

УДК 004.04

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.3>

## ТАБЛИЧНИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ЦІЛОЧИСЕЛЬНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ НЕПОЗИЦІЙНИХ КОДОВИХ СТРУКТУР

**Янко А. С.** – кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем  
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
ORCID ID: 0000-0003-2876-9316

**Торбенко О. С.** – магістр спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки» кафедри  
комп'ютерних та інформаційних технологій і систем  
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
ORCID ID: 0000-0003-0918-0821

У статті розглянуто основні недоліки сучасних комп'ютерних систем обробки цілочисельних даних (КСОЦД), що функціонують у позиційній системі числення (ПСЧ): наявність міжрозрядних зв'язків між операндами, що обробляються. Дані зв'язки суттєво впливають на архітектуру обчислювача та методи реалізації арифметичних операцій, що реалізуються КСЦОД, ускладнюють апаратуру та обмежують швидкодію виконання арифметичних операцій. Застосування основних методів підвищення продуктивності в ПСЧ, на основі розпаралелювання обчислень, шляхом використання деяких властивостей задач і алгоритмів, що реалізуються, не в усіх випадках дозволяє підвищити продуктивність КСОЦД. Як результат всі існуючі методи підвищення продуктивності в ПСЧ мають загальний недолік: неможливість розпаралелити розв'язувані алгоритми на рівні елементарних операцій. Наведено позитивні результати теоретичних та практичних досліджень, які показали ефективність застосування непозиційної системи числення в системі залишкових класів (СЗК) для підвищення продуктивності за рахунок табличного методу реалізації арифметичних операцій. Результати досліджень методів реалізації цілочисельних арифметичних операцій показали, що використання методу табличної обробки даних забезпечує максимально високу швидкодію виконання операцій додавання, віднімання і множення в СЗК. Кодування в непозиційній системі числення, а саме СЗК дозволяє синтезувати КСОЦД, в якому обробка всіх залишків числа проводиться паралельно в часі. Результат арифметичних модулних операцій може бути отримано в момент надходження вхідних чисел на табличний суматор, тобто в один такт. У цьому випадку час виконання арифметичних операцій у СЗК співрозмірний з тактовою частотою обчислювача, що принципово неможливо в позиційних двійкових КСОЦД при існуючій елементній базі.

**Ключові слова:** комп'ютерна система обробки цілочисельних даних, позиційна система числення, продуктивність, система залишкових класів.

**Yanko A. S., Torbenko O. S. Tabular method of increasing the productivity of integer data processing computer systems based on non-positional code structures**

The article discusses the main disadvantages of modern computer systems for processing integer data (CSPID) that function in the positional number system (PNS): the availability of inter-bit connections between the operands being processed. These connections significantly affect the architecture of the computer and methods of implementation of arithmetic operations implemented by CSPID, complicate the equipment and limit the speed of execution of arithmetic operations. In this regard, the increase in the productivity of CSPID in the PNS is primarily due to increasing the clock frequency, creating multiprocessor computing systems, optimizing the command system and command formats, taking into account the development of programming technology, etc., the development and application of methods and means of parallel data processing. The application of the main methods of increasing productivity in the PNS, based on the parallelization of calculations, by using some properties of the tasks and implemented algorithms, does not in all cases allow to increase the productivity of CSPID. As a result, all existing methods of increasing productivity in PNS have a common drawback: the impossibility of parallelizing solved algorithms at the level of elementary operations. The positive results of theoretical and practical research are presented, which showed the effectiveness of using a non-positional calculation system in the system of residual classes (SRC) to increase productivity due to the tabular method of implementing arithmetic operations. The results of studies of methods of implementation of integer arithmetic operations showed that the use of the tabular data processing method ensures the highest possible speed of performing operations of addition, subtraction and multiplication in SRC. Coding in a non-positional number system, namely SRC, allows synthesizing CSPIDs, in which the processing of all the remainders of the number is carried out in parallel in time. The result of arithmetic modular operations can be obtained at the moment of arrival of input numbers to the tabular adder, that is, in one cycle. In this case, the time of performing arithmetic operations in the SRC is commensurate with the clock frequency of the calculator, which is fundamentally impossible in positional binary CSPIDs with the existing element base.

**Key words:** computer system for processing integer data, positional number system, productivity, system of residual classes.

**Вступ.** В даний час існує ряд областей та напрямів науки і техніки, де є необхідність швидких, надійних та високоточних цілих арифметичних обчислень. Можна сміливо сказати, що у всіх галузях науки використовують цілочисельні арифметичні обчислення. Це в першу чергу такі галузі науки як: математика, фізика, астрономія, технічні науки, геодезія та метеорологія, метрологія, сейсмологія та ін. числами та поліномами; цілісне лінійне програмування; операції над числами та множинами; вирішення багатомірних NP-повних завдань; реалізація алгоритмів маршрутизації (алгоритми знаходження найкоротшого шляху); завдання множення векторів та матриць; завдання швидкого перетворення Фур'є та їх застосування; створення систем штучного інтелекту (нейромережні системи обробки даних); завдання військового призначення; цифрове оброблення сигналів; цифрове оброблення зображень; криптографічні перетворення; цілочисельна арифметика високої точності; вирішення завдань, пов'язаних із дослідженням космічного простору; високоточні цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворення тощо.

Результати досліджень, що проводилися протягом останніх десятиліть у галузі інформаційних технологій, різними групами вчених та інженерів методів підвищення продуктивності, надійності, живучості, а також достовірності обчислень комп'ютерних систем обробки даних, представлених у цілочисельному вигляді, показали, що в межах позиційної системи числення (ПСЧ) цього істотно досягти практично неможливо [1]. На цей час виник розрив між зростаючими вимогами до підвищення продуктивності комп'ютерних систем реального часу, з одного боку, і неможливістю задоволення цих запитів з урахуванням використання існуючих ПСЧ, з іншого боку. Ця обставина зумовила необхідність пошуку шляхів підвищення ефективності функціонування комп'ютерних систем обробки цілочисельних даних (КСОЦД).

**Сучасні методи підвищення продуктивності.** Підвищення продуктивності КСОЦД (вирішення більшої кількості завдань за менший час), що функціонують у ПСЧ, у більшості випадків досягається за рахунок застосування трьох груп методів: технологічних, архітектурних та математичних. Відповідно до цих напрямів відбувається розвиток сучасних КСОЦД. При цьому вони чинять один на одного взаємний вплив.

Удосконалення та використання технології виробництва сучасної елементної бази (виготовлення НВІС (FPGA) та ПЛІС (PLD)) дозволяє підвищувати тактову частоту роботи процесора КСОЦД. У цьому забезпечують зростання рівня інтеграції елементної бази. Підвищення тактової частоти сприяє також «зменшення» послідовних ланцюжків логічних елементів, що виконують елементарні перетворення даних за такт. Перехід до НВІС на кремнієвій основі суттєво покращило основні характеристики КСОЦД і насамперед продуктивність, надійність, габарити, споживану потужність [2]. Однак мініатюризація елементної бази на основі застосування НВІС та ПЛІС, крім невирішених проблем (мінімізація міжсхемних з'єднань між НВІС, зменшення кількості застосовуваних типів НВІС і т.д.), практично досягла межі. В даний час розмір топологічних елементів, що входять до НВІС, становить приблизно 0,5-0,1 мкм, а до кінця 2023 р. розмір цих елементів буде орієнтовно дорівнює менше 0,1 мкм. Подальше зменшення розмірів, елементів, що входять до НВІС, викликає значні труднощі, що полягають насамперед у наступному: вирішення проблеми контролю та діагностики НВІС; монтаж невеликих кристалів знижує деякі показники надійності КСОЦД; щільність упаковки елементів, що погіршує економічні показники; при зменшенні розмірів елементів НВІС виникає необхідність зниження робочих напруг, для яких межею можуть бути термодинамічні процеси, що відбуваються в них, наприклад, власні шуми. Водночас сам напівпровідниковий матеріал на кремнієвій основі має максимально допустимі значення напруженості електричного поля, які обмежують граничні розміри транзисторів [3].

Архітектурні методи підвищення продуктивності КСОЦД пов'язані з низкою напрямів розвитку архітектур: створення багатопроцесорних обчислювальних систем (SMP-системи), оптимізацією системи команд та форматів команд з урахуванням розвитку технології програмування, використанням методів та засобів паралельної обробки даних при виконанні команд тощо [4].

Математичні методи пов'язані зі створенням нових обчислювальних методів розв'язання класів (типів) завдань, що допускають розпаралелювання обчислювальних процесів.

У цьому плані очевидні два основних глобальних напрями у вирішенні завдання підвищення продуктивності КСОЦД: створення нової елементної бази обчислювальної техніки і розробка обчислювальної системи новаторської архітектури.

Зазначимо, що між цими двома напрямками підвищення продуктивності КСОЦД реального часу існує тісний зв'язок. Справді, нова елементна база КСОЦД, можливо, вимагатиме свого впровадження ефективнішого використання принципово нової організації обчислювального процесу з урахуванням новаторської архітектури КСОЦД. Створення обчислювальних структур глобальної обробки даних пред'являє підвищені вимоги до елементної бази КСОЦД шляхом її вдосконалення або створення принципово нової, відмінної від існуючої.

Розглянемо існуючі та можливі перспективні шляхи підвищення продуктивності. Як відомо, продуктивність є найважливішою технічною характеристикою КСОЦД і визначається кількістю обчислювальної роботи, що виконується за одиницю часу [5]. Для кількісних оцінок використовують поняття номінальної (пікової), системної та користувальницької продуктивності.

*Номінальна продуктивність* може бути вектором  $V_n = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ , тобто це максимальна кількість операцій, яка може бути виконана системою за одиницю часу за відсутності зв'язків між пристроями, де  $v_i$  – швидкість  $i$ -го пристрою обчислювальної системи. При оцінках продуктивності КСОЦД найчастіше виділяють продуктивність конкретного пристрою: процесора, оперативної та дискової пам'яті та інше. Зазначимо, що номінальна продуктивність характеризує лише потенційні можливості пристроїв. Працюючи у складі системи ці можливості, зазвичай, повністю не використовуються. Ступінь їх використання залежить від характеру та кількості розв'язуваних задач, інтенсивності вхідного потоку завдань, операційної системи (ОС), що виконує функції розподілу ресурсів системи та організації управління ними. Для характеристики ступеня використання потенційних можливостей пристрою у складі системи використовується показник завантаження  $p_i$   $i$ -го пристрою:

$$p_i = t_i / t_c$$

де  $t_i$  – час, протягом якого працював  $i$ -й пристрій за час  $t_c$  роботи системи.

*Системна продуктивність*  $V_c$  – визначається при вирішенні сукупності задач користувача певного класу та враховує спільну роботу пристроїв в системі під управлінням ОС:

$$V_c = (p_1 V_1, p_2 V_2, \dots, p_n V_n).$$

Однак слід врахувати, що показники  $p_i$  – залежать від великої кількості факторів, оцінка їх значень може бути отримана на основі статистичних даних за результатами моделювання. Отримання достовірних оцінок дуже важко. Тому показник системної продуктивності КСОЦД використовується рідко. Також можлива ситуація, коли користувачеві необхідно вирішити безліч порівняно невеликих незалежних завдань. З його погляду продуктивність КСОЦД і є системна продуктивність. Однак користувача завжди цікавить продуктивність КСОЦД, що реалізується при вирішенні одного конкретного свого завдання, так звана користувальницька продуктивність.

*Користувальницькою продуктивністю* називають продуктивність КСОЦД, яка досягається при вирішенні одного окремо взятого завдання.

Під продуктивністю КСОЦД нас цікавитиме лише користувальницька продуктивність, тобто. час вирішення одного конкретного завдання. В даний час намітилися або вже реалізуються такі шляхи підвищення користувальницької продуктивності КСОЦД:

- створення КСОЦД із набору процесорів або низки окремих засобів обробки інформації (багатомашинні комплекси та багатопроцесорні системи, конвеєрні (магістральні) обчислювальні системи тощо);

- використання деяких властивостей даного класу розв'язуваних завдань (природний паралелізм обчислень, паралелізм безлічі об'єктів, паралелізм незалежних гілок обчислень та суміжних операцій, штучний паралелізм та інше);

- використання різних (позиційних та непозиційних) систем числення при реалізації методів обробки даних;

- підвищення продуктивності на базі одного процесора шляхом використання принципово нової елементної бази;

- розробка нової архітектури надпродуктивного процесора на основі використання голографічного принципу обробки інформації.

Оцінимо вплив деяких показаних вище практичних шляхів підвищення продуктивності КСОЦД.

Використання безлічі окремих процесорів дозволяє підвищити системну продуктивність, залишаючи значення користувальницької продуктивності КСОЦД в одних і тих же межах. Крім цього, застосування даного методу підвищення продуктивності вимагає для своєї реалізації значної кількості обладнання, що обмежує його широке практичне застосування для бортових КСОЦД.

Розвиток сучасної мікроелектронної бази, що базується в основному на застосуванні ПЛІС, дало поштовх до дослідження можливості застосування табличних методів обробки інформації. Застосування табличних методів переробки інформації може забезпечити надвисоку продуктивність (за рахунок можливості розпаралелити елементарну операцію) та надійність, а також зумовлює високий рівень регулярності та однорідності структури пристроїв для їх реалізації. Істотним недоліком (який зумовлює труднощі, а в деяких випадках і неможливість їх практичної реалізації) табличних методів переробки інформації, які застосовуються в ПСЧ, залишається значна кількість обладнання. Так, нехай точність обчислень для КСОЦД ПСЧ становитиме величину  $Z$ , а основа системи числення дорівнює  $q$ . У цьому випадку число адрес, наприклад, для матричного пристрою, що дорівнює,  $q^Z$ . Для значень  $Z = 128$ ,  $q = 2$  число адрес дорівнює  $2^{128}$ , а число схем збігу  $I$  у вузлах матричного ПЗУ дорівнює  $2^{256}$ , що навряд чи доцільно і реалізовано для КСОЦД в ПСЧ.

Таким чином, із перерахованих можливих шляхів підвищення продуктивності – створення КСОЦД новаторської архітектури, яка реалізує принцип паралелізму обробці даних [6]. Всі існуючі та перспективні методи підвищення продуктивності в ПСЧ мають загальний недолік: неможливість розпаралелити розв'язувані алгоритми на рівні елементарних операцій.

Так як існуючі КСОЦД оперують з даними, представленими в ПСЧ, виникає труднощі організації процесу освіти та поширення цифр перенесення між двійковими розрядами операндів, що обробляються. Алгоритмічна зв'язок двійкових розрядів між двома числами при реалізації арифметичних операцій додавання між собою обумовлює той факт, що одинична відмова або збій схеми обробки одного двійкового розряду операційного пристрою здатний викликати не одноразову, а багаторазові помилки в машинному слові. До того ж саме наявність міжрозрядних зв'язків не дозволяє розпаралелити алгоритми, що вирішуються на рівні елементарних операцій [7].

**Табличний метод, як інструмент підвищення продуктивності.** Результати досліджень в області створення швидкодіючих КСОЦД відомих авторів (Валаха М., Свободи А., Сабо Н., Акушського І. Я., Юдицького Д. І., Николайчука Я. М.,

Долгова О. І., Торгашова В. А., Амербасва В. М., Shimbo A., Paulier P., Thornton M. A., Dreschler R., Miller D. M. та ін.) показали, що використання непозиційних кодових структур як системи числення КСОЦД, призначеної для реалізації цілочисельних арифметичних операцій, істотно підвищує швидкість вирішення задач певного класу, тобто підвищує користувальницьку продуктивність.

Кодування в непозиційній системі числення, а саме в системі залишкових класів (СЗК) дозволяє синтезувати КСОЦД, в якому обробка всіх залишків числа проводиться паралельно в часі. Структурна схема КСОЦД в СЗК являє собою набір процесорів, що функціонують незалежно один від одного і паралельно в часі, причому кожна за своїм певним модулем. У цьому випадку пристрої введення та виведення вирішують також відповідно задачу перетворення вхідної інформації КСОЦД з позиційного коду код СЗК і назад [1].

На підставі вимог, що пред'являються до КСОЦД, ґрунтуючись на перспективних концепціях розвитку комп'ютерних засобів швидкої обробки даних, а також у зв'язку з невирішеністю задачі створення високопродуктивних КСОЦД на основі використання ПСЧ, з одного боку, та з тенденціями, що розвиваються, використання непозиційних кодових структур у СЗК, з іншого боку, тема дослідження методів підвищення продуктивності КСОЦД, є дуже важливою, актуальною як на даному етапі, так і для подальшої перспективи розвитку обчислювальної техніки.

На основі використання трьох основних властивостей (незалежність, рівноправність і малорозрядність залишків, що визначають непозиційну кодову структуру в СЗК), непозиційна арифметика в СЗК, порівняно з ПСЧ, має такі істотні переваги:

- можливість розпаралелювання обчислень на рівні декомпозиції операндів, що суттєво підвищує їхню швидкість;
- можливість просторового рознесення елементів даних з можливістю їх подальшої асинхронної незалежної обробки;
- можливість табличного (матричного) виконання арифметичних операцій базового набору та поліноміальних функцій з однократною вибіркою результату модульної операції;
- можливість створення системи контролю та корекції КСОЦД з ефективним виявленням та виправленням збоїв та відмов;
- можливість контролю та корекції помилок у динаміці обчислювального процесу КСОЦД;
- можливість ефективного використання пасивної, а також активної відмовостійкості на основі оперативної реконфігурації структури КСОЦД;
- менша обчислювальна та часова складність для окремих класів (типів) цілих задач (операцій);
- вияв особливого властивості структури КСОЦД в СЗК, що забезпечує відсутність ефекту розмноження помилок при реалізації арифметичних операцій складання, віднімання та множення;
- пристосованість структури КСОЦД у СЗК для проведення оперативної діагностики блоків та вузлів обчислювача;
- можливість підвищення надійності КСОЦД в СЗК за рахунок ефективності одночасного використання пасивної та активної відмовостійкості.

Звичайно з усіх наведених переваг КСОЦД в СЗК для підвищення продуктивності головною перевагою є саме використання табличного методу реалізації арифметичних операцій. Результати досліджень методів реалізації цілочисельних арифметичних операцій показали, що використання методу табличної обробки даних забезпечує максимально високу швидкість виконання операцій додавання, віднімання і множення в СЗК. Результат арифметичних модульних операцій може бути отримано в момент надходження вхідних чисел на табличний суматор, тобто в один такт. У цьому випадку час виконання арифметичних операцій у СЗК

співрозмірний з тактовою частотою обчислювача, що принципово неможливо в позиційних двійкових КСОЦД при існуючій елементній базі [8].

**Висновок.** В даній статті уточнено та систематизовано можливі галузі науки і техніки, де є необхідність швидких, надійних та високоточних цілочисельних обчислень. Показано, що в ПСЧ досягти суттєвого «прориву» у цьому напрямі практично неможливо. Фактично ефективне застосування ПСЧ в електроніці досягла своєї межі, що зумовлює неможливість суттєвого підвищення продуктивності існуючих КСОЦД. Таким чином, до сьогодні не вирішено важливого та актуального науково-технічного завдання з розробки методів підвищення продуктивності КСОЦД на основі використання ПСЧ. Результати проведених у статті досліджень методів підвищення продуктивності показали, що у ПСЧ завдання підвищення продуктивності не може бути ефективно вирішено без погіршення деяких основних техніко-економічних показників КСОЦД. У той же час існують позитивні результати теоретичних та практичних досліджень, які показали ефективність застосування непозиційної системи числення в СЗК для підвищення швидкодії реалізації цілих арифметичних операцій.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Data processing in the system of residual classes / Krasnobayev V. et al. USA, Nevada : ASC Academic Publishing, 2019. 208 p. ISBN: 978-0-9989826-6-3 (Hardback), ISBN: 978-0-9989826-7-0 (Ebook)
2. Bosilca G., Delmas R, Dongarra J., Langou J. Algorithm-based fault tolerance applied to high performance computing. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. Academic Press, Inc. Orlando, FL, USA, 2009. Vol. 69. №4. P.410-416.
3. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design by David A. Patterson / under the editorship Morgan Kaufmann, 1 edition, 2016. 720 p. ISBN-10: 0128017333, ISBN-13: 978-0128017333.
4. David A. Patterson, John L. Hennessy. Computer Organization and Design, Fifth Edition: The Hardware/Software Interface. Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA, USA, 2013. 800 p. ISBN-13: 978-0124077263, ISBN-10: 0124077269.
5. Vears R. E. Microprocessor Based Systems for the Higher Technician. Kindle Edition. Newnes, 2016. 298 p.
6. Woods J. Stability of 2-D causal digital filters, using the residue theorem. *IEEE Trans. Acoust. Signal Processing*. New York, 1983. Vol. 31. № 3. P. 772-774.
7. Акушский И. Я. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Радио и связь, 1968. 444 с.
8. Krasnobayev V., Yanko A. and Koshman S. A Method for arithmetic comparison of data represented in a residue number system. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016. Vol. 52. Issue 1. P. 145-150.

### REFERENCES:

1. Krasnobayev V., Kuznetsov A., Yanko A., Koshman S., Zamula A. and Kuznetsova T. (2019). *Data processing in the system of residual classes*. ASC Academic Pub. Co. [in English]
2. Bosilca G., Delmas R, Dongarra J., Langou J. (2009). Algorithm-based fault tolerance applied to high performance computing. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. Orlando, FL, USA: Academic Press Pub. Co, vol. 69, no. 4, 410-416. [in English]
3. David A. Patterson (2016). *The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design by Morgan Kaufmann*, 1 edition. [in English]
4. David A. Patterson, John L. Hennessy (2013). *Computer Organization and Design, Fifth Edition: The Hardware/Software Interface*. San Francisco: Morgan Kaufmann Pub. Co. [in English]
5. Vears R. E. (2016). *Microprocessor Based Systems for the Higher Technician*. Kindle Edition. Newnes. [in English]
6. Woods J. (1983) Stability of 2-D causal digital filters, using the residue theorem. *IEEE Trans. Acoust. Signal Processing*. New York, vol.31, no 3, 772-774. [in English]
7. Akushskii I.Ya. and Yuditskii D.I. (1968) *Arifmetika mashiny v klassah ostatkov [Machine Arithmetic in Residual Classes]*. Moscow: Sov. Radio. [in Russian]
8. Krasnobayev V., Yanko A. and Koshman S. (2016) A Method for arithmetic comparison of data represented in a residue number system. *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 52, issue 1, 145-150. [in English]