14, 2006
81. Intersil Corporation™, HFA3046/3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models, 1994. [Online]. Available: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>

82. О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, “Високолінійні спеціалізовані струмові дзеркала з давачами рівня сигналу”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 3(40), с. 30-36, 2017.
83. О. Д. Азаров, та В. Є. Яцик, “Методи покращення статичних характеристик відбивачів струму”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 1, с.31-39, 2012.
84. О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, та В. Є. Яцик, “Відбивачі струму для аналогових пристроїв із покращеними статичними і динамічними характеристиками”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 2, с.48-55, 2012.
85. О. Д. Азаров, М. Ю. Теплицький, та В. Є. Яцик, “Спеціалізовані відбивачі струму з парафазними входами для двотактних підсилювальних схем”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 1, с.45-53, 2013.
86. Micro-Cap 12 Analog/Digital Simulator / Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software, 1982-2020. 712 pages.
87. S. Soclof, *Analog Integrated Circuits. 0th Edition*. Prentice-Hall, 1984.
88. W. Jung, *Op Amp Applications Handbook (Analog Devices Series) 1st Edition*. Newnes, 2004.
89. О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Т. Г. Сапсай, та В. П. Тарасенко, *Теоретичні основи комп’ютерних напівпровідникових електронних компонентів : навчальний посібник*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
90. Roy Choudhury, D., & Jain, S. B. (1978). *Linear Integrated Circuits* (2nd ed.). New Delhi, India: New Age International Publishers.
91. Bell, D. A. (1995). *Electronic Devices and Circuits* (5th ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

92. Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (1996). *Electronic Devices and Circuit Theory* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
93. Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (1987). *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
94. M. H. Jones, *A Practical Introduction to Electronic Circuits 3rd Edition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.
95. О. Д. Азаров, та В. А. Гарнага, *Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011.
96. О. Д. Азаров, та С. В. Богомолов, *Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013.
97. G. J. Frye, "Push-pull amplifier with current mirrors for determining the quiescent operating point", *United States Patent 3852678*, Dec. 3, 1974.
98. Y. Okabe, "Single ended push-pull amplifier", *United States Patent 4274059*, Jun. 16, 1981.
99. M. V. Hoover, "Class ab push-pull amplifiers", *United States Patent 4335360*, Jun. 15, 1982.
100. J. W. Wright, "Linear amplifier with transient current boost", *United States Patent 4833424*, May 23, 1989.
101. K. Lehmann, "Unity gain amplifier with high slew rate and high bandwidth", *United States Patent 5003269*, Mar. 26, 1991.

102. K. Lehmann, “Unity gain amplifier with high slew rate and high bandwidth other publications”, *United States Patent 5177451*, Jan. 5, 1993.
103. N. Yoshioka, “Operational amplifier”, *United States Patent 5515005*, May 7, 1996.
104. B. Harvey, “Current-feedback amplifier exhibiting reduced distortion”, *United States Patent 6535064*, Mar. 18, 2003.
105. J. Weiss, “Differential amplifier with common mode regulator”, *United States Patent 5557238*, Sep. 17, 1996.
106. N. Gibson, and T. Hagan, “Ultra linear high speed operational amplifier output”, *United States Patent 6794943*, Sep. 21, 2004.
107. L. Wennerberg, and A. F. Martz, “Bidirectional direct current transistor amplifier”, *United States Patent 3332029*, July 18, 1967.
108. S. Yee, “Complementary emitter follower amplifier based for class A operation”, *United States Patent 3418589*, Dec. 24, 1968.
109. L. K. Hill, “Class B amplifier circuit”, *United States Patent 3529254*, Sept. 15, 1970.
110. B. Duncan, *High Performance Audio Power Amplifiers*. Burlington, USA: Newnes, 1996.
111. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, В. А. Гарнага, “Двотактні підсилювачі постійного струму із симетричною структурою”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4, с. 20–24, 2008.

Наукове видання

**Азаров Олексій Дмитрович
Богомолів Сергій Віталійович
Обертюх Максим Романович
Фігас Анна Сергіївна**

**ВИСОКОЛІНІЙНІ СИСТЕМИ
ЦИФРОВОЇ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛІВ**

Монографія

Рукопис підготовлено С. Богомолівим

Оригінал-макет виготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до друку 02.07.2024 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman
Ум. др. арк. 7,16.
Наклад 20 пр. Зам № 2024-025.

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