

В.В. Грицик, Ю.В. Опотяк, І.Г. Цмоць

**ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ  
ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ  
РЕАЛЬНОГО ЧАСУ**

**Вступ**

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій обробки сигналів характеризується розширенням галузей застосування, в значній частині з яких вимагається опрацювання за складними алгоритмами у реальному часі різних за інтенсивністю надходження потоків даних на апаратних засобах, що задовольняють обмеженням щодо габаритів, енергоспоживання, вартості та часу розробки. Створення таких апаратних засобів вимагає широкого використання сучасної елементної бази (напівзаповнених і заповнених НВІС, однокристальних процесорів цифрової обробки сигналів (ЦОС)) та розробки нових методів, алгоритмів і НВІС-структур для реалізації алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Режим реального часу при обробці інтенсивних потоків даних за складними алгоритмами забезпечується розпаралелюванням та конвеєризацією процесів обчислень. У апаратних паралельно-конвеєрних засобах інформаційних технологій обробки сигналів у реальному часі висока ефективність використання обладнання досягається узгодженням їх обчислювальної здатності з інтенсивністю надходження даних. Побудову таких засобів можна здійснювати так:

- на основі універсальних і програмованих процесорів ЦОС шляхом розробки спеціалізованого програмного забезпечення;
- обчислювального ядра, орієнтованого на задачі обробки сигналів, доповненого базовими апаратно-програмними компонентами, які реалізують основні алгоритми інформаційних технологій ЦОС;
- у вигляді спеціалізованої алгоритмічної системи, архітектура та організація обчислювального процесу в якій відображає структуру алгоритму розв'язання задачі.

Перший варіант є доступним для широкого кола користувачів.

© Грицик В.В., Опотяк Ю.В., Цмоць І.Г., 2006

Істотною його перевагою є можливість використання раніше розроблених програм. Його недоліками є невисока швидкодія, функціональна і структурна надлишковість комп'ютерних засобів.

Другий варіант є перспективним, оскільки він передбачає поєднання універсальних і спеціальних засобів. Таке поєднання забезпечує високу ефективність використання обладнання при створенні систем для опрацювання у реальному часі потоків даних за алгоритмами, які є нерегулярними з великою кількістю логічних операцій. При цьому розробка апаратних засобів з заданими технічними параметрами зводиться до доповнення обчислювального ядра додатковими апаратно-програмними компонентами.

Третій варіант орієнтований на обробку 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, які пов'язані з оперативним переналаштуванням ПЛІС на реалізацію конкретного алгоритму.

Другий і третій варіанти передбачають розробку апаратно-програмних компонентів для синтезу інформаційних технологій обробки сигналів у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема розроблення апаратних засобів, архітектура яких легко адаптується до вимог конкретних застосувань, забезпечує високу ефективність використання обладнання та орієнтована на узгоджено-паралельну обробку сигналів у реальному часі [1].

#### **Інтегрований підхід до задачі синтезу апаратних засобів.**

Пропонується створення високоефективних апаратних засобів інформаційних технологій обробки сигналів у реальному часі 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 і інтенсивності надходження даних.

При цьому задача синтезу апаратних засобів ОС узгоджено-паралельної обробки сигналів у реальному часі зводиться до формування множин вимог  $\mathbf{R}=\{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ , характеристик  $\mathbf{H}=\{H_1, H_2, \dots, H_m\}$  і обмежень  $\mathbf{B}=\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$  та знаходження такого вектора  $\mathbf{H}^*=[H_1^*, H_2^*, \dots, H_m^*]$ ,  $H_i^*=f_i(R, H, B)$ ,  $i=1, \dots, m$ , який забезпечить максимальне значення ефективності використання обладнання  $E=\max f(R, \mathbf{H}^*, B)$ .

Множину вимог  $\mathbf{R}$  складає:  $R_1$  - 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  $t_b$ ;  $R_5$  - кількість елементів (слів) вхідного масиву  $N$ ;  $R_6$  - розрядність вхідного слова  $n$ . Множину характеристик  $\mathbf{H}$  становлять:  $H_1$  - загальна кількість зв'язків  $Z$ ;  $H_2$  - просторова зв'язкова віддаль  $\Delta j$ ;  $H_3$  - конвеєрний такт  $t_k$ ;  $H_4$  - витрати обладнання  $W$ ;  $H_5$  - кількість типів функціональних вузлів  $s$ ;  $H_6$  - кількість каналів введення  $m_{bv}$ ;  $H_7$  - розрядність каналів введення  $n_{bv}$ ;  $H_8$  - кількість виводів інтерфейсу зв'язку  $Y$ . Обмеження  $\mathbf{B}$ , які необхідно враховувати при синтезі апаратних засобів реального часу, є наступними:  $B_1$  - точність обчислення, яка визначається розрядністю результату  $n_p$ ;  $B_2$  - час обчислення  $T_{обч}$ , повинен бути  $T_{обч} \leq T_{обм}$ , де  $T_{обч} = \frac{t_k N n}{m_{bv} n_{bv}}$ ,  $T_{обм}$  - час обміну, який

визначається так

$$T_{обм} = \frac{Nn}{F_d m_d n_d}.$$

Для вибору варіанту апаратного засобу реального часу використовується критерій ефективності використання обладнання  $E$ , який враховує кількість виводів інтерфейсу, однорідність структури, кількість і локальність зв'язків, зв'язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам (вентиліям) компонента за продуктивністю [2]. Кількісна величина ефективності використання обладнання для такого апаратного засобу визначається наступним чином:

$$E = \frac{m_k n_k}{t_k N n (k_1 \sum_{i=1}^s W_{\phi Y_i} d_i + k_2 Q + k_3 Y)}$$

де  $W_{\Phi y_i}$  - витрати обладнання у вентилях на реалізацію  $i$ -о функціонального вузла,  $d_i$  - кількість функціональних вузлів  $i$ -о типу,  $k_1$  - коефіцієнт врахування однорідності  $k_1=f(s)$ ,  $k_2$  - 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  $t_k$  визначається за формулою  $t_k = \sum_j^l \max t_{\sigma}$ , де  $l$  - кількість послідовно з'єднаних вентилів у найповільніші сходиці конвеєра, а  $\Delta j$  - як різниця просторових індексів.

### Етапи синтезу апаратних засобів

Синтез апаратних засобів складається із наступних етапів: вибору та розробки методів і алгоритмів узгоджено-паралельної обробки, визначення основних параметрів та переходу від алгоритму до структури [3].

При виборі та розробці методів і алгоритмів узгоджено-паралельної обробки враховуються вимоги **R** і характеристики **H**, але визначальним є забезпечення обмежень **B**. Для оцінки розроблених алгоритмів використовуються характеристики: інформаційні, операційні та точності. До інформаційних характеристик відносяться: кількість констант, вхідних, вихідних і проміжних даних, кількість каналів і їх розрядність, кількість і види операцій. Операційні характеристики дозволяють оцінити час реалізації та обчислювальну здатність. До характеристик точності алгоритму відносяться: розрядність операційних пристроїв, способи округлення. У інформаційних технологіях узгоджено-паралельної обробки сигналів у реальному часі необхідно 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 обробки.

До основних параметрів оцінки апаратних засобів реального часу, крім витрат обладнання, швидкодії, ефективності використання обладнання пропонується використовувати обчислювальну здатність. Для асинхронних (однотактних) апаратних засобів, обробка даних в яких здійснюється без проміжних запам'ятовувань, обчислювальна здатність визначається 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  $\Phi_{jk}$ . Кожна однотактна структура є послідовною з точки зору реалізації функціональних операторів  $\Phi_{jk}$ . Це є причиною обмеженої швидкодії та неефективного використання обладнання при обробці інтенсивних потоків даних у реальному часі. Тому для обробки потоків даних доцільно використовувати синхронні структури з конвеєрною реалізацією графів алгоритмів, в яких здійснюється суміщення у часі виконання функціональних операторів алгоритму над різними даними. Конвеєризація структур апаратних засобів передбачає 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 оператори ярусу. Для забезпечення високої швидкодії та ефективності використання обладнання функціональні оператори, які реалізуються у сходинках конвеєра, мають бути простими та мати приблизно однаковий час реалізації. Однотактні алгоритмічні пристрої можна розглядати як одноступінчатий конвеєр. У зв'язку з цим актуальним є розгляд питань пов'язаних із синтезом конвеєрних структур апаратних засобів реального часу з високою ефективністю використання обладнання.

У конвеєрних апаратних засобах обчислювальна здатність визначається так:

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

де  $t_{БП}$  – час звертання до буферної пам'яті,  $t_{OB}$  – час обчислення операційним блоком найскладнішого функціонального оператора  $\Phi_{jk}$ ,  $m_k$  – кількість каналів надходження даних у сходинках конвеєра,  $n_k$  – розрядність каналів надходження даних у сходинках конвеєра.

### Метод просторово-часового відображення обчислювальних алгоритмів у узгоджено-паралельні структури

В апаратних засобах реального часу висока ефективність використання обладнання досягається мінімізацією витрат обладнання при забезпеченні реального часу. Перехід від алгоритму розв'язання задачі в реальному часі до структури апаратних засобів формально зводиться до мінімізації витрат обладнання

$$W_{OC} = W_{III} + W_{II} + W_{IIV} + \sum_{i=1}^k W_{IIe_i} m_i,$$

де  $W_{OC}$ ,  $W_{IIV}$ ,  $W_{III}$ ,  $W_{II}$ ,  $W_{IIe}$  - витрати обладнання відповідно на обчислювальні засоби, пристрої управління, інтерфейсні пристрої, пам'ять,  $k$  - кількість типів процесорних елементів,  $i$ -ий процесорний елемент,  $m_i$  - кількість процесорних елементів  $i$ -о типу, при забезпеченні такої умови:

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

Основними шляхами мінімізації витрат обладнання при розробці пристроїв та систем реального часу є:

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

Для переходу від алгоритму до структури апаратних засобів реального часу необхідно розробити узгоджений потоковий граф [3-8]. Цей процес розробки можна розбити на наступні чотири етапи:

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

На етапі декомпозиції алгоритм розв'язання задачі  $\Phi$  розбивається на функціональні оператори  $\Phi_i$ , між якими



установлюються зв'язки, що відповідають даному алгоритму. Чим більшу ступінь деталізації алгоритму отримуємо у результаті декомпозиції, тим гнучкішим буде алгоритм і тим легше можна здійснити адаптацію його до виконання умови (1). Декомпозицію можна здійснювати за методом декомпозиції даних або функціональної декомпозиції. Використання методу функціональної декомпозиції дозволяє отримати просторово-часове відображення структури алгоритму на рівні операцій  $\Phi_i$ , які використовуються при НВІС-реалізаціях. При використанні методу декомпозиції даних спочатку сегментуються дані, а потім алгоритми обробки. Вибір методу декомпозиції залежить як від структури даних, так і від алгоритму розв'язання задачі. На практиці для синтезу високоефективних алгоритмічних структур реального часу використовується метод функціональної декомпозиції, при якому алгоритм  $\Phi$  розбивається на операції  $\Phi_i$ , кожна із яких може бути реалізована операційними блоками певного рівня ієрархії. Час і спосіб виконання операції  $\Phi_i$  операційним блоком є одними із основних параметрів при визначенні конвеєрного такту роботи  $T_k$  і розрядності каналів надходження даних  $p_k$  для алгоритмічних структур реального часу. Результатом першого етапу розробки є граф схема алгоритму, де функціональні оператори  $\Phi_i$  мають приблизно однаковий час виконання, а їх складність визначається засобами реалізації.

На етапі проектування комунікацій для конвеєрної алгоритмічної реалізації алгоритму необхідно визначити структуру каналів обміну даними між функціональними операторами  $\Phi_i$ . Для чого виконується перехід від граф-схеми алгоритму до потокового графу, в якому здійснюється просторово-часове розміщення і закріплення функціональних операторів  $\Phi_i$  за ярусами. Структура зв'язків у потоковому графі між функціональними операторами  $\Phi_{jk}$  сусідніх ярусів визначає кількість каналів надходження даних  $m_j$  і структуру з'єднань між операційними блоками при апаратній реалізації алгоритму. У більшості алгоритмів цифрової обробки сигналів передача даних між ярусами виконується методами досконалого тасування або обмінної перестановки.

За результатами перших двох етапів розробки отримуємо потоковий граф, який дозволяє 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  $\Phi_i$ , 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  $P_d$  досягається шляхом зміни тривалості такту  $T_k$  або кількості  $m_k$  і розрядності  $n_k$  каналів надходження даних у потоковому графі. При розробці узгодженого потокового графу алгоритму для реалізації апаратних засобів з високою ефективністю використання обладнання необхідно у першу чергу максимального використати особливості та швидкодію елементної бази, тобто визначити складність функціональних операторів  $\Phi_i$  і мінімізувати тривалість такту  $T_k$ . У другу чергу, змінювати кількість  $m_k$  і розрядність  $n_k$  каналів у потоковому графі, яка напряму зв'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  $R=1$ , то розроблений узгоджений потоковий граф забезпечує отримання узгоджено-паралельної структури пристрою реального часу з високою ефективністю використання обладнання.

Якщо  $R<1$ , то для забезпечення обробки потоків даних у реальному часі необхідне збільшення обчислювальної здатності  $D_k$ , яке може бути досягнуте збільшенням кількості каналів  $m_k$ , їх розрядності  $n_k$  або зменшенням такту конвеєра  $T_k$ , що досягається зменшенням складності функціональних операторів  $\Phi_i$ . У випадку коли зміною перерахованих параметрів не вдається досягнути необхідної обчислювальної здатності  $D_k$ , то тоді використовується паралельне включення алгоритмічних апаратних засобів, кількість яких визначається виразом:



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

де  $\lceil \rceil$  - знак округлення до більшого цілого.

У випадку коли  $R > 1$ , то для забезпечення високої ефективності використання обладнання необхідно переходити до третього етапу розробки – укрупнення функціональних операторів  $\Phi_{jk}$ . На цьому етапі здійснюється об'єднання функціональних операторів  $\Phi_{jk}$  і каналів передачі даних у ярусах потокового графа, або об'єднання функціональних операторів сусідніх ярусів. Граф алгоритму, який отримаємо у результаті такого об'єднання будемо називати узгодженим потоковим графом. Коефіцієнт об'єднання  $v$  визначається так:

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

де  $\lfloor \rfloor$  - знак округлення до меншого цілого. При об'єднанні функціональних операторів  $v$  сусідніх ярусів утворюється один ярус функціональних макрооператорів, у якому за  $v$  ітерацій виконується обчислення таких функціональних макрооператорів  $V$ . Обчислення у середині ярусу здійснюється із тактом  $T_k$ , який визначається складністю функціональних операторів  $\Phi_{jk}$  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, при якій всі функціональні оператори ярусу потокового графу відображаються у один функціональний макрооператор, а канали передачі даних – у оператор затримки та перестановки даних. Для забезпечення узгодженості може використовуватися комбіноване укрупнення, яке передбачає об'єднання функціональних операторів і каналів передачі даних як у середині ярусу, так і між ярусами. На рис.1 наведений приклад узгодженого потокового графа, де ОУ – оператор управління, ЗК – оператор затримки та комутації, V – функціональний макрооператор.

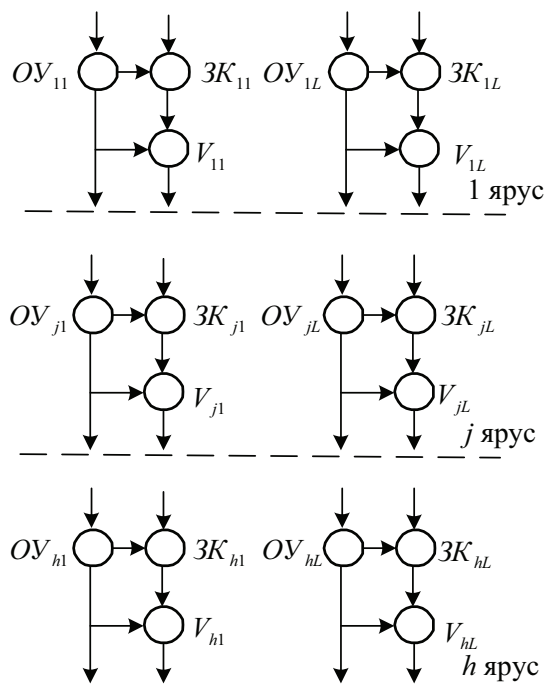


Рисунок 1 – Узгоджений потоковий граф алгоритму

Опис узгодженого потокового графу алгоритму включає дві частини – функціональну та структурну. Функціональний опис визначає операційний базис функціональних макрооператорів, а структурний – затримки, комутації даних і зв'язки між макрооператорами. Структура узгодженого потокового графу алгоритму відображається 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 володіє вагою, рівною 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, визначаються величини затримок і перестановки даних. Для відтворення обчислень у кожний ярус узгодженого графу вводяться оператори управління затримки та перестановки даних.

При апаратному відображенні узгодженого потокового графу алгоритму кожному функціональному макрооператору  $V$  ставляться у відповідність багатофункціональні операційні пристрої, які забезпечують виконання операцій ярусу, операторам  $ЗК$  - буферна

паралельна пам'ять, яка може забезпечити необхідну затримку та перестановку даних, а операторам ОУ - пристрої керування, які керують багатофункціональними операційними пристроями і буферною пам'яттю.

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

### **Висновки**

1. Для вибору апаратних засобів реального часу запропоновано використовувати критерій ефективності використання обладнання, який враховує кількість виводів інтерфейсу, однорідність структури, кількість і локальність зв'язків, зв'язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам системи за продуктивністю.

2. Основними шляхами підвищення ефективності використання обладнання у системах обробки сигналів у реальному часі є: врахування величини зміни значень даних; вибір ефективних методів і алгоритмів реалізації апаратних засобів; зменшення розрядності операційних пристроїв, пам'яті, кількості і 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 апаратних засобів реального часу може здійснюватися шляхом зміни тривалості конвеєрного такту, кількості і розрядності каналів надходження даних.

4. Основними етапами синтезу апаратних засобів є: вибір та розробка методів і алгоритмів узгоджено-паралельної обробки; визначення основних параметрів апаратних засобів; перехід від алгоритму до узгодженої-паралельної структури.

5. Для переходу від алгоритму до структури апаратних засобів систем реального часу використовується 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. В.В. Грицик, Ю.В. Опотяк, І.Г. Цмоць. Базові компоненти інтелектуальних систем введення, обробки класифікації та розпізнавання зображень у реальному часі. Науково-технічний журнал “Інформаційні технології і системи”. Том 8, №1, Львів 2005, с.104-113.
2. Цмоць І.Г. Принципи розробки і оцінка основних характеристик високопродуктивних процесорів на надвеликих інтегральних схемах. Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології" № 349. Львів, 1998.-с.5-11.
3. Цмоць І.Г. Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень у реальному часі. – Львів: УАД, 2005.- 227с.
4. Параллельная обработка информации: в 5т./ АН УССР. Физ-мех. ин-т. - Киев: Наукова думка, 1984.- т5: Проблемно-ориентированные и специализированные средства обработки информации / А.И. Аксенов, В.В. Аристов, Е.Ю. Барзилович и др.; Под ред. Б.Н. Малиновского и Грицика В. В. –1990.-504с.
5. Грушицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608с.
6. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002.-608с.
7. Немнюгин С.А., Стесик О.Л. Параллельное программирование для многопроцессорных систем. – СПб.: БХВ – Петербург, 2002. – 400с.
8. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. - СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 1104с.