

УДК 681.142:612.822

Проф. І.Г. Цмоць, д-р техн. наук; доц. Я.П. Кісь,
канд. техн. наук; студ. О.В. Скорохода – НУ "Львівська політехніка"

ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Проаналізовано засоби реалізації та шляхи побудови штучних нейромереж реального часу, вибрано принципи розроблення, розглянуто основні етапи синтезу апаратних засобів, визначено основні шляхи підвищення ефективності використання обладнання та вдосконалено метод просторово-часового відображення нейроалгоритмів в узгоджено-паралельні структури.

*Prof. I.G. Tsmots; assoc. prof. Ya.P. Kis; stud. O.V. Skorokhoda –
NU "L'vivs'ka Politekhnik"*

Integrated approach to the synthesis of high-performance hardware neural network real-time technology

Facilities technique and ways of construction of artificial networks of real-time were analyzed, principles of development were selected and main stages of synthesis of hardware design were considered. Main ways of rise of efficiency equipment were detected and method of spatio-temporal mapping of neuroalgorithm into consistently parallel structure was improved.

Вступ. Для сучасного етапу розвитку штучних нейромережєвих (ШНМ) технологій характерне розширення сфер застосування. Йдеться насамперед про ті галузі, специфіка яких потребує опрацювання за складними алгоритмами у реальному часі різних за інтенсивністю надходження потоків даних на апаратних засобах (АЗ), що задовольняють обмеженням щодо габаритів, енергоспоживання, вартості та часу розроблення. Створення таких АЗ потребує широкого використання сучасної елементної бази (напівзамовних і замовних НВІС, однокристальних мікропроцесорів) та розроблення нових методів, алгоритмів і НВІС-структур для реалізації нейроалгоритмів.

Аналіз задач, що розв'язуються за допомогою ШНМ, методів і алгоритмів їхнього розв'язання виявив такі особливості [1]:

- великий об'єм обчислень з перевагою обчислювальних операцій над логічними;
- постійність і висока інтенсивність надходження даних;
- регулярність і рекурсивність алгоритмів;
- можливість розпаралелювання процесу оброблення як у часі, так і в просторі.

Для забезпечення розв'язання задач у реальному часі за допомогою ШНМ продуктивність АЗ повинна бути:

$$\Pi \geq \frac{\beta R F_d k n_d}{N n},$$

де: Π – складність алгоритмів розв'язання задач; β – коефіцієнт врахування особливостей засобів реалізації алгоритму; R – кількість операцій, потрібна для реалізації алгоритму; F_d – частота надходження даних у каналах; k – кількість каналів надходження даних; n_d – розрядність каналів надходження даних; N – величина і n – розрядність вхідного масиву даних.

Режим реального часу під час оброблення інтенсивних потоків даних за складними алгоритмами забезпечується розпаралелюванням і конвеєризацією процесів обчислень і використанням нових технологічних досягнень в області розроблення надвеликих інтегральних схем (НВІС). З огляду на це, актуальним завданням є розроблення високоефективних АЗ для ШНМ реального часу.

Постановка задачі та формулювання мети дослідження. Для розроблення конкурентноздатних та ефективних ШНМ реального часу потрібно використовувати НВІС і просторово-часове розпаралелювання. У паралельно-конвеєрних ШНМ реального часу висока ефективність використання обладнання досягається завдяки узгодженню інтенсивності надходження потоків даних з обчислювальною інтенсивністю АЗ. Аналіз існуючих варіантів апаратної реалізації ШНМ реального часу [2] виявив такі недоліки:

- забезпечення режиму реального часу потребує великих затрат обладнання;
- велика вартість і терміни розроблення ШНМ реального часу для розв'язання конкретних задач;
- не враховуються вимоги конкретних застосувань щодо габаритів і споживаної потужності;
- алгоритми оброблення та архітектури ШНМ не зорієнтовані на НВІС-реалізацію і не забезпечують узгодження інтенсивності надходження даних з інтенсивністю обчислень;
- апаратні засоби ШНМ реального часу мають низьку ефективність використання обладнання.

Для усунення перерахованих недоліків пропонуємо розробити апаратні узгоджено-паралельні ШНМ, які просто адаптуються до вимог конкретних застосувань і забезпечують високу ефективність використання обладнання.

Метою цього дослідження є вибір принципів, засобів реалізації та шляхів підвищення ефективності використання обладнання, розроблення методу синтезу високоефективних АЗ для ШНМ реального часу.

Виклад основного матеріалу. *Аналіз і вибір засобів комп'ютерної реалізації алгоритмів ШНМ.* Ефективність комп'ютерної реалізації алгоритмів ШНМ безпосередньо пов'язана з вибором засобів реалізації: програмних, мікропрограмних або апаратних [1, 2].

Під час програмної реалізації алгоритмів ШНМ обчислювальні процеси переважно розгортаються в часі з великим обсягом пересилання інформації між оперативною пам'яттю і операційними пристроями. Програмні засоби є доступними для програміста, перед яким виникає задача мінімізації обсягу програм і часу їх реалізації за заданої точності обчислень. Вказані засоби характеризуються низькою швидкістю і гнучкістю з погляду можливості модифікації та заміни алгоритмів.

Мікропрограмна реалізація обчислень потребує їхнього розгортання як у часі, так і в просторі. Під час мікропрограмування є доступ до системи мікропрограм процесора, що забезпечується застосуванням постійної пам'яті, програмованих логічних матриць, а також оперативних запам'ятовувальних пристроїв, використовуваних як пам'ять мікропрограм. Прикладом мікропрограмної реалізації є реалізація алгоритмів ШНМ на базі одноманітних об-

числювальних середовищ (ООС). Процесор на базі ООС – це двовимірна регулярна матриця процесорних елементів (ПЕ), кожен з яких фізично пов'язаний входом-виходом з чотирма сусідами – зверху, знизу, зліва та справа [2]. Кожний ПЕ може виконувати набір бітових операцій перетворення інформації з вхідних каналів у вихідні. Процесор на базі ООС є універсальною системою, тобто в ньому можливо реалізувати довільну обчислювальну функцію. Бітовий рівень ПЕ та повна система комутації дають змогу реалізувати розпаралелення обчислень на найнижчому бітовому рівні. У цьому полягає істотна перевага мікропрограмної реалізації алгоритмів ШНМ. Реалізації повною мірою потенційних можливостей мікропрограмних засобів може бути досягнуто лише за умови глибокого вивчення задачі, яка розв'язується, та внутрішньої мови процесора. Мікропрограмні засоби реалізації алгоритмів ШНМ, порівняно з програмними, є більш швидкодіючими.

Успіхи інтегральної технології дають змогу дедалі більше перекладати реалізацію алгоритмів ШНМ на апаратні засоби, які розгортають обчислення не тільки у часі, а і в просторі. Такі обчислення потребують додаткового обладнання і уникають проміжних пересилань інформації в процесі обчислення, а також спрощують функції місцевого управління. В основі структурної організації апаратних засобів покладено принцип адекватного апаратного відображення поточкових графів алгоритмів ШНМ на комбінаційну матрицю, процесорні елементи якої реалізують функціональні оператори та з'єднані між собою відповідно з поточковим графом алгоритмом [3]. Синтезовані за таким принципом структури є алгоритмічними. В алгоритмічних структурах алгоритм виконується над вхідними даними за їх одноразового проходження через всі ПЕ. За режимами роботи такі структури діляться на синхронні та асинхронні. В асинхронних (однотактних) структурах оброблення даних здійснюється без проміжних запам'ятовувань. Продуктивність таких структур визначається часом виконання найскладніших функціональних операторів Φ_{ij} алгоритму, які є на шляху проходження даних. Кожна однотактна структура послідовна з погляду реалізації функціональних операторів Φ_{ij} . Це є причиною обмеженої швидкодії та неефективного використання обладнання під час оброблення інтенсивних потоків даних у реальному часі. Тому для оброблення потоків даних доцільно використовувати синхронні структури з конвеєрною реалізацією графів алгоритмів, яка потребує суміщення у часі виконання функціональних операторів алгоритму над різними даними. Апаратні засоби уможливають з максимальною швидкістю реалізовувати алгоритми ШНМ, скоротити витрати на створення та експлуатацію програм. Це доступно тільки розробникам архітектур ШНМ.

Потрібно зазначити, що всі види реалізації алгоритмів в безпосередньому вигляді трапляються досить рідко. На практиці в більшості випадків для реалізації алгоритмів функціонування ШНМ використовують комбіновані підходи з перевагою одного з перерахованих засобів. Переважання того чи іншого засобу визначається вимогами, які ставляться до ШНМ за швидкістю, габаритами, потужністю споживання та ціною.

Аналіз і вибір варіантів побудови комп'ютерних ШНМ реального часу.
Розглянемо три основні варіанти побудови ШНМ реального часу:

- на основі універсальних і функціонально зорієнтованих мікропроцесорів шляхом розроблення спеціалізованого програмного забезпечення;
- на основі універсального обчислювального ядра, доповненого базовими апаратно-програмними компонентами, які реалізують часомісткі алгоритми функціонування ШНМ;
- у вигляді спеціалізованої алгоритмічної системи, архітектура та організація обчислювального процесу в якій відображає структуру алгоритму розв'язування задачі.

Перший варіант є доступним для широкого кола користувачів. Істотною його перевагою є можливість використання раніше розроблених програм. Його вадами є невисока швидкодія, функціональна і структурна надлишковість комп'ютерних засобів.

Другий варіант є перспективним, оскільки він поєднує універсальні та спеціальні засоби. Таке поєднання забезпечує високу ефективність використання обладнання під час створення систем для опрацювання у реальному часі потоків даних за алгоритмами, які є нерегулярними з великою кількістю логічних операцій. При цьому розроблення апаратних засобів з заданими технічними параметрами зводиться до доповнення обчислювального ядра додатковими апаратно-програмними компонентами.

Третій варіант зорієнтований на оброблення у реальному часі інтенсивних потоків даних за складними алгоритмами. При цьому висока ефективність використання обладнання досягається узгодженням обчислювальної здатності апаратних засобів з інтенсивністю надходження потоків даних. Використання для побудови апаратних засобів обчислювальних полів на основі ПЛІС з динамічним репрограмуванням відкриває нові можливості, пов'язані з оперативним переналаштуванням ПЛІС на реалізацію конкретного алгоритму. Другий і третій варіанти є найперспективнішими для синтезу ШНМ реального часу з високою ефективністю використання обладнання.

Принципи розроблення апаратних засобів ШНМ. Архітектури ШНМ реального часу повинні повною мірою використовувати можливості НВІС-технології, враховувати вартість площі кристала, а також кількість вхідних і вихідних виводів. Число зовнішніх виводів НВІС обмежене рівнем технології та величиною кристалу. В основу побудови ШНМ реального часу пропонується покласти принципи, які дадуть змогу зменшити вартість, терміни і розширити галузі їх застосування. Аналіз показує [5], що забезпечити ці вигоди можна, використавши такі принципи:

- модульність, тобто розроблення компонентів АЗ у вигляді функціонально завершених пристроїв (модулів), що мають вихід на стандартний інтерфейс;
- узгодженість інтенсивності надходження даних з обчислювальною здатністю АЗ;
- конвеєризація та просторовий паралелізм оброблення даних;
- одноманітність та регулярність архітектури ШНМ;
- локалізація та спрощення зв'язків між елементами АЗ;
- відкритість програмного забезпечення, що створює можливості його нарощування та вдосконалення, максимального використання стандартних драйверів та програмних засобів;
- спеціалізація та адаптація апаратно-програмних засобів до структури алгоритмів оброблення та інтенсивності надходження даних;

- програмованість архітектури шляхом використання репрограмованих логічних інтегральних мікросхем.

Синтез апаратних засобів ШНМ реального часу. Пропонуємо створити високоефективні АЗ для ШНМ реального часу здійснювати на основі інтегрованого підходу, який ґрунтується на можливостях сучасної елементної бази та охоплює методи, алгоритми паралельних обчислень, архітектури апаратних засобів, враховує вимоги конкретних застосувань та інтенсивності надходження даних.

При цьому задача синтезу АЗ для ШНМ реального часу зводиться до формування множин вимог $R=\{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, характеристик $H=\{H_1, H_2, \dots, H_m\}$ і обмежень $B=\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ та знаходження такого вектора $H^*=[H_1^*, H_2^*, \dots, H_m^*]$, $H_i^*=f_i(R, H, B)$, $i=1, \dots, m$, який забезпечить максимальне значення ефективності використання обладнання $E=\max f(R, H^*, B)$.

Множину вимог R становить: R_1 – кількість каналів надходження даних m_d ; R_2 – розрядність каналів надходження даних n_d ; R_3 – частота надходження даних F_d ; R_4 – швидкодія елементної бази, яка визначається часом затримки вентиля t_κ ; R_5 – кількість елементів (слів) вхідного масиву N ; R_6 – розрядність вхідного слова n . Множину характеристик H становлять: H_1 – загальна кількість зв'язків Z ; H_2 – просторова зв'язкова віддаль Δj ; H_3 – конвеєрний такт t_κ ; H_4 – витрати обладнання W ; H_5 – кількість типів функціональних вузлів s ; H_6 – кількість каналів введення $m_{\text{вв}}$; H_7 – розрядність каналів введення $n_{\text{вв}}$; H_8 – кількість виводів інтерфейсу зв'язку Y . Обмеження B , які потрібно враховувати під час синтезу апаратних засобів реального часу, такі: B_1 – точність обчислення, яка визначається розрядністю результату n_p ; B_2 – час обчислення $T_{\text{обч}}$, повинен бути $T_{\text{обч}} \leq T_{\text{обм}}$, де $T_{\text{обч}} = \frac{t_\kappa N n}{m_{\text{вв}} n_{\text{вв}}}$, $T_{\text{обм}}$ – час обміну, який можна визначити так:

$$T_{\text{обм}} = \frac{N n}{F_d m_d n_d}.$$

Для вибору варіанту АЗ реального часу використовують критерій ефективності використання обладнання E , який враховує кількість виводів інтерфейсу, однорідність структури, кількість і локальність зв'язків, пов'язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам (вентильям) компонента за продуктивністю [2]. Кількісну величину ефективності використання обладнання для такого апаратного засобу визначають таким чином:

$$E = \frac{m_\kappa n_\kappa}{t_\kappa N n (k_1 \sum_{i=1}^s W_{\phi Y_i} d_i + k_2 Q + k_3 Y)},$$

де: $W_{\phi Y_i}$ – витрати обладнання у вентилях на реалізацію i -го функціонального вузла, d_i – кількість функціональних вузлів i -го типу, k_1 – коефіцієнт врахування одноманітності $k_1=f(s)$, k_2 – коефіцієнт врахування регулярності зв'язків $k_2=f(\Delta j)$, k_3 – коефіцієнт врахування кількості виводів інтерфейсу зв'язку $k_3=f(Y)$.

Конвеєрний такт t_k визначають за формулою $t_k = \sum_j^l \max t_{\epsilon}$, де l – кіль-

кість послідовно з'єднаних вентилів у найповільнішій сходинці конвеєра, а Δj – як різниця просторових індексів.

Етапи синтезу апаратних засобів. Синтез АЗ складається із таких етапів: вибору та розроблення методів і алгоритмів узгоджено-паралельного оброблення, визначення основних параметрів та переходу від алгоритму до структури [3].

Під час вибору та розроблення методів і алгоритмів узгоджено-паралельного оброблення враховують вимоги R і характеристики H , але визначальним є забезпечення обмежень B . Для оцінки розроблених алгоритмів використовують характеристики: інформаційні, операційні та точності. До інформаційних характеристик належать: кількість констант, вхідних, вихідних і проміжних даних, кількість каналів і їх розрядність, кількість і види операцій. Операційні характеристики дають змогу оцінити час реалізації та обчислювальну здатність. До характеристик точності алгоритму відносять: розрядність операційних пристроїв, способи заокруглення. В інформаційних технологіях узгоджено-паралельного оброблення сигналів у реальному часі потрібно забезпечити взаємозв'язок і узгодження параметрів апаратних засобів. Для апаратних засобів реального часу одним із найважливіших параметрів є узгодженість інтенсивності надходження даних із обчислювальною інтенсивністю на всіх етапах оброблення.

До основних параметрів оцінки апаратних засобів реального часу, крім витрат обладнання, швидкодії, ефективності використання обладнання пропонуємо використовувати обчислювальну здатність. Для асинхронних (однотактних) апаратних засобів, оброблення даних в яких відбувається без проміжних запам'ятовувань, обчислювальну здатність можна визначити так:

$$D_o = \frac{m_o n_o}{\sum_{j=1}^h \max_k t_{BO_k}},$$

де: m_o – кількість каналів надходження даних; n_o – розрядність каналів; h – кількість послідовно з'єднаних операційних блоків, t_{OB_k} – час реалізації операційними блоками найскладніших функціональних операторів Φ_{jk} .

Кожна однотактна структура є послідовною з погляду реалізації функціональних операторів Φ_{jk} . Це є причиною обмеженої швидкодії та неефективного використання обладнання під час оброблення інтенсивних потоків даних у реальному часі. Тому для оброблення потоків даних доцільно використовувати синхронні структури з конвеєрною реалізацією графів алгоритмів, у яких відбувається суміщення у часі виконання функціональних операторів алгоритму над різними даними. Конвеєризація структур апаратних засобів потребує розділення їх на сходинки шляхом введення буферної пам'яті. При цьому кожна сходинка конвеєра складається з двох компонентів: буферної пам'яті та операційних пристроїв, які реалізують функціональні операто-

ри ярусу. Для забезпечення високої швидкодії та ефективності використання обладнання функціональні оператори, які реалізуються у сходінках конвеєра, мають бути простими та мати приблизно однаковий час реалізації. Однотактні алгоритмічні пристрої можна розглядати як одноступінчастий конвеєр. Тому актуальним є синтез конвеєрних структур апаратних засобів реального часу з високою ефективністю використання обладнання.

У конвеєрних АЗ обчислювальна здатність визначається так:

$$D_k = \frac{m_k n_k}{t_{БП} + t_{ОБ}},$$

де: $t_{БП}$ – час звертання до буферної пам'яті; $t_{ОБ}$ – час обчислення операційним блоком найскладнішого функціонального оператора Φ_{jk} ; m_k – кількість каналів надходження даних у сходінках конвеєра; n_k – розрядність каналів надходження даних у сходінках конвеєра.

Шляхи підвищення ефективності використання обладнання. В АЗ для ШНМ реального часу висока ефективність використання обладнання досягається мінімізацією витрат обладнання у разі забезпечення реального часу. Перехід від алгоритму розв'язання задачі в реальному часі до структури АЗ формально зводиться до мінімізації витрат обладнання

$$W_{АЗ} = W_{ШП} + W_{П} + W_{ПУ} + \sum_{i=1}^k W_{ПЕ_i} m_i,$$

де: $W_{АЗ}$, $W_{ПУ}$, $W_{ШП}$, $W_{П}$, $W_{ПЕ}$ – витрати обладнання відповідно на АЗ для ШНМ, пристрої управління, інтерфейсні пристрої, пам'ять; k – кількість типів процесорних елементів, i -й процесорний елемент; m_i – кількість процесорних елементів i -го типу, за дотримання такої умови:

$$\frac{Nn}{F_d m_d n_d} \geq \frac{t_k Nn}{m_{\text{вв}} n_{\text{вв}}}. \quad (1)$$

Основними шляхами мінімізації АЗ для ШНМ реального часу є:

- врахування величини зміни елементів даних;
- вибір ефективних методів і алгоритмів реалізації функціональних операторів;
- зменшення розрядності операційних пристроїв, пам'яті, кількості та розрядності каналів передачі даних;
- узгодження інтенсивності надходження даних із обчислювальною здатністю апаратних засобів.

Метод просторово-часового відображення нейроалгоритмів в узгоджено-паралельні структури. Для переходу від алгоритму до структури АЗ для ШНМ реального часу потрібно розробити узгоджений потоковий граф [3-8]. Цей процес розробляння можна розбити на такі чотири етапи:

- декомпозиція алгоритму розв'язання задачі;
- проектування комунікацій (обмінів даними) між функціональними операторами;
- укрупнення функціональних операторів;
- планування обчислень.

На етапі декомпозиції алгоритм розв'язання задачі Φ розбивають на функціональні оператори Φ_i , між якими установлюються зв'язки, що відповідають цьому алгоритму. Чим більший ступінь деталізації алгоритму отримуємо внаслідок декомпозиції, тим гнучкішим буде алгоритм і тим легше можна здійснити його адаптацію до виконання завдання. Декомпозицію можна здійснювати за методом декомпозиції даних або функціональної декомпозиції. Використання методу функціональної декомпозиції дає змогу отримати просторово-часове відображення структури алгоритму на рівні операцій Φ_i , які використовуються під час НВІС-реалізаціях. Під час використання методу декомпозиції даних спочатку сегментуються дані, а потім алгоритми оброблення. Вибір методу декомпозиції залежить як від структури даних, так і від алгоритму розв'язання задачі. На практиці для синтезу високоефективних алгоритмічних структур реального часу використовують метод функціональної декомпозиції, за якого алгоритм Φ розбивають на операції Φ_i , кожна із яких може бути реалізована операційними блоками певного рівня ієрархії. Час і спосіб виконання операції Φ_i операційним блоком є одними із основних параметрів під час визначення конвеєрного такту роботи T_k і розрядності каналів надходження даних n_k для алгоритмічних структур реального часу. Результатом першого етапу розроблення є графічна схема алгоритму, де функціональні оператори Φ_i мають приблизно однаковий час виконання, а їхня складність визначається засобами реалізації.

На етапі проектування комунікацій для конвеєрної алгоритмічної реалізації алгоритму потрібно визначити структуру каналів обміну даними між функціональними операторами Φ_i . Для цього виконують перехід від граф-схеми алгоритму до потокового графу, в якому здійснюють просторово-часове розміщення і закріплення функціональних операторів Φ_i за ярусами. Структура зв'язків у потоковому графі між функціональними операторами Φ_{jk} сусідніх ярусів визначає кількість каналів надходження даних m_j і структуру з'єднань між операційними блоками під час апаратної реалізації алгоритму. У більшості алгоритмів цифрової оброблення сигналів передача даних між ярусами виконується методами досконалого тасування або обмінної перестановки.

За результатами перших двох етапів розроблення отримуємо потоковий граф, який дає змогу оцінити обчислювальну здатність D_k алгоритмічних апаратних засобів. Вихідними даними для визначення обчислювальної здатності D_k є m_k – кількість каналів надходження даних, n_k – розрядність даних, складність функціональних операторів Φ_i , особливості і швидкодія елементної бази. Використовувана елементна база і її швидкодія є визначальними для оцінки такту роботи T_k апаратних засобів. Для оцінки узгодженості інтенсивності надходження даних P_d із обчислювальною здатністю D_k вводиться коефіцієнт узгодженості, який визначається так:

$$R = \frac{D_k}{P_d}.$$

Узгодження обчислювальної здатності D_k апаратних засобів із інтенсивністю надходження даних P_d досягають шляхом зміни тривалості такту T_k

або кількості m_k і розрядності n_k каналів надходження даних у потоковому графі. Під час розроблення узгодженого потокового графу алгоритму для реалізації апаратних засобів з високою ефективністю використання обладнання потрібно насамперед максимально використати особливості та швидкодію елементної бази, тобто визначити складність функціональних операторів Φ_i і мінімізувати тривалість такту T_k . Потім треба змінювати кількість m_k і розрядність n_k каналів у потоковому графі, яка напряду пов'язана з використовуваною елементною базою. Зміна параметрів потокового графу алгоритму має забезпечити узгодження обчислювальної здатності D_k апаратних засобів із інтенсивністю надходження даних P_d .

У випадку, коли $R=1$, розроблений узгоджений поточковий граф забезпечує отримання узгоджено-паралельної структури пристрою реального часу з високою ефективністю використання обладнання.

Якщо $R<1$, то для забезпечення оброблення потоків даних у реальному часі потрібно збільшити обчислювальну здатність D_k , цього можливо досягти збільшенням кількості каналів m_k , їхньої розрядності n_k або зменшенням такту конвеєра T_k , що досягається зменшенням складності функціональних операторів Φ_i . У разі, коли зміною перерахованих параметрів не вдається досягнути належної обчислювальної здатності D_k , використовують паралельне включення алгоритмічних апаратних засобів, кількість яких можна визначити з виразу:

$$h = \lceil 1/R \rceil$$

де $\lceil \rceil$ – знак заокруглення до більшого цілого.

У разі, коли $R>1$, для забезпечення високої ефективності використання обладнання потрібно переходити до третього етапу розроблення – укрупнення функціональних операторів Φ_{jk} . На цьому етапі здійснюється об'єднання функціональних операторів Φ_{jk} і каналів передачі даних у ярусах потокового графа, або об'єднання функціональних операторів сусідніх ярусів. Граф алгоритму, який отримаємо внаслідок такого об'єднання, будемо називати узгодженим поточковим графом. Коефіцієнт об'єднання v можна визначити так:

$$v \leq \lfloor D_k/P_d \rfloor,$$

де $\lfloor \rfloor$ – знак округлення до меншого цілого.

Внаслідок об'єднання функціональних операторів v сусідніх ярусів утворюється один ярус функціональних макрооператорів, у якому за v ітерацій виконують обчислення таких функціональних макрооператорів V . Обчислення у середині ярусу здійснюється із тактом T_k , який визначають складність функціональних операторів Φ_{jk} а між ярусами з макротактом $T_{mk} = vT_k$. Об'єднання функціональних операторів сусідніх ярусів приводить до зменшення у v разів кількості ярусів. Таке об'єднання доцільно здійснювати, коли яруси потокового графа є однотипними. Інше укрупнення здійснюють шляхом об'єднання функціональних операторів і каналів передачі даних у межах ярусу. Для випадку, коли $v \geq L$ укрупнення здійснюють шляхом лінійної проєкції, за якої всі функціональні оператори ярусу потокового графу зливаються в один функціональний макрооператор, а канали передачі даних – у оператор затримки та перестановки даних. Для забезпечення узгодженості може викорис-

товуватися комбіноване укрупнення, тобто об'єднання функціональних операторів і каналів передачі даних як у середині ярусу, так і між ярусами.

Структура узгодженого потокового графу алгоритму можна виразити орієнтованим графом $G = \langle V, E, D(E) \rangle$, де V – функціональні макрооператори ярусу; E – орієнтовані дуги, які моделюють зв'язки між функціональними макрооператорами. Кожна дуга $e \in E$ зв'язує вихід одного функціонального макрооператора з входом другого та має вагу, яка дорівнює значенню затримки $D(e)$.

Етап укрупнення тісно пов'язаний з етапом планування, на якому після об'єднання функціональних операторів для збереження інформації про структуру потокового графу алгоритму здійснюється планування обчислень, визначають величини затримок і перестановки даних. Для відтворення обчислень у кожний ярус узгодженого графу вводять оператори управління затримки та перестановки даних.

Для апаратного відображення узгодженого потокового графу алгоритму характерне те, що кожному функціональному макрооператору V відповідають багатофункціональні операційні пристрої, які забезпечують виконання операцій ярусу, операторам затримки – буферна паралельна пам'ять, яка може забезпечити потрібну затримку та перестановку даних, а операторам управління – пристрої керування, які керують багатофункціональними операційними пристроями і буферною пам'яттю.

Процес розроблення узгодженого потокового графу алгоритму є ітераційним, він тісно пов'язаний з покращенням характеристик алгоритму.

Висновки

1. Для вибору апаратних засобів для ШНМ реального часу запропоновано використовувати критерій ефективності використання обладнання, який враховує кількість виводів інтерфейсу, одноманітність структури, кількість і локальність зв'язків, пов'язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам системи за продуктивністю.
2. Основними шляхами підвищення ефективності використання АЗ для ШНМ реального часу є: врахування величини зміни значень даних; вибір ефективних методів і алгоритмів реалізації апаратних засобів; зменшення розрядності операційних пристроїв, пам'яті, кількості та розрядності каналів передачі даних; узгодження інтенсивності надходження даних із обчислювальною здатністю апаратних засобів на всіх рівнях.
3. Визначено, що узгодження інтенсивності надходження даних із обчислювальною здатністю АЗ для ШНМ реального часу може здійснюватися шляхом зміни тривалості конвеєрного такту, кількості і розрядності каналів надходження даних.
4. Основними етапами синтезу АЗ для ШНМ є: вибір та розроблення методів і алгоритмів узгоджено-паралельного оброблення; визначення основних параметрів апаратних засобів; перехід від алгоритму до узгодженої паралельної структури.
5. Для переходу від алгоритму до структури апаратних засобів систем реального часу використовують узгоджений потоковий граф, основними етапами формування якого є: декомпозиція алгоритму розв'язання задачі; проектування комунікацій (обмінів даними) між функціональними операторами; укрупнення функціональних операторів; планування обчислень.

Література

1. **Круглов В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – 2-е изд., стереотип / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М. : Изд-во "Горячая линия-Телеком", 2002. – 382 с.
2. **Галушкин А.И.** Нейрокомпьютеры. – М. : Изд-во "ИПРЖР", 2000. – Кн. 3. – 528 с.
3. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации : пер. с польского. – М. : Изд-во "Финансы и статистика", 2002. – 344 с.
4. **Цмоць І.Г.** Інформаційні технології та спеціалізовані засоби оброблення сигналів і зображень у реальному часі. – Львів : Вид-во УАД, 2005. – 227 с.
5. **Параллельная обработка информации.** – в 5-и т. / АН УССР. Физ.-мех. ин-т. – К. : Вид-во "Наук. думка", 1984. – Т. 5: Проблемно-ориентированные и специализированные средства обработки информации / А.И. Аксенов, В.В. Аристов, Е.Ю. Барзилович и др. / под ред. Б.Н. Малиновского и В.В. Грицика. – 1990. – 504 с.
5. **Грушицкий Р.И.** Проектирование систем на микросхемах программируемой логики / Р.И. Грушицкий, А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов. – СПб. : Изд-во "БХВ-Петербург", 2002. – 608 с.
6. **Воеводин В.В.** Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – СПб. : Изд-во "БХВ-Петербург", 2002. – 608 с.
7. **Немнюгин С.А.** Параллельное программирование для многопроцессорных систем / С.А. Немнюгин, О.Л. Стесик. – СПб. : Изд-во "БХВ-Петербург", 2002. – 400 с.
8. **Касьянов В.Н.** Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В.Н. Касьянов, В.А. Евстигнеев. – СПб. : Изд-во "БХВ-Петербург", 2003. – 1104 с.

УДК 64.036

*Доц. О.Р. Марець, канд. екон. наук;
асист. О.М. Вільчинська – Львівський НУ ім. Івана Франка*

ОЦІНЮВАННЯ СТУПЕНЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДОХОДІВ НАСЕЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗМІЩЕНИХ КРИВИХ ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ

Використано інструментарій зміщених кривих щільності розподілу доходів для оцінювання ступеня поляризації населення України. Сформульовано висновок про негативний вплив на поляризацію населення за доходами збільшення величини соціальних нормативів. Встановлено, що штучне підвищення грошових доходів (за інших однакових умов) посилить поляризацію населення за доходами.

Ключові слова: поляризація доходів, крива щільності розподілу, від'ємний дохід, індекс поляризації доходів, концентратор поляризації доходів, концентратор поляризації населення.

*Assoc. prof. O.R. Marets; assist. O.M. Vilchynska –
L'viv NU named after Ivan Franko*

Income polarization assessment through dislodged density distribution curves

Density distribution curves are used to estimate the Ukrainian population income's polarization. It was made a conclusion about the negative impact on the income polarization because of income increasing value of social norms. It is set that the artificial increase of money profits (at other identical terms) will strengthen polarization of population after profits.

Keywords: income polarization, density distribution curve, negative income, income polarization index, income polarization concentrator, population polarization concentrator

Соціальна політики держави, спрямована на зменшення поляризації населення за доходами. Теоретично, такі заходи як збільшення величини со-