

**О.С. МЕЛЬНИК**, канд. техн. наук, доц., НАУ, Київ;  
**Н.В. ТРОХИМЕНКО**, асистент, НАУ, Київ;  
**А.О. СОБЧЕНКО**, студент, НАУ, Київ;

## НАНОПРИСТРОЇ З ПРОГРАМОВАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Реалізовано автоматизоване проектування наноелектронних схем з програмованими характеристиками на квантових мажоритарних компонентах. Запропоновані методи побудови арифметико-логічних обчислювальних пристроїв комбінаційного та послідовностного типів, які реалізують практично повну систему логічних функцій як в мажоритарному, так і в булевому базисах.

**Ключові слова:** квантові автомати, мажоритарний елемент, наносхеми з програмованими характеристиками (НСПХ).

**Вступ.** Усунути протиріччя між універсальністю і специфічністю функцій можна шляхом розробки наносхем з програмованими характеристиками (НСПХ), алгоритми роботи яких можуть бути змінені на вимогу розробника конкретної обчислювальної апаратури [1]. Одна програмована наносхема замінює від 30 до 150 інтегральних схем середнього ступеню інтеграції.

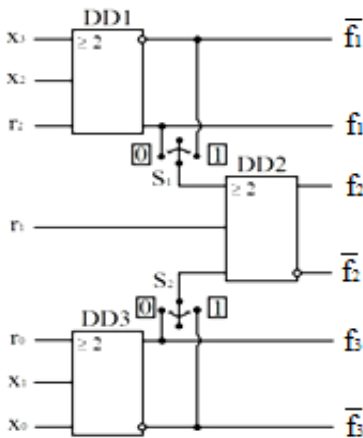


Рис. 1 – Структурна схема універсальної НСПХ.

подаються інформаційні ( $x_3, x_2, x_1, x_0$ ) і програмуючі ( $r_2, r_1, r_0$ ) сигнали [2].

За допомогою НСПХ такого типу можна реалізувати всі 16 і 256 функцій двох і 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 НСПХ являється те, що можна змінити по програмі її логічні можливості і зв'язки, що дозволяє використовувати її для побудови мажоритарних адаптивних систем. В табл. 1

**Основний матеріал.** Для реалізації адаптивних систем, необхідно мати можливість програмно змінювати їх технічні характеристики в процесі чи перед початком роботи. З точки зору здешевлення виробництва наноелектронних систем і підвищення надійності їх роботи доцільно виконувати їх на одному типі коміроч з однаковою конфігурацією з'єднань між комірками.

В якості такої комірки для побудови мажоритарних адаптивних систем можна використовувати НСПХ, які складаються з трьох універсальних мажоритарних елементів (УМЕ), відповідним чином з'єднаних між собою (рис. 1). На входи НСПХ

наведені найбільш важливі функції в мажоритарному базисі, які реалізуються на базі НСПХ.

Таблиця 1 – Приклади найбільш важливих функцій, які можна реалізувати на наносхемах з запрограмованими характеристиками

№	$r_2$	$r_1$	$r_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Число вих. функцій
1	0	0	0	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, x_1 x_0, 0)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
2	0	0	1	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, x_1 \vee x_0, 0)$	$maj(x_1, x_0, 1)$	24
3	0	1	0	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, x_1 x_0, 1)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
4	0	1	1	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, x_1 \vee x_0, 1)$	$maj(x_1, x_0, 1)$	24
5	1	0	0	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 x_0, 0)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
6	1	0	1	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 0)$	$maj(x_1, x_0, 1)$	24
7	1	1	0	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 x_0, 1)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	24
8	1	1	1	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 1)$	$maj(x_1, x_0, 1)$	24
9	0	0	$x_4$	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, maj(x_1, x_0, x_4), 0)$	$maj(x_1, x_0, x_4)$	44
10	0	$x_4$	0	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, x_1 x_0, x_4)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	40
11	0	$x_4$	$x_5$	$maj(x_3, x_2, 0)$	$maj(x_3 x_2, maj(x_1, x_0, x_5), x_4)$	$maj(x_1, x_0, x_5)$	76
12	$x_4$	0	0	$maj(x_3, x_2, x_4)$	$maj(maj(x_3, x_2, x_4), x_1 x_0, 0)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	44
13	$x_4$	0	$x_5$	$maj(x_3, x_2, x_4)$	$maj(maj(x_3, x_2, x_4), maj(x_1, x_0, x_5), 0)$	$maj(x_1, x_0, x_5)$	48
14	$x_4$	$x_5$	0	$maj(x_3, x_2, x_4)$	$maj(maj(x_3, x_2, x_4), x_1 x_0, x_5)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	76
15	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$maj(x_3, x_2, x_4)$	$maj(maj(x_3, x_2, x_4), maj(x_1, x_0, x_6), x_5)$	$maj(x_1, x_0, x_6)$	80
16	1	$f_2$	0	$maj(x_3, x_2, 1)$	$maj(x_3 \vee x_2, x_1 x_0, f_2)$	$maj(x_1, x_0, 0)$	Тригер з управл. входами
17	$f_1$	0	$f_3$	$maj(x_3, x_2, f_1)$	$maj(maj(x_3, x_2, f_1), maj(x_1, x_0, f_3), 0)$	$maj(x_1, x_0, f_3)$	Два тригери
18	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$maj(x_3, x_2, f_1)$	$maj(maj(x_3, x_2, f_1), maj(x_1, x_0, f_3), f_2)$	$maj(x_1, x_0, f_3)$	Три тригери
19	$f_2$	$f_2$	$\bar{f}_2$	$maj(x_3, x_2, f_2)$	$maj(maj(x_3, x_2, f_2), maj(x_1, x_0, \bar{f}_2), f_2)$	$maj(x_1, x_0, \bar{f}_2)$	Накоп. суматор

НСПХ являється функціонально повним пристроєм, так як до її склад входять функціонально повні УМЕ. Синтез мажоритарних систем на базі НСПХ рекомендується проводити в наступному порядку:

- задані чи отримані булеві функції представляються в мажоритарному базисі;
- проводиться мінімізація отриманої мажоритарної функції;
- в табл. 1 відшукується рядок, еквівалентний мінімальній формі мажоритарної функції;
- складається структурна схема заданої адаптивної системи з врахуванням можливостей НСПХ.

В табл. 1  $x_6, x_5, x_4, x_3, x_2, x_1, x_0$  – це вхідні інформаційні сигнали, представлені або в прямому, або в інверсному кодах;  $r_2, r_1, r_0$  – програмуючі сигнали;  $f_3, f_2, f_1$  – вихідні сигнали.

**Приклади моделювання.** Синтезуємо, наприклад, за допомогою САПР QCA Designer [3] логічну функцію:

$$f_2 = maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 0), \quad (1)$$

якій відповідає мажоритарний еквівалент у шостому рядку табл. 1.

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

$$f_1 = x_3 \vee x_2 = maj(x_3, x_2, 1), \quad (2)$$

$$f_3 = x_1 \vee x_0 = maj(x_1, x_0, 1). \quad (3)$$

**Результати комп'ютерного проектування.** Для програмування функцій (1), (2) та (3) слід в структурній схемі ПНЕХ (рис. 1) ключі  $S_1$  та  $S_2$  перекомутувати в стан 0, а на програмуючих входах встановити поляризації  $+P=1$  для входів  $r_2 = r_0 = 1$ , та  $-P=-1$  для входу  $r_1 = 0$ .

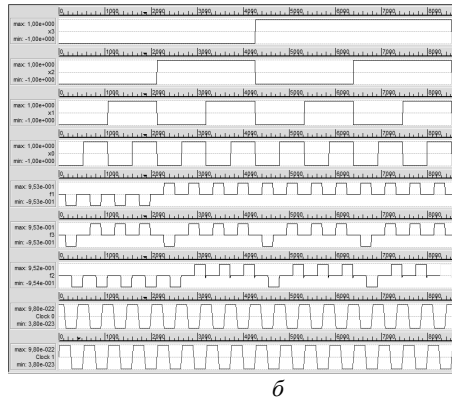
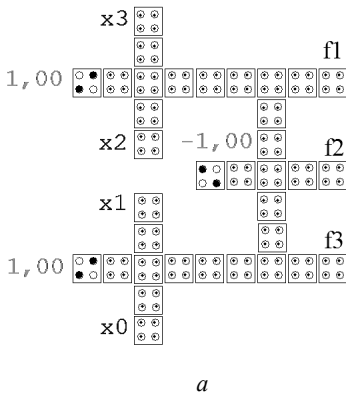


Рис. 2 – Автоматизоване проектування НСПХ комбінаційного типу на квантових автоматах: а – наносхема; б – результати.

На рис. 2, а наведена НСПХ, яка побудована на робочому полі САПР QCA Designer [3]. Вона складається з 37 квантових комірок розміром  $18 \times 18$  нм з 4 квантовими точками діаметром 5 нм і відстанню між центрами 20 нм. Загальний розмір НСПХ ( $198 \times 218$ )  $\text{нм}^2$ . Вона має чотири інформаційні входи  $x_3, x_2, x_1$  та  $x_0$ , три програмуючих входи з поляризаціями  $+P=1$  та  $-P=-1$  і три пари комплементарних виходів  $f_1, f_2$  і  $f_3$ .

Результати комп'ютерного моделювання часових характеристик НСПХ показані на рис. 2, б. Позитивним імпульсам відповідають позитивні поляризації  $+P=1$ , а негативним – від'ємні поляризації  $-P=-1$ . Відповідна табли-

ця істинності НСПХ для цього режиму програмування наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Таблица істинності функцій  $maj(x_3, x_2, 1)$ ,  $maj(x_3 \vee x_2, x_1 \vee x_0, 0)$  та  $maj(x_1, x_0, 1)$

$x_3$	$x_2$	$x_1$	$x_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	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	0	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	0	0
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

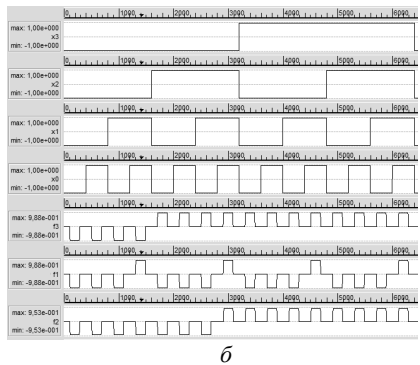
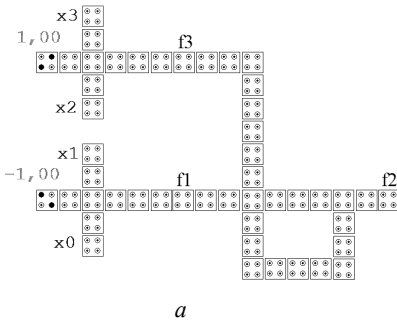


Рис. 3 – Комп’ютерне проектування послідовності НСПХ на КА:  
а – наносхема; б – результати.

За допомогою змін поляризації на входах  $r_2, r_1, r_0$  та перекомутації ключів  $S_1$  та  $S_2$  семивходову НСПХ (рис. 1) можна запрограмувати для отримання 192 логічних функцій дво- та чотиривходових комбінаційних схем.

Далі синтезуємо наприклад, послідовну схему 16-го варіанту з табл. 1 у складі двох мажоритарних елементів з роздільними входами  $x_3, x_2$  і  $x_1, x_0$ . Прямі виходи  $f_1$  і  $f_3$  цих мажоритарних елементів є входами RS-триггера, із зворотнім зв’язком  $f_2$ . На рис. 3, а побудована ця послідовна

наносхема у форматі системи QCA Designer, а результати моделювання її часових характеристик наведені на рис. 3, б. Вона має розмір (350×240) нм<sup>2</sup> і складається з 48 квантових автоматів.

Перевірочна таблиця станів одотригерної НСПХ подана в табл. 3

Таблиця 3 – Таблиця істинності функції  $maj(x_3 \vee x_2, x_1x_0, f_2)$ .

$x_3$	$x_2$	$x_1$	$x_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	1	0
1	0	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	0
1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1

**Висновки.** У найближче десятиріччя напівпровідникові компоненти ВІС досягнуть квантово-термодинамічних обмежень і не зможуть відповідати наростаючим вимогам ефективності обчислювальної техніки. Тому так активно розробляються нові нанотехнології, які б забезпечили суттєво вищу ефективність. Однією з таких розробок є квантові коміркові автомати і створені на їх основі системи з програмованими характеристиками. Як вище доведено, саме такі пристрої забезпечать реалізацію повної системи логічних функцій як для комбінаційних, так і для послідовностних логікоарифметичних пристроїв.

**Список літератури:** 1. Пакулов Н.И., Уханов В.Ф., Чернышов П.Н. Мажоритарный принцип построения надежных узлов и устройств ЦВМ. – М.: Сов. радио, 1974, – 184 с. 2. Melnyk O.S., Todavchych S.V. Synthesis programmable nanoelectronic divaces. // Electronics and Control systems – 2013. – P. 89 – 94. 3. 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.

**Bibliography (transliterated):** 1. Pakulov, N. I., V. F. Uhanov and P. N. Chernyshov. // *Mazhoritarnyj princip postroenija nadezhnyh uzlov i ustrojstv CVM*. Moscow: Sov. radio, 1974, Print. 2. Melnyk, O. S., and S.V. Todavchych. "Synthesis programmable nanoelectronic divaces." *Electronics and Control systems*. 2013. 89–94. Print. 3. Walus, K. "QCA Designer: A Rapid Design and Simulation Tool for QCA." *Internet journal of Nanotech. and Appl.* Vol. 2. No. 1. 2005. 1–7. Print.

Надійшла (received) 25.12.2014