

УДК 681.32

Б. Б. КРУЛКОВСЬКИЙ, А. Я. ДАВЛЕТОВА

ТЕОРІЯ ТА СИСТЕМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА СУМАТОРІВ ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНИХ СПЕЦПРОЦЕСОРІВ

Тернопільський національний економічний університет

46000, вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна, E-mail: a90f@meta.ua

Анотація. Викладені теоретичні засади побудови компонентів багаторозрядних проблемно-орієнтованих спецпроцесорів (ПОС). Класифіковані аналоговий, фізичний та цифровий абстрактний сигнали. Формалізовані параметри цифрових сигналів, які формуються та опрацьовуються у цифровій техніці. Систематизовані структури інформаційних, керуючих та інтерфейсних каналів, ключів, одно- та двонаправлених ключів та шин. Класифіковані базові типи паралельних та послідовних неповних та повних однорозрядних суматорів, у тому числі унітарні накоплюючі, а також по модулю 2 та модулю числа P . Досліджені системні характеристики часової, апаратної та структурної складності однорозрядних суматорів, які виконують різні функції арифметики ПОС. Наведені аналітичні вирази оцінки характеристики багаторозрядних суматорів високопродуктивних ПОС у базисі Радемахера та побудовані відповідні порівняльні діаграми досліджених системних характеристик.

Ключові слова: теоретико-числовий базис, унітарний базис, структурізовані дані, структуризація, структурна складність, поліфункціональні дані.

Анотация. Изложены теоретические основы построения компонентов многоуровневых проблемно-ориентированных спецпроцессоров (ПОС). Классифицированы аналоговый, физический и цифровой абстрактные сигналы. Формализованные параметры цифровых сигналов, что формируются и обрабатываются в цифровой технике. Систематизированы структуры информационных, управляющих и интерфейсных каналов, ключей, одно- и двусторонних ключей и шин. Классифицированы базовые типы параллельных и последовательных неполных и полных одноразрядных сумматоров, в том числе унитарные накопительные, а также по модулю 2 и модулю числа P . Исследованы системные характеристики временной, аппаратной и структурной сложности одноразрядных сумматоров, которые выполняют различные функции арифметики ПОС. Приведены аналитические выражения оценки характеристики многоуровневых сумматоров высокопроизводительных ПОС в базисе Радемахера и построены соответствующие сравнительные диаграммы исследованных системных характеристик.

Ключевые слова: теоретико-числовой базис, унитарный базис, структурированная данные, структурирование, структурная сложность, полифункциональные данные.

Abstract. The theoretical basis for building components of multi-problem-oriented special processors (PIC). Classified analog, physical and abstract digital signals. Formal parameters of digital signals that are generated and processed in digital technology. Systematized information structure, control and interface channels, keys, single and bi-directional keys and tires. Classified basic types of parallel and sequential single-parent and full adders, including unitary *nakoplyuyuchi* and modulo 2 and modulo the number R . Investigated temporal characteristics of the system, hardware and structural complexity single-digit adders that perform different functions arithmetic PIC. These analytical expressions characteristics evaluation of high-performance multi-adders in the basis Rademacher PIC and built the corresponding comparative charts investigated system characteristics.

Keywords: theoretical and numerical basis, unitary basis, structured data structuring, structural complexity, multifunctional data.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

За останні пів століття цифрова техніка і мікроелектроніка отримали стрімкий розвиток, як в теоретичному аспекті, так і в схемотехніці фундаментальні основи теорії елементної бази, функціональних та структурних компонентів універсальних цифрових процесорів та спецпроцесорів закладені у роботах відомих вчених та спеціалістів у галузі цифрової техніки та мікроелектроніки. Починаючи від винахідника базового елемента обчислювальних машин тригера Бонч-Бруєвича,

теоретиків архітектури процесорів: Д. фон Неймана, Х. Айкіна, М. Фліна, Р. Хокні, Д. Скілкорна. Вагомий вклад у розвиток теорії булевої алгебри та арифметики процесорів у базисі Радемахера внесли Дж. Буль, В. М. Глушков, О. В. Палагін, С. А. Майоров, Г. І. Новиков, З. Л. Рабінович, А. А. Карцев, Д. М. Каган, В. П. Тарасенко, Р. Міллер, А. О. Мельник, Р. Б. Дунець та ін [1—6].

Значний розвиток теорії, архітектури, арифметики та схемотехніки у теоретико-числовому базисі Крестенсона досягнений завдяки науковим працям І. А. Акушського, В. А. Торгашева, Н. І. Червякова, С. І. Брюховина, Я. М. Николайчука, О. І. Волинського [7—11].

Успішний розвиток у наш час отримує теорія та техніка побудови цифрових компонентів та процесорів на основі вертикальної інформаційної технології у ТЧБ Галуа Я. М. Николайчук, В. С. Глухов, П. В. Гуменний, А. Р. Воронич [10—13].

АКТУАЛЬНІСТЬ

Вирішення проблеми захисту інформаційних потоків від несанкціонованого доступу у сучасних телекомунікаційних та комп'ютерних мережах ставить нові актуальні задачі розвитку теорії та вдосконалення компонентів високопродуктивних великорозрядних універсальних процесорів та проблемно-орієнтованих спецпроцесорів (ПОС). При цьому потрібне нове усвідомлення напрямів розвитку теорії, арифметики та архітектури компонентів ПОС на основі повноцінного системного застосування мультиарифметики та схемотехніки реалізації компонентів мультибазисних процесорів [14] у різних ТЧБ: унітарному, Хаара, крейга, Радемахера, Грея, Уолша, Крестенсона та Галуа.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ ДИСКРЕТНИХ КОМПОНЕНТІВ ПОС

В цифрових системах існують два поняття сигналу: фізичний та абстрактний. На рис. 1 позначені продукційні моделі такого класу сигналів.

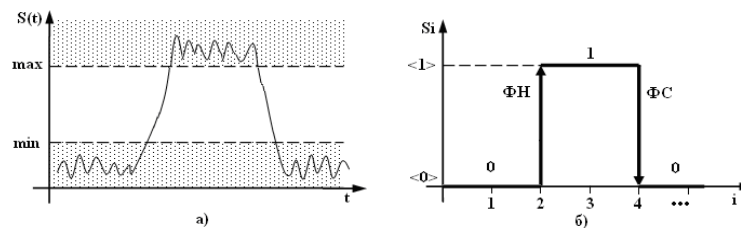


Рис. 1. Продукційні моделі фізичного (а) та абстрактного (б) сигналів цифрової техніки
З рис. 1 витікає формалізація цього класу сигналів згідно наступних аналітичних виразів

$$S(t) = \begin{cases} 1, S(t) > \max \\ 0, S(t) < \min \end{cases}; \quad S_i = \begin{cases} 1, S_i = \langle 1 \rangle \\ 0, S_i = \langle 0 \rangle \\ \uparrow, S_i = \langle \phi_H \rangle \\ \downarrow, S_i = \langle \phi_C \rangle \end{cases};$$

t та i — відповідно аналоговий та дискретний час; \max / \min — апертура граничних станів аналогового фізичного сигналу; $S_i \in \overline{0,1}$ — цифрові стани абстрактного сигналу нуля та одиниці; \uparrow, \downarrow — відповідно фронти наростання та спаду абстрактного цифрового сигналу.

Таким чином, згідно формалізації абстрактного сигналу S_i витікає, що S_i у цифровій техніці має чотири стани та ознаки $(0, 1, \uparrow, \downarrow)$ по відношенню до фізичного сигналу $S(t)$, який у два рази інформативніший. Отже всі цифрові перетворення та зміна станів компонентів, операційних пристроїв та мікропрограмних операцій у процесорах відбуваються у строгі синхронізовані моменти часу $i \in \overline{1,4}$.

2. ЕЛЕМЕНТАРНІ КОМПОНЕНТИ ПОС

До елементарних компонентів універсальних процесорів та ПОС відносяться атрибути показані на рис. 2.

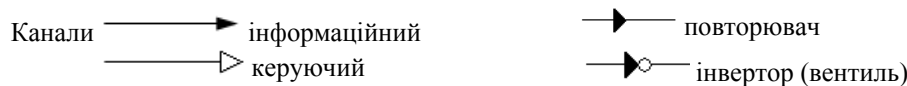


Рис. 2. Елементарні компоненти цифрової техніки

Інформаційні та керуючі канали в окремих групах формують відповідні інформаційні та керуючі шини (рис. 3) де n — число каналів.



Рис. 3 Інформаційні та керуючі шини

Група інформаційних та керуючих шин формують комутаційну магістраль (рис. 4), яка є базовою інтерфейсною шиною процесорів.

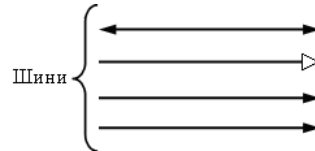


Рис. 4. Структура інтерфейсної шини процесорів

Пересічення інформаційних та керуючих каналів утворюють ключі, а пересічення відповідних шин та каналів утворюють цифрові клапани (рис. 5).

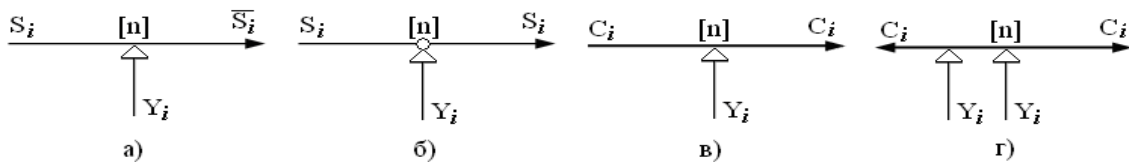


Рис. 5. Прямий (а) та інверсний (б) ключі, одно- (в) та двонаправлений (г) цифрові канали; C_i — цифровий розрядний код. $Y_i \in \{0,1\}$ $\bar{Y}_i \in \{0,1\}$

Слід зауважити, що прямий та інверсний ключ реалізуються відповідно на основі логічних функцій «І» та «І-НЕ» булевої алгебри (рис.6).

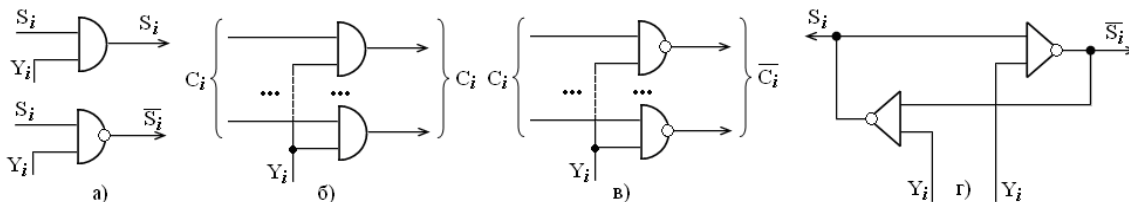


Рис. 6. Реалізація одно- (а) та двонаправлених (б) ключів та каналів на елементах булевої алгебри

Окремий напрям компонентів ПОС є їх реалізація на базі оптоелектронних компонентів [15] квантронах (рис. 6).

3. СТРУКТУРА ТА СИСТЕМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУМАТОРІВ ПОС

Арифметична операція додавання існує практично у всіх алгоритмах опрацювання сигналів та обчислень. Ця операція та компоненти, які її реалізують є ваговим атрибутом, який суттєво може впливати на продуктивність, апаратну та структурну складність високорозрядних ПОС, що є предметом досліджень даної роботи.

На рис. 7 та рис.8 показані входи / виходи та позначення однорозрядних напівсуматорів (НС) та повних суматорів (СМ) паралельного типу.

У загальному випадку структура однорозрядного напівсуматора та суматора паралельної дії у базисі Радемахера представлена на рис. 7

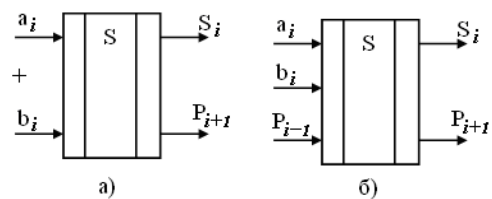


Рис. 7. Вхідні та вихідні логічні сигнали напівсуматора (а) та повного суматора (б) базису Радемахера

a_i, b_i — відповідно біти i -го розряду; S_i — результат сумування в i -му розряді;
 P_{i-1}, P_{i+1} — відповідно переноси бітів з i -го розряду та $i+1$ -й розряд.

При побудові структурних схем багаторозрядних суматорів, арифметико-логічних пристроїв (АЛП), міжбазисних перетворень коду у двійковий код та матричних перемножувачів використовують умовне позначення неповного (а) та повного (б) суматора подані на рис. 8.

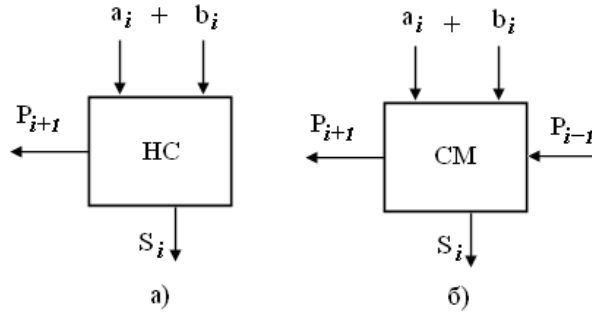


Рис. 8. Умовні позначення неповного (а) та повного (б) суматорів

Реалізація різних структур НС та СМ виконується на основі таблиці істинності та відповідних логічних рівнянь.

a_i	b_i	P_{i+1}	S_i
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

$$S_i = \bar{a}_i \wedge b_i \vee a_i \wedge \bar{b}_i;$$

$$S_i = \bar{a}_i \wedge b_i \wedge (a_i \vee b_i);$$

$$P_{i+1} = a_i \wedge b_i;$$

$$P_{i+1} = \bar{a}_i \wedge \bar{b}_i \vee a_i \wedge \bar{b}_i \vee \bar{a}_i \wedge b_i;$$

$$P_{i+1} = a_i \wedge b_i.$$

P_{i-1}	a_i	b_i	P_{i+1}	S_i
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

$$S_i = \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{a}_i \wedge b_i \vee \bar{P}_{i-1} \wedge a_i \wedge \bar{b}_i \vee \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{a}_i \wedge \bar{b}_i \vee P_{i-1} \wedge a_i \wedge b_i;$$

$$P_{i+1} = \bar{P}_{i-1} \wedge a_i \wedge b_i \vee P_{i-1} \wedge (a_i \vee b_i);$$

$$P_{i+1} = \bar{P}_{i-1} \wedge a_i \wedge b_i \vee P_{i-1} \wedge \bar{a}_i \wedge b_i \vee P_{i-1} \wedge a_i \wedge \bar{b}_i \vee P_{i-1} \wedge a_i \wedge b_i;$$

$$\bar{P}_{i+1} = \bar{P}_{i-1} \wedge (\bar{a}_i \vee \bar{b}_i) \vee P_{i-1} \wedge \bar{a}_i \vee \bar{b}_i;$$

$$\bar{S}_i = \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{a}_i \wedge \bar{b}_i \vee \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{a}_i \wedge b_i \vee \bar{P}_{i-1} \wedge a_i \wedge \bar{b}_i \vee P_{i-1} \wedge \bar{a}_i \wedge \bar{b}_i.$$

Критерії системної складної структури однорозрядних двійкових суматорів розроблені в роботах [16—17] включають наступні системні характеристики:

— апаратна складність визначається числом логічних елементів або вентилів мікроелектронної реалізації; $A = \sum_{j=1}^m V_j$

— часова складність визначається сумарною затримкою сигналів у максимальному числі послідовно з'єднаних вентилів. $\tau = \sum_{j=1}^m V_j$

— структурна складність визначається коефіцієнтом структурної складності згідно виразу $k_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i$ включає α_i — вагові коефіцієнти експертних оцінок інформативності компонентів атрибутів поліфункціональних даних (ПФД), P_i — параметри атрибутів ПФД.

Враховуючи також функціонально-інформативні характеристики ПФД $\sum_{j=1}^m f_j$ отримаємо кількісну оцінку структурної складності представлення елементів складної системи:

$$k_e = K \cdot \frac{\sum_{j=1}^m f_j}{\sum_{i=1}^n \alpha_i P_i} \Rightarrow \max,$$

K — ідентифікатор рівня ПФД ($K = n, \dots$ — відповідно для n -рівневих зображень).

У табл. 1 приведена символіка компонентів ПФД та коефіцієнти їх складності α_j .

Таблиця 1.

Символіка компонентів ПФД

№	Назва елемента	Символ	α_i	№	Назва елемента	Символ	α_i
1	Лінія		1	7	Направлений зв'язок		2
2	Поворот		2				3
3	Пересічення		3	8		Літера	Aa, Бб, ...
4	Дотик		2	9	Цифра	0, 1, 2, ..., 9	4
5	Розгалуження		2	10	Індекс	a, б, в, ..., 1, 2, 3, ...	4
6	Заливка		2	11	Знак	<, >, ,, ;, -, +, ...	2

На основі приведених аналітичних виразів оцінки апаратної, часової та структурної складності однорозрядних паралельних та послідовних неповних та повних двійкових суматорів розраховані їх системні характеристики, які приведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Системні характеристики суматорів

№	Структурне рішення	Системні характеристики, складність		
		апаратна	часова	структурна
1	Напівсуматори			
1.1	<p>а) б) в)</p>	а) $A = 2$ б) $A = 4$ в) $A = 3$	а) $\tau = 2$ б) $\tau = 3$ в) $\tau = 2$	а) $S = 118$ б) $S = 158$ в) $S = 192$
1.2		$A = 7$	$\tau = 10$	$S = 293$

Продовження табл. 2

№	Структурне рішення	Системні характеристики, складність		
		апаратна	часова	структурна
2	Повні суматори			
2.1	<p>а) б) в)</p>	<p>а) $A = 3$ б) $A = 4$ в) $A = 10$</p>	<p>а) $\tau = 4$ б) $\tau = 2$ в) $\tau = 3$</p>	<p>а) $S = 194$ б) $S = 334$ в) $S = 491$</p>
2.2	<p>а) б) в)</p>	<p>а) $A = 5$ б) $A = 5$ в) $A = 9$</p>	<p>а) $\tau = 3$ б) $\tau = 5$ в) $\tau = 5$</p>	<p>а) $S = 239$ б) $S = 254$ в) $S = 422$</p>
2.3		<p>а) $A = 10$ б) $A = 12$</p>	<p>а) $\tau = 4$ б) $\tau = 4$</p>	<p>а) $S = 417$ б) $S = 673$</p>

Продовження табл. 2

№	Структурне рішення	Системні характеристики, складність		
		апаратна	часова	структурна
2.3	<p>а) б)</p>			
2.4	<p>а) б) в)</p>	<p>а) $A = 9$ б) $A = 9$ в) $A = 10$</p>	<p>а) $\tau = 2$ б) $\tau = 2$ в) $\tau = 1$</p>	<p>а) $S = 643$ б) $S = 659$ в) $S = 656$</p>
2.5	<p>а) б)</p>	<p>а) $A = 12$ б) $A = 6$</p>	<p>а) $\tau = 3$ б) $\tau = 3$</p>	<p>а) $S = 637$ б) $S = 535$</p>

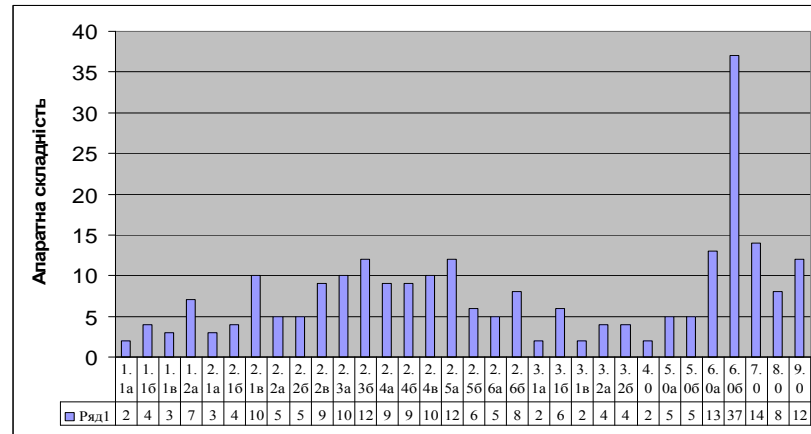
Продовження табл. 2

№	Структурне рішення	Системні характеристики, складність		
		апаратна	часова	структурна
2.6	<p>а) б)</p>	<p>а) $A = 5$ б) $A = 8$</p>	<p>а) $\tau = 5$ б) $\tau = 5$</p>	<p>а) $S = 375$ б) $S = 395$</p>
3	Послідовні суматори			
3.1	<p>а) б) в)</p>	<p>а) $A = 2$ б) $A = 6$ в) $A = 2$</p>	<p>а) $\tau = 2$ б) $\tau = 2$ в) $\tau = 2$</p>	<p>а) $S = 145$ б) $S = 240$ в) $S = 155$</p>
3.2	<p>а) б)</p>	<p>а) $A = 4$ б) $A = 4$</p>	<p>а) $\tau = 2$ б) $\tau = 4$</p>	<p>а) $S = 299$ б) $S = 210$</p>
4	Однорозрядний суматор по модулю 2			
	<p style="text-align: center;">а) a_i b_i</p>	<p>$A = 2$</p>	<p>$\tau = 2$</p>	<p>$S = 84$</p>
5	Однорозрядний СМ модульних операцій $(a_i + b_i) \bmod P_i$			
	<p>$P_i = 0$</p> <p>а) б)</p>	<p>а) $A = 5$ б) $A = 5$</p>	<p>а) $\tau = 1$ б) $\tau = 1$</p>	<p>а) $S = 253$ б) $S = 259$</p>

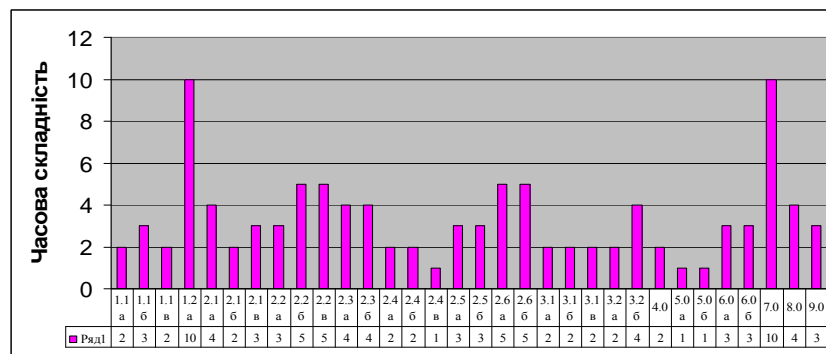
Продовження табл. 2

№	Структурне рішення	Системні характеристики, складність		
		апаратна	часова	структурна
6	Реалізація однорозрядних НС та СМ на ПЛМ			
	<p>а) б)</p>	<p>а) $A = 13$ б) $A = 37$</p>	<p>а) $\tau = 3$ б) $\tau = 3$</p>	<p>а) $S = 293$ б) $S = 628$</p>
7	Однорозрядні накоплюючі суматори СМ			
		$A = 7 \div 14$	$\tau = 2 \div 10$	$S = 177$
8	Синхронний суматор із вхідними регістрами пам'яті НС			
		$A = 8$	$\tau = 4$	$S = 367$
9	Суматор Унітарно-Хаара міжбазисного перетворення			
		$A = 12$	$\tau = 3$ $n = 4$	$S = 493$

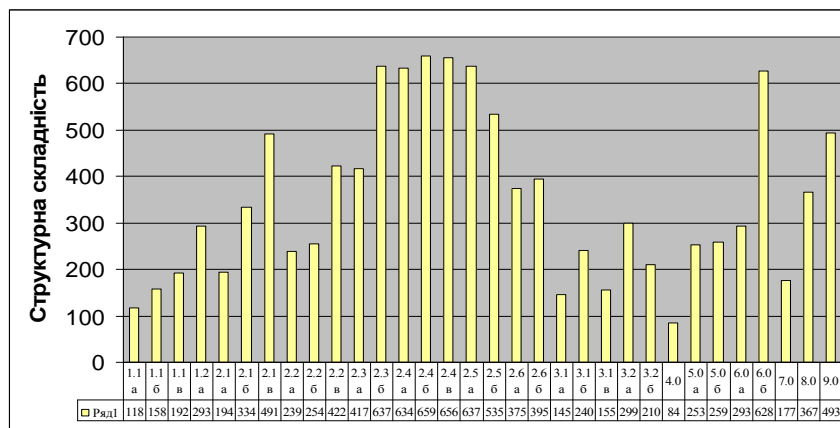
За результатами розрахунку апаратної, часової та структурної складності досліджуваних схемотехнічних рішень суматорів табл. 2 побудовані відповідні діаграми, які представлені на рис. 9.



а)



б)



в)

Рис. 9. Діаграми розрахунку апаратної (а), часової (б) та структурної (в) складності досліджуваних схемотехнічних рішень суматорів

Аналіз отриманих системних характеристик широкоживаних схемотехнічних рішень НС та СМ показує, що мінімальними характеристиками апаратної, часової та структурної складності характеризуються такі схеми № 2.4в, 4.0, 5.0а, 5.0б.

Отримані результати дослідження системних характеристик НС та СМ, які є базовими компонентами більш складних операційних пристроїв процесорів, дозволяють оптимізувати відповідні системні характеристики ПОС на основі мінімаксних критеріїв апаратної, часової та структурної складності. Особливу перспективу застосування такого класу компонентів цифрової техніки складає побудова багаторозрядних спецпроцесорів додавання великого числа двійкових кодів, матричнихперемножувачів у базисі Радемахера та Крестенсона, квадраторів, степеневих обчислювачів по модулю, а також спецпроцесорів міжбазисних перетворень Радемахера-Крестенсона, Хаара-Крестенсона, які дозволяють забезпечити супервисоку швидкодію ПОС.

ВИСНОВКИ

Викладені теоретичні засади побудови компонентів багаторозрядних ПОС. Класифіковані аналоговий, фізичний та цифровий абстрактний сигнали. Формалізовані параметри цифрових сигналів, які формуються та опрацьовуються у цифровій техніці. Систематизовані структури інформаційних, керуючих та інтерфейсних каналів, ключів, одно- та двонаправлених ключів та шин. Класифіковані базові типи паралельних та послідовних неповних та повних однорозрядних суматорів, у тому числі унітарні накоплюючі, а також по модулю 2 та модулю числа Р. Досліджені системні характеристики часової, апаратної та структурної складності однорозрядних суматорів, які виконують різні функції арифметики ПОС. Наведені аналітичні вирази оцінки характеристики багаторозрядних суматорів високопродуктивних ПОС у базисі Радемахера та побудовані відповідні порівняльні діаграми досліджених системних характеристик. Виконаний аналіз діаграм системних характеристик НС та СМ та подані рекомендації їх використання при побудові багаторозрядних ПОС у різних теоретико-числових базисах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов. — М. : Физматгиз, 1962. — 476 с.
2. Карцев М. А. Арифметика цифровых машин. — М. : Наука, 1969. — 535 с.
3. Майоров С. А. Принципы организации цифровых машин / С. А. Майоров, Г. И. Новиков — Л. : Машиностроение, — 1974. — 306 с.
4. Рабинович З. Л. Элементарные операции в вычислительных машинах / З. Л. Рабинович. — К. : Техніка, 1966. — 303 с.
5. Каган Б. М. Цифровые вычислительные машины и системы / Б. М. Каган, М. М. Каневский. — М. : Энергия, 1970. — 623 с.
6. Мельник А. О. Архітектура комп'ютера. Наукове видання. — Луцьк : Волинська обласна друкарня, 2008. — 470 с.
7. Акушский И. Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий — М. : Сов.радио, 1968. — 440 с.
8. Брюховин Е. Н. О принципе построения компьютеров, специализированных на вычислении некоторого набора специальных функций в мультипроцессорной вычислительной системе // Автоматика и вычислительная техника, 1983, № 12. — С. 45—51.
9. Червяков Н.И. Нейрокомпьютеры в остаточных классах / Н. И. Червяков, П. А. Сахнюк, А. В. Шапошников, А. Н. Макоха — М. : Радиотехника, 2003. — 272 с.
10. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації. — Монографія : Тернопіль: — ТНЕУ, 2008. — 536 с.
11. Волинський О. Систематизація характеристик теоретико-числових базисів та їх застосування для побудови високопродуктивних спецпроцесорів / О. Волинський, В. Пуял // Науковий журнал. — Тернопіль — 2011 — Том 16. № 3. — С. 183—189.
12. Глухов В. С. Особливості виконання операцій над матрицями в полях Галуа // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика». Вип. 564. Львів, 2006.
13. Гуменний П. В. Функціональна структура спецпроцесора вертикально-інформаційної технології та його компоненти. / П. В. Гуменний, Я. М. Николайчук// Вісник національного університету «Львівська політехніка», «Комп'ютерні системи та мережі». — 2012. — №745. — С. 69—77.
14. Николайчук Я. М. Теорія цифрових перетворень мультибазисного супершвидкодіючого процесора // Научно-теоретический журнал «Искусственный интеллект». ИПШ МОН і НАН України «Наука і освіта». — 2008. — № 4. — С. 387—394.
15. Кожемяко В. П. Оптоэлектронные параллельные вычислительные устройства / В. П. Кожемяко, О. Г. Натрошвили, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лисенко — Тбилиси : Изд-во Тбилисского университета, 1985. — 248.
16. Возна Н. Я. Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем // Н. Я. Возна- Вісник Хмельницького національного університету. — Хмельницький, 2015. — № 2 (223) — С. 204—208.
17. Николайчук Я. М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем / Навчальний посібник / Я. М. Николайчук, Н. Я. Возна, І. Р. Пітух.—Тернопіль : ТзОВ «Терно-граф». 2010. — 392 с., іл.

REFERENCES

1. Glushkov V. M. Synthesis of digital machines. / V. M. Glushkov /M. : Fyzmathyz, 1962. — 476 p.

2. Kartsev M. A. The arithmetic of digital machines. / M. A. Kartsev M. : Science, 1969. — 535 p.
3. Mayorov S. A. The principles of organization of digital computers / S. A. Mayorov, G. I. Novikov — L. : Engineering, —1974. — 306 c.
4. Rabinovich ZL Elementary operations in computers / S. L. Rabinowitz. — K. : Equipment, 1966. — 303 p.
5. Kagan BM Digital computers and systems / B. M. Kagan, M. N. Kanevskyy. — M. : Energy, 1970. — 623 p.
6. Melnyk A. Computer Architecture. Scientific vydannya. / A. Melnyk Lutsk : Volyn Oblast printing, 2008.— 470 s.
7. Akushskyy I. J. Computer arithmetic in the residual class / I. J. Akushskyy, D. I. Yudytskyy — M: Sov.radyo, 1968. — 440 p.
8. Bryuhovyn E. N. O On the principle of building computers, specialized on the calculation of a set of special functions in the multiprocessor computer system // Automation and Computer Science, 1983, № 12. — P. 45—51.
9. Chervyakov N. I. eurocomputers in the residual class / N. I. Chervyakov, P. A. Sahnyuk, A. V. Shaposhnikov, A. N. Makoha N. : Radio Engineering, 2003. 272 pp.
10. Nykolaychuk Ya. Theory informatsiyi. — sources. Monograph / Ya. Nykolaychuk Ternopol: — TNEU, 2008. — 536 s.
11. Volynskiy O. Organizing characteristics theoretic bases and applications for building high—performance special processors / O. Volynskiy, V. Puyul // Scientific journal. — Ternopil — 2011 — Vol 16. № 3. — S.183—189.
12. Glukhov V. S. Features Operations on matrices in Galois fields / V. S. Glukhov // Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic» «Computer systems design. Theory and Practice ». Vol. 564. Lviv, 2006.
13. Gumennyi P. V. Functional special processor structure vertical information technology and its components. / P. V. Gumennyi, Ya. M. Nykolaychuk // Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic», «Computer systems and networks». 2012. — № 745. —S. 69—77.
14. Nykolaychuk Ya. M. Theory digital transformation multybazysnoho supershvydkodiyuchoho processor / Ya. M. Nykolaychuk // Scientific and Theoretically journal «Artificial Intelligence». IAI MES and NAS of Ukraine «Science and education». — 2008. — № 4. — S. 387—394.
15. Kogemiako V. P. Optoelectronic parallel computing device / V. P. Kogemiako, OH Natroshvyly, LI Timchenko, GL Lysenko — bilisi: Publishing house of Tbilisi State University, 1985.—248.
16. Vozna N. Y. Basic theory of structuring elements of multifunctional complex systems // N. Y. Vozna- Bulletin Khmelnytsky National universytetu. — Khmelnytsky, 2015. — №2 (223) — S. 204—208.
17. Ya. M. Nykolaychuk Designing of specialized computer systems / Manual / Ya. M. Nykolaychuk, N. Y. Vozna, I. R. Pitukh., Ternopil, Ltd. «Terno-Count.» 2010. — 392 p.

Надійшла до редакції 24.05.2015 р.

КРУЛКОВСЬКИЙ БОРИС БОРИСОВИЧ — к. т. н., доцент, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна.

ДАВЛЕТОВА АЛІНА ЯРОСЛАВІВНА — аспірант кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Тернопільського національного економічного університету, м. Тернопіль, Україна.