

В. А. ЛУКАШЕНКО

кандидат технічних наук,
науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-9685-4654

Д. А. ГАРДЕР

кандидат технічних наук,
науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-4066-8182

А. В. БЕРНАЦЬКИЙ

кандидат технічних наук, старший дослідник,
завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-8050-5580

В. М. ЛУКАШЕНКО

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0009-0006-7459-4704

Г. А. ЛУКАШЕНКО

здобувач вищої освіти
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0009-0000-5560-9700

МОДЕЛЬ ІРРАЦІОНАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ РІЗНИХ ДВІЙКОВО-КODOVИХ СИСТЕМАХ ЧИСЛЕННЯ В ЄДИНОМУ КРИСТАЛІ

Сучасний розвиток обчислювальної техніки характеризується постійним пошуком інноваційних рішень у сфері цифрового перетворення інформації. Метою даної роботи є створення ефективної моделі ірраціональної функції, шляхом перетворення в єдиному кристалі коротіжні двійково-кодові формалізовані операнди з високою швидкістю і надійністю при малому енергоспоживанні. Методологія дослідження ґрунтується на сукупності прийомів, що перетворюють вхідні коротіжні операнди різних двійково-кодових систем числення в вихідні значення комбінації за допомогою малого обсягу корегуючих констант (визначаються заздалегідь через операцію XOR), використовуючи одні й ті ж табличні дані відповідностей та синтезу відповідних логічних структур компонентів. Ключовою інновацією даної роботи є підвищення ефективності та зменшення активних компонентів і пасивних елементів за рахунок використання запропонованого оригінального схемотехнічного рішення при збереженні високої інформаційної точності. Верифікація перетворення вхідних коротіжних двійково-кодових операндів була підтверджена розрахунками для наведених операндів у двійковій системі числення при визначенні моделі ірраціональної функції спеціального призначення. Останні формують значення: двійкового коду функції «квадратний корінь»; двійково-десятьового коду функції «квадратний корінь» шляхом корегування вхідного масиву двійкового коду аргументів за допомогою відповідних малорозрядних корегуючих констант. Розрахунки, що були виконані за запропонованою формулою, через співвідношення середнього часу безвідмовної роботи запропонованої моделі формувача та моделей, підтверджують підвищення конструктивної надійності майже

© Лукашенко В. А., Гардер Д. А., Бернацький А. В., Лукашенко В. М., Лукашенко Г. А., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

2 рази за рахунок зменшення пасивних елементів. Запропонована технологія може бути успішно застосована в цифрових обчислювальних пристроях спеціального призначення, а саме: контрольно-вимірювальних системах; комп'ютерно-інтегрованих комплексах; тощо. Результати дослідження демонструють, що запропонований інноваційний підхід до архітектури компонентів може кардинально змінити уявлення вчених та дослідників про можливості цифрових перетворювачів спеціального призначення.

Ключові слова: формалізована модель, математична логіка, двійковий код, операнд, значення функції, «квадратний корінь».

V. A. LUKASHENKO

Candidate of Technical Sciences,
Researcher at the Department of the Specialized High-Voltage Engineering
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-9685-4654

D. A. HARDER

Candidate of Technical Sciences,
Researcher at the Department of the Specialized High-Voltage Engineering
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-4066-8182

A. V. BERNATSKYI

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of the Department of Specialised High-Voltage Equipment
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-8050-5580

V. M. LUKASHENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Robotics and Specialized Computer Systems
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0009-0006-7459-4704

H. A. LUKASHENKO

Higher Education Student
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0009-0000-5560-9700

MODEL OF A SPECIAL-PURPOSE IRRATIONAL FUNCTION IN VARIOUS BINARY-CODED NUMBERING SYSTEMS IN A SINGLE CRYSTAL

The modern development of computing is characterized by a constant search for innovative solutions in the field of digital information conversion. The purpose of this work is to create an effective model of an irrational function by converting in a single crystal tuple binary-code formalized operands with high speed and reliability at low power consumption. The research methodology is based on a set of techniques that convert input tuple operands of different binary-code number systems into output values of the combination using a small amount of correction constants (determined in advance through the XOR operation), using the same tabular data of correspondences and synthesis of the corresponding logical structures of components. The key innovation of this work is to increase the efficiency and reduce active components and passive elements by using the proposed original circuit-technical solution while maintaining high information accuracy. Verification of the transformation of the input tuple binary-coded operands was confirmed by calculations for the given operands in the binary number system when determining the model of the irrational function of special purpose. The latter form the values of: binary code of the function «square root»; binary-decimal code of the function "square root" by adjusting the input array of binary code of arguments using the corresponding small-bit adjusting constants. Calculations that were performed according to the proposed formula, through the ratio of the average time of failure-free operation of the proposed model of the shaper and models, confirm the increase in design reliability by almost 2 times due to the reduction of passive elements. The proposed technology can be successfully applied

in digital computing devices of special purpose, namely: control and measuring systems; computer-integrated complexes; etc. The results of the study demonstrate that the proposed innovative approach to component architecture can radically change the way scientists and researchers think about the capabilities of special-purpose digital converters.

Key words: formalized model, mathematical logic, binary code, operand, function value, «square root».

Постановка проблеми

На сьогодні проблемою формування значень ірраціональних функцій є або велика тривалість операції при використанні евристичного методу послідовного наближення, або великий об'єм постійного запам'ятовування пристрою при апаратній реалізації табличним класичним методом (ТКМ) у єдиному кристалі [1-3], що зменшує кількість придатних кристалів з пластини і, як наслідок, збільшується вартість виробу. Однією з ірраціональних функцій апаратної реалізації для систем спеціального призначення (в промисловості, в оборонній галузі та ін.) є функція «корінь квадратний», тому для спрощення процедури формування і дослідження ірраціональної моделі пропонується на прикладу цієї функції. Апаратна реалізація функції «корінь квадратний» з високими показниками одночасно такими як: швидкодія, надійність, габарити, вага, потужність споживання при низькій вартості для систем спеціального призначення є проблематичною задачею.

Крім того, частіше в спеціалізованих системах керування динамічними процесами виникає потреба в реєстрації та швидкому аналізу значення вхідних, проміжних та кінцевих результатів добування кореня, тоді для зручної візуалізації її перетворюють у двійково-десятковий код. На теперішній час це вирішується додатково через комутаційну плату з активними компонентами та пасивними елементами, це значно погіршує конструктивну надійність, що недопустимо для систем спеціального призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням теорії та практики створення якісних комп'ютерних компонентів присвячено ряд робіт (у тому числі і формувачів проблемних функцій) [4–6]. У цих працях описано багато інтересних моделей, що мають новітні схемотехнічні рішення, в яких стосуються формування багатфункціональних компонентів. Проте в них не в повній мірі освітлено процедури створення високоефективних ірраціональних функцій, які мають можливість представити результат вихідної інформації в різних двійково-кодових системах при схемотехнічному рішенні в єдиному кристалі та на базі єдиного числового блоку пам'яті (ЧБП).

У роботі [1, 2] значення функції «корінь квадратний» отримують шляхом використання ітераційного методу або на базі евристичного методу послідовного наближення. Недоліком цих методів є дуже тривалий час отримання значення функції добування коріння.

Високу швидкість забезпечує табличний класичний метод, що аналізується в роботі [3], але для високої точності відтворення результату необхідно мати великий обсяг ПЗП. Це значно погіршує показники по енергоспоживанню та надійності. У статті [4] запропоновано метод визначення надмірності коригуючих констант при відтворенні прецизійних значень багатфункціональних трансцендентних функцій. Це сприяє зменшенню таблиць, які зберігаються в числовому блоці пам'яті (ЧБП) і зменшенню активних елементів, але процедура розглядається тільки для однієї двійкової системи числення в кристалі. Відомо, що кожен зовнішній контакт вузла з'єднання (рис. 1), як правило, складається з системи фізичних об'єктів такого виду: термокомпресія – провідник – мікрозварювання – вивід – корпусу – зовнішнє мікрозварювання (мікропайка), з мінімальними розмірами (60×60 мкм), має велику інтенсивність відмови $\lambda_i = 10^{-5}$. Тому зовнішні контактні вузли є одними з найбільш ненадійних елементів системи з'єднання.

Крім того, аналіз топології контактних вузлів мікросхеми на кристалі (рис. 1) показав, що для їх з'єднання з відповідними виводами до корпусу займають багато площі кристалу.

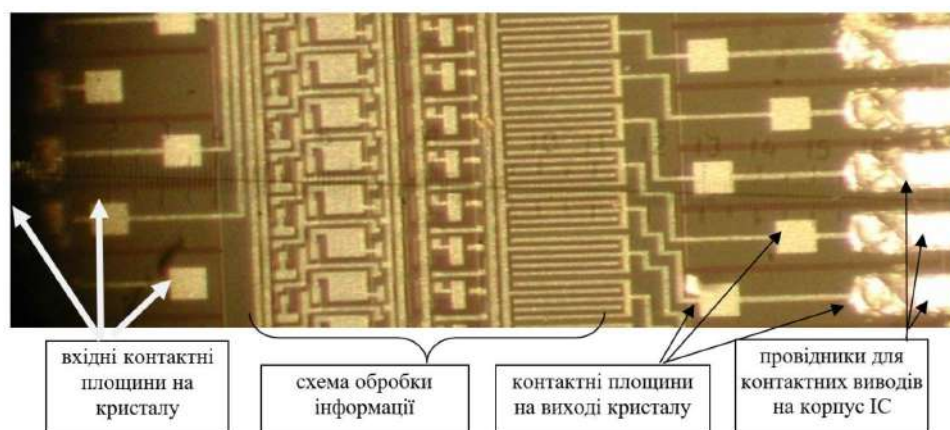


Рис. 1. Топологія контактних вузлів мікросхеми на кристалі

В роботах [5, 6] запропоновані моделі функції добування квадратного кореня на базі таблично-логічного методу. Результати обчислювання представлено в двійковому коді та в двійково-десятьковому коді. Недоліком цих моделей при високої точності є наявність великої кількості зовнішніх і внутрішніх контактів, що зменшує конструктивну надійність.

Метод зменшення кількості зовнішніх контактних вузлів за рахунок введення в середині кристалу додаткового блоку вентилів запропонованих в роботах [7–9], що сприяє підвищенню конструктивної надійності. Але не розглянуто як впливає на значення показнику енергоспоживання при додатковому імплементуванні в межах площі єдиного кристалу.

Тому, синтез логічних структур в єдиному кристалі моделі функції «корінь квадратний» спеціального призначення в двох двійково-кодових системах на методологічному й інформаційному базисі є першочерговим завданням.

При цьому необхідно враховувати, що особливість компонентів спеціального призначення полягає в обмеженні множини вхідних та відповідних вихідних кодових послідовностей. Це дозволяє заздалегідь складати таблиці відповідних вхідних і вихідних двійкових кодів. При цьому в роботі [10] показана процедура формування оптимальної розрядності кортежів при підготовці таблиць кортежних відповідностей, на яку використовується багато часу.

Формулювання мети дослідження

Метою підвищення ефективності моделі, що відтворює значення ірраціональної функції спеціального призначення в двох двійково-кодових системах за рахунок схемотехнічного рішення в єдиному кристалі через зменшення апаратних витрат, що базується на принципах: коригування вхідної двійково-кової інформації за допомогою малорозрядних кортежів при формуванні таблиць відповідностей малого обсягу та багаторазового використання активних компонентів та пасивних елементів при збереженні високої інформаційної точності.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів апаратної реалізації значень ірраціональних функцій та визначити базовий метод на основі таблиць для побудови ефективної моделі.

2. Створити та дослідити модель ірраціональної функції на прикладу функції добування квадратного кореня спеціального призначення в двох двійково-кодових системах.

3. Провести верифікацію запропонованої моделі за параметрами: часу напруцювання на відмову, апаратних витрат і потужності споживання в порівнянні з моделями, що реалізовані ТКМ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Особливість компонентів спеціального призначення полягає в обмеженні множини вхідних та відповідних вихідних кодових послідовностей, тому заздалегідь складаються таблиці відповідних вхідних і вихідних двійкових кодів.

Апаратно моделі ірраціональних функцій частіше реалізується одним із традиційних таблично-алгоритмічних методів (ТАМ), перевагою яких є значне зменшення обсягу ПЗП. Традиційні ТАМ такі як: табличний адитивно – мультиплікативний та таблично-адитивний методи характеризуються малим обсягом ПЗП, але мають повільну швидкодією через наявність тривалих арифметичних операцій: множення та додавання.

Існуючи на сьогодні нетрадиційні методи: таблично-логічний, напівадитивний таблично-логічний, багатофункціональний таблично-логічний, таблично-логічний оборотний, формалізований таблично-логічний та розрядний кортежно-табличний логіко-оборотний (РКТЛО) метод, мають високу швидкодією завдяки використанню тільки швидкодіючі логічні операцій. Серед них виділяється метод РКТЛО [10], перевагою якого велика можливість маневрувати між апаратними витратами та швидкістю отримання результату при збереженні високої точності перетворення інформації.

Особливість РКТЛО методу полягає в тому, що позиційно-впорядковані операнди кодових послідовностей представляються як композиція незалежних «1» і «0». Це дозволяє представляти їх у вигляді впорядкованих кортежів, розрядність яких визначається за допомогою алгоритму машинного формування [10].

У той же час, аналіз поставленого завдання показав, що РКТЛО метод, можна модернізувати через усунення в його алгоритму операції визначення оптимального значення розрядності в кортежах через те, що при формуванні значень ірраціональної функції в двійково-десятьковій системі числення, операнди останнього є тетради. Це значно зменшує підготовчий час на створення таблиць відповідностей.

Пропонується створення моделі ірраціональної функції на базі табличного обчислювання, властивостей математичної логіки, формалізації, принципу багаторазового використання одних і тих ж таблиць, що реалізуються апаратно в числовому блоку пам'яті (ЧБП).

Особливістю таблиць ЧБП полягає в тому, що записується різниця багаторозрядних вхідних і вихідних кодів, яка визначається через операцію XOR. Цим зменшує обсяг пам'яті майже в 2 рази. В той же час при порівнянні тетрад вхідних і вихідних кодів, що представлено кортежними композиціями з незалежними «1» і «0» забезпечується можливість отримати велике число однакових значень кодів.

Послідовність організації таблиць, що записується в ЧБП, здійснюється таким чином: створюються таблиці відповідностей у вигляді кортежів; при необхідності вирівнюються по довжині тетради кодові операнди через

додавання «0» перед старшим розрядом у старшій кортеж для цілих чисел і додавання «0» після молодшого розряду в молодшій кортеж; визначаються різниці відповідних кортежів за допомогою операції XOR; формується таблиця значень корегуючих констант після ліквідації інформаційні надмірності, тобто зберігається в ПЗП з множини однакових тільки одно значення корегуючих констант.

Верифікація процедури створення моделі високоефективної ірраціональної функції проведена на прикладу значень функції «корінь квадратний» $(\sqrt{n})_2$ та аргументів $(n)_2$ і корегуючої константи $(\Delta)_2$ у двійковій системі числення за формулою (1) представлено у кортежному вигляду та наведено в таблиці 1.

$$\Delta_{cm} = Y_{2cm} \oplus Y_{2-10cm}; \quad \Delta_{mld} = Y_{2mld} \oplus Y_{2-10mld}. \quad (1)$$

Таблиця 1

Реляційна модель даних чотирьох розрядними кортежами аргументу, значень функції та корегуючи константи

№ п/п	Кортежне представлення операндів у двійковій системі числення		
	Код аргументу $(n)_2$	Код функції, $(\sqrt{n})_2$	Код корегуючої константи, $(\Delta)_2$
1	0100 0000 0000	0000 0010 0000	0100 0010 0000
2	0100 0100 0001	0000 0010 0001	0100 0110 0000
3	0100 1000 0100	0000 0010 0010	0100 1010 0110
4	0100 1100 1001	0000 0010 0011	0100 1110 1010
5	0101 0001 0000	0000 0010 0100	0101 0011 0100
6	0101 0101 1001	0000 0010 0101	0101 0111 1100
7	0101 1010 0100	0000 0010 0110	0101 1000 0010
8	0101 1111 0001	0000 0010 0111	0101 1101 0110
9	0110 0100 0000	0000 0010 1000	0110 0110 1000
10	0110 1001 0001	0000 0010 1001	0110 1011 1000
11	0110 1110 0100	0000 0010 1010	0110 1100 1110
12	0111 0011 1001	0000 0010 1011	0111 0001 0010
13	0111 1001 0000	0000 0010 1100	0111 1011 1100
14	0111 1110 1001	0000 0010 1101	0111 1100 0100
15	1000 0100 0100	0000 0010 1110	1000 0110 1010

Коли довжина операндів старшої тетради двійково-десятькового коду функції більш розрядності двійкового коду функції, тоді в старшій кортеж двійкового коду дописуються розряди нульового значення «0», тобто проводиться операція вирівнювання розрядів в старшій тетради (приклади наведено в таблиці 1 і таблиці 2).

Враховуючи (1), (логіко-математична модель корегуючих констант визначається за формулою:

$$\Delta = \Delta_{cm} \Delta_{mld} = (Y_{2cm} \oplus Y_{2-10cm})(Y_{2mld} \oplus Y_{2-10mld}). \quad (2)$$

Аналіз результатів кортежної декомпозиції кодів у таблиці 1 і таблиці 2, показав наявність корегуючих констант однакового значення дуже багато. На рис. 2 і рис. 3 побудовано гістограми, кількісного оцінювання однакових значень корегуючих констант через показник h це забезпечує ліквідацію інформаційної надмірності, зменшує кількість активних елементів.

Аналіз гістограм (рис. 2 і рис. 3) показав, що для наведеного прикладу в сукупності кількість корегуючих констант зменшується і, як наслідок, зменшується кількість активних елементів у ЧБП, збільшується конструктивна надійність. Причому збільшується вільна площа на кристалі, яка використовується для введення додатково всередині кристалу інформаційного зворотного зв'язку (ІЗЗ) і блок вентилів.

Останній забезпечує можливість використання багаторазово входних контактів зовнішніх та внутрішніх для передачі вихідної інформації і, тим самим, на чотири, п'ять порядків збільшується надійність моделі, образно-знакова модель якого представлена на рис. 4.

Аналіз моделі ірраціональної функції «корінь квадратний» (рис. 4) підтвердив відсутність арифметичні операції, тобто формування значень функції в двох двійково-кодових системах здійснюється тільки логічними операціями. Цим забезпечується висока швидкість відтворення значень ірраціональної моделі.

Модель функції «корінь квадратний», що представлена в двійково-кодових системах числення працює в таких режимах:

- 1) у режимі перетворення двійкового коду значень аргументу $(n)_2$ у код значення функції «корінь квадратний» $(\sqrt{n})_2$ двійкової системи числення;
- 2) у режимі перетворення значення функції «корінь квадратний» із двійкової системи числення в двійково-десятькову, тобто код $(\sqrt{n})_2$ перетворюється в код $(\sqrt{n})_{2-10}$.

Таблиця 2

Реляційна модель даних значень функції «корінь квадратний» в різних системах числення та корегуючі константи

№ п/п	Y_2		Y_{2-10}		$\Delta_{ст}$	$\Delta_{мло}$
	$Y_{2\text{ ст}}$	$Y_{2\text{ мло}}$	$Y_{2-10\text{ ст}}$	$Y_{2-10\text{ мло}}$		
1	0010 0000		0011 0010		0001 0010	
2	0010 0001		0011 0011		0001 0010	
3	0010 0010		0011 0100		0001 0110	
4	0010 0011		0011 0101		0001 0110	
5	0010 0100		0011 0110		0001 0010	
6	0010 0101		0011 0111		0001 0010	
7	0010 0110		0011 1000		0001 1110	
8	0010 0111		0011 1001		0001 1110	
9	0010 1000		0100 0000		0110 1000	
10	0010 1001		0100 0001		0110 1000	
11	0010 1010		0100 0010		0110 1000	
12	0010 1011		0100 0011		0110 1000	
13	0010 1100		0100 0100		0110 1000	
14	0010 1101		0100 0101		0110 1000	
15	0010 1110		0100 0110		0110 1000	

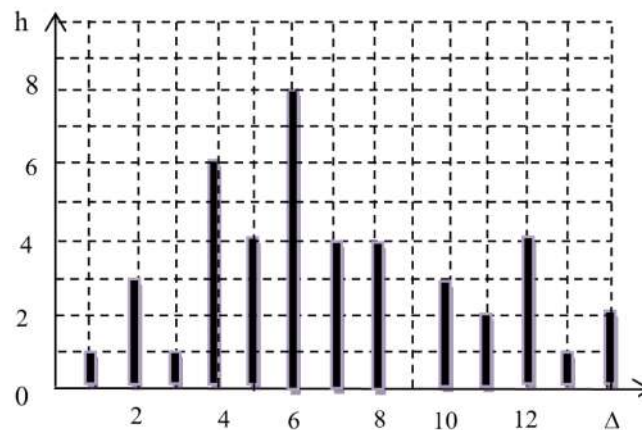


Рис. 2. Гістограма кількості k значень корегуючих констант при перетворенні двійкового коду аргументу $(n)_2$ в двійковий код функції $(\sqrt{n})_2$

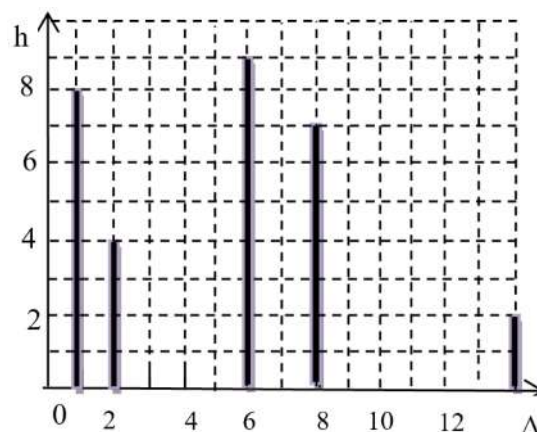


Рис. 3. Гістограма кількості k значень корегуючих констант при перетворенні двійкового коду значень функції $(\sqrt{n})_2$

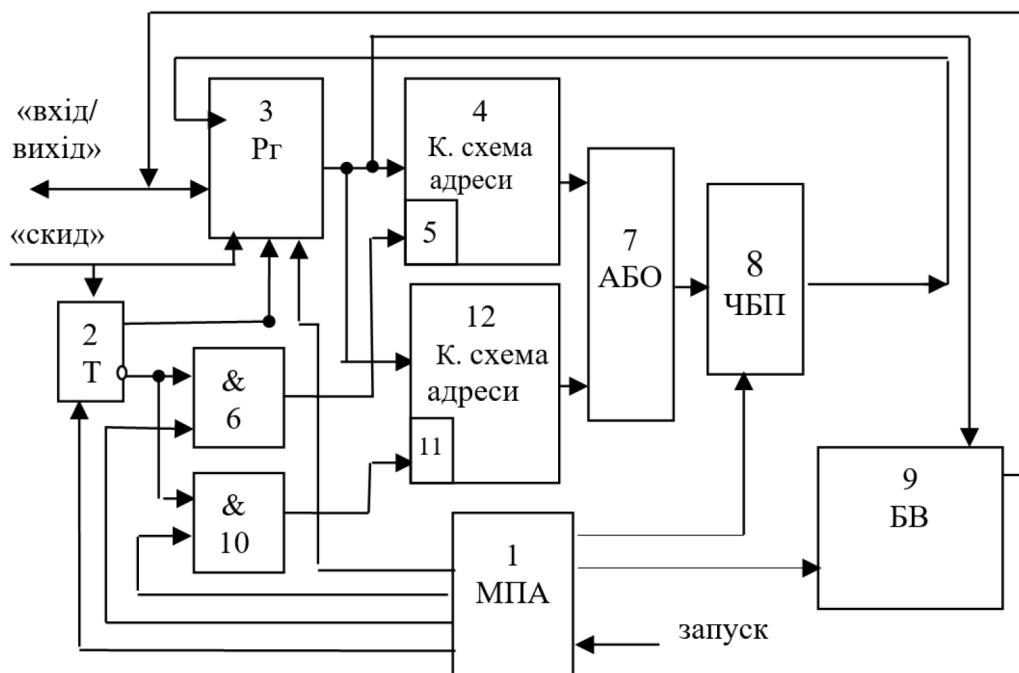


Рис. 4. Модель високоефективного формувача функції «корінь квадратний» спеціального призначення в двох двійково-кодкових системах, де: 1 МПА – мікропрограмний автомат; 2 Т – тригер; 3 Рг – регістр; 4, 12 – комбінаційна схема адреси; 5, 11 – «дозвіл» роботи компонентів 4, 12 відповідно; 6, 10 – елементи «І»; 7 – елемент АБО; 8 ЧБП – числовий блок пам'яті; 9 БВ – блок вентилів

Робота моделі (рис. 4) в часі здійснюється зовнішнім МПА. Формувач працює в першому режимі таким чином. Імпульсом «скид» тригер Т2 і регістр Рг3 обнулюються. Після імпульсу «запуск» на вхід МПА1 з його виходу надходить відповідний керуючий сигнал і під дією імпульсу з виходу Q тригера 2 вхідна інформація записується в Рг 3. Комбінаційна схема адреси 4 під дією імпульсу «дозвіл» 5, що надходить з виходу елементу «І»6, розпізнає адресу корегуючої константи. Імпульс, що проходить через блок елементів АБО 7 збуджує відповідну шину ЧБП8, що зберігає відповідний коротенький код корегуючої константи. Код константи через АБО 9 по корегуючому зворотному зв'язку (КЗЗ) надходить на лічильні регістру Рг 3 і під дією «1» його тригери змінюють інформацію на протилежну. Таким чином, код аргументу $n_{\text{вх}}$ перетворюється в код значення функції «корінь квадратний» $(\sqrt{n})_2$ і зберігається в Рг 3. Далі цей код з виходу Рг 3 по інформаційному зворотному зв'язку (ІЗЗ) надходить на входи блок вентилів БВ 9, виходи якого в середині кристалу з'єднані з інформаційними входами моделі формувача. Відповідний імпульс з виходу МПА1 відкриває блок вентилів БВ 9 і код значення функції з'являється на зовнішніх вхідних контактах.

Робота формувача в режимі перетворення двійкового коду значення функції «корінь квадратний» $(\sqrt{n})_2$ у код $(\sqrt{n})_{2-10}$ двійково-десятьової системи числення здійснюється після того, як у Рг 3 сформовано $(\sqrt{n})_2$. Далі під дією відповідного у часі керуючого імпульсу МПА1, який проходить через елемент «І»10 відкривається «дозвіл» 11 на розпізнавання адреси за допомогою комбінаційної схеми 12. Імпульс, що проходить через блок відповідних елементів АБО 7 збуджує шину відповідного ЧБП 8, у якому зберігається код корегуючої константи. Код останній по КЗЗ надходить на лічильні регістру Рг 3 і під дією «1» його тригери змінюють інформацію на протилежну. Таким чином, на виході Рг 3 з'являється код $(\sqrt{n})_{2-10}$ значення функції в двійково-десятьової системи числення. Далі процедура проходження коду $(\sqrt{n})_{2-10}$ на вихід створеної моделі аналогічна першому режиму.

Особливістю моделі (рис. 4) є можливість записати в Рг 3 значення функції «корінь квадратний» двійкової системи числення, мінував процедуру перетворення коду аргументу в код функції $(\sqrt{n})_2$ завдяки розташовуванню МПА за межами кристалу. Це розширює функціональні можливості моделі формувача.

Верифікація запропонованої моделі ірраціональної функції за параметрами: часу напрацювання на відмову, апаратних витрат і потужності споживання в порівнянні з моделлю, що реалізована ТКМ показано на прикладі моделі формувача функції «корінь квадратний».

Відомо, що модель функції, що реалізовані ТАМ містить два n-розрядних регістра, дешифратор з адресами 2^n на виході, шифратор, обсяг пам'яті якого визначається у бітах, як

$$V = n \cdot (2^n - 1). \quad (3)$$

Конструктивна надійність моделі ірраціональної функції до відмови, що розраховується за формулою

$$T_0 = \frac{1}{\sum_i^n \lambda_i}, \quad (4)$$

де λ_i – інтенсивність відмовної роботи одного елементу.

У той же час, розміри внутрішнього контакту вузла з'єднання має майже максимальний розмір (5×5 мкм) з $\lambda_i = 10^{-10}$, а контакти вузлів зовнішнього з'єднання має майже мінімальний розмір (60×60 мкм) при $\lambda_i = 10^{-5}$.

Верифікація значення часу напрацювання на відмову формувача через використання двічі зовнішніх входних контактних вузлів з'єднання підтверджена результатом розрахунку за формулою

$$T_{\phi 3\phi} / T_{\phi 1\phi} = \left(1 / \sum_i^n l_{i3\phi} \right) / \left(1 / \sum_i^n l_{i1\phi} \right), \quad (5)$$

де $T_{\phi 3\phi}$ – час напрацювання запропонованого формувача; $T_{\phi 1\phi}$ – час напрацювання моделі, що представлена в роботі [6] і визначена як прототип; $\lambda_{i3\phi}$ – інтенсивність відмовної роботи запропонованого формувача $\lambda_{\phi} = 10^{-10}$; $\lambda_{i1\phi}$ – інтенсивність відмовної роботи прототипу [6] $\lambda_{\phi} = 10^{-5}$.

Нехай k_{np} – кількість зовнішніх входних і вихідних контактних вузлів прототипу [6] при $n = 64$, тоді $k_{np} = (4 \cdot n) = 256$, а $k_{зф}$ – кількість зовнішніх контактів формувача при $n = 64$, тоді $k_{np} = 2 \cdot n = 128$, звідки

$$T_{\phi 3\phi} / T_{\phi 1\phi} = 2 \text{ рази}. \quad (6)$$

Потужність споживання $W_{ср}$ за кількістю укрупнених основних вузлів, блоків і елементів в них, з відповідними значеннями потужності одиничного елемента або компоненту, представляється у вигляді

$$W_{ср} = \sum_{i=1}^N W_i \cdot c_i = W_1 \cdot c_1 + W_2 \cdot c_2 + W_i \cdot c_i + \dots + W_N \cdot c_N, \quad (7)$$

де W_i – значення потужності споживання одним тригером; c_i – число однорозрядних елементів у відповідних блоках; N – загальне число відповідних блоків.

Припустимо, що використовуються операнди розрядністю $n = 64$, потужність одного логічного елемента дорівнює $W_1 = 10 \cdot 10^{-6}$ Вт. Тоді потужність споживання блока вентилів становить

$$W_B = n \cdot W_1 = 64 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,00064 \text{ Вт} = 0,64 \text{ мВт} \quad (8)$$

Відомо [10], що потужність одного тригера регістру в чотири рази більше потужності одного логічного елемента, тоді потужність одного 64-розрядного регістру визначається за такою формулою:

$$W_2 = n \cdot 4 \cdot W_1 = 64 \cdot 4 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,00256 \text{ Вт} = 2,56 \text{ мВт}. \quad (9)$$

Величина економії потужності W_2 знизиться через введення блока вентилів завдяки ланцюга ІЗЗ до величини ΔW , значення якої визначається нижче:

$$\Delta W = W_2 - W_B \approx 0,00256 - 0,00064 = 0,00192 \text{ Вт} = 1,92 \text{ мВт}. \quad (10)$$

Отже, розрахунки за формулою (10) через співвідношення середнього часу безвідмовної роботи запропонованої моделі формувача та моделей, що реалізовані в роботі [6], підтверджують підвищення конструктивної надійності майже 2 рази за рахунок зменшення пасивних елементів.

Висновки

Ключовою інновацією даної роботи є підвищення ефективності та зменшення активних компонентів і пасивних елементів за рахунок використання запропонованого оригінального схемотехнічного рішення при збереженні високої інформаційної точності. Верифікація перетворення входних кортежних двійково-кодованих операндів була підтверджена розрахунками для наведених операндів у двійковій системі числення при визначенні моделі ірраціональної функції спеціального призначення.

Аналіз моделі ірраціональної функції «корінь квадратний» підтвердив відсутність арифметичні операції, тобто формування значень функції в двох двійково-кодових системах здійснюється тільки логічними операціями. Цим забезпечується висока швидкість відтворення значень ірраціональної моделі.

Розрахунки за запропонованою формулою, через співвідношення середнього часу безвідмовної роботи запропонованої моделі формувача та моделей, підтверджують підвищення конструктивної надійності майже 2 рази за рахунок зменшення пасивних елементів.

Список використаної літератури

1. Shwartz-Ziv, R., Armon, A. Tabular data: Deep learning is not all you need. *Information Fusion*. 2022. Vol. 81. P. 84–90. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.11.011>
2. Kahraman, C., Onar, S. C., Oztaysi, B. Fuzzy multicriteria decision-making: a literature review. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2015. Vol. 8. Iss. 4. P. 637–666. URL: <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1046325>
3. Aboul-Maaty, N. A. F., Oraby, H. A. S. Extraction of high-quality genomic DNA from different plant orders applying a modified CTAB-based method. *Bulletin of the National Research Centre*. 2019. Vol. 43. Iss. 1. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0066-1>
4. Jin, L., Tan, F., Jiang, S. Generative adversarial network technologies and applications in computer vision. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2020. Vol. 2020. Iss. 1. Id. 1459107. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/1459107>
5. Alcin, M., Koyuncu, I., Tuna, M., Varan, M., Pehlivan, I. A novel high speed artificial neural network-based chaotic true random number generator on field programmable gate array. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 2019. Vol. 47. Iss. 3. P. 365–378. URL: <https://doi.org/10.1002/cta.2581>
6. Wang, Z., She, Q., Ward, T. E. Generative adversarial networks in computer vision: A survey and taxonomy. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2021. Vol. 54. Iss. 2. P. 1–38. URL: <https://doi.org/10.1145/3439723>
7. Nandi, A. K., Medal, H. R. Methods for removing links in a network to minimize the spread of infections. *Computers & Operations Research*. 2016. Vol. 69. P. 10–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.11.001>
8. Sun, C., Liu, G. R., Huo, S. H., Wang, G., Yu, C., Li, Z. A novel node-to-segment algorithm in smoothed finite element method for contact problems. *Computational Mechanics*. 2023. Vol. 72. Iss. 5. P. 1029–1057. URL: <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02327-6>
9. Sundararaj, V., Muthukumar, S., Kumar, R. S. An optimal cluster formation based energy efficient dynamic scheduling hybrid MAC protocol for heavy traffic load in wireless sensor networks. *Computers & Security*. 2018. Vol. 77. P. 277–288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.04.009>
10. Lukashenko, A., Harder, D., Lukashenko, V. M., Fedorov, E., Lukashenko, V. A., Utkina, T., Mitsenko, S., Rudakov, K. Bitwise method for the binary-coded operands conversion based on mathematical logic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. (2018). Vol. 5. Iss. 4(95). P. 6–14. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142975>

References

1. Shwartz-Ziv, R., & Armon, A. (2022). Tabular data: Deep learning is not all you need. *Information Fusion*, 81, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.11.011>
2. Kahraman, C., Onar, S. C., & Oztaysi, B. (2015). Fuzzy multicriteria decision-making: a literature review. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(4), 637–666. <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1046325>
3. Aboul-Maaty, N. A. F., & Oraby, H. A. S. (2019). Extraction of high-quality genomic DNA from different plant orders applying a modified CTAB-based method. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0066-1>
4. Jin, L., Tan, F., & Jiang, S. (2020). Generative adversarial network technologies and applications in computer vision. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2020(1), 1459107. <https://doi.org/10.1155/2020/1459107>
5. Alcin, M., Koyuncu, I., Tuna, M., Varan, M., & Pehlivan, I. (2019). A novel high speed artificial neural network-based chaotic true random number generator on field programmable gate array. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 47(3), 365–378. <https://doi.org/10.1002/cta.2581>
6. Wang, Z., She, Q., & Ward, T. E. (2021). Generative adversarial networks in computer vision: A survey and taxonomy. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(2), 1–38. <https://doi.org/10.1145/3439723>
7. Nandi, A. K., & Medal, H. R. (2016). Methods for removing links in a network to minimize the spread of infections. *Computers & Operations Research*, 69, 10–24. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.11.001>
8. Sun, C., Liu, G. R., Huo, S. H., Wang, G., Yu, C., & Li, Z. (2023). A novel node-to-segment algorithm in smoothed finite element method for contact problems. *Computational Mechanics*, 72(5), 1029–1057. <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02327-6>
9. Sundararaj, V., Muthukumar, S., & Kumar, R. S. (2018). An optimal cluster formation based energy efficient dynamic scheduling hybrid MAC protocol for heavy traffic load in wireless sensor networks. *Computers & Security*, 77, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.04.009>
10. Lukashenko, A., Harder, D., Lukashenko, V. M., Fedorov, E., Lukashenko, V. A., Utkina, T., Mitsenko, S., & Rudakov, K. (2018). Bitwise method for the binary-coded operands conversion based on mathematical logic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4(95)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142975>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
 Дата публікації: 28.11.2025