

О. С. МЕЛЬНИК, В. О. КОЗАРЕВИЧ

МОДЕЛІ ПРОГРАМОВАНИХ МІКРО- ТА НАНОСТРУКТУР

Розроблені математичні моделі технологічного проєктування нових структур для реалізації різнорідних дискретних функцій декількох аргументів на базі мультиплексорних мікро- та/або наноелектронних структур. Підвищення універсальності сучасних великих мікро- та нанорозмірних схем вступає в суперечність з їх спеціалізацією, що знижує обсяги відтворення кожного типового зразка. Ліквідувати розбіжність між різнобічністю та спеціалізацією можливо шляхом фахового проєктування пристроїв з програмованими структурами. Кодування виконується не для відтворення алгоритмів обробки бінарної інформації, як це реалізує мікроконтролер, а шляхом структурних налаштувань нано- та мікромультиплексорів. Отримані в роботі результати порівняльного моделювання підтвердили еквівалентність їхнього функціонування, а також переваги квантових нанорозмірних мультиплексорів у швидкодії, енергоспоживанні, надійності та масштабуванні технологічних розмірів на кристалі. Проте сучасні нанорозмірні пристрої залишаються працездатними лише в умовах космічного застосування.

Ключові слова: нанорозмірні програмовані пристрої, спеціалізоване математичне моделювання, кулонівські квантові кластери, булева та мажоритарна алгебри, кодування логічних структур, аерокосмічна техніка.

O. S. MELNYK, V. O. KOZAREVYCH

MODEL OF PROGRAMMED MICRO- AND NANOSTRUCTURES

Mathematical models of technological design of new structures for implementation of heterogeneous discrete functions of several arguments based on multiplexer micro- and/or nanoelectronic structures have been developed. Increasing the versatility of modern large micro- and nanoscale circuits comes into conflict with their specialization, which reduces the reproduction volumes of each typical sample. It is possible to eliminate the discrepancy between versatility and specialization by professional design of devices with programmable structures. Coding is performed not for reproduction of binary information processing algorithms, as implemented by a microcontroller, but by structural settings of nano- and micromultiplexers. The results of comparative modeling obtained in the work confirmed the equivalence of their functioning, as well as the advantages of quantum nanoscale multiplexers in speed, power consumption, reliability and scaling of technological dimensions on a crystal. However, modern nanoscale devices remain operational only in space applications.

Key words: nanoscale programmable devices, specialized mathematical modeling, Coulomb quantum clusters, Boolean and majority algebras, coding of logical structures, aerospace engineering.

Вступ. Математичне моделювання мікро- та наноструктур не передбачає можливості створення алгоритмів для обробки вхідних багатоаргументних функцій шляхом зміни робочих програм, як це зазвичай реалізується мікроконтролерами. Воно стосується технологічних змін у внутрішній структурі електронних схем таким чином, щоб забезпечити синтез необхідних функцій на структурно-логічному рівні.

Огляд актуальних досліджень та публікацій. Експерименти в галузі моделювання мікро- та наносхем активно розвиваються, і значна частина уваги науковців зосереджена на автоматизованому багаторівневому проєктуванні таких систем. Сучасні досягнення у цій галузі відбулися внаслідок розробки комбінованих систем на базі універсальних функціонально завершених модулів. Такі модулі виявилися однією з перспективних тенденцій в розвитку сучасної електроніки [1]. У цих дослідженнях була реалізована можливість проєктування мікро- та наносхем, здатних відтворювати 16 двоаргументних та 256 триаргументних функцій на основі мультиплексорів [2]. Однак існують суттєві труднощі у спрощенні цих схем, що зумовлює надмірну складність у реалізації та унеможливорює їх універсальне застосування. Важливим аспектом досліджень стало удосконалення методів моделювання мікро- та наносхем для запровадження різноманітних функцій булевої алгебри [3] та мажоритарної логіки [4]. Вчені запропонували ефективні алгоритми автоматизованого програмування мікросхем з високим рівнем інтеграції, що стали основою для подальшого розвитку нанопристроїв з програмованими структурами [5]. Попри значний прогрес у цій сфері, потреба досягнення ефективного автоматизованого проєктування все ще залишається відкритою, і на сьогоднішній день проблема спрощення алгоритмів та їх адекватного відтворення викликає активні дискусії.

Особливої уваги заслуговують питання впливу температурних режимів на надійність наносхем, зокрема, робота в умовах кріогенних температур. Дослідження показали, що такі умови можуть значно вплинути на роботу нанопристроїв, стимулюючи пошук нових підходів для підвищення їх якості та стабільності функціонування [6]. Також залишаються невирішеними питання узгодження таких структур, що створює додаткові виклики для їх впровадження. У результаті проблеми математичного моделювання та підвищення якості мікро- та наносхем з програмованою логікою залишаються актуальними і потребують подальших досліджень та вдосконалення.

Математичні моделі мультиплексорних мікро- і наноструктур. Для запровадження мультиплексорів як універсальних логічних накомпонентів, сигнали деяких аргументів функції подаються на адресні входи, а вхідні слова d_1, d_0 (рис. 1, а) чи x_1, x_0 (рис. 1, в), відповідно записують для функціональної реалізації. Зазвичай

для двовходового мультиплектора ($2 \rightarrow 1$) з двома інформаційними входами можливі чотири комбінації аргументів 11, 10, 01, 00 і це дозволяє реалізувати 16 різних вихідних функцій.

Рис. 1, а ілюструє умовну графічну позначку одноадресного наномультиплектора ($2 \rightarrow 1$) з двома інформаційними входами d_1 та d_0 .

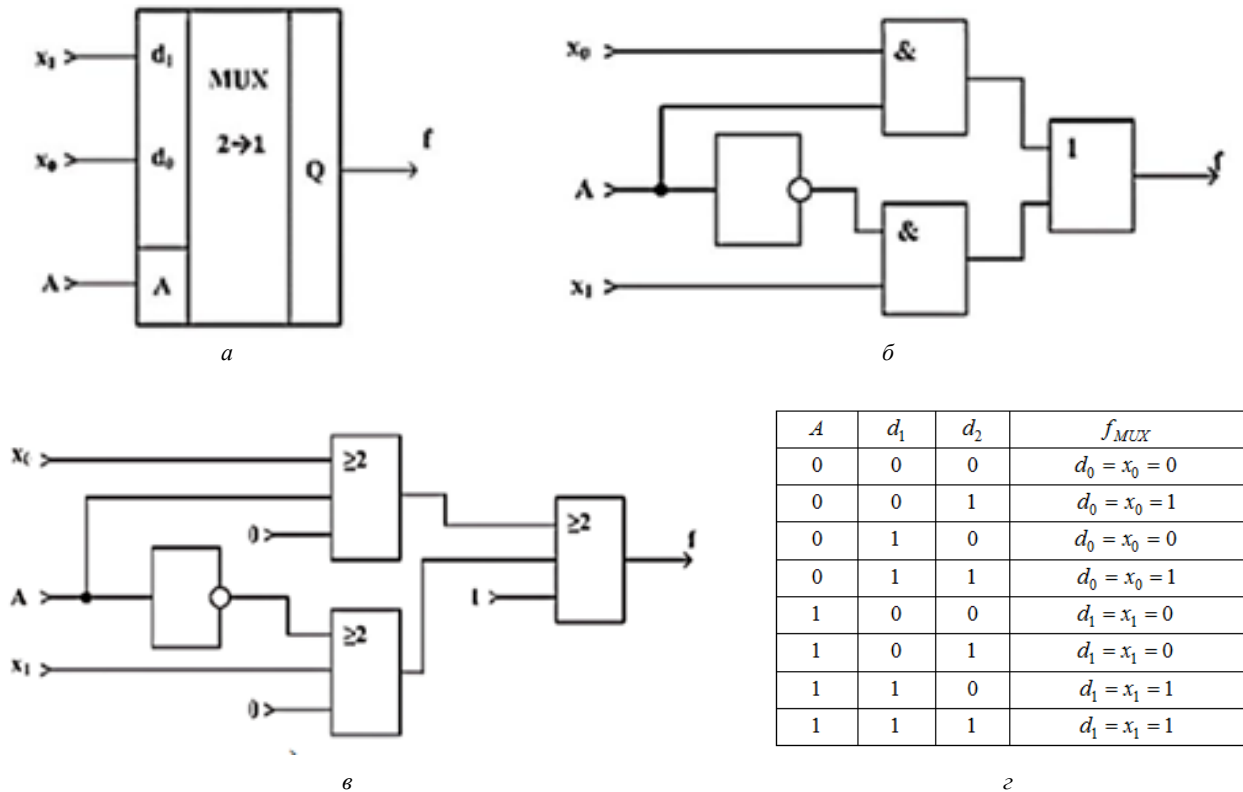


Рис. 1 – Двовходовий мультиплексор – а, його моделі для мікро- – б та наносхем – в і таблиця істинності – з.

Використовуючи аксіоми алгебри логіки [7] для таблиці істинності (рис. 1, з), отримують функцію моделі програмування мультиплектора ($2 \rightarrow 1$) у вигляді:

$$f_{MUX} = \bar{A}d_1d_0 \vee \bar{A}d_1\bar{d}_0 \vee Ad_1\bar{d}_0 \vee Ad_1d_0 = d_1A \vee d_0\bar{A}. \quad (1)$$

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

$$f_1 = \bar{x}_1\bar{x}_0 = d_1A \vee d_0\bar{A}. \quad (2)$$

Тоді для чотириразового програмування єдиного адресного входу аргументними константами необхідно подавати наступні чотири комбінації сигналів на два інформаційні входи:

$$\begin{aligned} A = \bar{x}_0, \quad d_1 = x_1, \quad d_0 = x_0 \quad \text{чи} \quad 0; \\ A = \bar{x}_1, \quad d_1 = \bar{x}_0, \quad d_0 = \bar{x}_1 \quad \text{чи} \quad 0; \\ A = x_1, \quad d_1 = \bar{x}_1 \quad \text{чи} \quad 0, \quad d_0 = 0; \\ A = x_0, \quad d_1 = x_0 \quad \text{чи} \quad 0, \quad d_0 = x_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналіз отриманих результатів. За результатами комп'ютерного моделювання двовходових програмуваних наномікромультиплексорів (НММ) ($2 \rightarrow 1$) відтворені усі 16 двоаргументних функцій (табл. 1).

Відповідно до рис. 1, б, НММ був побудований на основі системи автоматизованого проєктування (САПР) Altera Max++ [8] (рис. 2) з чотирьох комбінаційних компонентів (рис. 2, а) і також з одиничної макромоделі (рис. 2, б).

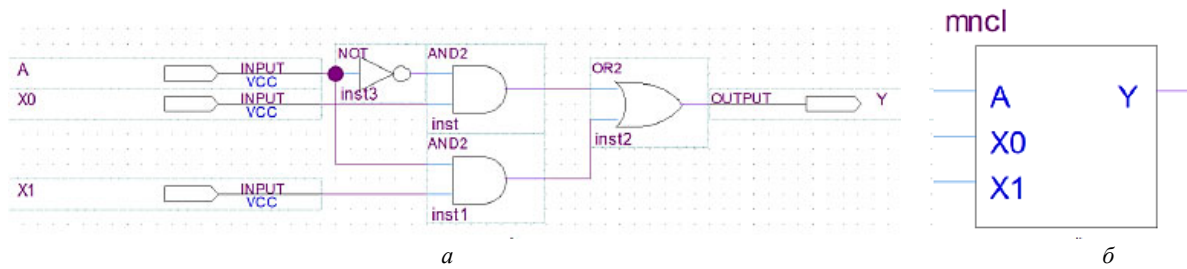


Рис. 2 – Моделі двовходових НММ: а – на логічних елементах; б – макромоделі.

Таблиця 1 – Моделювання двоаргументних дискретних функцій для НММ ($2 \rightarrow 1$)

Модельовання НММ	1	d_i	0	$x_1(0)$	$x_1(0)$	$x_1(0)$	x_0	$x_1(0)$	x_1	$\overline{x_0}$	x_0	x_0	$x_0(1)$	x_0	$x_1(1)$	$x_1(1)$	$x_1(1)$	1
		d_0	0(1)	$\overline{x_0}$	x_0	$x_1(1)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0(1)}$	x_0	$x_1(1)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0}$	$x_0(0)$	$x_1(1)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0}$	x_0	0(1)
		A	0	x_1	x_1	x_1	x_1	$\overline{x_0}$	x_1	x_1	x_1	x_1	$\overline{x_0}$	x_1	x_1	x_1	x_1	0
	2	d_i	$x(0)$	$x_1(0)$	x_1	x_1	$\overline{x_0(0)}$	$\overline{x_0}$	x_1	x_1	x_1	x_1	x_0	$x_0(1)$	x_1	x_1	$x_0(1)$	$x(1)$
		d_0	$x(0)$	x_1	$x_0(0)$	$x_1(0)$	x_1	$\overline{x_0(0)}$	x_1	$\overline{x_0(1)}$	$x_0(0)$	x_1	$x_0(0)$	x_1	$x_1(0)$	$\overline{x_0(1)}$	x_1	$x(1)$
		A	x	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$	0	$\overline{x_0}$	0	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$	0	$\overline{x_0}$	0	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$
	3	d_i	0(1)	$\overline{x_0}$	x_0	$x_1(1)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0(1)}$	x_0	$x_1(1)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0}$	$x_0(0)$	$x_1(1)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0}$	x_0	0(1)
		d_0	0	$x_1(0)$	$x_1(0)$	$x_1(0)$	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0(0)}$	$\overline{x_0}$	$\overline{x_0}$	x_0	x_0	$x_0(1)$	x_0	$x_1(1)$	$x_1(1)$	$x_1(1)$	1
		A	1	x_1	x_1	x_1	x_1	x_0	x_1	x_1	x_1	x_1	x_0	x_1	x_1	x_1	x_1	1
	4	d_i	$x(0)$	x_1	$x_0(0)$	$x_1(0)$	x_1	$\overline{x_0(0)}$	x_1	$\overline{x_0(1)}$	$x_0(0)$	x_1	$x_0(0)$	x_1	$x_1(0)$	$x_0(1)$	x_1	$x(1)$
		d_0	$x(0)$	$x_1(0)$	x_1	x_1	$x_0(0)$	$\overline{x_0}$	x_1	x_1	x_1	x_1	x_0	$x_0(1)$	x_1	x_1	$x_0(1)$	$x(1)$
		A	x	x_0	x_0	1	x_0	1	x_0	x_0	x_0	x_0	1	x_0	1	x_0	x_0	x
			$f_0 = 0$	$f_1 = \overline{x_1} \vee \overline{x_0}$	$f_2 = \overline{x_1} x_0$	$f_3 = x_1$	$f_4 = x_1 \overline{x_0}$	$f_5 = \overline{x_0}$	$f_6 = x_1 \oplus x_0$	$f_7 = \overline{x_1} \overline{x_0}$	$f_8 = x_1 x_0$	$f_9 = \overline{x_1} \oplus \overline{x_0}$	$f_{10} = x_0$	$f_{11} = \overline{x_1} \vee x_0$	$f_{12} = x_1$	$f_{13} = x_1 \vee \overline{x_0}$	$f_{14} = x_1 \vee x_0$	$f_{15} = 1$

На рис. 3 приведені схеми чотириваріантного автоматизованого моделювання для відтворення двоаргументної функції Додавання за модулем 2 на базі чотирьох НММ (рис. 3, а), які конфігуровані згідно рівносильностям (1), (2), алгоритму (3) та стовпцю f_6 з табл. 1, а також їхні тотожні часові діаграми (рис. 3, б). Ці результати підтверджують адекватність розроблених моделей НММ.

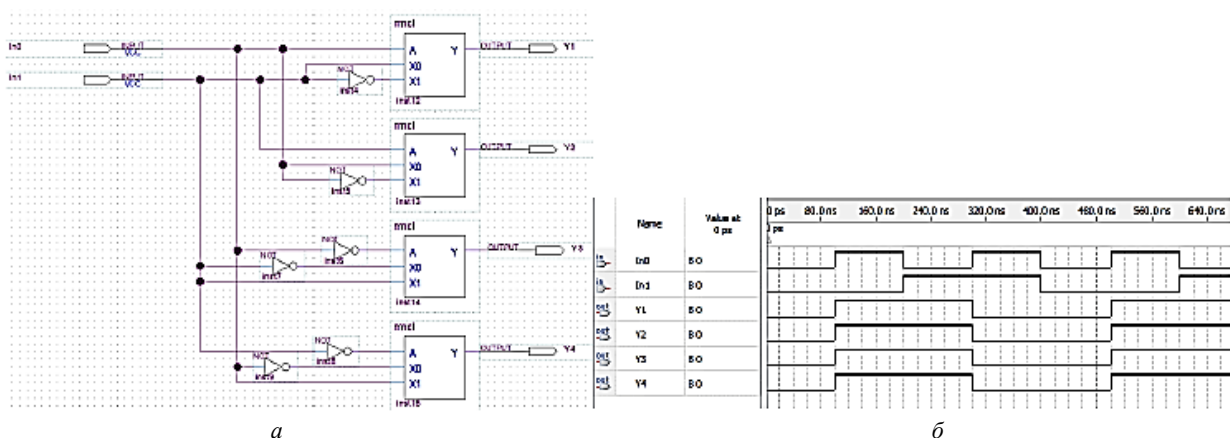


Рис. 3 – Комп'ютерне моделювання НММ – а та часова діаграма запрограмованої функції Додавання за модулем 2 – б.

Кулонівські автомати на основі квантових кластерів є базовими компонентами логічних одноелектронних наносхем [9]. Їх часто називають *квантовими* або *кулонівськими автоматами (КА)*. В чотирьох кутках на поверхні діелектричної підкладки з двоокису кремнію розміром (50×50) нм формують кулонівські острівці з тридцяти атомів чистого кремнію з використанням *технології іонної літографії* [6]. Через кулонівське відштовхування, яке спостерігається при $T < 2K$, два вільних електрона в КА можуть знаходитися тільки в двох стабіль-

них станах по двом діагоналям комірок. Тому логічні стани 1/0 комірки визначаються розподілом електронів.

Створений раніше НММ на основі одноелектронних мажоритарних наносхем (рис. 1, в) тепер відтворений на квантових коміркових автоматах (рис. 4, а) у вигляді вхідного завдання для моделювання на САПР QCADesigner [6]. Він складається з інвертора адресного сигналу A на вході мажоритарного елемента (МЕ), структуру якого запрограмовано з нульовою поляризацією "–1" для відтворення функції логічного перемноження в (1) та мажоритарних елементів на виході з позитивною одиничною функцією "1" для відтворення диз'юнктивної логічної функції f_{MUX} (1). На рис. 4, б наведені результати моделювання його осцилограм, які цілком відповідають початковій таблиці мультимплексора на рис. 1, з.

Додатково виконане комп'ютерне моделювання одноелектронного НММ з іншою конфігурацією налаштування (рис. 5, а порівняно з рис. 4, а) логічної функції f_6 Додавання за модулем 2 з табл. 1: для $A = x_1$ слід програмувати $d_1 = \bar{x}_0$ та $d_0 = x_0$ в умовах космічних температур ($0 \div 2\text{K}$).

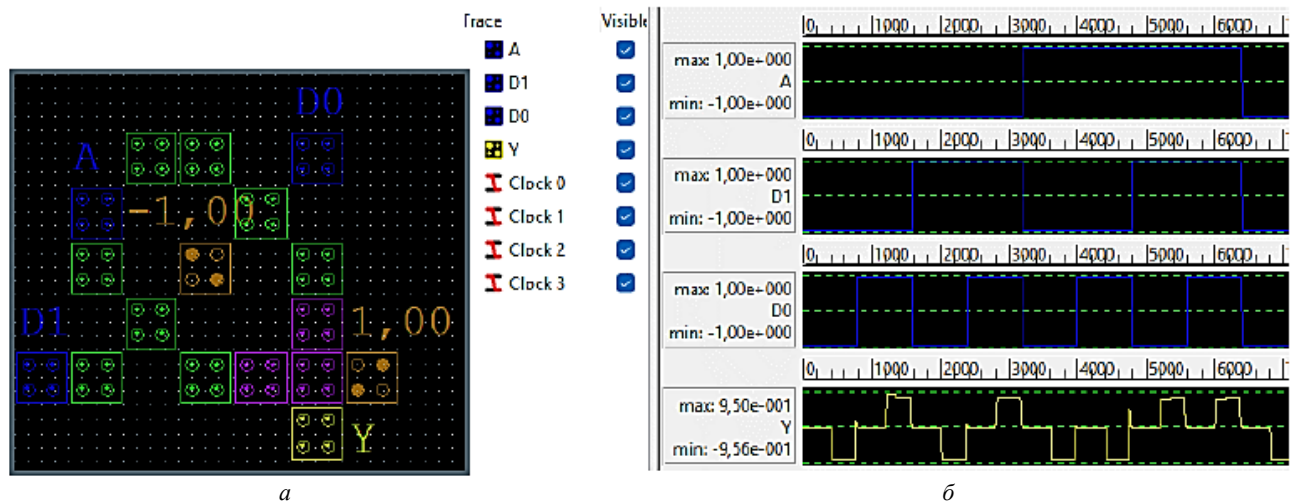


Рис. 4 – Комп'ютерне моделювання наносхеми НММ – а та відповідних осцилограм – б.

Перевірка відповідності результатів моделювання часових діаграм (рис. 5, б) та таблиці істинності (табл. 1) підтверджують адекватність налаштування НММ. Проте стають помітними явища виродження, особливо вихідної діаграми, які пояснюються термогенерацією фонових електронів в одноелектронних КА [5, 8, 10].

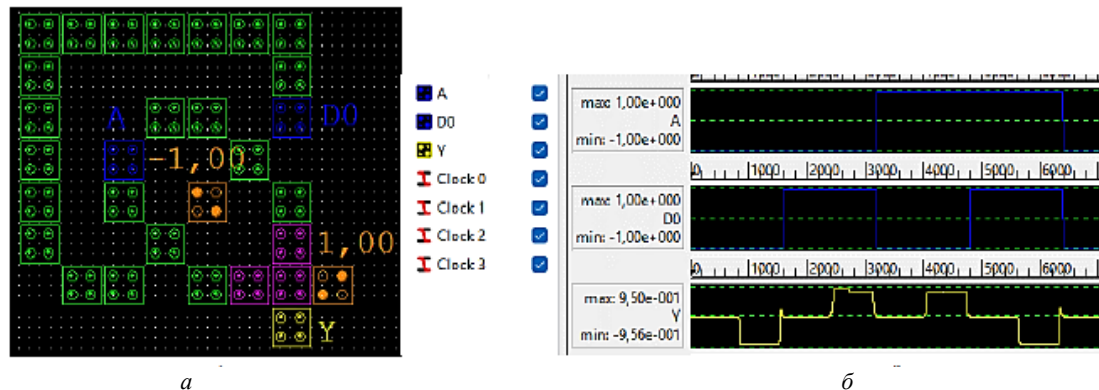


Рис. 5 – Комп'ютерне моделювання НММ в космічних умовах: а – двоаргументний наноконтур; б – часові діаграми.

Окрім цього, співвідношення часових діаграм моделей мікромультиплексора (рис. 3, б) і наномультимплексора (рис. 5, б) доводить їх синхронний збіг з результатами програмування дискретної функції Додавання за модулем 2 f_6 в табл. 1.

Подальші дослідження. Перспективним у майбутніх дослідженнях буде моделювання одноелектронних наноструктур для створення надійних аерокосмічних систем, які функціонуватимуть в умовах кріогенних температур та високих рівнів космічного опромінення.

Висновки. В роботі встановлено, що розробка адекватних моделей програмованих мікро- та наноструктур дає позитивні результати, а саме – прискорює процес відтворення дискретних функцій на базі наноелектронних мультиплексорів у порівнянні з мікросхемними аналогами. Це, в свою чергу, розширює математичний опис етапів моделювання наноструктур до рівня мажоритарної логіки. Оскільки наноелектроніка продовжує свій розвиток, Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 2 (9)'2025.

ток на базі транзисторної напівпровідникової мікроелектроніки, то на цей час необхідно подолати суттєві фізико-технологічні та квантово-енергетичні обмеження, які властиві транзисторним структурам метал-окисел-напівпровідник. Запропонований алгоритм автоматизованого програмування (табл. 1) мікро- та наноструктур підтвердив еквівалентність створених моделей. Головною перевагою, яка визначає високу ефективність нового методу моделювання мікро- та наноструктур, є те, що він не використовує інформацію про технологічні особливості транзисторних мікрокомпонент, а це забезпечує високу точність реалізації дискретних функцій. Однак, головним недоліком логічних наноструктур залишаються дуже низькі температури (десяти частки градусів Кельвіна), що пов'язано із нанорозмірами квантових острівців [6]. Тому сучасні наноструктури експлуатуються виключно в космічних пристроях.

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. Jha N. K., Roy K. *Nanoelectronic Circuit Design*. – Springer, 2010. – 439 p.
8. Tahoori M. B. *Nanotechnology for Logic and Memory Applications*. – Springer, 2018. – 300 p.
9. Walus K., Jullien G. A. Design Tools for an Emerging SOC Technology: Quantum-Dot Cellular Automata // *Processing of the IEEE*. – 2006. – vol. 94. – no. 6. – pp. 1225 – 1244. DOI: 10.1109/JPROC.2006.875791.
10. Melnyk O. S., Kozarevych V. O. Single-electron sequential nanocircuits and their models // *Electronics and Control Systems*. – 2024. – vol. 2. – no. 80. – pp. 43 – 50. DOI: 10.18372/1990-5548.80.18683.

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. Jha N. K., Roy K. *Nanoelectronic Circuit Design*. Springer, 2010. 439 p.
8. Tahoori M. B. *Nanotechnology for Logic and Memory Applications*. Springer, 2018. 300 p.
9. Walus K., Jullien G. A. Design Tools for an Emerging SOC Technology: Quantum-Dot Cellular Automata. *Processing of the IEEE*. 2006, vol. 94, no. 6, pp. 1225–1244. DOI: 10.1109/JPROC.2006.875791.
10. Melnyk O. S., Kozarevych V. O. Single-electron sequential nanocircuits and their models. *Electronics and Control Systems*. 2024, vol. 2, no. 80, pp. 43–50. DOI: 10.18372/1990-5548.80.18683.

Надійшла (received) 29.05.2025

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: 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.