

Korszerű számítógép architektúrák II.

Készítette: Simon Péter ¹

2021. december 11.

¹Hallgatói jegyzet Sima Dezső előadásai alapján

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. A tárgy célja	4
1.2. Csíkszélesség	4
1.3. Pentium 4 processzorcsalád	4
1.4. Intel Core processzorok fejlesztése	4
1.5. Gyártási technológia	5
1.6. Utasításkészlet fejlődése	5
1.7. A mikroarchitektúra fontosabb újításai	5
1.8. Fejlődés IPC-ben kifejezve	6
1.9. Frekvencia vs tranzisztorok száma	6
2. Intel Core 2 család	8
2.1. Kategorizálás	8
2.2. Kliens processzorok fejlődése	8
2.2.1. Magok száma	8
2.2.2. Memória csatornák	8
2.2.3. Memória vezérlő elhelyezése	9
2.2.4. Memória sebessége	9
2.2.5. Grafika	9
3. HEDT processzorok fejlődése	11
3.1. Bevezetés	11
3.2. PCIe vonalak	11
3.3. Magszámok	11
3.4. Memóriacsatornák	12

3.5. Overclocking	12
3.6. Fogyasztás	12
3.7. Grafika	12
4. Nagy teljesítményű, két foglalatos szerver processzorok fejlődése	13
4.1. Szerver platformok osztályozása	13
4.2. Méret, tranzistorok	13
4.3. Fogyasztás	13
4.4. Lábak száma	13
4.5. Magok száma	14
4.6. Intel Cascade Lake 9200-AP	14
4.7. Magszámok és tranzistorok növekedése	14
4.7.1. Kivételek	15
4.8. Memória sebességek fejlődése	15
5. Mobil és táblagép processzorok fejlődése	17
5.1. Bevezetés	17
5.2. Fogyasztás csökkentése	17
5.2.1. Intel Atom	17
5.2.2. AMD	17
5.2.3. A frekvencia csökkentése	18
5.3. Piaci részesedés	18
5.4. Szélesség fejlődése	20
6. Disszipációkezelés	21
6.1. A disszipációkezelés fontossága	21
6.2. A disszipáció	21
6.2.1. Kiszámítása	21
6.3. TDP	22
6.4. Intel processzorok disszipációja a fejlődés során	22
6.5. Disszipációcsökkentő kezdeményezések	23
6.5.1. Energy Star	23
6.6. ACPI	24

6.7. Az AMD hatékonysági kezdeményezése	24
6.8. Szerverek energiahatékonysága	24
6.9. A disszipációkezelés technikái	25
6.9.1. Kezelés CPU szinten	25
6.9.2. Kezelés áramköri szinten	25

1. fejezet

Bevezetés

1.1. A tárgy célja

A tárgy célja ismertetni a jelenleg domináns architektúrákat (Intel Core, AMD Zen, ARM), speciális témaköröket (pl. disszipáció) és a mobil architektúrákat.

1.2. Csíkszélesség

A processzor csíkszélessége a hagyományos (planár) MOSFET tranzisztorokat használó processzoroknál a tranzisztor kapu szélességét jelenti. Az Intel által bevezetett 3D FinFET tranzisztorok jellemzéséhez már több paraméterre lenne szükség, de a publikációkban továbbra is egy számot használtak. Ezért gyártónként eltérően kell értelmezni a gyártástechnológiát. Pl. az Intel 10 nm technológiája nagyjából a Samsung vagy a TSMC 7 nm-esének felel meg.

1.3. Pentium 4 processzorcsalád

A Core 2 család elődje a Pentium 4 processzorcsalád volt, ami valójában 3 generációt jelent (Willamette, Northwood, Prescott). A Pentium 4 fontos innovációkat tartalmazott, alapja a Netburst mikroarchitektúra. Második generációja hozta be először a többszörös architektúrát, a harmadik pedig a 64 bites architektúrát és a több processzormagot (Pentium D).

2000-ben 7 éves élettartamot vártak a Netburst-től, de 2004 körül a bejelentett architektúrákat visszavonták, mivel a várt 10 GHz-es frekvencia helyett csak 3.6-at értek el, a disszipáció miatt. A Prescott processzorok 1 cm²-en 100 W-ot adtak le, amivel elérte a léghűtéses rendszerek határát.

1.4. Intel Core processzorok fejlesztése

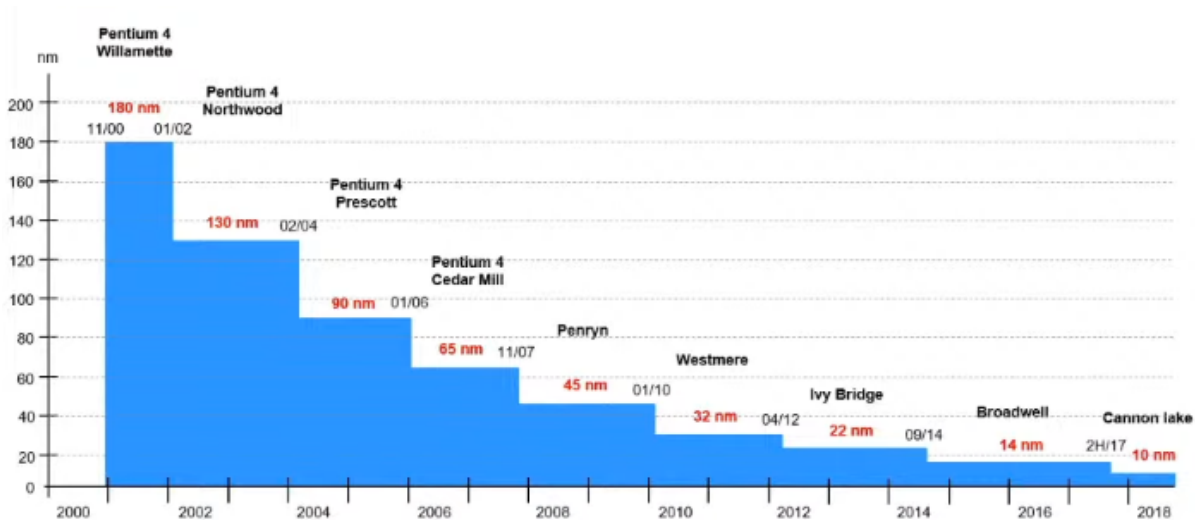
A fejlesztők ezentúl másik irányban folytatták a tervezést, a nyers teljesítmény növelése helyett az 1 W-ból kihozható teljesítmény maximalizálására törekedtek. 2006 környékén a mobil processzorok megjelenésével egy újabb tervezési irány jelent meg: a minél alacsonyabb fogyasztás, a jobb üzemidő elérése miatt.

A célok elérése érdekében a Pentium 4-ig használt egyfázisú fejlesztési modellt két fázisúra (Tick-Tock)

cserélték. Az első fázisban döntően a csíkszélesség csökkentésére fókuszáltak, a másodikban pedig a mikroarchitektúrát fejlesztették. Ez a fejlesztési modell a Core 2 processzorcsaládtól kezdődött, és a Skylake-ig tartott, amit viszont nem követett csíkszélesség csökkentés, így a fejlesztés visszaállt egy fázisúra.

1.5. Gyártási technológia

A gyártástechnológia fejlődése a 1.1. ábrán látható. Látható, hogy 22-14 nm környékén lelassult a fejlődés.



1.1. ábra. Intel processzorok csíkszélessége

Az Intel ennek ellenére 2019-ben két évenkénti csíkszélesség csökkentést jósolt 2029-ig.

1.6. Utasításkészlet fejlődése

Az utasításkészlet legfontosabb fejlesztése a vektorfeldolgozás volt, először 64 biten, majd a későbbiekben 128, 256 és újabban 512 bitre szélesítették.

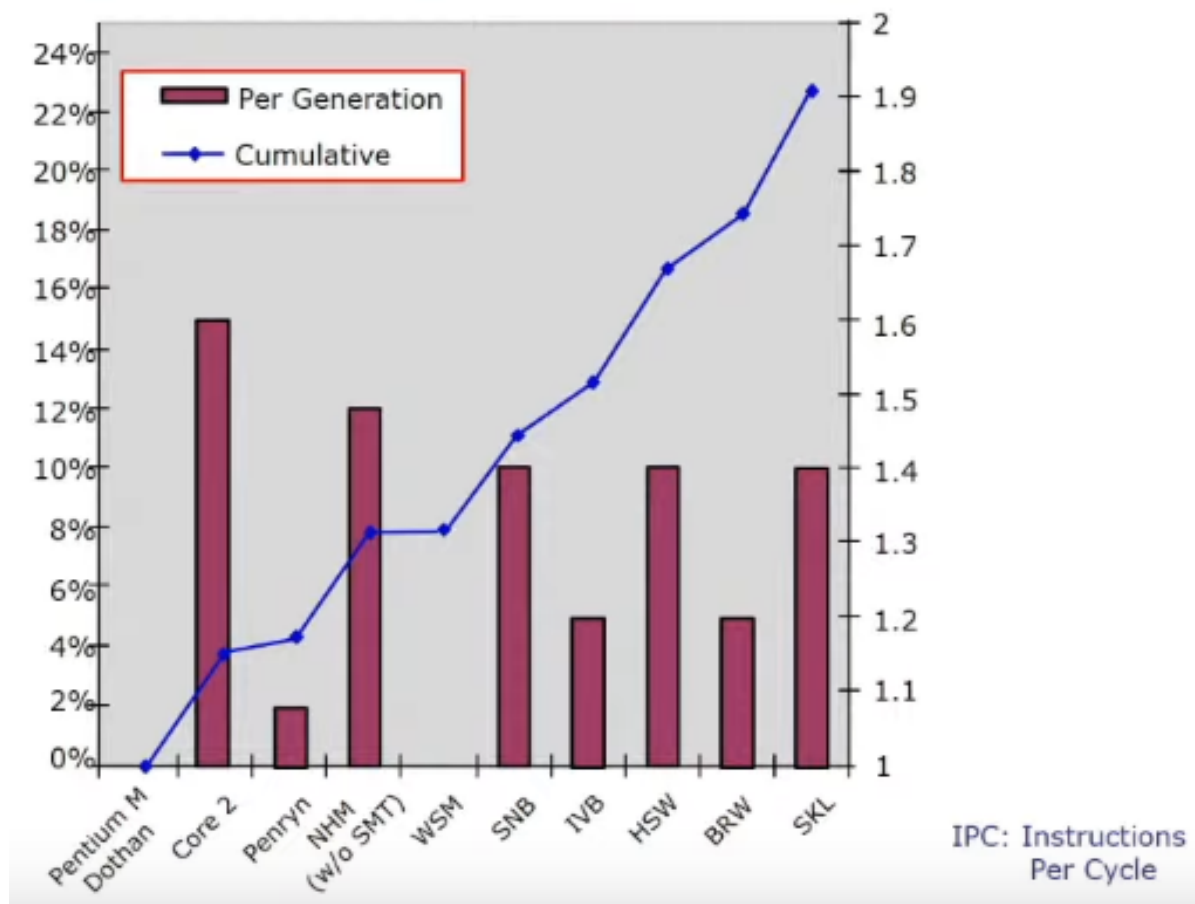
1.7. A mikroarchitektúra fontosabb újításai

A Core 2 processzorok 3 helyett 4 széles magokat használtak, kb. 30%-al nagyobb teljesítményt eredményezve. Ezzel lehaladta az AMD-t. A Nehalem architektúránál jelent meg az integrált memóriavezérlő és a 3. szintű cache, valamint újra a többszálú végrehajtás. A Sandy Bridge legfőbb újdonsága a lapkára integrált videokártya volt. A Skylake 5 széles magokat alkalmazott és megjelentek az egy tokba integrált CPU, GPU és nagy teljesítményű memória lapkák. 2017-ben az AMD konkurencijára válaszul az Intel növelte a magok számát 6-ra, 8-ra, majd 10-re.

Egy másik fontos fejlődési irány a disszipáció kezelése volt, erről később részletesebben.

1.8. Fejlődés IPC-ben kifejezve

Az ábrán látható, hogy az architektúrális váltást hozó processzorok jóval nagyobb (kb. 10%) teljesítmény növekedést hoztak, mint a technológiai váltást hozók.



1.9. Frekvencia vs tranzisztorok száma

A következő ábra jól mutatja, hogy az utóbbi kb. 20 évben megállt a frekvencia növekedése, a fejlődés fő iránya a tranzisztorok számának növelése és az energiahatékonyság.



2. fejezet

Intel Core 2 család

2.1. Kategorizálás

A Core 2 családot 4 csoportra oszthatjuk:

- szerverek (e3, e5, e7, Platinum, Gold)
- high-end desktopok (i7, i9)
- desktopok, laptopok (i3, i5, i7), összefoglalva kliensek
- mobilok (Atom - 2016-ban visszavonva)

A magok száma kategóriánként változik: szerverek max. 28, HEDT max. 18, desktopok 2-10 + grafika, mobilok max. 10 + grafika. A magok számával a lapkaméret is nő, a szerverek nagyobbak a klienseknél és a mobiloknál.

2.2. Kliens processzorok fejlődése

2.2.1. Magok száma

A többmagos fejlődést a Pentium D indította el, de ez még nem valódi kétmagos processzor volt, mivel két, egymagos lapkát tokozta egybe. Ezután a Core 2 valósított meg 2 magot egy lapkán. A Core 2 Quad 2 db 2 magos lapkát tokozott egybe. A Nehalem-mel már egy lapkán 4 mag lehetett.

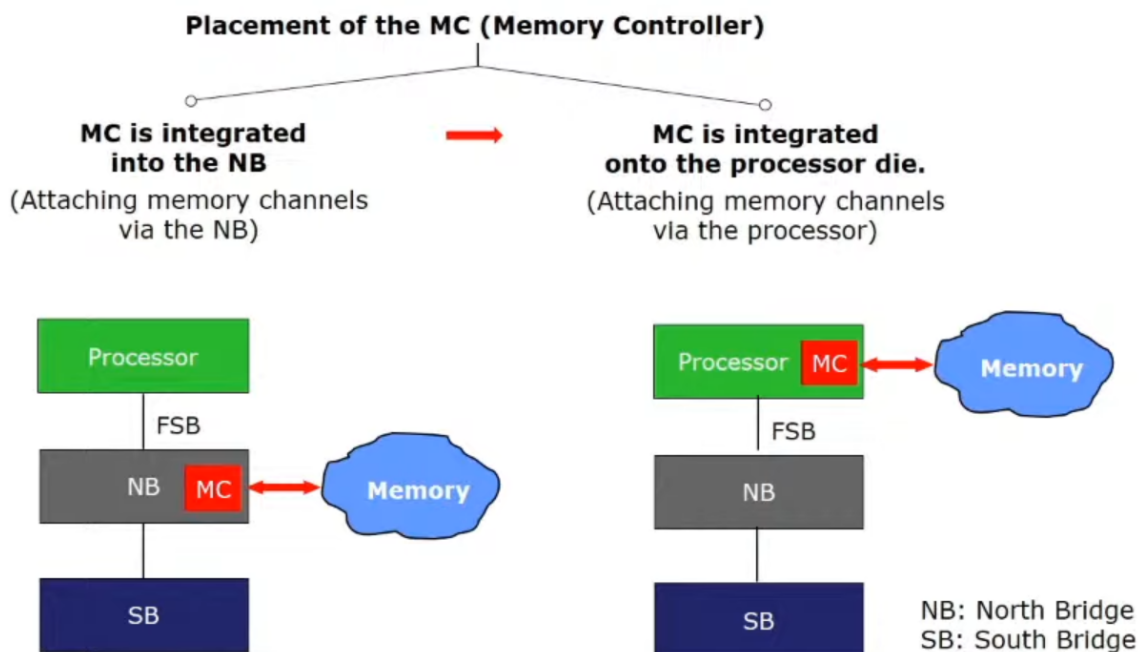
Később megjelent a grafika, egy harmadik, egybetokozott grafikai maggal. Ezután sokáig nem történt semmi, a magok száma maximum 4 maradt. 2017-ben, hogy konkurenciát nyújtsanak az AMD-nek, emelték a magok számát. A 10 nm-es rendszerek megjelenésekor az Intel nem követte a magszám növekedés irányát, először 2, aztán 4 magot alkalmazott.

2.2.2. Memória csatornák

A memória csatorna szám végig 2 maradt. Bár a magok számának növekedésével gyorsabb memória hozzáférésre is szükség volt, a memóriák fejlődése ellensúlyozta azt, hogy nem lett több csatorna.

2.2.3. Memória vezérlő elhelyezése

A Nehalem előtt a memóriavezérlőt az északi hídra helyezték. Hátránya, hogy az északi híd és a processzor közötti kapcsolatot terheli a memória forgalma. Ez főleg több processzoros rendszerekben negatívum, mivel az északi híd ekkor komolyan korlátozza a memória sávszélességét. Tehát a processzorszám növekedésével a memória nem skálázódik. Ezért a Nehalem-től a memória közvetlenül a processzorhoz csatlakozik (a lapkán lévő vezérlőhöz), ami rövidebb utakat és tehermentesített északi hidat jelent (2.1. ábra). Előny, hogy processzoronként külön memória kapcsolat létezhet, azaz skálázódik a processzor-számmal.



2.1. ábra. Memória kontrollek elhelyezkedése

Később az északi híd egybeolvadt a délivel, amit periféria vezérlőnek neveztek el.

2.2.4. Memória sebessége

A DDR (Double Data Rate) memóriák átviteli sebessége kétszerese az órajelének, tehát a DDR4-2400 (MT/s) átviteli sebességű memória frekvenciája 1200 MHz. Az átviteli sebesség jelentősen fejlődött, 10 év alatt megháromszorozódott.

2.2.5. Grafika

A grafikai magok generációjának számozása 5-től kezdődik a Westmere-nél, mivel előtte is volt grafika, csak az északi híd látta el a feladatát. Westmere-nél még csak egybe volt tokozva, de Sandy Bridge-től már egy lapka.

A grafikai technológiai szint jelölésénél a GR2 egy grafikai szeletet tartalmaz, a GT3 kettőt, a GT4 pedig hármat. A GT1 rész szeletet jelöl (kevesebb végrehajtó egység mint a többiben).

A végrehajtó egységek száma 6-ról 96-ra nőtt az évek során.

A Westmere és a Sandy Bridge még nem támogatott OpenCL-t, de Ivy Bridge már igen.

A teljesítmény növekedése a Sandy Bridge-től Skylake-ig kb 7x-es.

A Haswell grafikai végrehajtó egysége

Egy szelet 20 végrehajtó egységet tartalmaz, két fél szeletre osztva. A két fél szelet egy közös adat cache-en dolgozik és egy buszrendszeren kapcsolódik. Egy végrehajtó egység (EU) négy funkcionális egységet tartalmaz:

- Send - adat küldés/fogadás
- Branch - elágazáskezelés
- 2x SIMD (Single instruction multiple data) feldolgozó

Minden SIMD egység négy darab egyszeres pontosságú adaton tud MAD (Multiply-Add) műveleteket végrehajtani. Tehát minden EU $2 \times 4 \times 2 = 16$ utasítást tud ciklusonként elvégezni. Az EU 7 szálon többszálú, minden szálnak 128 db 32 bites regisztere van. Ezen kívül képes lebegőpontos és transzcendens matematikai műveletek végrehajtására.

A Haswell grafikai újdonsága, hogy kapott egy kiegészítő eDRAM-ot is, ezeket az egységeket nevezték Iris Pro-nak.

3. fejezet

HEDT processzorok fejlődése

3.1. Bevezetés

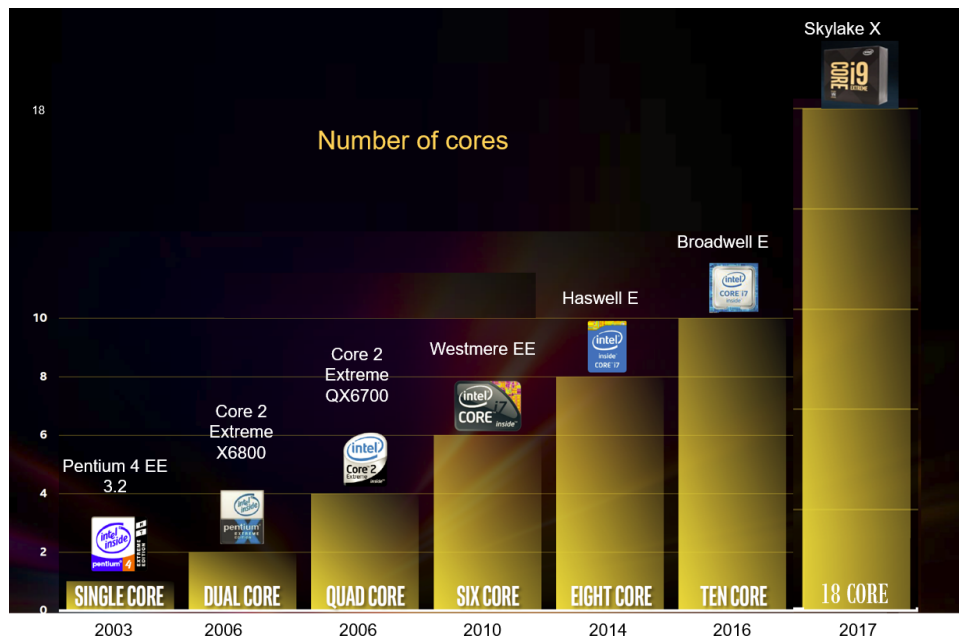
A HEDT (High-End Desktop) processzorok a nagyteljesítményű asztali gépek processzorait jelentik. Ilyenek az Intel i7 és i9 Extreme Edition modellei. Döntően a játékosok és tartalom kreátorok igényeit igyekeznek kiszolgálni. Ezeknek a felhasználóknak nagy teljesítményre és jó minőségű grafikára van szükségük, ezért az ilyen processzoroknak több, akár 4 grafikus kártyát is támogatniuk kell.

3.2. PCIe vonalak

Ehhez több PCIe vonalra van szükség (kártyánként 8 vagy 16). A Core 2 Extreme (2006 körül) család (4x8) 32 PCIe vonalpárt tartalmazott, amik az északi hídra csatlakoztak. Ez csak a Sandy Bridge-el változott meg, ahol már a lapkára csatlakoztak. Az Ivy Bridge előtt a PCIe 2.0 változatát támogatták a processzorok, Ivy Bridge-től pedig 3.0-t.

3.3. Magszámok

Mivel ezek a feladatok (pixelek feldolgozása) jól párhuzamosíthatók, több mag és így több memória csatorna van a HEDT processzorokban. A magoknak csak a technológiai korlátok szabtak határt. Kezdetben (Core 2 Extreme) ez 2 magot jelentett, majd fokozatosan 18 magra nőtt.



3.1. ábra. Intel HEDT processzorok magszámának fejlődése

3.4. Memóriacsatornák

A kezdetekben a viszonylag kevés mag könnyen kiszolgálható volt 2 memóriacsatornával, de ahogy növekedtek a magok számai, úgy nőtt a memóriacsatornák száma is, először 3-ra, majd 4-re.

3.5. Overclocking

A processzorok órajelét egy szorzó állítja elő, ami megszorozza a buszfrekvenciát (100/133 MHz) egy olyan faktorral, amit a Power Control Unit ad (pl. 20). A HEDT processzorok szorzója nem rögzített, tehát a hozzáértő felhasználók növelni tudják a processzor sebességét, nagyobb disszipáció árán.

3.6. Fogyasztás

A HEDT processzorok nagy fogyasztással rendelkeznek a sok mag és memóriacsatorna miatt (130-160 W). A processzorok teljesítményét TDP-ben szokás megadni (Thermal Design Power). A hűtési rendszert erre az értékre kell tervezni.

3.7. Grafika

A HEDT processzorok nem tartalmaznak integrált grafikát, mivel az ilyen PC-kben jellemzően nagy teljesítményű, diszkrét grafikus kártyák dolgoznak.

4. fejezet

Nagy teljesítményű, két foglalatos szerver processzorok fejlődése

4.1. Szerver platformok osztályozása

A szerver rendszerek feloszthatók egy processzoros (UP) és több processzoros platformokra. A több processzoros platformok feloszthatók két foglalatos (2S/DP), négy vagy nyolc foglalatos (4S, 8S) és nyolcnál több foglalatos rendszerekre. A piac nagy részét a két processzoros szerverek teszik ki (kb. 80%), ezért részletesebben ezekkel foglalkozunk.

4.2. Méret, tranzisztorok

A 2S szerver processzorok nagy méretűek, sok tranzisztort tartalmaznak. A 2000-es évek közepén a Pentium 4 szerver processzorok még viszonylag kevés tranzisztorból álltak (125 millió), ezért elég volt kb 1 cm²-es lapka. A magok számának növekedésével egyre több tranzisztor kellett, a Skylake (2017) processzoroknál már 8 milliárd. Még újabb CPU-knál nincs információ. Ezzel együtt a lapkaméret is tovább nőtt, a mai lapkáknál 8 cm² körüli.

Mivel a lapkák gyártása nagyon komplex, nagyobb méretű lapkáknál több hiba előfordulhat, ezért alacsonyabb lesz a kihozatali arány. A lapkák méretét így a gazdasági hatékonyság is meghatározza.

4.3. Fogyasztás

A HEDT processzoroknál is nagyobb fogyasztással kell számolni a szerver processzoroknál, 130-tól 200 W felettig mennek.

4.4. Lábak száma

A szerver processzorok sok lábbal kapcsolódnak a foglalatokhoz, amik precíz gyártást igényelnek.

4.5. Magok száma

A szerver alkalmazások általában jól párhuzamosíthatók, így a processzorok a lehető legtöbb magot implementálják. A Pentium 4 szerver processzoránál még csak 1 mag volt, de később 28-ig növekedett a magok száma.

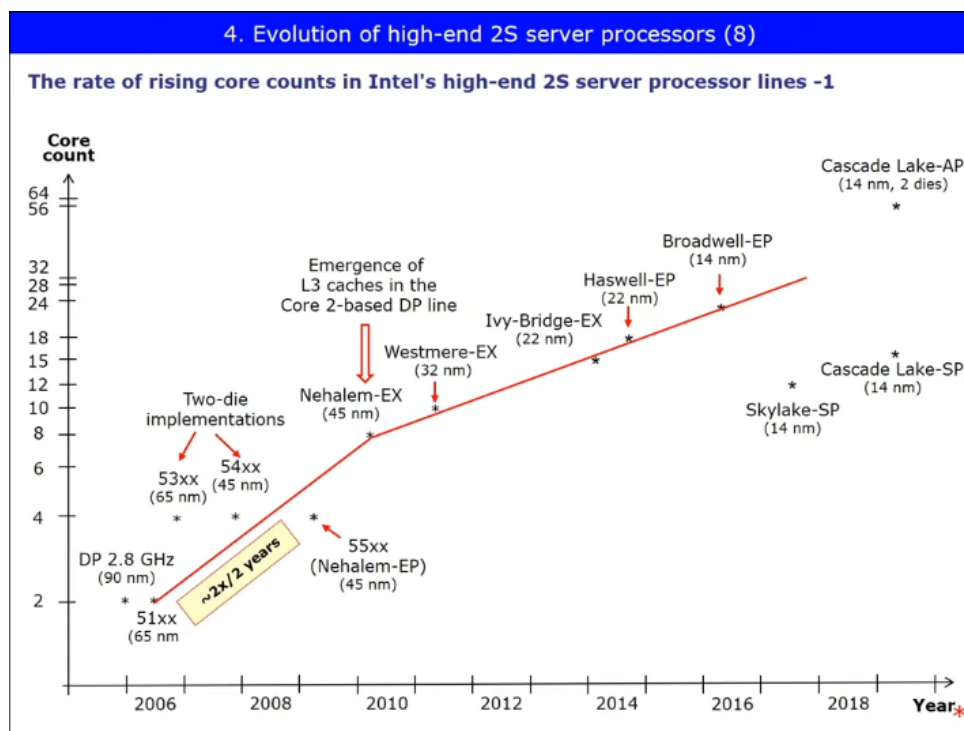
4.6. Intel Cascade Lake 9200-AP

Ez a 2x28, azaz 56 magos processzor az Intel válasza volt az AMD 64 magos EPYC Rome processzoraira. Az AMD 2017-ben adta ki ezt a processzort, ami valós konkurenciát állított az Intelnek, ami 2015 környékén még nagyrészt egyeduralkodó volt a szervereknél. Ezért az Intel két 28 magos lapkát tett egy foglalatba, és BGA (Ball Grid Array) tokozással látta el, ami forrasztásra készült. A forrasztás miatt nem voltak külön megvásárolhatóak, csak OEM-ek kapták meg.

A két lapka egybecsomagolása miatt egy két foglaltos rendszer gyakorlatilag 4 processzort jelent.

4.7. Magszámok és tranzisztorok növekedése

A kétfoglaltos szerver CPU-k esetében kb 2 évente duplázódott a magok száma (4.1. ábra).

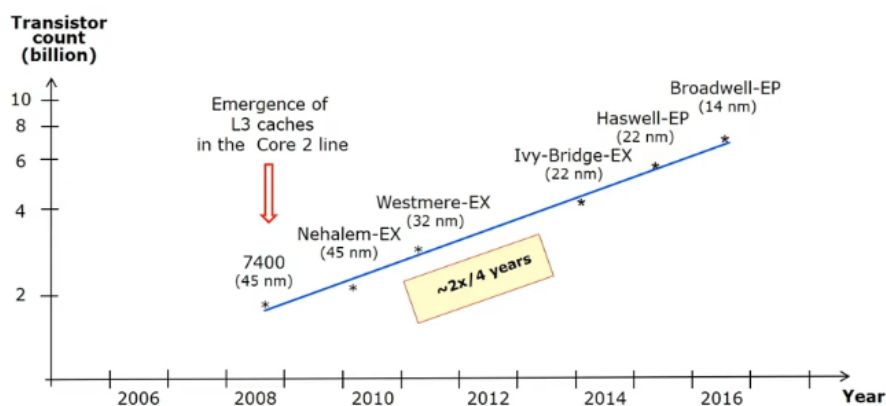


4.1. ábra. Intel 2S szerver processzorok magszámának fejlődése

Ez összhangban van a Moore-szabállyal, ami szerint a tranzisztorok száma két évente duplázódik. Az utóbbi években viszont lelassult a fejlődés, már csak négy évente duplázódott a magok száma. Ennek egyik oka az L3 cache megjelenése, ami elfoglalja a lapka jelentős részét, mivel nagyon sok tranzisztor kell a működéséhez. A technológiai változása miatt a Moore törvénnyel ellentétben az Intel már csak 4 évente tudta duplázni a tranzisztorok számát (4.2. ábra). Ennek az oka, hogy a sok tranzisztor disszipációját kezelni kell, ami korlátozza a fejlődést.

4. Evolution of high-end 2S server processors (10)

Evolution of transistor counts of Intel's Core 2 based HE server processor dies



As the above Figure shows, transistor counts rise slower than would be according to Moore's law. This can presumably be attributed to heat issues caused by the limited power budget.

*

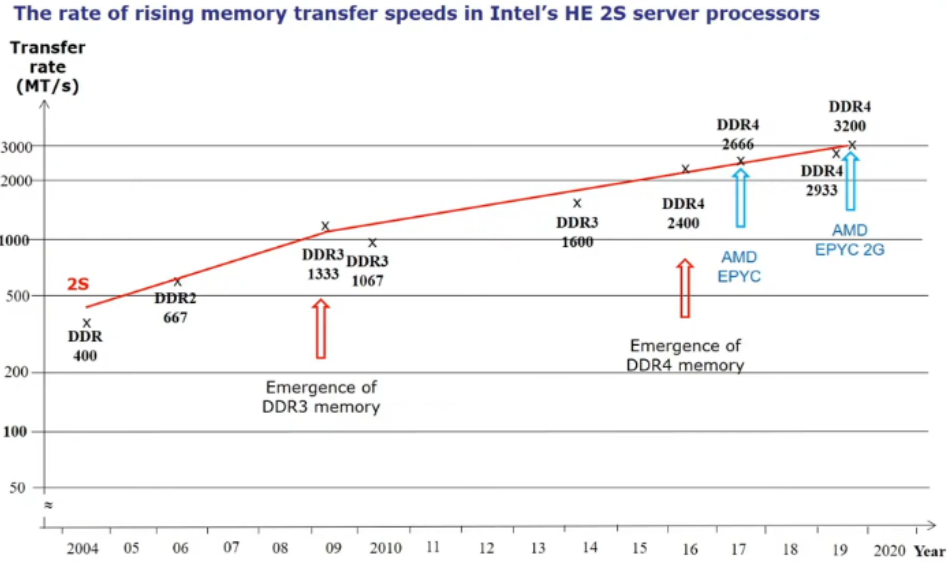
4.2. ábra. Intel 2S szerver processzorok tranzisztorszámának fejlődése

4.7.1. Kivételek

Néhány processzor az ábrán nem illik a fejlődési görbére, ezek az AMD konkurenciára adott válaszoknak köszönhetőek.

4.8. Memória sebességek fejlődése

A memória sebességeknél adatátviteli rátával jellemezzük őket, mivel a frekvencia nem azonos az átviteli sebességgel a DDR (Double Data Rate) memóriák esetében.



4.3. ábra. Memória sebességek fejlődése

A ?? ábrán látható, hogy a DDR és DDR2-es memóriák gyorsabban fejlődtek, mint a DDR3 és DDR4 memóriák. Az első szakaszban egy duplázódáshoz 4 év kellett, DDR3 óta pedig már 8. Ennek oka a DDR3-as memóriák jóval komplexebb felépítése, ami lassította a fejlődést. A magok száma tehát gyorsabban növekedett, mint a memóriák sebessége, ami konfliktusforrás.

Szerverek esetében elvárás, hogy az egymástól függetlenül működő magokat azonos memória sávszélességgel kell ellátni. Tehát a sávszélességet lineárisan skálázni kell a magszámmal együtt. A foglalatonkénti sávszélesség kiszámítása:

$$BW/core = n_M * w * T_M / n_C \quad (4.1)$$

ahol:

- n_M : memória csatornák száma
- w : memória csatorna szélessége (pl. 8 byte)
- T_M : memória átviteli rátája (pl. 2.4 GT/s)
- n_C : magok száma

Probléma, hogy a transzfer ráta lassabban nő, mint a magok száma, tehát T_m/n_C folyamatosan csökken. Megoldás a memória csatornák számának növelése. Ez azonban elég komplex feladat.

A magonkénti memória sávszélességnél referenciának tekinthető a Pentium 4 DP rendszer, a fejlesztési cél ehhez az értékhez tartani.

5. fejezet

Mobil és táblagép processzorok fejlődése

5.1. Bevezetés

Az okostelefonok 2006 körül jelentek meg, a táblagépek ennél is később, 2010-ben. A fő prioritás az üzemidő, tehát alacsony fogyasztású processzorokat kell fejleszteni. Ez ellentétes az addig uralkodó fejlesztési iránytól (legnagyobb teljesítmény wattonként).

5.2. Fogyasztás csökkentése

Az alacsony fogyasztást kétféleképpen lehet elérni:

- keskeny mikroarchitektúrákkal
- alacsony órajekvenciával.

Az ARM Cortex család korai tagjai ezt általában 2 (3 a Cortex A15 esetében) széles architektúrával (egyszerre 2 utasítás vágrehajtására képes) érték el.

5.2.1. Intel Atom

Az Intel viszont a Core 2 családtól kezdve 4 szélességű architektúrát implementált, a nagyobb teljesítmény/fogyasztás arány elérése érdekében. Következmény, hogy az Intel és AMD hagyományos mikroarchitektúrái nem voltak versenyképesek az ARM-el szemben. Ezért kifejlesztettek egy új mikroarchitektúrát, ami 2 szélességű. Így jött létre 2008-ban az Intel Atom családja, amire alapozva megjelentek az Intel okostelefon platformjai.

5.2.2. AMD

2011 környékén az AMD a Bulldozer mikroarchitektúrára épülő processzorokat gyártotta, ami végül nem vált be. Ezzel párhuzamosan bevezették a kisebb fogyasztású Cat mikroarchitektúrát, az Atomhoz hasonlóan 2 szélességgel. Ez is a mobil piacot célozta.

5.2.3. A frekvencia csökkentése

A disszipáció két részből áll: statikus és dinamikus. Statikus a zárt tranzisztorokon szivárgó áram által keltett disszipáció, dinamikus pedig a működő tranzisztorok által keltett. Következmény, hogy a dinamikus disszipáció egyenesen arányos az órajelel, mivel magasabb frekvencián több töltéskisülés keletkezik. Ezen kívül négyzetesen arányos a feszültséggel (Ohm-törvény). Tehát a dinamikus disszipáció:

$$D_d = \text{const} * f_c * V^2 \quad (5.1)$$

Mivel a frekvenciához arányosan nagyobb feszültség kell, ezért a disszipáció a frekvencia növelésével köbösen növekszik. Ezt mutatja a 5.1. ábra.

TDP (W)	No. of cores	Graphics	No. of graphics EUs	eDRAM	Base frequency (GHz)
4.5	2	HD 515	18	--	1.2
15	2	HD 540	48	64 MB	2.2
15	2	HD 520	24	--	2.6
28	2	HD 550	48	64 MB	3.3
35	4	HD 530	24	--	2.8
45	4	HD 530	24	--	2.9
65	4	HD 530	24	--	3.4
91	4	--	--	--	4.2

5.1. ábra. Az Intel Skylake család órajelei és fogyasztásai

A Skylake család gyengébb tagjait táblagépekbe szánták, ezeknél az alacsony fogyasztás érdekében gyengébb grafikát, kevesebb magot és alacsony órajelet használtak.

5.3. Piaci részesedés

A fejlesztések ellenére az Intelnek és AMD-nek nem sikerült betörniük a mobil eszközök piacára.

Smartphone application processors worldwide market share 2015 (revenue)	
Qualcomm (USA)	42 %
Apple (USA)	21 %
MediaTek (Taiwan)	19 %
Samsung (S. Korea)	
Spreadtrum (China)	

5.2. ábra. Az okostelefon processzorok piaci részesedése 2015-ben

Bár az Intel a táblagépeknél elért valamekkora részesedést, ezt úgy érte el, hogy fizetett a gyártóknak az Atom processzor használatáért.

Tablet application processors worldwide market share 2015 (revenue)	
Apple (USA)	31 %
Qualcomm (USA)	16 %
Intel (USA)	14 %
MediaTek (Taiwan)	
Samsung (S. Korea)	

5.3. ábra. A táblagép processzorok piaci részesedése 2015-ben

A gyártóknak fizetett összegek miatt az Intelnek 2 év alatt 7 milliárd dollár vesztesége keletkezett. A nagy veszteségek miatt 2016-ban az Intel visszavonult a mobil piacról, a már bejelentett rendszereket pedig törölték. Ezzel együtt 12000 embert bocsátottak el.

Az AMD 2015-ban még megjelentetett egy új mobil családot, de a 2016-os kínálatban már nem szerepeltek mobil processzorok. Helyette 2017-től a Zen architektúrát fejlesztették.

Az Nvidia szintén gyártott mobil processzorokat a 2010-es évek elején, de 2016-ban ők is kivonultak a

piacról.

5.4. Szélesség fejlődése

A keskeny szélesség és alacsony frekvencia követelmények a processzorok fejlődésével kevésbé lettek lényegesek, mivel nagyon sok fejlesztés történt a disszipáció csökkentésére. 2010 környékén még jellemzően 2 széles rendszerek voltak a mobilokban, aztán a teljesítmény növelése érdekében 3 szélesre növelte a processzorait az ARM, az Apple, a Qualcomm és a Samsung is. A fejlődés itt nem állt meg, az ARM 2018-ban 4 széles rendszereket hozott ki. Szintén 4 széles a Samsung M1 magja is. Ezután még 6, 7 és 8 széles architektúrákat is bejelentettek. Az Apple pl. nagyon korán (2013-ban) 6 széles magot mutatott be (Jim Keller fejlesztése).

6. fejezet

Disszipációkezelés

6.1. A disszipációkezelés fontossága

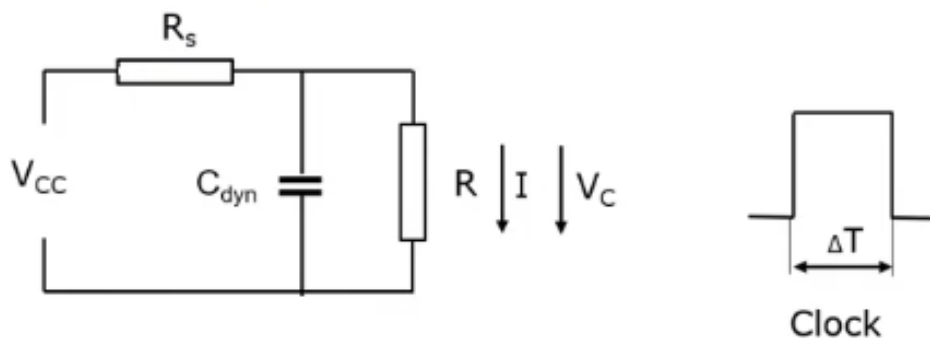
A processzorok fejlesztésének két iránya van: teljesítmény növelése és a fogyasztás csökkentése. A fejlesztés fókusza folyamatosan a disszipáció csökkentése felé tolódott, mivel rájöttek, hogy a teljesítmény fő korlátja a disszipáció.

6.2. A disszipáció

A disszipáció két komponensből áll: dinamikus (működés közbeni) és statikus. A tápegység szempontjából a processzor egy szórt kapacitás, amit a felfutó órajelen fel kell tölteni, a lefutón pedig egy ellenálláson keresztül le kell vezetni. A töltés-kisülés fogyasztása a dinamikus disszipáció. A statikus disszipáció a lezárt tranzisztorok szivárgási áramából adódik. A teljes disszipáció a kettő összege.

6.2.1. Kiszámítása

A dinamikus disszipáció kiszámításához a processzor aktív tranzisztorait egy áramkörrel modellezzük (6.1).



6.1. ábra. Aktív tranzisztorok modellje

Ebből a dinamikus disszipáció kiszámítása:

$$D_d = 2 * C_{dyn} * V_c^2 * f_c \quad (6.1)$$

Az órafrekvenciával lineáris, mivel a töltés-kisülések mennyisége függ tőle.

6.3. TDP

Thermal Design Power, azaz tervezési hőérték. Egy számításigényes alkalmazás futtatása közbeni maximális disszipációt jelenti. Fontos, hogy nem teljesen pontos érték. Az OEM-ek ez alapján tervezik a hűtés rendszereket, aminek legalább ezt a TDP értéket el kell vezetnie úgy, hogy a tranzisztorok hőmérséklete nem megy kb. 80-90°C fölé. A kategóriák jellemző TDP értékeit mutatja a 6.2. ábra.

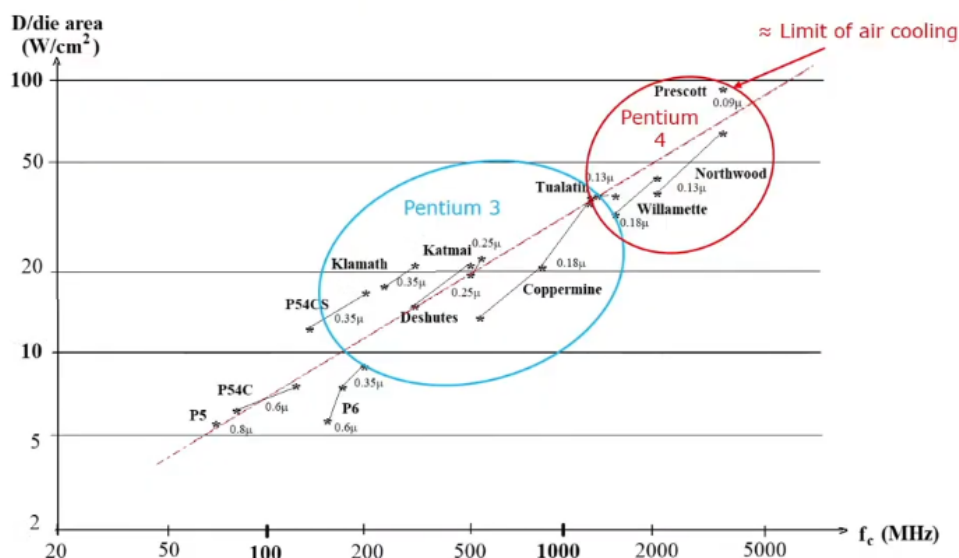
Processor category		TDP	Intel's usual tags
Servers		≈85-200 W	
HEDs		≈100-150 W	X
Desktops	High perf.	≈70-95 W	K
	Mainstream	≈50-65 W	S
	Low power	≈35-45W	T
Notebooks	High perf.	≈45 W	H/HQ
	Mainstream	≈25-35 W	U
	Ultra-thin	≈15 W	U
Tablets		≈5 W	Y/m

6.2. ábra. Processzor osztályok jellemző disszipációja

A TDP korlátozza az alapfrekvenciát. A Turbo működéséhez jóval több watt szükséges.

6.4. Intel processzorok disszipációja a fejlődés során

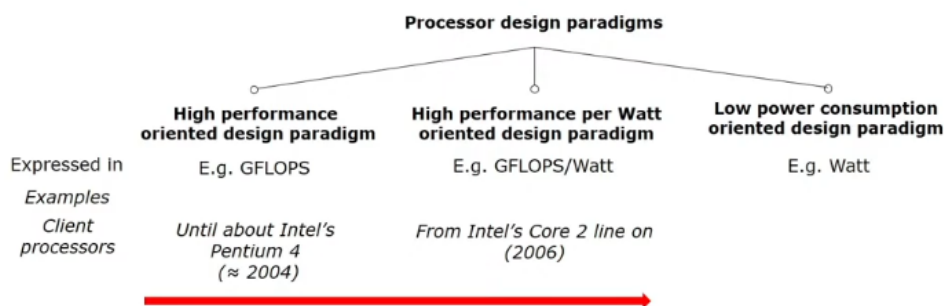
A 6.3. ábrán az Intel processzorok lapkaméretéhez viszonyított disszipációjának növekedése látható az órajel növekedésével.



6.3. ábra. Disszipáció változása az órajel függvényében

Látható, hogy a Pentium 4 Prescott mag már közel 100 wattot adott le cm²-enként, ami a léghűtés fizikai határa. Az Intel 2000-ben azt várta a Pentium 4 családtól, hogy 10 évig gyártásban marad és 10 GHz órajelet fog elérni. Ehelyett 2004-ben 4 GHz-nél megakadt a fejlesztés. A Prescott család bizonyos tagjait kénytelenek voltak visszavonni túlmelegedési problémák miatt.

Ezzel az Intel 2003-tól a nyers teljesítményről áthelyezte a hangsúlyt a teljesítmény per watt, azaz a hatékonyság növelésére. Összefoglalva a tervezési paradigmák változását mutatja a 6.4. ábra.



6.4. ábra. Processzor tervezési paradigmák

6.5. Disszipációcsökkentő kezdeményezések

A disszipáció kezelésére megszületett az Energy Star kezdeményezés, az AMD pedig célul tűzte ki, hogy 2014 és 2020 között 20x-osára emeli a hatékonyságot.

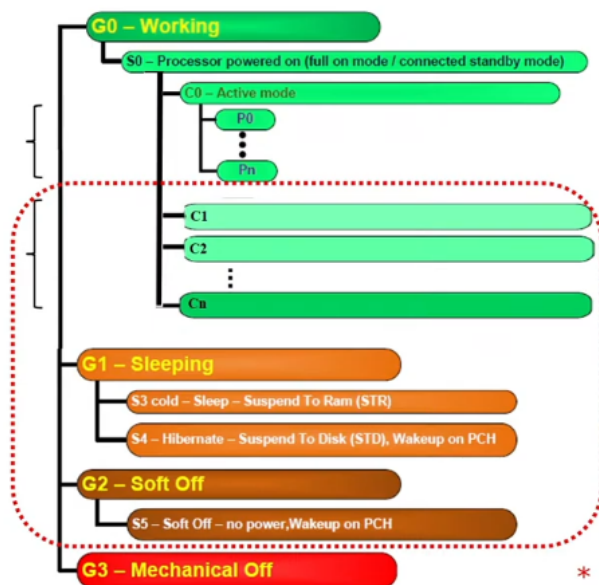
6.5.1. Energy Star

Az amerikai környezetvédelmi hatóság indította 1992-ben, az energiatudatosság elterjesztésére a processzoroknál. Több verziója volt, a legfontosabb az 5., amit 2009-ben adtak ki, a Pentium 4 problémái

után. Lényege, hogy a processzorokra kiszámítják az éves inaktív állapotú energiafogyasztást, és ha egy modell a határérték alatt van, akkor használhatja az Energy Star jelölést. A különböző inaktív állapotok súlyozása kategóriánként eltér.

6.6. ACPI

Az inaktív állapot definiálása az ACPI (Advanced Configuration and Power Interface) szabvány segítségével lehetséges. Ez egy nyílt szabvány, ami definiálja a számítógép állapotait. Az állapotot globális (Gi), teljesítmény (Pi), inaktív (Ci) és alvó (G3) állapotok jellemzik (6.5. ábra).



6.5. ábra. ACPI állapotok

Globális állapotok:

- G1: OS által kezdeményezett leállítás, kontextus mentéssel
- G2: OS által kezdeményezett leállítás, kontextus mentés nélkül, tápellátás megmarad
- G3: mechanikai kikapcsolás

6.7. Az AMD hatékonysági kezdeményezése

2014-ben jelentették be, hogy növelni szeretnék a teljesítmény per watt arányt. 2009-től 2014-ig 10x-es hatékonyság növekedést értek el, ehhez képest szerettek volna további 25x-ös javulást 2020-ra. 2020-ban bejelentették, hogy a Zen 2 alapú Ryzen processzorokkal elérték a célt, 32x-es növekedéssel.

6.8. Szerverek energiahatékonysága

A szervereknél kiemelten fontos a hatékonyság, mivel egy adatközpont több MW áramot is fogyaszthat. A szuperszámítógépeket hatékonyság szerint is rangsorolják, erre szolgál a Green500-as lista.

6.9. A disszipációkezelés technikái

A disszipáció kezelése sokféleképpen történhet, a tranzisztorok tervezésétől az áramkörökön és a processzoron át egészen a platform és operációs rendszer szintekig.

6.9.1. Kezelés CPU szinten

Kétféle kezelési lehetőség:

- aktív magok kezelési technikái:
 - energiafogyasztás csökkentése:
 - * DVFS - dinamikus feszültség és frekvencia kezelés
 - * CPPC
 - * AVFS - adaptív feszültség és frekvencia kezelése
 - Turbo Boost: a TDP hőtartalékát felhasználva megemeli a processzor az alap frekvenciáját ideiglenesen
- inaktív magok kezelési technikái (ACPI alapú, C állapoton keresztül): a kihasználatlan magot egyre mélyebb alvó állapotba helyezi a rendszer.

6.9.2. Kezelés áramköri szinten

Két jelentős technológia:

- óra kapuzás
- tápfeszültség kapuzás

Óra kapuzás

Az éppen inaktív áramkörök elé egy AND kapu kerül, ami inaktivitás esetén nem küld órajelet az áramkörre, így csökkentve a fogyasztást. A statikus disszipáció viszont továbbra is fennmarad. Implementációja történhet finom vagy durva szemcsézettséggel. A finomnál kis áramköri egységeket külön-külön kapuznak, míg a durva szemcsézés több modult kapuz egyszerre. Az óra kapuzást korán, már 1996-ban is alkalmazta a DEC cég az Alpha processzoraiban (lebegőpontos egységeket kapuzták). Mivel a technológia jól bevált, hamar elterjedt, az Intel a Pentium 4-től használja, ma már teljesen általános.

Tápellátás kapuzása

Az óra kapuzás továbbfejlesztése, nagyobb áramköri egységekre használják mint pl. mag vagy memória kontroller. Az egység inaktivitása esetén a komplett tápellátást lekapcsolja az egységről, így a dinamikus és a statikus disszipációt is megszüntetve. A többmagos processzorokban a processzormagok külön-külön kapuzhatók.

A tápfeszültség kapuzás előfeltétele a Turbo Boost technológiának, mivel a Turbo órajelet a processzor fogyasztása és a TDP közötti hőtartalékot felhasználva emeli meg az órajelet. Ehhez elegendő hőtartalékot kell biztosítani, amit nagyban elősegít a kapuzás.

A tápellátás kapuzást az Intel vezette be a Nehalem processzorokkal 2008-ban. Később az AMD és az IBM is átvette.

Implementáció szerint először (Nehalem) csak a magokat kapuzták, később több egységre is kiterjedt mint pl. L3 cache, GPU, memória kontroller. Az Intel a Westmere, Sandy Bridge és Ivy Bridge folyamatosan terjesztette ki a kapuzást, az AMD a Bulldozer családdal gyakorlatilag minden alapegységet kapuzott.

A tápellátás megszüntetése történhet a pozitív pólus vagy a föld elvágásával is.

Integrált tápegységek - Intel FIVR

Az Intel a Haswell családdal továbbfejlesztette az energiaellátást, a tápegység (voltage regulator) bizonyos részeinek processzorlapkára helyezésével. Ez a FIVR (Fully Integrated Voltage Regulator), ami eltérő feszültséggel tudja ellátni a processzor különböző részeit, így a kapuzás fölöslegessé vált.

Ezt a technológiát a Haswell és Broadwell processzorok után felfüggesztették, mivel az integrált tápegység a processzor disszipációjához adott hozzá, így csökkentve az elérhető órajelet. A Skylake-el kezdődően tehát ideiglenesen visszatértek a teljesítmény kapuzásra.

Feszültség lekapcsolás előkészítése

Mielőtt egy magról lekapcsolnánk a tápot, a gyorsítótárat vissza kell írni a következő szintű gyorsítótárba, vagy ha az nem elérhető, memóriába. A processzor végrehajtási állapotát (kontextus, azaz a regiszterek állapota) is el kell menteni egy következő szintű cache-be, vagy a memóriába, esetleg SRAM-ba. A táp lekapcsolással együtt a magról lekapcsolják az órajelet és az órajel generátort is.

A kontextus mentése

A kontextus mentése történhet:

- memóriába (AMD használta pl. Bulldozer, Piledriver, Excavator, Bobcat, Jaguar)
- következő szintű gyorsítótárba (AMD Jaguar, Puma)
- magonkénti SRAM-ba (Intel processzorok)