

УДК 681.784

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, Л.В. ЗАГОРУЙКО, Т.А. МАРТ'ЯНОВА

## АНАЛІТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ З ОБРОБЛЕННЯ БІОМЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ВІДЕОГРАФІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна,  
Тел.: 80631064077, e-mail: Tata-Zagoruyko@rambler.ru*

**Анотація.** У статті проведений аналітичний огляд методів та засобів оброблення біомедичних зображень на основі відеографічних технологій. Проведено патентний пошук США, країн Європи та вітчизняних джерел по технологіям оброблення біомедичної інформації, використовуючи графічні адаптери. Проаналізовано сучасний стан реалізації графічних адаптерів, їх архітектури та перспективи подальшого розвитку. Приведено методологічні особливості оброблення інформації, програмні моделі реалізації тощо.

**Аннотация.** В статье проведен аналитический обзор методов и средств обрабатывания биомедицинских изображений на основе видеографических технологий. Проведен патентный поиск США, стран Европы и отечественных источников, по технологиям обрабатывания биомедицинской информации, использующих графические адаптеры. Проанализировано современное состояние реализации графических адаптеров, их архитектуры и перспективы последующего развития. Приведены методологические особенности обрабатывания информации, программные модели реализации и тому подобное.

**Abstract.** In the article the state-of-the-art review of methods and facilities of processing of biomedical images is conducted on the basis of videographic technologies. The patent search USA, European countries and domestic source, is conducted for technologies of treatment of biomedical information, utilizing graphic adapters. The modern state of realization of graphic adapters, their architecture and prospect of subsequent development is analysed. The methodological features of treatment of information are resulted, programmatic models of realization and others like that.

**Ключові слова:** оброблення біомедичної інформації, графічні адаптери, GPU, системи діагностування, патологія ока, ідентифікація очних патологій.

### ВСТУП

Графічний процесор (GPU), вперше винайдений NVIDIA в 1999 році, є найпоширенішим паралельним процесором на сьогоднішній день. GPU перетворився на процесор з безпрецедентним пристроєм, який обробляє дані з плаваючою комою з високою продуктивністю і програмування графічних процесорів на сьогодні значно випереджає процесори пропускнуої арифметики та пропускнуої здатності пам'яті, що робить їх ідеальним процесором для прискорення різних даних паралельних програм [1].

Спроби використовувати GPU для неграфічних додатків ведуться з 2003 року. При використанні високорівневої мови, такої як DirectX, OpenGL і Cg, різних даних паралельних алгоритмів були перенесені на GPU. Такі проблеми, як згортання білка, ціноутворення опціонів, SQL запити, а також МРТ реконструкції дістали прискорення продуктивності завдяки GPU. Ці ранні зусилля, які використовували графіку API, для загальних обчислень були відомі як програми GPGPU [2].

У той час як моделі GPGPU продемонстрували велике прискорення, вона зіткнулася з низкою недоліків. По-перше, програмістам довелося оволодіти глибокими знаннями графіки і графічного API архітектури. По-друге, проблеми повинні були виражені через координати вершин, текстур і шейдерів, що значно збільшує складність програми. По-третє, основні функції програмування, таких як випадкове читання і запис в пам'ять не підтримується, значно обмежують моделі програмування.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є вивчення та аналіз методів і засобів оброблення біомедичних зображень для

вибору оптимальної комп'ютерної архітектури та удосконалення систем діагностування захворювань очей. Діагностування очних патологій планується проводити за допомогою системи аналізу зображення очей пацієнта.

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Досягнення сучасної медичної науки неможливі без аналізу великої кількості фактичного матеріалу – даних клінічного, лабораторного, рентгенологічного, радіологічного та інших методів обстеження.

Об'єктивності оцінки даних сприяють методи математичного оброблення цифрових результатів обстежень.

Статистичний аналіз цифрового матеріалу дає можливість вияснити не тільки якісні, а й кількісні взаємовідносини між явищами, що вивчаються, вияснити значення різних методів для діагностики, і цінність лікарських засобів при певному захворюванні, дає наочне кількісне уявлення про етіологію, патогенез, клініку та ефективність лікування залежно від методів і засобів терапії тощо [3].

Щоб профілактичні та лікувальні заходи були достатньо ефективними, лікар повинен уміти не тільки діагностувати захворювання, а й передбачити ймовірність його виникнення, розвитку і закінчення, тобто володіти наукою і мистецтвом прогнозування. Лікар, який досліджує масові випадкові події, повинен оволодіти методами відбору, реєстрації, описування і оброблення експериментальних даних.

В основу ефективних систем прогнозування і діагностики захворювань покладено методи теорії ймовірностей і математичної статистики. Без використання цих методів у медицині неможливе вирішення питань об'єктивного порівняння вибірових груп за параметрами, що вивчаються, в дослідженні і контролі, визначення надійності (вірогідності) безпомилкових прогнозів на основі статистичного порівняння їх, оцінки сили впливу різних факторів на процеси і явища в живому організмі, встановлення закономірностей, притаманних цим явищам, визначення достатньої кількості підслідних об'єктів.

Саме для таких цілей необхідно здійснити аналітичний огляд методів та засобів оброблення біомедичних зображень на основі відеографічних технологій, а також обрати оптимальну апаратну архітектуру.

### КОРОТКА ІСТОРІЯ ОБЧИСЛЕНЬ НА GPU

Для вирішення цих проблем, компанія NVIDIA представила дві ключові технології – G 80 єдиного графіка та обчислювальні архітектури (вперше введено в @ GeForce 8800, Quadro FX 5600 @ і @ Tesla C870 GPU), і CUDA, програмні та апаратні архітектури, що дозволило GPU бути запрограмованими різними мовами програмування високого рівня. Разом ці дві технології, представляють собою новий спосіб використання GPU. Замість програмування спеціалізованих підрозділів по графіку з графічними API, програміст тепер може написати C програм з розширеннями CUDA і призначати їх для загального користування масивно-паралельних процесорів. Цей новий спосіб графічного програмування названо "обчислення на GPU", це означає широку підтримку програм, більш широку підтримку мов програмування, а також чітке розділення на ранні моделі "GPGPU" програмування [4].

Архітектура G80. NVIDIA GeForce 8800 є продуктом, який породив нову модель обчислень на GPU. Представлений в листопаді 2006 року G80 заснована GeForce 8800 приніс декілька ключових нововведень для обчислень на GPU [5]:

- G80 був перший GPU для підтримки C, що дозволяє програмістам використовувати потужність графічного процесора без необхідності вивчати нову мову програмування;
- G80 був перший GPU для заміни окремих вершинних і піксельних конвеєрів з одним, єдиним процесором;
- G80 був першим GPU використовувати процесор скалярний потік, усуваючи необхідність для програмістів, щоб вручну керувати вектором реєстрів;
- G80 представила однонаванчання кількох потоків (SIMT) моделі виконання, коли кілька незалежних потоків виконуватися паралельно з допомогою однієї команди;
- G80 представило розділення пам'яті і синхронізації бар'єрів між потоками комунікації.

У червні 2008 року NVIDIA представила перегляд G80 архітектури. Друге покоління уніфікованої архітектури – GT200 (перша введена в GeForce GTX 280, Quadro FX 5800 і Tesla T10 GPU), збільшилася кількість поточкових процесорних ядер (надалі званій CUDA ядрами) від 128 до 240. Кожен файл реєстра процесора був в два рази збільшеним, що дозволило виконувати більшу кількість потоків на чіпі в будь-який момент часу. В обладнанні доступу до пам'яті був доданий елемент для підвищення ефективності доступу до пам'яті. Подвійна точність з плаваючою точкою була додана для задоволення потреб наукових і високопродуктивних обчислень додатків.

При розробці кожного нового покоління GPU, присутня завжди була філософія NVIDIA для

поліпшення як існуючої продуктивності додатків і графічного програмування, в той же час більша продуктивності додатків приносить вигоду розробникам і користувачам, що невпинно просуває GPU в області програмування і дозволяє йому перетворитися в самий універсальний паралельний процесор нашого часу [6].

Наступне покоління від NVIDIA CUDA в обчислюванні і графіці є архітектури під кодовою назвою «Fermi».

Архітектура Fermi є найбільш значний крок вперед в архітектурі GPU з оригінальною назвою G80. G80 було початкове бачення того, що єдиної графікою і процесором обчислювальних паралельно повинна виглядати. GT200 продовжив продуктивності і функціональності G80. З Фермі, ми зробили все, що ми дізналися від двох попередніх процесорів і всіх додатків, які були написані для них, і використовували абсолютно новий підхід до дизайну, щоб створити першу обчислювальну в світі GPU. Коли розпочалася розробка Фермі, то було зібрано велику кількість відгуків користувачів на GPU з моменту появи G80 і GT200, що зосередило розробників на таких основних областях покращення [7]:

1. Підвищення продуктивності подвійної точності, в той час як одинарна точність з плаваючою точкою було близько в десять разів вищою по продуктивності настільних процесорів, тоді як деякі обчислювальні GPU намагалися досягти більшої подвійної точності виконання.

2. Підтримка ECC – ECC дозволяє користувачам GPU безпечно розгортання великого числа графічних процесорів в центрах обробки даних установок, а також забезпечення збереження даних додатків, чутливих, як медична візуалізація і фінансові параметри ціноутворення, що захищені від помилок пам'яті.

3. Ієрархія «Правда», деякі кеш – пам'яті паралельних алгоритмів не змогли використати загальну пам'ять GPU, а користувачі просили, щоб архітектура кеша подолала даний недолік.

4. Більше Shared Memory, багато програмістів CUDA просили більше 16 Кб SM для розділення пам'яті для прискорення їх.

5. Більш швидке перемикання контексту – користувачі просили швидше контекстне перемикання між прикладними програмами і швидшу графіка, а також обчислення взаємодії.

6. Прискорення автономних операцій – користувачі просили швидше виконання читання – модифікація – запис автономних операцій для своїх паралельних алгоритмів.

За допомогою цих запитів команда Фермі розробила процесор, який значно збільшує обчислювальну потужність сировини, а також через архітектурні нововведення і нові технології різко збільшилися можливості програмування і ефективність обчислень.

Основні архітектурні моменти Фермі [8]:

1. Третє покоління багатопроцесорних Streaming (SM) O 32 CUDA з ядрами на SM, 4x на GT200 про 8-х пік подвійної точності з плаваючою точкою на GT200 з подвійною деформацією планувальника одночасної графіки, що відправляє інструкції від двох незалежних перекосів про 64 КБ оперативної пам'яті з налаштованими розділами загальної пам'яті і кеша L1.

2. Друге покоління паралельного виконання потоків ISA про Єдиний адресний простір з повною підтримки C + + та оптимізовано для OpenCL і DirectCompute з повною IEEE 754-2008 32-бітної і 64-бітної точності з повним 32-бітовим цілим шляхом з 64-розрядними розширеннями про інструкції доступу до пам'яті для підтримки переходу до 64 - розрядної адресації з покращеною продуктивністю через предикації.

3. Покращена підсистема пам'яті NVIDIA Parallel DataCache™ ієрархії налаштування L1 і L2 кешем про перші GPU з підтримкою ECC пам'ять із значно покращеною продуктивністю автономної роботи з пам'яттю.

4. NVIDIA GigaThread™ Engine в 10 разів швидша, застосування перемикання контексту з паралельним виконанням у ядрі із виходом з ладу блоку виконання з подвійним перекиванням процесів передачі у пам'ять.

CUDA є апаратною і програмною архітектурою, яка дозволяє графічним процесорам NVIDIA виконувати програми, що написані на C, C + +, Fortran, OpenCL, DirectCompute та іншими мовами. Програма CUDA являє собою паралельні виклики ядра. Ядро виконує паралельно операції на безлічі паралельних потоків. Програміст або компілятор організовує ці операції в блоки потоків та сітки потоків блокування. GPU створює ядро програми на сітці паралельних блоків потоків. Кожен потік в блоці потоків виконує примірник ядра і має ідентифікатор потоку в межах свого блоку, програмний лічильник, регістри, власну пам'ять, введення і виведення результатів [9].

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБЛЕННЯ БІОМЕДИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАФІЧНИХ АДАПТЕРІВ

Відеоадаптер – пристрій, що вимагає особливо високої швидкості передачі даних. Як при впровадженні локальної шини VLB, так і при впровадженні локальної шини PCI відеоадаптер завжди був першим пристроєм, що "врізається" в нову шину. Коли параметри шини PCI перестали відповідати вимогам відеоадаптерів, для них була розроблена окрема шина, що отримала назву AGP (Advanced Graphic Port - вдосконалений графічний порт). Частота цієї шини відповідає частоті шини PCI (33 МГц або 66 МГц), але вона має набагато вищу пропускну спроможність за рахунок передачі декількох сигналів за один такт. Число сигналів, передаваних за один такт, вказується у вигляді множника, наприклад AGP4x (у цьому режимі швидкість передачі досягає 1066 Мбайт/с) [10].

Пам'ять відеоданих – це динамічний ЗП. Один біт інформації відповідає одному елементу роздільної здатності на екрані відеомонітора, а вся пам'ять містить одну сторінку зображення, що є досить зручним при детальному аналізі зображення ока пацієнта. Формування даних (елементів зображення) в пам'яті здійснюється за допомогою перетворювача і процесора відеоданих. Дані заносяться в пам'ять з перетворювача відеоданих, а управління адресами здійснює контролер відеоданих. Для формування відеосигналу дані з пам'яті безперервно прочитуються в регістр – звідки вони в послідовному коді у формувач відеосигналу, з виходу якого повний сигнал на вхід відеомонітора. Контролер відеоданих виробляє рядкові і кадрові синхроімпульси для формування відеосигналу, а також одночасно адресні і стробуючі сигнали управління пам'яттю відеоданих, що забезпечує однозначну відповідність координат зображення на екрані відеомонітора і адрес пам'яті відеоданих. Відеоконтролер має можливість зсуву адреси пам'яті щодо кадрових синхроімпульсів, забезпечуючи зсув зображення по вертикалі [11].

Функціональна схема графічного адаптера показана на рис. 1. Обов'язковим елементом графічного адаптера є контролер монітора, в завдання якого входить формування сигналів сканування відеопам'яті та сигналів вертикальної і горизонтальної синхронізації монітора. Контролер монітора повинен забезпечувати необхідні частоти розгортки і режими сканування відеопам'яті, які залежать від режиму відображення (графічний або текстовий) і організації відеопам'яті. Опорною частотою для роботи контролера є частота виведення пікселів в графічних режимах або точок розкладання символів в текстовому режимі [12].

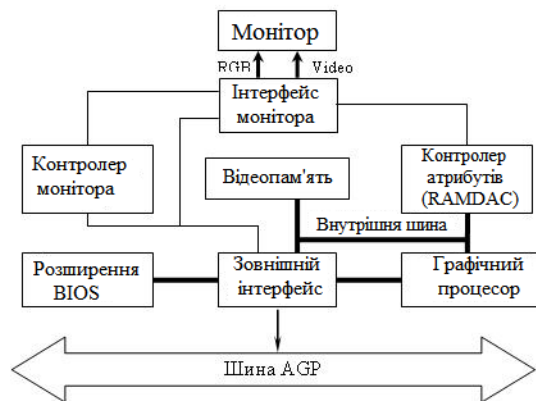


Рис. 1. Функціональна схема графічного адаптера

Відеопам'ять є спеціальною областю пам'яті, з якої контролер монітора організовує циклічне читання вмісту для регенерації зображення. Спочатку для відеопам'яті в карті розподілу пам'яті PC була виділена область адрес A0000h-BFFFFh, доступні будь – якому процесору x86. Для збільшення об'єму пам'яті (для VGA і SVGA) довелося застосовувати техніку перемикування банків пам'яті. Сучасні графічні адаптери мають можливість переадресації відеопам'яті в область старших адрес (понад 16 Мбайт), що дозволяє в захищеному режимі процесора працювати з цілісними екранів. На графічних адаптерах існує і архітектура уніфікованої пам'яті UMA. При такому підході під відеобуфер виділяється область системного ОЗП. Але це призводить до зниження продуктивності як графічної підсистеми, так і комп'ютера в цілому. Для підвищення продуктивності служить не просто виділення відеопам'яті, але і застосування в ній мікросхем із спеціальною архітектурою – VRAM, WRAM, MDRAM, RDRAM, SGRAM.

Контролер атрибутів управляє трактуванням колірної інформації, що зберігається у відеопам'яті. У текстовому режимі він обробляє інформацію з байт атрибутів знакомиць, а в графічному – біт

поточного пікселя, що виводиться. Контролер атрибутів дозволяє пов'язати об'єм колірної інформації, що зберігається, з можливостями монітора. До складу контролера атрибутів входять регістри палітр, які служать для перетворення кольорів, закодованих бітами відеопам'яті, в реальні кольори на екрані. З появою адаптерів, здатних обробляти більше 256 кольорів, на відеокарту їх монітора перенесли цифроаналогові перетворювачі сигналів базисних кольорів. Даний аспект є дуже важливим для погодження зорового сприйняття інформації лікарем та відображення її досить точно на моніторі. Це дозволить більш ефективно діагностувати патології очних захворювань, оскільки одними з основних параметрів при ідентифікації та аналізі очних патологій є форма та колір патологічного утворення [13].

Об'єднання ЦАП з регістрами палітр в даний час виконується у вигляді мікросхем RAMDAC (цифро-аналоговий перетворювач). Мікросхеми RAMDAC характеризуються розрядністю перетворювачів, яка може доходити до 8 бітів на колір, і граничною частотою вибірки (DOTCLK), якою вони здатні працювати.

Графічний контролер є засобом підвищення продуктивності програмної побудови зображень у відеопам'яті. У адаптерах EGA і VGA функції графічного контролера реалізовані апаратними засобами спеціалізованих мікросхем. Адаптери EGA і VGA мають чотири 8-ми бітових регістра, в яких фіксуються дані з відповідних їм кольорних шарів при виконанні будь-якої операції читання відеопам'яті. У подальших операціях запису у формуванні даних для кожного шару можуть брати участь дані від процесора і дані з регістрів відповідних шарів. Регістр бітової маски дозволяє побітно управляти джерелом записуваних даних: якщо біт регістра маски має нульове значення, то у відеопам'яті цей біт у всіх шарах буде записаний з регістра. Дані від процесора тільки для біт з одиничним значенням маски. При читанні графічний контролер може задавати номер читаного шару. У сучасних адаптерах функції графічного контролера, істотно розширені в порівнянні з EGA і VGA, виконуються вбудованим мікропроцесором – графічним акселератором.

Синхронізатор дозволяє синхронізувати цикли звернення процесора до відеопам'яті з процесом регенерації зображення. Від внутрішнього генератора виробляється частота виведення пікселів DotClock, щодо якої будуються всі часові послідовності сканування відеопам'яті, формування відеосигналів і синхронізації монітора. В той же час процесор звертається до відеопам'яті асинхронно процесу регенерації. У завдання синхронізатора входить узгодження цих асинхронних процесів [14].

Внутрішня шина адаптера призначена для високопродуктивного обміну даними між відеопам'яттю, графічним акселератором і зовнішнім інтерфейсом. Типова розрядність каналу даних у цієї шини 64/128 біт. Проте реально використовується розрядність може виявитися меншою, якщо встановлені не всі передбачені мікросхеми відеопам'яті.

Блок зовнішнього інтерфейсу зв'язує адаптер з однією з шин комп'ютера. Раніше для графічних адаптерів використовували шину ISA (8/16 біт). Сучасні графічні адаптери використовують в основному високопродуктивні шини, такі як PCI і ще продуктивніший канал AGP.

Модуль розширення BIOS зберігає код драйверів відеосервісу (INT 10h) і таблиці знакогенераторів. Цей модуль забезпечує можливість установки будь-якої карти, не замислюючись про проблеми програмної сумісності. Модуль розширення отримує управління для ініціалізації графічного адаптера майже на самому початку процедури POST. Модуль має початкову адресу C0000h і його розмір залежить від типу адаптера. Для підвищення продуктивності відеосистем застосовують тінюву пам'ять (Video BIOS Shadowing) або кешування (Video BIOS Caching). Для графічних адаптерів, інтегрованих в системну плату, програмна підтримка також вбудована в системну BIOS.

Сучасні відеоадаптери здатні також виконувати функції оброблення різного роду зображень, у тому числі біомедичних, знижуючи навантаження на центральний процесор ціною додаткових відеопам'яті. Об'єм відеопам'яті, встановленої на відеоадаптері, сьогодні визначається не розміром буфера кадру, а необхідністю виконання подібних додаткових операцій, і зазвичай складає 32-128 Мбайт [15].

Відеоприскорення – одна з властивостей відеоадаптера, яка полягає в тому, що частина операцій по побудові зображень може відбуватися без виконання математичних обчислень в основному процесорі комп'ютера, а чисто апаратним шляхом – перетворенням даних в мікросхемах відеоприскорювача. Відеоприскорювачі зазвичай входять до складу відеоадаптера (у таких випадках говорять про те, що відеокарта володіє функціями апаратного прискорення). Кілька років тому існували і відеоприскорювачі, які поставлялися у вигляді окремої плати, що встановлюється на материнській платі і підключається до відеоадаптера.

Розрізняють два типи відеоприскорювачів – прискорювачі плоскої (2D) і тривимірної (3D) графіки. Перші найбільш ефективні для роботи з прикладними програмами, що використовують стандартний інтерфейс (зазвичай офісного застосування), і оптимізовані для операційної системи Windows, а другі орієнтовані на роботу мультимедійних розважальних програм, насамперед комп'ютерних ігор, і професійних програм обробки тривимірної графіки. Зазвичай в цих випадках використовують різні

математичні принципи автоматизації графічних операцій. Всі сучасні відеокарти володіють функціями і двовимірною, і тривимірною прискорення. Саме можливість оброблення тривимірних зображень дозволить більш ефективно обробляти біомедичні зображення очей пацієнта, а завдяки особливій реалізації пам'яті відеоданих – більш точно ідентифікувати та діагностувати патології [16].

### ВИСНОВКИ

Отже, у роботі проведений аналітичний огляд методів та засобів оброблення біомедичних зображень на основі відеографічних технологій. Проведено патентний пошук США, країн Європи та вітчизняних джерел по технологіям оброблення біомедичної інформації, використовуючи графічні адаптери. Проаналізовано сучасний стан реалізації графічних адаптерів, їх архітектури та перспективи подальшого розвитку. Приведено методологічні особливості оброблення інформації, програмні моделі реалізації тощо.

На основі проведених досліджень обрано оптимальну апаратну архітектуру – систему графічних адаптерів GPU, оскільки вона дозволяє швидко та ефективно обробляти біомедичні зображення. Саме можливість оброблення тривимірних зображень дозволить більш ефективно обробляти біомедичні зображення очей пацієнта, а завдяки особливій реалізації пам'яті відеоданих – більш точно ідентифікувати та діагностувати патології.

У подальших дослідженнях планується проводити діагностування захворювань очей за допомогою системи аналізу зображення очей пацієнта.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крашенинников В. Р., Основы теории обработки изображений: учебн. пособие / В. Р. Крашенинников. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 150 с.
2. NVidia CUDA [Електронні ресурс] – Режим доступу: [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_home.html).
3. Denny Atkin. "Computer Shopper: The Right GPU for You". Retrieved 2007-05-15.
4. Bradley Sanford. "Integrated Graphics Solutions for Graphics-Intensive Applications". Retrieved 2007-09-02.
5. John Nickolls. "Stanford Lecture: Scalable Parallel Programming with CUDA on Manycore GPUs"
6. Darren Murph. "Stanford University tailors Folding@home to GPUs". Retrieved 2007-10-04.
7. Mike Houston. "Folding@Home - GPGPU". Retrieved 2007-10-04.
8. Linear algebra operators for GPU implementation of numerical algorithms", Kruger and Westermann, International Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2005
9. "ABC-SysBio—approximate Bayesian computation in Python with GPU support", Liepe et al., Bioinformatics, (2010), 26:1797-1799.
10. V. Garcia and E. Debreuve and M. Barlaud. Fast k nearest neighbor search using GPU. In Proceedings of the CVPR Workshop on Computer Vision on GPU, Anchorage, Alaska, USA, June 2008.
11. Michael Swaine, "New Chip from Intel Gives High-Quality Displays", March 14, 1983, p.16
12. Kirk D.B., Wen-mei W. Hwu «Programming massively parallel processors. A hands-on approach», 2010, 279 ст.
13. Боресков А.В. Основы работы с технологией CUDA / А.В.Боресков, А.А.Харламов. - М: ОЛМА-ПРЕСС, 2010. – 234 с.
14. J. Sanders, E.Kandrot «CUDA by example. An introduction to general-purpose GPU programming», 2010, 313 ст.
15. Леонтьев В.П. Новейшая энциклопедия персонального компьютера / В.П. Леонтьев. – М: ОЛМА-ПРЕСС, 2003. – 450 с.
16. Локазюк В.М. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК / В.М. Локазюк., Ю.Г.Савченко. – К: Академія, 2004. – 376 с.

Надійшла до редакції 05.12.2012 р.

**КОЖЕМ'ЯКО В.П.** – д.т.н., проф., завідувач кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ЗАГОРУЙКО Л.В.** - к.т.н., доц. кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**МАРТ'ЯНОВА Т.А.** – аспірант кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.