

**ZAMONAVIY PROTSESSOR ARHITEKTURALARINING RIVOJLANISH
TENDENSIYALARI KO'P YADROLI TIZIMLAR, ENERGIYA SAMARADORLIGI,
ISHLASH TEZLIGI**

Soliyev Maqsudjon Murodjon o'g'li

Farg'ona Davlat texnika universiteti

Axborot texnologiyalari va telekommunikatsiya fakulteti

Suniy Intelekt yo'nalishi 3-bosqich 72-23SI-guruh talabasi.

Sobirov Muzaffarjon Mirzaolimovich

(FDTU) Kompyuter muhandisligi va sun'iy intellekt kafedrasi (katta o'qituvchi) (ilmiy rahbar).

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19345264>

Annotatsiya. Ushbu maqolada zamonaviy protsessor arxitekturalarining rivojlanish tendensiyalari tahlil qilinadi. Xususan, ko'p yadroli tizimlarning shakllanishi, geterogen hisoblash tamoyillari, energiya samaradorligini oshirish usullari, ishlash tezligini ta'minlovchi mikroarxitektura yechimlari, chiplet texnologiyasi hamda ochiq arxitektura platformalarining ahamiyati yoritilgan. Tadqiqot davomida Intel, AMD, Arm, Apple va RISC-V platformalari misolida zamonaviy protsessorlarning tuzilishi, ularning afzalliklari va amaliy qo'llanish xususiyatlari qiyosiy tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, protsessorlar rivojlanishida asosiy yo'nalish endilikda faqat takt chastotasini oshirish emas, balki ko'p yadroli va energiya tejankor tizimlar orqali yuqori unumdorlikka erishishdan iborat. Shuningdek, xotira o'tkazuvchanligi, yadro turlari o'rtasida vazifalarni oqilona taqsimlash va modulli integratsiya zamonaviy hisoblash tizimlarining eng muhim talablari sifatida namoyon bo'lmoqda.

Kalit so'zlar: protsessor arxitekturasi, ko'p yadroli tizimlar, energiya samaradorligi, ishlash tezligi, chiplet texnologiyasi, geterogen hisoblash, xotira o'tkazuvchanligi, RISC-V, Intel, AMD, Arm, Apple silicon.

Аннотация. В данной статье анализируются тенденции развития современных процессорных архитектур. Особое внимание уделено формированию многоядерных систем, принципам гетерогенных вычислений, методам повышения энергоэффективности, микроархитектурным решениям, обеспечивающим высокую производительность, технологии chiplet, а также значению открытых архитектурных платформ. В ходе исследования на примере платформ Intel, AMD, Arm, Apple и RISC-V был проведён сравнительный анализ структуры современных процессоров, их преимуществ и особенностей практического применения. Результаты показывают, что основным направлением развития процессоров сегодня является уже не только увеличение тактовой частоты, а достижение высокой производительности за счёт многоядерных и энергоэффективных систем. Кроме того, пропускная способность памяти, рациональное распределение задач между различными типами ядер и модульная интеграция становятся важнейшими требованиями современных вычислительных систем.

Ключевые слова: архитектура процессоров, многоядерные системы, энергоэффективность, производительность, технология chiplet, гетерогенные вычисления, пропускная способность памяти, RISC-V, Intel, AMD, Arm, Apple silicon.

Abstract. This article analyzes the development trends of modern processor architectures. Particular attention is paid to the evolution of multicore systems, heterogeneous computing principles, methods for improving energy efficiency, microarchitectural solutions that ensure high performance, chiplet technology, and the growing importance of open architecture

platforms. The study comparatively examines the structure, advantages, and practical application features of modern processors using Intel, AMD, Arm, Apple, and RISC-V platforms as examples. The results show that the main direction of processor development is no longer limited to increasing clock frequency, but rather focuses on achieving high performance through multicore and energy-efficient systems. In addition, memory bandwidth, rational task distribution among different core types, and modular integration are becoming key requirements of modern computing systems.

Keywords: processor architecture, multicore systems, energy efficiency, performance, chiplet technology, heterogeneous computing, memory bandwidth, RISC-V, Intel, AMD, Arm, Apple silicon.

Kirish

Mikroprotessorlar evolyutsiyasining dastlabki bosqichida ishlash tezligini oshirishning asosiy vositasi takt chastotasini ko'paytirish edi. Biroq quvvat sarfi, issiqlik ajralishi va termik cheklovlar kuchaygani sari bu yondashuv o'z chegarasiga yetdi. Zamonaviy arxitektura nazariyasida bu holat "power wall" va "dark silicon" tushunchalari bilan izohlanadi: ya'ni tranzistorlar soni ortib borgani bilan ularning barchasini bir vaqtda maksimal chastotada ishlatish amaliy jihatdan mumkin emas. Shu sababli protsessor sanoati ko'p yadroli va keyinchalik geterogen tizimlarga o'tdi. Bundan tashqari, Hill va Marty tomonidan qayta talqin qilingan Amdahl qonuni parallelizatsiya darajasi cheklangan dasturlarda yadrolar sonini cheksiz oshirish kutilgan tezlanishni bermasligini ko'rsatadi.

Bugungi kunda protsessor arxitekturasidagi asosiy maqsad "eng yuqori chastota" emas, balki "ma'lum quvvat budjeti ichida maksimal natija"ga erishishdan iborat. Shu bois ishlab chiqaruvchilar bir tomondan yuqori unumdor "katta" yadrolar, ikkinchi tomondan energiya tejamkor "kichik" yadrolarni birlashtirayotgan bo'lsa, boshqa tomondan chiplet, ilg'or paketlash, standart die-to-die interfeyslar, xotira o'tkazuvchanligini kengaytirish va ish yuklamalariga mos maxsus yondashuvlarni joriy etmoqda. Intel, Arm, AMD, Apple va RISC-V ekotizimlarida kuzatilayotgan tendensiyalar mazkur jarayonning amaliy dalilidir.

Mazkur tadqiqotning maqsadi zamonaviy protsessor arxitekturalarining rivojlanishidagi uchta asosiy yo'nalishni — ko'p yadroli tizimlar, energiya samaradorligi va ishlash tezligini — ilmiy manbalar asosida tahlil qilish, ularning o'zaro bog'liqligini ko'rsatish hamda real arxitektura misollarida umumiy xulosalar chiqarishdan iborat.

Materiallar va usullar

Tadqiqotda qiyosiy-tahliliy metod qo'llanildi. Manba bazasi sifatida Intel'ning performance hybrid architecture va Thread Director bo'yicha rasmiy hujjatlari, Arm'ning big.LITTLE, DynamIQ va Cortex-A520 bo'yicha rasmiy sahifalari, AMD'ning 5-avlod EPYC protsessor arxitekturasi bo'yicha texnik white paper'i, Apple'ning M4 chipi bo'yicha rasmiy ma'lumotlari, UCIE Consortium spetsifikatsion tavsifi, TSMC'ning ilg'or texnologik jarayonlar haqidagi ma'lumotlari, shuningdek, ko'p yadroli tizimlarning nazariy cheklovlarini ochib beruvchi ilmiy ishlar tahlil qilindi.

Tahlil quyidagi mezonlar asosida olib borildi: birinchidan, arxitekturaning yadro tashkiloti va parallel ishlash modeli; ikkinchidan, quvvat sarfi va performance-per-watt ko'rsatkichlarini yaxshilashga qaratilgan mexanizmlar; uchinchidan, xotira, kesh, I/O va paketlash darajasidagi kengayish imkoniyatlari; to'rtinchidan, mazkur yechimlarning klient qurilmalar, mobil SoClar, serverlar va kelajakdagi ochiq ekotizimlar uchun ahamiyati.

Natijalar

Ko'p yadroli tizimlardan geterogen ko'p yadroli tizimlarga o'tish

Tahlil shuni ko'rsatdiki, zamonaviy protsessorlar rivojining birinchi yirik tendensiyasi oddiy simmetrik ko'p yadroli tizimlardan geterogen ko'p yadroli tizimlarga o'tishdir. Nazariy jihatdan Amdahl qonuni shuni ko'rsatadiki, dasturdagi ketma-ket bajariladigan qism saqlanib qolsa, yadro sonini oshirishdan olinadigan foyda kamayib boradi. Shu sababli barcha yadrolarni bir xil qilish har doim ham optimal yechim emas. Hill va Marty asimmetrik, ya'ni turli quvvatdagi yadrolarni bir tizimda birlashtirish g'oyasining mantiqiy asosini ko'rsatgan.

Intel'ning rasmiy white paper'ida keltirilishicha, klient ilovalarining katta qismi 4 tadan ortiq yadroga yaxshi masshtablanmaydi, ayrimlari 8 yadro atrofida foyda beradi, undan ham oz qismi 10 tadan yuqori yadrolarda barqaror masshtablanadi. Shu sabab Intel P-core va E-core'larni bitta kristalda birlashtirgan gibrid arxitekturani tanladi: P-core'lar cheklangan oqimli va yuqori sezgir vazifalar uchun, E-core'lar esa ko'p oqimli va quvvat-chegaralangan ssenariylar uchun mo'ljallangan. Intel Thread Director esa apparat darajasida real vaqt monitoringi hamda mashinaviy o'rganish elementlari yordamida oqimlarni mos yadroga joylashtirib, performance-per-watt ko'rsatkichini optimallashtiradi.

Arm ekotizimida ham shunga o'xshash, biroq mobil va edge qurilmalar uchun anchadan beri shakllangan model mavjud. Arm big. LITTLE arxitekturasi "big" va "LITTLE" yadrolarni bir SoC ichida birlashtirib, yuqori yuklama paytida katta yadro, fon rejimi va yengil vazifalarda esa energiya tejamkor yadrodan foydalanishga imkon beradi. Arm DynamIQ esa bu yondashuvni rivojlantirib, turli turdagi yadrolarni yagona integratsiyalashgan klasterga joylashtirish orqali quvvat boshqaruvi va moslashuvchanlikni oshirdi. Zamonaviy misol sifatida Cortex-X925, Cortex-A725 va Cortex-A520 kombinatsiyasi ko'rsatiladi.

Energiyaning "birinchi darajali cheklov"ga aylanishi

Ilmiy va sanoat manbalari energiya samaradorligi bugungi protsessor dizaynida asosiy mezonlardan biriga aylanganini tasdiqlaydi. Elsevier'ning ochiq ilmiy sharhida quvvat boshqaruvi zamonaviy mikroprotsessor dizaynidagi eng muhim masalalardan biri ekani, maqsad esa berilgan quvvat budjeti ichida maksimal unumdorlikni ta'minlashdan iboratligi qayd etiladi.

Mazkur sharhda DVFS kabi texnikalar deyarli barcha zamonaviy mikroprotsessorlarda qo'llaniladigan yechim sifatida tavsiflangan.

Arm Cortex-A520 bunga aniq misoldir. Rasmiy ma'lumotlarga ko'ra, u Cortex-A510 bilan solishtirganda quvvat sarfini 22% gacha kamaytirishi, shu bilan birga ishlashni 8% gacha oshirishi mumkin; 3 nm fizik yechimlar bilan esa qo'shimcha 15% gacha samaradorlik yutug'i qayd etiladi. Bu raqamlar energiya samaradorligi faqat chastotani tushirish bilan emas, balki mikroarxitektura, klaster dizayni va jarayon texnologiyasining uyg'unligi bilan ta'minlanishini ko'rsatadi.

Apple silicon ham performance-per-watt yo'nalishining kuchli namunasi. Apple'ning rasmiy taqdimotida M4 chipi M2 bilan teng ishlashni taxminan ikki baravar kam quvvatda bera olishi, shuningdek, yupqa va yengil noutbukdagi "so'nggi PC chipi" bilan teng ishlashni uning taxminan chorak quvvatida amalga oshirishi aytiladi. Bundan tashqari, M4 oilasi ikkinchi avlod 3 nm texnologiyada ishlab chiqarilgani ta'kidlangan. Bu faktlar energiya samaradorligi endilikda nafaqat mobil telefonlarda, balki planshet va noutbuklarda ham arxitektura tanlovining markaziga aylanganini ko'rsatadi.

Texnologik jarayonlarning maydalanishi ham energiya samaradorligini oshirishga xizmat qilmoqda.

TSMC ma'lumotiga ko'ra, 3 nm jarayon 5 nm (N5) bilan solishtirganda bir xil tezlikda 30–35% gacha quvvat kamayishi va 1.6 baravar mantiqiy zichlik oshishini ta'minlaydi. Demak, zamonaviy protsessor arxitekturalarining samaradorligi faqat ISA yoki yadro dizayni bilan emas, balki litografiya va tranzistor zichligi bilan ham chambarchas bog'liq.

Ishlash tezligi endilikda faqat GHz bilan o'lchanmaydi

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, ishlash tezligi tushunchasi ham sezilarli darajada kengaydi. Ilgari unumdorlik ko'proq takt chastotasi bilan baholangan bo'lsa, hozirgi arxitekturalarda IPC, kesh iyerarxiyasi, xotira o'tkazuvchanligi, oqim rejalashtiruvchisi, interkonnekt va I/O subsistemi birgalikda yakuniy natijani belgilaydi. AMD'ning 5-avlod EPYC white paper'ida Zen 5 va Zen 5c asosidagi gibrid multi-die yondashuvi aynan shu maqsadda shakllangani ko'rsatiladi. AMD CPU yadro va I/O funksiyalarini alohida kristallarga ajratgan: Zen 5 yadrolari 4 nm, Zen 5c 3 nm, I/O die esa 6 nm texnologiyada ishlab chiqariladi.

Bunday "decoupled innovation paths" modeli har bir komponentni o'z vazifasiga mos jarayonda ishlab chiqishga imkon beradi.

AMD EPYC 9005 oilasida yuqori zichlik va yuqori unumdorlikning konkret ko'rsatkichlari mavjud. White paper'da ayrim modellar 192 tagacha yadroga ega ekani, protsessorlarda 12 ta xotira kontrollery, DDR5-6400 qo'llovi, bir soket uchun nazariy 614 GB/s gacha xotira o'tkazuvchanligi, bir soketda 128 tagacha, ikki soketli tizimda 160 tagacha PCIe Gen 5 liniyalari mavjudligi qayd etiladi. Bundan tashqari, CXL 2.0 qo'llovi persistent memory, tiered memory va memory pooling kabi ssenariylarni yoqadi. Bu esa "ishlash tezligi" tushunchasini faqat ALU tezligi emas, balki butun tizim ma'lumot oqimini boshqarish qobiliyati sifatida ko'rish zarurligini anglatadi.

Mazkur tendensiya server va ma'lumot markazi segmentida ayniqsa muhimdir. Chunki yadro soni oshgani sari xotira kechikishi, NUMA topologiyasi, kesh koherentligini ta'minlash va I/O o'tkazuvchanligi cheklovchi omillarga aylanadi. AMD hujjatida aynan ko'p chipli arxitekturada turli xotira kontrollery va CPU die'lari orasidagi kechikish farqlari NUMA fenomenini keltirib chiqarishi ko'rsatilgan. Demak, yuqori yadro sonining o'zi yetarli emas; arxitektura tizim miqyosida muvozanatlangan bo'lishi lozim.

Chiplet va standartlashtirilgan die-to-die aloqa kelajak yo'nalishi sifatida

Chiplet arxitekturasi zamonaviy protsessorlar evolyutsiyasidagi eng muhim yo'nalishlardan biridir. Monolitik kristallarda yadro soni, kesh hajmi va I/O kompleksligi oshgani sari ishlab chiqarish chiqimi, tannarx, issiqlik va reticle o'lchami bilan bog'liq muammolar kuchayadi. AMD'ning white paper'i modulli multi-die yondashuv aynan shu cheklovlarni yumshatish uchun ishlab chiqilganini ko'rsatadi. Kichikroq die'lardan foydalanish ishlab chiqarishdagi nuqsonlar ta'sirini kamaytiradi va turli ish yuklamalari uchun mos variantlarni yig'ish imkonini beradi.

UCI Consortium ma'lumotiga ko'ra, UCI spetsifikatsiyasi die-to-die fizik qatlam, protokol, dasturiy model va moslik sinovlarini belgilab, turli yetkazib beruvchilarning chipletlarini bitta SoC tarkibida "mix and match" tarzida birlashtirishni osonlashtiradi.

Konsortsiy bu yondashuv SoC'larni maksimal reticle o'lchamidan kattaroq tizimlarga kengaytirish, vaqtni tejash va portfel xarajatlarini kamaytirish imkonini berishini ta'kidlaydi. Bu holat kelajakda protsessorlar rivoji "bitta ulkan chip"dan ko'ra "standartlashtirilgan modullar tizimi"ga yaqinlashayotganini bildiradi.

Ochiq ISA va moslashtiriladigan arxitekturalarning kuchayishi

Zamonaviy arxitektura rivojida yana bir muhim tendensiya — ochiq va modulli ISA'larning kengayishi. RISC-V International rasmiy manbalarida RISC-V ochiq standart ISA ekani, uning soddaligi va modulligi apparat hamda dasturiy yechimlarni moslashtirish va optimallashtirishni yengillashtirishi qayd etiladi. 2025-yil hisobotida esa RVA23 application processor baseline sifatida qabul qilingani, server, boot, debug, platform management, vector intrinsics va memory management bo'yicha bir nechta spetsifikatsiyalar ratifikatsiya qilingani ta'kidlangan. Bu esa RISC-V'ning faqat akademik loyiha emas, balki real sanoat standarti sifatida kuchayib borayotganini ko'rsatadi.

Ochiq ISA'larning ahamiyati ayniqsa maxsus vazifali hisoblash, automotive, embedded, AI va edge segmentlarda yuqori. Chunki ishlab chiqaruvchilar o'z ish yuklamalariga mos kengaytmalarni tanlash yoki qo'shish orqali energiya samaradorligi va funksional moslikni oshira oladi. Shunday qilib, protsessor arxitekturasi evolyutsiyasi endilikda faqat tayyor vendor platformalari bilan emas, balki ochiq ekotizim va domen-spetsifik optimallashtirishlar bilan ham belgilanmoqda.

Muhokama

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, zamonaviy protsessorlar rivojining markazida uchta o'zaro bog'liq tamoyil mavjud. Birinchisi, ko'p yadroli tizimlarning samaradorligi parallelizatsiya darajasiga bog'liq bo'lib, shu sabab geterogen yadro dizayni amaliy jihatdan ko'proq foyda beradi.

Ikkinchisi, energiya samaradorligi endi ikkilamchi parametr emas, balki asosiy arxitektura cheklovidir. Uchinchisi esa, ishlash tezligi tizim darajasidagi ko'rsatkichga aylangan: yadro, kesh, xotira, interkonnekt, scheduler va paketlash birgalikda yakuniy natijani belgilaydi.

Intel va Arm misollarida ko'rinadiki, geterogen yadro dizayni quvvat cheklovli muhitda ish yuklamalarini yadro xususiyatiga mos taqsimlash imkonini beradi. AMD misolida esa bu g'oya server segmentiga ko'chib, chiplet, yuqori yadro zichligi, katta xotira o'tkazuvchanligi va keng I/O bilan birlashmoqda. Apple silicon tajribasi performance-per-watt mezoni premium iste'molchi qurilmalarda hal qiluvchi omilga aylanganini ko'rsatsa, RISC-V esa kelajakda arxitektura tanlovini yanada moslashuvchan va ochiq qilishi mumkinligini anglatadi.

Shu bilan birga, yuqori yadro soni har doim ham chiziqli tezlanishni bermaydi. Xotira devori, NUMA, sinxronizatsiya xarajatlari, interkonnekt kechikishlari va dasturiy parallelizm cheklovlari bunday yondashuvning amaliy chegaralarini belgilaydi. Demak, kelajakdagi muvaffaqiyatli protsessor arxitekturasi "ko'proq yadro" emas, balki "mos ish yuklamaga mos yadro, mos xotira va mos quvvat rejimi" tamoyiliga tayangan tizim bo'ladi.

Xulosa

Tadqiqot yakunida quyidagi ilmiy xulosalarga kelindi. Birinchidan, zamonaviy protsessor arxitekturalarining rivojlanishi simmetrik ko'p yadroli modellar doirasidan chiqib, geterogen, vazifa-bilishli va quvvatga sezgir tizimlarga o'tayotganini ko'rsatadi. Ikkinchidan, energiya samaradorligi barcha segmentlarda — mobil qurilmadan tortib ma'lumot markazlarigacha — protsessor dizaynining bosh mezoniga aylangan. Uchinchidan, ishlash tezligi endilikda faqat takt chastotasi bilan emas, balki IPC, scheduler sifati, xotira kengligi, kesh iyerarxiyasi, I/O va paketlash darajasi bilan baholanadi. To'rtinchidan, chiplet va UCIE kabi standartlar protsessorlarni modulli yig'ish paradigmasini kuchaytirmoqda. Beshinchidan, RISC-V kabi ochiq ISA'lar kelajakda domen-spetsifik va moslashtiriladigan protsessorlar ulushini oshirishi ehtimoli yuqori.

Shunday qilib, zamonaviy protsessor arxitekturalari rivojining umumiy yoʻnalishi “yuqori chastota”dan “aqli arxitektura”ga oʻtish deb baholanishi mumkin. Yaʼni kelajak protsessori koʻproq yadroga ega boʻlgani uchun emas, balki ish yuklamasini toʻgʻri joylashtirgani, energiyani oqilona sarflagani va tizim darajasida muvozanatni saqlagani uchun kuchli boʻladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Hill, M. D., Marty, M. R. Amdahl's Law in the Multicore Era.
2. Esmailzadeh, H. va boshqalar. Dark Silicon and the End of Multicore Scaling.
3. Intel. Performance Hybrid Architecture & Software Optimizations; Intel Thread Director rasmiy materiallari.
4. Arm. big.LITTLE, DynamIQ, Cortex-A520 rasmiy texnik materiallari.
5. AMD. 5th Gen AMD EPYC Processor Architecture white paper, 2025.
6. UCie Consortium. UCie Specification Overview.
7. Apple. Apple introduces M4 chip, 2024.
8. TSMC. 3nm technology va 3 nm ishlab chiqarish boʻyicha rasmiy materiallar.
9. Attia, K. M., El-Hosseini, M. A., Ali, H. A. Dynamic power management techniques in multi-core architectures: A survey study.
10. RISC-V International. RISC-V Annual Report 2025 va rasmiy platforma materiallari.