УДК 681.325.59

Я.М.Клятченко, О.В. Тарасенко-Клятченко, В.П.Тарасенко, О.К.Тесленко
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

ДОСТОВІРНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛОГІЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ДІЇ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ВХІДНИХ СПОТВОРЕНЬ

Проведено дослідження методики визначення достовірності функціонування логічних мереж, які реалізують багаторозрядні булеві функції шляхом суперпозиції функцій меншої розрядності.

Вступ. Вирішення проблем забезпечення надійного функціонування комп'ютерних засобів безпосередньо пов'язане з оцінкою (перевіркою) достовірності функціонування апаратних та програмних засобів. Достовірність функціонування комп'ютерних засобів взагалі – це їх властивість, що визначає безпомилковість виконуваних ними перетворень інформації та характеризується закономірностями появи помилок внаслідок випадкових збоїв. Поки що не існує загальної математико-модельної основи, яка дозволяла б забезпечити аналіз достовірності функціонування будь-яких комп'ютерних засобів. Тому задачі визначення достовірності функціонування програмних і апаратних засобів доцільно вирішувати для окремих їх класів.

В комп'ютерних системах досить широкий клас їх апаратних засобів складають логічні мережі (ЛМ), практичне застосування яких значно розширилось завдяки розвитку технології ПЛІС, зокрема ПЛІС FPGA. Кількісною оцінкою достовірності роботи ЛМ служить ймовірність отримання правильного результату (ймовірність правильної роботи) або ймовірність помилки. Традиційний аналіз достовірності функціонування апаратних засобів базується на припущеннях, що ця їх якість залежить тільки від помилок, викликаних відмовами та збоями апаратних засобів (включаючи засоби контролю), перехідних процесів при перемиканні структурних елементів або завад (наприклад, по колах живлення).

В той же час в роботах [1-4] досліджувались латентні можливості булевих функцій по виправленню детермінованих спотворень вхідних даних – явище автокорекції. Детермінованість спотворень означає, що результат дії конкретного спотворення, наприклад, на нульове значення сигналу, залежить виключно від чинників спотворення. Тому нульове значення сигналу може бути спотворено конкретним типом спотворення лише виключно в нульове або виключно в одиничне значення. Аналогічно для спотворення одиничних сигналів. Наприклад, в роботі цифрових пристроїв найчастіше зустрічаються наступні спотворення – «константа 0», «константа 1» та «інверсія», які є детермінованими. В [5] показані можливості суттєвого підвищення оцінок достовірності роботи логічних функціональних перетворювачів інформації в умовах дії детермінованих вхідних спотворень завдяки автокоригуючим властивостям булевих функцій.

Постановка задачі дослідження. Визначення абсолютних та відносних оцінок автокоригуючих властивостей має, згідно з [5], трудомісткість, яка пропорційна експоненті від кількості змінних булевої функції. Широке впровадження в комп'ютерні засоби 32-розрядних, а в перспективі – 64 – розрядних платформ обмежує безпосереднє практичне застосування існуючих результатів операціями порозрядної логіки. В загальному ж випадку функціонування ЛМ описується системами булевих функцій від будь-якої заданої кількості вхідних змінних, реалізованих шляхом суперпозиції булевих функцій з обмеженою кількістю змінних (наприклад, в сучасних ПЛІС FPGA до 6 змінних). Тому виникає теоретично та практично важлива задача подальшого розвитку аналізу достовірності функціонування ЛМ з в врахуванням їх структури.

Основна частина. Позначимо x_i – розряди n-розрядного операнда X; $p^0{}_i$ = (p(x_i=0), $p^1{}_i$ = (p(x_i=1) - ймовірності значень $x_i=0$ та $x_i=1$. Очевидно, що

$$p^0{}_i + p^1{}_i = 1, \tag{1}$$

тоді

$$\prod_{i=1,2\dots,n}(p_i^0 + p_i^1) = 1 = \sum_{j=0}^{2^n-1} p_1^{a_1} p_2^{a_2} \dots p_n^{a_n}, \tag{2}$$

де $a_1, a_2, \dots, a_n$ – розрядні значення n-розрядного двійкового подання числа j. Позначимо також A_j = =< $a_1, a_2, \dots, a_n$> кортеж (впорядковану послідовність) значень булевих змінних x_1., x_2 ,…,x_n , $\boldsymbol{A}$ –

множина кортежів A_j (j=0,1,…,2^n-1), $p(A_j)$ – ймовірність кортежу A_j. Із (2) випливає можливість визначення ймовірностей кортежів при заданих ймовірностях одиничних та нульових значень сигналів. За відомих значень ймовірностей кортежів легко визначається ймовірність нульового та одиничного значення функції

$$p_f^0 = \sum_{\text{по всіх кортежах, де f=0}} P(A_j), \qquad p_f^1 = \sum_{\text{по всіх кортежах, де f=1}} P(A_j) \tag{3}$$

В багатьох практичних випадках визначають ймовірності не розрядів операндів, а значень операндів. Але

$$p_i^0 = \sum_{\text{по всіх кортежах, де } a_i=0} p_1^{a_1} p_2^{a_2} \cdot\cdot p_i^0 \cdot p_n^{a_n}, \qquad p_i^1 = \sum_{\text{по всіх кортежах, де } a_i=1} p_1^{a_1} p_2^{a_2} \cdot\cdot p_i^1 \cdot p_n^{a_n} \tag{4}$$

Нехай в загальному випадку на i-й розряд операнда діють b детермінованих спотворень. Тоді $g_{0i}+g_{1i}+\ldots+g_{bi} = 1$, де g_{0i} – ймовірність відсутності будь яких спотворень, g_{li} - $(l=1,2,\ldots,b)$ – ймовірність спотворення типу l . Очевидно, що

$$g_{0i}+g_{1i}+\ldots+g_{bi} = g_{0i}\,(p^0{}_i + p^1{}_i)+g_{1i}(p^0{}_i + p^1{}_i)+\ldots+g_{bi}\,(p^0{}_i + p^1{}_i) =$$
$$= g_{0i}p^0{}_i +(g_{1i}p^0{}_i + g_{bi}p^0{}_i)+g_{0i}p^1{}_i + (g_{1i}p^1{}_i +\ldots + g_{bi}p^1{}_i) \tag{5}$$

Тут $g_{0i}p^0{}_i$ та $g_{0i}p^1{}_i$ – ймовірності відсутності спотворень нульового та одиничного значення розрядів операнда. Детермінованість спотворень дає можливість подати (5) в наступному вигляді

$$g_{0i}+g_{1i}+\ldots+g_{bi} = (g_{0i}p^0{}_i + g_{ci}{}^0p^0{}_i + g_{ei}{}^0p^1{}_i)+ (g_{0i}p^1{}_i + g_{ci}{}^1p^1{}_i + g_{ei}{}^1p^0{}_i) = p^0{}_{gi} + p^1{}_{gi} \tag{6}$$

де $g_{ci}{}^0$ – сума ймовірностей детермінованих спотворень, при яких нульове значення не змінюється (вхідна автокорекція); $g_{ei}{}^0$ - сума ймовірностей детермінованих спотворень, при яких одиничне значення змінюється на нульове; $g_{ci}{}^1$ - сума ймовірностей детермінованих спотворень, при яких одиничне значення не змінюється (вхідна автокорекція); $g_{ei}{}^1$ сума ймовірностей детермінованих спотворень, при яких нульове значення змінюється на одиничне; $p^0{}_{gi}$, $p^1{}_{gi}$ - ймовірності 0 та 1 в результаті спотворень.

Із (6) випливає, що кожна з ймовірностей $p^0{}_{gi}$ та $p^1{}_{gi}$ складається із 3 компонент – ймовірності, при відсутності спотворень, ймовірності вхідної автокорекції та ймовірності вхідного хибного значення.

Розглянемо довільний кортеж $A_j \in \boldsymbol{A}$, (j=0,1,…,2^n-1), який одержано в результаті дії спотворень. В випадку незалежності ймовірностей результатів дії спотворень на кожний розряд можна записати

$$p(A_j) = \prod_{i=1}^{n} (g_{0i}p_i^{a_{ij}} + g_{ci}^{a_{ij}}p_i^{a_{ij}} + g_{ei}^{a_{ij}}p_i^{\text{not } a_{ij}}) \tag{8}$$

Розкриваючи в (8) дужки одержимо суму 3^n добутків, які можна розділити на наступні класи: клас K_{j0}, який містить лише один добуток, коли спотворення відсутні; клас K_{jc}, який містить добутки, де хибні значення відсутні, а вхідна автокорекція використовується принаймні в одному розряді; клас K_{je} , який містить добутки, де принаймні в одному розряді під дією спотворень одержано хибне значення.

Необхідно зауважити, що результати формування класів повністю не залежить від булевої функції.

Розглянемо ймовірності значень булевої функції на кортежі A_j. Нехай, наприклад, $f(A_j)=0$. Позначимо G^0_{j0} – ймовірність нульового значення булевої функції на кортежі A_j при відсутності спотворень. Очевидно, що значення G^0_{j0} дорівнює значенню елемента класу K_{j0}. Позначимо G^0_{jc} - ймовірність нульового значення булевої функції на кортежі A_j при вхідних автокорекціях. Очевидно, що значення G^0_{jc} дорівнює сумі значень елементів класу K_{jc}. Обробка елементів класу K_{je} значно складніша, і може бути виконана, наприклад, по наступному Алгоритму.

1. Встановити E_1=0, E_2=0.
2. Взяти черговий елемент із класу K_{je} .
3. Шляхом інверсії розрядів кортежу A_j , де згідно з вибраним елементом є хибні значення, створити кортеж B .
4. Якщо f(B)=0, то значення вибраного елемента додати до E_1 , інакше до E_2 .
5. Якщо не всі елементи класу K_{je} переглянуто, то перейти до п.2.
6. Кінець.

Очевидно, що значення E_1 репрезентує ймовірність автокорекції при спотворенні відповідних кортежів в кортеж A_j . В свою чергу значення E_2 репрезентує ймовірність хибних значень функції при спотворенні відповідних кортежів в кортеж A_j . При цьому забезпечується повнота аналізу можливих спотворень.

Значення E_1 додається до G^0_{jc} , а значення E_2 позначимо як G^0_{je} – ймовірність хибних значень функції при спотворенні відповідних кортежів в кортеж A_j . У відповідності до (3), маємо

$$G^0_0 = \sum_{\text{по всіх кортежах, де } f=0} G^0_{j0} \;, \quad G^0_c = \sum_{\text{по всіх кортежах, де } f=0} G^0_{jc} \;, G^0_e = \sum_{\text{по всіх кортежах, де } f=0} G^0_{je} \qquad (9)$$

Аналогічно можуть бути одержані значення G^1_0 – ймовірність одиничного значення булевої функції при відсутності спотворень, G^1_c – ймовірність правильного одиничного значення при наявності спотворень (повна автокорекція), G^1_e – ймовірність хибного одиничного значення при наявності спотворень. В результаті маємо $p^0_f = G^0_0 + G^0_c + G^0_e$ та $p^1_f = G^1_0 + G^1_c + G^1_e$, або

$$p^0_f + p^1_f = G^0_0 + G^0_c + G^0_e + G^1_0 + G^1_c + G^1_e \qquad (10)$$

що згідно з (6) відповідає системі ймовірностей вхідних змінних.

Отже системи ймовірностей (6) та (10) забезпечують можливість розрахунків достовірності функціонування ЛМ, що являє собою суперпозицію булевих функцій. При цьому обсяг обчислень пропорційний експоненті від кількості змінних кожної з булевих функцій в логічній мережі та кількості булевих функцій в логічній мережі.

В свою чергу доданки в (10) для вихідних булевих функцій логічної мережі можна згрупувати наступним чином

$$(G^0_0 + G^1_0) + (G^0_c + G^1_c) + (G^0_e + G^1_e) = G_0 + G_c + G, \qquad (11)$$

де $G_0 = (G^0_0 + G^1_0)$ – ймовірність результату без спотворень вхідних даних; $G_c = (G^0_c + G^1_c)$ – ймовірність правильного значення при наявності спотворень (явище автокорекції); $G_e = (G^0_e + G^1_e)$ - ймовірність хибного значення при наявності спотворень. Тоді достовірність для булевої функції можна оцінювати сумою $G_0 + G_c$.

Значення із (11) можуть бути використані для формування кількісних оцінок достовірності булевих функції, наприклад, як сума $G_0 + G_c$.

Експериментальні дослідження. На основі одержаних результатів розроблений програмний інструмент для обчислення значень достовірності функціонування ЛМ, які реалізують багаторозрядні булеві функції як суперпозицію функцій меншої розрядності. В табл.1 наведені ймовірності значень 0 та 1 для 9-ти змінних $x_1 ,\dots, x_9$, а також ймовірностей можливих спотворень значень цих змінних – «константа 0», «константа 1» та «інверсія», одержаних за допомогою генератора псевдовипадкових чисел.

Таблиця 1**.**

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
p^0	0,9333	0,5	0,1176	0,6957	0,6	0,6087	0,2727	0,8889	0,5
p^1	0,0667	0,5	0,8824	0,3043	0,4	0,3913	0,7273	0,1111	0,5
g_{0i}	0,6195	0,6667	0,7979	0,6446	0,8022	0,7222	0,7368	0,7386	0,6915
$g_{1i}(const0)$	0,0973	0	0,1489	0,124	0,0549	0,1889	0,2	0,0341	0,0319
$g_{2i}(const1)$	0,1681	0,1414	0,0319	0,0909	0,011	0,0333	0,0316	0,125	0,1277
$g_{3i}(inv)$	0,115	0,1919	0,0213	0,1405	0,1319	0,0556	0,0316	0,1023	0,1489
g^0_{0i}	0,5782	0,3333	0,0939	0,4484	0,4813	0,4396	0,201	0,6566	0,3457
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
g^0_{ci}	0,0909	0	0,0175	0,0862	0,033	0,115	0,0545	0,0303	0,016
g^0_{ei}	0,2643	0,1667	0,0063	0,161	0,0857	0,0541	0,0172	0,202	0,1383
g^1_{0i}	0,0413	0,3333	0,704	0,1962	0,3209	0,2826	0,5359	0,0821	0,3457
g^1_{ci}	0,0112	0,0707	0,0282	0,0277	0,0044	0,013	0,023	0,0139	0,0638
g^1_{ei}	0,0142	0,096	0,1502	0,0805	0,0747	0,0957	0,1684	0,0152	0,0904

За цими даними розраховані ймовірності $g^0_{0i}, g^0_{ci}, g^0_{ei}, g^1_{0i}, g^1_{ci}, g^1_{ei}$. , значення яких не залежать від булевої функції. Для наочності як булева функція вибрана функція «Або», що реалізована суперпозицією $f_3(x_9,x_8,x_7,x_6,x_5,x_4,x_3,x_2,x_1)= f_2(x_9,x_8,x_7,x_6,f_1(x_5,x_4,x_3,x_2,x_1))$.

Результат для функції f_3 – «Або» від 9 змінних без врахування суперпозиції: G^0_0=0,0001, G^0_c=0,0002, G^0_e=0,0015, G^1_0=0,0462 G^1_c=0,9499, G^1_e=0,0022, G_0=0,0463, G_c=0,95, G_e=0,0036.

Результат для функції f_1 – «Або» від 5 змінних: G^0_0=0,0039, G^0_c=0,0029, G^0_e=0,0161, G^1_0=0,1665 G^1_c=0,7896, G^1_e=0,021, G_0=0,1704, G_c=0,7926, G_e=0,0371.

Результат для функції f_2 – «Або» від 5 змінних: G^0_0=0,0001, G^0_c=0,0002, G^0_e=0,0015, G^1_0=0,0462 G^1_c=0,9499, G^1_e=0,0022, G_0=0,0463, G_c=0,95, G_e=0,0036.

На практиці найчастіше виникають спотворення одного керуючого чи інформаційного сигналу, які називають однократними спотвореннями. Були виконані обчислення для випадку однократних спотворень

окремо по змінній x_2 та окремо по змінній x_7 при рівноймовірних значеннях 0 та 1 по всіх змінних і наступних ймовірностях спотворень: «константа 0»- 0,0973, «константа 1» - 0,1681, «інверсія» - 0,115.

Таблиця 2.

Розряд		G^0_0	G^0_c	G^0_e	G^1_0	G^1_c	G^1_e	G_0	G_c	G_e
Перенос	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Сума	0	0,33486	0,06881	0,09633	0,33486	0,06881	0,09633	0,66972	0,13761	0,19266
Перенос	1	0,50229	0,20183	0,04587	0,16743	0,03211	0,05046	0,66972	0,28211	0,04817
Сума	1	0,33486	0,11697	0,04817	0,33486	0,11697	0,04817	0,66972	0,23394	0,09633
Перенос	2	0,41858	0,18349	0,02294	0,25115	0,09862	0,02523	0,66972	0,30619	0,02408
Сума	2	0,33486	0,14106	0,02408	0,33486	0,14106	0,02408	0,66972	0,28211	0,04817
Перенос	3	0,37672	0,17431	0,01147	0,293	0,13188	0,01261	0,66972	0,31823	0,01204
Сума	3	0,33486	0,1531	0,01204	0,33486	0,1531	0,01204	0,66972	0,30619	0,02408
Перенос	4	0,35579	0,16972	0,00573	0,31393	0,14851	0,00631	0,66972	0,32425	0,00602
Сума	4	0,33486	0,15912	0,00602	0,33486	0,15912	0,00602	0,66972	0,31823	0,01204
Перенос	5	0,34533	0,16743	0,00287	0,3244	0,15682	0,00315	0,66972	0,32726	0,00301
Сума	5	0,33486	0,16213	0,00301	0,33486	0,16213	0,00301	0,66972	0,32425	0,00602
Перенос	6	0,34009	0,16628	0,00143	0,32963	0,16098	0,00158	0,66972	0,32877	0,00151
Сума	6	0,33486	0,16363	0,00151	0,33486	0,16363	0,00151	0,66972	0,32726	0,00301
Перенос	7	0,33748	0,16571	0,00072	0,33225	0,16306	0,00079	0,66972	0,32952	0,00075
Сума	7	0,33486	0,16439	0,00075	0,33486	0,16439	0,00075	0,66972	0,32877	0,00151
Перенос	8	0,33617	0,16542	0,00036	0,33355	0,1641	0,00039	0,66972	0,3299	0,00038
Сума	8	0,33486	0,16476	0,00038	0,33486	0,16476	0,00038	0,66972	0,32952	0,00075
Перенос	9	0,33552	0,16528	0,00018	0,33421	0,16462	0,0002	0,66972	0,33009	0,00019
Сума	9	0,33486	0,16495	0,00019	0,33486	0,16495	0,00019	0,66972	0,3299	0,00038
Перенос	10	0,33519	0,16521	0,00009	0,33454	0,16488	0,0001	0,66972	0,33018	0,00009
Сума	10	0,33486	0,16504	0,00009	0,33486	0,16504	0,00009	0,66972	0,33009	0,00019
Перенос	11	0,33503	0,16517	0,00004	0,3347	0,16501	0,00005	0,66972	0,33023	0,00005
Сума	11	0,33486	0,16509	0,00005	0,33486	0,16509	0,00005	0,66972	0,33018	0,00009
Перенос	12	0,33494	0,16516	0,00002	0,33478	0,16507	0,00002	0,66972	0,33025	0,00002
Сума	12	0,33486	0,16511	0,00002	0,33486	0,16511	0,00002	0,66972	0,33023	0,00005
Перенос	13	0,3349	0,16515	0,00001	0,33482	0,16511	0,00001	0,66972	0,33026	0,00001
Сума	13	0,33486	0,16513	0,00001	0,33486	0,16513	0,00001	0,66972	0,33025	0,00002
Перенос	14	0,33488	0,16514	0,00001	0,33484	0,16512	0,00001	0,66972	0,33027	0,00001
Сума	14	0,33486	0,16513	0,00001	0,33486	0,16513	0,00001	0,66972	0,33026	0,00001
Перенос	15	0,33487	0,16514	0	0,33485	0,16513	0	0,66972	0,33027	0
Сума	15	0,33486	0,16513	0	0,33486	0,16513	0	0,66972	0,33027	0,00001
Перенос	16	0,33487	0,16514	0	0,33486	0,16513	0	0,66972	0,33027	0
…	…	…	…	…		…	…	…	…	…
Сума	30	0,33486	0,16514	0	0,33486	0,16514	0	0,66972	0,33028	0
Перенос	31	0,33486	0,16514	0	0,33486	0,16514	0	0,66972	0,33028	0

Сума	31	0,33486	0,16514	0	0,33486	0,16514	0	0,66972	0,33028	0
Перенос	32	0,33486	0,16514	0	0,33486	0,16514	0	0,66972	0,33028	0

У випадку спотворень по змінній x_2 одержані наступні результати.

Для функції f_3 – «Або» від 9 змінних без врахування суперпозиції: G^0_0=0,0012, G^0_c =0,0002, G^0_e =0,0006, G^1_0=0,6183, G^1_c =0,3794, G^1_e =0,0004, G_0=0,61947, G_c =0,37957, G_e =0,00097.

Такі ж результати одержані і при аналогічних спотвореннях по змінній x_7 .

Для функції f_2 результати наступні: G^0_0=0,0194, G^0_c =0,003, G^0_e =0,0088, G^1_0=0,6001, G^1_c =0,362,
G^1_e =0,0066, G_0=0,61947, G_c =0,36505, G_e =0,01549.

Для функції f_2 результати збігаються з результатами для f_3 без врахування суперпозиції.

У випадку спотворень по змінній x_7 , для функції f_3 – «або» від 9 змінних без врахування суперпозиції одержані результати, які збігаються з попередніми.

Для функції f_2 результати наступні: G^0_0=0,0313, G^0_c =0, G^0_e =0, G^1_0=0,9688, G^1_c =0, G^1_e =0, G_0=1,0000 G_c=0,0000 G_e=0,0000.

Для функції f_2 результати збігаються з результатами для f_3 без врахування суперпозиції.

Із проведеного експерименту випливає наступне. По перше, функція «Або» завдяки явищу автокорекції забезпечує достовірність правильного результату навіть в умовах суттєвих спотворень вхідних даних. По друге, параметри достовірності для булевих функцій без врахування суперпозиції та з врахуванням суперпозиції збігаються між собою. Але складність обчислення без врахування суперпозиції, в даному прикладі, в 16 разів перевищує складність обчислень для функцій f_1 та f_2 .

Далі експериментально досліджувалась ЛМ багаторозрядного суматора. ЛМ складається із 32-х однорозрядних суматорів, кожний із яких реалізує дві булеві функції суми – $f_{sumi}(x_i,y_i,c_i) = x_i$ *xor* y_i *xor* c_i та переносу – $c_{i+1} = x_iy_i \vee x_ic_i \vee y_ic_i$, при цьому $p^0_i=p^1_i$ = 0,5, (i=0,1,2,…31), c_0= 0 з ймовірністю 1. Були виконані обчислення для випадку однократних спотворень по змінній x_0 з наступними ймовірностями спотворень: «константа 0»- 0,09411, «константа 1» - 0,01176, «інверсія» - 0,10588. Результат розрахунку наведено в табл.2, де показано відповідні ймовірності для входу переносу та виходу розряду суми для кожного однорозрядного суматора. Із табл.2 випливає наступне. Починаючи з 16 розряду достовірність сигналу переносу практично стовідсоткова і, відповідно, практично така ж достовірність старших розрядів суми. З іншого боку, відомі достовірності значень кожного окремого розряду суматора ще не обумовлюють конкретне значення достовірністі функціонування суматора в цілому. Обчислення відповідних ймовірностей по суматору в цілому може бути виконане шляхом деякої модифікації Алгоритму 1, але об'єм обчислень при цьому буде пропорційним 2^{64} , що практично неможливо виконати. В той же час результати, наведені, в табл.2, завдяки використанню суперпозицій, можна отримати практично миттєво. Нехай, в загальному випадку, в будь-якій ЛМ обчислено достовірність по кожній окремо взятій булевій функції верхньою оцінкою достовірності функціонування ЛМ в цілому. Для суматора в розглянутому прикладі це сума 0,66972+0,13761=0,80733.

Висновки. Запропонована методика та система обчислення ймовірностей вхідних та вихідних значень булевих функцій, що описують ЛМ, дозволяє проводити обчислення достовірності їх функціонування в умовах детермінованих спотворень з врахуванням реальних реалізацій комбінаційних схем шляхом суперпозиції булевих функцій меншої розрядності. При цьому трудомісткість відповідних обчислень значно зменшується.

Експериментально доведена тотожність результатів обчислень без врахування суперпозицій та з врахуванням суперпозицій.

Напрямки подальших досліджень полягають в доведенні теоретичним шляхом збігу параметрів достовірності без врахування суперпозицій булевих функцій та при їх врахуванні. Окрім того, необхідні дослідження спільних параметрів достовірності для булевих функцій, які реалізуються ЛМ, для визначення точних значень достовірності функціонування ЛМ в цілому.

1. Тарасенко В.П., Тарасенко-Клятченко О.В. Метод оценки автокорректирующих свойств поразрядных логических операций // Радиоэлектроника и информатика. – 2001. - № 1 (14). – С. 83-86.

2. Михайлюк А.Ю., Тарасенко-Клятченко О.В. Автокоригуючі властивості логічних операцій // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2000. - № 7. - С. 196-198.
3. Тарасенко-Клятченко О.В. Сравнительный анализ корректирующих свойств переключательных функций // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2002. - № 5. - С. 189-194.
4. Tarasenko-Klyatchenko O.V. The Comparative Analysis of Correcting Properties of Switching Functions // Proceedings of the 7-th International Conference "The experience of designing and application of CAD Systems in Microelectronics".– 2003. - P. 232-234.
5. Тарасенко-Клятченко О.В. Автокоригуючі властивості та достовірність роботи логічних функціональних перетворювачів інформації. // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ, 2004.