

УДК 681.325.2

Н.І. ЗАБОЛОТНА, І.В. МУСІЙЧУК

## АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРЯДНО-ЗРІЗОВИХ ЛІНІЙНО- АЛГЕБРАЇЧНИХ ПРОЦЕСОРІВ З ПЛАВАЮЧОЮ КОМОЮ

*Вінницький національний технічний університет,  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,  
E-mail: irenkaua@o2.pl*

**Анотація.** В статті розглянуто можливості застосування розрядно-зрізових лінійно-алгебраїчних процесорів з плаваючою комою в сучасних складних системах, що потребують високошвидкісного та високоточного розв'язання задач лінійної алгебри. Показано основні архітектурні особливості таких процесорів, а також дано рекомендації щодо вибору елементної бази для практичної реалізації таких процесорів.

**Анотация.** В статье рассмотрено возможность использования разрядно-срезовых линейно-алгебраических процессоров с плавающей запятой в современных сложных системах, которые нуждаются в высокоскоростном и высокоточном решении задач линейной алгебры. Показано основные архитектурные особенности таких процессоров, а также даны рекомендации по выбору элементной базы для практической реализации таких процессоров.

**Abstract.** In the article it is considered the possibility of using bit-slice linear algebraic processors with floating-point in modern complex systems that require high speed and precision solving the tasks of linear algebra. It is shown basic architectural features of such processors and recommendations for choosing the element base for the practical implementation of such processors are included.

**Ключеві слова:** розрядно-зрізове оброблення, архітектурні особливості процесорів, задачі лінійної алгебри, оптоелектронна елемента база.

### ВСТУП

У сучасних умовах динамічного зростання ролі інформації в усіх галузях діяльності людини, завдання оперативного та якісного формування зображень та їх подальшої обробки займає чільне місце серед задач, що вимагають першочергового розв'язання. На даному етапі розвитку науки та техніки поняття зображення значно розширилося. Так, на сьогодні, під зображенням розуміють багатовимірні сигнали, що відповідають розподілам фізичних величин у просторі, таких як температура, інтенсивність випромінювання та інше, що мають місце у радіолокації, томографії, радіоастрономії, генній інженерії.

Для вирішення таких завдань, як проектування складних космічних систем, моделювання ядерних вибухів і криптографія, гідродинаміка і астрофізика, біомолекулярні дослідження і т.п., потрібні обчислювальні засоби з продуктивністю порядку  $10^{12}$  і більше операцій в секунду, що необхідно при обробленні величезних масивів інформації, часто в реальному масштабі часу. Для забезпечення такої продуктивності потрібна наявність високопаралельних процесорів, що безпосередньо реалізують в апаратурі базові операції лінійної алгебри.

Аналіз методів побудови обчислювальних пристроїв для виконання арифметичних операцій над великорозмірними даними [1-3] спонукає до пошуку нових методів, які б узгоджувалися з паралельними властивостями алгоритмів розв'язання поставлених задач.

Окрім значної продуктивності в багатьох сучасних задачах до процесорів висувається умова високої точності обчислень, що може бути досягнута за допомогою цифрового способу оброблення інформації, представленої у формі з плаваючою комою.

Поєднання високого рівня паралелізму обчислень з представленням вхідних зображень у цифровому вигляді з плаваючою комою за розрядними зрізами дасть можливість суттєво покращити характеристики обчислювальних засобів. Саме на таке поєднання паралелізму та точності направлені праці по створенню розрядно-зрізових лінійно-алгебраїчних процесорів з плаваючою комою.

Метою роботи є розгляд можливості застосування розрядно-зрізових лінійно-алгебраїчних процесорів з плаваючою комою з урахуванням їх архітектурних особливостей в сучасних складних системах, що потребують високошвидкісного та високоточного розв'язання задач лінійної алгебри.

## ФОРМУЛЮВАННЯ СИСТЕМНИХ ВИМОГ ДО ЛІНІЙНО-АЛГЕБРАЇЧНИХ ПРОЦЕСОРІВ ЯК БАЗОВИХ БЛОКІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У значній частині застосувань інформаційно-вимірювальних систем виникає необхідність виконувати певні операції лінійної алгебри над інтенсивними потоками даних в реальному масштабі часу на апаратних засобах з високою швидкістю. Зокрема це стосується прикладної обробки та аналізу зображень, в тому числі, аналізу супутникових знімків, для генерації зображень на основі даних, отриманих від радарів із синтезованою апертурою, реконструкції біомедичних зображень, адаптивному моделюванні в геофізичних дослідженнях.

Так, відома структурна схема (рис. 1) адаптивної антенної решітки [4], базовим блоком якої є адаптивний процесор, в основі роботи якого лежить розв'язання задач лінійної алгебри. В сучасних умовах при геофізичних дослідженнях паралельні потоки інформації, що поступають на адаптивний процесор мають розмірності порядку  $10^5$  і більше і таким чином висувають певні системні вимоги до проектування процесорів. Такими є: забезпечення паралельності оброблення великорозмірних даних, оброблення інформації з високою точністю, забезпечення паралельного введення та виведення потоків інформації та багатфункціональність.

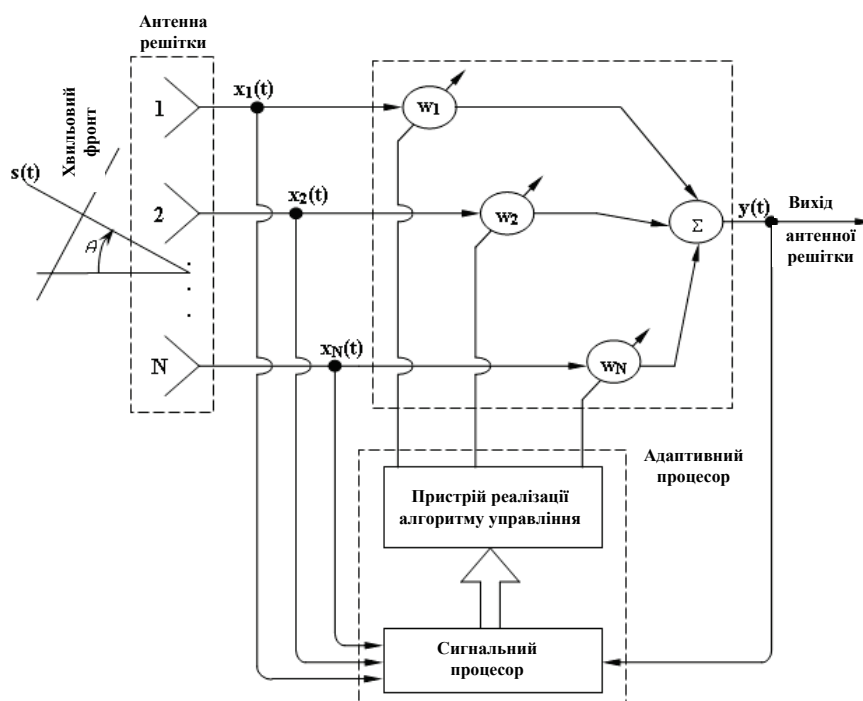


Рис. 1. Структурна схема адаптивної антенної решітки

Сучасні методи діагностування неможливо уявити без томографічних систем. Однак важливою ланкою в процесі діагностування є реконструкція томографічних зображень, в основу якої покладено розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Оскільки розмірності таких зображень є дуже великими, що призводить до збільшення часу їх оброблення на звичайних ЕОМ, що досягає декількох хвилин на одне зображення, виникає необхідність в створенні спеціалізованих процесорів як базових вузлів томографічних систем, які б дозволяли з високою точністю оброблювати зображення за значно менший час. Так, в роботі [5] запропоновано оптичний двохвильовий томограф (рис. 2), для суттєвого покращення його часових характеристик в якості блоку перетворення та оброблення зображень БПОЗ пропонується використання паралельного лінійно-алгебраїчного процесора.

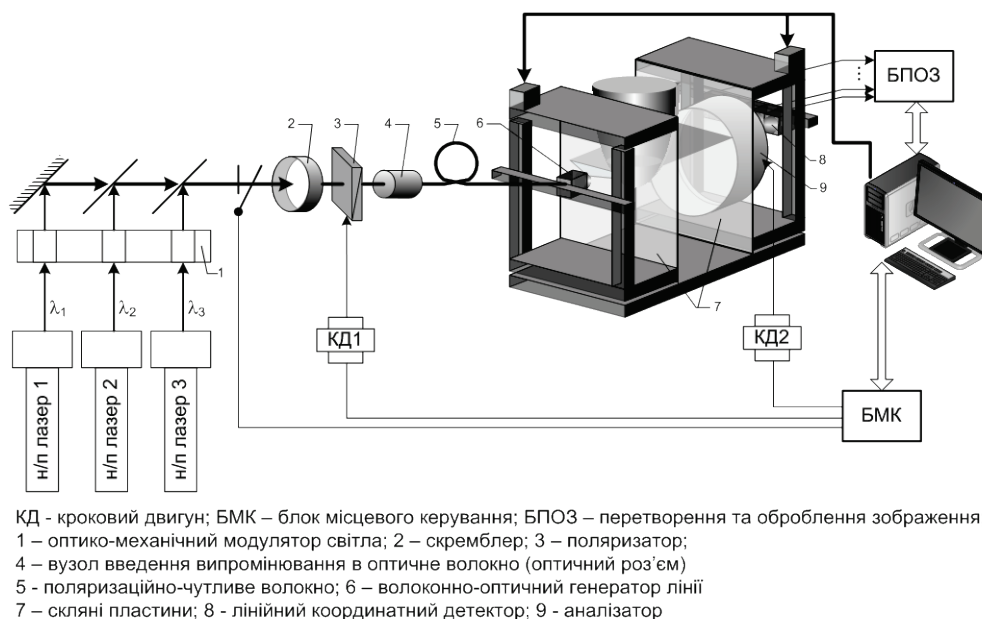


Рис. 2. Оптичний двохвильовий томограф

При створенні образного комп'ютера не можна обійтись без операцій лінійної алгебри, що повинні виконуватися в реальному часі та з високою точністю. Крім того, образний комп'ютер передбачає так звану око-процесорну обробку [6], до основних принципів якої належать:

- паралельне оброблення всіх елементів вхідного масиву;
- ітераційний характер процесу оброблення;
- базові операції – вилучення загальної складової всіх елементів масиву даних та паралельне підсумовування поточних загальних складових а кожній ітерації оброблення.

Отже, розв'язання сучасних складних науково-технічних задач в інформаційно-вимірвальних системах реального часу висуває системні вимоги до побудови їх базових блоків, а саме паралельних лінійно-алгебраїчних процесорів. Основними особливостями [7] ефективної апаратної реалізації паралельних процесорів є: 1) способи представлення даних, 2) розрядність та розмірність, 3) топологія внутрішньопроцесорних комунікацій 4) особлива структура пам'яті, пристроїв введення-виведення, 5) забезпечення спеціальної системи команд процесора та ін.

1. Представлення даних з плаваючою комою виявляється переважним в тих випадках, коли доводиться мати справу з числами із дуже великого діапазону. Така ситуація є типовою при проведенні науково-технічних розрахунків. Безумовно операції над числами з фіксованою комою виконуються швидше, ніж над числами з плаваючою комою, оскільки при реалізації останніх по суті доводиться виконувати дії з парами чисел з фіксованою комою. Однак представлення чисел з плаваючою комою дає набагато більшу відносну точність. Отже, виникає необхідність представлення всіх вхідних, проміжних та вихідних даних у формі з плаваючою комою.

2. Більшість вхідних та вихідних даних являють собою матриці чисел, що для забезпечення високої точності мають велику розмірність, тому їх краще подавати у вигляді наборів розрядних зрізів (РЗ), при чому сама схема їх оброблення повинна бути адекватною вигляду існування вхідної та вихідної інформації.

3. Необхідність використання природний паралелізму матричних обчислень, при розв'язанні задач лінійної алгебри, визначає доцільність своєї найкращої реалізації на матричних обчислювальних системах, де кожному процесорному елементу (ПЕ) ставиться у відповідність один елемент розрядного зрізу матричного операнду. Така організація обумовлює введення в структуру процесора як локальних, так і глобальних взаємозв'язків між ПЕ, які вдало можуть бути поєднані при використанні методу оброблення матричних операндів за розрядними зрізами.

4. Введення (чи доступ в пам'ять) та виведення знакозмінних матричних операндів в матричній системі оброблення зображень здійснюється паралельно за РЗ за рахунок використання пристроїв паралельного введення з паралельними входами-виходами, названих аналого-цифровими картинними перетворювачами (АЦКП), чи шляхом використання сторінкової пам'яті з паралельним доступом до будь-якої її комірки.

5. Використання спеціального блоку керування для забезпечення паралельного виконання

операцій кожним ПЕ, з регулярним надходженням вхідної інформації з пам'яті та синхронним спрацюванням необхідних блоків.

### АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗРЯДНО-ЗРІЗОВИХ ЛІНІЙНО-АЛГЕБРАІЧНИХ ПРОЦЕСОРІВ З ПЛАВАЮЧОЮ КОМОЮ

З огляду на висунуті системні вимоги, а також на необхідність універсалізму процесорів для розв'язання задач лінійної алгебри, пропонуються архітектурні особливості багатofункціонального розрядно-зрізового лінійно-алгебраїчного процесора з плаваючою комою. В роботі [8] було запропоновано обчислювальну систему оброблення зображень на основі цифрових оптикоелектронних процесорів (ЦОЕП), загальна архітектура (рис. 3) якої містить: пристрої введення (ПВВ1-ПВВn) з паралельними оптичними входом-виходом, призначені для введення багатоградацийних зображень шляхом перетворення в набір бінарних розрядних зрізів, картинні ПЗП і ОЗП з картинними виходами і, зокрема, стековою організацією, блок D-тригерів картинного типу (БД КТ), призначений для запису, зберігання і зчитування однієї або декількох оптичних цифрових картин, пристрої картинного виведення (ПВив1-ПВивn), призначені для відображення результуючої цифрової інформації у вигляді багатоградацийних зображень, комутатор і розгалужувач оптичних цифрових картин (КОЦК і РОЦК), а також багатofункціональний багатоканальний блок обробки (БФБО) з оптичними тригерами картинного типу для запам'ятовування настроювальних керувальних операторів, що відображають алгоритм виконання обраного виду операції. Для загального управління можливе використання мікро-ЕОМ. До складу БФБО можуть входити картинний логічний пристрій, оптикоелектронний двомірний регістр зсуву, помножувач матриць, цифровий суматор, а також інші спеціалізовані функціональні вузли, склад яких може легко нарощуватися і визначається необхідними елементарними операціями, за якими розкладаються завдання обробки зображень, що вирішуються цим ЦОЕП.

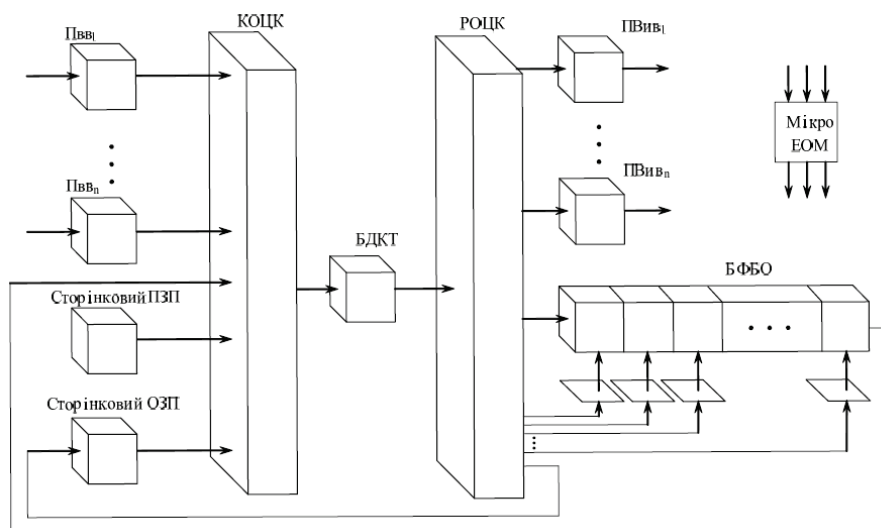


Рис. 1. Обчислювальна система оброблення зображень на основі цифрових оптикоелектронних процесорів

Пропонується удосконалити цю загальну концепцію побудови обчислювальної системи на основі цифрових оптикоелектронних процесорів, а саме – запропонувати архітектурні особливості ЦОЕП, що є нічим іншим, як лінійно-алгебраїчним процесором, які б задовольняли сучасним вимогам оброблення інформації.

На загальний час виконання задачі головним чином впливають два фактори [7] – час виконання арифметичних операцій та час взаємодії з пам'яттю. Головною вимогою до пам'яті є забезпечення малого часу доступу до окремих слів. Цей час повинен бути набагато менший за час виконання операції над словами, або в крайньому випадку сумірний з ним. Найшвидшою є регістрова пам'ять, що має невеликий об'єм та зберігає ті результати виконання операції, які необхідні для виконання наступної операції. А в архітектурі лінійно-алгебраїчного процесора передбачається застосування принципів розподіленої пам'яті, де регістрова пам'ять є невід'ємною частиною АЛП. Крім того, передбачається ефективне керування кожним функціональним блоком лінійно-алгебраїчного процесора своїм власним міні блоком керування, що може видавати як одиничні сигнали керування базовими блоками, так і матричні керуючі сигнали, спів мірні з розмірністю вхідних даних.

Багатofункціональність процесора полягає в можливості розв'язання набору різних задач лінійної алгебри, серед яких основне місце належить розв'язанню систем лінійних алгебраїчних рівнянь

(СЛАР) за паралельним методом та матрично-матричному множенню. А також процесор передбачає можливість звернення до основних вузлів для розв'язання СЛАР як до самостійних блоків, що можуть реалізовувати додавання (віднімання) числових матриць, множення вектора на число, ділення вектора на число, порівняння двох матриць, пошук максимального (мінімального) елемента матриці (вектора), транспонування матриць та ін.

Вхідні, проміжні та вихідні дані в розрядно-зрізовому лінійно-алгебраїчному процесорі з плаваючою комою представляються в загальному випадку як знакомінні  $N \times N$ -вимірні матриці  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$  в формі з плаваючою комою в прямому коді у вигляді наборів із  $S=(M+P+2)$  бінарних розрядних зрізів (PЗ), що мають розмірність відповідних матриць (рис. 4):

$$\mathbf{A} = \{ \mathbf{Sg}_{m_A=0}, \mathbf{A}_{m_A=1}, \dots, \mathbf{A}_{m_A=M}, \mathbf{Sg}_{p_A=M+1}, \mathbf{A}_{p_A=M+2}, \dots, \mathbf{A}_{p_A=S} \};$$

$$\mathbf{B} = \{ \mathbf{Sg}_{m_B=0}, \mathbf{B}_{m_B=1}, \dots, \mathbf{B}_{m_B=M}, \mathbf{Sg}_{p_B=M+1}, \mathbf{B}_{p_B=M+2}, \dots, \mathbf{B}_{p_B=S} \},$$

де  $\mathbf{Sg}_{m_A=0}, \mathbf{Sg}_{m_B=0}$  – знакові PЗ відповідно мантиси матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ ;  $\mathbf{A}_{m_A}, \mathbf{B}_{m_B}$  – інформаційні PЗ мантиси матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ ;  $\mathbf{Sg}_{p_A=M+1}, \mathbf{Sg}_{p_B=M+1}$  – знакові PЗ порядку матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ ;  $\mathbf{A}_{p_A=S}, \mathbf{B}_{p_B=S}$  – інформаційні PЗ порядку матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ ;  $m_A, m_B$  – порядкові номери PЗ просторових кодів мантиси матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ ;  $p_A, p_B$  – порядкові номери PЗ просторових кодів порядку матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ ;  $M, P$  – число інформаційних PЗ мантиси і порядку матриць  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{B}$ .

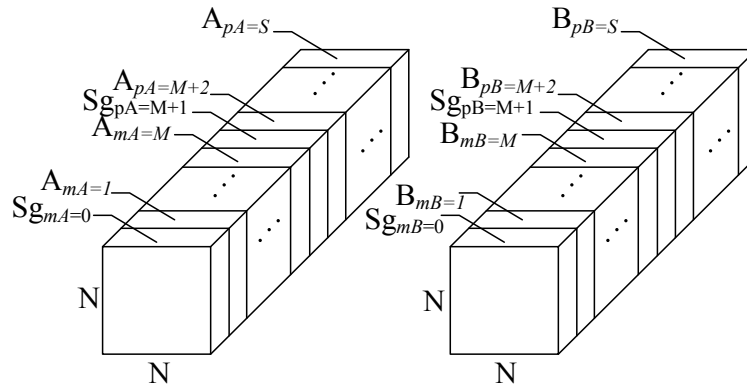


Рис. 4. Представлення даних за розрядними зрізами

Таке подання вхідних даних обумовлює використання матричної архітектури, де кожному процесорному елементу (ПЕ) ставиться у відповідність один елемент розрядного зрізу матричного операнду.

Одним з основних напрямів підвищення продуктивності процесорів є розпаралелювання процесу обробки інформації аж до елементарних операцій і децентралізація функцій пам'яті і перетворення інформації. Притаманні оптичним методам зв'язку властивості [9]: паралелізм, висока швидкодія, низький рівень перехресних завад, відсутність емнісних навантажень, програмованість та ін. – передбачають переважне використання оптики в обчислювальній техніці. А тому, найкращою на даний час елементною базою для практичної реалізації таких лінійно-алгебраїчних процесорів є оптоелектроніка. Зокрема, всі функціональні блоки розрядно-зрізового лінійно-алгебраїчного процесора з плаваючою комою можна представити на рівні елементарних операцій І, ПІ, АБО, які, однак, повинні бути матричного виду для забезпечення паралелізму оброблення даних.

В цьому випадку заслуговує на розгляд оптоелектронний пристрій на основі транспарантів з повним набором логічних операцій для роботи з матрицями, запропонований в роботі [10]. Даний пристрій має ряд переваг над відомими транспарантами, оскільки є універсальним, що полягає у можливості виконання ним різних логічних операцій, дає змогу досить гнучко і вдало застосовувати його у спеціалізованих обчислювальних системах для обробки, прийому та передачі даних без втрати швидкості та з набагато легшою реалізацією, ніж логічних елементів на відомих транспарантах. А отже, при застосуванні таких пристроїв в якості логічних елементів І, АБО, ПІ для розрядно-зрізового лінійно-алгебраїчного процесора з плаваючою комою можна суттєво зменшити апаратні витрати на його реалізацію. Крім того, пристрій виконує логічну операцію І над матрицею за час  $t_I = 19,73nc$ ; операцію АБО за  $t_{АБО} = 49,75nc$ ; а операцію ПІ за  $t_{ПІ} = 16,49nc$ , що на два порядки менший в порівнянні з відомими транспарантами, а отже застосування його в якості базового блоку може суттєво збільшити швидкодію розрядно-зрізового лінійно-алгебраїчного процесора з плаваючою комою.

## ВИСНОВКИ

В статті розглянуто можливості застосування розрядно-зрізових лінійно-алгебраїчних процесорів з плаваючою комою в сучасних складних системах, зокрема показано їх місце в системах радіолокації при побудові адаптивних решіток, в системах медичної діагностики в складі оптичного двохвильового томографа, що потребують високошвидкісного та високоточного розв'язання задач лінійної алгебри при надвеликих розмірностях вхідних даних. Показано основні архітектурні особливості таких процесорів, що передбачають матричну організацію архітектури з розподіленою регістровою пам'яттю, паралельне введення, оброблення та виведення інформації за розрядними зрізами в формі з плаваючою комою. Також показано перспективи використання оптоелектронної елементної бази для практичної реалізації таких процесорів, зокрема використання оптоелектронного пристрою на основі транспарантів з повним набором логічних операцій для роботи з матрицями.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

9. Заболотна Н. І. Сучасні методи побудови оптико-електронних обчислювальних пристроїв для лінійно-алгебраїчних процесорів / Н. І. Заболотна, В. В. Шолота // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця. – 2001. – №2. – С.63-70.
10. Вербовецкий А. А. Современные методы создания оптической цифровой вычислительной техники / А. А. Вербовецкий // Зарубежная радиоэлектроника. – 1999. – №6. – С. 12-50.
11. Заболотна Н. І. Концепції та підходи до побудови спецпроцесорів для ітераційного розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь / Н. І. Заболотна, І. В. Мусійчук, С. В. Костюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця. – 2008. – №2(16). – С. 34-41.
12. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз – М. : Радио и связь, 1989. – 438 с.
13. Патент України № 53678, МПК<sup>8</sup> А01В 8/13. Оптичний двохвильовий томограф / Н.І. Заболотна, С.С. Тужанський, І.В. Мусійчук, В.В. Шолота, Б.П. Олійниченко; заявник та патентовласник ВНТУ – № u201005394; заявл. 05.05.10; опубл. 11.10.10, Бюл. №19.
14. Кожемяко В.П. Класифікаційна модель створення прототипу образного комп'ютера / В.П. Кожемяко, Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко – Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології: – 2006. – №2(12). – С. 129 – 141.
15. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин – СПб. : БВХ-Петербург, 2004. – 608 с.
16. Заболотная Наталия Ивановна. Организация вычислительных структур высокопроизводительных линейно-алгебраических процессоров параллельной обработки матриц : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Заболотная Наталия Ивановна. – Винница, 1996. – 214 с.
17. Оптические вычисления / Под ред. Р.Аратуна. – М.: Мир, 1993. – 441с.
18. М'ялківська І.В. Використання оптичних транспарантів для спеціалізованих обчислювальних систем / І. В. М'ялківська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 123 – 129.

Надійшла до редакції 01.06.2011р.

**ЗАБОЛОТНА Н.І.** – к.т.н., доцент, декан факультету функціональної електроніки та лазерної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**МУСІЙЧУК І.В.** – аспірант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.