

ВСТУП

Пам'ять є одним з основних вузлів комп'ютера. Вона необхідна для зберігання інформації (команд та даних) та забезпечення обміну нею з пристроями комп'ютера [1–4]. З розвитком комп'ютерів істотні зміни відбулися і в будові пам'яті, значно покращилися її технічні характеристики [5]. Разом з тим виникає потреба в створенні пам'яті з новими властивостями, якими не володіють наявні в сучасних комп'ютерах типи пам'яті. Зокрема під час виконання інтенсивних обчислень над масивами даних, як це необхідно, наприклад, під час розв'язання мультимедійних та телекомунікаційних задач, потрібно забезпечувати зберігання масивів даних, що надходять з багатьох каналів, одночасно із зчитуванням раніше прийнятих масивів даних для опрацювання в багатоблокових операційних пристроях, тобто паралельно виконувати операції реорганізації масивів даних та впорядкування даних у масивах [6, 7]. Виконання цих функцій на існуючих типах пам'яті є доволі складною, а часто і нерозв'язною з прийнятними характеристиками задачею, що зумовлено їхніми потенційними обмеженнями [8–12]. Основною класифікаційною ознакою пам'яті є спосіб доступу до даних, який в ній реалізовано [1]. Ця ознака задає потенційні можливості пам'яті стосовно паралельного доступу до даних. Такий доступ повною мірою не забезпечується жодним з сучасних типів пам'яті, а саме пам'яті з довільним, асоціативним та послідовним доступом [13–17], що істотно ускладнює організацію комп'ютера та призводить до сповільнення його роботи. Тому існує потреба підвищення ефективності пам'яті для розв'язання вищезгаданих задач роботи з масивами даних.

У роботах [18–22] запропоновано принципи та варіанти побудови нового типу пам'яті, яку надалі називатимемо пам'яттю із впорядкованим доступом (ПВД). Як і пам'ять із послідовним доступом, пам'ять із впорядкованим доступом орієнтована на роботу з масивами даних. У цій пам'яті забезпечується доступ до даних у програмно встановленому порядку, тобто індекс, який надходить до пам'яті разом з даними під час їх запису або зчитування з пам'яті, позначає місце даних у вихідному масиві. Однак до цього часу не було вирішено проблем розроблення методів побудови цієї пам'яті, принципів її структурної організації та визначення її місця серед інших типів пам'яті.

Необхідно дослідити загальні проблеми організації пам'яті, розробити критерії порівняння різних типів пам'яті та пошуку найефективнішої для роботи з паралельними масивами даних, а також розробити методи побудови та структурної організації пам'яті із впорядкованим доступом, дослідження, синтезу та реалізації в ПЛІС її програмних моделей, визначення галузей її доцільного застосування. Пошуку відповідей на ці питання і присвячена ця книга.

Зважаючи на те, що в книзі розглянуто новий тип пам'яті, багато питань її побудови вирішено вперше. Зокрема:

- Вперше розроблено критерії її ефективності з позиції забезпечення паралельного доступу до даних, а також проаналізовано задоволення наявними типами пам'яті вимог запропонованих критеріїв ефективності, що дало можливість порівняти різні типи пам'яті, визначити та обґрунтувати переваги та вузькі місця і недоліки кожного типу пам'яті та показало найкращу відповідність вимогам критеріїв ефективності пам'яті із впорядкованим доступом.
- Вперше запропоновано математичну модель пам'яті із впорядкованим доступом у складі багаторівневої множини її компонент та їхніх функцій, системи зв'язків між компонентами на всіх рівнях, форматів даних та їхніх індексів за допомогою формалізованого опису вищезазначених складових, що дало можливість визначити взаємозв'язки між ними та їхній вплив на характеристики пам'яті із впорядкованим доступом.
- Вперше розроблено метод побудови пам'яті із впорядкованим доступом на основі комбінаційних сортувальних мереж за схемами із впорядкуванням даних у рядку, стовпці та матриці, який полягає в тому, що дані з комірок пам'яті впорядковують за величиною їхніх індексів у комутуючій мережі, яка переміщує дані до відповідних виходів пам'яті за результатами порівняння їхніх індексів у сортувальній мережі, та, на відміну від наявних методів побудови пам'яті, забезпечує можливість не лише послідовного, а й паралельного доступу до даних.
- Вперше розроблено основні типи структур пам'яті із впорядкованим доступом на основі комбінаційних сортувальних мереж за схемами із впорядкуванням даних у рядку, стовпці та матриці, здійснено дослідження та отримано аналітичні вирази для розрахунку швидкодії та затрат обладнання на реалізацію розроблених типів пам'яті, що дало можливість

вибрати потрібний тип пам'яті залежно від вимог задачі та дало змогу провести їх порівняльне оцінювання і визначити галузі доцільного використання залежно від ємності та кількості портів.

- Вперше розроблено метод побудови паралельної пам'яті з впорядкованим доступом на основі налаштовуваних сортувальних мереж за схемами із впорядкуванням даних у рядку, стовпці та матриці, який полягає в тому, що дані з комірок впорядковують за величиною їхніх індексів у налаштовуваній сортувальній мережі, яка переміщує дані до відповідних виходів пам'яті за результатами попереднього порівняння їхніх індексів, та, на відміну від методу побудови на основі комбінаційних сортувальних мереж, дає змогу практично вдвічі скоротити кількість входів пам'яті та затрати обладнання на її реалізацію, оскільки відповідає потреба в окремому обладнанні для зберігання та опрацювання індексів.
- Вперше розроблено основні типи структур паралельної ПВД на основі налаштовуваних сортувальних мереж за схемами із впорядкуванням даних у рядку, стовпці та матриці, виконано дослідження та отримано аналітичні вирази для розрахунку швидкодії та затрат обладнання на реалізацію розроблених типів пам'яті, що дало можливість вибрати потрібного типу пам'яті залежно від вимог задачі та дало змогу виконати їх порівняльне оцінювання і визначити галузі доцільного використання залежно від ємності та кількості портів.
- Вперше розроблено метод побудови паралельної пам'яті з фіксованим та зі змінним впорядкованим доступом до векторів та матриць даних, який полягає в тому, що для запам'ятовування даних виділяють відповідну кількість комірок пам'яті, до яких записують та з яких зчитують дані, та, на відміну від існуючих методів побудови пам'яті, до складу пам'яті вводять комутуючу мережу, на якій впорядковують дані відповідно до величини коду впорядкування, що забезпечує можливість не лише послідовного, а й паралельно впорядкованого доступу до даних.
- Розроблено та досліджено основні типи структур паралельної пам'яті з фіксованим та зі змінним впорядкованим доступом на основі комутуючих мереж, оцінено швидкодію та затрати обладнання на їх реалізацію, визначено галузі доцільного використання розроблених структур пам'яті.
- Вперше розроблено структури пам'яті з впорядкованим доступом на основі комутуючих мереж та пам'яті з довільним доступом та на основі пошуку

даних за їхніми індексами, здійснено дослідження та отримано аналітичні вирази для розрахунку швидкодії та затрат обладнання на реалізацію розроблених типів пам'яті.

- З використанням запропонованих технологій та сучасних засобів проектування реалізовано в ПЛІС варіант пам'яті із впорядкованим доступом, що показало, що її функціональні характеристики відповідають вимогам багатьох застосувань.

Автор розраховує, що розроблені методи побудови пам'яті із впорядкованим доступом будуть використані для побудови широкого спектра паралельної пам'яті комп'ютерних пристроїв.

Книга складається із 14 розділів. Короткий зміст кожного розділу такий.

У першому розділі класифіковано та проаналізовано типи пам'яті сучасних комп'ютерів. Це пам'ять з довільним, послідовним та асоціативним доступом. Кожний тип пам'яті має переваги та недоліки, які визначають місце його використання в комп'ютері. Розглянуто структуру багаторівневої пам'яті та типи пам'яті, які входять до внутрішньої та зовнішньої пам'яті комп'ютера, а також основні характеристики пам'яті: ємність, організація, швидкодія, час доступу, період звернення, вартість. Розглянуто способи адресного, послідовного та асоціативного доступу до даних у пам'яті, а також відповідні типи пам'яті.

У другому розділі розглянуто спосіб впорядкованого доступу до даних у пам'яті та його відмінні риси порівняно з відомими способами доступу. Описано вхідні дані, їхні індекси та вихідні дані пам'яті із впорядкованим доступом, а також підходи до побудови та використання пам'яті із впорядкованим доступом. Показано, що залежно від типу використовуваного пристрою впорядкування даних та від того, як визначають код впорядкування, розрізняють такі типи пам'яті із впорядкованим доступом: на основі комбінаційних сортувальних мереж, налаштовуваних сортувальних мереж, із фіксованим впорядкованим доступом, із змінним впорядкованим доступом. Після цього розглянуто вхідні та вихідні інформаційні та керуючі входи вищезазначених типів пам'яті із впорядкованим доступом та підходи до її побудови на основі пам'яті з довільним доступом, пристрою сортування даних та пам'яті з асоціативним доступом.

У третьому розділі визначено потребу використання пам'яті з впорядкованим доступом в універсальних та спеціалізованих процесорах, а також у

багатопроесорних системах із спільною пам'яттю. Сформовано критерії ефективності пам'яті та показано, що пам'ять із впорядкованим доступом якнайкраще відповідає вимогам до пам'яті сучасних комп'ютерів, зокрема: багатопортовості, одночасного безконфліктного доступу до даних з багатьох портів, одночасного запису та зчитування даних, виконання операцій реорганізації масивів та впорядкування даних у масивах, виконання операцій реорганізації масивів та впорядкування даних у масивах, відсутності звернення за даними як під час їх запису, так і під час зчитування, відсутності потреби зберігання інформації про місцезнаходження даних у пам'яті.

У четвертому розділі формалізовано описано пам'ять із впорядкованим доступом для підтвердження зв'язку між будовою ПВД та її характеристиками, тобто як ті чи інші структурні особливості та організація роботи ПВД та її вузлів пов'язані з можливостями, які надає користувачу ПВД, які є альтернативи під час створення ПВД і за якими критеріями повинні прийматися ті чи інші проектні рішення; як пов'язані між собою характеристики окремих вузлів ПВД і як вони впливають на її загальні характеристики. Запропоновано модель ПВД узбагаченою множиною компонент та їхніх функцій, системи зв'язків між компонентами на всіх рівнях, форматів даних та їхніх індексів за допомогою формалізованого опису вищезазначених складових, що дало можливість визначити взаємозв'язки між ними та їхній вплив на характеристики пам'яті з впорядкованим доступом.

У п'ятому розділі виділено найефективніші для паралельної реалізації алгоритми сортування та здійснено їх порівняльний аналіз. Оцінено декілька варіантів сортувальних мереж. Введено поняття ефективності структури сортувальної мережі як відношення її обчислювальної складності до кількості ярусів. Виконано порівняльне оцінювання ефективності структури розглянутих сортувальних мереж і вибрано кращі за цим критерієм сортувальні мережі для використання.

У шостому розділі визначено принципи побудови сортувальних мереж, які можна використати під час синтезу пам'яті із впорядкованим доступом. Розглянуто структури сортувальних мереж двох паралельно поданих даних за різними схемами їх надходження: $1 \times 2 \rightarrow 1 \times 2$, $2 \times 1 \rightarrow 1 \times 2$, $1 \times 2 \rightarrow 2 \times 1$ та $2 \times 1 \rightarrow 2 \times 1$ та складніші схеми структури сортувальних мереж аж до схеми $k1 \rightarrow mn$.

У сьомому розділі розроблено алгоритми впорядкування векторних та матричних даних за їхніми індексами та метод побудови ПВД до двох даних за

їхніми індексами, який полягає в тому, що порівнюють індекси вхідних даних, для чого використовують схему порівняння, та впорядковують дані відповідно до їхніх індексів, для запам'ятовування даних виділяють дві комірки пам'яті, в ролі яких використовують регістри, в режимі запису до регістрів ПВД записують дані, впорядковані відповідно до величини їхніх індексів, а в режимі зчитування з регістрів ПВД зчитують дані, які в них зберігалися, на виходи ПВД, дані на входи та виходи якої можуть надходити паралельно або послідовно. Розроблено метод побудови ПВД до вектора даних за їхніми індексами, який полягає в тому, що впорядковують вектор індексів вхідних даних та отримують вектор впорядкованих індексів вхідних даних. Для впорядкування індексів використовують сортувальну мережу, для впорядкування даних відповідно до їхніх індексів – комутуючу мережу, завданням якої є переміщення даних до відповідних виходів за результатами порівняння їхніх індексів у сортувальній мережі, для запам'ятовування вектора даних виділяють відповідну кількість комірок пам'яті, в ролі яких використовують регістри, в режимі запису до регістрів ПВД записують дані, впорядковані відповідно до величини їхніх індексів, а в режимі зчитування з регістрів ПВД зчитують дані, які в них зберігалися, на виходи ПВД, дані на входи та виходи якої можуть надходити паралельно або послідовно. Розроблено також метод побудови ПВД до матриці даних за величиною їхніх індексів, яка складається з комірок, до яких записують та з яких зчитують дані, який полягає в тому, що дані з комірок впорядковують за величиною їхніх індексів у комутуючій мережі, яка переміщує дані до відповідних виходів пам'яті за результатами порівняння їхніх індексів у сортувальній мережі, та, на відміну від наявних методів побудови пам'яті, забезпечує можливість не лише послідовного, а й паралельного доступу до даних.

Запропоновано основні типи структур пам'яті із впорядкованим доступом на основі комбінаційних сортувальних мереж. Розглянуто структури різних типів пам'яті із впорядкованим доступом для варіантів запису та зчитування даних двох паралельно поданих даних за різними схемами їх надходження: $1 \times 2 \rightarrow 1 \times 2$, $2 \times 1 \rightarrow 1 \times 2$, $1 \times 2 \rightarrow 2 \times 1$ та $2 \times 1 \rightarrow 2 \times 1$ та складніші схеми ПВД із впорядкуванням даних у рядку, стовпці та матриці. Оцінено швидкодію та затрати обладнання на реалізацію розроблених типів ПВД.

У восьмому розділі введено поняття налаштовуваних сортувальних мереж та запропоновано основні типи структур пам'яті із впорядкованим

доступом на їх основі. Розроблено алгоритми впорядкування векторних та матричних даних за їхніми індексами у ПВД на основі налаштовуваної сортувальної мережі. Розроблено метод побудови ПВД до двох даних за їхніми індексами, який полягає в тому, що спочатку порівнюють індекси вхідних даних, для чого використовують схему порівняння, та запам'ятовують результат порівняння в тригері, після чого до пам'яті записують дані та впорядковують дані відповідно до значення, записаного в тригер; для запам'ятовування даних виділяють дві комірки пам'яті, в ролі яких використовують регістри, в режимі запису до регістрів ПВД записують дані, впорядковані відповідно до величини їхніх індексів, а в режимі зчитування з регістрів ПВД зчитують дані, які в них зберігалися, на виходи ПВД, дані на входи та виходи якої можуть надходити паралельно або послідовно. Розроблено метод побудови ПВД до вектора даних за їхніми індексами, який полягає в тому, що впорядковують вектор індексів вхідних даних та отримують вектор впорядкованих індексів вхідних даних, причому для впорядкування індексів використовують налаштовувану сортувальну мережу, як і для виконання впорядкування даних відповідно до їхніх індексів, завданням якої є в режимі налаштування сортування індексів та запам'ятовування стану, а в режимі впорядкування – переміщення даних до відповідних виходів за результатами порівняння їхніх індексів. Для запам'ятовування вектора даних виділяють 1 комірку пам'яті, в ролі якої використовують регістри, в режимі запису до регістрів ПВД записують дані, впорядковують їх відповідно до величини їхніх індексів, а в режимі зчитування з регістрів ПВД зчитують дані, які в них зберігалися, на виходи ПВД, дані на входи та виходи якої можуть надходити паралельно або послідовно. Розроблено метод побудови ПВД до матриці даних за їхніми індексами, який полягає в тому, що в режимі налаштування впорядковують матриці індексів вхідних даних у налаштовуваній сортувальній мережі та отримують матриці впорядкованих індексів вхідних даних і запам'ятовують стан мережі, причому для впорядкування даних відповідно до їхніх індексів у режимі впорядкування використовують ту саму налаштовувану сортувальну мережу, завданням якої є переміщення даних до відповідних виходів за результатами порівняння їхніх індексів в режимі налаштування. Для запам'ятовування матриці даних виділяють kl комірок пам'яті, в ролі яких використовують регістри, в режимі запису до регістрів ПВД записують дані, впорядковують їх відповідно до величини їхніх індексів, а в режимі зчитування з регістрів ПВД зчитують дані,

які в них зберігалися, на виходи ПВД, дані на входи та виходи якої можуть надходити паралельно або послідовно.

Запропоновано основні типи структур пам'яті із впорядкованим доступом на основі налаштовуваних сортувальних мереж. Розглянуто структури різних типів пам'яті із впорядкованим доступом для варіантів запису та зчитування даних двох паралельно поданих даних за різними схемами їх надходження: $1 \times 2 \rightarrow 1 \times 2$, $2 \times 1 \rightarrow 1 \times 2$, $1 \times 2 \rightarrow 2 \times 1$ та $2 \times 1 \rightarrow 2 \times 1$, та складніші схеми ПВД із впорядкуванням даних у рядку, стовпці та матриці. Оцінено швидкодію та затрати обладнання на реалізацію розроблених типів ПВД на основі налаштовуваної сортувальної мережі.

У дев'ятому розділі розроблено метод побудови паралельної пам'яті з фіксованим та зі змінним впорядкованим доступом до векторів та матриць даних, який полягає в тому, що для запам'ятовування даних виділяють відповідну кількість комірок пам'яті, до яких записують та з яких зчитують дані, та, на відміну від наявних методів побудови пам'яті, до складу пам'яті вводять комутуючу мережу, на якій впорядковують дані відповідно до величини коду впорядкування, що забезпечує можливість не лише послідовного, а й паралельно впорядкованого доступу до даних. Також розроблено та досліджено основні типи структур паралельної пам'яті з фіксованим та зі змінним впорядкованим доступом на основі комутуючих мереж, оцінено швидкодію та затрати обладнання на їх реалізацію, визначено галузі доцільного використання розроблених структур пам'яті.

У десятому розділі розроблено метод побудови базового елемента багатоступеневих комутуючих мереж та структури різних варіантів його побудови та вирази для оцінювання їхньої швидкодії та затрат обладнання на їх реалізацію. Розроблено структуру сортувальної мережі, призначену для використання в ПВД, завданням якої є формування сигналів керування для комутуючої мережі КМ, в якій дані впорядковують за значеннями їхніх індексів. Її схема дещо відрізняється від традиційної СМ Бетчера, оскільки з кожного базового елемента порівняння виведено сигнал керування відповідним елементом комутуючої мережі, а також немає потреби виводити впорядковані індекси на вихід СМ. Сформульовано правила побудови модифікованих сортувальних мереж, призначених для побудови ПВД, та досліджено їхні характеристики.

Розроблено структуру комутуючої мережі, призначеної для використання в ПВД, завданням якої є впорядкування даних за значеннями їхніх індексів, та здійснено дослідження та отримано вирази для розрахунку затрат обладнання на реалізацію цієї мережі та її затримки.

Отримано вирази розрахунку затрат обладнання на реалізацію розглянутих у роботі типів ПВД на рівні складових ПВД, на рівні функціональних елементів та на рівні вентилів та отримано вирази розрахунку швидкодії розглянутих в роботі типів ПВД на рівні складових ПВД, на рівні функціональних елементів та на рівні затримки одного вентиля.

Виконано порівняльний аналіз розроблених типів ПВД та визначено галузі доцільного використання різних типів пам'яті.

В одинадцятому розділі розглянуто питання побудови ПВД на основі комутуючих мереж та пам'яті з довільним доступом. Наведено короткий опис принципів побудови та організації роботи пам'яті з довільним доступом (ПДД). Описано одноканальну ПВД на основі ПДД з об'єднаними входом і виходом, а також досліджено проблеми побудови багатопортової ПДД. Спроектовано паралельну багатопортову ПВД на основі комутуючої мережі та ПДД, в якій реалізовано метод впорядкованого доступу до даних.

У дванадцятому розділі розглянуто питання побудови ПВД на основі пам'яті з асоціативним доступом – від повністю паралельного до повністю послідовного. Запропоновано шляхи вдосконалення ПВД на основі пошуку даних за їхніми індексами та розроблено схему цієї пам'яті і основи організації її роботи, а також отримано вирази для розрахунку її технічних характеристик.

У тринадцятому розділі для практичного підтвердження відповідності отриманих теоретичних результатів було синтезовано та описано програмні моделі пам'яті з впорядкованим доступом типів ПВДК, ПВДН, ПЗВД та ПФВД. Пам'ять описано мовою VHDL. Реалізовано програмні моделі розробленої пам'яті із впорядкованим доступом у ПЛІС та здійснено оцінювання та порівняльний аналіз досягнутих характеристик.

У чотирнадцятому розділі запропоновано методику проектування спеціалізованих процесорів на основі пам'яті із впорядкованим доступом. Запропоновано метод подання графу алгоритму векторами даних, індексів і команд ярусів графу, які зберігають структуру алгоритму в зручній для опрацювання формі, а також визначено властивості векторів даних, індексів і команд ярусів графу, що дає можливість досліджувати потоковий граф алгоритму не з

графічного представлення, а з його формального опису. Запропоновано процедури класифікації та нумерації функціональних операторів та їхніх портів, що забезпечує можливість подання графу алгоритму векторами даних, індексів і команд ярусів графу та розроблено метод отримання вихідних даних для синтезу спеціалізованого процесора з графу алгоритму, а також метод переходу від векторів даних, команд і з'єднань портів функціональних операторів ярусів графу до матриць вхідних даних ПВД, їхніх індексів та команд операційного пристрою процесора.