

**О. С. МЕЛЬНИК, В. О. КОЗАРЕВИЧ**

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМОВАНИХ ОДНОЕЛЕКТРОННИХ НАНОСХЕМ

Швидкодія та спеціалізація великих інтегральних схем завжди вступають в протиріччя з їх універсальністю, що розширює їх номенклатуру і викликає подорожчання електронних пристроїв. Усунути протиріччя між універсальністю і спеціалізацією можна шляхом розробки програмованих наноелектронних пристроїв, алгоритми роботи яких змінюються на вимогу розробника конкретної обчислювальної апаратури, тобто шляхом створення арифметико-логічних схем з програмованими характеристиками. При виготовленні таких схем використовується єдиний нанотехнологічний комплекс, а тому з точки зору технолога це – універсальні вироби. Налаштування самих мікро- чи наносхем на заданий алгоритм роботи виконує розробник апаратури, з точки зору якого ці схеми реалізують вузько спеціалізовані завдання. В результаті програмування вносяться зміни структури схем, які призводять до набуття заданих характеристик. Розробка питань теорії і практики використання мажоритарного принципу являється в теперішній час актуальною проблемою, оскільки при наноелектронному виконанні обчислювальних систем з програмованими структурами відбувається значне зниження їх вартості і суттєво спрощується етап автоматизованого системотехнічного проектування. Одна програмована наносхема замінює від 100 до 1000 інтегральних схем середнього ступеню інтеграції. Реалізоване комп'ютерне моделювання та проектування надійних програмованих наноелектронних пристроїв на базі технології квантових автоматів. При побудові одноелектронних схем комбінаційного та послідовностного типів використовується теорія мажоритарної логіки. Проаналізовано порядок побудови та програмування різних типів арифметико-логічних пристроїв.

**Ключові слова:** квантові автомати, моделювання мажоритарних елементів, програмовані наносхеми.

**А. С. МЕЛЬНИК, В. А. КОЗАРЕВИЧ**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММИРОВАННЫХ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ НАНОСХЕМ

Реализовано компьютерное моделирование и проектирование надежных программируемых нанoeлектронных устройств на базе технологии квантовых автоматов. При построении одноэлектронных наносхем комбинационного и последовательностного типов используется теория мажоритарной логики. Проанализирован порядок построения и программирования различных типов арифметико-логических устройств.

**Ключевые слова:** квантовые автоматы, моделирование мажоритарных элементов, программируемые наносхеми.

**O. S. MELNYK, V. O. KOZAREVYCH**

### SIMULATION OF PROGRAMMABLE SINGLE-ELECTRON NANOCIRCUITS

The speed and specializations of large-scale integrated circuits always contradict their versatility, which expands their range and causes the rise in price of electronic devices. It is possible to eliminate the contradictions between universality and specialization by developing programmable nanoelectronic devices, the algorithms of which are changed at the request of computer hardware developers, i.e. by creating arithmetic circuits with programmable characteristics. The development of issues of theory and practice of the majority principle is now an urgent problem, since the nanoelectronic execution of computer systems with programmable structures will significantly reduce their cost and significantly simplify the design stage of automated systems. Today there is an important problem of developing principles for building reliable computer equipment. The use of mathematical and circuit modeling along with computer-aided design systems (CAD) can significantly increase the reliability of the designed devices. The authors prove the advantages of creating programmable nanodevices to overcome the physical limitations of micro-rominiatization. This continuity contributes to the accelerated introduction of mathematical modeling based on programmable nanoelectronics devices. The simulation and computer-aided design of reliable programmable nanoelectronic devices based on the technology of quantum automata is described. While constructing single-electron nanocircuits of combinational and sequential types the theory of majority logic is used. The order of construction and programming of various types of arithmetic-logic units is analyzed.

**Key words:** quantum automata, simulation of majority gates, programmable nanoelectronic circuits.

**Вступ.** Розвиток *наноелектроніки* іде в бік зменшення розмірів, підвищення швидкодії і надійності. *Одноелектронні* наносхеми з'явилися за принципових обмежень, що виникли на шляху розвитку мікросхем. Гнучка програмованість функцій і характеристик наносхем суттєво переважає можливості *програмованих логістичних інтегральних схем (ПЛІС)* за рахунок структурних переваг і меншого надлишка. Тому насущним є впровадження *нових методів моделювання програмованих наноелектронних пристроїв (ПНЕП)*.

**Аналіз попередніх досліджень.** *Квантові автомати (КА)* є новою нанотехнологією, в якій використовується *кулонівська блокада* для фіксації електронів. Попередні роботи [1, 2] по ПНЕП на КА були зосереджені на програмованих з'єднаннях, що викликало проблеми нетрадиційної синхронізації наносхем. На відміну від цього, у цій роботі подолано таку проблему і запропоноване нове логічне програмування в одному напрямку (зліва-праворуч). Це дозволяє створювати адекватні і прості моделі ПНЕП і їх синхронізації.

**Постановка завдання.** На сьогодні є важливою проблема розробки принципів побудови надійних засобів обчислювальної техніки. Застосування *математичного і схемотехнічного моделювання* поряд з *автоматизованими системами проектування (САПР)* дозволяє в значній мірі підвищити надійність пристроїв, які проектуються. Враховуючи вищенаведене, актуальною стає *задача синтезу математичних моделей ПНЕП* для інформаційного забезпечення САПР.

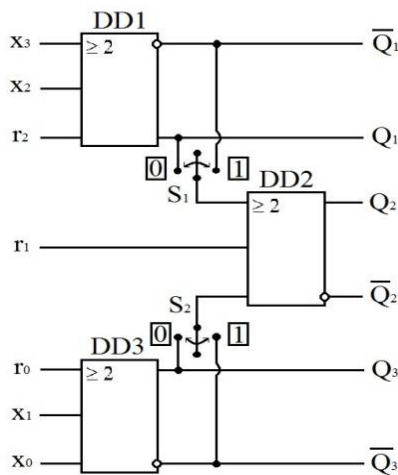


Рис. 1 – Структурна схема ПНЕП.

В якості такої комірки для побудови *мажоритарних адаптивних систем (МАС)* можна використовувати універсальний програмований наноелектронний пристрій (ПНЕП), який складається з трьох *універсальних мажоритарних елементів (УМЕ)*, відповідним чином з'єднаних між собою (рис. 1). На входи ПНЕП подаються інформаційні ( $x_3, x_2, x_1, x_0$ ) і програмуючі ( $r_2, r_1, r_0$ ) сигнали [3].

За допомогою ПНЕП такого типу можна реалізувати всі 16 або 256 функцій двох чи трьох аргументів, в тому числі функції суми, різниці, добутку, переносу і займу, функції одного, двох і трьох елементів пам'яті, а також більшість функцій чотирьох і п'яти аргументів. Особливістю ПНЕП являється те, що можна змінити по програмі його логічні можливості і зв'язки, які дозволяють використовувати його для побудови МАС. В табл. 1 наведені найбільш важливі функції в мажоритарному базисі, які реалізуються на базі ПНЕП.

Таблиця 1 – Приклади найбільш важливих функцій, які можна реалізувати на ПНЕП

№	$r_2$	$r_1$	$r_0$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	Число вих. функцій
1	0	0	0	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3x_2, x_1x_2, 0)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
2	0	0	1	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3x_2, x_1 \vee x_0, 0)$	$maj(x_1, x_1, 1)$	24
3	0	1	0	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3x_2, x_1x_0, 1)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
4	0	1	1	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3x_2, x_1 \vee x_0, 1)$	$maj(x_1, x_1, 1)$	24
5	1	0	0	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1x_0, 0)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
6	1	0	1	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 0)$	$maj(x_1, x_1, 1)$	24
7	1	1	0	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1x_0, 1)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
8	1	1	1	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 1)$	$maj(x_1, x_1, 1)$	24
9	0	0	$x_4$	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3x_2, maj(x_1, x_0, x_4), 0)$	$maj(x_1, x_0, x_4)$	44
10	$Q_1$	0	$Q_3$	$maj(x_3, x_2, Q_1)$	$maj(maj(x_3, x_2, Q_1), maj(x_1, x_0, Q_3), 0)$	$maj(x_1, x_0, Q_3)$	Два тригери

В табл. 1  $x_4, x_3, x_2, x_1, x_0$  – вхідні інформаційні сигнали, представлені або в прямому, або в інверсному кодах;  $r_2, r_1, r_0$  – сигнали програмування;  $Q_3, Q_2, Q_1$  – вихідні сигнали.

ПНЕП являється функціонально повним пристроєм, оскільки в його склад входять функціонально повні УМЕ.

Моделювання мажоритарних систем на базі ПНЕП проводиться в наступному порядку:

1. Задані чи отримані булеві функції представляються в мажоритарному базисі.
2. Проводиться мінімізація отриманої мажоритарної функції.
3. В табл. 1 відшукується рядок, еквівалентний мінімальній формі мажоритарної функції.
4. Складається структурна наносхема з урахування можливостей ПНЕП і заданої кількості входів.

Функціонування систем на квантових *коміркових автоматах (КА)* ґрунтується на взаємодії кулонівських сил квантових точок для здійснення логічних функцій. Вони розроблені для зменшення застосування транзис-

торів і вирішення проблем щільності та з'єднання одноелектронних пристроїв. Комірковий автомат – це згруповані квантові точки, поєднані тунельними переходами та конденсаторами. Квантові точки являють собою регіони низького потенціалу, які оточені кільцем високого потенціалу. Є декілька способів їх формування, але найзагальніший з них – металізація. У коміркових автоматах чотири квантові точки з 50 атомів чистого кремнію розміщуються в кутках діелектричного квадрату розміром  $(20 \times 20)$  нм. Кожен автомат містить у собі два електрони, які внаслідок дії кулонівських сил відштовхування розміщуються діагонально, у протилежних кутках (рис. 2). Два можливі розміщення цих електронів позначено як поляризації комірок  $P = -1$  та  $P = +1$  [1].



Рис. 2 – Квантові комірки в станах: *a* – логічного нуля; *б* – логічної одиниці.

Моделюємо за допомогою САПР QCADesigner [4] функцію логічного додавання чотирьох аргументів:

$$Q_2 = x_3 \vee x_2 \vee x_1 \vee x_0, \quad (1)$$

якій відповідає мажоритарний еквівалент у восьмому рядку табл. 1.

На двох додаткових виходах ПНЕП формуються функції логічного додавання попарно двох з чотирьох аргументів:

$$Q_1 = x_3 \vee x_2 = \text{maj}(x_3, x_2, 1); \quad (2)$$

$$Q_3 = x_1 \vee x_0 = \text{maj}(x_1, x_0, 1). \quad (3)$$

**Результати проектування.** Для програмування функцій (1), (2) та (3) слід в структурній схемі ПНЕП (рис. 1) ключі  $S_1$  та  $S_2$  перекомутувати в стан 0, а на програмуючих входах встановити поляризації  $P = +1$ , тобто  $r_2 = r_1 = r_0 = 1$ .

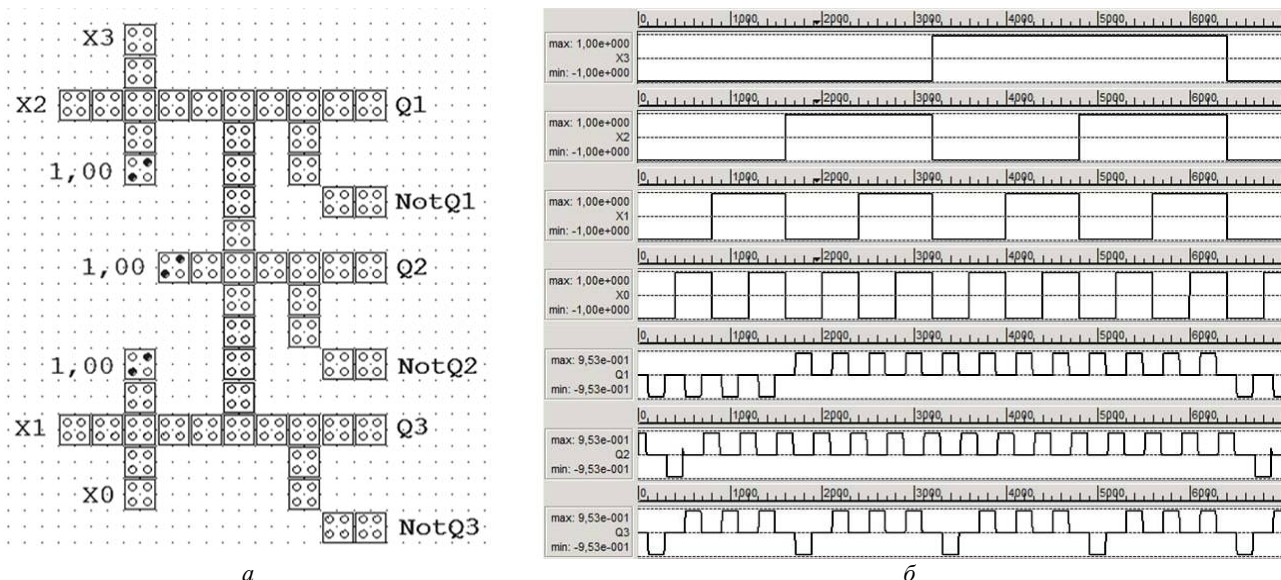


Рис. 3 – Автоматизоване проектування ПНЕП комбінаційного типу на КА: *a* – схема ПНЕП; *б* – результати часових характеристик ПНЕП.

На рис. 3, *a* наведена схема ПНЕП, яка побудована на робочому полі САПР QCA Designer [4]. Вона складається з 55 квантових комірок розміром  $(18 \times 18)$  нм з 4 квантовими точками діаметром 5 нм і відстанню між центрами 20 нм. Загальний розмір ПНЕП  $(198 \times 318)$  нм<sup>2</sup>. Пристрій має чотири інформаційні входи  $x_3, x_2, x_1$  та  $x_0$ , три програмуючих входи з поляризаціями  $P = +1$  і три пари комплементарних виходів  $Q_1, Q_2$  та  $Q_3$ .

Результати автоматизованого моделювання часових характеристик ПНЕП показані на рис. 3, б. Позитивним імпульсам відповідають позитивні поляризації  $P = +1$ , а негативним – від’ємні поляризації  $P = -1$ . Відповідну таблицю істинності ПНЕП для цього режиму програмування наведено в табл. 2.

За допомогою змін поляризації на входах  $r_2, r_1, r_0$  та перекомутації ключів  $S_1$  та  $S_2$  семивходовий ПНЕП (рис. 1) можна запрограмувати для отримання 192 логічних функцій дво- та чотиривходових комбінаційних схем. Наприклад, для першого варіанту програмування  $r_2 = r_1 = r_0 = 0$  моделюємо елементи логічного перемноження:  $Q_1 = x_3x_2$ ,  $Q_2 = x_3x_2x_1x_0$ ,  $Q_3 = x_1x_0$ .

Сума попарних добутків чотирьох аргументів  $Q_2 = x_3x_2 \vee x_1x_0$  реалізована в третьому варіанті табл. 1, а добуток попарних сум  $Q_2 = (x_3 \vee x_2)(x_1 \vee x_0)$  – у шостому.

Таблиця 2 – Таблиця істинності функцій  $maj(x_3, x_2, 1)$ ,  $maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 1)$  та  $maj(x_1, x_0, 1)$

$x_3$	$x_2$	$x_1$	$x_0$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	0	0	1	1
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	1	1	1
0	1	1	0	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

Далі моделюємо послідовностну схему 10-го варіанту з табл. 1 у складі двох RS-тригерів з роздільними входами  $x_3, x_2$  і  $x_1, x_0$ , охопленими зворотними зв'язками  $r_2 = Q_1$  і  $r_0 = Q_3$ . Прямі виходи  $Q_1$  і  $Q_3$  цих тригерів об'єднані по третьому мажоритарному елементу (рис. 1), який в цьому випадку реалізує операцію логічного множення  $maj(Q_1, Q_3, 0)$ . На рис. 4, а побудована ця послідовностна одноелектронна наносхема у форматі системи QCA Designer, а результати її часового моделювання наведені на рис. 4, б. Вона має розмір  $(258 \times 338) \text{nm}^2$  і складається з 81 КА.

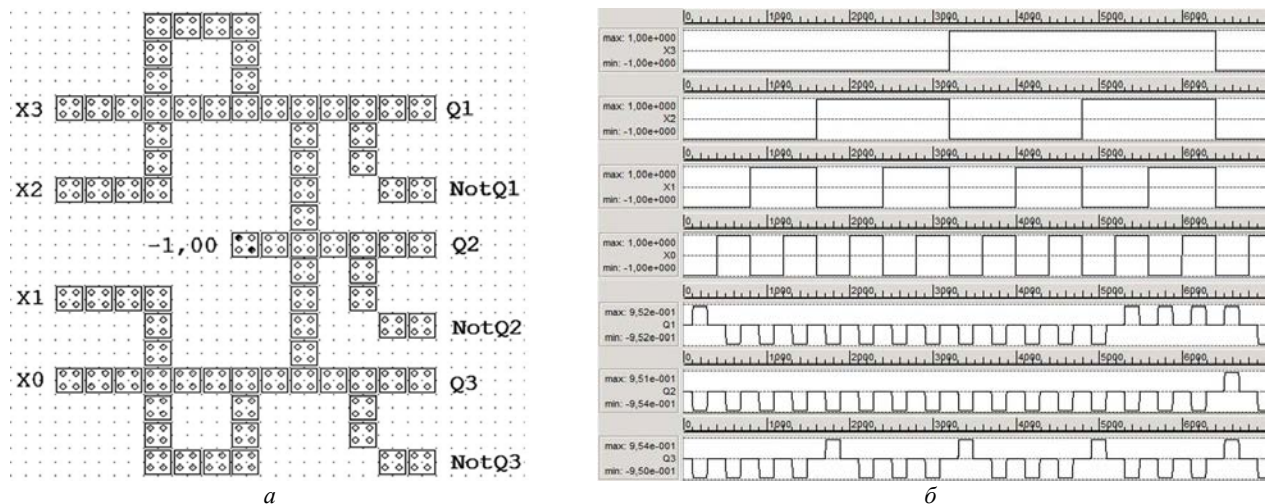


Рис. 4 – Автоматизоване проектування послідовностного ПНЕП на КА: а – одноелектронна наносхема; б – результати часового моделювання.

**Перспективи подальших досліджень.** Нанoeлектроніка – це один з найбільш перспективних напрямів, що продовжує розвиток мікроелектроніки. Автори довели переваги створення програмованих нанопристроїв на шляху подолання фізичних обмежень *мікромініютиаризації*. Ця наступність сприяє прискореному запровадженню математичного моделювання на базі ПНЕП. Однак, деякі дослідники переконані, що інструментальною базою штучного інтелекту може стати молекулярна електроніка.

**Висновки.** Отже, в роботі успішно створені математичні моделі програмованих нанопристроїв для інформаційного забезпечення САПР. Такі нанопристрої, реалізовані на базі одноелектронних наносхем з використанням технології квантових автоматів, є надшвидкодійними та щонайекономичнішими.

Не виключена також можливість, що майбутнє нанoeлектроніки може ґрунтуватися на вуглецевих нанотрубках, а не на кремнієвих компонентах. Тому синтез математичних моделей і надалі залишатиметься актуальним.

#### Список літератури

1. Мельник О. С., Івахнюк В. В. Автоматизоване моделювання наносхем на квантових коміркових автоматах // Електроніка та системи управління. – 2011. – № 2 (28). – С. 7 – 15.
2. Lantz T. D. A QCA implementation of a look-up table for an FPGA // Graduate Paper, Electrical Engineering Department. – Rochester Institute of Technology, May 2006. – 110 p.
3. Пакулов Н. Н. Мажоритарный принцип построения надежных узлов и устройств ЦВМ. – М. : Сов. радио, 1974. – 184 с.
4. Walus K. QCA Designer: A Rapid Design and Simulation Tool for QCA // Internet journal of Nanotech. and Appl. – 2005. – Vol. 2 – №1 – P.1 – 7.

#### References (transliterated)

1. Mel'nyk O. S., Ivakhnyuk V. V. Avtomatyzovane modelyuvannya nanoskhem na kvantovykh komirkovykh avtomatakh [Computer-aided design of quantum cellular automata based nanocircuits]. *Electronika ta systemy upravlinnya* [Electronics and control systems]. 2011, № 2 (28), pp. 7–15.
2. Lantz T. D. *A QCA implementation of a look-up table for an FPGA*. Graduate Paper, Electrical Engineering Department, Rochester Institute of Technology, May 2006. 110 p.
3. Pakulov N. N. Mazhoritarnyy printsyp postroeniya nadezhnykh uzlov i ustroystv TsVM [Majority principle for constructing reliable nodes and units of electronic digital computer]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1974. 184 p.
4. Walus K. QCA Designer: A Rapid Design and Simulation Tool for QCA. *Internet journal of Nanotech. and Appl.* 2005, Vol. 2, no. 1, pp. 1–7.

Надійшла (received) 18.09.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / 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.: +38(044)4067130; e-mail: melnyk.olexa@nau.edu.ua.

**Мельник Александр Степанович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроники, робототехники и технологий мониторинга и интернет вещей, Национальный авиационный университет, г. Киев; тел.: +38(044)4067130; e-mail: melnyk.olexa@nau.edu.ua.

**Melnyk Oleksandr Stepanovich** – 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.: +38(044)4067130; e-mail: melnyk.olexa@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; e-mail: kozarevichviktoria@gmail.com.

**Козаревич Виктория Александровна** – старший преподаватель кафедры электроники, робототехники и технологий мониторинга и интернета вещей, Национальный авиационный университет, г. Киев; тел.: (063) 310-30-41; e-mail: kozarevichviktoria@gmail.com.

**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; e-mail: kozarevichviktoria@gmail.com.