

## **Тема 12.** Процесори для високопродуктивних обчислювальних машин і систем

У сфері розробки і застосування процесорів для високопродуктивних обчислювальних машин і систем останніми роками відбулися значні стратегічні зміни. До середини 1980-х років високопродуктивні обчислювальні машини і системи (БПК, суперкомп'ютери) створювалися як одиничні екземпляри спеціалізованого призначення, для яких проектувалася унікальна архітектура дорогих багатокомпонентних векторно-конвеєрних процесорів, що збираються з великої кількості мікросхем. У теперішній час високопродуктивні обчислювальні машини і системи переходять у розряд таких, що серійно випускаються і відносно широко використовуються.

Компанії AMD і Intel користуються на цьому ринку приблизно тією ж стратегією, що і на мобільному. Вони пропонують адаптовані для даних умов процесори своїх модельних рядів, які, завдяки невисокій ціні і великій кількості програмного забезпечення для x86-архітектури, широко застосовуються у високо-продуктивних обчислювальних машинах і системах. Intel пропонує серію процесорів Xeon двох модифікацій. Перша з цих модифікацій – Xeon DP для робочих станцій і двопроцесорних серверів – є практично повним аналогом Pentium 4 з підтримкою багатопроцесорності. Інша модифікація – багато-процесорна версія Xeon MP – оснащується кеш-пам'яттю третього рівня, об'єм якої складає 1 або 2 Мбайт. Ці процесори найчастіше використовуються в чотирипроцесорних конфігураціях, вони мають 400-МГц системну шину і оснащені засобами Hyper-Threading. AMD для високопродуктивних обчислювальних машин і систем до недавнього часу пропонувала серію процесорів Athlon MP, що є повним аналогом Athlon Xp, але здатних працювати в двопроцесорних конфігураціях. Athlon MP зміг завоювати чималу популярність завдяки вигідному поєднанню ціна/продуктивність. Подальше посилення позицій корпорацій Intel і AMD пов'язане з впровадженням 64-розрядних процесорів. Найпродуктивніші обчислювальні системи вже давно будуються на базі 64-розрядних RISC-процесорів, таких, наприклад, як

вищезазначені процесори Alpha, Power, ULTRASPARC, PA-RICS. Перехід на 64 розряди дає те ж, що свого часу дав перехід від 8 до 16 і потім від 16 до 32 розрядів: значне збільшення об'єму прямоадресованої пам'яті і підвищення швидкості і/або точності деяких обчислень.

Intel і AMD під час проектування 64-розрядних процесорів використовують майже протилежні підходи. Створювана архітектура Intel не є продовженням x86. Хоч можливість використання програмного забезпечення для x86 залишається. AMD ж, навпаки, пропонує 64-розрядне розширення архітектури x86, здатне ефективно працювати як на 32-, так і на 64-розрядних завданнях. 64-розрядна архітектура IA-64 розробляється Intel з 1994 року за активної участі корпорації Hewlett-Packard. Ця архітектура має ідеологію VLIW і реалізована в її вдосконаленому варіанті EPIC. Архітектура IA-64 вперше була застосована Intel в 2001 році в процесорі Itanium з ядром Merced. Це складний і дорогий процесор, що містить 325 млн. транзисторів: 25 млн. у процесорному ядрі, включаючи кеш-пам'ять першого і другого рівнів об'ємом 32 і 96 Кбайт відповідно, і по 75 млн. в кожній з чотирьох додаткових мікросхем, що складають у сумі кеш-пам'ять третього рівня об'ємом 4 Мбайт. Itanium підтримує до 4 включених паралельно процесорів (для їх більшої кількості необхідний відповідний міст). На цьому процесорі вдалося досягти тактової частоти 800 МГц. Наступним кроком став випуск у 2002 році процесора Itanium 2 на базі ядра McKinley. В порівнянні з Merced він швидший, компактніший і набагато кращий за всіма основними параметрами. В Itanium 2 кеш-пам'ять другого рівня збільшена до 256 Кбайт, кеш-пам'ять третього рівня (до 3 Мбайт) інтегрована в процесорне ядро.

Пропоноване AMD 64-розрядне вирішення x86-64 реалізується в архітектурі Hammer, що відноситься до восьмого покоління процесорів x86. Архітектура Hammer достатньо близька до архітектури процесора Athlon, тобто є її 64-розрядним розширенням. Також є дев'ять виконавчих блоків і конвеєр завдовжки 12 рівнів. Довжина регістрів збільшена до 64 біт, додано декілька нових регістрів. Введена деяка кількість нових 64-розрядних інструкцій.

Підтримується новий і дуже ефективний набір операцій з плаваючою крапкою, що використовує 16 нових 128-розрядних регістрів. Об'єм кеш-пам'яті другого рівня – до 1 Мбайт. 64-розрядний процесор AMD Opteron представлений в 2003 році. Він стартував з частоти 1400 МГц. Opteron має багато переваг як перед 64-розрядними серверними процесорами Intel, так і перед традиційними 64-розрядними процесорами Alpha, Power PC, ULTRASPARC, MIPS. Основний плюс Opteron: при відносно невисоких значеннях ціни і тепловиділення ці процесори мають високу продуктивність. Важливим моментом слід визнати і те, що розробка корпорації AMD, незважаючи на 64-розрядну архітектуру, вже зараз забезпечена достатньою кількістю програмного забезпечення, яка завдяки своїй зворотній сумісності з 32-розрядною системою команд x86 дозволяє без втрат і навіть з виграшем у швидкодії виконувати звичайний 32-бітовий програмний код.

### **12.1 Багатоядерні процесори**

Багатоядерні процесори містять декілька процесорних ядер в одному корпусі (на одному або декількох кристалах). Процесори, призначені для роботи однієї копії операційної системи на декількох ядрах, є високо-інтегрованою реалізацією мультипроцесора.

Двоядерність процесорів включає такі поняття, як наявність логічних і фізичних ядер: наприклад, двоядерний процесор Intel Core Duo складається з одного фізичного ядра, яке у свою чергу розділене на два логічних. Процесор Intel Core 2 Quad складається з чотирьох фізичних ядер, що істотно впливає на швидкість його роботи.

10 вересня 2007 року були випущені в продаж нативні (у вигляді одного кристала) чотирьох'ядерні процесори для серверів AMD Opteron, що мали в процесі розробки кодову назву AMD Opteron Barcelona. 19 листопада 2007 року вийшов у продаж чотирьох'ядерний процесор для домашніх комп'ютерів AMD Phenom. Ці процесори реалізують нову мікроархітектуру K8L (K10).

27 вересня 2006 року Intel продемонструвала прототип 80-ядерного процесора. Передбачається, що масове виробництво подібних процесорів стане можливе не раніше переходу на 32-нанометровий техпроцес.

26 жовтня 2009 року Tiler а анонсувала 100-ядерний процесор широкого призначення серії TILE-Gx. Кожним процесорним ядром є окремий процесор з кешем 1, 2 і 3 рівнів. Ядра, пам'ять і системна шина зв'язані за допомогою технології Mesh Network. Процесори виготовляються по 40-нм нормам техпроцесу і працюють на тактовій частоті 1,5 ГГц. Випуск 100-ядерних процесорів призначався на 2011 рік.

На даний момент масово доступні двох-, чотирьох- і шестиядерні процесори, зокрема Intel Core 2 Duo на 65-нм ядрі Conroe (пізніше на 45-нм ядрі Wolfdale) і Athlon 64 X2 на базі мікроархітектури K8. У листопаді 2006 року вийшов перший чотирьох'ядерний процесор Intel Core 2 Quad на ядрі Kentsfield, що є збіркою з двох кристалів Conroe в одному корпусі. Нащадком цього процесора став Intel Core 2 Quad на ядрі Yorkfield (45 нм), архітектурно схожому з Kentsfield, але він має більший об'єм кеша і робочі частоти.

Компанія AMD пішла по власному шляху, виготовляючи чотирьох'ядерні процесори єдиним кристалом (на відміну від Intel, перші чотирьох'ядерні процесори якої є фактично склеюванням двох двоядерних кристалів). Незважаючи на всю прогресивність подібного підходу, перший «чотирьох'ядерник» фірми, який отримав назву AMD Phenom X4, вийшов не дуже вдалим. Його відставання від сучасних йому процесорів конкурента складало від 5 до 30 і більше відсотків залежно від моделі і конкретних завдань.

В 2009 році обидві компанії відновили свої лінійки чотирьох'ядерних процесорів.

Intel представила сімейство Core i7, що складається з трьох моделей, які працюють на різних частотах.

Core i7 (Bloomfield, Lynnfield або Gulftown) – чотирьох- або шестиядерний процесор останнього покоління, призначений для настільних комп'ютерів вищого класу. Вперше представлений у листопаді 2008 року. Чотирьох'ядерні

Bloomfield і Lynnfield виготовляються по 45-нм технології, шестиядерні Lynnfield – по 32-нм технології. Мікроархітектура Nehalem має три рівні кеш-пам'яті: L1 – 64 Кбайт (32 Кбайт для даних і 32 Кбайт для інструкцій) для кожного ядра; L2 – 256 Кбайт для кожного ядра; L3 – 8 або 12 Мбайт, є загальною для всіх ядер. Особливостями даного процесора є:

- Природжена чотирьох'ядерна будова. Єдиний процесорний кристал включає чотири ядра з 256-кілобайтним кешем L2 і загальний кеш L3, що розділяється.
- Заміна процесорної шини Quad Pumped Bus новим послідовним інтерфейсом QuickPath з топологією крапка-крапка, який може використовуватися не тільки для з'єднання процесора і чипсета, але і для зв'язку процесорів між собою.
- Вбудований у процесор контролер пам'яті, що підтримує триканальну DDR3 SDRAM - 1066/1333 МГц із напругою до 1,6В. При цьому кожен канал здатний працювати з двома модулями DIMM. Підтримка технології SMT (Simultaneous multithreading), яка є аналогічною пам'ятній технології Hyper-Threading. Завдяки їй кожне ядро Core i7 може виконувати два обчислювальні потоки одночасно, внаслідок чого процесор представляється в операційній системі вісьма ядрами.
- Кеш третього рівня, що розділяється, загальним об'ємом 8 Мбайт.
- Вбудований мікроконтролер PCU, незалежно керуючий напругою та частотою кожного з ядер і володіючий можливостями автоматичного розгону окремих ядер при пониженому навантаженні на інші ядра.
- Підтримка нового набору інструкцій SSE4.2.

Core i7 проводиться за технологією з нормами виробництва 45 нм, складається з 731 млн. транзисторів і має площу ядра 263 кв.мм.

Базова тактова частота для всіх моделей Core i7 – 133 МГц, номінальні частоти досягаються застосуванням множників. В модифікаціях Core i7 Extreme множник розблокований, що дозволяє безперешкодно підвищувати тактову частоту процесора.

Сумісні набори системної логіки: серія 8xx – Intel H55 Express, H57 Express, P55 Express, Q57 Express, серія 9xx – Intel X58 Express.

Слабкою стороною платформи, використовуючою Core i7, є її надмірна вартість, оскільки для установки даного процесора необхідна дорога материнська плата на чипсеті Intel X58 і триканальний набір пам'яті типу DDR3, що також має на даний момент високу вартість.

Техпроцес супершвидкісного процесора виробництва Intel – Core i7 з вісьма ядрами планується зменшити з 45 до 32 нм. Завдяки підтримці триканальної пам'яті DDR3 об'єм RAM в 6 Гбайт стане стандартом, як і необхідні для цього 64-бітові операційні системи.

Core i5 (Clarkdale або Lynnfield) – дво- або чотирьохядерний процесор останнього покоління, призначений для настільних комп'ютерів середнього рівня. Вперше представлений 8 вересня 2009 року. Встановлюється в роземи LGA1156. Двоядерні Clarkdale виготовляються по 32-нм технології, чотирьохядерні Lynnfield – по 45-нм технології. Мікроархітектура Nehalem. Має три рівні кеш-пам'яті: L1 – 64 Кбайт (32 Кбайт для даних і 32 Кбайт для інструкцій) для кожного ядра; L2 – 256 Кбайт для кожного ядра; L3 – 4 або 8 Мбайт, є загальною для всіх ядер. Процесор оснащений вбудованим двоканальним контролером оперативної пам'яті DDR3-1066/1333 МГц з напругою до 1,6В. Модулі, що розраховані на більш високу напругу, не будуть працювати з цим чипом і навіть можуть його зашкодити.

Оснащений вбудованим контролером PCI Express 2.0 x16, завдяки якому графічний прискорювач може підключатися прямо до процесора. В моделях із вбудованим графічним ядром GMA HD до чипа може підключатися одна відеокарта в режимі x16, в моделях без вбудованої графіки – дві відеокарти в режимі x8 кожна.

Для з'єднання з набором системної логіки застосовується шина DMI (Digital Media Interface) с пропускною здатністю 2 Гбайт/с.

У двоядерних моделях (серія 6xx) вбудований графічний адаптер GMA HD і реалізована технологія Hyper-Threading, в чотирьох'ядерних (серія 7xx) графіки

і Hyper-Threading немає. В моделях, номер яких закінчується на 1, тактова частота графіки становить 900 МГц, в моделях, номер яких закінчується на 0, графічне ядро працює на частоті 733 МГц.

У всіх Core i5 реалізована технологія автоматичного підвищення тактової частоти Turbo Boost у ресурсномістких завданнях.

Базова тактова частота для всіх моделей Core i5 – 133 МГц, номінальні частоти досягаються застосуванням множників.

Сумісні набори системної логіки: Intel H55 Express, H57 Express, P55 Express, Q57 Express.

Core i3 (Clarkdale) – двоядерний процесор останнього покоління, призначений для настільних комп'ютерів початкового рівня. Вперше представлений 7 січня 2010 року. Мікроархітектура Nehalem. Встановлюється в роз'єми LGA1156. Виготовляється по 32-нм технології.

Процесор Core i3 використовує три рівні кеш-пам'яті: L1 – 64 Кбайт (32 Кбайт для даних і 32 Кбайт для інструкцій) для кожного ядра; L2 – 256 Кбайт для кожного ядра і L3 – 4 Мбайт, є загальною для всіх ядер.

Оснащений вбудованим двоканальним контролером оперативної пам'яті DDR3-1066/1333 МГц із напругою до 1,6В. Модулі, що розраховані на більш високу напругу, не будуть працювати з цим чипом і навіть можуть його зашкодити.

Оснащений вбудованим контролером PCI Express 2.0 x16, завдяки якому графічний прискорювач може підключатися прямо до процесора. Для з'єднання з набором системної логіки застосовується шина DMI (Digital Media Interface) з пропускною здатністю 2 Гбайт/с.

У процесори Core i3 вбудоване графічне ядро GMA HD з дванадцятьма конвеєрами і тактовою частотою 733 МГц.

Базова тактова частота для всіх моделей Core i3 – 133 МГц, номінальні частоти досягаються застосуванням множників.

Сумісні набори системної логіки: Intel H55 Express, H57 Express, P55 Express, Q57 Express.

Компанія AMD у свою чергу перевела випуск своїх CPU на основі мікроархітектури K10 на 45-нанометровий технологічний процес – з'явилися процесори AMD Phenom II. Від AMD Phenom вони відрізняються не тільки досконалішою технологією виробництва, але і злегка переробленим ядром, окремі блоки якого були оптимізовані і допрацьовані. Процесор має три рівні кеш-пам'яті: L1 – об'ємом 128 Кбайт на кожне ядро, L2 – об'ємом 512 Кбайт на кожне ядро і L3 – об'ємом 6 Мбайт. Новий процесор увійшов до складу платформи, що отримала назву Dragon.

Процесори модельного ряду AMD Phenom II виготовляються методом іммерсійної літографії по 45-нанометровому техпроцесу. Це перші процесори AMD, у ході виробництва яких застосовується така досконала технологія. Нагадаємо, що Intel почала використовувати 45-нанометрову технологію для виробництва мікропроцесорів ще в кінці 2007 року. Модельний ряд AMD Phenom II складається з двох чотирьох'ядерних CPU для роз'єму Socket Am2+ – топового AMD Phenom II X4 940 Black Edition з розблокованим множником і частотою 3 ГГц і AMD Phenom II X4 920, що працює на частоті 2,8 ГГц.

AMD Phenom II X4 містить 758 млн. транзисторів, площа його кристала складає 258 мм<sup>2</sup>. Процесор попереднього покоління Phenom X4 складається з 450 млн. транзисторів, розміщених на площі 285 мм<sup>2</sup>. Більш ніж півторакратне збільшення кількості транзисторів обумовлено тим, що: всі чотири ядра в обох моделях розміщені на одному кристалі; нові процесори сумісні зі всіма моделями материнських плат, що є на сьогоднішній день, з роз'ємом Socket Am2+ (для установки Phenom II потрібно буде всього лише відновити BIOS). AMD продовжує наслідувати концепцію зворотної сумісності, і процесори Phenom II також можуть працювати в деяких платах з роз'ємом Socket Am2.

У 2011 році Intel анонсує, а потім трохи пізніше випускає партію нових процесорів на архітектурі Sandy Bridge, для нового, що вийшов в тому ж році сокету LGA 1155. Це друге покоління сучасних процесорів Intel.



Цікаво, що в тому ж 2011, вийшов новий сокет LGA 2011, для якого вийшли два супер-процесора i7 4820K (4 ядра, 8 потоків, з L3 кешем - 10 Мб) і i7 4930K (6 ядер, 12 потоків, L3 кеш дорівнює цілих 12 Мб).

У 2012 Intel випускає 3 покоління процесорів, під назвою Ivy Bridge. Нове покоління процесорів, базується на сокеті - LGA 1155.

Провідні процесори четвертого покоління (Haswell-E): i7-5960X Extreme Edition, i7-5930K і 5820K, адаптовані під серверні рішення. Вони базуються на новому 2011 v3 сокеті і продуктивність у них виняткова, що не дивно, адже у старшого процесора в лінійці цілих 16 потоків і 20 Мб кеша.

У 2015 виходить Skylake, на сокеті 1151. Процесори цього покоління відрізняється від усіх попередніх: по-перше, зменшеними розмірами теплорозподільної кришки, для поліпшеного теплообміну з системою охолодження на процесорі, по-друге, підтримкою пам'яті DDR4.

У 2016 році Intel представила п'яте покоління процесорів – Broadwell-E. Core i7-6950X був перший в історії десктопний десятиядерний процесор в світі.

2 березня 2017 го року в продаж надійшли нові процесори старшої лінійки AMD Ryzen 7, що включали в себе 3 моделі: 1800x, 1700x і 1700. На сьогодні старший Ryzen - найшвидший восьм'ядерний процесор в світі.

Зараз компанії AMD і Intel представляють нові флагманські процесори. У AMD це Ryzen Threadripper, у Intel – Core i9. Процесор Intel Core i9-7980XE це вісімнадцяти ядерний тридцяти шести потоковий процесор. Intel Core i9-7960X це шістнадцяти ядерний тридцяти двох потоковий процесор. Процесор AMD Ryzen Threadripper 1950X – шістнадцяти ядерний тридцяти двох потоковий.