

Шинкарчук Н. В., к.т.н., доцент (Рівненський державний гуманітарний університет, м. Рівне, nazar.shynkarchuk@rshu.edu.ua)

КОНЦЕПЦІЯ ПРОЦЕСОРНОЇ АРХІТЕКТУРИ INTEL RAPTOR LAKE І AMD ZEN 4

Подано загальну інформацію про процесорну архітектуру x86 і ARM. Описано підходи RISC і CISC. Проведено огляд базових процесорів Intel Core 13-го покоління і AMD Ryzen 7000-серії. Досліджено технічні особливості та продуктивність архітектури Raptor Lake і Zen 4. Проаналізовано поточний стан справ на ринку материнських плат з новими чіпсетамі Intel і AMD.

Ключові слова: архітектура; процесор; тактова частота; ядро; кеш-пам'ять, чіпсет; Intel; AMD.

Постановка проблеми. З кожним роком, напівпровідникові елементи все помітніше впливають на повсякденне життя людини. Про мікросхеми (чіпи) багато говорять ІТ-спеціалісти, а термін стає загальноприйнятим і зрозумілим. Стрімке і повсюдне їхнє проникнення є результатом розвитку таких технологій, як машинне навчання, штучний інтелект, Інтернет речей, 5G-зв'язок. Своє місце займають комп'ютери, ноутбуки, різноманітні девайси, які наділені високою продуктивністю, завдяки розвитку процесорної індустрії. Приблизна рівність тактової частоти процесорів Intel і AMD, які є основними конкурентами, підкреслює тісну конкуренцію між їхнім поточним поколінням мікросхем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [1] проаналізовано основні тенденції розвитку сучасних процесорних архітектур на базі напівпровідникової техніки Intel. Дослідження діапазону зміни реальної продуктивності та реальної ефективності ядер сучасних процесорів, проведено в [2]. В [3] описано методику підвищення продуктивності персонального комп'ютера шляхом розгону його центрального процесору. Аналіз енергетичного аспекту використання кластерів обчислювачів та порівняння систем на архітектурі x86 та ARM наведено в [4]. У статті [5] розглянуто структуру мультипроцесорних систем на архітектурі сучасних мультимедійних процесорів Nexperia з 32-розрядним обчислювальним ядром.

Мета статті. В статті досліджено процесорну архітектуру Intel Raptor Lake і AMD Zen 4, проаналізовано відмінності між їхніми дизайнерськими підходами та що це означає на практиці.

Вступ. Коли купується новий комп'ютер чи ноутбук, на вибір є дві основні архітектури процесора, системи з Windows зазвичай побудовані на платформі x86, яку використовують компанії Intel і AMD з різними дизайнерськими підходами, тоді як системи Apple використовують процесори M1 та M2 на основі платформи ARM.

Останніми роками між AMD і Intel точилася запекла боротьба за перевагу на ринку CPU. Перші процесори Ryzen від AMD зробили революцію на ринку з точки зору вартості та кількості ядер, але зазнали труднощів, коли справа дійшла до вихідної тактової частоти, тоді як Intel пропонувала високу тактову частоту, але відносно мало фізичних ядер. З роками, AMD неухильно ставала все більш і більш конкурентоспроможною в параметрі величини тактової частоти, тоді як Intel в кількості ядер і вартості.

Незважаючи на те, що AMD отримала велику кількість позитивних і схвальних відгуків від покупців персональних комп'ютерів, завдяки своїм попереднім настільним процесорам Ryzen, все ж більшість з них будуть купувати CPU з максимальною продуктивністю.

Виклад основного матеріалу. *Архітектура x86 і ARM.* Процесорні платформи x86 і ARM виконують ту саму роботу, але по-різному. Їхня системна логіка організована по-різному, з відмінними конфігураціями внутрішніх реєстрів даних і різними наборами інструкцій. Структура та набір інструкцій процесора x86 в основному базується на Intel 8008, 8-розрядному процесорі 1972 року випуску. Природно, що апаратне забезпечення з тих часів значно вдосконалилося, після 8008 з'явився 8088, а потім 16-розрядний 8086, який використовувався в оригінальному IBM PC, звідси і псевдонім «x86».

Чіпи AMD не мають такої чіткої ідентифікації, оскільки вони використовують ту саму архітектуру ядра x86 і набір інструкцій, що й Intel. У 1980-х роках AMD отримала ліцензійний дозвіл на випуск процесорів Intel 8086, 80186 і 80286. На рубежі тисячоліть, AMD розробила абсолютно новий 64-розрядний режим обробки до архітектури x86 з удосконаленнями для підтримки роботи з більшими наборами даних і обсягами оперативної пам'яті. Потім ці розширення були ліцензовані Intel, що призвело до ситуації, коли сьогодні дві компанії фактично залежать одна від одної: Intel

дозволяє AMD використовувати оригінальну архітектуру x86, тоді як AMD дозволяє Intel використовувати 64-розрядні розширення.

Архітектура ARM започаткована компанією Acorn Computers у середині 1980-х років, в той час, коли ця компанія прагнула створити наступника надзвичайно популярного комп'ютера BBC Micro. Замість того, щоб купувати чіпи у стороннього постачальника Acorn Computers взялася за розробку власного процесора, який перевершив би апаратні рішення конкурентів. І це вдалося, Acorn Archimedes на базі ARM був найпотужнішим домашнім комп'ютером, який можна було купити за гроші в той час. Сьогодні платформа ARM належить компанії Arm Limited.

RISC проти CISC. RISC розшифровується як «комп'ютер зі скороченим набором інструкцій» і це ідея, яка стала популярною в 1980-х і 1990-х роках. Це був період, коли Intel та інші виробники чіпів «вбудовували в кремній» все більше можливостей і функцій, такі процесори стали називати мікросхемами CISC, що означає «комп'ютер із набором інструкцій».

Філософія RISC використовує дещо протилежний підхід, прагнучи зробити центральний процесор максимально простим, надати йому тільки основні функції. Архітектура ARM використовує лише 34 інструкції, які здебільшого обробляють прості математичні операції та переміщують дані між регістрами і ділянками пам'яті. Навпаки, Intel 8086 підтримував 81 інструкцію, що дозволяло виконувати набагато більше операції з даними, а з подальшими вдосконаленнями його було розширено до понад 200 інструкцій.

Підхід RISC може здатися нелогічним. Менший набір інструкцій означає, що програми мають бути об'ємнішими та складнішими, щоб досягти тих же результатів CISC. Однак, мікросхема RISC має набагато простіший фізичний дизайн ніж CISC, а це може спростити та здешевити виробництво, а також дозволити реалізувати інструкції з більшою швидкістю (у більшості випадків кожна операція виконується за один такт). Крім того, він може споживати менше енергії, тому процесори ARM домінують у мобільних телефонах і планшетах.

Хоча підходи CISC і RISC дещо протилежні, відмінності не такі великі. У наш час небагато програм пишуться чистою мовою Assembler, тому розробникам не потрібно турбуватися про базову архітектуру: вони можуть програмувати на Python, C/C++ або будь-якій іншій мові.

Ще однією відмінністю між двома основними обчислювальними архітектурами є те, що на відміну від Intel/AMD, ARM не виробляє власні процесори. Натомість компанія надає ліцензію на виготовлення чіпів з власними специфікаціями. Наприклад, Apple використовує основну логіку ARM, але додає в мікроархітектуру чіпа свій дизайнерський почерк і «доручає» виробництво TSMC.

Лінійка процесорів. Сімейство процесорів Intel 13-го покоління містить чимало моделей, але розглянемо три основні варіанти – Core i9-13900, Core i7-13700 і Core i5-13600, кожен з суфіксом K і KF. Приставка K означає, що кожен процесор має розблокований множник, а F, що вбудована графіка – відсутня.

Core i9-13900K має вісім P-Cores і шістнадцять E-Cores, що забезпечує величезну загальну кількість фізичних ядер – двадцять чотири. Враховуючи, що P-Cores підтримують технологію Hyper-Threading, то Core i9-13900K може обробляти до 32 потоків додатків одночасно – це найвищий показник серед настільних процесорів Intel. Однак, як і у випадку з процесорами 12-го покоління, E-Cores значно повільніші за P-Cores, таким чином, незважаючи на те, що Core i9-13900K може одночасно працювати над чималою кількістю потоків, швидкість з якою він це робитиме буде значно повільнішою, ніж якби він мав двадцять чотири P-Cores.

Така гібридна архітектура Intel з E-Core/P-Core ускладнює пряме порівняння з конкуруючими процесорами AMD, оскільки в їхніх розробках використовуються лише ядра еквівалентні P-Core. Отже, хоча AMD Ryzen 7950X містить лише шістнадцять ядер порівняно з двадцять чотирма у Core i9-13900K, кількість високопродуктивних ядер у нього вдвічі більша. Крім того, оскільки кожне з цих ядер може обробляти два потоки одночасно завдяки багатопоточності (SMT, Simultaneous multithreading), Ryzen 9 7950X відповідає Core i9-13900K за загальною кількістю потоків, які він може обробляти одночасно.

Тактова частота – характеристика, яка зазнала значних змін у порівнянні Core i9-13900K зі старішим Core i9-12900K. Останній досяг 5.2 ГГц, а Core i9-13900K – 5.8 ГГц, а Core i9-13900KS рекордних – 6 ГГц. Щодо енергоспоживання, то Core i9-13900K має базову потужність 125 Вт, але це сильно не відповідає цифрам, коли чіп працює під навантаженням [6].

Core i7-13700K має на чотири E-Core більше ніж Core i7-12700K, таким чином, кількість ядер становить вісім P-Cores і вісім E-Cores, тобто шістнадцять фізичних ядер, які можуть обробляти двадцять

чотири потоки одночасно. Пікова тактова частота також виросла з 5 ГГц до 5.4 ГГц. Core i5-13600K теж додає чотири E-Cores порівняно з еквівалентом 12-го покоління Core i5-12600K, доводячи загальну кількість ядро/потік до 14/20 із шістьма P-Core та вісьмома E-Core з максимальною тактовою частотою 5.1 ГГц. Особливість цього процесора – він володіє хорошим розгінним потенціалом [6].

У базовому списку AMD представлено чотири настільні процесори Ryzen 7000: 16-ядерний Ryzen 9 7950X, 12-ядерний Ryzen 9 7900X, 8-ядерний Ryzen 7 7770X і 6-ядерний Ryzen 5 7600X. Всі вони підтримують багатопоточність, тому мають вдвічі більше потоків, ніж фізичних ядер.

16-ядерний Ryzen 9 7950X досягає пікової одноядерної тактової частоти 5.7 ГГц, що забезпечує збільшення максимальної тактової частоти на 0.9 ГГц або 18 відсотків порівняно з Ryzen 9 5950X. Всі інші процесори також мають високу тактову частоту: від 5.3 ГГц у Ryzen 5 7600X до 5.6 ГГц у Ryzen 9 7900X [7].

Зважаючи на те, що базова тактова частота протягом тривалого часу була єдиною характеристикою, де AMD не могла конкурувати з Intel, це безсумнівно успіх. Тому технологи AMD можуть радіти тому, що зробили великий крок вперед у цьому напрямку. Одним із негативних наслідків загального підвищення тактової частоти і обчислювальної потужності в серії 7000 є збільшення споживання електроенергії та виділення тепла. Теплова потужність (TDP, Thermal design power) для серії 5000 склала 105 Вт, а для 7950X і 7900X вже 170 Вт. Тому якісне охолодження буде необхідним, оскільки ці мікросхеми під сильним навантаженням будуть нагріватися. Замість того, щоб протистояти цьому збільшенню максимального TDP, AMD представила режим Eco Mode, який можна використовувати для обмеження TDP процесора до 105 Вт або навіть до 65 Вт, однак це вплине на максимальну продуктивність і спрацює відповідно, коли тактова частота нижча 5 ГГц і 4 ГГц.

Нові процесори AMD тепер включають вбудовану графіку Radeon – RDNA 2, це зроблено вперше для стандартних чіпів Ryzen. Такої інтегрованої графіки вистачить для простої роботи за персональним комп'ютером. AMD стверджує, що вбудований графічний процесор Radeon, який містить подвійний обчислювальний блок не призначений для ігор, а натомість він лише призначений для використання настільного комп'ютера з монітором, який підтримує високу роздільною здатністю, а також декодування та кодування відео AV1 і H.264. Графічні процесори RDNA2 мають 64 466

потоків процесори на обчислювальну одиницю і відповідно 128 у вбудованому графічному процесорі. Для порівняння, Radeon RX 6600 має 28 обчислювальних блоків (1792 поточкових процесора), тому існує величезна різниця в продуктивності між цим вбудованим графічним процесором і «скромною» відеокартою [7].

Мікроархітектура. Intel підтвердила, що базова архітектура її чіпів Raptor Lake схожа з Alder Lake, оскільки P-Cores і E-Cores, інтегрована графіка та інші будівельні блоки мають практично однаковий дизайн [6]. Таким чином, щоб отримати розуміння про Raptor Lake, потрібно озирнутися на те, що Alder Lake може зробити. Чіпи Alder і Raptor Lake реалізовані на одному кристалі кремнію, а не на кількох чіплетах, які використовуються для створення процесорів AMD Ryzen. Перевага такого монолітного підходу полягає в тому, що спрощує з'єднання всіх компонентів на чіпі замість того, щоб покладатися на зовнішні з'єднання між ними. Однак це дорожчий і ризикованіший підхід у виробництві будь-якої мікросхеми, аніж підхід AMD, оскільки навіть невеличкий дефект може зруйнувати цілий процесор, а не лише одну меншу його частину. Більше того, необхідно використовувати найновіший виробничий процес для всього CPU, тоді як використання чіплетного підходу дозволяє використовувати дешевші, старіші або по-іншому оптимізовані процеси для деяких компонентів, таких як матриця введення-виведення AMD. Саме з цих та інших причин Intel збирається застосувати підхід чіплетів для своїх майбутніх чіпів Meteor Lake.

Повертаючись до загального дизайну Alder і Raptor Lake, великим доповненням Alder Lake стало впровадження енергоефективного ядра E-Core для виконання низькопріоритетних фонових завдань і надання додаткових послуг (наприклад, можливість паралельної обробки з мінімальним енергоспоживанням). Кожен кластер із чотирьох E-Core, споживає менше кремнію та займає приблизно стільки ж місця на кристалі, скільки одне ядро P-Core. У цих P-Cores використовується дизайн ядра під кодовою назвою Golden Cove і вони в основному є еволюційним продовженням ядер Sunny Cove і Cypress Cove, які використовуються в процесорах Intel Core 10-го та 11-го поколінь. У них використовується на 50 відсотків ширший мікроопераційний декодер і мікрооперативний кеш, який майже вдвічі більший, ніж у Cypress Cove. Інші оптимізації включали подвоєння буфера перегляду трансляції, збільшення черги мікрооперацій і подвоєння

цільового буфера розгалужень (BTV, Branch target predictor) кешу. «Передня» частина ядра процесора відповідає за розбиття великих інструкцій на менші мікрооперації, таким чином реалізується оптимізація порядку виконання інструкцій і прогнозування результатів розгалужень у коді. Більший декодер мікрооперацій, кеші мікрооперацій і BTV гарантують, що процесор зможе зберігати якомога більше потенційних фрагментів для ефективної роботи. Завдяки цьому частина чіпа, де виконуються мікрооперації, споживає електроенергію ефективніше.

Тепер до механізму виконання, де Intel дещо збільшила кількість портів виконання з десяти до дванадцяти і значно збільшила буфер переупорядкування (ROB, Processor reorder buffer), який використовується для зберігання результатів інструкцій для використання іншими інструкціями з 352 записів у Cypress Cove до 512 записів у Golden Cove. Підсумок цих змін: 19-відсоткове збільшення інструкцій за такт в P-Core порівняно з чіпами Cypress Cove; E-Cores вийшли на рівень продуктивності Intel Skylake з 40-відсотковим пониженням енергоспоживання [6].

Розглянувши архітектуру Alder Lake, тепер можна ґрунтовніше дослідити внесені зміни, вже у Raptor Lake, які забезпечують значне підвищення результуючої продуктивності чіпа. Ця мікроархітектура 13-го покоління використовує останню ітерацію виробничого процесу Intel 7. Вдосконалення мобільності каналу (швидкість потоку електронів через затвор транзистора), дозволило отримати вищі тактові частоти і понизити напругу. Незважаючи на ці зміни, революції в енергоефективності чи пониженні енергоспоживання – не відбулося.

Важливою зміною в Raptor Lake є збільшення розміру кешу L2. P-Cores тепер має 2 Мб кожне, замість 1280 Кб. E-Cores отримали подвійний обсяг кешу L2 на кластер із чотирьох E-Cores, від 2 Мб до 4 Мб, що забезпечило Core i9-13900K 32 Мб кешу L2. Ще одним нововведенням в Raptor Lake є зміна алгоритму попередньої вибірки. Це стосується попередньої вибірки інструкцій або даних із пам'яті чи повільніших сховищ кешу та переміщення їх у швидші кеші. Мікроархітектура Alder і Raptor Lake включає підтримку пам'яті DDR5 та зберігає підтримку DDR4, а також використовує вбудований графічний модуль на базі архітектури Intel Xe [6].

У AMD, інтегрований теплорозподілювач (IHS, Integrated heat spreader), в CPU Ryzen серії 7000, містить два або три основні чіпи, які складаються з однієї або двох матриць Zen 4 з ядром комплексу 468

(CCX, Core complex) і плашки (CCD, Core complex die) та матриці вводу/виводу (IOD, Input/Output die). IOD забезпечує і контролює зв'язок між кристалами Zen 4, а також між центральним процесором і обчислювальною системою. Він включає і підтримує такі функції, як з'єднання Infinity Fabric, контролер DDR5 DRAM, інтерфейс PCI-E5, інтерфейс USB 3.2. Тут також розміщено новий інтегрований графічний чіп RDNA 2 [7].

Кожна CCD базово містить вісім ядер Zen 4, проте лише деякі з них можуть бути ввімкненими при побудові CPU. Наприклад, Ryzen 7 7770X має дві CCD-матриці, причому на кожній з цих CCD-матриць буде вимкнено два ядра. Окрім ядер, кожна CCD містить 321 фрагмент кешу L3. Коли ядра CCD вимкнено, дві сусідні частини кешу L3 також вимикаються [7].

Окрім зони для з'єднання Infinity Fabric і кількох додаткових блоків керування системою, це все, що входить до складу CCD – усі інші функції процесора передаються на IOD. Цей підхід використання кількох матриць для різних функцій відомий як чіплетний дизайн – має чимало переваг і один недолік. Переваги: підвищення ефективності виробництва (дозволяє вмістити більше менших CCD-матриць у кремнієву пластину, ніж у більшу одинарну матрицю), вплив будь-яких дефектів зменшується (одна зіпсована CCD використовує набагато менше кремнію, аніж ціла зіпсована матриця процесора), можливість створювати широкий спектр проектів CPU з використанням тих самих основних «будівельних блоків» (з тими самими компонентами AMD теоретично може запропонувати будь-яку конструкцію від 2-ядерного до 16-ядерного настільного процесора). Основний недолік дизайну чіплета AMD це проблематика у керуванні потоком даних між CCD-матрицями та IOD (використання не кремнієвих з'єднань між CCD та IOD призводить до значного зниження швидкості). CCD-матриці AMD побудовані на новітньому 5-нм техпроцесі від TSMC, але ось новий IOD побудований на 6-нм техпроцесі TSMC. Обидва є оновленнями серії Ryzen серії 5000, які використовували 6-нм або 7-нм техпроцес для матриць ядра та 14-нм для IOD.

Як завжди, перехід до меншого виробничого процесу це менше енергоспоживання та підвищення тактової частоти. AMD стверджує, що процесори Ryzen 7000-ї серії забезпечать 62-відсоткове зниження енергоспоживання за того ж рівня продуктивності, як у Ryzen 5000-ї серії або 49-відсоткове підвищення продуктивності за того самого енергоспоживання. Хоча значна частина цього

вдосконалення пов'язана лише з новим виробничим процесом, нова архітектура Zen 4 може похвалитися 13-відсотковим зростанням кількості інструкцій за такт (IPC, Instructions per cycle) порівняно з Zen 3 [7].

Якщо поглянути на структуру ядра Zen 4 з точки зору блок-схеми, то на макрорівні загальний вигляд побудови ядра схожий на Zen 3, з тим же зовнішнім виглядом, таким же компонованням механізму виконання, налаштуваннями завантаження/збереження та кеш-пам'яті. Фактично, блок-схеми Zen 3 і Zen 4 на перший погляд не відрізняються, однак коли мова йде про частину ядра механізму виконання, то на макрорівні механізм виконання операцій в Zen 4 інший. Він все ще має проблеми з кількістю операцій, які можуть бути виконані за цикл: десять для цілочисельного механізму та шість для механізму з плаваючою комою. Розташування планувальника також залишається таким же, як і раніше, налаштування 4x2 для цілого числа та 2x3 для числа з плаваючою комою. Проте є зміни, приховані всередині механізму виконання, які сумарно забезпечують помірне підвищення продуктивності. До них відноситься збільшення на 25 відсотків черги видалення інструкцій, більший файл основного реєстру як для механізмів цілочисельного, так і з плаваючою комою, а також більш ємні буфери в усьому ядрі та має дещо більші сховища даних ніж у Zen 3.

Продуктивність. Кінцевим результатом змін у мікроархітектурі Raptor Lake є заявлене 15-відсоткове збільшення однопоточної продуктивності при порівнянні Core i9-12900K з Core i9-13900K, відповідно до цифр Intel. Приблизно 70 відсотків цього покращення є наслідком підвищення тактової частоти, а приблизно 15 відсотків з них за рахунок підвищення швидкості обміну даними та збільшення обсягу кешу. Примітно, що таке підвищення продуктивності не пояснюється покращенням інструкцій за такт (IPC), як і слід було очікувати, враховуючи відсутність дійсно істотних змін в цій мікроархітектурі. Це контрастує з впровадженням Alder Lake, який приніс із собою 19-відсоткове збільшення IPC порівняно з Rocket Lake. Що стосується багатопоточної продуктивності, то тут Intel заявляє про зростання на 41 відсоток, значною мірою завдяки додатковим E-Cores. Частота і кеш-пам'ять є наступними, за значенням, фактором покращення багатопоточної продуктивності. Це вказує на важливість мати достатньо великі та швидкі сховища даних для ефективного переміщення і опрацювання даних процесором [6].

Окрім вдосконалення апаратної частини CPU, Intel також добре попрацювала над вдосконаленням своєї системи Thread Director. Використовуючи машинне навчання, Intel розрахувала «нові межі» для кожного з потоків, зробивши ставку на Thread Director при визначенні, які з них оптимально опрацюють ядра P-Core, а які краще перенаправити в ядра E-Cores. Розгін процесорної лінійки Intel з мікроархітектурою Raptor Lake став простішим, завдяки виконаним спеціалістами Intel вдосконаленням – це Extreme Tuning Utility. Зокрема, тепер доступна функція по налаштуванню кожного з ядер P-Cores і E-Cores окремо.

Перше велике вдосконалення інтерфейсу в AMD Zen 4 – збільшення оперативного кешу на 68 відсотків. Це дозволяє ядру водночас обробляти та визначати пріоритети для більшої кількості операцій, забезпечити роботою механізм виконання найефективнішим способом. Механізм «передбачення розгалужень» також покращений. Очікування від результату розгалуження перед переходом до наступного етапу виконання може призвести до того, що процесор «втратить роботу». Тому, CPU використовують «передбачення розгалуження», щоб «вгадати» результат розгалуження і налаштувати дані та операції для такого результату виконання розгалуження. «Прогнозування розгалужень» є одним із перших етапів, які проходить інструкція, коли її отримує центральний процесор, оскільки правильне вгадування заощадить багато часу та ресурсів. У Zen 4 «передбачення розгалужень» зазнало кількох вдосконалень, зокрема збільшено цільовий буфер розгалужень (BTB) кешу L1 і L2.

AMD пояснює більш значне підвищення продуктивності в змінах завантаження та зберігання даних ядра Zen 4. Вони стосуються переміщення даних між ядром і оперативною пам'яттю або внутрішніми кешами. Знову ж таки, загальне налаштування в основному таке ж, як і в Zen 3, з максимум трьома операціями з пам'яттю за такт. Однак, розмір кешу даних L2 було збільшено на 50 відсотків, а чергу завантаження на 22 відсотки. Збільшені сховища даних дозволяють одночасно використовувати і опрацьовувати більше даних, підвищуючи ймовірність того, що «правильні дані» будуть оперативно доступні для інших операцій. Недоліками більших кеш-пам'ятей є збільшення простору на кристалі та потенційні труднощі з забезпеченням ефективного доступу до них, але AMD вважає, що більші сховища кешу забезпечать «чисту вигоду» [7].

Одним із найбільш інтригуючих нововведень в Zen 4 є належна апаратна підтримка 512-бітних векторних інструкцій (інструкцій, які виконують обчислення на кількох бітах даних одночасно), відомих як AVX-512. Як правило, AVX-512 використовується лише в наукових розрахунках, програмах зі штучним інтелектом та в інших подібних спеціалізованих програмах, користуються дедалі більшою підтримкою та є функцією, яку Intel давно підкреслює як важливу. Реалізація AVX-512 від Intel була енергоємною, це спричиняло величезні стрибки потужності, які значно перевищували номінальну вихідну потужність чіпів. AMD заявляє про енергоефективну і стабільну роботу AVX-512 в архітектурі Zen 4. Проте у своїй розробці AMD використовує 256-розрядну схему SIMD (single instruction multiple data) і для виконання повної 512-бітної інструкції потрібні два такти, у порівнянні з повною 512-розрядною одноцикловою схемою Intel, тому не дивно, що AMD може стверджувати, що його дизайн є більш енергоефективним [6; 7].

Нові чіпсети. Raptor Lake запущено разом із новим чіпсетом материнської плати Z790, але процесори використовують той самий роз'єм LGA1700, що й Alder Lake. Це відкриває можливість використовувати старі материнські плати Z690 і B660 за умови оновлення BIOS. Є також кілька материнських плат Z790, які підтримують пам'ять DDR4.

Важливим для процесорів AMD Ryzen серії 7000 є запуск нового сокета AM5 і ряду нових чіпсетів материнських плат, а також виробництво самих материнських плат з підтримкою нових процесорів. Нові чіпи на Zen 4 функціонують на новому сокеті – AM5 з масивом контактів (LGA, Land grid array) на материнській платі. Використання LGA перекладає тягар за не пошкодження контактів з AMD на виробника материнської плати, але також дозволяє створити щільнішу сітку контактів. Сокет AM5 має 1718 контактів, порівняно з 1331 у AM4. Разом із більшою кількістю контактів і їхнім розташуванням AM5 включає нововведення, яке пов'язане з живленням, зокрема активація двостороннього зв'язку із регуляторами напруги материнської плати. В результаті це забезпечить стабільність роботи та потенційно збільшить можливості для розгону CPU.

Що стосується чіпсетів, то AMD початково пропонуватиме чотири: X670E, X670, B650E і B650. Материнські плати з сокетом AM5 не матимуть підтримки оперативної пам'яті DDR4, а працюватимуть лише з пам'яттю DDR5, яка забезпечує вищу тактову частоту та низьке енергоспоживання.

Паралельно з Zen 4, розроблено нову технологію – EXPO від AMD для розгону оперативної пам'яті DDR5, як говориться «одним клацанням миші». Подібно до XMP, сертифікована EXPO-пам'ять гарантує її стабільну роботу для номінальної тактової частоти, напруги та таймінгу [7].

Висновок. У роботі розглянуто архітектурні підходи RISC і CISC, на яких засновані системи ARM та x86, проведено огляд новітньої лінійки процесорів Intel і AMD, досліджено нову архітектуру Intel Raptor Lake і AMD Zen 4 та проаналізовано їхню практичну продуктивність. А також наведено стислу інформацію про сучасні чіпсети Intel та AMD.

Збільшення загальної кількості ядер в процесорах Intel з архітектурою Raptor Lake значно покращує багатопотокову продуктивність там, де це необхідно. Процесори Intel Core 13-го покоління мають покращену тактову частоту, збільшену кеш-пам'яті L2 та більше ядер E-Cores, а восьми P-Cores абсолютно достатньо для переважної більшості сучасних ігор та програмного забезпечення. На жаль, енергоспоживання залишається високим, але розгінні можливості Intel Core i5-13600K вражають. Зважаючи на те, як мало можливостей для розгону спостерігалось в останніх процесорах Intel, добре бачити такий CPU. В Raptor Lake закладено зворотню сумісність з Alder Lake, завдяки незмінному роз'єму LGA1700 та підтримці оперативної пам'яті DDR4 і DDR5.

Огляд AMD Ryzen 7000-серії показує, що нові процесори справді є високопродуктивними обчислювальними одиницями. Ці процесори AMD пропонують суттєве підвищення тактової частоти і загальну продуктивність. В дизайн Zen 4 були внесені такі зміни: додано підтримку інструкцій AVX-512, збільшено кеш L2 і кеш мікрооперацій. У певному сенсі це відносно скромний рух вперед, оскільки Intel не революціонізувала свою архітектуру, як це було з впровадженням E-Cores у 12-му поколінні (Alder Lake), вона не перейшла на абсолютно новий виробничий процес.

1. Фролова Н. В., Гулак Д. О. Аналіз сучасних архітектур процесорів. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*. 2011. Вип. 58. С. 109–117. URL: <http://dspace.nbuuv.gov.ua/handle/123456789/28318>. (дата звернення: 25.05.2023).
2. Недзельський Д. О., Сафонова С. О. Про реальну продуктивність та ефективність ядер сучасних процесорів. *Наукові вісті Далівського університету*. 2019. № 17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2019_17_11. (дата звернення: 17.03.2023).
3. Богач О. В., Моденов Ю. Б. Методика підвищення продуктивності

персонального комп'ютера шляхом розгону центрального процесору. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. Вип. 2 (46). С. 9–13. URL: <https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/7708>. (дата звернення: 17.03.2023). **4.** Нездоровін В. П., Горященко К. Л., Махрова Є. Г. Архітектура ARM як потенційна основа грид-інфраструктури наукової бази України. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2012. № 1. С. 204–208. URL: <http://dspace.bsmu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/7756>. (дата звернення: 17.03.2023). **5.** Христинець Н. А. Реалізація багатопоточності на архітектурі мультимедійних процесорів Nexperia. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. № 3. С. 59–64. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36544>. (дата звернення: 17.03.2023). **6.** Intel | Data Center Solutions, IoT, and PC Innovation. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html> (дата звернення: 04.03.2023). **7.** AMD | together we advance_AI. URL: <https://www.amd.com/en.html> (дата звернення: 17.03.2023).

REFERENCES:

1. Frolova N. V., Hulak D. O. Analiz suchasnykh arkhitektur protsesoriv. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu problem modeliuvannia v enerhetytsi im. H.le. Pukhova NAN Ukrainy*. 2011. Vyp. 58. S. 109–117. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/28318>. (data zvernennia: 25.05.2023). **2.** Nedzelskyi D. O., Safonova S. O. Pro realnu produktyvnist ta efektyvnist yader suchasnykh protsesoriv. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*. 2019. № 17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2019_17_11. (data zvernennia: 17.03.2023). **3.** Bohach O. V., Modenov Yu. B. Metodyka pidvyshchennia produktyvnosti personalnoho kompiutera shliakhom rozghonu tsentralnoho protsesoru. *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia*. 2014. Vyp. 2 (46). S. 9–13. URL: <https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/7708>. (data zvernennia: 17.03.2023). **4.** Nezdorovin V. P., Horiashchenko K. L., Makhrova Ye. H. Arkhitektura ARM yak potentsiina osnova hrid-infrastruktury naukovoi bazy Ukrainy. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2012. № 1. S. 204–208. URL: <http://dspace.bsmu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/7756>. (data zvernennia: 17.03.2023). **5.** Khrystynets N. A. Realizatsiia bahatopotochnosti na arkhitekturi multymediinykh protsesoriv Nexperia. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*. 2022. № 3. S. 59–64. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36544>. (data zvernennia: 17.03.2023). **6.** Intel | Data Center Solutions, IoT, and PC Innovation. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html> (data zvernennia: 04.03.2023). **7.** AMD | together we advance_AI. URL: <https://www.amd.com/en.html> (data zvernennia: 17.03.2023).

Shynkarchuk N. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Rivne State University of Humanities, Rivne, nazar.shynkarchuk@rshu.edu.ua)

INTEL RAPTOR LAKE AND AMD ZEN 4 PROCESSOR ARCHITECTURE CONCEPT

General information on x86 and ARM processor architectures is provided. The historical stages of the birth and development of the x86 architecture are considered. A brief description of the addition to the x86 architecture – 64-bit processing mode from AMD. RISC and CISC architectural approaches, their common and distinctive features are described. The number of instructions included in a processor built on RISC and CISC is indicated. An overview of basic 13th generation Intel Core processors and AMD Ryzen 7000 series was conducted. Their technical characteristics are described. Information on technological improvements in 13th generation Intel Core and AMD Ryzen 7000 series processors is provided. Changes with previous models, which are built on last year's processor architecture, are indicated. The thermal power of these processors is considered. The technical features of the Intel Raptor Lake and AMD Zen 4 architectures are studied. The performance of the Raptor Lake and Zen 4 architectures is studied. The main ideas and concepts of these processor architectures are reflected. Advantages and disadvantages of chiplet approach from AMD are described. Numerical results of single-threaded performance increase in 13th generation Intel Core and AMD Ryzen 7000 series processors are presented. Numerical data on other important improvements in the hardware part of the CPU have been generated and presented. These are the frequency and cache memory of the processor. The Thread Director system, which was developed by Intel specialists, is described. Considered an important innovation in AMD Zen 4 – proper hardware support for 512-bit vector instructions, known as AVX-512. The current state of affairs in the motherboard market with new Intel and AMD chipsets is analyzed. AMD Ryzen 7000 series chips work on a new socket – AM5 with an array of LGA contacts on the motherboard. A new technology is described – EXPO from AMD for overclocking DDR5 RAM. In this work, the architectural approaches of Intel Raptor Lake and AMD Zen 4 are considered. Their practical performance is analyzed.

***Keywords:* architecture; processor; clock frequency; core; cache memory; chipset; Intel; AMD.**