

Мельник О.С., к.т.н., доцент,
Козаревич В.О.,
Цапок Л.О.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАНОЕЛЕКТРОННИХ АРИФМЕТИКО-ЛОГІЧНИХ ПРИЛАДІВ

Національний авіаційний університет

melnyk.ols@gmail.com

Робота присвячена комп'ютерному моделюванню дворозрядного унікального арифметико-логічного пристрою на квантових коміркових автоматах, до складу якого входять виключно мажоритарні логічні суматори та інвертори. В роботі виконується моделювання квантових коміркових автоматів з використанням автоматизованої системи проектування QCADesiner

Ключові слова: квантовий комірковий автомат, мажоритарний елемент, квантовий суматор, квантовий перемножувач, зона синхронізації, компланарне перехрещування нанопровідників

Вступ

Квантові коміркові автомати – це обчислювальна парадигма, згідно з якою інформація представляється певною конфігурацією електронів в комірці квантових автоматів, що складається з однієї чи двох окремих молекул [1].

Орієнтація пари квантових комірок така, що їхнє взаєморозміщення визначає взаємний вплив. Ця взаємодія зарядів між сусідніми комірками дає змогу обробляти і передавати інформацію. Такий метод є функціонально аналогічним, але структурно відрізняється від способу, в який комбінуються окремі вентиля у великих інтегральних мікросхемах для забезпечення виконання арифметико-логічних операцій та створення схем з пам'яттю.

Описові моделі наноелектронних елементів

1. *Основи теорії квантових коміркових автоматів.* Прилади на квантових коміркових автоматах складаються з комірок-діелектриків, які мають чотири квантові напівпровідникові точки, розташовані у кутках, і два рухомі електрони. Порядок їх розміщення залежить лише від скінченного набору можливих значень в межах певної комірки. Окрема комірка забезпечує тунельний перехід з потенці-

альним бар'єром. Переходи контролюються локальним електричним полем, величина якого збільшується для перешкодження руху електронів, або зменшується для його спонукання. Таким чином, окрема комірка може перебувати в одному з трьох станів. Нульовий стан або стан невизначеності настає, коли потенціальний бар'єр зменшений, і рухомий електрон може зайняти будь-яку з вакансій. Інші два стани – стани поляризації, виникають, коли величина потенціального бар'єру зростає і зберігає свій рівень, щоб мінімізувати енергетичний рівень комірки. Набір станів Q скінченний і типовий: $Q = \{0,1\}$. Ймовірність перебування комірки в одному із станів поляризації може бути співвіднесена з густиною заряду кожної окремої квантової точки, і визначається формулою:

$$P = \frac{(\rho_1 + \rho_3) - (\rho_2 + \rho_4)}{(\rho_1 + \rho_3) + (\rho_2 + \rho_4)} = \pm 1;$$

де ρ_i – густина електричного заряду кожної квантової точки комірки.

На рис. 1 зображена базова комірка квантового автомата, два способи її розміщення в просторі, і поляризації електронів.

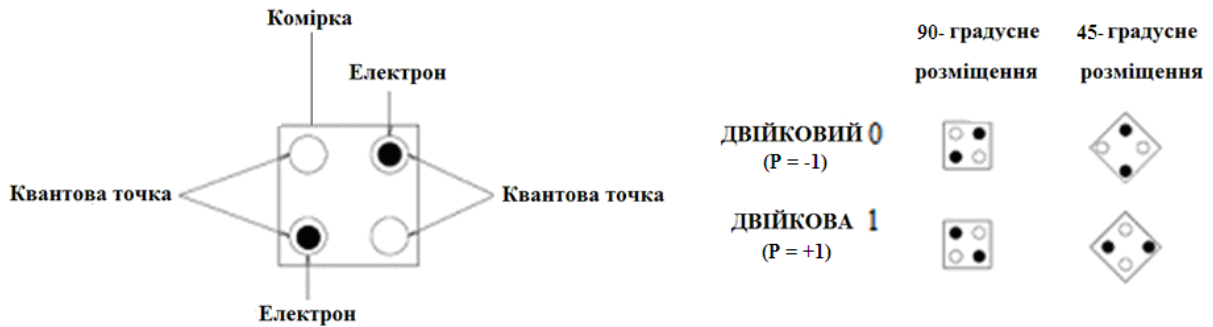


Рис. 1. Окрема комірка квантового автомата (а), її два способи розміщення в просторі (б) і поляризації ($P = \pm 1$)

2. *Мажоритарний елемент та інвертор.* Розміщуючи комірки в послідовності одна за другою і викликаючи їх взаємодію між собою, можливо забезпечити передачу інформації по такому провіднику. Теоретично існує два методи побудови провідника в залежності від 45-градусної чи 90-градусної орієнтації комірок, але технологічно складно вигото-

вити нанокмірки з різною орієнтацією.

За допомогою квантових коміркових автоматів можуть бути сконструйовані різні елементи для виконання арифметичних і логічних операцій. Базовими логічними елементами в теорії коміркових автоматів є мажоритарний елемент та інвертор (рис. 2).

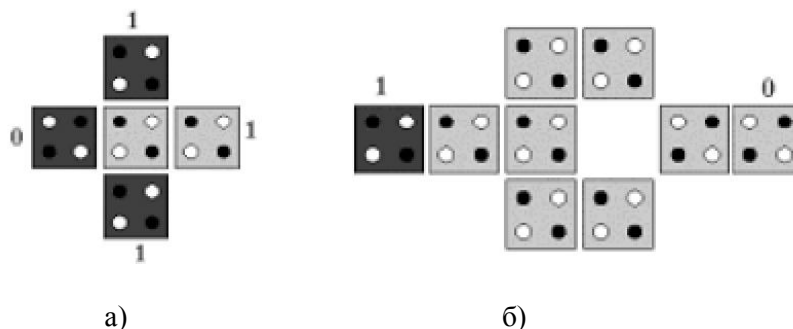


Рис. 2. Мажоритарний елемент (а) та інвертор (б) на базі коміркових автоматів

Вихідна комірка мажоритарного елемента буде мати поляризацію більшості вхідних комірок. Булевий вираз для мажоритарної функції;

$$maj(a, b, c) = ab \vee bc \vee ac,$$

де a, b і c – входи. Фіксація поляризації одного з входів мажоритарного елемента як логічний 0 чи логічна 1, дає змогу отримати елементи І чи АБО, відповідно $a \cdot b = maj(a, b, 0)$, $a \vee b = maj(a, b, 1)$. Такі комірки можуть бути створені в процесі виробничого виготовлення, що усуває необхідність підтримувати постійний струм через схему.

3. *Синхронізація.* Синхронізація ві-

діграє важливу роль в керуванні роботою квантово-коміркової логіки. Такий контроль реалізується в результаті приєднання комірок до тактових зон таким чином, що вони замикаються в послідовність для бажаного напрямку передачі сигналу. Коли потенціал зони зменшується, електрони втрачають стабільність, в результаті чого поляризація комірки не визначається. Зростання потенціального бар'єру зменшує коефіцієнт тунелювання, в результаті чого електрон починає локалізуватися. Якщо електрон займає одне місце, то комірка набуває визначеної поляризації. Коли потенціальний бар'єр досягає максимуму, говорять, що комірка закрита.

Закриті комірки працюють як умовний вхід, причому дійсний вхід може набувати нового значення. Саме тому, існує певна затримка в поширенні сигналу через квантові комірки. З метою забезпечення обчислень сигнал проходить через тактові зони, що представляють собою області, де відбуваються обчислення. Тактові зони фізично упорядковані, це означає, що обчислення повинні проводитися в послідовному порядку. Сигнали повинні надходити до схеми обрахунку без затримок.

Квантові комірки мажоритарного елемента повинні бути в тактовій зоні відділеній від тактових зон вхідних і вихідної комірок, тому мажоритарний елемент розташовується на краях інших тактових зон.

4. Повний суматор. Науковці Харківського університету [2] і Університету Нотр Дам [1] першими запропонували наносхему повного суматора. Однобітний повний суматор на квантових комірко-вих автоматах може бути складений з трьох мажоритарних елементів і двох інверторів (рис.3). Вирази для суми S і переповнення цього суматора C_{out} наступні:

$$S = maj(\bar{C}_{out}, x_0, maj(x_1, \bar{x}_0, C_{in}))$$

$$C_{out} = maj(x_0, x_1, C_{in}),$$

де x_0, x_1, C_{in} – входи, S і C_{out} – виходи суматора.

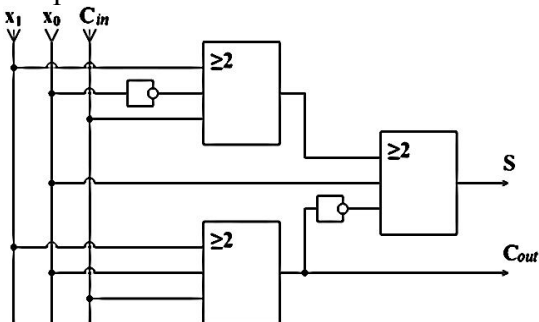


Рис. 3. Схема однорозрядного суматора на мажоритарних елементах

Приєднання 90-градусно орієнтованої комірки між двома 45-градусно орієнтованими дає можливість отримати на виході як початковий сигнал (Вихід 1) і комплементарний до нього (Вихід 2). Нанопровідники подібної конструкції представлені на рис. 4.

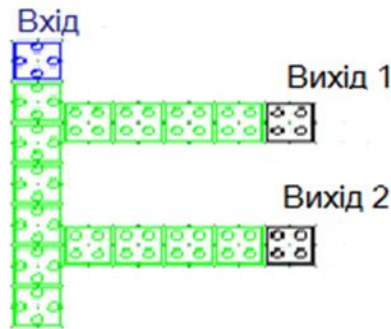


Рис.4. Нанопровідник одночасної передачі з Входу початкового (Вихід 1) і комплементарного (Вихід 2) сигналів

На рис. 5 наведена наносхема на квантових комірко-вих автоматах однорозрядного суматора на планшетному полі проектування системи *QCADesiner* [5]. Для конструювання вхідних провідників використані комірки з 45 градусною орієнтацією. Використання такого способу розміщення комірок створює інвертуючий ланцюг, в якому кожна комірка протилежно поляризована до сусідніх. Якщо провідник з однаково поляризованих комірок перетинає інвертуючий провідник, провідники не взаємодіють між собою, тому можуть працювати незалежно на одному рівні. Такий перетин має назву компланарний [3-4]. Проблемою компланарного перетину є те, що відстань між комірками окремого провідника призводить до зниження ймовірності проходження сигналу.

Затримка такого суматора – один тактовий цикл, що складається з чотирьох тактових зон (представлених на рис. 5 різними ступенями градацій сірого).

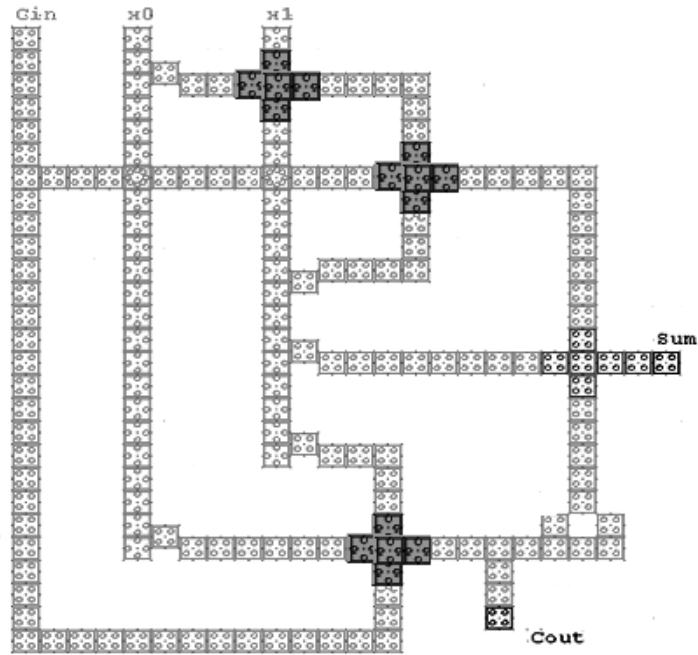


Рис. 5. Наносхема суматора на квантових коміркових автоматах

5. *Перемножувач*. Проектування дворозрядного перемножувача є складнішим в порівнянні з попередніми, що пов'язане не лише з використанням більшої кількості логічних елементів, але також з моделюванням перемножувача на декількох фізичних рівнях. З цією метою використовується багат шаровий перетин провідників. Традиційний багат шаровий перетин може бути створений з комірок будь-якого типу, вертикальна відстань при цьому між комірками повинна бути достатньою, щоб запобігти взаємодії сигналів на різних рівнях. Оскільки існує затримка в поширенні сигналу від комірок

до комірок, повинне існувати обмеження максимальної кількості комірок в тактовій зоні. Це забезпечує належне поширення і передачу сигналу. Мінімальне розділення між двома провідниками сигналу – ширина двох комірок. Це правило також повинно бути застосоване для провідників, що перетинаються на різних рівнях, використовуючи більше ніж один шар комірок як міст.

Вираз для чотирьох виходів дворозрядного перемножувача, реалізованого на чотирьох мажоритарних елементах і двох повних суматорах, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= x_0 y_0 = \text{maj}(x_0, y_0, 0); \\
 P_1 &= \bar{x}_1 x_0 y_1 \vee x_1 x_0 \bar{y}_0 \vee x_1 \bar{y}_1 y_0 \vee x_1 \bar{x}_0 y_0 = \\
 &\text{maj}(\overline{\text{maj}(\text{maj}(x_0, y_1, 0), \text{maj}(x_1, y_0, 0), C_1)}, \text{maj}(\text{maj}(x_0, y_1, 0), \text{maj}(x_1, y_0, 0), \bar{C}_1), C_1); \\
 P_2 &= x_1 y_1 \bar{y}_0 \vee x_1 \bar{x}_0 y_1 = \text{maj}(C_2, \text{maj}(\bar{C}_2, \text{maj}(\text{maj}(x_0, y_1, 0), \text{maj}(x_1, y_0, 0), C_1), \text{maj}(x_1, y_1, 0)), \\
 &\overline{\text{maj}(C_2, \text{maj}(\text{maj}(x_0, y_1, 0), \text{maj}(x_1, y_0, 0), C_1), \text{maj}(x_1, y_1, 0))}); \\
 P_3 &= x_1 x_0 y_1 y_0 = \text{maj}(C_2, \text{maj}(x_1, y_1, 0), (C_1, \text{maj}(x_0, y_1, 0), \text{maj}(x_1, y_0, 0))),
 \end{aligned}$$

де x_0, x_1, y_0, y_1 – вхідні сигнали, P_0, P_1, P_2, P_3 – відповідні біти вихідного добутку, C_1, C_2 – перенесення з попереднього стану.

Для компонування наносхеми перемножувача і моделювання його функціональних можливостей використовується система автоматизованого проектування *QCADesiner* [5].

Дворозрядний перемножувач, спроектований на вищезгаданих принципах, складається з двох однорозрядних суматорів і чотирьох мажоритарних елементів

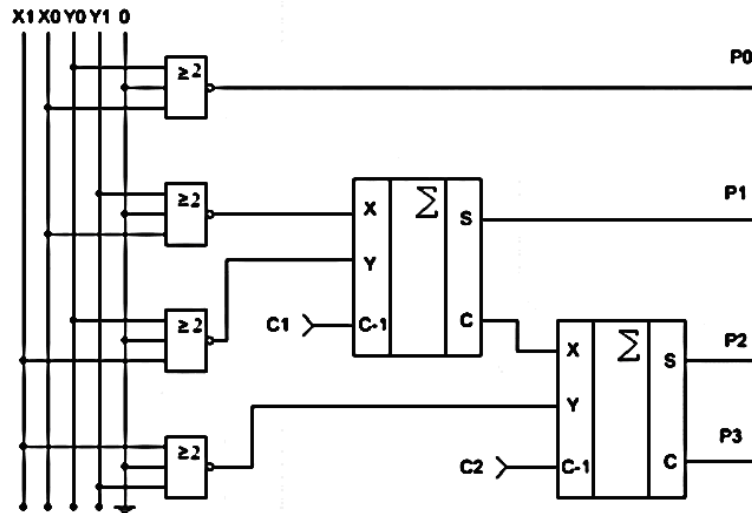


Рис. 6. Наносхема дворозрядного перемножувача

Комп'ютерна модель цієї наносхеми на квантових коміркових автоматах показана на рис. 7. Особлива увага має бути приділена розділенню наносхеми на тактові зони, щоб забезпечити синхронну послідовність роботи комірок з метою одночасного досягнення сигналами відповідних елементів. Існує необхідність розміщення комірок, що знаходяться одна над одною, в одній тактовій зоні, так як стан квантових точок комірок керується локальним електричним полем. Швидкодія такого перемножувача – три тактові цикли, що складаються з чотирьох тактових зон.

Наносхема сконструйована на шести коміркових рівнях задля уникнення проблем компланарного перетину, що пов'язані з низьким рівнем передачі сигналу між двома провідниками.

Спроектвана таким чином наносхема дворозрядного перемножувача базується на 630 квантових комірках, розмір яких 18×18 нм, з чотирма квантовими то-

з фіксованими входами. Наносхема дворозрядного перемножувача представлена на рис. 6.

чками, кожна з яких має діаметр 5 нм, відстань між центрами сусідніх комірок – 20 нм. Розміри всієї конструкції складають $1250 \text{ нм} \times 820 \text{ нм}$. Існує 6 входів, включаючи два з переносом з попереднього стану та чотири комірки з фіксованою поляризацією.

Результати комп'ютерного моделювання

В середовищі проектування QCADesiner можуть використовуватися два методи моделювання: бістабільний метод і метод когерентних векторів[5]. Для моделювання дворозрядного перемножувача використаний перший метод. В ньому кожна комірка змодельована як проста система з двома станами. В даному методі застосовується апроксимація, що базується на взаємодії між комірками, а саме, сила взаємодії між двома комірками послаблюється обернено відстані між комірками в п'ятій степені.

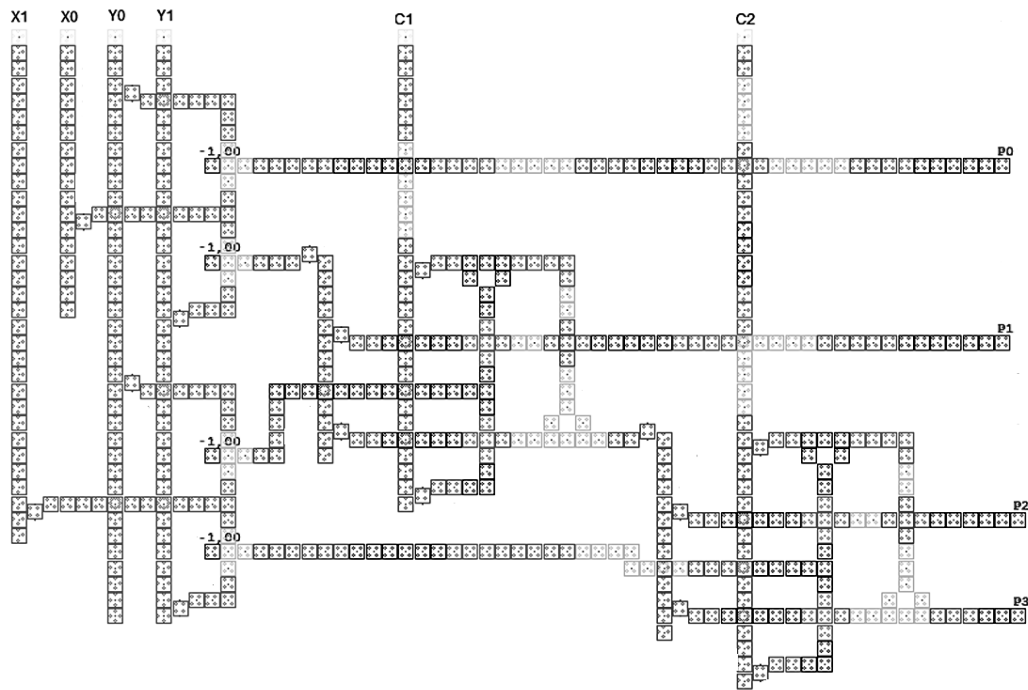


Рис. 7. Модель наносхеми дворозрядного перемножувача

Отже, використовуючи цей механізм, не всі коміркові ефекти враховуються. Тільки ефекти комірок, що знаходяться в так званому радіусі взаємодії R , розглядаються як такі, що впливають на окрему комірку. Беручи це до уваги, було вирішено використовувати багаторівне-

вий перетин провідників, тому що радіус взаємодії недостатній, щоб забезпечити передачу сигналу компланарним перетинанням. Існує певна затримка між вхідним сигналом і появою реакції на виході. Результати комп'ютерного моделювання роботи перемножувача наведені на рис. 8.

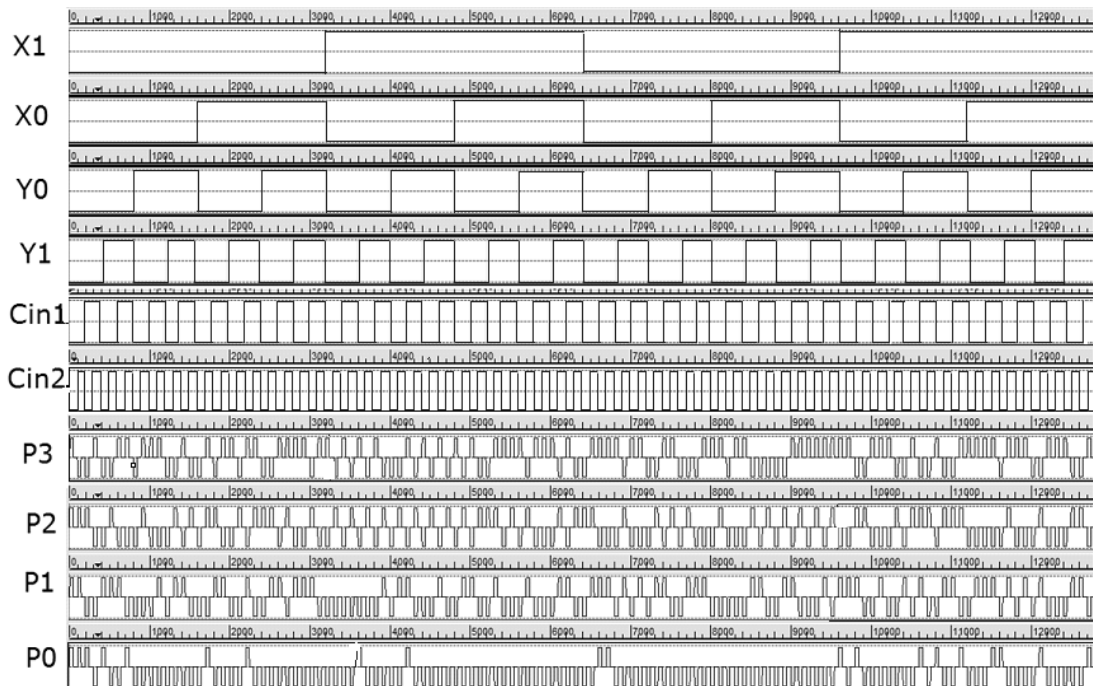


Рис. 8. Моделювання форми сигналів дворозрядного перемножувача

Наприклад, якщо $x_l=0$, $x_0=1$, $y_l=1$, $y_0=0$, $C_{in1}=0$, $C_{in2}=0$, що відповідає часовому проміжку між 2000нс і 2400нс, можна відмітити, що згідно з графіком реакції перемножувача $P_3=0$, $P_2=0$, $P_l=1$, $P_0=0$.

Висновки

Виконане комп'ютерне проектування дворозрядного перемножувача, який складається з чотирьох трьохвходових мажоритарних елементів з одним фіксовано поляризованим входом ($P = -1$) і двох повних суматорів. Використання багаторівневого перетинання провідників дозволяє уникнути проблем компланарного перетину. Моделювання виконане в такий спосіб, що виходи перебувають в останній четвертій тактовій зоні, а це відповідає фазі спокою після фази в якій проводилися останні обчислення. Визначено, що необхідно три повних тактових цикли для завершення операції перемноження. Досягнута мета проектування надійного розшарування наносхеми дворозрядного перемножувача і підвищення його експлуатаційної надійності, але наявність недоліків і дефектів, пов'язаних з молекулярною технологією виготовлення квантових коміркових автоматів, потребує подальшої роботи в цьому напрямку.

Список літератури

1. *Tougaw, P.D., Lent C.S* .Logic devices implemented using quantum cellular automata / Tougaw, P.D., Lent C.S //J. Appl. Phys., American Institute of Physics. – 1994.
2. *Пакулов Н.Н.* Мажоритарный принцип построения надежных узлов и устройств ЦВМ / Пакулов Н.Н. – М.: Сов. радио – 1974.
3. *Bhanja, S., Ottavi, M., Lombardi, F., Pontarelli. S.* OCA circuit for robust coplanar crossing. / Bhanja, S., Ottavi, M., Lombardi, F., Pontarelli. S. // Journal of Electronic Testing. – 2007, -P. 193-210.
4. *Мельник О.С.* Автоматизоване моделювання наносхем на квантових коміркових автоматах / О.С. Мельник, В.В. Івахнюк // Електроніки та систем управління. – 2010, - №2, – с. 81-84.
5. *Walus, K.* QCADesiner: A CAD Tool for an Emerging Nano-Technology / Walus, K. // Micronet Annual Workshop – 2003.

Статтю подано до редакції 29.08.2014