

Валентин БАГАЦЬКИЙ

Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ України
Bagatskiy@nas.gov.ua

Максим ОБЕРТЮХ

Вінницький національний технічний університет

Сергій ЗАХАРЧЕНКО

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3977-2908>

ВИСОКОПРОДУКТИВНІ АЦП КОМБІНОВАНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ

У теперішній час аналого-цифрові перетворювачі використовуються в обчислювальних і керуючих системах, що значно поширилися в епоху цифрової революції. Підвищення точності, швидкодії, енергоефективності, надійності аналого-цифрових перетворювачів є надзвичайно важливим. Одними з найбільш класичних типів аналого-цифрових перетворювачів є АЦП послідовного наближення та слідувального типу. Час перетворення АЦП слідувального типу є змінним і визначається різницею між двома відліками вхідної напруги. Тому комбінування слідувального підходу та методу послідовного наближення в разі різких стрибків вхідного сигналу дозволяє значно покращити характеристики перетворення. Також значні переваги має використання надлишкових систем числення для ваг розрядів АЦП, що дозволяє значно підвищити лінійність характеристики перетворення. Розглянуто методи побудови АЦП, працюючих за принципом послідовного наближення та аналого-цифрових перетворювачів, алгоритм роботи яких є слідувальним. Запропоновано метод побудови АЦП комбінованого типу, який поєднує слідувальний алгоритм перетворення та алгоритм послідовного наближення, що дозволяє покращити характеристику перетворення АЦП. Доведено доцільність використання в АЦП комбінованого типу надлишкових позиційних систем числення. Проаналізовано властивість надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ), що притаманна їм за умови відхилення реальних ваг розрядів від їхніх теоретичних значень, – забезпечувати відсутність "розривів" у перетворювальній характеристиці, а також здатність виконувати процедуру самокалібрування ваг розрядів АЦП, тим самим значно покращуючи лінійність перетворювальної характеристики. Вказано, що навіть за подовження розрядної сітки для АЦП, побудованих на базі надлишкових позиційних систем числення, не відбувається зменшення їх швидкодії.

Ключові слова: комбіноване врівноваження, вагова надлишковість, АЦП.

Valentine BAHATSKYI

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Maxim OBERTYUKH

Vinnytsia National Technical University

Serhii ZAKHARCHENKO

Vinnytsia National Technical University

HIGHLY-PRODUCTIVE ADC WITH COMBINED BALANCING

Today analog-to-digital converters are used in computing and control systems which have greatly expanded in the era of the digital revolution. Increasing the accuracy, speed, energy efficiency, and reliability of analog-to-digital converters is extremely important. One of the most classic types of analog-to-digital converters is the sequential approximation and tracking type ADCs. The conversion time of the tracking type ADC is variable and is determined by the difference between the two readings of the input voltage. Therefore, combining the tracking approach and the method of successive approximation in the case of sharp jumps in the input signal allows you to significantly improve the conversion characteristic. Also the use of redundant counting systems for the weights of the ADC digits has significant advantages, which makes it possible to significantly increase the linearity of the conversion characteristic. The methods of construction of ADCs working on the principle of successive approximation and analog-digital converters whose operation algorithm is tracking are considered. A method of constructing a combined type ADC is proposed, which combines a follow-up conversion algorithm and a sequential approximation algorithm, which allows to improve the characteristics of ADC conversion. The expediency of using a combined type of redundant positional counting systems in ADCs has been proven. The analyzed property of redundant positional counting systems, which is inherent in them when the real weights of the digits deviate from their theoretical values, ensures the absence of "gaps" in the conversion characteristic, as well as the ability to perform the procedure of self-calibration of the weights of the ADC digits, thereby significantly improving the linearity of the conversion characteristic. It is indicated that even with the lengthening of the bit grid for ADCs built on the basis of redundant positional counting systems, their performance does not decrease.

Key words: combined balancing, weight redundancy, ADC.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Аналого-цифрові перетворювачі та цифроаналогові перетворювачі утворюють клас перетворювачів форми інформації, вони використовуються в різних сферах людської діяльності. До характеристик перетворювачів форми інформації висуваються серйозні вимоги – основні це точність і швидкодія. Залежно від потрібної швидкодії і точності використовуються різні підходи щодо побудови аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів. Також визначену нішу посідають дослідження, пов'язані з вирішенням проблем комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в пристрої, що проєктуються, надлишковості у формі надлишкових позиційних систем числення.

Аналіз досліджень та публікацій

АЦП слідкувального типу мають джерелами статичних та динамічних похибок відхилення параметрів аналогових елементів від своїх номінальних значень (параметрів ЦАП, підсилювачів, буферів тощо). Це пов'язано з впливом та зміною параметрів навколишнього середовища, старінням елементів та вузлів ЦАП, обмеженнями та недосконалістю технології виготовлення тощо [1–3]. Час перетворення АЦП цього типу є змінним і визначається різницею між двома відліками вхідної напруги. Це означає, що АЦП даного типу придатні до роботи з постійними чи повільно змінюваними напругами, які під час перетворення змінюються не більше, ніж на значення кванта перетворення. Тому комбінування слідкувального перетворення з перетворенням методом послідовного наближення в разі різких стрибків вхідного сигналу, дозволяє значно покращити характеристику перетворення. В теперішній час в АЦП широко використовують різноманітні методи калібрування та коригування (у тому числі для підвищення лінійності характеристики перетворення) [4-6]. Відомо, що побудова багаторозрядних АЦП (в тому числі слідкувального типу) із використанням принципів вагової надлишковості та використанні самокалібрування дозволяє значно підвищити точність такого перетворювача. Тому забезпечення підвищеної швидкодії та більш широких функціональних можливостей за рахунок використання АЦП комбінованого типу, а також точності за рахунок застосування вагової надлишковості є важливою та актуальною задачею.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення висопродуктивного цифроаналогового перетворювача з ваговою надлишковістю на неточних компонентах комбінованого типу.

Постановка завдання

1. Проаналізувати існуючі методи побудови аналого-цифрових перетворювачів послідовного наближення та слідкувального типу.
2. Запропонувати методи побудови та алгоритм функціонування аналого-цифрового перетворювача комбінованого типу.
3. Проаналізувати методи використання надлишковості в аналого-цифрових перетворювачах комбінованого типу.

Виклад основного матеріалу

Базова схема АЦП слідкувального типу зображена на рис. 1 а).

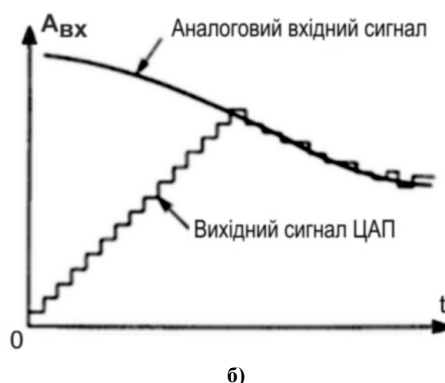
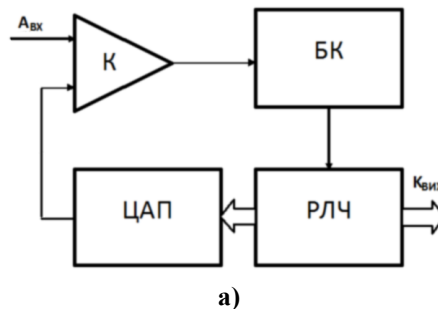


Рис. 1. АЦП слідкувального типу: а) схема АЦП слідкувального типу, б) характеристика перетворення АЦП слідкувального типу

Вона містить реверсивний лічильник (РЛЧ), код якого є вихідним кодом АЦП і також надходить на допоміжний ЦАП. Вхідний сигнал порівнюється з сигналом який формується на допоміжному ЦАП на компараторі (К). Сигнал з виходу компаратора надходить в блок керування (БК), який керує напрямом лічби реверсивного лічильника, таким чином, що код на лічильнику постійно збільшується чи зменшується так, щоб досягти якнайменшої різниці сигналу із допоміжного ЦАП та вхідного сигналу. Коли різниця сигналів на вході та виході допоміжного ЦАП стає меншою, ніж молодший значущий розряд, код лічильника можна зчитувати як вихідний цифровий сигнал АЦП. АЦП цього типу мають високу роздільну здатність, але час

перетворення залежить від вхідного сигналу, вони добре відслідковують сигнал, що не дуже швидко змінюється. Максимальний час перетворення дорівнює:

$$T_{max} = \frac{2^n}{f_c}, \tag{1}$$

де n – розрядність АЦП, f_c – частота тактового генератора лічильника.

На рис. 1 б) зображена типова характеристика перетворення АЦП слідкувального типу. АЦП слідкувального типу зазвичай є добрим вибором для оцифровування сигналів навколишнього світу, так як більшість сигналів у фізичних системах змінюються відносно плавно.

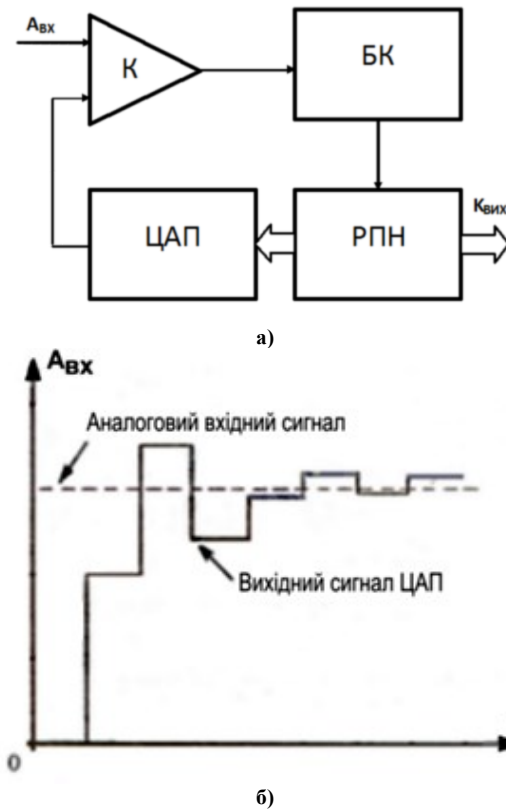


Рис. 2. АЦП послідовного наближення: а) схема АЦП послідовного наближення, б) характеристика перетворення АЦП послідовного наближення

Базову схему АЦП слідкувального типу зображено на рис. 2 а), і в загальному вигляді вона подібна до попередньої схеми АЦП слідкувального типу.

АЦП послідовного наближення або АЦП з порозрядним врівноваженням містить компаратор (К), допоміжний ЦАП та регістр послідовного наближення (РПН), код якого є вихідним кодом АЦП і також надходить на допоміжний ЦАП. АЦП перетворює аналоговий сигнал на цифровий за n кроків, де n – розрядність АЦП. На кожному кроці визначається по одному біту шуканого цифрового значення, починаючи від старшого значущого розряду і закінчуючи молодшим. Послідовність дій щодо визначення чергового біта полягає в такому. На допоміжному ЦАП виставляється аналогове значення, утворене з бітів, які вже визначені на попередніх кроках; біт, який має бути визначений на цьому кроці, виставляється в 1, молодші біти встановлені в 0. Отримане на допоміжному ЦАП значення порівнюється з вхідним аналоговим значенням. Якщо значення вхідного сигналу більше значення на допоміжному ЦАП, то біт, що визначається, отримує значення 1, в іншому випадку 0. Таким чином, визначення підсумкового цифрового значення нагадує двійковий пошук. На рис. 2 б) зображена типова характеристика перетворення АЦП послідовного наближення. АЦП послідовного наближення мають високу швидкість і роздільну здатність.

Запропоновано реалізувати АЦП який би міг виконувати обидва вищезазначені методи аналого-цифрового врівноваження залежно від потреби. Загальна структура схеми буде подібною до вищеповисаних схем АЦП слідкувального типу та послідовного врівноваження, алгоритм його роботи зображено на рис. 3 та полягає у такому.

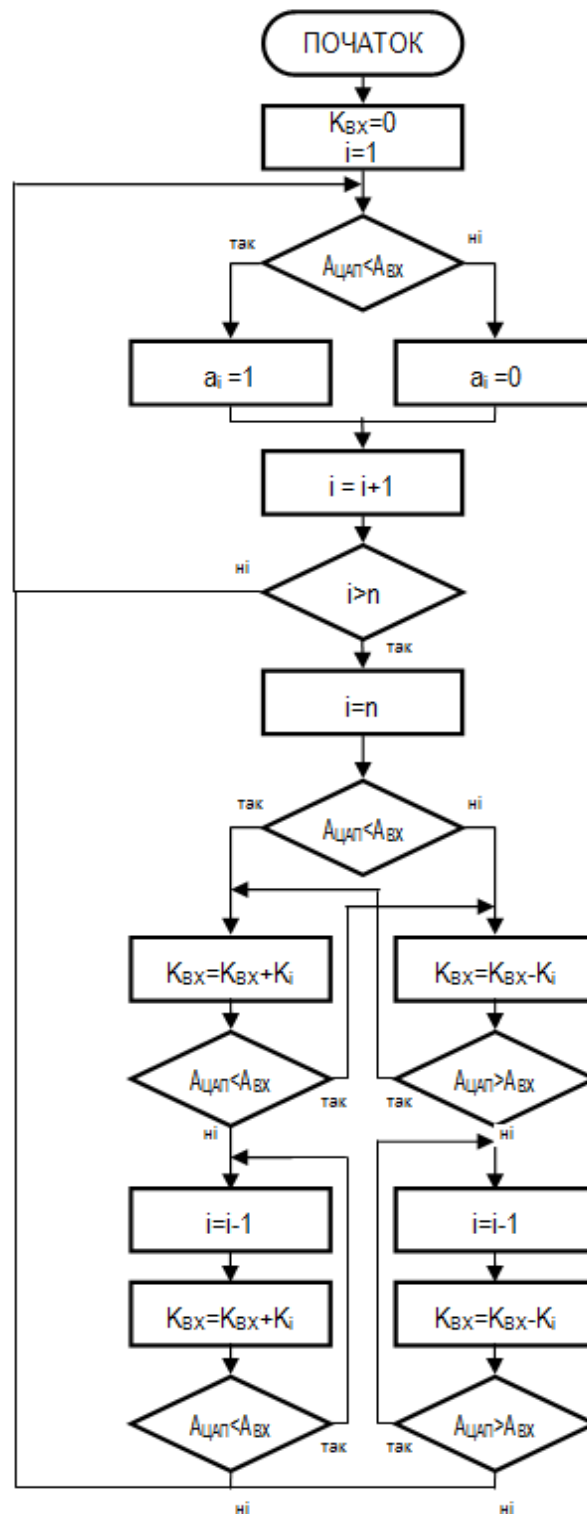


Рис. 3. Алгоритм роботи АЦП комбінованого врівноваження

На початковому етапі АЦП реалізує алгоритм послідовного наближення, чим досягається швидке початкове перетворення та перехід у робочий режим. Після його завершення система переходить до реалізації алгоритму стеження за вхідним сигналом, причому реверсивний лічильник збільшує або зменшує своє значення на одиницю молодшого розряду (n) значення. Якщо в режимі спостереження протягом кількох тактів не відбувається зміна сигналу на виході компаратора (вхідний сигнал змінюється занадто швидко), то реверсивний лічильник починає збільшувати або зменшувати своє значення на одиницю більш старшого розряду ($n-1$), якщо знову протягом декількох тактів (1-3) не відбувається зміна сигналу на виході компаратора, то реверсивний лічильник починає збільшувати або зменшувати своє значення на одиницю ще старшого розряду ($n-2$) і т. п., поки не відбудеться зміна сигналу на виході компаратора, після чого АЦП переходить до реалізації алгоритму послідовного наближення, після завершення якого повертається в режим слідкування.

Подібний алгоритм дозволяє аналого-цифровому перетворювачу швидко входити в робочий стан на початку роботи та швидко повертатися в робочий стан при стрибках вхідного сигналу. Побудова АЦП комбінованого типу дозволяє покращити характеристику перетворення.

У Вінницькому національному технічному університеті в науковій школі Азарова О. Д. широко досліджуються методи використання вагової надлишковості при АЦ- та ЦА-перетворенні [4-8]. У НПСЧ використовується основа системи числення $1 < \alpha < 2$, а ваги розрядів визначаються виразом:

$$Q_i = q \cdot \alpha^i, \tag{2}$$

де q – вага молодшого розряду.

Будь-яке дійсне число може бути зображене в НПСЧ таким чином:

$$X = \sum_{i=0}^n a_i \cdot q \cdot \alpha^i, \tag{3}$$

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

Поняття вагова надлишковість асоціюється в першу чергу з наявністю надлишкового співвідношення між вагами розрядів. Основною ознакою цього є перевищення суми ваг молодших розрядів над сусіднім старшим, тобто:

$$\sum_{j=0}^{i-1} Q_j > Q_i. \tag{4}$$

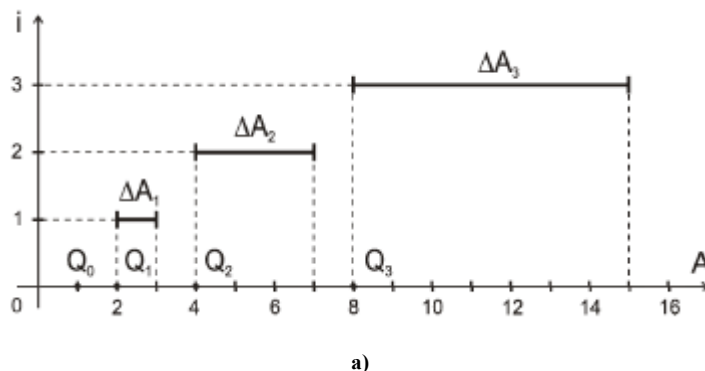
Головна перевага НПСЧ, при використанні в аналого-цифровому перетворенні складається у відсутності "розривів" у характеристиці перетворення, що виникають при відхиленні реальних ваг розрядів від їхніх розрахункових значень, рис. 4. Для АЦП, що використовують «двійкові» ваги розрядів ці відхилення не повинні перевищувати половини молодшого розряду. Для АЦП на основі НПСЧ відносна похибка ваг розряду може становити десятків процентів, і пропусків кодів не буде.

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. Причому, самокалібрування може бути проведено в будь-який момент часу роботи САЦП, наприклад, за умови змінення температури навколишнього середовища.

Число розрядів n_α , задіяних у надлишковому ЦАП, природно, більше ніж у двійковому n_2 й визначається зі співвідношення:

$$\alpha^{n_\alpha} = 2^{n_2} \Rightarrow n_\alpha = n_2 = n_2 \cdot \log_\alpha 2. \tag{5}$$

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].



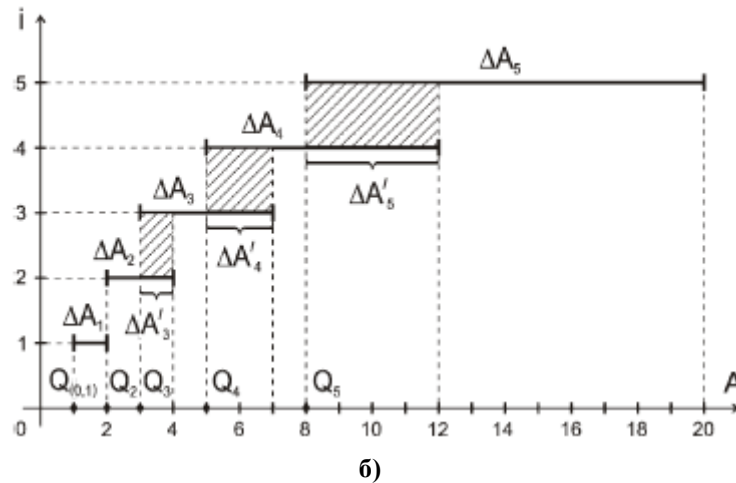


Рис. 4. Характеристики перетворення АЦП для різних систем числення: а) двійкова $\alpha=2$; б) надлишкова $\alpha=1,6$

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Проаналізовано недоліки та переваги існуючих методів побудови аналого-цифрових перетворювачів послідовного наближення та слідкувального типу, що уможливило їх конструктивне використання шляхом створення АЦП комбінованого типу, що має підвищену продуктивність.

2. Запропоновано метод побудови та алгоритм функціонування аналого-цифрового перетворювача комбінованого типу.

3. Проаналізовано методи використання надлишковості в аналого-цифрових перетворювачах комбінованого типу, що дозволяє покращити лінійність характеристики перетворення.

Література

1. Alan B. Grebene, Bipolar and MOS analog integrated circuit design – Wiley-Interscience, 2002. – 894 p.
2. W. Kester, Data Conversion Handbook. – USA: Newnes, 2005. – 953 p.
3. Eugene R. Hnatek, A User's Handbook of Digital to Analogue and Analogue to Digital Converters Hardcover. – John Wiley & Sons Inc, 1976. – 488 p.
4. Stakhov AP. Algorithmic Measurement Theory: a General Approach to Number Systems and Computer Arithmetic // The International journal "Control Systems and Computers". – № 4-5. – 1994. – Рр. 10 – 31.
5. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю : монографія. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 232 с.
6. Азаров О. Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / О.Д. Азаров, Л.В. Крупельницький. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.
7. A. D. Azarov, Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy / A. D. Azarov, S. A. Kyrylashchuk, S. V. Bogomolov, O. Y. Stakhov, A. Kotyra, and O. Mamyrbayev // Proceedings of SPIE 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments, – 2019. – vol. 11176, Nov., pp. 1809 - 1815, doi:10.1117/12.2537197.
8. Азаров О. Д., АЦП порозряднослідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Я. Стахов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – В. ВНТУ, 2020. – № 3(49). – С.37-44. – DOI:10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44.

References

1. Alan B. Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design – Wiley-Interscience 2002. – 894 p.
2. W. Kester, Data Conversion Handbook. –USA:, Newnes, – 2005. – 953 p.
3. Hnatek Yu.R. Spravochnik po cifroanalogovym i analogocifrovym preobrazovatelyam: Per. s angl./ Pod red. Yu.A. Ryuzhina. – M.: Radio i svyaz, 1982. – 552 s., il.
4. Stakhov A.P. Vvedenie v algoritmicheskuyu teoriyu izmereniya. –M., "Sov. Radio", 1977, – 288 s.
5. Azarov O. D. Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiu : monohrafiia. – UNIVERSUM-Vinnitsia, 2010. – 232 s.
6. Azarov O. D. Analoho-tsyfrovi prystroi sistem, shcho samokoryhuiutsia, dia vymiriuvan i obrobliannia nyzkochastotnykh syhnaliv : monohrafiia / O.D. Azarov, L.V. Krupelnitskyi. – UNIVERSUM-Vinnitsia, 2005. – 167 s.
7. A. D. Azarov, Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy / A. D. Azarov, S. A. Kyrylashchuk, S. V. Bogomolov, O. Y. Stakhov, A. Kotyra, and O. Mamyrbayev // Proceedings of SPIE 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments, – 2019. – vol. 11176, Nov., pp. 1809 - 1815, doi:10.1117/12.2537197.
8. Azarov O. D., ATSP porozriadnoslidkuvalnogo vrvnovazhennia z vahovoiu nadlyshkovistiu / O. D. Azarov, O. I. Cherniak, ta O. Ya. Stakhov // Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia. – V. VNTU, 2020. – № 3(49). – S.37-44. – DOI:10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44.