

## АНОТАЦІЯ

*Обертюх М. Р.* Метод і апаратні засоби високолінійного надлишкового цифроаналогового перетворення на основі генераторів однакових струмів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 – «Комп'ютерна інженерія» (галузь знань 12 – «Інформаційні технології»). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Аналого-цифрові перетворювачі та цифроаналогові перетворювачі утворюють клас перетворювачів форми інформації, вони використовуються в різних сферах людської діяльності. На теперішній час перетворювачі форми інформації застосовуються у складі різних систем, у системах з цифровими обчислювальними пристроями реалізують функції зв'язку з об'єктом, функції аналого-цифрових контролерів, аналого-цифрових інтерфейсів, аналого-цифрових спецпроцесорів, підсистем тестування, випробовування та регулювання параметрів і характеристик, збирання й оброблення вимірювальної інформації, аналізу і синтезу сигналів, тощо. До характеристик перетворювачів форми інформації висуваються серйозні вимоги – основні це точність і швидкодія.

Традиційний спосіб вирішення проблеми підвищення точності і швидкодії перетворювачів форми інформації – застосування більш досконалої елементної бази. Перетворювачі форми інформації містять вхідні або вихідні канали перетворення аналогового сигналу, які включають в себе підсилувачі, аналогові комутатори та пристрої вибірки-зберігання. Дослідження в сфері підвищення їх точності і швидкодії посідають важливу роль в вирішенні вказаної проблеми. Також важливу роль займають дослідження в області підвищення точності і стабільності джерел опорного струму та напруги, які виступають в якості універсальної міри в перетворювачах форми інформації. Також визначену нішу посідають дослідження, пов'язані з вирішенням проблем

комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в пристрої, що проектуються, надлишковості у формі надлишкових позиційних систем числення.

В дисертаційній роботі поставлена і вирішена актуальна задача підвищення точності багаторозрядних струмових ЦАП за рахунок дотримання принципу суперпозиції у діапазоні вихідного сигналу, а також подальшого розвитку отримали методи підвищення точності двотактних підсилювачів постійного струму та буферів напруги, термостабільних джерел постійного струму та напруги.

У першому розділі дисертаційної роботи проаналізовано сучасні методи побудови двійково-зважених ЦАП з використанням резистивних матриць. Відзначені основні джерела похибок лінійності і суперпозиції ваг розрядів. Сформульована задача побудови надлишкових ЦАП на базі резистивних матриць з використанням генераторів однакових струмів з підвищеною навантажувальною здатністю для зменшення похибок суперпозиції ваг розрядів. Проаналізовано сучасні методи побудови підсилювачів постійного струму на базі двотактних структур. Відзначені причини похибок лінійності, дрейфу нуля та невисокої швидкодії підсилювачів постійного струму. Сформульована задача побудови двотактних підсилювачів постійного струму зі зворотним зв'язком по струму з поліпшеними характеристиками лінійності, дрейфу нуля і навантажувальної здатності. Проаналізовано методи побудови термостабільних джерел опорної напруги з використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника. Сформульована задача побудови джерел опорної напруги і струму з використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника з більш високою термостабільністю. Проаналізовано методи побудови буферів напруги. Сформульована задача створення швидкодіючих буферів напруги з високим вхідним і низьким вихідним опором на основі двотактних структур.

У другому розділі дисертаційної роботи побудована математична модель для розрахунку значення похибки вихідного струму ЦАП, що побудовані з

використанням резистивних матриць і генераторів однакових розрядних струмів, які комутуються у вузли матриці, яка виникає через порушення принципу суперпозиції ваг його розрядів. Запропоновано метод підвищення лінійності багаторозрядних струмових ЦАП за рахунок дотримання принципу суперпозиції ваг розрядів в діапазоні вихідного сигналу шляхом використання генераторів розрядних струмів з високим і надвисоким вихідним опором. Запропоновано метод побудови таких генераторів однакових розрядних струмів. Розроблено методику визначення значень номіналів резисторів для матриць секційного типу, в яких використовують різні типи надлишкових систем числення для представлення ваг розрядів. Визначено критерії вибору рівня надлишковості для ЦАП, побудованих з використанням резистивних матриць і генераторів розрядних струмів, залежно від специфіки їх застосування, зокрема, в АЦП чи ЦА системах.

У третьому розділі дисертаційної роботи запропоновано метод побудови двотактних підсилювачів постійного струму із внутрішнім балансним зворотним зв'язком. Доведено, що вказані пристрої мають кращі характеристики: лінійності і навантажувальної здатності ніж однотактні схеми. Запропоновано метод побудови двотактних буферів напруги з високим вхідним опором і малими вхідними струмами. Доведено, що використання двотактних підсилювачів постійного струму в вихідних каскадах буферів напруги призводить до зменшення їх вихідного опору (пропорційно власному коефіцієнту підсилення двотактних підсилювачів постійного струму). Запропоновано методи побудови джерел опорної напруги і струму з підвищеною термостабільністю з використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника і струмових дзеркал. Розглянуто варіанти побудови джерел опорної напруги і струму, що дозволяють здійснювати значно кращу температурну компенсацію.

У четвертому розділі дисертаційної роботи розроблені структурні і принципові схеми: багаторозрядного надлишкового ЦАП на базі генераторів однакових струмів з високими та надвисокими вихідними опорами, що

комутуються в вузли резистивних матриць, двотактних підсилювачів постійного струму, двотактних буферів напруги і термостабільних джерел опорної напруги. Розглянуто алгоритми функціонування і самокалібрування перетворювача. Розроблено метод побудови ЦА накопичувача з ваговою надлишковістю на неточних елементах для запису, зберігання та генерування низькочастотних сигналів.

**Наукова новизна отриманих результатів**, що виносяться на захист, є такою:

1. Вперше запропоновано метод побудови багаторозрядних ЦАП із ваговою надлишковістю з комутацією однакових струмів у вузли резистивної матриці, в яких застосовуються генератори розрядних струмів із високими та надвисокими вихідними опорами, що дозволяє дотримуватися принципу суперпозиції ваг розрядів в діапазоні вихідного сигналу та істотно зменшити похибку диференційної нелінійності характеристики перетворення.

2. Удосконалено математичну модель для розрахунку секційних резистивних матриць ЦАП залежно від типу конфігурації та характеристик надлишкової системи числення, яка використовується, що дозволяє проводити розрахунки секційних матриць для довільних надлишкових систем числення.

3. Отримали подальшого розвитку методи підвищення точності широкосмугових високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму за рахунок застосування складених транзисторів, принципу підсилення струмів та зворотних зв'язків по струму, що дозволяє збільшити їх лінійність та навантажувальну здатність і двотактних буферів напруги за рахунок застосування складених транзисторів та внутрішніх балансних зворотних зв'язків, що дозволяє збільшити їх вхідний опір.

4. Отримали подальшого розвитку методи побудови термостабільних генераторів постійного струму і напруги із використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника за рахунок застосування складених транзисторів, відбивачів струму і додаткових зворотних зв'язків, що дозволяє збільшити їх термостабільність на 2-3 порядки.

**Практичне значення отриманих результатів**, що виносяться на захист, є таким:

1. Розроблено структурні та принципові електричні схеми багаторозрядних (14-20 двійкових розрядів) струмових ЦАП із ваговою надлишковістю, що використовуються для генерування високолінійних сигналів.

2. Розроблено структурні та принципові електричні схеми високоомних генераторів розрядних струмів (вихідний опір  $10^7$ - $10^9$  Ом) для надлишкових ЦАП, завдяки чому зберігається принцип суперпозиції ваг розрядів в діапазоні вихідного сигналу під час їх перемикання.

3. Розроблено структурні та принципові електричні схеми широкосмугових високолінійних двотактних підсилювачів постійного струму з балансними зворотними зв'язками (нелінійність вихідного струму  $10^{-8}$  А в діапазоні вихідного сигналу  $\pm 1$  мА), а також структурні та принципові електричні схеми двотактних буферів напруги (вхідний опір 1-10 ГОм).

4. Розроблено структурні та принципові електричні схеми термостабільних джерел постійного струму і напруги із використанням напруги ширини забороненої зони напівпровідника (температурний коефіцієнт 0,006-0,3ppm/°C).

5. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету під час викладання дисциплін «Аналого-цифрові системи», «Лінійні інтегральні схеми», «Аналого-цифрові пристрої комп'ютерних систем».

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено в ТОВ МАЙТЕК ПЛЮС.

*Ключові слова:* система числення з ваговою надлишковістю, секційна резистивна матриця, принцип суперпозиції ваг розрядів, високолінійний багаторозрядний струмовий ЦАП, двотактний підсилювач постійного струму, двотактний буфер напруги, генератор термостабільного опорного струму, генератор термостабільної опорної напруги, цифроаналоговий накопичувач.

## ABSTRACT

*Obertyukh M.R.* Method and hardware for high-linear redundant digital-to-analog conversion based on generators of equal currents. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis is submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 123 – "Computer Engineering" (field of knowledge 12 – "Information technology"). – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

Analog-to-digital converters and digital-to-analog converters form a class of information form converters that are used in various spheres of human activity. Currently, information form converters are used as part of various systems, in systems with digital computing devices they implement the functions of communication with the object, the functions of analog-digital controllers, analog-digital interfaces, analog-digital special processors, testing subsystems, testing and regulation of parameters and characteristics, collection and processing of measurement information, analysis and synthesis of signals, etc. Serious requirements are imposed on the characteristics of information form converters – the main ones are accuracy and speed.

The traditional way to solve the problem of improving the accuracy and speed of information form converters is to use a more advanced element base. Information from converters contains input or output channels for converting an analog signal, including amplifiers, analog switches and sample-and-hold devices. Researches in the field of improving their accuracy and speed play an important role in solving this problem. Also, an important place is occupied by researches in the field of improving the accuracy and stability of reference current and voltage sources, which act as a universal measure in information form converters. Also, a certain niche is occupied by researches related to solving the problems of a comprehensive increase, both accuracy and speed by introducing redundancy in the designed devices in the form of redundant positional numeral systems.

In the dissertation work, the urgent problem of increasing the accuracy of multi-bit current DACs by observing the principle of superposition in the output signal range was formulated and solved, as well as methods for improving the accuracy of push-pull DC amplifiers and voltage buffers, thermostable DC current and voltage sources were further developed.

In the first chapter of the dissertation work, modern methods of constructing binary-weighted DACs using resistive matrices are analyzed. The main sources of linearity and superposition errors of the bit weights are noted. The problem of constructing redundant DACs based on resistive matrices using the same current generators with an increased load capacity to reduce the errors of the superposition of the bit weights is formulated. The modern methods of constructing the DC amplifiers based on push-pull structures are analyzed. The reasons for the linearity errors, zero drift and low speed of the DC amplifiers are noted. The problem of constructing push-pull DC amplifiers with current feedback with improved characteristics of linearity, zero drift and loading capacity is formulated. Methods for constructing thermostable reference voltage generators using the voltage of the semiconductor band gap are analyzed. The problem of constructing reference voltage and current sources using the voltage of the bandgap of a semiconductor with a higher thermal stability is formulated. Methods for constructing voltage buffers are analyzed. The problem of creating high-speed voltage buffers with high input and low output impedance based on push-pull structures is formulated.

In the second chapter of the dissertation work, a mathematical model is built for calculating the error value of the output current of the DAC, built using resistive matrices and generators of the same current generators, switched to the matrix nodes, arising from the violation of the principle of superposition of the weights of its bits. A method is proposed for increasing the linearity of multi-bit current DACs by observing the principle of superposition of digit weights in the output signal range by using current generators with high and ultra-high output resistance. A method for constructing such generators of identical digit currents is proposed. A method has been developed for determining the values of the nominal resistors for section-type

matrices, in which different types of redundant number systems are used to represent the weights of the digits. The criteria for choosing the level of redundancy for DACs built using resistive matrices and same current generators, depending on the specifics of their application, in particular, in ADC or DAC systems, have been determined.

In the third chapter of the dissertation work, a method for constructing push-pull DC amplifiers with internal balanced feedback is proposed. It has been proven that these devices have better linearity and loading characteristics than single-stage circuits. A method for constructing push-pull voltage buffers with high input impedance and low input currents is proposed. It is proved that the use of push-pull DC amplifiers in the output stages of voltage buffers leads to a decrease in their output resistance (proportional to the intrinsic gain of push-pull DC amplifiers). Methods for constructing reference voltage and current sources with increased thermal stability using the voltage of the semiconductor band gap and current mirrors are proposed. Variants of constructing reference voltage and current sources are considered, allowing producing significantly better temperature compensation.

In the fourth chapter of the dissertation work, structural and schematic diagrams were developed: a multi-bit redundant DAC based on generators of the same currents with high and ultra-high output resistances, switched to the nodes of resistive matrices, push-pull DC amplifiers, push-pull voltage buffers and thermostable voltage references. Algorithms for the operation and self-calibration of the converter are considered. A method for constructing a DAC storage device with weight redundancy on inaccurate elements for recording, storing and generating low-frequency signals has been developed.

**The scientific novelty** of the results obtained, which are submitted for defense, is as follows:

1. For the first time, a method for constructing multi-bit DACs with weight redundancy with switching of the same currents to the nodes of a resistive matrix is proposed, in which generators of discharge currents with high and ultrahigh output resistances are used, which allows adhering to the principle of superposition of digit



weights in the output signal range and significantly reducing the error of differential nonlinearity of conversion characteristics

2. Improved mathematical model for calculating sectional resistive DAC matrices depending on the type of configuration and characteristics of the used redundant number system, which allows calculating sectional matrices for arbitrary redundant numeral systems.

3. Methods for increasing the accuracy of broadband high-linear push-pull DC amplifiers have been further developed through the use of composite transistors, the principle of amplifying currents and current feedback, which makes it possible to increase their linearity and load capacity and push-pull voltage buffers through the use of composite transistors and internal balanced feedback connections, which allows you to increase the input impedance.

4. Methods for constructing thermostable direct current and voltage generators using the voltage of the band gap of a semiconductor have been further developed through the use of composite transistors, current reflectors and additional feedbacks, which make it possible to increase their thermal stability by 2-3 orders of magnitude.

**The practical significance** of the results obtained in defense is as follows:

1. Structural and basic electrical circuits of multi-bit (14-20 binary digits) current DACs with weight redundancy, used to generate high-linear signals, have been developed.

2. Structural and basic electrical circuits of high-resistance generators of digit currents (initial resistance  $10^7$ - $10^9$  Ohm) for redundant DACs have been developed, due to which the principle of superposition of the weights of digits in the range of the output signal during their switching is preserved.

3. Structural and basic electrical circuits of broadband high-linear push-pull DC amplifiers with balanced feedbacks (nonlinearity of the output current  $10^{-8}$  A in the range of the output signal  $\pm 1$  mA), as well as structural and basic electrical circuits of push-pull voltage buffers (input resistance 1- 10 GOhm).

4. Structural and schematic electrical diagrams of thermostable direct current and voltage sources using the voltage of the semiconductor band gap (temperature coefficient 0.006-0.3 ppm / ° C) have been developed.

5. The results of the dissertation work are used in the educational process of Vinnitsa National Technical University in teaching the disciplines "Analog-digital systems", "Linear integrated circuits", "Analog-digital devices of computer systems".

6. The results of the dissertation work are implemented in MAYTEK PLUS LLC.

*Keywords:* numeral system with weight redundancy, sectional resistive matrix, principle of superposition of bit weights, high-linear multi-bit current DAC, push-pull DC amplifier, push-pull voltage buffer, thermostable reference current generator, thermostable reference voltage generator.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:**

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

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

[3] 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.

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

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

[6] О. Д. Азаров, С. Ш. Каців, та М. Р. Обертюх, “Двотактні перетворювачі струм-струм і напруга-струм із комутацією вихідного сигналу”, *Наукові Праці Вінницького Національного Технічного Університету*, №1, с. 1-8, 2018.

[Електронний ресурс]. Режим доступу:  
<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/533/524>

[7] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, “Високолінійні двотактні балансні буфери напруги на біполярних транзисторах”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 1(41), с. 34-41, 2018.

[8] О. Азаров, М. Обертюх, та С. Кирилащук, “Резистивні матричні дільники струму для багаторозрядних ЦАП із ваговою надлишковістю”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, т. 2, № 45, с. 33-39, 2019. doi: 10.31649/1999-9941-2019-45-2-33-39

[9] 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

**– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що входять науково-метричну базу даних SCOPUS**

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

**Документи інтелектуальної власності, що отримані за результатами дисертації:**

**– патенти на корисну модель:**

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

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

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

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

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

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

[17] О.Д. Азаров, М.Р. Обертюх, С.А. Кирилашук, "Струмове дзеркало", *Патент на корисну модель 134333 Україна*, 10.05.2019.

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

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

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

[21] О.Д. Азаров, М.Р. Обертюх, С.А. Кирилашук, "Джерело струму змінного напрямку", *Патент на корисну модель 135998 Україна*, 25.07.2019.

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

[23] О.Д. Азаров, Р.М. Медяний, М.Р. Обертюх, С.Ш. Кацив, "Відбивач струму", *Патент на корисну модель 136282 Україна*, 12.08.2019.

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

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

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

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

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

**– патенти на винахід:**

[29] О.Д. Азаров, В.А. Гарнага, М.Р. Обертюх, “Джерело опорної напруги”, *Патент на винахід 117711 Україна*, 10.09.2018.

[30] О.Д. Азаров, С.В. Павлов, М.Р. Обертюх, О.Я. Стахов, О.О. Лукашук, “Відбивач струму”, *Патент на винахід 124781 Україна*, 18.11.2021.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

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

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

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

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

[35] О. Д. Азаров, та М. Р. Обертюх, “Резистивні дільники струму для багаторозрядних надлишкових ЦАП”, на *XLIX Науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2020)*, Вінниця, 2020, с. 840-843. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2020>.

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

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