



PROTSESSOR TEZLIGINI YUQORI CHASTOTALI SIGNALLARGA BOG'LIKLIGI

Elektronika va Avtomatika Muhandisligi fakulteti
(1-bosqich talabalari) Qurbonov. J va Hamroyev. J
Ilmiy maslahatchi A.A.Abduvayitov

Annotatsiya. Ushbu maqolada yuqori chastotali signal, takt chastotasi, protsessor tezligi, mikroarxitektura, kesh xotira, parallelizm, energiya sarfi va issiqlik cheklovlari bir butun tizim sifatida tahlil qilinadi. Maqola birinchi Andrew S. Tanenbaum va Todd Austinning kompyuter tashkiloti haqidagi nazariy yondashuviga tayanadi: kompyuter tizimi faqat bitta qurilma emas, balki raqamli mantiq, mikroarxitektura, buyruqlar to'plami, operatsion tizim va dasturiy qatlamlardan iborat ierarxik tuzilma sifatida ko'riladi. Maqolada Intel Core, AMD Ryzen, ARM va AVR/ATmega protsessor oilalarining vazifa turi, energiya samaradorligi, kesh va mikroarxitektura nuqtayi nazaridan bir-biri bilan solishtirib o'ganilgan.

Kalit so'zlar. yuqori chastota, takt signali, protsessor, CPU, IPC, GHz, mikroarxitektura, kesh, pipeline, CISC, RISC, Intel Core, AMD Ryzen, ARM, AVR, energiya samaradorligi

Kirish

Zamonaviy axborot texnologiyalarining rivojlanishi bevosita protsessorlarning hisoblash quvvati, energiya samaradorligi va barqaror ishlashiga uzviy bog'liq. Kompyuter bugungi kunda faqat matn yozish yoki fayl saqlash vositasi bo'lib qolmay, balki, u sun'iy intellekt, grafiklarga ishlov berish, real vaqt boshqaruvi, katta ma'lumotlar tahlili, kiberxavfsizlik va ilmiy modellashtirish kabi murakkab jarayonlarning markaziy qurilmasiga aylangan. Bunday jarayonlar protsessorlarda juda qisqa vaqt oralig'ida millionlab va milliardlab mantiqiy amallar bajarilishini talab qiladi.



Protsessor tezligi kattaligi asosan yuqori chastotali signal, xususan takt signallariga bog'liq. Takt signali protsessor ichidagi boshqaruv bloki, arifmetik-mantiqiy blok, registrlar, kesh xotira va shina tizimini vaqt bo'yicha tartibga soladi. Agar bu bloklar sinxron ishlamasa, buyruq noto'g'ri bajarilishi, ma'lumot noto'g'ri yozilishi yoki butun tizim beqaror holatga kelishi mumkin. Shuning uchun takt signali protsessorning ichki ritmi, ya'ni vaqt mezoni hisoblanadi. Structured Computer Organization adabiyotda[1] kompyuter tashkiloti ko'p darajali tuzilma sifatida tushuntiriladi. Bu yondashuvga ko'ra, kompyuter apparat va dasturiy qatlamlarning ketma-ket joylashgan tizimidir pastda raqamli mantiq, undan yuqorida mikroarxitektura, keyin buyruqlar to'plami arxitekturasi, operatsion tizim va yuqori darajali dasturlar turadi. Demak, protsessor tezligini faqat GHz bilan baholash yetarli emas, chunki GHz faqat taktlar sonini bildiradi, real unumdorlik esa har takt ichida bajarilgan foydali ish miqdoriga bog'liq.

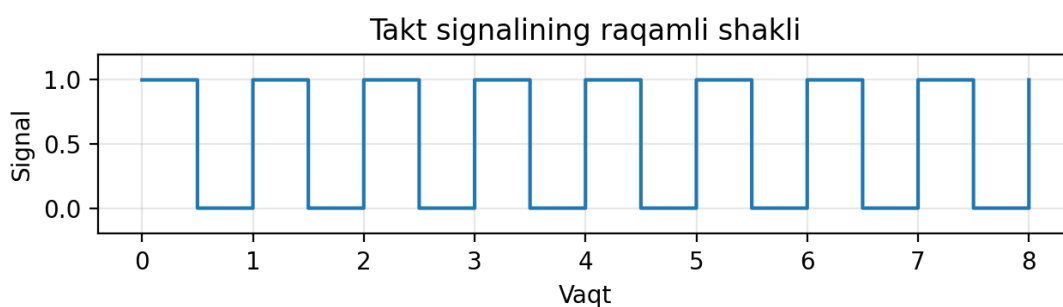
Ushbu maqolaning maqsadi yuqori chastotali signal va protsessor tezligi orasidagi bog'liqlikni ilmiy, mantiqiy va amaliy jihatlari yoritilgan. Shu bilan birga chastota, davr, IPC, kesh, CISC/RISC, parallelizm, energiya, issiqlik va protsessor tanlash mezonlari bir butun tizim sifatida ko'rib chiqilgan. Yakunda protsessor oilalari solishtirilib, qaysi vazifaga qaysi protsessor maqsadga muvofiq ekani asoslangan

Asosiy qism

Takt signali va chastotaning fizik mohiyati Asosiy qism

Chastota signalning bir soniyada nechta to'liq davr yoki impuls hosil qilishini bildiradi. U gersda o'lchanadi. Protsessorlarda chastota odatda megagers va gigagers diapazonida bo'ladi. Masalan, 3 GHz chastota bir soniyada uch milliard takt demakdir. Bu raqam juda katta ko'rinsa ham, zamonaviy operatsion tizimlar, grafik interfeyslar, brauzerlar, kompilyatorlar va ilmiy dasturlar bajaradigan buyruqlar soni ham juda katta bo'lgani uchun bunday chastota zarur hisoblanadi. Chastota va davr orasidagi asosiy bog'liqlik $f = 1 / T$ ko'rinishida ifodalanadi. Bu yerda f - chastota, T - bitta takt davri. Davr qisqargan sari chastota oshadi. Masalan, 1 GHz chastotada bitta takt davri 1 nanosekund, 4 GHz chastotada esa taxminan 0,25 nanosekund

bo'ladi. Bunday qisqa vaqt oralig'ida tranzistorlar holatini o'zgartirishi, mantiqiy zanjir natija berishi va natija keyingi registrga barqaror yetib borishi kerak. Biroq yuqori chastotali signal ideal holatda tarqalmaydi. Chip ichidagi metallic izlar qarshilik va sig'imga ega, bu esa tranzistorlarda kirish va chiqishdagi signallarni kechikishlarini hosil qiladi. Shu sababli signalning ortish va kamayish frontlari cheksiz intensiv emas, balki ma'lum vaqt davomida shakllanadi. Chastota ortgan sari bu kechikishlar sodir bo'la boshlaydi va signalning barqarorligi protsessor loyihalashdagi asosiy muammolardan biriga aylanadi. (*1-rasm*)



CPU tashkil etilishi va takt signalining roli

Structured Computer Organization adabiyotda[2] protsessorlarni CPU xotirasida saqlangan buyruqlarni olib, tahlil qilib va bajaradigan asosiy hisoblash bloki sifatida izohlangan. CPU tarkibida boshqaruv bloki, arifmetik-mantiqiy blok va registrlar mavjud. Boshqaruv bloki buyruq turini aniqlaydi, ALU arifmetik hamda mantiqiy amallarni bajaradi, registrlar esa eng tezkor vaqtinchalik xotira vazifasini bajaradi. Takt signali shu qismlarning barchasini sinxronlashtiradi. Bir takt ichida ma'lum bosqich tugashi kerak, masalan, operand registrdan ALUga uzatiladi, ALU natijani hisoblaydi va keyingi takt frontida registr natijani saqlaydi. Agar takt davri juda qisqa bo'lsa, signal belgilangan joyga yetib bormasligi yoki mantiqiy amal tugallanmasligi mumkin. Bu holat noto'g'ri natija yoki tizim xatosiga olib keladi. Shuning uchun yuqori chastota faqat ko'proq takt degani emas, balki, u butun chipning elektr, mantiqiy va issiqlik xususiyatlariga mos bo'lishi shu sababli, zamonaviy protsessorlarda murakkab takt taqsimlash tarmoqlari, quvvat boshqaruv bloklari, kesh ierarxiyasi va signal yaxlitligini saqlovchi loyihalash usullari mavjud.



(1-jadval)

CPU, xotira va I/O aloqasining soddalashtirilgan modeli.

Kirish buyruqlari	Boshqaruv bloki	Takt signali
Registrlar	ALU	Kesh L1/L2/L3
Xotira (RAM)	Shina	I/O qurilmalar

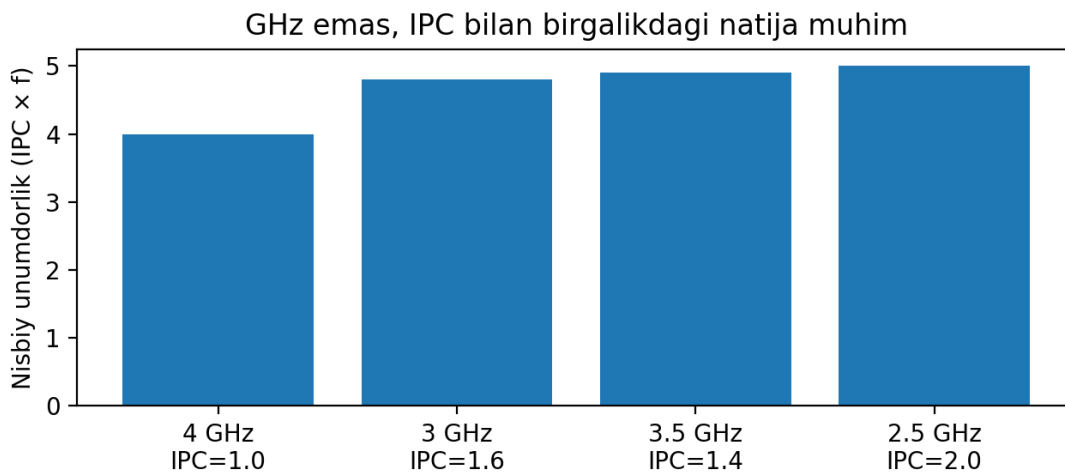
Protsessor tezligi modeli: GHz, IPC va bajarilish vaqti

Protsessor unumdorligini tushuntirishda IPC tushunchasi muhim. IPC - har bir taktga to'g'ri keladigan buyruqlar soni hisoblanadi. Agar protsessor 4 GHz chastotada ishlasa, lekin IPC past bo'lsa, u real vazifalarda kutilgan tezlikni bermasligi mumkin. Aksincha, chastotasi pastroq, lekin IPC yuqori bo'lgan protsessor samaraliroq ishlaydi. Buyerda umumiy model quyidagicha bo'ladi: unumdorlik taxminan IPC va chastota ko'paytmasiga bog'liq. Bu soddalashtirilgan model bo'lsa-da, u muhim g'oyani ko'rsatadi GHz alohida olinganda yetarli mezon emas. Bajarilish vaqti buyruqlar soni, har bir buyruq uchun kerakli taktlar, kesh xatolari, tarmoqlanish xatolari va xotira kechikishlariga bog'liq.

Misol uchun, 4 GHz chastotali, IPC 1,0 bo'lgan protsessorning nisbiy ko'rsatkichi 4 ga teng. 3 GHz chastotali, IPC 1,6 bo'lgan protsessorning nisbiy ko'rsatkichi esa 4,8 ga teng. Demak, chastotasi pastroq protsessor arxitektura samaradorligi tufayli tezroq bo'lishi mumkin.(2-rasm) Nisbiy unumdorlik quyidagicha aniqlanadi.

$$\text{Nisbiy unumdorlik} = \text{IPC} \times 1/T$$

Unumdorlikka IPC va chastotaning birgalikdagi ta'siri.



Mikroarxitektura va chastota chegaralari

Mikroarxitektura buyruqlar qurilma ichida qanday bajarilishini belgilaydi. Bir xil x86 buyruqlar to'plami turli avlod Intel yoki AMD protsessorlarida turlicha natija beradi, chunki ichki pipeline, kesh, dekoder, branch prediction va ijro bloklari farq qiladi. Shu sababli protsessorning haqiqiy quvvati faqat ISA emas, balki, mikroarxitektura bilan belgilanadi. Chastotani oshirish uchun kritik yo'l qisqarishi kerak. Kritik yo'l - bitta takt ichida signal bosib o'tishi kerak bo'lgan eng uzun mantiqiy yo'l. Agar kritik yo'l takt davridan uzun bo'lsa, protsessor barqaror ishlamaydi. Shu sababli pipeline bosqichlari maydalanadi. Biroq pipeline juda chuqur bo'lsa, branch prediction xatosi katta yo'qotish keltiradi, chunki noto'g'ri yo'l bo'yicha bajarilgan ko'plab bosqichlar bekor qilinadi.

Kesh xotira va xotira ierarxiyasi

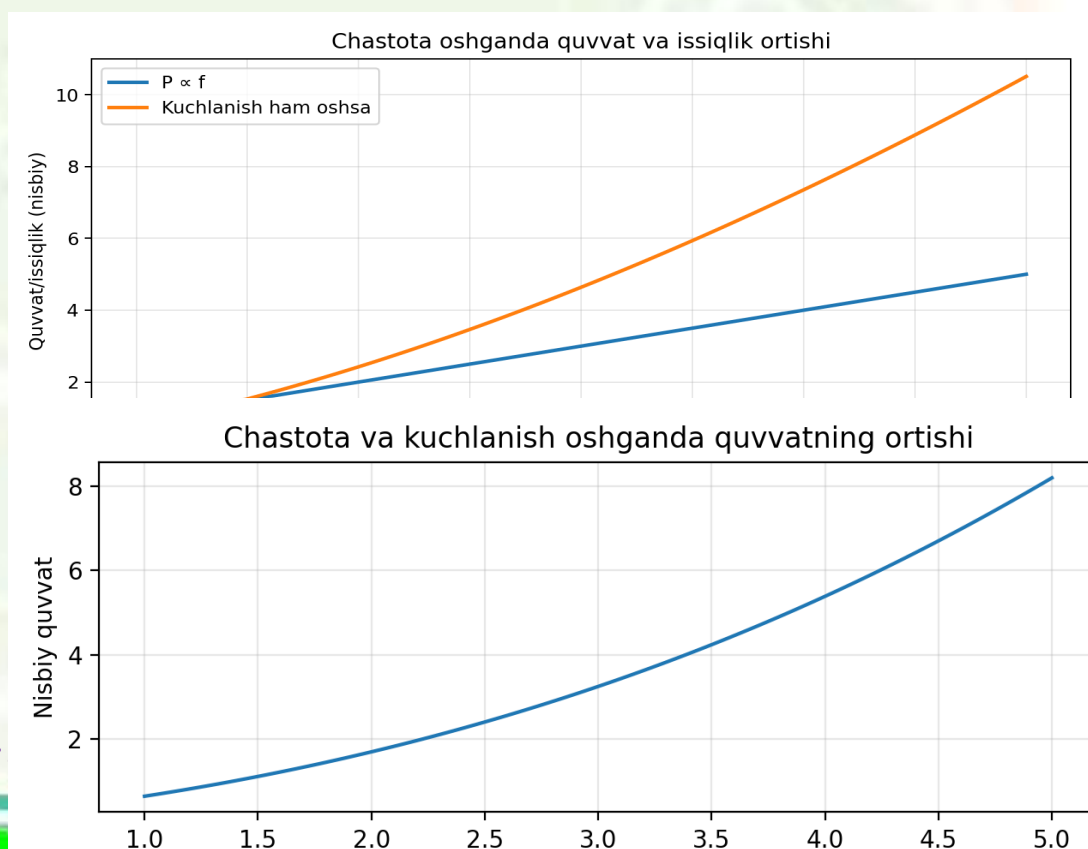
Protsessor ichidagi ALU va registrlar juda tez ishlaydi, asosiy xotira esa nisbatan sekin. Agar CPU har safar ma'lumotni RAMdan kutsa, yuqori chastota to'liq ishlatilmaydi. Shu sababli kesh xotira qo'llanadi. Kesh tez-tez ishlatiladigan buyruq va ma'lumotlarni protsessorga yaqin saqlaydi.

L1 kesh eng tez, lekin kichik, L2 kattaroq va biroz sekinroq, L3 undan ham kattaroq, lekin kechikishi ko'proq. Kesh xatosi yuz berganda protsessor RAMdan ma'lumot kutadi, bu esa ko'plab taktlarning yo'qolishiga olib keladi. Demak, protsessor tezligini baholashda kesh hajmi, kesh kechikishi va kesh samaradorligi GHz bilan bir qatorda turadi.

Amaliy jihatdan, o'yinlar, kompilyatsiya, ma'lumotlar bazasi va ilmiy hisoblash keshdan turlicha foydalanadi. Ba'zi vazifalar yuqori single-core chastotadan, ba'zilari katta kesh va ko'p yadro dan ko'proq foyda ko'radi. Masalan, ma'lumotlar bazasi va katta jadval bilan ishlashda xotira kechikishi kuchli ta'sir qiladi, o'yinlarda esa single-core IPC va kesh samaradorligi muhim hisoblanadi.

Energiya sarfi, issiqlik va barqarorlik

Chastotani oshirishning asosiy cheklovi energiya va issiqlik hisoblanadi. CMOS sxemalarda tranzistorlar holati almashganda energiya sarflanadi, chunki, chastota ortsa, almashishlar soni ortadi. Ko'p hollarda yuqori chastotalar uchun kuchlanish ham oshiriladi, bu quvvat sarfini yanada tez ortishiga olib keladi. Dinamik quvvat modelining $P = C \times U^2 \times f$ ko'rinishida ifodalanadi. Bu formulada kuchlanish kvadrat darajada ta'sir qiladi. Shuning uchun overclocking paytida kuchlanishni oshirish issiqlik ajralishini keskin oshiradi. Issiqlik ajralish yuqori bo'lganda, chastotasini kamaytiradi. Natijada nazariy yuqori chastota amalda uzoq saqlanmaydi. (4-rasm.) Server, noutbuk va mobil qurilmalarda performance per watt, ya'ni bir watt energiyaga to'g'ri keladigan unumdorlik muhim mezonga aylangan. Zamonaviy chiplar shu sababli faqat maksimal GHzga emas, balki energiyani dinamik boshqarish, yadro faolligini o'zgartirish, turbo rejim va past quvvatli holatlarni qo'llashga tayanadi.





CISC va RISC yondashuvlari

CISC murakkab buyruqlar to'plamiga asoslanadi. x86 oilasi tarixan CISC sifatida qurilgan bo'lib, uning afzalligi - keng dasturiy moslik va murakkab buyruqlar orqali ixcham kod yaratish hisoblanadi. Zamonaviy Intel va AMD protsessorlari ko'pincha murakkab x86 buyruqlarini ichkarida sodda mikrooperatsiyalarga ajratib bajaradi.

RISC esa sodda, bir xilroq va tez bajariladigan buyruqlarga asoslangan. RISC pipeline qurishni osonlashtiradi va energiya samaradorligini oshiradi, biroq zamonaviy protsessorlarda CISC va RISC farqi mutlaq emas: real natijani buyruqlar to'plami nomi emas, balki mikroarxitektura, kesh, ishlab chiqarish texnologiyasi va dasturiy optimallashtirish belgilaydi. Shuning uchun protsessor tanlashda CISC yoki RISC nomiga emas, balki real vazifa, dasturiy moslik, energiya va umumiy arxitektura samaradorligiga qarash kerak. Desktop va professional dasturlarda x86 moslik katta afzallik bo'lishi mumkin, mobil va o'rnatilgan tizimlarda esa ARM yoki AVR energiya va soddalik bo'yicha ustun keladi.

Protsessor oilalarining afzalliklari va cheklovlari

Intel Core protsessorlari yuqori single-core unumdorlik va keng dasturiy moslik bilan ajralib turadi. O'yinlar, interaktiv dasturlar va ayrim professional ilovalarda kuchli bitta yadro muhim bo'lganligi sababli Intel ko'pincha yaxshi natija beradi. Intelning yangi avlodlarida P-core va E-core kabi gibrid yadro yondashuvi ham qo'llanadi, natijada u kuchli va tejamkor yadrolarni bir chipda birlashtirish orqali vazifalarni samarali taqsimlashga xizmat qiladi.

AMD Ryzen protsessorlari ko'p yadro, narx/samaradorlik, katta kesh va multitasking bo'yicha kuchli, hisoblanadi, shu sababli, kompilyatsiya, rendering, virtual mashina, video montaj va ko'p dastur bilan bir vaqtda ishlashda ko'p yadro katta foyda beradi. AMD Zen arxitekturasi chiplet, kesh va yuqori IPCga e'tibor bergani sababli umumiy akademik va amaliy ishlar uchun Ryzen balansli tanlov sifatida qaraladi. ARM protsessorlari energiya tejamkorligi bilan ajralib turadi. Mobil qurilma, planshet, yengil noutbuk va IoT tizimlarida batareya, kam qizish va doimiy barqaror bo'lishi talab etiladi. ARMning afzalligi maksimal GHz emas, balki



har wattga to'g'ri keladigan unumdorlik sanaladi, shu sababli ARM arxitekturasi smartfonlardan tortib server va maxsus akseleratorlargacha kengayib bormoqda.

AVR/ATmega mikrokontrollerlari umumiy kompyuter protsessori emas. Ular kichik boshqaruv vazifalari uchun yaratilgan bo'lib, xususan, sensor o'qish, motor boshqarish, Arduino loyihalari, avtomatika va o'quv elektronikasini tashkil qilinadi. Ularning hisoblash quvvati kichik, lekin arzonligi, soddaligi, kam energiya sarfi va real vaqt boshqaruvidagi ishonchliligi ajralib turadi

(2-jadval)

Protsessor oilalarining vazifa bo'yicha taqqoslanishi.

Oilasi	Asosiy afzalligi	Cheklovi	Mos soha	Tavsiya
Intel Core	Yuqori single-core, keng x86 moslik	Issiqlik va quvvat talabi yuqori bo'lishi mumkin	O'yin, ish stoli, professional dastur	Bitta yadro tezligi muhim bo'lsa
AMD Ryzen	Ko'p yadro, kesh, narx/samaradorlik	Ba'zi dasturlar Intelga optimallashtirilgan bo'lishi mumkin	Dasturlash, rendering, multitasking	Universal ish uchun balansli
ARM	Kam energiya, yuqori performance per watt	x86 dasturlari bilan moslik sharoitga bog'liq	Smartfon, planshet, IoT, yengil noutbuk	Batareya va kam qizish muhim bo'lsa
AVR/ATmega	Arzon, sodda, real vaqt boshqaruvi	Hisoblash quvvati past	Arduino, sensor, avtomatika	O'quv va boshqaruv loyihasi uchun



Vazifa bo'yicha amaliy tavsiyalar

Agar maqsad o'yin, yuqori kadrlar soni va tez javob beradigan interaktiv dasturlar bo'lsa, yuqori single-core IPC va barqaror turbo chastota muhim. Bu holatda Intel Core yoki kuchli AMD Ryzen modellari mos bo'lishi mumkin. Tanlovda faqat maksimal GHzga emas, sovitish tizimi, real benchmarklar, kesh va quvvat sarfiga ham etibor berish kerak. Agar maqsad dasturlash, kompilyatsiya, ma'lumotlar bazasi, virtual mashina, video montaj yoki 3D rendering bo'lsa, ko'p yadro va kesh muhim hisoblanadi. Bu vazifalar ko'pincha parallel bo'linadi, shuning uchun AMD Ryzen kabi ko'p yadroli protsessorlar yaxshi narx/samaradorlikni beradi. Biroq maxsus dastur Intel uchun optimallashtirilgan bo'lsa, real test natijalari alohida tekshirilishi kerak.

Agar maqsad mobil qurilma, planshet, fanless noutbuk yoki uzoq batareya vaqti bo'lsa, ARM asosidagi tizimlardan foydalanish zarur. Bu yerda eng katta GHz emas, balki kam quvvatda yetarli unumdorlik yuqori bo'lishi muhim hisoblanadi. Agar maqsad Arduino, robototexnika, sensorlar va avtomatika bo'lsa, AVR/ATmega kabi mikrokontrollerlar oddiy, arzon va ishonchli yechim hisoblanadi. Bularni hammasi tepadagi jadval asosida berilgan tavsiyadir.

Natijalar va ilmiy umumlashtirish

Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, yuqori chastota ketma-ket bajariladigan, parallel bo'linishi qiyin vazifalarda muhim. O'yinlar, interaktiv dasturlar va real vaqt javob talab qiladigan vazifalarda yuqori IPC va yuqori chastota yaxshi natija beradi, biroq bunday ustunlik faqat kesh samarali, xotira kechikishi past va sovitish yetarli bo'lsa saqlanadi. Parallel bo'linadigan vazifalarda esa ko'p yadro va kesh asosiy hisoblanadi, chunki, rendering, kompilyatsiya, ma'lumotlarni qayta ishlash va virtual mashinalarda ko'p yadroli protsessor yuqori chastotali, lekin kam yadroli protsessoridan ustun bo'lishi talab qilinadi. Bu holatda protsessorning real unumdorligi asosan yadro soni, threadlar, xotira o'tkazuvchanligi va dastur parallelizmidan kelib chiqadi. Energiya cheklangan tizimlarda ARM eng maqbul yo'nalishlardan biri sanaladi ya'ni batareyani, kam qizish va uzoq ishlash vaqti birinchi o'rinda bo'lsa, maksimal chastota uchun emas, quvvat uchun ishlashi



sanaladi. O'rnatilgan oddiy boshqaruv tizimlarida esa AVR/AT gerlardanfoydalanish maqsadga muvofiq, chunki u ortiqcha murakkab bo'lmagan aniq boshqaruv vazifasini bajaradi.

Xulosa

Yuqori chastotali signal protsessorning vaqt bo'yicha ishlash tartibini belgilovchi asosiy mexanizm hisoblanadi. U protsessor ichidagi barcha bloklar - boshqaruv bloki, ALU, registrlar, kesh va shina - o'rtasida sinxronlikni hosil qiladi. Chastotani ortishi nazariy jihatdan ko'proq takt va ko'proq amaliy imkonini beradi, lekin bu imkoniyat real unumdorlikka aylanishi uchun mikroarxitektura ham samarali bo'lishi talab etiladi.

Protsessor tezligini faqat takt chastotasi bilan baholash ilmiy jihatdan yetarli hisoblanmaydi. Real tezlik esa IPC, kesh samaradorligi, xotira kechikishi, yadro soni, parallelizm, branch prediction, pipeline, energiya va issiqlik boshqaruvining umumiy natijasini belgilaydi. Shuning uchun zamonaviy protsessorlarda eng muhim to'talish maksimal GHz emas, balki barqaror, foydali va energiya jihatidan samarali hisoblanadi. Chastotani oshirish issiqlik va energiya sarfi bilan cheklanadi. $P = C \times U^2 \times f$ modeli yuqori chastotali ishlashning fizik miqdorini ko'rsatadi. Ayniqsa mobil qurilmalar va serverlarda performance per watt mezoni katta ahamiyatga ega. Shu sababli kelajak protsessorlari ko'p yadro, heterogen arxitektura, maxsus akseleratorlar, kesh optimizatsiyasi va dinamik chastota boshqaruvi orqali rivojlanadi.

Umumiy tavsiyalar quyidagilarni, o'z ichiga oladi:

- ko'p vazifali akademik va amaliy ishlar uchun AMD Ryzen balansli tanlov,
- o'yin va yuqori single-core talab qiladigan vazifalar uchun Intel Core,
- mobil va energiya tejankor qurilmalar uchun ARM,
- Arduino, sensor va oddiy boshqaruv tizimlari uchun AVR/ATmega tavsiya etiladi.

Eng to'g'ri tanlov protsessor nomiga emas, vazifa xususiyati, energiya sharoiti, dasturiy moslik va real ishlash natijasiga asoslanishi kerak.



akseleratori, video kodlash bloki va xavfsizlik moduli bitta platformada birlashadi. Har bir blok o'ziga mos vazifani tezroq va kam energiya bilan bajaradi.

Bu yondashuv yuqori chastotali signal mavzusiga ham bog'liq. Maxsus akselerator ba'zan umumiy CPUdan pastroq chastotada ishlashi mumkin, lekin ma'lum vazifani ko'proq parallel bloklar orqali ancha samarali bajaradi. Masalan, matritsa ko'paytirish, video dekodlash yoki kriptografik amal umumiy ALUda bajarilgandan ko'ra maxsus blokda kam energiya va qisqa vaqt talab qiladi. Demak, kelajak tezligi faqat GHz emas, balki vazifaga mos apparat bloklarining kombinatsiyasi orqali oshadi.

Shu sababli protsessorlarni taqqoslashda kelajakda NPU, GPU integratsiyasi, kesh arxitekturasi, xotira turlari, chiplet dizayni va dasturiy ekotizim alohida ahamiyatga ega bo'ladi. Intel, AMD va ARM yo'nalishlarining barchasi heterogenlikka intilmoqda. AVR/ATmega esa boshqa yo'nalishda - soddalik, real vaqt va arzon embedded boshqaruvda o'z ahamiyatini saqlab qoladi.

Shu bilan birga ushbu maqolada asosiy sabab-oqibat zanjiri quyidagicha qurildi

- takt signali protsessor bloklarini vaqt bo'yicha sinxronlashtiradi,
- chastota bitta sekunddagi taktlar sonini belgilaydi,
- har takt ichida bajarilgan foydali ish IPC va mikroarxitektura bilan belgilanadi,
- kesh va xotira tizimi ma'lumot yetkazib bera olmasa, yuqori chastota bekor kutishga aylanadi,
- energiya va issiqlik esa chastotaning fizik chegarasini belgilaydi.

Demak yuqori chastota muhim, lekin yetarli emas ekan. Real unumdorlik chastotasi, IPC, kesh, parallelizm, energiya, issiqlik va dasturiy moslikning umumiy natijasi hisoblanadi. Bu pozitsiya akademik jihatdan aniq, amaliy jihatdan esa protsessor tanlashda to'g'ri qaror qabul qilishga yordam beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR VA MANBALAR

1. Tanenbaum A.S., Austin T. *Structured Computer Organization*. 6th Edition. Pearson Education Limited, 2013.



2. Patterson D.A., Hennessy J.L. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann.
3. Stallings W. *Computer Organization and Architecture: Designing for Performance*. Pearson.
4. Silberschatz A., Galvin P.B., Gagne G. *Operating System Concepts*. Wiley.
5. Intel. *Intel Processor Names, Numbers and Generation List; Intel Performance Hybrid Architecture*. Available at: <https://www.intel.com>
6. AMD. *AMD Zen Core Architecture; AMD Ryzen Desktop Processors*. Available at: <https://www.amd.com>
7. Arm. *CPU Architecture; Performance per Watt is the New Moore's Law*. Available at: <https://www.arm.com>
8. Microchip Technology. *ATmega168 Product Page and ATmega88/ATmega168 Datasheet*. Available at: <https://www.microchip.com>