

**О.С. МЕЛЬНИК**, канд. техн. наук, доц., НАУ, Київ;

**В.О. КОЗАРЕВИЧ**, асистент, НАУ, Київ;

**Р.І. ПИЛИПЕНКО**, студент, НАУ, Київ

## **КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ АРИФМЕТИЧНИХ НАНОПРИСТРОЇВ**

Квантові коміркові автомати – нанотехнологія, що виникла відносно нещодавно, в якій значення логічних станів відповідають не рівням напруги, як в мікропристроях, а позиціям окремих електронів. Квантові комірки використовуються для конструювання усіх фрагментів наносхем логічних та арифметичних. 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 виконуються моделювання квантових коміркових автоматів з використанням автоматизованої системи проектування QCADesiner.

**Ключові слова:** квантовий комірковий автомат, мажоритарний елемент, квантовий суматор, квантовий помножувач, зона синхронізації, компланарний перетин нанопровідників.

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

Орієнтація пари квантових комірок така, що їхнє взаєморозміщення визначає взаємний вплив. Електронегативна 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 пам'яттю.

**Основи теорії квантових коміркових автоматів.** Прилади на КА складаються з нанорозмірних 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 електронів крізь потенціальні бар'єри. 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 наступає, коли потенціальний бар'єр зменшений, і рухомий електрон може зайняти будь-яку з чотирьох 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 за формулою:

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

де  $\rho_i$  – густина електричного заряду кожної квантової точки комірки.

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

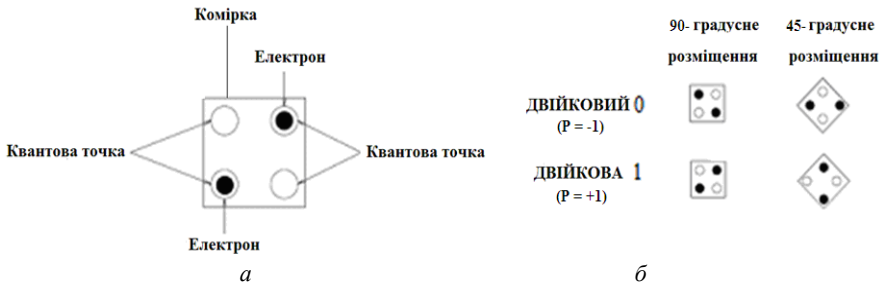


Рис. 1 – Окрема комірка квантового автомата *a*, її два способи розміщення в просторі *б* і поляризації ( $P = \pm 1$ ).

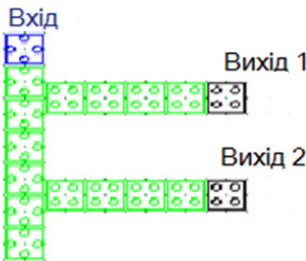


Рис. 2 – Нанопровідник одночасної передачі з входу початкового (Вихід 1) і комплементарного (Вихід 2) сигналів.

**Наноелектронний 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 провідників в залежності від 45-градусної чи 90-градусної орієнтації комірок, але технологічно складно виготовити нанокірку з різною орієнтацією.

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

За допомогою КА можуть бути сконструйовані різні елементи для виконання арифметичних і логічних операцій. Базовими логічними елементами в теорії КА є тривходовий мажоритарний елемент (МЕ) та інвертор (рис. 3).

Вихідна комірка МЕ буде мати поляризацію більшості вхідних комірок. Булевий вираз для мажоритарної функції [2] має вигляд:

$$maj(x_2, x_1, x_0) = x_2 \cdot x_1 \vee x_2 \cdot x_0 \vee x_1 \cdot x_0,$$

де  $x_2, x_1$  і  $x_0$  – входи. Фіксація поляризації одного з входів МЕ як логічний 0

чи логічна 1, дає змогу отримати елементи І чи АБО, відповідно  $maj(x_2, x_1, 0) = x_2 \cdot x_1$  чи  $maj(x_2, x_1, 1) = x_2 \vee x_1$ . Такі комірки можуть бути створені в технологічному процесі, що усуває необхідність підтримувати постійний струм через схему.

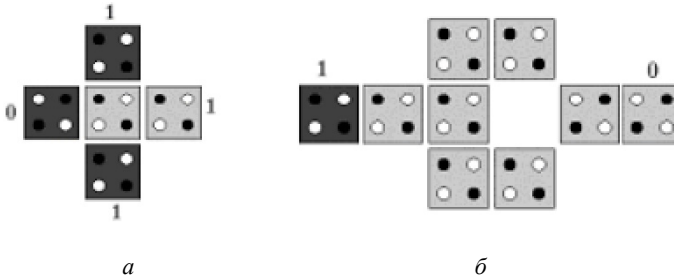


Рис. 3 – Мажоритарний елемент *a* та інвертор *b* на базі квантових автоматів.

**Синхронізація.** Синхронізація відіграє 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 синхрозони зменшується, електрони втрачають стабільність, в результаті чого поляризація комірки не визначається. Зростання потенціального бар'єру зменшує коефіцієнт тунелювання, в результаті чого електрон починає локалізуватися [3]. 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.

Центральні квантові комірки МЕ повинні бути в тактовій зоні відділені від тактових зон вхідних і вихідної комірок, тому мажоритарний елемент розташовується на краях інших тактових зон.

**Повний суматор.** Науковці Харківського університету радіоелектроніки [2] і Університету Нотр Дам [1] першими запропонували наносхему повного суматора. Однобітний повний суматор на КА може бути складений з трьох МЕ і двох інверторів (рис. 4). Вирази для суми  $S$  і переносу цього суматора  $C_{out}$  наступні:

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

де  $x_1, x_0, C_{in}$  – входи;  $C$  і  $C_{out}$  – виходи суматора.

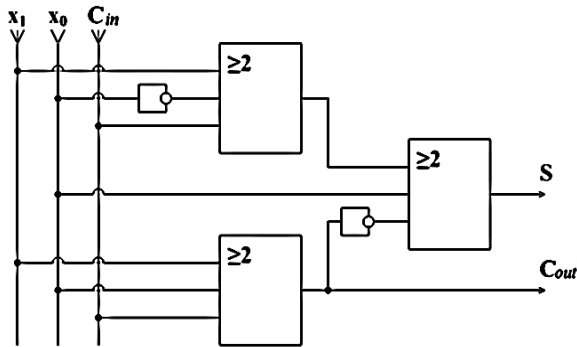


Рис. 4 – Схема однорозрядного суматора на мажоритарних елементах.

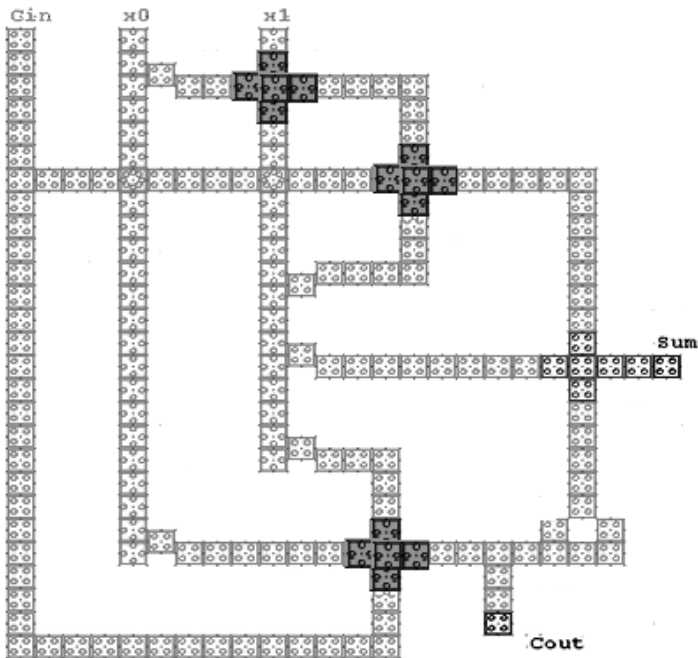


Рис. 5 – Наносхема суматора на квантових коміркових автоматах.

На рис. 5 наведена наносхема на КА однорозрядного суматора на планшетному полі проектування системи QCADesiner [5]. Для конструювання вхідних провідників використані комірки з 45-градусною орієнтацією. Використанням такого способу розміщення комірок створено інвертуючий ланцюг, в якому кожна комірка протилежно поляризована до сусідніх. Якщо провідник з однаково поляризованих комірок перетинає інвертуючий провід-

ник, провідники не взаємодіють між собою, тому можуть працювати незалежно на одному рівні. Такий перетин має назву *компланарний* [3]. Проблемою компланарного перетину є те, що мала 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 градації сірого.

**Помножувач.** Проектування дворозрядного помножувача є складнішим в порівнянні з попередніми вузлами, що пов'язане не лише з використанням більшої кількості логічних елементів, але також з моделюванням помножувача на декількох фізичних рівнях. З цією метою використовується багатошаровий перетин провідників. Традиційний багатошаровий 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.

Дворозрядний помножувач реалізує помноження  $M_3, M_2, M_1, M_0$  дворозрядних бінарних чисел  $x_1x_0$  та  $y_1y_0$ , яке базується на арифметичному додаванні часових добуток розрядів співмножників.

Логічні рівняння в булевому та мажоритарному базисах для дворозрядного помножувача мало вигляд:

$$\begin{aligned} M_0 &= x_0y_0, \\ M_1 &= (x_0y_1)(\overline{x_1y_0}) \vee (\overline{x_0y_1})(x_0y_0) = (x_0y_1) \oplus (x_1y_0), \\ M_2 &= (x_1y_1)(\overline{x_0y_1})(\overline{x_1y_0}) \vee (\overline{x_0y_1})(x_0y_1)(x_1y_0) = (x_1y_1) \oplus ((x_0y_1)(x_1y_0)), \\ M_2 &= (x_1y_1)((x_0y_1)(x_1y_0)), \\ M_0 &= \text{maj}(x_0, y_0, 0), \\ M_1 &= \text{maj}(\text{maj}(\overline{x_1y_0}, (x_0y_1), 0), \text{maj}(\overline{x_1y_0}, \overline{x_0y_1}), 0, 1), \\ M_2 &= \text{maj}(\text{maj}((x_0y_1), (\overline{x_0y_1})(\overline{x_1y_0}), 0), \text{maj}(\overline{x_1y_1}, ((x_0y_1)(x_1y_0)), 0), 1), \\ M_3 &= \text{maj}((x_1y_1), ((x_0y_1)(x_1y_0)), 0), \end{aligned}$$

де  $x_1x_0, y_1y_0$  – вхідні сигнали співмножників і  $M_3, M_2, M_1, M_0$  – відповідні біти вихідного добутку.

Для компонування наносхеми помножувача і моделювання його функціональних можливостей використовується система автоматизованого проектування QCA Designer [4].

Дворозрядний помножувач, спроектований на вищезгаданих принципах, складається з чотирьох мажоритарних елементів з фіксованими входами двох однорозрядних суматорів. Наносхема дворозрядного помножувача представлена на рис. 6.

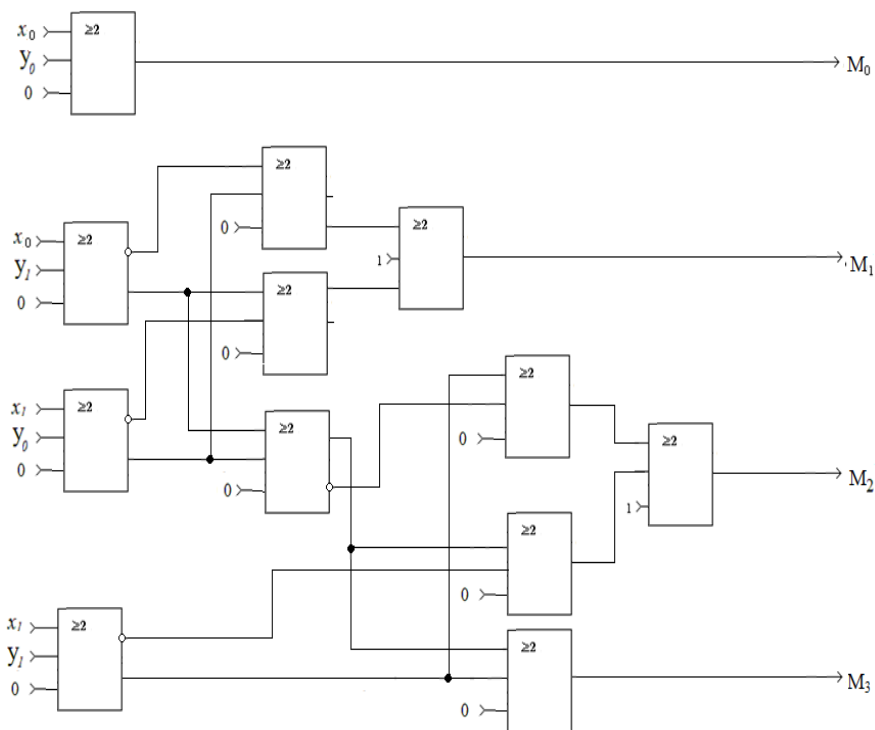


Рис. 6 – Наносхема дворозрядного помножувача.

Комп’ютерна модель цієї наносхеми на КА 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 електро-негативний стан квантових точок комірок керується локальним електричним полем. Швидкодія такого помножувача – 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.

Спроектована таким чином наносхема дворозрядного помножувача базується на 235 квантових комірках, розмір яких  $18 \times 18$  нм, з чотирма квантовими точками, кожна з яких має діаметр 5 нм, відстань між центрами сусідніх комірок – 20 нм. Розміри всієї конструкції складають  $504 \times 522$  нм. Існує 6 входів співмножників, 10 входів з від’ємною поляризацією  $-P = 0$  і 2 входи з позитивною поляризацією  $+P = 1$  та чотири виходи добутку.

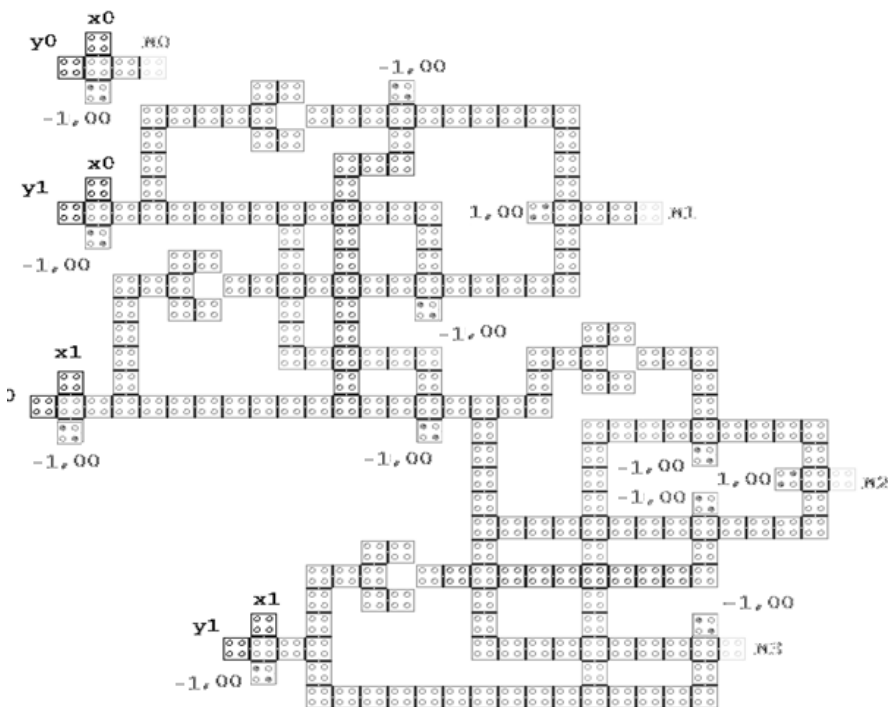


Рис. 7 – Модель наносхеми дворозрядного помножувача.

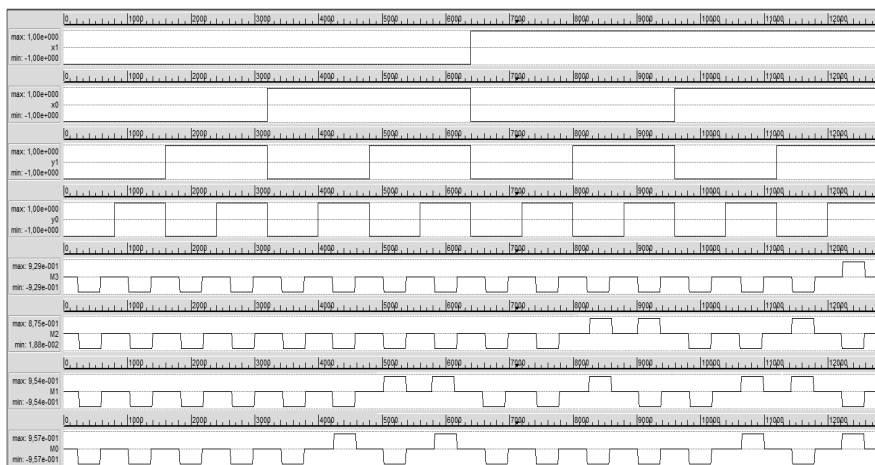


Рис. 8 – Моделювання форми сигналів дворозрядного помножувача.

**Результати комп'ютерного моделювання.** В середовищі проектування QCA Designer можуть використовуватися два методи моделювання: *бістабіль-*

ний метод і метод когерентних векторів [4]. Для моделювання дворозрядного помножувача використаний перший метод. В ньому кожна комірка змодельована як система з двома станами. В даному методі застосовується апроксимація, що базується на електронегативній взаємодії між комірками, а саме, сила взаємодії між двома комірками послаблюється обернено відстані між комірками в п'ятому ступені.

Таблиця 1 – Таблиця істинності

№	$x_1$	$x_0$	$y_1$	$y_0$	$M_3$	$M_2$	$M_1$	$M_0$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	1
6	0	1	1	0	0	0	1	0
7	0	1	1	1	0	0	1	1
8	1	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	0	1	0	0
11	1	0	1	1	0	1	1	0
12	1	1	0	0	0	0	0	0
13	1	1	0	1	0	0	1	1
14	1	1	1	0	0	1	1	0
15	1	1	1	1	1	0	0	1

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 багаторівневий 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 дворозрядного помножувача наведені на рис. 8.

Наприклад, якщо  $x_1 = 0$ ,  $x_0 = 1$ ,  $y_1 = 1$ ,  $y_0 = 0$ , на часовому проміжку між 5000 пс і 5300 пс, то можна відмітити, що згідно з графіками реакції помножувача  $M_3 = 0$ ,  $M_2 = 0$ ,  $M_1 = 1$ ,  $M_0 = 0$  відповідає шостому варіанту таблиці істинності (табл. 1).

**Висновки.** Виконане комп'ютерне проектування дворозрядного помножувача, який складається з чотирьох тривходових мажоритарних елементів і двох повних суматорів. Використання багаторівневого перетинання провідників дозволяє уникнути проблем компланарного перетинання. Моделювання виконане в такий спосіб, що виходи перебувають в останній четвертій тактій зоні, а це відповідає фазі спокою після фази, в якій проводились останні обчислення. Визначено, що необхідно три повних тактових цикли



для завершення операції перемноження. Досягнута мета проектування надійного розшарування наносхеми дворозрядного помножувача 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 // J. Appl. Phys., American Institute of Physics. – 1994.* 2. *Пакулов Н.И. Мажоритарный принцип построения надежных узлов и устройств ЦВМ. – М.: Сов. Радио. – 1974. – 194 с.* 3. *Melnyk O.S., Tsapok L.O. Computer simulation of nanoelectronic-logic devices // Electronic and Control Systems. – 2012. – № 1 (31). – pp. 65 – 71.*

**Bibliography (transliterated):** 1. *Tougaw, P. D., and C. S. Lent. Logic devices implemented using quantum cellular automata. J. Appl. Phys., American Institute of Physics. 1994. Print.* 2. *Pakulov, N. I. Mazhoritarnyj princip postroenija nadezhnyh uzlov i ustrojstv CVM. Moscow: Sov. Radio. 1974. Print.* 3. *Melnyk, O. S., and L. O. Tsapok. "Computer simulation of nanoelectronic-logic devices." Electronic and Control Systems. 2012. No. 1 (31). 65–71. Print.*

*Надійшла (received) 22.10.2014*

УДК 629.083:621-113

**В.І. НАЗАРОВ**, провідний інженер ПАТ «ЗАЗ», Запоріжжя;  
**О.І. НАЗАРОВ**, канд. техн. наук, доцент ХНАДУ, Харків;  
**І.О. НАЗАРОВ**, аспірант, ХНАДУ, Харків

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ РЕАКЦІЙ НА ОСЯХ ПІД ЧАС ЕКСТРЕНОГО ГАЛЬМУВАННЯ НА ДОРОЗІ З НАХИЛОМ**

Запропоновано математичну модель зміни осьових вертикальних реакцій під час екстрених гальмувань легкових автомобілів, не обладнаних електронними системами контролю процесу гальмування, на рівній дорозі з подовжнім нахилом та врахуванням аеродинамічних збурювальних факторів. Для конкретних легкових автомобілів розглянуто роботу створеного алгоритму, наведено результати роботи програми та аналіз результатів проведеного обчислювального експерименту. Також розглянуто перспективи подальших досліджень для забезпечення безпеки дорожнього руху.

**Ключові слова:** легковий автомобіль, умови експлуатації, збурювальний фактор, екстрене гальмування, вертикальна реакція.

**Вступ.** Велика частина легкових автомобілів, які експлуатуються на дорогах України, мають гальмівні системи, не обладнані електронними системами контролю процесу гальмування (антиблокувальними системами).

На деяких моделях легкових автомобілів були встановлені заводом-виготівником регулятори гальмівних сил, що мають механічний зв'язок з піввіскою, але за певний період експлуатації вони через знос, як правило, або