

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.

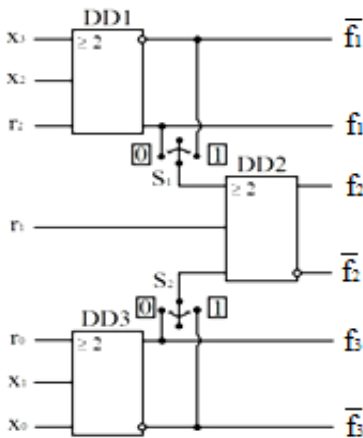


Рис. 1 – Структурна схема універсальної НСПХ.

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 комірок з однаковою конфігурацією з'єднань між комітками.

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 програмованими 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 переконуувати в стан 0, а на програмуючих входах встановити поляризації $+P=1$ для входів $r_2 = r_0 = 1$, та $-P=-1$ для входу $r_1 = 0$.

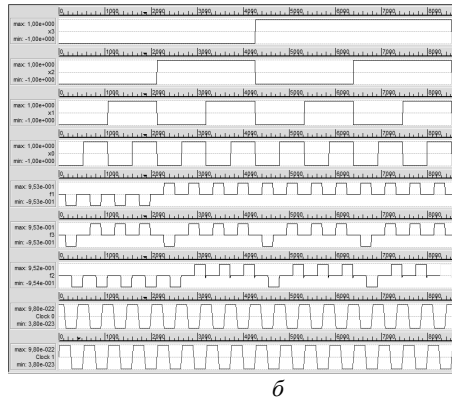
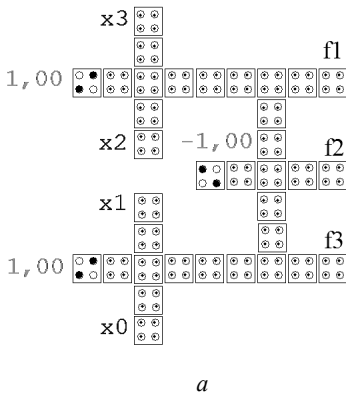


Рис. 2 – Автоматизоване проектування НСПХ комбінаційного типу на квантових автоматах: а – наносхема; б – результати.

На рис. 2, а наведена НСПХ, яка побудована на робочому полі САПР QCA Designer [3]. Вона складається з 37 квантових комірок розміром 18×18 нм з 4 квантовими точками діаметром 5 нм і відстанню між центрами 20 нм. Загальний розмір НСПХ (198×218) нм². 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

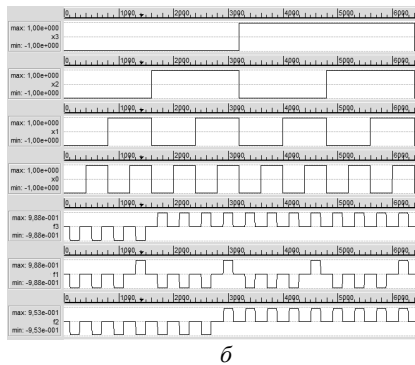
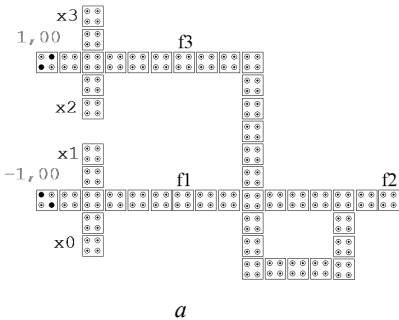


Рис. 3 – Комп’ютерне проектування послідовності НСПХ на КА:
 а – наносхема; б – результати.

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 розділними 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) нм² 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