

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.3

О. Д. Азаров, А. С. Фігас

ВИСОКОЛІНІЙНА СИСТЕМА АНАЛОГ-КОД-АНАЛОГ З
ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ НА БАЗІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТРУМІВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. В теперішній час аналого-цифрові- і цифроаналогові- перетворювачі широко застосовуються для операцій з сигналами і дозволяють проводити запис і зберігання сигналів, виведення сигналу в аналоговій формі, виконання операцій з сигналами, генерування сигналів довільної форми. В ряді застосувань аналого-цифрові- і цифроаналогові- перетворювачів для обробки сигналів потрібна висока роздільна здатність, низькі шуми та висока лінійність передатної характеристики перетворення аналог-цифра-аналог для забезпечення низьких нелінійних, частотних, фазових спотворень сигналів й високого відношення сигнал/шум. Розглянуто метод побудови високолінійної системи аналог-код-аналог з ваговою надлишковістю на базі перетворювачів струмів. Розглянуті особливості застосування надлишкових позиційних систем числення в аналого-цифровому та цифроаналоговому перетворенні. Вказана здатність надлишкових позиційних систем числення забезпечувати відсутність «розривів» у перетворювальній характеристиці, викликаних відхиленнями реальних ваг розрядів від їхніх розрахункових значень, а також здатність істотно коригувати вихідні похибки цифроаналогових перетворювачів, а саме лінійність перетворювальної характеристики. Вказана здатність надлишкових позиційних систем числення забезпечувати незважаючи на подовження розрядної сітки, істотне збільшення швидкодії. Наведена схема перетворювача аналог-код-аналог на основі надлишкових позиційних систем числення з буферним накопиченням відліків сигналів в пам'яті. Наведений розрахунок похибок відтвореного перетворювачем аналог-код-аналог сигналу. Обґрунтована актуальність і практична доцільність застосування надлишкових систем числення для отримання високої розрядності та швидкодії систем аналого-код-аналог при використанні неточних компонентів.

Ключові слова: перетворення сигналів, вагова надлишковість, АЦП, ЦАП.

Abstract. At present, analog-to-digital and digital-to-analog converters are widely used for operations with signals and allow recording and storing signals, outputting a signal in analog form, performing operations with signals, and generating arbitrary waveforms. In a number of applications of analog-to-digital and digital-to-analog converters for signal processing, high resolution, low noise and high linearity of the analog-to-digital-to-analog transfer characteristic are required to provide low non-linear, frequency, phase distortion of signals and a high signal-to-noise ratio. A method for constructing a high-linear analog-code-analog system with weight redundancy based on current converters is considered. The features of the use of redundant positional number systems in analog-to-digital and digital-to-analog conversion are considered. The ability of redundant positional number systems to ensure the absence of «gaps» in the conversion characteristic caused by deviations of the real weights of digits from their calculated values, as well as the ability to significantly correct the initial errors of digital-to-analog converters, namely the linearity of the conversion characteristic, is indicated. The ability of redundant positional number systems to provide, despite the lengthening of the bit grid, a significant increase in performance is indicated. The scheme of analog-code-analog converter based on redundant positional number systems with accumulation of buffer samples of signals in memory is presented. Calculation of errors of the analog-code-analog signal reproduced by the converter is given. The relevance and practical expediency of using redundant number systems to obtain high bit capacity and speed of analog-code-analog systems using inaccurate components is substantiated.

Key words: signal conversion, weight redundancy, ADC, DAC.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-68-73>.

Вступ

В теперішній час АЦ- і ЦА- перетворювачі широко застосовуються для операцій з сигналами [1-3]. Такі системи дозволяють проводити: запис і зберігання сигналів – проводитися фіксація значень сигналу і забезпечується можливість їх тривалого зберігання в цифровій формі без втрати інформації; виведення сигналу в аналоговій формі – проводиться зворотне перетворення збереженого сигналу в аналогову форму в необхідний час; виконання операцій з сигналами – додавання, віднімання, множення, інтегрування і більш складні їх похідні, такі як знаходження кореляційних залежностей, перетворення Фур'є, фільтрація; генерування сигналів довільної форми – будь-яка математично визначена і розрахована в цифровій формі функція може бути перетворена в аналоговий сигнал [1-3]. В ряді застосувань АЦ- і ЦА- перетворювачів для обробки сигналів потрібна висока роздільна здатність, низькі шуми та висока лінійність передатної характеристики перетворення аналог-цифра-аналог. Ці параметри в наскрізному тракту перетворення й опрацювання сигналів повинні забезпечити низькі нелінійні, частотні, фазові спотворення сигналів й високе відношення сигнал/шум.

Актуальність

В багатьох сучасних застосуваннях систем обробки низькочастотних сигналів (вимірювання, звукові процесори) виникає необхідність в таких функціональних можливостях, як :

1) затримка аналогового сигналу на заданий чи змінюваний в процесі роботи час (декілька секунд). Наприклад, в радіо та телевізійному мовленні прямого ефіру такі пристрої повинні забезпечити попадання в ефір нетактичних висловлювань гостей студії або телефонних дозвонювачів. Також актуальна задача синхронізації відео і аудіосигналів, якщо один з них запізнюється через цифрове ущільнення й передавання по цифровим лініям зв'язку;

2) запам'ятовування фрагменту вимірюваного аналогового сигналу з метою наступного багатократного відтворення або аналізу, – наприклад, при діагностуванні автомобільних двигунів за акустичними параметрами їх роботи. Інший приклад – в медицині;

3) відтворення сигналу в зворотньому напрямку, або з іншою частотою дискретизації (пришвидшення або уповільнення сигналу). Прикладом можуть слугувати спеціальні методи шифрування аналогових сигналів.

Тому забезпечення високої роздільної здатності, низьких нелінійних, частотних, фазових спотворень сигналів й високого відношення сигнал/шум в системах аналог-код-аналог, в тому числі за рахунок застосування вагової надлишковості є важливою та актуальною задачею.

Мета

Створення високолінійної системи аналог-код-аналог з ваговою надлишковістю з використанням ЦАП на неточних компонентах.

Задачі досліджень

1. Проаналізувати існуючі методи побудови систем запису, запам'ятовування, обробки, відновлення та генерування сигналів на базі перетворювачів аналог-цифра-аналог.

2. Проаналізувати методи використання надлишковості при аналого-цифровому та цифро аналоговому перетворенні та їх переваги.

3. Розглянути методи побудови високолінійних швидкодіючих перетворювачів аналог-цифра-аналог з можливістю запам'ятовування та відтворення сигналів.

Розв'язання задач досліджень

Блок схема типової системи АЦА зображена на рисунку 1. Аналоговий вхідний фільтр (ФНЧ1) використовується для обмеження полоси частот вхідного аналогового сигналу, щоб забезпечити виконання умов теореми Котельникова. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) переводить сигнал в цифрову форму. Після цифрової обробки чи зберігання в цифровому пристрої (ЦП) сигнал за допомогою цифроаналогового перетворювача (ЦАП) знову переводиться в аналогову форму. Вихідний фільтр (ФНЧ2) згладжує вихідний сигнал і усуває небажані високочастотні компоненти, які виникають в наслідок шуму квантування. Створення систем такого типу з високою розрядністю та швидкодією потребує значного ускладнення та подорожчання АЦП та ЦАП і використання в цьому випадку надлишковості може дати значні переваги.

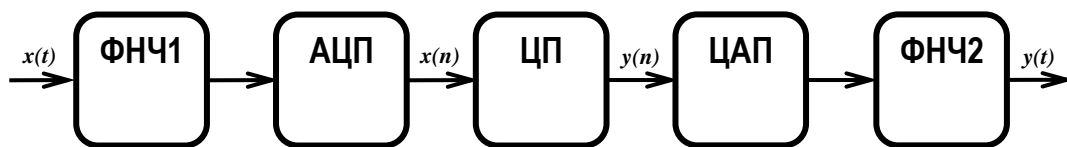


Рисунок 1 – Схема спрощеної АЦА системи.

Перспективним напрямком розвитку АЦП порозрядного наближення є їхня побудова з використанням надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ) [4-6]. Проаналізуємо особливості САЦП на основі НПСЧ.

У НПСЧ використовується недвійкова основа системи числення $1 < \alpha < 2$, а ваги розрядів представляються у вигляді

$$Q_i = q \cdot \alpha^i, \quad (1.1)$$

де q – вага молодшого розряду.

Будь-яке дійсне число може бути представлене в НПСЧ у вигляді суми ваг розрядів

$$X = \sum_{i=0}^N a_i \cdot q \cdot \alpha^i, \quad (1.2)$$

де $a_i = \overline{0, 1}$ – двійковий i -ий біт N -розрядного результату перетворення.

Основна перевага НПСЧ, реалізована при аналого-цифровому перетворенні складається у відсутності «розривів» у перетворювальній характеристиці, викликаних відхиленнями реальних ваг розрядів від

їхніх розрахункових значень, рисунок 2. Для «двійкових» АЦП ці відхилення не повинні перевищувати половини молодшого розряду. Для АЦП на основі «золотої пропорції» відносна похибка ваг розряду за рахунок технологічних, температурних, часових факторів може досягати до 23,6%, що не приведе до пропусків кодів.

Як видно з викладеного, у САЦП на основі НПСЧ надлишковість виявляється тільки у співвідношенні між вагами розрядів ЦАП. Проте, теоретично обґрунтована, підтверджена результатами моделювання й практично перевірена в численних розробках [5,6] здатність САЦП істотно коригувати вихідні похибки ЦАП. Так, при вихідних відхиленнях ваг розрядів «надлишкового» ЦАП на рівні 5-10% вдається одержати після самокалібрування САЦП похибка лінійності 0.003%. Причому, самокалібрування може бути проведено в будь-який момент часу роботи САЦП, наприклад, при змінненні температури навколишнього середовища.

Очевидно, що описаний спосіб коригування ваг розрядів САЦП поряд з очевидними перевагами накладає також і певні обмеження. Так, при підсумовуванні ваг розрядів ЦАП повинен виконуватися принцип суперпозиції, що передбачає незалежність ваги розряду від станів («включене» або «виключене») інших розрядів. Необхідно також забезпечити й досить малий температурний і часовий дрейф ваг розрядів, якщо за умовами експлуатації АЦП у складі системи неможливо досить часто здійснювати самокалібрування.

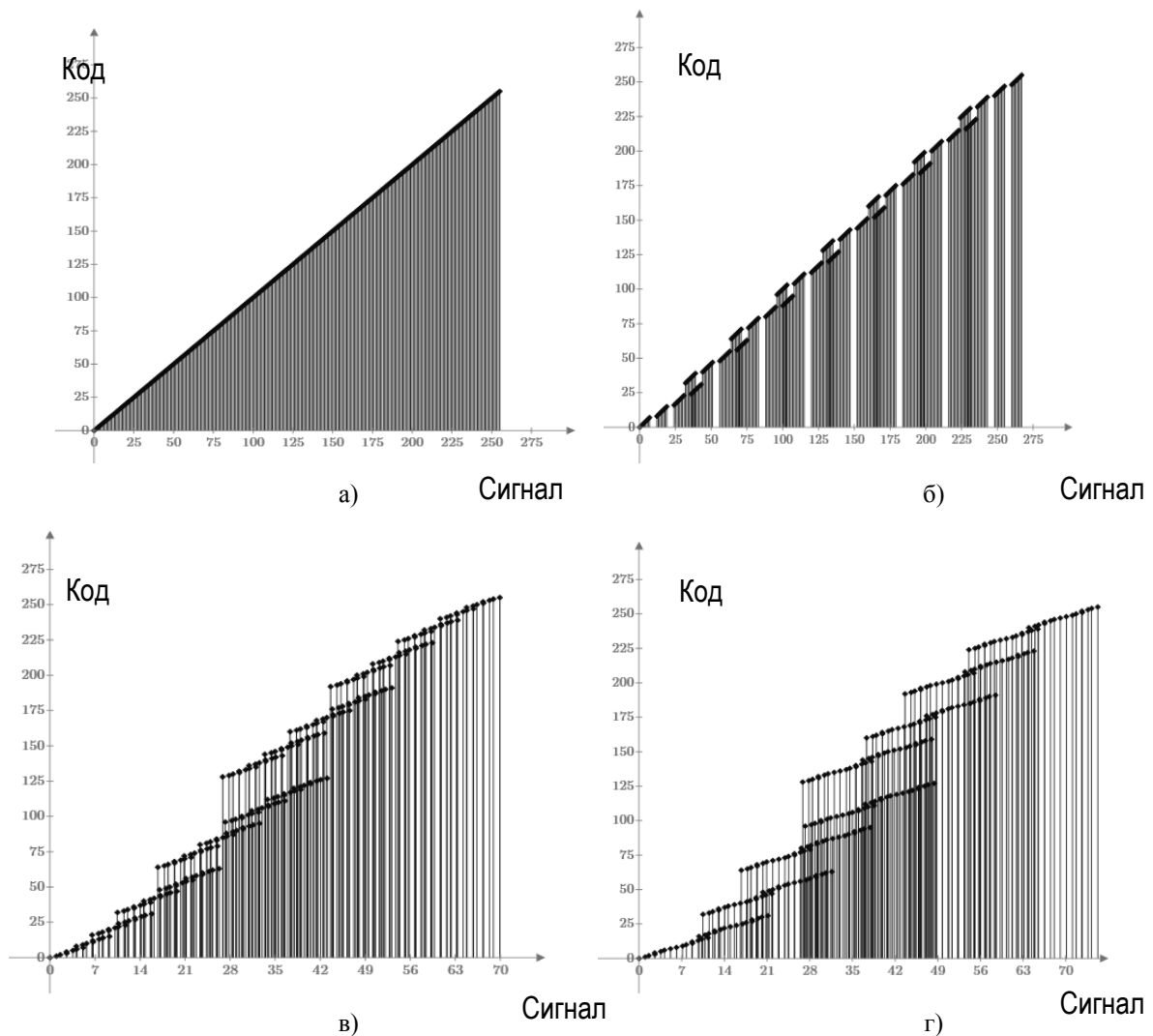


Рисунок 2 – Характеристики перетворення АЦП для різних систем числення: а) двійкова $\alpha=2$ без спотворень; б) двійкова $\alpha=2$ зі спотвореннями; в) надлишкова $\alpha=1,6$ без спотворень; г) надлишкова $\alpha=1,6$ зі спотвореннями

Число розрядів N_α , задіяних у надлишковому ЦАП, природно, більше ніж у двійковому N_2 й визначається зі співвідношення:

$$\alpha^{N_\alpha} = 2^{N_2} \Rightarrow N_\alpha = N_2 \cdot \log_\alpha 2 \quad (1.3)$$

Так, для побудови АЦП 16-ти розрядної точності ($N_2=16$) при $\alpha=1,618$ потрібен ЦАП на $N_\alpha=24$ розряду коду «золотої пропорції». Незважаючи на збільшення розрядної сітки, швидкодія АЦП на основі НПСЧ не зменшується, а навпаки, може бути істотно збільшена. Зазначений ефект виникає внаслідок витрати частини надмірності ваг розрядів на автокомпенсацію динамічних похибок із сигналу, що компенсує [5-6].

Відомо, що наявність при аналого-цифровому перетворенні динамічних похибок може призвести до появи розривів кодувальної характеристики. При правильному ж аналого-цифровому перетворенні наприкінці врівноважування похибка недовстановлення не повинна перевищувати половини молодшого розряду:

$$\Delta_g(t_{np}) = \left| A_{BX} - \sum_{i=0}^N Q_i(t-t_i) \right| \leq q/2, \quad (1.4)$$

де Δ_g – динамічна похибка квантування;

$Q_i(t-t_i)$ – вага i -го розряду, як функція від часу його включення t_i ;

$t_{np} = \Delta t \cdot N$ – сумарний час перетворення;

Δt – тривалість такту зрівноважування.

Наявність похибки на кожному з тактів врівноваження може привести або до невключення необхідного розряду, або до помилкового включення розряду, що перевищує по своїй вазі некомпенсований сигнал. У двійкових АЦП зазначені помилки не можуть бути виправлені на наступних тактах зрівноважування й приводять до похибок зрівноважування, що проявляються в розривах передатної характеристики. Мінімальна тривалість такту у двійковому АЦП визначається значенням [5]:

$$t_2 = \tau \cdot (N_2 + 1) \cdot \ln 2, \quad (1.5)$$

де τ – постійна часу перехідних процесів.

В АЦП на основі НПСЧ поява помилок типу «невключення» розряду компенсується на наступних тактах перетворення за рахунок включення групи більш молодших розрядів. Таким чином в АЦП на основі НПСЧ, вдається, незважаючи на подовження розрядної сітки, істотно збільшити швидкодію. Потенційні можливості розглянутих способів збільшення швидкодії можуть бути досягнуті тільки з урахуванням ряду факторів, пов'язаних з динамічними характеристиками ЦАП і схеми порівняння. Так, при перемиканні розряду важливим виявляється форма різницевого сигналу. Оптимальною є одноекспонентна форма залежності сигналу від часу, для якої й отримані наведені вище оцінки збільшення швидкодії. У реальних пристроях перехідні процеси відбуваються складніше: позначаються затримки включення розрядів, комутаційні перешкоди, перерегулювання, «затягування» і т.д. Вплив зазначених ефектів може бути зменшене за рахунок переходу на струмовий принцип побудови пристрою квантування й розробкою відповідних схемних рішень [7].

На рисунку 3 наведено запропоновану структурну схему АЦА-перетворювача на основі НПСЧ з буферним накопиченням відліків сигналів в пам'яті.

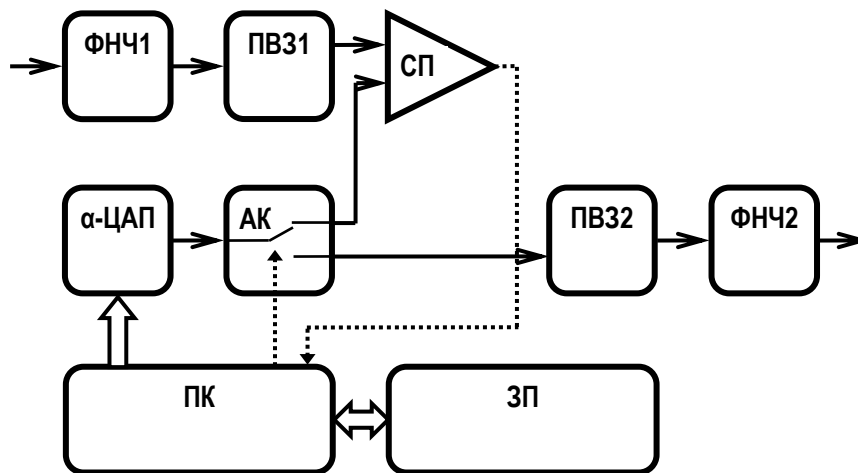


Рисунок 3 – Схема АЦА-перетворювача на основі НПСЧ з буферним накопиченням відліків сигналів в пам'яті

Надлишковий ЦАП на основі НПСЧ працює по чергово – в АЦП порозрядного врівноваження, та (або) в ЦАП. При цьому перетворення з НПСЧ в двійкову систему числення не здійснюється, в цифровій пам'яті зберігаються коди, отримані при АЦ-перетворення. За умови відсутності «розривів» характеристики зберігається задана якість АЦ-перетворення. Пристрої вибірки-зберігання потрібні для збереження аналогового сигналу на час перетворення. Процедури самокорекції для АЦП і ЦАП не потрібні.

Як було зазначено раніше передавальна характеристика (код-сигнал) для надлишкових систем числення залишається нерозривною навіть при істотній похибці ваг розрядів ЦАП або при значному скороченні часу встановлення сигналу на виході внутрішнього ЦАП в процесі порозрядного врівноваження в АЦП. Тобто для будь-якого значення вхідного сигналу $U_{X.BX}$ (в АЦП) існує така кодова комбінація K_X на вході внутрішнього ЦАП, що:

$$U_{X.BX} + \delta U_{BX.T} - U_{CAP}(K_X) < 1 MЗР, \quad (1.6)$$

де $\delta U_{BX.T}$ – похибка вхідного тракту. Якщо потім в якийсь інший момент часу подати отриману кодову комбінацію K_X на вхід того ж внутрішнього ЦАП, і використовувати аналоговий сигнал з його виходу в якості вихідного $U_{X.VIX}$, то він буде дорівнювати:

$$U_{X.VIX} = \delta U_{VIX.T} + U_{CAP}(K_X), \quad (1.7)$$

де $\delta U_{VIX.T}$ – похибка вихідного тракту. Звідки збережений вхідний сигнал і відновлений вихідний будуть пов'язані співвідношенням:

$$U_{X.VIX} = U_{X.BX} + \delta U_{BX.T} + \delta U_{VIX.T} + \delta U_{KB}, \quad (1.8)$$

де δU_{KB} – похибка квантування. Як можна бачити похибка відновленого сигналу не залежить від конкретних значень похибок внутрішнього ЦАП, єдина умова, яка до останнього висувається – це нерозривність його передатної характеристики (код-сигнал), тобто його похибки не повинні бути досить великими. В даному випадку є неважливою конкретна відповідність надлишкового коду його двійковому еквіваленту.

У зазначених раніше завданнях роботи з нестационарними сигналами операції запису і зберігання сигналів, операції відновлення сигналів і виконання операцій над сигналами в аналоговій формі не вимагають здійснення будь-якої математичної обробки їх цифрових еквівалентів, коди в надлишковій формі потрібно просто зберігати і використовувати для зворотного перетворення в необхідний час. Тобто також є неважливим конкретна відповідність надлишкового коду його двійковому еквіваленту. Таким чином створення систем аналого-код-аналог з високою розрядністю та швидкодією при використанні надлишковості не потребує значного ускладнення та подорожчання АЦП та ЦАП і має значні переваги. Також для підвищення швидкодії ЦАП може бути запропоновано використання при їх побудові принципу перетворення струмів [8].

Використання АЦП порозрядного врівноваження з ваговою надлишковістю у складі систем реєстрації аналогових сигналів має певні переваги порівняно з АЦП на основі двійкових систем числення, а саме:

- більшу швидкодію, що дозволяє збільшити кількість відліків на однакових проміжках часу, це в свою чергу знижує вимоги до ФНЧ на виході ЦАП;
- реалізація ЦАП з ваговою надлишковістю дозволяє зробити нерозривною характеристику перетворення незважаючи на використання цього ЦАП в АЦП з прискореною швидкодією. АЦП на базі такого ЦАП не буде мати пропусків кодів в характеристиці перетворення, а це дозволить зареєструвати значення аналогових сигналів у всьому діапазоні перетворення.

Висновки

1. Проаналізовано методи використання надлишковості при аналого-цифровому та цифро аналоговому перетворенні та її переваги.
2. Розглянуто методи побудови високолінійних швидкодіючих перетворювачів аналого-цифра-аналог з можливістю запам'ятовування та відтворення сигналів з використанням вагової надлишковості. Обґрунтована можливість значного підвищення швидкодії та зниження вартості.

Список літератури

- [1] Emmanuel C. Ifeachor (Author), Barrie W. Jervis, Digital Signal Processing: A Practical Approach 2nd Edition – Wokingham, England: Addison-Wesley Publishing Company, 2001.
- [2] W. Kesler, *The Data Conversion Handbook*. Burlington, USA: Newnes, 2005.

- [3] Ю. Р. Гнатек, *Справочник по цифроаналоговым и аналого-цифровым преобразователям: Пер. с англ.* Москва, СССР: Радио и связь, 1982.
- [4] А. П. Стахов, *Введение в алгоритмическую теорию измерения.* Москва, СССР: "Сов. Радио", 1977.
- [5] О. Д. Азаров. *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: монографія.* Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [6] Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров, *Аналого-цифрові пристрої систем, що самокалібруються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [7] O. D. Azarov, L. V. Krupelnitskiy, P. Komada, T. Ławicki, N. Askarova, A. Sagymbekova, "AD systems for processing of low frequency signals based on self calibrate ADC and DAC with weight redundancy", *Przegląd Elektrotechniczny*, volume R. 93, № 5, pp. 125-128. 2017.
- [8] О. Азаров, 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.

Стаття надійшла: 20.05.2022.

References

- [1] Emmanuel C. Ifeachor (Author), Barrie W. Jervis, *Digital Signal Processing: A Practical Approach* 2nd Edition – Wokingham, England: Addison-Wesley Publishing Company, 2001.
- [2] W. Kesler, *The Data Conversion Handbook.* Burlington, USA: Newnes, 2005.
- [3] Yu. R. Gnatek, *Spravochnik po cifroanalogovym i analogo-cifrovym preobrazovatelyam: Per. s angl.* Moskva, SSSR: Radio i svyaz', 1982 [in Russian].
- [4] A. P. Stahov, *Vvedenie v algoritmicheskuyu teoriyu izmereniya.* Moskva, SSSR: "Sov. Radio", 1977 [in Russian].
- [5] O. D. Azarov. *Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiu: monohrafiia.* Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2010 [in Ukrainian].
- [6] L. V. Krupelnitskiy, O. D. Azarov, *Analoho-tsyfrovi prystroi system, shcho samokalibriuetsia, dlia vymiriuvan i obrobliannia nyzkochastotnykh syhnaliv: monohrafiia.* Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2005 [in Ukrainian].
- [7] O. D. Azarov, L. V. Krupelnitskiy, P. Komada, T. Ławicki, N. Askarova, A. Sagymbekova, "AD systems for processing of low frequency signals based on self calibrate ADC and DAC with weight redundancy", *Przegląd Elektrotechniczny*, volume R. 93, № 5, pp. 125-128. 2017.
- [8] O. D. Azarov and M. R. Obertiukh, "Generators of identical currents with high output resistance for multi-digit DACs", *ITKI*, vol. 46, no. 3, pp. 28–38, Dec. 2019, doi: 10.31649/1999-9941-2019-46-3-28-38 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки.

Фігас Ганна Сергіївна – аспірант кафедри обчислювальної техніки.

O. D. Azarov, A. S. Figas

HIGH-LINEAR ANALOGUE-CODE-ANALOGUE SYSTEM WITH WEIGHT REDUNDANCY BASED ON CURRENT CONVERTERS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia