

О. С. МЕЛЬНИК, В. О. КОЗАРЕВИЧ

МАЖОРИТАРНІ НАНОСХЕМИ РЕГІСТРІВ

В статті наведені результати запровадження новітніх технологій автоматизованого моделювання тригерних наносхем з мажоритарною логікою для проєктування надшвидкодійних нанорегістрів. В створених послідовних пристроях використана технологія квантових коміркового автоматів. На відміну від мікроелектронних тригерів запропоновані в роботі нанотригери на базі універсальних мажоритарних елементів, як елементарних автоматів, поєднують виконання логічних функцій з функціями затримки. Таке поєднання дозволяє скоротити кількість квантових комірок до 25 проти 34 – 43 комірок у існуючих аналогів. Запропоновані унікальні чотириваріантні реалізації тригерних наносхем з роздільними входами, які стало можливо програмувати забороненими комбінаціями логічних одиниць для вхідних сигналів і які є недопустимими для мікроелектронних компонентів з пам'яттю. Це призводить до суттєвого прискорення комп'ютерного проєктування повного набору послідовних наносхем, особливо багатовходових нанорегістрів паралельної дії із записом та запам'ятовуванням коду бінарних чисел та нанорегістрів зі зсувом в бік старших чи молодших розрядів. Стаття присвячена впровадженню мажоритарної логіки функціонування модифікованих нанотригерів з роздільними входами, яка дає можливість реалізувати заборонені комбінації вхідних сигналів логічних одиниць. Це дозволяє суттєво прискорити комп'ютерне проєктування повного набору послідовних наносхем. Сучасна система автоматизованого проєктування QCA Designer синтезує схеми нанорегістрів та адекватно моделює часові діаграми їх працездатності.

Ключові слова: мажоритарна логіка, квантові комірково автомат, нанотригер, системи автоматизованого проєктування, наносхеми регістрів, часові діаграми, функції переходів.

O. S. MELNYK, V. O. KOZAREVYCH MAJORITY REGISTER NANOCIRCUITS

The article presents the results of the implementation of the latest technologies for automated modeling of trigger nanocircuits with majority logic for the design of ultra-fast nanoregisters. The created sequential devices use the technology of quantum cellular automata. Unlike microelectronic triggers, the nanotriggers proposed in the work are based on universal majority elements as elementary automata, combining the execution of logical functions with delay functions. This combination allows reducing the number of quantum cells to 25 versus (34 – 43) cells in existing analogues. Unique four-variant implementations of trigger nanocircuits with separate inputs are proposed, which have become possible to program with forbidden combinations of logical units for input signals and which are unacceptable for microelectronic components with memory. This leads to a significant acceleration of computer design of a full set of sequential nanocircuits. A feature of multi-input nano-registers of parallel action with recording and memorizing the code of binary numbers and nano-registers with a shift towards the senior or junior digits. The article is devoted to the implementation of the majority logic of the functioning of modified nano-triggers with separate inputs, which makes it possible to implement forbidden combinations of input signals of logical units. This allows significantly accelerating the computer design of a full set of sequential nanocircuits. The modern automated design system QCA Designer synthesizes nano-register schemes and adequately models the timing diagrams of their performance.

Key words: majority logic, quantum cellular automata, nanotriggers, systems of automated design, nanocircuits of registers, time diagrams, transition functions.

Вступ. Поняття *кінцевого автомата* виникло в середині ХХ століття у зв'язку зі спробами *математичного моделювання нейронних систем, електронних обчислювальних машин та інших технічних автоматів* [1]. Характерною особливістю цього класу *математичних моделей* є *дискретність*, отже, скінченність наборів елементів, що відтворюють математичну модель. Подальший розвиток *теорії автоматів* йшов шляхом розгляду нескінченних автоматів того чи іншого класу, введення *випадкових функцій та недетермінованих співвідношень* між входом і виходом автомата [2], тощо.

Моделі мажоритарних нанотригерів. Розглянемо основні принципи побудови та моделювання *мажоритарних тригерних наноелементів*. Тригер – послідовний пристрій, здатний формувати та запам'ятовувати два постійних значення вихідного сигналу і стрибкоподібно змінювати ці значення під впливом зовнішнього керуючого сигналу. У загальному випадку тригер містить сам *елемент пам'яті* і деяку вхідну комбінаційну схему, яка перетворює вхідні сигнали тригера в сигнали, необхідні для керування елементом пам'яті [3].

При синтезі мажоритарних нанотригерів з метою економії обчислювальних ресурсів використовуємо *універсальний мажоритарний елемент (УМЕ)* як елементарний автомат, що поєднує логічні функції з функціями затримки [4]. Мажоритарний нанотригер із роздільними входами має вхід x_1 для встановлення в стан «1» і вхід x_0 для встановлення в стан «0». Функції переходів і збудження нанотригера з роздільними входами наведені в табл. 1. Вона відповідає аналітичній формі запису [5]:

$$q(t_{i+1}) = \bar{x}_0(t_i)q(t_i) \vee x_1(t_i). \quad (1)$$

У разі заборонених комбінацій вхідних сигналів, зазначених у табл. 1 як одиниці з ризиками 1', функція збудження (1) може приймати довільне значення (a_1, a_2) . Залежно від конкретних значень невизначених коефіцієнтів a_1 і a_2 можна синтезувати чотири варіанта тригерних наносхем з роздільними входами: $(a_1 = 1, a_2 = 0)$, $(a_1 = a_2 = 1)$, $(a_1 = a_2 = 0)$ та $(a_1 = 0, a_2 = 1)$.

Четверта модифікація мажоритарної наносхеми тригера потребує найменших обчислювальних затрат і має мінімальну кількість квантових *коміркового автоматів (КА)*, а саме усього 25 КА у порівнянні з 34 – 43 КА для

попередніх модифікацій.

Таблиця 1 – Таблиця переходів мажоритарного нанотригера

x_1	x_0	Q_t	Q_{t+1}	q
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	1	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	1	1
1'	1'	0	–	a_1
1'	1'	1	–	a_2

З рівняння (1) та табл. 1 отримують булеву логічну функцію при $a_1 = 0, a_2 = 1$:

$$q = \bar{x}_1\bar{x}_0Q_t \vee x_1\bar{x}_0\bar{Q}_t \vee x_1\bar{x}_0Q_t \vee x_1x_0Q_t = x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_0Q_t \vee x_1Q_t. \quad (2)$$

Для еквівалентних перетворень булевих функцій до мажоритарних і навпаки використовують систему допоміжних рівносильностей [5]:

$$f_{x_1x_0} = \bar{x}_1Q_t \vee x_1Q_t = Q_t;$$

$$f_{x_1\bar{x}_0} = x_1 \vee x_1Q_t = x_1.$$

Якщо початкова булева функція (2) належить до класу мажоритарних, то її повністю можливо представити за допомогою УМЕ [3] без використання постійних рівнів напруги:

$$q = maj(maj(x_1, x_0, x_1), maj(\bar{x}_1, \bar{x}_0, x_1), Q_t) = maj(x_1, x_0, Q_t). \quad (3)$$

Мажоритарна наносхема тригера з роздільними входами, побудована за попереднім рівнянням (3), показана на рис. 1.

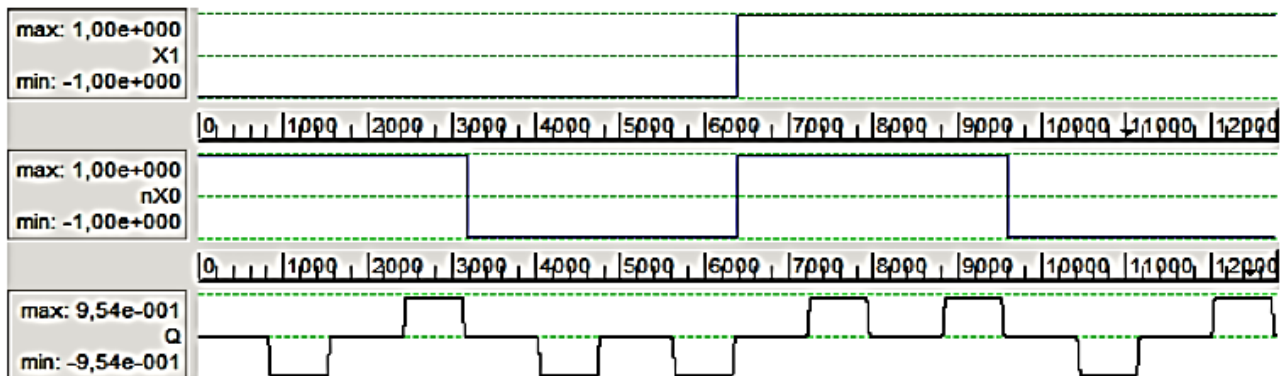
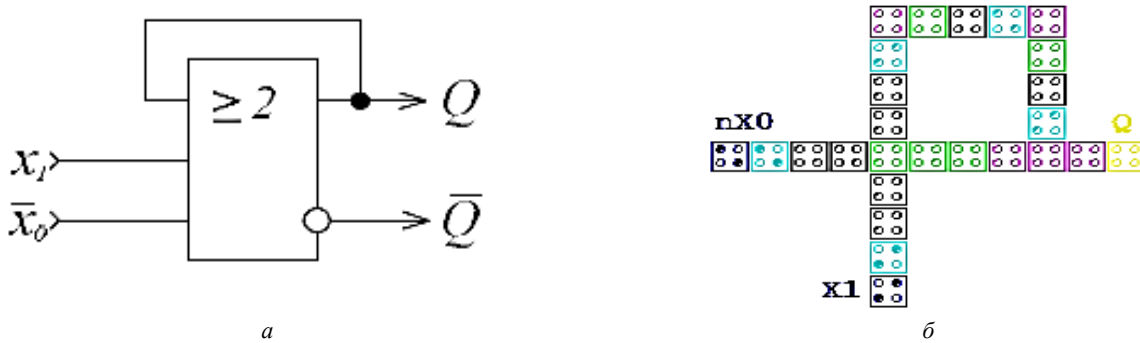
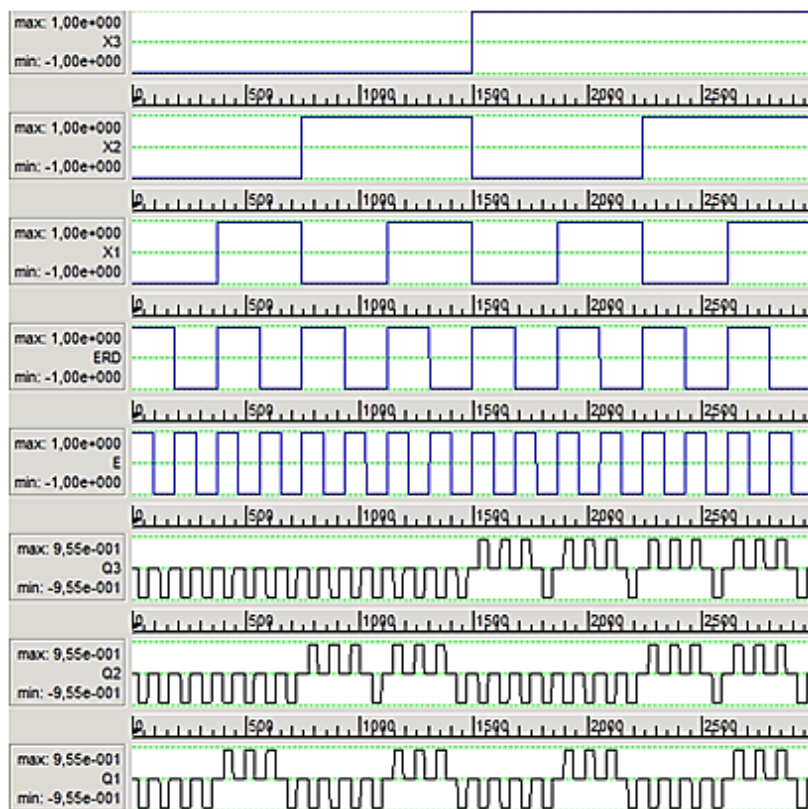
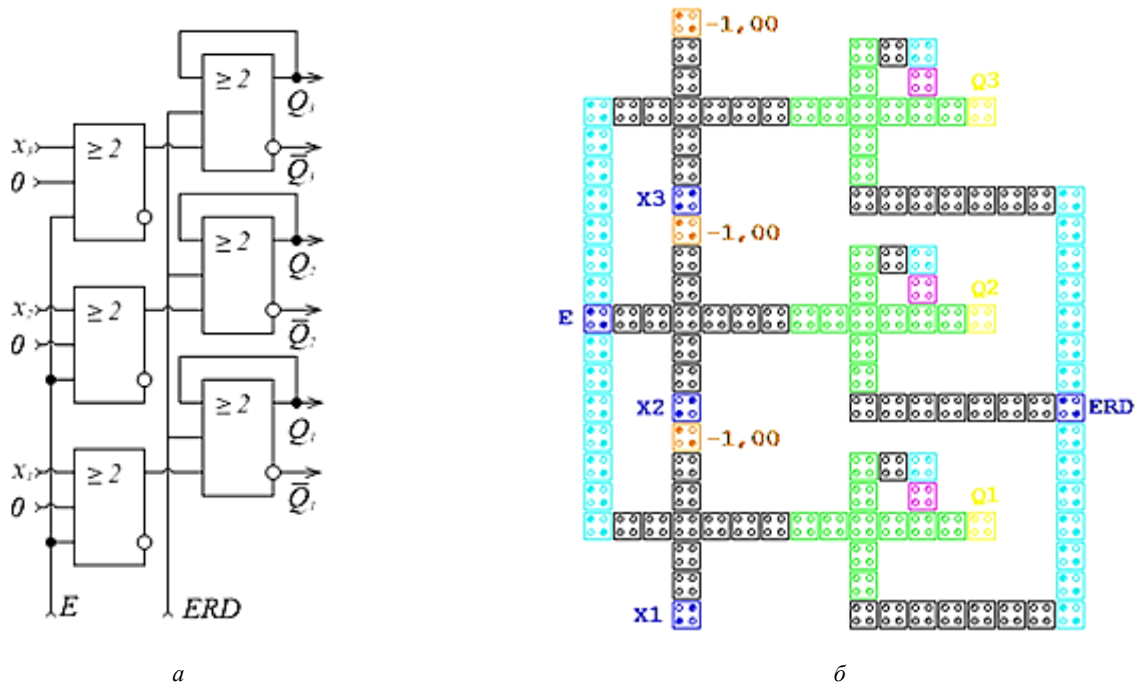


Рис. 1 – Нанотриггер (модифікація 4): а – структурна схема; б – наносхема на квантових автоматах; в – результати моделювання сигналів логічних станів в САПР QCA Designer [6].

Вочевидь, часові діаграми (рис. 1, в) повністю підтверджують адекватність моделі нанотригера на КА (рис. 1, б) і відтворюють стани його таблиці переходів (табл. 1).

Далі будемо використовувати мажоритарні нанотригери з розділними входами для моделювання одноелектронних паралельних нанореєстрів.

Трирозрядний нанореєстр паралельної дії без ланцюгів зсуву (рис. 2, а) призначений для прийому та зберігання паралельного коду двійкового числа і являє собою набір шести мажоритарних тригерів: трьох для паралельного запису інформації (E) і трьох для її зберігання (ERD).



в

Рис. 2 – Паралельний реєстр з одновходовим керуванням: а – структурна схема; б – тригерна наносхема на квантових автоматах; в – результати моделювання сигналів логічного стану в САПР QCADesigner.

На рис. 2, б та рис. 2, в приведені наносхема паралельного регістра та результати моделювання її часових діаграм на робочому планшети САПР QCADesigner [6].

Загальна кількість КА регістрової наносхеми становить 129. Розміри КА складають (18×18) нм. Відстань між їх центрами становить 20 нм. Діаметри квантових острівців становлять 5 нм. Габаритні розміри нанорегістра паралельної дії (340×420) нм.

На рис. 3 показаний регістр зі зсувом у бік старших розрядів. При синтезі регістрів зсуву як елементарного автомата використовується нанотригер четвертої модифікації (рис. 1, а, б) з роздільними входами.

Узагальнена табл. 2 переходів і функцій збудження для двох розрядів регістра зі зсувом числового коду в бік старших розрядів виглядає наступним чином [7].

Таблиця 2 – Функції переходів та збудження двох бітів регістра зі зсувом цифрового коду в бік старших розрядів

x_r	Q_t^{i+1}	Q_t^i	Q_{t+1}^{i+1}	Q_{t+1}^i	q_0^{i+1}	q_1^{i+1}
1	0	0	0	1	a_1	0
1	0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	0	0	a_2
1	1	0	0	0	1	0

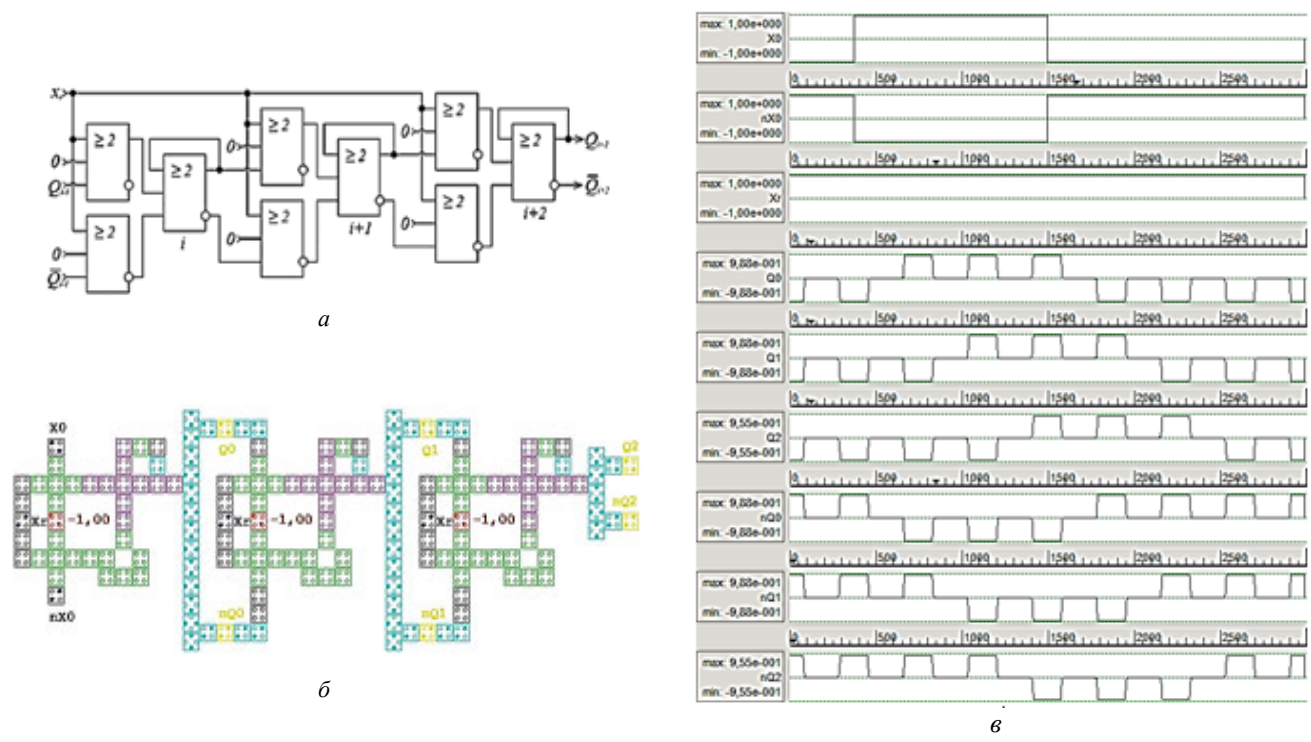


Рис. 3 – а – Структурна схема нанорегістра зі зсувом у бік старших розрядів; б – наносхема на квантових автоматах; в – результати моделювання сигналів в САПР QCADesigner.

Використовуючи матрицю переходів з табл. 1, дійсну для тригера з роздільними входами, заповнимо стовпці для функцій збудження (q_0^{i+1} і q_1^{i+1}). З отриманої таблиці випливає, що:

$$\begin{aligned} \text{при } a_1 = 0: q_0^{i+1} &= x_0 \bar{Q}_t^i, \text{ тоді } q_0^{i+1} = maj(x_0, \bar{Q}_t^i, 0); \\ \text{при } a_2 = 1: q_1^{i+1} &= x_1 Q_t^i, \text{ тоді } q_1^{i+1} = maj(x_1, Q_t^i, 0). \end{aligned}$$

Аналогічно визначаються функції збудження для інших розрядів регістра. Загальна кількість КА регістрової наносхеми зі зсувом у бік старших розрядів становить 167. Розміри КА (18×18) нм. Відстань між центрами КА становить 20 нм. Діаметри квантових острівців становлять 5 нм. Загальні розміри нанорегістра (740×260) нм.

Перспективи подальших досліджень. Отримані результати автоматизованого проектування одноелектронних нанорегістрів підтвердили їх переваги над мікроелектронними аналогами з точки зору мінімального енергоспоживання та щонайбільшої швидкодії. Тому автори вважають перспективними напрямки досліджень, пов'язані зі створенням функціонально повної компонентної бази наноелектроніки. Актуальність розробок стимулюється їх подальшим розвитком для підвищення енергоефективності, надійності та скорочення часу виконання логічних операцій.

Висновки. Універсальні елементи з мажоритарною логікою є одними із найперспективніших напрямків підвищення надійності та завадостійкості, коли на їхні входи впливають випадкові флуктуації сигналів комутації комп'ютерних систем.

В статті реалізоване комп'ютерне моделювання мажоритарних нанопристроїв послідовного типу з використанням системи автоматизованого проектування QCADesigner. Досягнута мета мінімізації геометричних розмірів наносхем, щільності розміщення на кристали до рівня 120 КА на 10нм² та підвищення надійності виконання мажоритарних логічних операцій і функцій булевої алгебри.

Створена функціональна завершена мажоритарна система нанoeлементів для комп'ютерного проектування нанопристроїв послідовного типу, що включає нанотригери з роздільними входами та на їх основі – нанорегістри.

Список літератури

1. Niemier M. T. Designing Digital Systems in Quantum Cellular Automata // Master's Thesis. – University of Notre Dame, Indiana, 2004.
2. Melnyk O. S., Kravets M. M., Kravets V. M. Four-bit nanoadder controlled by five-inputs majority elements // International scientific journal «Electronics and control systems». – 2022. – № 4 (74). – P. 67 – 72.
3. Lent C. S., Tougaw P. D. A. Device Architecture for Computing with Quantum Dots // Proc. Of the IEEE. – 1997. – vol. 10. – no. 3. – pp. 73 – 83.
4. Melnyk O. S., Kozarevych V. O. Arithmetic-logic single-electron nanocircuits // International scientific journal «Electronics and control systems». – 2023. – № 2 (76). – P. 68 – 72.
5. Melnyk O. S., Kozarevych V. O., Butok M. V. Micro- and nanocircuits with configurable logic // International scientific journal Electronics and control systems. – 2023. – № 3 (76). – P. 47 – 52. DOI: 10.18372/1990-5548.77.18003.
6. Walus K. QCA Designer : A Rapid Design and Simulation Tool to QCADII Int. // Journal of Nanotech and Appl. – 2005. – no. 1. – pp. 1 – 7.
7. Мельник О. С., Козаревич В. О., Пилипенко П. І. Комп'ютерне проектування арифметичних нанопристроїв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 39 (1082). – С. 126 – 134. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpimm_2014_39_14. – Дата звертання : 26 вересня 2024 р.

References (transliterated)

1. Niemier M. T. Designing Digital Systems in Quantum Cellular Automata. *Master's Thesis*. University of Notre Dame, Indiana, 2004.
2. Melnyk O. S., Kravets M. M., Kravets V. M. Four-bit nanoadder controlled by five-inputs majority elements. *International scientific journal «Electronics and control systems»*. 2022, no. 4 (74), pp. 67–72.
3. Lent C. S., Tougaw P. D. A. Device Architecture for Computing with Quantum Dots. *Proc. Of the IEEE*. 1997, vol. 10, no. 3, pp. 73–83.
4. Melnyk O. S., Kozarevych V. O. Arithmetic-logic single-electron nanocircuits. *International scientific journal «Electronics and control systems»*. 2023, no. 2 (76), pp. 68–72.
5. Melnyk O. S., Kozarevych V. O., Butok M. V. Micro- and nanocircuits with configurable logic. *International scientific journal Electronics and control systems*. 2023, no. 3 (76), pp. 47–52. DOI: 10.18372/1990-5548.77.18003.
6. Walus K. QCA Designer : A Rapid Design and Simulation Tool to QCADII Int. *Journal of Nanotech and Appl*. 2005, no. 1, pp. 1–7.
7. Melnyk O. S., Kozarevych V. O., Pylypenko P. I. Komp'yuterne proektuvannya aryfimychnykh nanoprystroyiv [Computer-aided design of arithmetic nanodevices]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya : Matematychnе modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*. [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technology]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2014, no. 39 (1082), pp. 126–134. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpimm_2014_39_14. (accessed 26 September 2024).

Надійшла (received) 30.09.2024

Відомості про авторів / Information about authors

Мельник Олександр Степанович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей, Національний авіаційний університет, м. Київ; тел.: (067) 213-03-08; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1072-5526>; e-mail: oleksandr.melnyk@npp.nau.edu.ua.

Melnyk Oleksandr Stepanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronics, Robotics and Monitoring of Technologies and Internet of Things, National Aviation University, Kyiv; tel.: (067) 213-03-08; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1072-5526>; e-mail: oleksandr.melnyk@npp.nau.edu.ua.

Козаревич Вікторія Олександрівна – старший викладач кафедри електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей, Національний авіаційний університет, м. Київ; тел.: (063) 310-30-41; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-0927>; e-mail: viktoria.kozarevych@npp.nau.edu.ua.

Kozarevych Viktoriia Oleksandrivna – Senior Lecturer at the Department of Electronics, Robotics and Monitoring of Technologies and Internet of Things, National Aviation University, Kyiv; tel.: (063) 310-30-41; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-0927>; e-mail: viktoria.kozarevych@npp.nau.edu.ua.