

О. С. МЕЛЬНИК, В. О. КОЗАРЕВИЧ

КОМП'ЮТЕРНЕ КОНФІГУРУВАННЯ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

У статті запроваджені вдосконалені методи математичного моделювання з метою автоматизованого відтворення дискретних функцій мажоритарної та булевої логіки з використанням мультиплексорних систем. В цій роботі під структурним конфігуруванням розуміється не розробка спеціалізованого програмного забезпечення, що реалізується із застосуванням мікропроцесорів, а, навпаки, – перетворення технологічних операцій для налаштувань та змін конфігурацій великих мікро- та наносхем таким чином, щоб синтезувати функціонально повну логічну базу на структурно-логічній основі. Новітня технологія нанорозмірних коміркового автоматів (КА або QCA-quantum-dots cellular automata) є найперспективнішим напрямком одноелектроніки, який також підтверджує закон Мура. На відміну від традиційних мікротехнологій, наприклад, на базі комплементарних МОН-транзисторів, в КА бінарна інформація кодується поляризаціями двох електронів, а не через логічні рівні напруг. Отримані в статті результати комп'ютерного програмування нанопристроїв підтвердили їх переваги перед мікроелектронними еквівалентами щодо підвищеної швидкодії та мінімального споживання енергії. Використана сучасна САПР QCA Designer для аналізу і синтезу булевих, мажоритарних та гібридних логічних функцій із використанням мікро- та наносхем в умовах космічного застосування при криогенних температурах для прогнозування їх безвідмовного функціонування. Отримані результати та їх аналіз підтверджують можливість вдосконалення методології конфігурування сучасних мікро- та одноелектронних нанопристроїв.

Ключові слова: математичне моделювання, конфігуровані логічні блоки, мікро- та наномультимплексори, квантові автомати, криогенні температури.

O. S. MELNYK, V. O. KOZAREVYCH

COMPUTER CONFIGURATION OF MICRO- AND NANOELECTRONIC DEVICES

The article introduces advanced mathematical modeling methods for the automated reproduction of discrete functions of majority and Boolean logic using multiplexer systems. In this work, structural configuration is not understood as the development of specialized software implemented using microprocessors, but, on the contrary, as the transformation of technological operations for setting up and changing the configurations of large micro- and nanocircuits in such a way as to synthesize a functionally complete logical base on a structural-logical basis. The latest technology of nanoscale cellular automata (QCA or QCA-quantum-dots cellular automata) is the most promising direction of single-electron electronics, which also confirms Moore's law. Unlike traditional microtechnologies, for example, based on complementary MOS transistors, in QCA binary information is encoded by polarizations of two electrons, and not through logical voltage levels. The results of computer programming of nanodevices obtained in the article confirmed their advantages over microelectronic equivalents in terms of increased speed and minimal energy consumption. The modern CAD QCA Designer was used for the analysis and synthesis of Boolean, majority and hybrid logic functions using micro- and nanocircuits in space applications at cryogenic temperatures to predict their trouble-free operation. The results obtained and their analysis confirm the possibility of improving the methodology for configuring modern micro- and single-electron nanodevices.

Key words: mathematical modeling, configurable logic blocks, micro- and nanomultiplexers, quantum automata, cryogenic temperatures.

Вступ. Комп'ютерне конфігурування мікро- та нанопристроїв із програмованою логікою не передбачає можливості створення алгоритмів для обробки багатоаргументних вхідних функцій через зміну робочих програм, як це зазвичай реалізується в мікропроцесорах. Це стосується внесення технологічних змін до внутрішньої структури наелектронних схем для забезпечення синтезу потрібних функцій на структурно-логічному рівні.

Аналіз останніх досліджень. Розвиток досліджень у сфері конфігурованих мікро- та нанопристроїв набирає обертів, а значна увага дослідників спрямована на *автоматизоване ієрархічне математичне моделювання таких систем*. Перші значущі досягнення в цій галузі стали можливими завдяки створенню *мультиструктурних пристроїв*, заснованих на *універсальних функціонально завершених модулях*, які є перспективною тенденцією у розвитку сучасної *наноелектроніки* [1, 2]. У цих роботах продемонстровано можливості комп'ютерного проектування мікро- та наносхем, здатних реалізовувати 16 двоаргументних і 256 триаргументних функцій із використанням мікро- та одноелектронних наномультимплексорів. Однак, існують серйозні труднощі в оптимізації цих схем, що спричиняє їхню значну складність і обмежує універсальність застосування. Важливим аспектом досліджень стало вдосконалення методів програмування мікро- та наносхем для реалізації різноманітних функцій логічної алгебри [3, 4]. Учені запропонували ефективні алгоритми автоматизованого програмування мікро-схем із високим рівнем інтеграції, які стали основою для подальшого розвитку нанопристроїв із конфігурованими структурами [5]. Незважаючи на значний прогрес у цій сфері, питання досягнення ефективного автоматизованого проектування все ще залишається актуальним, і проблема спрощення алгоритмів та їх точного відтворення є предметом активних дискусій.

Особливої уваги потребує вплив температурних умов на продуктивність одноелектронних наносхем, зокрема робота в космічних умовах за криогенних температур. Дослідження вказують, що такі умови можуть істотно позначитися на роботі нанопристроїв, що стимулює пошук нових підходів для підвищення їхньої якості та надійності функціонування [6]. Залишається актуальною проблема синхронізації цих схем, що створює додаткові виклики для їх впровадження. Таким чином, питання покращення якості мікро- та одноелектронних наносхем із конфігурованою логікою залишаються важливими і вимагають подальших досліджень та вдосконалення.

Проектування комбінаційних мікросхем на мультиплексорах. Для використання мультиплексорів при проектуванні комбінаційних мікро- та нанопристроїв сигнали деяких аргументів функції, що відтворюються, по-

даються на адресні входи, а інформаційні входи виконують роль програмованих наноструктур.

На рис. 1, а показане умовне позначення мультиплексора ($8 \rightarrow 1$).

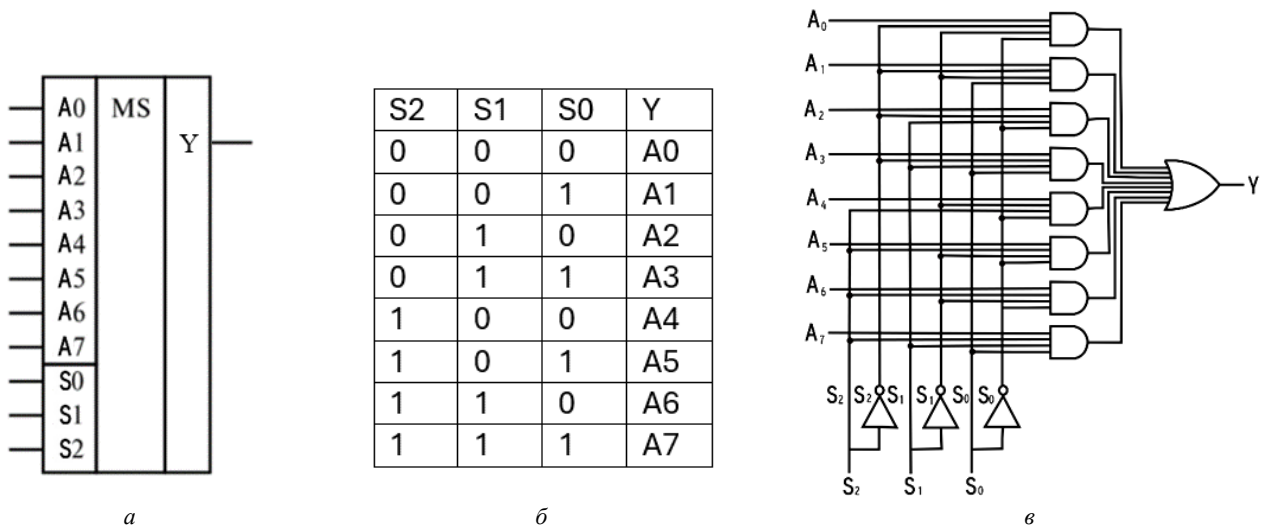


Рис. 1 – а – Мультиплексор ($8 \rightarrow 1$); б – таблиця істинності мультиплексора; в – еквівалентна мікросхема мультиплексора.

Після математичних перетворень з таблиці істинності функція алгебри логіки мультиплексора ($8 \rightarrow 1$) набуває вигляду:

$$Y = \bar{S}_0 \bar{S}_1 \bar{S}_2 A_0 \vee \bar{S}_0 \bar{S}_1 S_2 A_1 \vee \bar{S}_0 S_1 \bar{S}_2 A_2 \vee \bar{S}_0 S_1 S_2 A_3 \vee S_0 \bar{S}_1 \bar{S}_2 A_4 \vee S_0 \bar{S}_1 S_2 A_5 \vee S_0 S_1 \bar{S}_2 A_6 \vee S_0 S_1 S_2 A_7. \quad (1)$$

Для реалізації чотириаргументних функцій необхідно здійснити перетворення, щоб отримати диз'юнктивно нормальну форму (ДНФ). За допомогою закону подвійності де Моргана (інверсії) та карти Карно, наприклад, для функції:

$$f = \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 x_0 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_2 x_1 x_0 \vee \bar{x}_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee \bar{x}_3 x_2 x_1 x_0 \vee x_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 x_0 \vee x_3 \bar{x}_2 x_1 x_0 \vee x_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee x_3 x_2 x_1 x_0 \quad (2)$$

отримаємо наступну карту:

$X_3 X_2 \setminus X_1 X_0$	00	01	11	10
00	0	1	0	1
01	0	0	0	1
11	1	1	0	1
10	0	1	1	1

Отже, за допомогою карти Карно маємо мінімізовану ДНФ:

$$f = x_1 x_0 \vee x_2 x_1 x_0 \vee x_0 x_2 x_1 \vee x_3 x_2 x_1. \quad (3)$$

Отримані результати та їх обговорення. Для удосконаленої вище математичної моделі отримана остаточна таблиця програмування восьмивходового програмованого мікронаномультимплексора (ПМНМ) ($8 \rightarrow 1$) для реалізації чотириаргументної функції (табл. 1). Відповідно до рис. 1, в, ПМНМ був побудований на основі системи автоматизованого проєктування (САПР) *Quartus* [5] (рис. 2) з логічних елементів (рис. 2, а) та з окремого елемента в одному корпусі у вигляді макросхеми (рис. 2, б). На рис. 3 показана схема комп'ютерної реалізації функції (2) на ПМНМ (рис. 2, а), яка конфігурується в диз'юнктивній канонічній формі кон'юнкцій конститuent одиниці за таблицею істинності 1:

$$f = \sum(1, 2, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14).$$

Розкладання попередньо отриманої функції по старшій змінній має вигляд:

$$f = \bar{x}_3 * [(1, 2, 7)] \vee x_3 * [(1, 2, 3, 4, 5, 6)]. \quad (4)$$

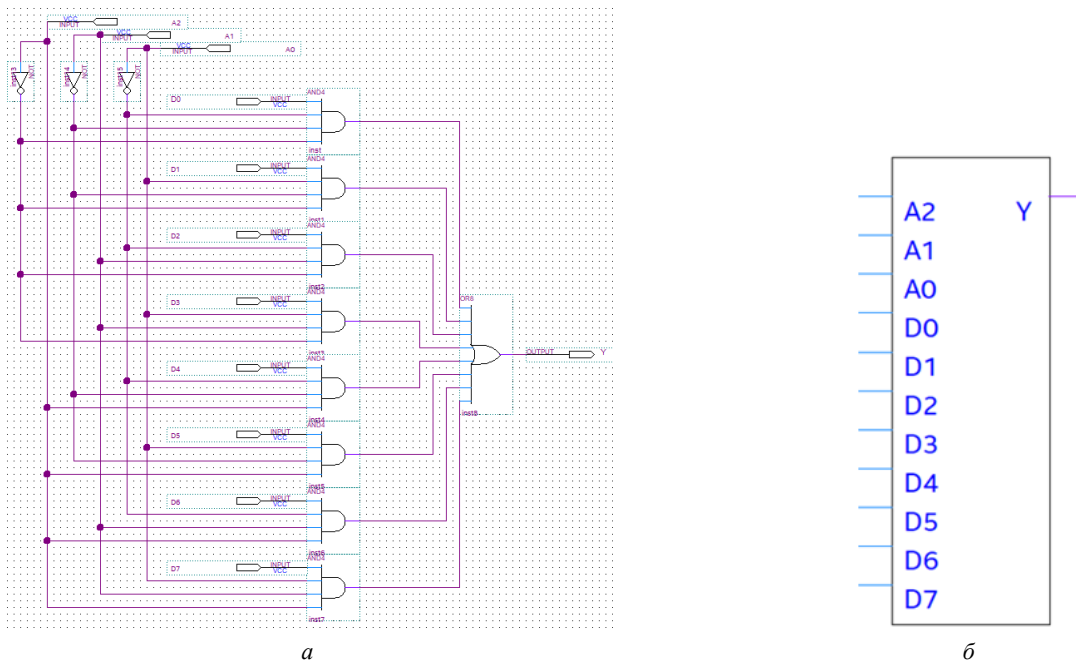


Рис. 2 – Модель восьмивходового ПМНМ: а – на мікроелементах; б – в макрокорпусі.

Звідси отримують алгоритм моделювання ПМНМ:

На вхід 7 подати $\overline{x_1}$;

На входи 3, 4, 5, 6 подати x_1 ;

На входи 1, 2 подати 1;

На вхід 0 подати 0.

На рис. 3, б наведені результати моделювання функції (4).

Квантові коміркові автомати (КА) є парадигмою обчислень, згідно з якою інформація представляється певною конфігурацією поляризацій електронів у клітині КА, яка формується з однієї або двох окремих молекул [7]. Пристрої на основі цієї технології складаються з нанорозмірних діелектричних клітин, що мають чотири квантові напівпровідникові точки, розташовані на кутах, і двох рухомих електронів.

Таблиця 1 – Підсумкова таблиця істинності для функції (4)

X_1	X_2	X_3	X_4	Y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	0

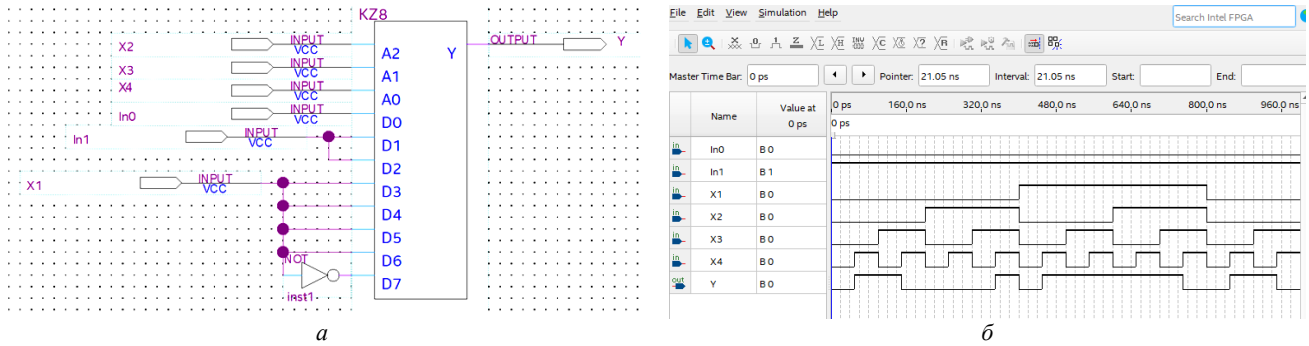


Рис. 3 – а – комп'ютерна конфігурація ПМНМ та б – часові діаграми запрограмованої функції.

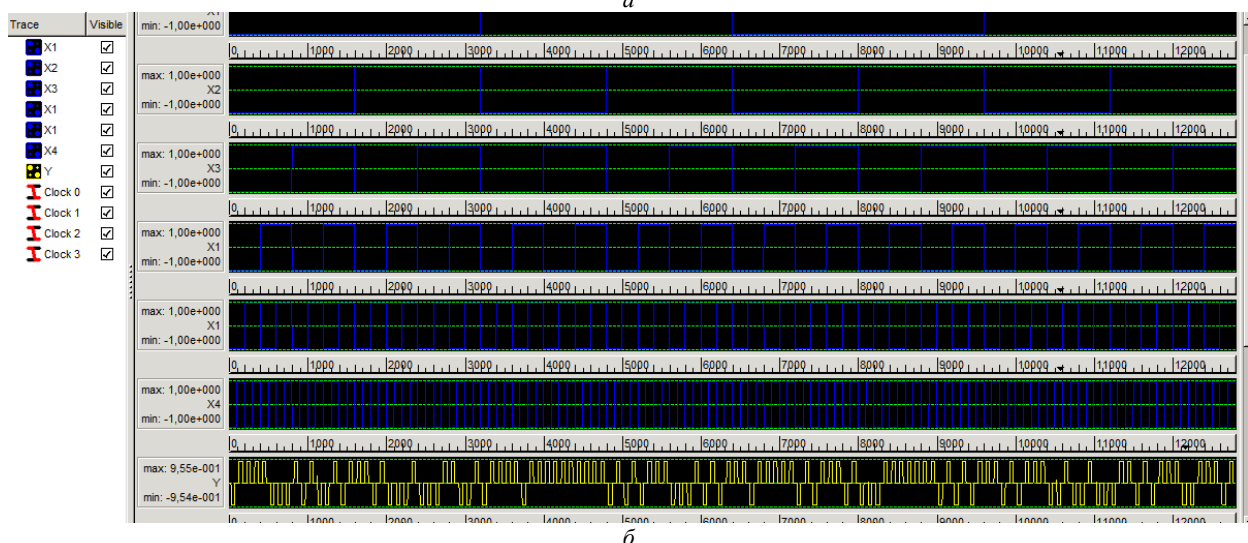
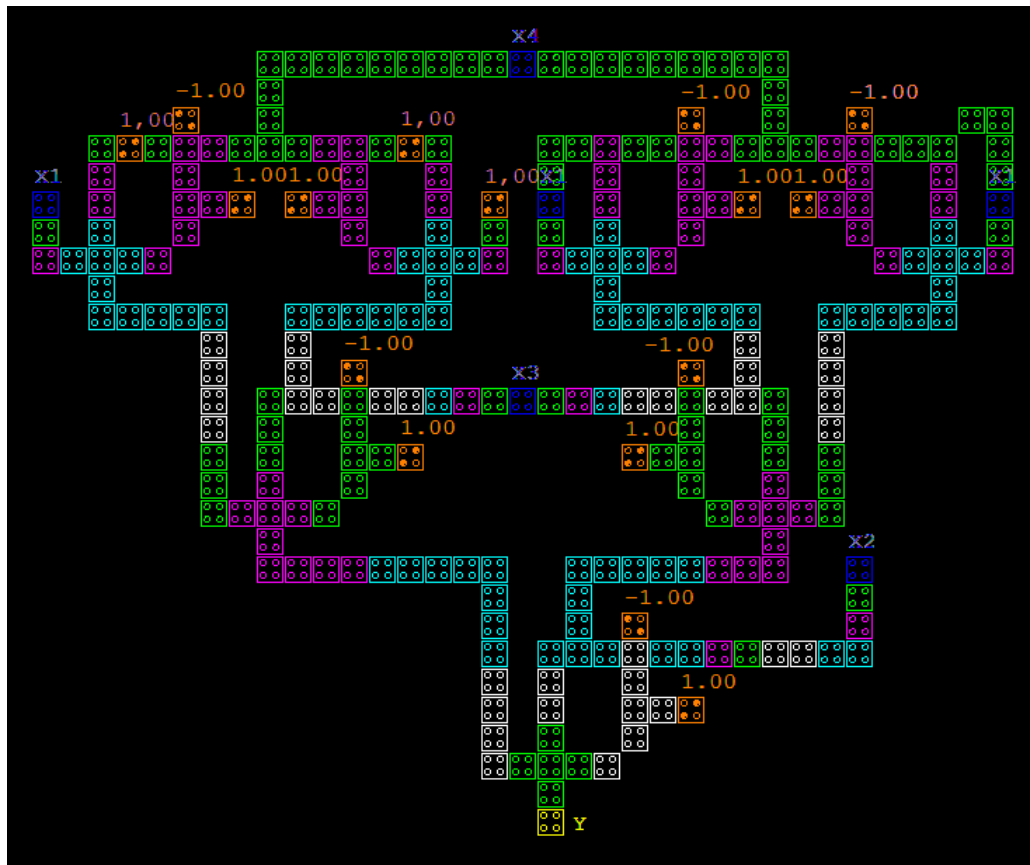


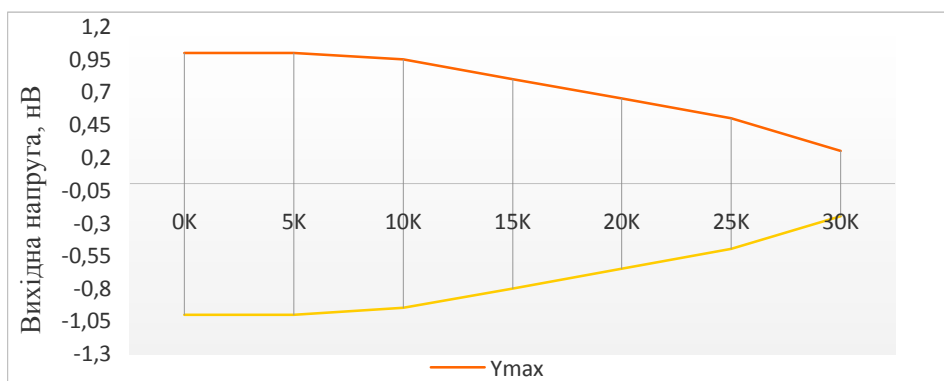
Рис. 4 – а – моделювання ПМНМ на коміркових автоматах та б – осцилограми роботи.

Раніше створений ПМНМ, тепер конфігуруємо на основі одноелектронних *мажоритарних нанoeлементів (ME)* на САПР QCADesigner [8] (рис. 4, а). Він спроектований на основі схем з рис. 2, а та рис. 3, а і складається з 24 ME, що виконують функції логічних елементів. Рис. 4, б ілюструє результати моделювання його часових діаграм, які повністю збігаються з таблицею істинності (табл. 1).

На рис. 5 наведені узагальнені результати моделювання впливу *криогенних температур* на функціонування одноелектронних ПМНМ. Вочевидь, при навіть несуттєвому збільшенні температури від 0 до 25K, не говорячи – до 300K, повністю втрачається працездатність ПМНМ до виконання логічних операцій (рис. 5, а). ME стають неспроможними детектувати одиничні, інформаційно важливі електрони в умовах зростаючої концентрації термогенерованих фонових носіїв зарядів (рис. 5, б). Це, в свою чергу, унеможливило безвідмовність функціонування одноелектронних наносхем на КА навіть при криогенних та, особливо, при нормальних температурах.



а



б

Рис. 5 – Моделювання імпульсних характеристик одноелектронних ПМНМ при криогенних температурах: а – виродження часових характеристик при $T = 20\text{ K}$; б – їх графіки температурної залежності.

Висновки. В результаті проведення математичних досліджень були реалізовані моделі мікро- та наноприс- троїв на основі мультиплексорних структур, які демонструють високу ефективність у відтворенні складних логічних функцій. Створені алгоритми дозволяють гнучко налаштовувати програмовані структури для реалізації як булевих, так і мажоритарних функцій, що значно розширює функціональні можливості одноелектронних наносхем. Моделювання підтвердило адекватність роботи розроблених мікронаномультимплексорів, а також виявило їхні переваги у частотних характеристиках. Однак низькотемпературний режим залишається критичним для їхньої стабільної роботи, що потребує подальших досліджень для оптимізації теплових характеристик. Таким чином, стаття робить внесок у розвиток технологій автоматизованого проектування, пропонуючи ефективні рішення для створення надійних і гнучких наносистем. Одноелектронні наносхеми на компонентній базі квантових автоматів зберігають працездатність тільки в умовах експлуатації на борту аерокосмічних апаратів [9, 10].

Список літератури

1. Lent C., Snider G., Lieberman M., Porod W. Quantum-dot cellular automata (QCA): The physics of computing with arrays of quantum dot molecules // Proceedings of the IEEE. – 1997. – vol. 85, no. 4, pp. 541 – 557.

2. Nielsen M., Chuang I. Quantum Computation and Quantum Information. – Cambridge University Press, 2010. – 676 p.
3. Uyemura J. Chip Design for Submicron VLSI: CMOS Layout and Simulation. – Cengage Learning, 2001. – 592 p.
4. Jaeger R. C., Blalock T. N. Microelectronic Circuit Design. – McGraw-Hill, 2010. – 1312 p.
5. Wolf W. FPGA-Based System Design. – Prentice Hall, 2004. – 507 p.
6. Walus K., Jullien G. A. Quantum-Dot Cellular Automata: Theory and Application // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2006. – vol. 99. – no. 2. – pp. 143 – 150.
7. Walus K., Jullien G. A. Design and Simulation of Quantum-Dot Cellular Automata Circuits // Journal of Applied Physics. – 2006. – vol. 99. – no. 2. – pp. 123 – 130.
8. Jha N. K., Roy K. Nanoelectronic Circuit Design. – Springer, 2010. – 439 p.
9. Melnyk O. S., Kozarevych V. O. Nanodevices with Programmable Logic // Electronics and Control Systems. – 2019. – vol. 4. – no. 62. – pp. 47–52. DOI: 10.18372/1990-5548.62.14383 DOI: 10.20998/2222-0631.2023.01.31.
10. Tahoori M. B. Nanotechnology for Logic and Memory Applications. – Springer, 2018. – 300 p.

References (transliterated)

1. Lent C., Snider G., Lieberman M., Porod W. Quantum-dot cellular automata (QCA): The physics of computing with arrays of quantum dot molecules. *Proceedings of the IEEE*. 1997, vol. 85, no. 4, pp. 541–557.
2. Nielsen M., Chuang I. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2010. 676 p.
3. Uyemura J. *Chip Design for Submicron VLSI: CMOS Layout and Simulation*. Cengage Learning, 2001. 592 p.
4. Jaeger R. C., Blalock T. N. *Microelectronic Circuit Design*. McGraw-Hill, 2010. 1312 p.
5. Wolf W. *FPGA-Based System Design*. Prentice Hall, 2004. 507 p.
6. Walus K., Jullien G. A. Quantum-Dot Cellular Automata: Theory and Application. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2006, vol. 99, no. 2, pp. 143–150.
7. Walus K., Jullien G. A. Design and Simulation of Quantum-Dot Cellular Automata Circuits. *Journal of Applied Physics*. 2006, vol. 99, no. 2, pp. 123–130.
8. Jha N. K., Roy K. *Nanoelectronic Circuit Design*. Springer, 2010. 439 p.
9. Melnyk O. S., Kozarevych V. O. Nanodevices with Programmable Logic // Electronics and Control Systems. – 2019. – vol. 4. – no. 62. – pp. 47–52. DOI: 10.18372/1990-5548.62.14383 DOI: 10.20998/2222-0631.2023.01.31.
10. Tahoori M. B. *Nanotechnology for Logic and Memory Applications*. Springer, 2018. 300 p.

Надійшла (received) 13.03.2025

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: viktoriia.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: viktoriia.kozarevych@npp.nau.edu.ua.