

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Matjaž Klančar

**Zmogljivost in varčnost
procesorskih arhitektur ARM in x86**

DIPLOMSKO DELO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

Mentor: izr. prof. dr. Patricio Bulić

Ljubljana, 2014

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.



Št. naloge: 00151 / 2013

Datum: 14.9.2013

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **MATJAŽ KLANČAR**

Naslov: **ZMOGLJIVOST IN VARČNOST PROCESORSKIH ARHITEKTUR ARM
IN X86
PROCESSING SPEED AND POWER CONSUMPTION OF ARM AND
X86 ARCHITECTURES**

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija prve stopnje

Tematika naloge:

Predstavite trende na področju mikroprocesorskih arhitektur v času, ko se proizvajalci procesorjev pospešeno obračajo k mobilnemu računalništvu. Intelovi procesorji x86 postajajo energijsko varčni in zato primerni za vgradnjo v tablice in telefone, procesorji ARM pa vedno zmogljivejši in primerni celo za vgradnjo v večprocesorske strežnike. Primerjajte hitrost procesiranja in varčnost obeh arhitektur.

Mentor:

izr. prof. dr. Patricio Bulić



Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Matjaž Klančar,
z vpisno številko 24006642,

sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Zmogljivost in varčnost procesorskih arhitektur ARM in x86

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvomizr. prof. dr. Patricia Bulića,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov, povzetek in ključne besede docela enaki tiskani obliki diplomskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, 5. marca 2014

Podpis avtorja:

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Patriciu Buliću, za vse predloge, pripombe, strokovno pomoč in mentorstvo pri pisanju diplomskega dela.

Poleg tega bi se rad zahvalil še ženi Heleni, ki me je spodbujala, podpirala in prenašala v mesecih pisanja diplomske naloge.

Kazalo

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 1 | Uvod | 1 |
| 2 | Razvoj..... | 3 |
| 2.1 | Intel | 3 |
| 2.1.1 | Intel Atom..... | 3 |
| 2.2 | ARM | 4 |
| 3 | Razlike v arhitekturah..... | 7 |
| 3.1 | Intel | 7 |
| 3.2 | ARM | 10 |
| 4 | SoC – System on a Chip..... | 13 |
| 4.1 | ARM | 13 |
| 4.2 | Intel | 16 |
| 5 | Miti o arhitekturah | 19 |
| 6 | Smeri razvoja..... | 21 |
| 6.1 | Hitrost in varčevanje..... | 21 |
| 6.2 | Varčevanje in hitrost | 22 |
| 6.3 | Več jeder/varčna jedra..... | 22 |
| 6.4 | Operacijski sistemi..... | 25 |
| 7 | Meritve | 27 |
| 7.1 | Težave | 27 |
| 7.1.1 | Varčnost | 27 |
| 7.1.2 | Hitrost..... | 28 |
| 7.1.3 | Programska oprema..... | 29 |
| 7.1.4 | Strojna oprema | 29 |
| 7.2 | Zasnova meritev..... | 30 |
| 7.3 | Rezultati..... | 30 |
| 7.4 | Obrazložitev rezultatov..... | 34 |
| 8 | Sklepne ugotovitve | 35 |
| 9 | Slike..... | 37 |
| 10 | Tabele..... | 39 |
| 11 | Viri | 41 |

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

| | | |
|----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AMR | Adaptive Multi-Rate audio codec | Kodiranje zvoka, ki ga uporablja mobilni standard GSM. |
| CISC | Complex Instruction Set Computing | Procesorska arhitektura, ki se ne omejuje z majhnim številom ukazov. |
| GPS | Global Positioning System | Sistem globalnega pozicioniranja, ki temelji na konstelaciji geostacionarnih satelitov. |
| GSM | Global System for Mobile Communications | Sistem druge generacije mobilnih komunikacij, ki ga je razvil evropski inštitut za standarde ETSI. |
| IEEE 754 | | Standard za aritmetiko s plavajočo vejico. |
| MP3 | MPEG Audio Layer III | Kodirni format za zvok/glasbo. |
| NEON | ARM Advanced SIMD extension | Skupek 64- in 128-bitnih ukazov, ki omogočajo pospeševanje medijskih in signalnih algoritmov. |
| OLPC | One Laptop per Child | Projekt, ki naj bi poskrbel za uvajanje dostopnih izobraževalnih naprav v nerazvitem svetu. |
| RISC | Reduced Instruction Set Computing | Procesorska arhitektura, ki temelji na malo ukazih, ki se hitro izvajajo. |
| SIMD | Single instruction, multiple data | »Vektorski« ukazi, ki jih vsebujejo vsi moderni procesorji in omogočajo hitro obdelavo večpredstavnih vsebin. |
| SOC | System on a chip | Integrirano vezje, ki poleg procesorja vsebuje še druge dele, potrebne za izdelavo računalnika. |
| TDP | Thermal Design Power | Največja količina toplote, ki jo mora sistem odvajati s procesorja, da ta še vedno deluje brez težav. |

Povzetek:

Cilj diplomske naloge je predstaviti smernice razvoja na področju mikroprocesorskih arhitektur v času, ko se svet iz desetletij osebnega računalništva pospešeno obrača v mobilno računalništvo. Intelovi procesorji x86 postajajo energijsko varčni in zato primerni za vgradnjo v tablice in telefone, procesorji ARM pa vedno zmogljivejši in primerni celo za vgradnjo v večprocesorske strežnike.

Diplomska naloga osvetli zgodovinske razloge za današnje stanje in osvetli razlike med obema procesorskima arhitekturama. Predstavi razloge za vstop obeh velikanov na področje, ki ga doslej nista obvladovala. Kakšne so tehnične rešitve, ki jih uporablja Intel, da lahko svoje »namizne« procesorje vgradi v telefone, in kakšne so rešitve »velikih«, ki jih ARM začinja uporabljati za uporabo v strežniških sistemih.

Na koncu so predstavljene hitrostne meritve telefonov in tablic s procesorji Intel Atom in ARM.

Ključne besede:

ARM, Cortex, Intel, Atom, x86, Android

Abstract:

The aim of this thesis is to present trends in microprocessor architectures within the context of a noticeable contemporary decrease of personal computing and the rise of mobile computing. Intel x86 processors are increasingly becoming energy efficient and therefore suitable for installation in tablets and phones. Similarly, ARM processors are becoming sufficiently powerful and thus suitable even to be installed in multi-processor servers.

The thesis highlights the historical factors that have led to this present day and discusses the differences between the two processor architectures. It proceeds to an in-depth discussion of the reasons for the entry of the two giants, Intel and ARM, in each other's playing field. The thesis then focuses on the technical solutions employed by Intel, which enable it to scale down its processors to phones as well as examines the solutions that ARM incorporate into their systems in order for them to be used in in server systems.

The 'Results' section contains benchmark figures for the speed of current phones and tablets that are fitted with Intel Atom and ARM processors.

Key words:

ARM, Cortex, Intel, Atom, x86, Android

1. poglavje

1 Uvod

Jedro bolj ali manj vseh elektronskih, lahko bi rekli že kar vseh »tehničnih« naprav je danes mikroprocesor. Razlog je preprost – prvi mikroprocesor, Intel 4004, je sprožil revolucijo, saj je bilo z njim mogoče zelo različne naprave izdelati z zelo podobno strojno opremo in jih med seboj ločiti predvsem s programsko opremo, ki je upravljala celoto.

S procesorjem lahko danes upravljamo vse – od hladilnikov prek računalnikov in telefonov do vesoljskih ladij. Pa vendar se ključen razvoj in zato tudi boj odvija na področju računalništva. Še več, specializirani procesorji za velike računalnike bolj ali manj izumirajo (s pomembno izjemo IBM-ovih procesorjev Power in nekoliko Sun/Oraclovih procesorjev Sparc), saj jih nadomešča množica cenejših procesorjev z Intelovo arhitekturo x86, ki je neposredno izšla iz prvega mikroprocesorja 4004. Tudi najmočnejši superračunalniki, ki se uporabljajo za simulacije vremena in atomskih eksplozij, danes tečejo na množici procesorjev x86 (znamke Intel ali AMD) ob pomoči specializiranih grafičnih procesorjev podjetja nVidia, ki rabijo kot vektorski procesorji.

[1]

Tudi v osebnem računalništvu že vse od nastanka prvega IBM-ovega osebnega računalnika PC prevladuje Intelova arhitektura x86, natančneje – prevladuje podjetje Intel. Nekaj odstotkov trga sicer (še vedno) obvladujeta podjetji z licenco, AMD in VIA, a je videti, da sta tam le zato, da ima Intel kritje pred protimonopolno zakonodajo. Intel s skorajda neomejenimi sredstvi za razvoj in lastno proizvodnjo skrbi za razvoj arhitekture, ki ji konkurenta zelo težko sledita. [2]

Intel je torej »zmagal«, a na področju, ki mu strokovnjaki ne pripisujejo prav veliko možnosti za dolgoročno preživetje, vsekakor pa ne za rast. Nova zlata jama so (pametni) telefoni in tablice, tam pa trenutno kraljuje britansko podjetje ARM, ki je svoj imperij zgradilo na popolnoma drugačnih temeljih. Tako tehničnih kot poslovnih. Čeprav Intel pri osebnih računalnikih v primerjavi s konkurentom AMD prevladuje, je, kot mi je v pogovoru osebno priznal Intelov zastopnik za Slovenijo, na področju procesorjev za mobilne naprave (telefone in tablice) nekoliko zaspal.

A ne za dolgo – pospešeno se trudi zmanjšati porabo svojih procesorjev in jih predstaviti kot primerne tudi za vgradnjo v prenosne naprave (tablice), oziroma razvijati nove različice procesorjev, namenjene posebej mobilnim napravam oz. telefonom [3]. Hkrati pa ARM v svoje procesorske arhitekture pospešeno vgrajuje napredne rešitve (64-bitnost ...), s katerimi namerava postati resen igralec tudi na strežniškem področju [4].

2. poglavje

2 Razvoj

2.1 Intel

Podjetje Intel so ustanovili nekdanji uslužbenci podjetja Fairchild, ki je bilo pionir na področju polprevodnikov. Intel je leta 1971 predstavil prvi mikroprocesor, 4004, ki je predstavljal revolucijo pri gradnji elektronskih vezij, saj je omogočal modularno zgradbo in programirljivost [5]. Od trenutka, ko je njegov procesor i8086 za srce svojega osebnega računalnika PC izbral IBM, je podjetje nedosegljiv gigant na področju mikroprocesorjev, pa tudi na področju polprevodnikov kot celoti. Za razliko od številnih drugih polprevodniških podjetij ima Intel tudi svoje proizvodne tovarne, s katerimi je v zadnjem desetletju razvojno vedno leto ali dve pred konkurenco [6].

Intelov procesor i8086 ni bil najboljši (in najhitrejši) procesor svojega časa. S strani IBM je bil izbran zato, ker je bil dovolj zmogljiv in obenem poceni. Še več, za prvotni IBM PC je bila izbrana omejena različica i8088, ki je imela le 8-bitno zunanje vodilo [7]. Procesor in sam IBM PC sta bila zato lahko še cenejša. Posledice IBM-ovega izbora so vidne še danes – vsi današnji Intelovi procesorji arhitekture x86 (ime izhaja iz procesorja i8086) imajo elemente združljivosti za zadnjih trideset let razvoja procesorjev in arhitekture PC.

Kljub temu so danes Intelovi procesorji (predvsem to velja za zadnje generacije Core) absolutni zmagovalci tako na področju hitrosti kot same tehnologije, daleč najuspešnejši pa so tudi na trgu. [8] Glavni konkurent na področju osebnih računalnikov in na področju strežnikov x86, podjetje AMD, v zadnjih letih Intela ne dosega več.

V zadnjih tridesetih letih so se kot konkurenti večkrat pojavili nezdržljivi procesorji, ki so bili občasno tehnično naprednejši od Intelovih procesorjev (DEC Alpha, PowerPC), a na trgu zaradi velikosti trga »IBM PC« in zaradi velikost in moči podjetja Intel niso obstali. Procesorji PowerPC so, denimo, »odmrli«, ko je njihov poglavitni uporabnik, Apple, ugotovil, da ne dosegajo zmogljivosti Intelovih procesorjev [9], njihovo »vejo« Power pa danes uporabljajo IBMovi veliki računalniki [10]. Od pomembnejših procesorskih družin je omembe vredna le še družina Sparc (Sun, zdaj Oracle), ki se uporablja v zmogljivih strežnikih.

Z vedno večjo priljubljenostjo prenosnih računalnikov v začetku tega tisočletja je postala pomembna poraba električne energije teh naprav, zato so (tudi) Intelovi procesorji z vsako generacijo varčnejši. K varčnosti pripomore že redno zmanjševanje razdalj med posameznimi tranzistorji v vezju (trenutno 22 nm), še bolj pa arhitekturne spremembe, kot so avtomatsko zniževanje delovne frekvence procesorja in podpora novim načinom spalnih stanj sistema (sleep state). [11]

2.1.1 Intel Atom

Ključni preskok k energijski varčnosti je Intel dosegel s predstavitvijo procesorske družine Atom [12]. Procesorji Atom nimajo nekaterih naprednih tehnologij kot procesorji Core, zato so veliko počasnejši, a tudi veliko varčnejši. [13]

Atom je v trenutku predstavitve pomenil delno revitalizacijo takrat že pokopanih procesorskih arhitektur i486 in P5, ki jih je Intel v zmogljivih procesorjih nadomestil s hitrejšimi arhitekturami P6 in NetBurst, kasneje predvsem Core. Temeljna zamisel je bila narediti procesor, ki bo dovolj preprost, da bo za svoje delo potreboval veliko manj električne energije kakor vrhunski procesorji in bo obenem dovolj zmogljiv za manj zahtevne vrste rabe. Tudi in predvsem za mobilne naprave.

2.2 ARM

Britansko podjetje Acorn Computers je leta 1981 doseglo izreden uspeh z osebnim računalnikom BBC Micro, ki ga je za projekt računalniškega opismenjevanja izbrala medijska hiša BBC. Uspeh so želeli nadgraditi na področju poslovnega računalništva, ki ga je ravno v tistem času zakoličil IBM s svojim računalnikom IBM PC, zato so za strojno zasnovo hoteli uporabiti procesor, ki bi bil močnejši od razmeroma šibkega procesorja MOS 6502, ki je bil uporabljen v BBC Micro. Odločili so se za arhitekturo z dodatnimi koprocesorji, ker pa so ocenili, da so takratni procesorji Motorola 68000 in National 32016 za kaj takega neprimerni, so se odločili za razvoj lastne procesorske arhitekture.

Projekt Acorn RISC Machine (ARM) je bil predstavljen leta 1983, prva simulacija procesorja pa je bila napisana kar v BASIC-u računalnika BBC Micro. Prvi praktični izdelek je bil koprocesor za BBC Micro, s pomočjo katerega so pospešili izvajanje programa CAD, s katerim so razvijali nove izdelke, prvi končni cilj pa je bil osebni računalnik Acorn Archimedes, prvi osebni računalnik v celoti razvit na arhitekturi ARM (ARM2).

Ključna razlika med arhitekturo ARM in drugimi arhitekturami tistega časa je bila orientacija v smer RISC oz. omejen ukazni nabor. Vsi takratni konkurenčni procesorji so namreč temeljili na arhitekturi CISC (Complex Instruction Set Computer). V praksi je to pomenilo, da je imel procesor ARM2 le 30.000 tranzistorjev (brez predpomnilnika, ki ga takratni procesorji niso imeli), šest let starejši Motorolin procesor pa jih je imel kar 68.000. Zaradi tranzistorske enostavnosti je za svoje delovanje porabil bistveno manj električne energije.

Acornov Archimedes se na koncu ni izkazal za komercialno uspešen projekt, a je projekt ARM kljub temu hitro napredoval. Eden ključnih trenutkov je nastopil, ko je v lastništvo vstopil Apple in ARM-ov procesor šeste generacije (ARM 610) izbral za procesor, ki je poganjal prvi dlančnik, Applov Newton [14]. Tudi Newton je bil pred časom, a je zakoličil smer, v katero se podjetje ARM razvija še danes – v smer naprav, ki so mobilne, delujejo na akumulator in morajo biti zato varčne. Danes procesorji ARM poganjajo bolj ali manj vse, razen osebnih računalnikov in strežnikov. Leta 2011 jih je bilo najti v 95 % odstotkih pametnih telefonov, 90 % diskov, 40 % televizorjev in so bili osnova za 15 % mikrokrmilnikov, najdemo pa jih tudi v kalkulatorjih. [15]

ARM je od nekdanje »intelektualno« podjetje, kar pomeni, da razvija procesorske arhitekture, proizvodnjo procesorjev in vezij pa prepušča drugim. Poleg same arhitekture podjetje ponuja tudi referenčne procesorske dizajne, ki jih različna podjetja izdelujejo in vgrajujejo pod svojimi imeni, oz. jih dopolnjujejo in po potrebi spreminjajo.

ARM od začetkov generacije Cortex svoje procesorje deli na tri »profile. To so:

- aplikacijski profil: serija Cortex-A
- profil za delovanje v realnem času: serija Cortex-R
- profil za mikrokrmilnike: Cortex-M

Ta diplomska naloga se ukvarja le s »splošno namenskimi« procesorji aplikacijskega profila, ki se vgrajujejo v naprave zabavne elektronike.

Leta 2011 je ARM predstavil ključno novost v svoji arhitekturi – ARMv8. [16] Gre za 64-bitno arhitekturo (AArch64) z novim naborom ukazov A64. Omogoča izvajanje 32-bitnih aplikacij na 64-bitnem operacijskem sistemu in omogoča nadzor 32-bitnega operacijskega sistema s strani 64-bitnega hipervizorja. [17] Očitno je, da se ARM usmerja tudi v strežniški prostor [18], kjer trenutno gospoduje Intel, novo arhitekturo pa

je vendarle prvi uporabil Apple, v svojem mobilnem procesorju A7, ki je vgrajen v telefon iPhone 5s in tablico iPad Air.

Tabela 2.1: Arhitekture in družine procesorjev ARM. Vir: ARM

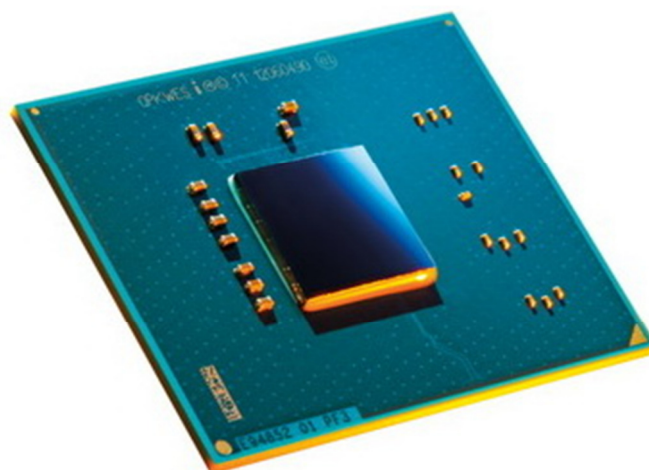
| arhitektura | družina |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ARMv1 | ARM1 |
| ARMv2 | ARM2, ARM3 |
| ARMv3 | ARM6, ARM7 |
| ARMv4 | StrongARM, ARM7TDMI, ARM9TDMI |
| ARMv5 | ARM7EJ, ARM9E, ARM10E, Xscale |
| ARMv6 | ARM11 |
| ARMv6-M | ARM Cortex-M0, ARM Cortex-M0+, ARM Cortex-M1 |
| ARMv7 | ARM Cortex-A5, ARM Cortex-A7, ARM Cortex-A8, ARM Cortex-A9, ARM Cortex-A15, |
| ARMv7 | ARM Cortex-R4, ARM Cortex-R5, ARM Cortex-R7 |
| ARMv7-M | ARM Cortex-M3, ARM Cortex-M4 |
| ARMv8-A | ARM Cortex-A53, ARM Cortex-A57 |

3. poglavje

3 Razlike v arhitekturah

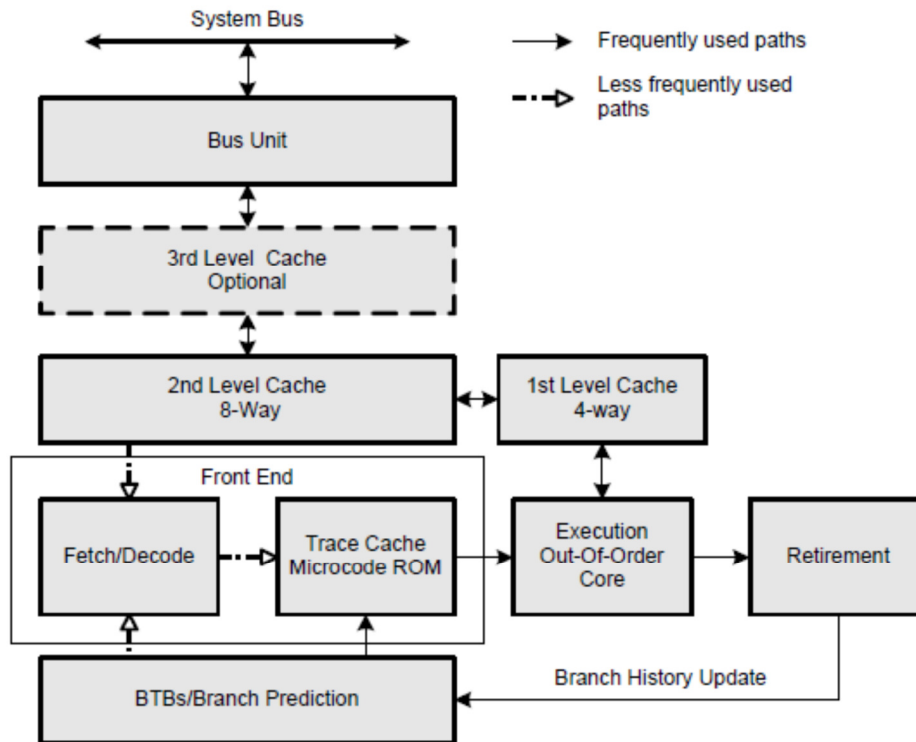
Ključna razlika med procesorskima arhitekturama Intel x86 (hitrost) in ARM (varčnost) ni nastala zato, ker bi bili razvijalci iz enega tabora boljši, bolj zagrizeni ali inteligentnejši od tistih na drugi strani, temveč zato, ker sta se arhitekturi razvijali vsaka s svojim ciljem v mislih.

3.1 Intel



Slika 3.1: Intel Atom S1200. Vir: Intel [19]

Intel je bil s svojimi procesorji od vsega začetka zagnan k čim večji hitrosti izvajanja ukazov in obenem k vzdrževanju združljivosti za nazaj (»IBM PC«). Intelovi procesorji so od nekdanj delovali »na žico«, šele z leti so jih začeli uporabljati v prenosnih računalnikih, ki delujejo tudi na akumulator. To pomeni, da niso bili optimizirani za varčnost delovanja, ampak je bil edini cilj hitrost izvajanja programov, predvsem za Windows, v zadnjih letih tudi Linux. Tako so procesorji hitro razvili vzporedno izvajanje ukazov, izvajanje ukazov zunaj vrstnega reda (Out of order), posebne ukaze za vzporedno obdelavo podatkov (SSE, SSE2 itd.) in še marsikaj. Zato je šla poraba procesorjev x86 dolga leta vedno samo navzgor, saj je bilo za vse (hitrostne) novosti treba vedno več in več tranzistorjev, še posebej po tem, ko so procesorji začeli vsebovati tudi predpomnilnike (danes celo tretjenivojske). In to čeprav so bile nove generacije redno izdelane v vedno manjših mikronskih tehnologijah, ki načeloma omogočajo izdelavo vedno večjega števila tranzistorjev na enaki površini silicija in s tem manjšo porabo električne energije.



Slika 3.2: Arhitektura NetBurst, ki je bila uporabljena v procesorjih Pentium 4, se je zaradi zelo dolgih cevovodov (celo 31 stopenj) izkazala za energetska zelo potratna, zato jo je nadomestila varčnejša arhitektura Core. Vir: Intel [20]

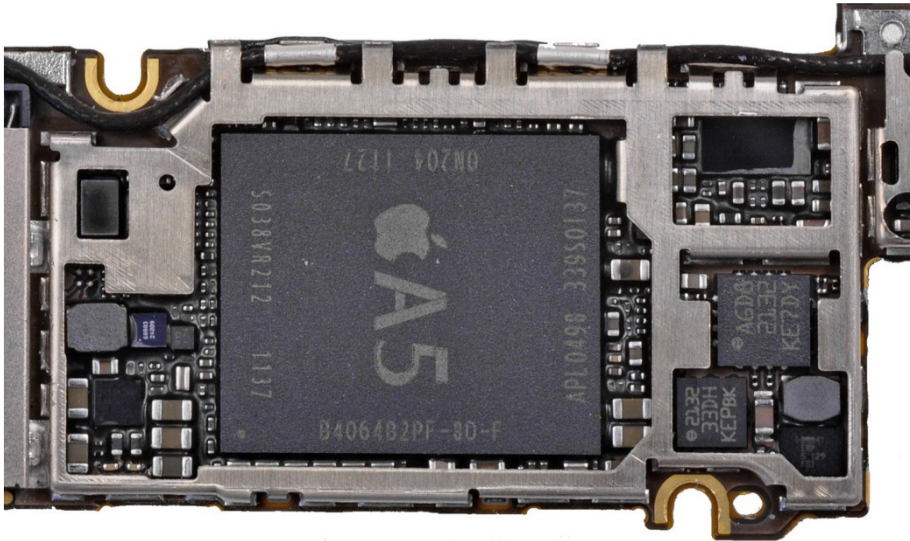
Po drugi strani so procesorji Atom veliko preprostejši in zato tudi veliko varčnejši. Izvajajo (le) do dva ukaza na cikel in, tako kot velja za vse procesorje x86, ukaze prevajajo v mikro ukaze. Velika večina ukazov se prevede v en sam mikro ukaz, le manjši del se jih prevede v več, kar pomeni precejšnje odstopanje od nekdanjih Intelovih arhitektur P6 in NetBurst (Pentium 4). Cevovod je krajši kot pri vrhunskih procesorjih Core (16 stopenj), prve izvedenke pa niso omogočale modernih tehnik, kot so špekulativno izvajanje ter preureditev ukazov. [20] Zaradi tega procesorje Atom sestavlja manj tranzistorjev in so posledično veliko varčnejši od procesorjev Core, obenem pa tudi veliko počasnejši. Ker interni mikro ukazi v povezavi z aritmetično enoto zmorejo tudi hkratno shranjevanje in prevzemanje iz pomnilnika (memory load/store), so procesorji kljub zgoraj zapisanim omejitvam razmeroma zmogljivi. Novejše izvedenke procesorjev Atom (Saltwell in Silvermont) uvajajo določeno stopnjo izvajanja ukazov zunaj vrstnega reda (out of order execution), zaradi česar so hitrejši, a tudi potratnejši z električno energijo. To nekoliko kompenzirajo z vedno manjšimi mikronskimi tehnologijami izdelave. [21]

Kljub vsem tem »varčevalnim ukrepom« je za mobilne sisteme, narejene na podlagi procesorjev Atom, do nedavna veljalo, da so precej manj varčni od naprav, narejenih na procesorjih ARM. Ključen razlog za to je bil Intelov pozen miselni preskok, da ultra varčni mobilni procesorji enostavno morajo vsebovati tudi (skoraj) vsa podporna vezja in vezje za pospeševanje grafike, drugače je skupek vezij, ki vse to zmore, enostavno preveč energijsko požrešen. Procesor Atom N270 (letnik 2009) je tako res trošil le 2,5 W (gre za TDP, t. i. termalno ovojnico) [22], vendar je za svoje delovanje potreboval skupek čipov 945GSE Express (narejen in uporabljan v namiznih računalnikih), tako da je celota na koncu porabila polnih 11,8 W [23]. Še več – na začetku so vsi procesorji

Atom uporabljali vezje 945GC, ki za svoje delovanje potrebuje tudi do 22 W [24]. Prvi Intelov korak v varčno smer je bila predstavitev procesorjev Atom N450, D519 in D410, ki so že imeli vgrajen grafični podsistem, poraba pa je bila ocenjena na 5,5 W [25]. Za oceno – izdelovalec Qualcomm meni, da mora celotno vezje SoC v telefonu porabiti med 2,5 in 3 W, v tablici pa največ 5 W. V nasprotnem primeru naprave ni več mogoče pasivno hladiti (brez ventilatorja). [26]

Šele v zadnjem času, ko se Intel pospešeno usmerja v prodor na trg pametnih telefonov, so ustrezno varčna tudi podporna vezja, oziroma je v enem integriranem vezju vsa potrebna elektronika, t. i. SoC (System on a Chip). To je v svetu ARM običajno že dalj časa.

3.2 ARM



Slika 3.3: Apple A5, eden izmed sistemov SoC, ki temeljijo na arhitekturi ARM. Vir: Anandtech [27].

ARMovi procesorji so od nekdaj namenjeni »varčnemu« delovanju, saj poganjajo naprave, ki morajo kar najdlje preživeti brez popkovine z električnim omrežjem, obenem pa morajo biti kar najcenejši, da jih lahko vgrajujejo tudi v naprave, ki jih bolj ali manj ne moremo šteti za računalnike (npr. diski). Hitrost je bila dolgo drugotnega pomena, a se to v zadnjem času spreminja.

Prvotni procesorji ARM so se strogo držali enostavnosti in preprostosti, zato so bili »ožičeni« brez uporabe mikro ukazov, strogo s strojnimi elementi. Tudi danes temeljijo na načelu RISC, kar pomeni:

- da imajo veliko večnamenskih registrov,
- da se velika večina ukazov izvede v enem urnem ciklu,
- da so vsi ukazi enako dolgi in
- da so vsi ukazi, ki imajo dostop do pomnilnika, vrste LOAD/STORE.

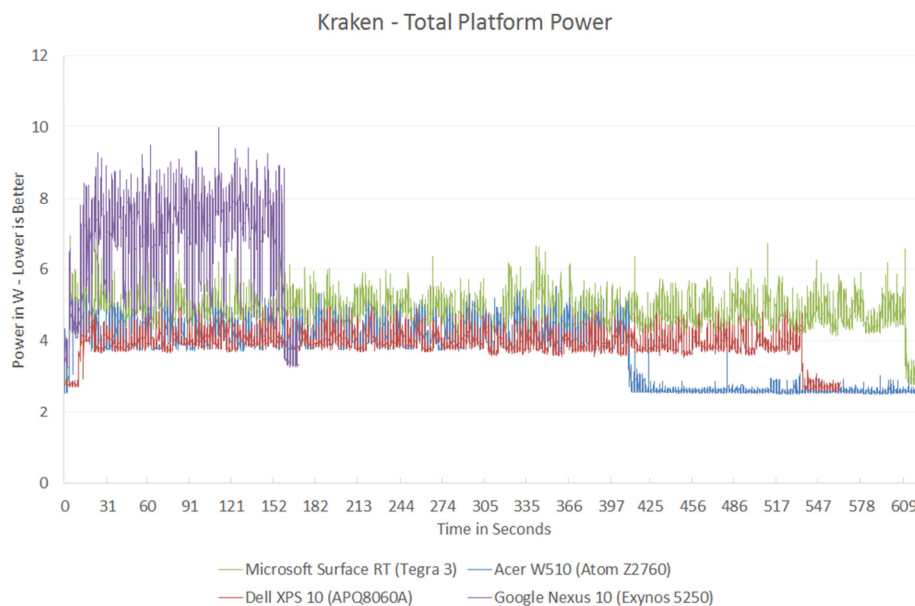
Vendar današnji procesorji za kompleksnejše ukaze uporabljajo tudi mikro ukaze. Zaradi poenostavljene zasnove bi bili procesorji ARM premalo učinkoviti, če ne bi novejša generacija vključevala tudi nekaj odstopanj v smeri procesorjev CISC (Complex Instruction Set Computing):

- večina ukazov omogoča pogojno izvajanje, s čimer procesor kompenzira odsotnost predikcije vejitev (branch predictor), ki ga premorejo moderni procesorji CISC,
- aritmetični ukazi spreminjajo pogojne kode le, če tako zahtevamo,
- obstajajo ukazi za hkratno nalaganje (Load) in shranjevanje (Store) več ukazov naenkrat,
- procesor premore zmogljive načine naslavljanja [28]

Od procesorja Cortex-A8 naprej procesorji premorejo tudi že vzporedne ukaze SIMD (Single Instruction Multiple Data) NEON, s katerimi lahko že najšibkejši procesorji (s

frekvenco le 10 MHz) dekodirajo tok MP3 oz. zmorejo zvočno kodiranje GSM (kodek AMR). [29] Zato so vgrajeni v bolj ali manj vse mobilne telefone.

Procesorji ARM omogočajo tudi programiranje s 16-bitnimi ukazi Thumb, kar jih naredi uporabne za aplikacije, kjer je ključno varčevanje s prostorom in električno energijo. Krajši ukazi namreč zasedejo manj pomnilnika, to pa se pozna na manjši porabi sistema. Novejši procesorji ARM, predvsem Cortex A-15, tudi v svet ARM uvajajo možnost izvajanja ukazov zunaj vrstnega reda (out of order execution), s katerim postajajo hitrejši, vendar zato potrebujejo več električne energije. Procesorji A-15 se zato uporabljajo le v tablicah, kjer jih je lažje hladiti in kjer so večji akumulatorji, v telefonih pa ne.

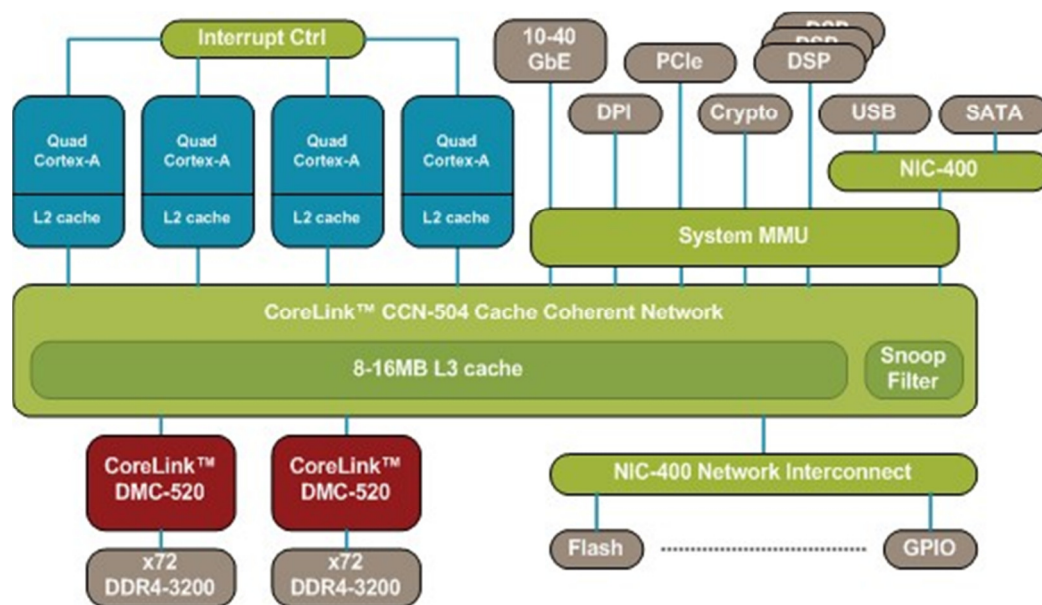


Slika 3.4: Meritve porabe neposredno na vezju telefona/tablice kažejo, da procesor ARM Cortex-A15 (Exynos 5250) med delom potrebuje nekajkrat več energije kot starejši procesorji ARM in Intel Atom. Vir: Anandtech [30]

4. poglavje

4 SoC – System on a Chip

4.1 ARM



Slika 4.1: Blok diagram SoC na podlagi ARM - ARM CoreLink system IP. Vir: ARM [31].

Mikroprocesor že dolgo ni več le mikroprocesor, temveč vsebuje še vse kaj drugega, že v osebnih računalnikih je danes velika večina procesorjev takih, da vsebujejo tudi grafični pospeševalnik [32]. Sledijo torej usmeritvi, ki se je začela v telefonih, prav na arhitekturi ARM. System On a Chip (SoC) je vezje, ki poleg samega procesorskega jedra (ali več njih) in predpomnilnika danes vsebuje še pomnilnik (ROM, RAM, Flash ...), grafični pospeševalnik, pomnilniški krmilnik, napetostne krmilnike, omrežno podporo (Wifi, Ethernet, 3G/4G), GPS/Glonass in še kaj. Tak sistem integracije je ključen, če želimo doseči kar najmanjšo porabo električne energije, ki je v mobilnih napravah in še predvsem telefonih nujna.

Podjetja, ki danes izdelujejo procesorje ARM za pametne telefone in tablice, vsa po vrsti v resnici izdelujejo celotne sisteme SoC. Ključni izdelovalci so Texas Instruments (OMAP), nVidia (Tegra), Apple (Ax), Samsung (Exynos) in Qualcomm (Snapdragon), grafične dele v SoCih pa razvijajo podjetja ARM (Mali), Qualcomm (Adreno – izhaja iz nekdanjega mobilnega oddelka ATI/AMD), Imagination Technologies (PowerVR) in nVidia (Tegra). Čeprav je grafične zmogljivosti zaradi množice dejavnikov (število cevovodov, število senčilnikov) v resnici zelo težko izmeriti, so po nekaterih ocenah današnji grafični pospeševalniki v telefonih hitrejši od vrhunskih grafičnih kartic, ki smo jih imeli v osebne računalnike vgrajene pred sedmimi leti (nVidia Geforce 8600GT) [33].

Tabela 4.1: Ocenjene hitrosti današnjih grafičnih vmesnikov v primerjavi z eno starejšo in eno moderno grafično kartico za namizne računalnike. Vir: revija Monitor [34].

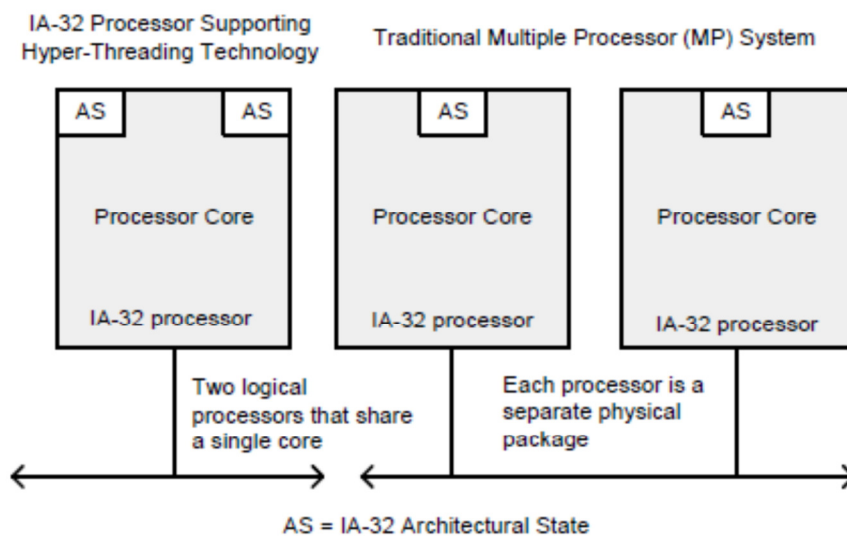
| Grafični vmesnik | Računska moč [v GFLOPih] |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Mali-400 | ~14 |
| Mali-T604 | ~68 |
| Mali-T658 | ~300 |
| Adreno 225 | ~25 |
| Adreno 320 | ~100 |
| PowerVR SGX 543MP2 | ~16 |
| PowerVR SGX 543MP4 | ~32 |
| PowerVR SGX 544MP3 | ~51 |
| PowerVR SGX 554MP4 | ~71 |
| Tegra 3 Geforce | ~12 |
| namizni Geforce 8600GT (letnik 2007) | ~113 |
| namizni Radeon HD 7970 Ghz Ed. | ~4100 |

Tabela 4.2: Nekaj najpogostejših sistemov SoC na podlagi ARM. Vir: spletne strani izdelovalcev

| | | proizvodni proces | frekvenca | jedra | grafika | letnica | naprave |
|----------|----------------|-------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| Qualcomm | Snapdragon S4 | 28 nm | do 1,7 GHz | 4 x Krait | Adreno 320 (1080p video) | 2012 | LG Optimus G, Nexus 4, Sony Xperia Z |
| | Snapdragon 600 | 28 nm | do 1,9 GHz | 4 x Krait 300 | Adreno 320 (1080p video) | 2013 | LG Optimus G Pro, HTC One |
| | Snapdragon 800 | 28 nm | do 2,3 GHz | 4 x Krait 400 | Adreno 330 (2160p video) | 2013 | LG G2, Samsung Galaxy Note 3 |
| Apple | A4 | 45 nm | 0,8 - 1,0 GHz | 1 x Cortex-A8 | PowerVR SGX535, 200–250 MHz | 2010 | iPad, iPhone 4 |
| | A5 | 45 nm | 0,8 - 1,0 GHz | 2 x Cortex-A9 | PowerVR SGX543MP2 (2-jedrni), 200 MHz | 2012 | iPad 2, iPad mini |
| | A5X | 45 nm | 1 GHz | 2 x Cortex-A9 | PowerVR SGX543MP2 (4-jedrni), 250 MHz | 2012 | iPad 3 |
| | A6 | 32 nm | 1,3 GHz | 2 x Swift | PowerVR SGX543MP2 (3-jedrni), 250 MHz | 2012 | iPhone 5 |
| | A6X | 32 nm | 1,4 GHz | 2 x Swift | PowerVR SGX554MP24 (4-jedrni), 280 MHz | 2012 | iPad 4 |
| | A7 | 28 nm | 1,4 GHz | 2 x Cyclone | PowerVR G6430, 450 MHz | 2013 | iPhone 5s, iPad Air |
| | Samsung | Exynos 3 | 45 nm | 0,8 - 1,2 GHz | 1 x Cortex-A8 | PowerVR SGX540, 200 MHz | 2010 |
| | Exynos 4 Dual | 45 nm | 1,2 - 1,4 GHz | 2 x Cortex-A9 | ARM Mali-400 MP4 (4-jedrni), 266 MHz | 2011 | Galaxy S II |
| | Exynos 4 Quad | 32 nm | 1,4 - 1,6 GHz | 4 x Cortex-A9 | ARM Mali-400 MP4 (4-jedrni), 440 MHz | 2012 | Galaxy S III |
| | Exynos 5 Dual | 32 nm | 1,7 GHz | 2 x Cortex-A15 | ARM Mali-T604 MP4 (4-jedrni), 533 MHz | 2012 | Chromebook, Nexus 10 |
| | Exynos 5 Octa | 28 nm | 1,8 GHz | 4 x Cortex A15 + 4 x Cortex-A7 | PowerVR SGX544MP3 (3-jedrni), 533 MHz | 2013 | / |
| nVidia | Tegra 2 | 40 nm | 1 GHz | 2 x Cortex-A9 | Geforce, 333 MHz | 2011 | Samsung Galaxy Tab 10.1, Asus Eee Pad Transformer |
| | Tegra 3 | 40 nm | 1,6 GHz | 4 x Cortex-A9 | Geforce , 520 MHz | 2012 | Asus Transformer Pad Infinity, HTC One X+ |
| | Tegra 4 | 28 nm | 1,9 GHz | 4 x Cortex-A15 | Geforce, 72 jeder | 2013 | nVidia Project Shield |

4.2 Intel

Intel je šele leta 2012 predstavil pravo integrirano vezje, ki je vsebovalo večino potrebnih elementov za vgradnjo v moderne mobilne naprave – Atom serije Z. Ta Intelov SoC (System on a chip) je nastal v sodelovanju z Googlom, v želji predstaviti procesor, ki ga bo moč uporabiti v napravah z operacijskim sistemom Android, seveda pa tudi v napravah z Windows (8), kjer procesorji x86 že od nekdaj prevladujejo. Sistem Atom Z2460 (z razvojnim imenom Medfield) je enojedrni, Atom Z2760 (Clover Trail) pa dvojedrni. Oba uporabljata procesorski jedri z razvojnim imenom Saltwell, s podporo za Hyperthreading [35], ki posamezno jedro programsko prikaže kot dvojedrni sistem in s tem nekoliko izboljša zmogljivosti sistema.



Slika 4.2: Procesor, ki podpira Hyperthreading, ima dva logična procesorja z lastnima naboroma večine registrov. Vir: Intel [20]

Prvi so namenjeni pametnim telefonom, drugi pa tablicam. Delovne frekvence se gibljejo med 1,2 in 1,8 GHz. Zanimivo, da je vgrajen grafični podsistem PowerVR, kar kaže na to, da Intel s svojo mobilno arhitekturo še vedno ni popolnoma na zeleni nogi. Intel je namreč največji izdelovalec grafičnih podsistemov na svetu (za osebne računalnike) in velika večina njihovih namiznih procesorjev ima vgrajen tudi lasten grafični sistem, a kaže, da varčnost tega sistema še vedno ni na ravni mobilnih naprav. Najnovejši sistemi SoC z razvojnim imenom Baytrail (Z3740 in Z3770) sicer že imajo Intelovo lastno grafiko, a so namenjeni le tablicam, zaradi prevelike porabe pa (še) ne pametnim telefonom [36].

Sama procesorska jedra v arhitekturi Saltwell niso nič hitrejša kot starejši procesorji Atom, ključni napredek je v hitrejši grafiki in predvsem v večji varčnosti. Poleg varčnosti, ki je posledica integriranosti v SoC, je podjetje naredilo ključni napredek z vgradnjo novih varčevalnih procesorskih stanj [37]. V mobilnih napravah, kot so telefoni in tablice, namreč naprava večino časa ne počne prav veliko, saj le prikazuje sliko na zaslonu ali pa še tega ne, ko je zaslon ugasnjen. Zato je pametno/delno izklapljanje elektronskih vezij in zunanjih naprav ključnega pomena za dolgo avtonomijo akumulatorja. Atom Z2760 ima tako vgrajeno podporo stanjem S0x [38]. Stanje S0i1 je namenjen dogodku, ko je zaslon sicer prižgan in v pripravljenosti, a

naprava ne počne ničesar (uporabnik bere spletno stran). V tem stanju Atom troši le nekaj milivatov energije, za prehod v to stanje in nazaj pa potrebuje le nekaj mikrosekund. »Globlje« je stanje S0i3, ki je namenjeno polnemu spanju (ko je zaslon ugasnjen). Takrat SoC troši v rangi mikrovatov, za prehod v stanje in iz njega pa potrebuje kar nekaj milisekund.

Procesorji Atom Z2460 so danes vgrajeni v nekaterih redkih pametnih telefonih z operacijskim sistemom Android (Xolo in Motorola), zanimanje za dvojedrne Z2760 pa je precej večje in jih najdemo v že kar nekaj tablicah, večinoma z operacijskim sistemom Windows 8. Počasi začenjajo nastajati tudi tablice z najnovejšimi štirijedrnimi sistemi SoC »Baytrail«, enako z Windows 8.

Tabela 4.3: Ključni sistemi SoC na podlagi Intel Atom. Vir: Intel

| | proizvodni proces | frekvenca | jedra | grafika | letnica | nekateri naprave |
|-------------|--------------------------|------------------|----------------|--------------------------|----------------|------------------------------------------------|
| Atom Z2420 | 32 nm | 1,2 GHz | 1 x Saltwell | PowerVR SGX 540 | 2013 | Xolo X900 |
| Atom Z2460 | 32 nm | 1,6 - 2 GHz | 1 x Saltwell | PowerVR SGX 540, 400 MHz | 2012 | Lenovo K800, Xolo X900, Motorola Razr i |
| Atom Z2760 | 32 nm | 1,8 GHz | 2 x Saltwell | PowerVR SGX 545, 533 MHz | 2012 | HP Envy x2, Dell Latitude 10, Acer Iconia W510 |
| Atom Z3740D | 22 nm | 1,33 – 1,9 GHz | 4 x Silvermont | Intel Ivy Bridge | 2013 | Dell Venue 8 Pro |
| Atom Z3770 | 22 nm | 1,33 – 1,9 GHz | 4 x Silvermont | Intel Ivy Bridge | 2013 | HP Omni 10, Asus Transformer T100 |

5. poglavje

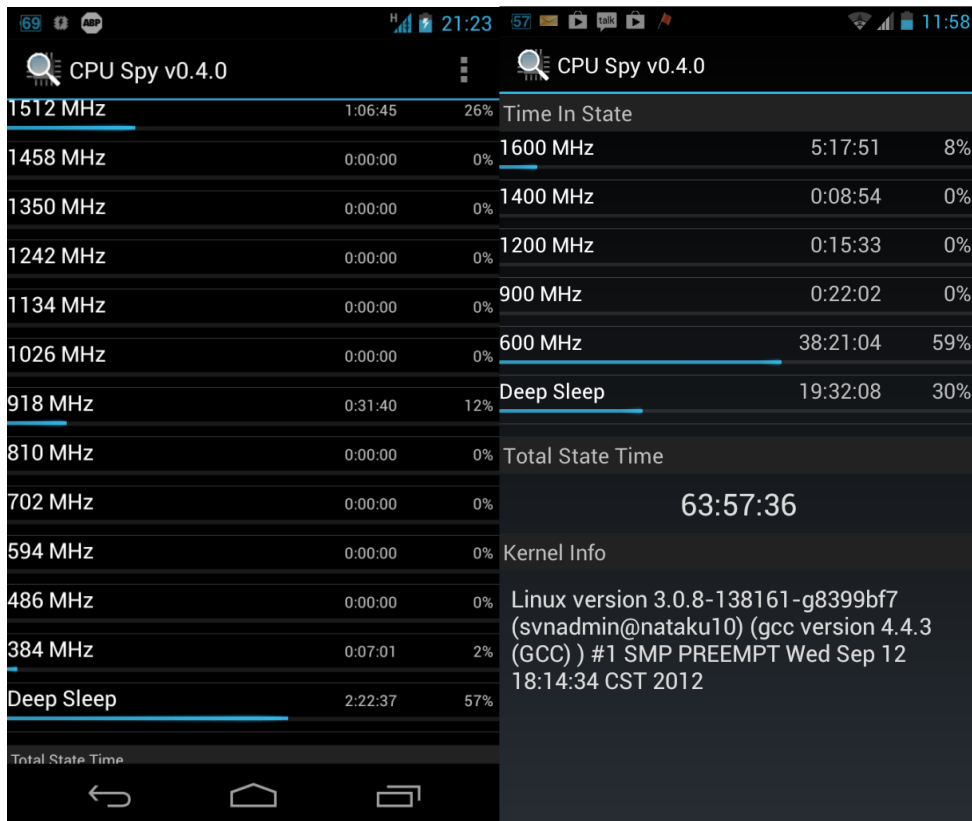
5 Miti o arhitekturah

Nekatera »dejstva« o arhitekturah ARM in x86 lahko danes že pospravimo med urbane mite. Prvi mit pravi, da ARM-ovi procesorji uporabljajo nekaj let starejšo proizvodno tehnologijo, zato njihovi tranzistorji med preklopi izgubijo manj električne energije. In ker je tranzistorjev manj (arhitektura RISC), je poraba še dodatno znižana. To je načeloma res, vendar mora zato procesor izvesti več ukazov (in preklpov), predvsem pa je danes procesorje že zelo težko ločiti na RISC in CISC. Moderni procesorji x86 so v resnici že dolgo procesorji RISC z nekakšno ovojnico CISC (spodaj ležeči »procesor« RISC izvaja mikrokodo, ki izvaja kompleksnejše ukaze CISC), procesorji RISC (ARM) pa že dolgo premorejo tudi ukaze, ki sodijo med »kompleksne«, kar pomeni, da za izvajanje potrebujejo več kot en cikel. Enostavno zato, ker se je to izkazalo kot pomemben kompromis med hitrostjo in porabo.

Drugi mit, ki je še do nedavna veljal, je ta, da znajo sistemi s procesorji ARM bolj učinkovito (za)spati in tako varčevati z električno energijo, ko niso v rabi. To od zadnjih generacij Intelovih procesorjev x86 ne velja več, saj je Intel z dodajanjem novih spalnih stanj v sisteme SoC s procesorji Atom to pomanjkljivost odpravil. Resnica je torej, da »spalna stanja« nimajo nobene zveze s samo »učinkovitostjo arhitekture«, temveč bolj s tem, ali se je izdelovalec v to smer potrudil ali ne. Seveda znajo današnji večjedrni procesorji ARM in Intel izklapljati tudi posamezna jedra, če jih programska oprema trenutno ne uporablja, oz. ustrezno pospešiti jedro, ki ne spi, če je treba (t. i. »turbo« način).

Procesorsko jedro v modernih vezjih zavzema le manjši del silicijeve površine, večji del zaseda predpomnilnik, preostanek pa ostane pomnilniškemu krmilniku in vezjem za komunikacijo. Pri integriranih vezjih SoC, ki danes zavzemajo večino t. i. »procesorjev«, je delež samega jedra še veliko manjši, saj so na istem siliciju vgrajeni še pospeševalnik 3D, vezje Wifi in Ethernet ter vmesniki 3G in LTE. Če je torej mogoče procesorsko jedro ARM narediti z manj tranzistorji kot primerljivo jedro x86, je to v celoti le minimalna prednost. In ker so Intelovi procesorji glede tehnologije izdelave vedno leto ali dve v prednosti pred konkurenco, so njihovi tranzistorji tako ali tako manjši, oz. jih gre na isto površino silicija več ...

S procesorji Atom in ARM, ki so nadvse varčni in zato primerni za vgradnjo v telefone in tablice, danes enostavno ni mogoče narediti sistema, ki bi bil dovolj zmogljiv, da bi gladko poganjal moderne operacijske sisteme (Windows, OS X). Obenem z vrhunskimi procesorji Core (i5, i7) ni mogoče narediti sistema, ki bi bil tako varčen, kot so današnji telefoni. S tablicami to še nekoliko gre, a imajo tablice s procesorji Core i5 takoj dvakrat nižjo avtonomijo od tistih s procesorji Atom in ARM, debelejšje so in imajo vgrajeno aktivno hlajenje oz. ventilatorje, tega pa uporabniki ne sprejemajo.



Slika 5.1.: Telefoni z operacijskim sistemom Android vgrajeni procesor po potrebi poganjajo z različnimi frekvencami. Kot je videti, je pri procesorjih ARM na voljo precej več procesorskih stanj kot pri Intelovem procesorju Atom. Levo – Nexus 4, Qualcomm Snapdragon S4 Pro, 1,5 GHz, desno – Lava Xolo X900, Intel Atom Z2460, 1,6 GHz. Na varčnost telefona to ne vpliva.

6. poglavje

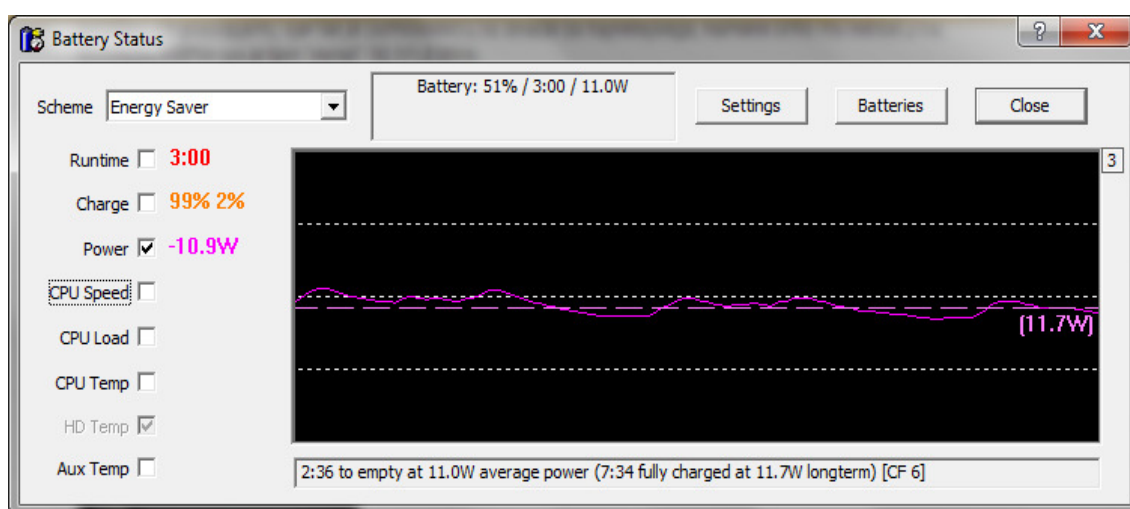
6 Smeri razvoja

Dandanes je ključna usmeritev, ki ji poskušajo slediti vsi izdelovalci procesorjev in procesorskih arhitektur za mobilne, pa tudi namizne in celo strežniške naprave, izdelati procesor/procesorsko arhitekturo, ki bo imela kar najboljše razmerje hitrost/poraba električne energije (t. i. »FLOPS per Watt«) [39]. Tega se različni izdelovalci lotevajo z dveh popolnoma različnih zornih kotov, a bodo, kot kaže, počasi oboji dosegli isti cilj.

6.1 Hitrost in varčevanje

Intel je s svojimi vrhunskimi procesorji Xeon nesporni vladar na področju strežnikov, strežniških farm in celo na področju superračunalnikov, pri čemer mu pri slednjih pomagajo še »grafične kartice«, ki jih je mogoče uporabiti kot masivno vzporedne sisteme za izračunavanje. Največkrat se uporabljajo kartice podjetja nVidia (Tesla) in seveda lastni sistem Xeon Phi, ki je izšel iz neuspešnega poskusa razvoja vrhunske grafične kartice (z razvojnim imenom Larrabee). Enako je nesporen vladar tudi na področju vrhunskih delovnih postaj in najzmogljivejših osebnih računalnikov (Windows in OSX) in osebnih računalnikov s procesorji Core (i3, i5 in i7). Ker pa danes vedno več računalnikov deluje (tudi) na akumulatorje in ker je »zeleno« v zadnjih letih postal precej moden izraz, je Intel zelo veliko truda vložil tudi v varčevalne lastnosti svojih procesorjev. Vsaka nova generacija procesorjev je tako hitrejša, a tudi varčnejša. Varčnost pri Intelu dosegajo z vedno natančnejšimi proizvodnimi procesi, pa tudi z vedno novimi arhitekturnimi prijemi. Današnji procesorji (in to ne samo mobilni) znajo zelo hitro in po potrebi zniževati procesorski takt, znajo izklapljati posamezna neuporabljena procesorska jedra in znajo sistem »uspavati« v več različno globokih spalnih stanj.

Kako varčevanje pri porabi vpliva na hitrost procesorja (in nasprotno) najboljše pričajo podatki o porabi procesorjev (TDP) [40], ki so za procesorje Atom od 2 do 5 W, vrhunski procesor Core i7 4960X TDP pa ima kar 130 W!



Slika 6.1: Poraba značilnega prenosnika v mirovanju s procesorjem Intel Core i5 (2520M) je okoli 11 W. To je veliko več od porabe povprečnega pametnega telefona ob polni rabi.

6.2 Varčevanje in hitrost

Podjetje ARM se doseganja najboljšega razmerja hitrost/nizka poraba loteva z nasprotnega konca – njihovi procesorji so že od nekdaj zelo varčni, šele v zadnjem času pa se trudijo biti tudi nadvse zmogljivi. K temu jih silijo zahteve po vedno hitrejših pametnih telefonih in vedno hitrejših tablicah. Nove naprave s procesorskimi arhitekturami ARM delujejo pri vedno višjih frekvencah (danes do 2,3 GHz), vsebujejo vedno več procesorskih jeder (Samsung izdeluje kar 8-jedrni procesor, vendar je 8-jedrnost le navidezna, hkrati delujejo največ 4 jedra) in uporabljajo vedno zmogljivejše arhitekture (trenutno je najzmogljivejša 64-bitna arhitektura Applevega procesorja A7). ARM-ovi procesorji so tako že dovolj zmogljivi, da jih podjetja začenjajo vgrajevati v osebne računalnike. Prvi je Samsung, ki je za Google izdelal prvi Chromebook, ki ne temelji več na Intelovem procesorju x86, temveč na procesorju ARM (dvojedrni Cortex–A15), Samsungu pa danes sledi še nekaj drugih izdelovalcev (Acer, HP). Res pa je, da Chromebook ni »pravi« osebni računalnik, na njem ne teče »pravi« operacijski sistem, kot sta Windows ali OSX, temveč ChromeOS, ki je v resnici prilagojeni Linux s spletnim brskalnikom Chrome. Preizkusi kažejo [41], da je Chromebook z ARM-om za opravila, katerim je namenjen (brskanje po spletu in uporaba Googlovih storitev Gmail, Drive in Youtube), dovolj hiter, a se mu občasno vendarle »zatakne«.

Slednje je verjetno razlog, da se o ARM-ovski različici OSX, s katero se menda že nekaj let ukvarja Apple, še vedno le govori. Apple hoče biti na morebitni prehod na novo procesorsko arhitekturo pripravljen (tak prehod je v svoji zgodovini že dvakrat uspešno opravil), a tehnologija zaenkrat enostavno še ni pripravljena, procesorji ARM so zaenkrat še prepočasni.

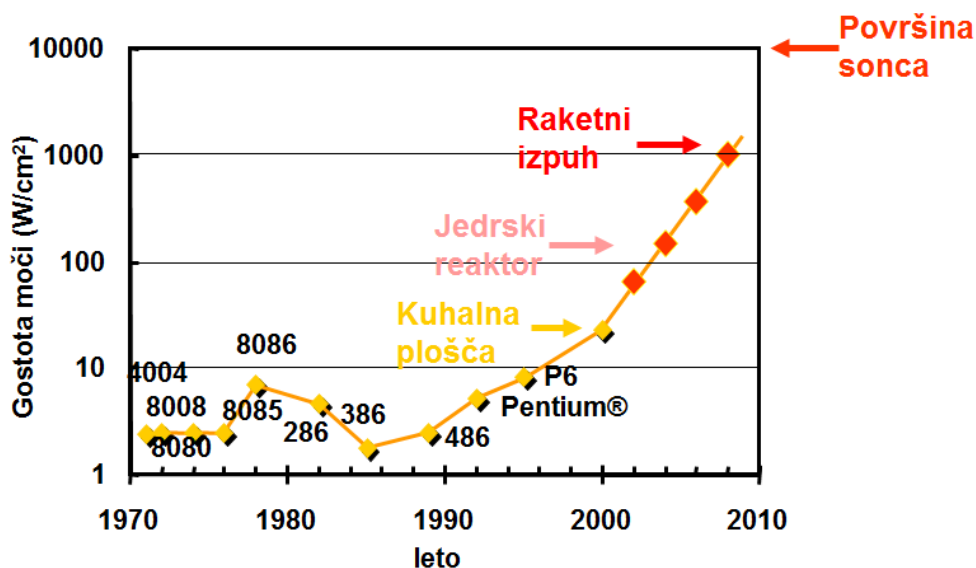
Po drugi strani so procesorji ARM po mnenju nekaterih podjetij že dovolj hitri, da bi jih bilo mogoče uporabiti v strežnikih [42] [43], kjer je mogoče bolje izrabiti večprocesorsko oz. kar gručno delovanje. Podjetje Calxeda tako že izdeluje strežnike s procesorji ARM (in operacijskim sistemom Linux), za katere zatrjuje, da imajo veliko boljše razmerje zmogljivost/poraba od konkurenčnih Intelovih procesorjev Xeon. [44] Intel se seveda ne strinja in dokazuje [45], da je poraba celotnega Calxedinega sistema (ne samo procesorja) višja od enakovrednega Xeonovega, pa vendar je bila vzpodbuda dovolj velika, da je tudi Intel za potrebe »varčnih strežnikov« izdelal posebno različico procesorja Atom – Atom S1200.

Prednost novega Atoma v primerjavi z dosedanjimi procesorji ARM je, da gre za 64-bitni procesor, kar je pri strežnikih pomembno, saj je naslavljanje več od 4 GB pomnilnika ključnega pomena. Velika večina delujočih sistemov s procesorji ARM je zaenkrat le 32-bitna, s strežniškimi vred, a se bo to kaj hitro spremenilo. ARM je že predstavil 64-bitno arhitekturo, med podjetji, ki so napovedala podporo zanjo, pa je tudi AMD, podjetje, ki je s procesorji Opteron trenutno edina resna konkurenca Intelovim strežniškim procesorjem Xeon. Strežniški procesorji AMD, ki bodo temeljili na 64-bitnih jedrih ARM, naj bi bili na voljo že leta 2014.

6.3 Več jeder/varčna jedra

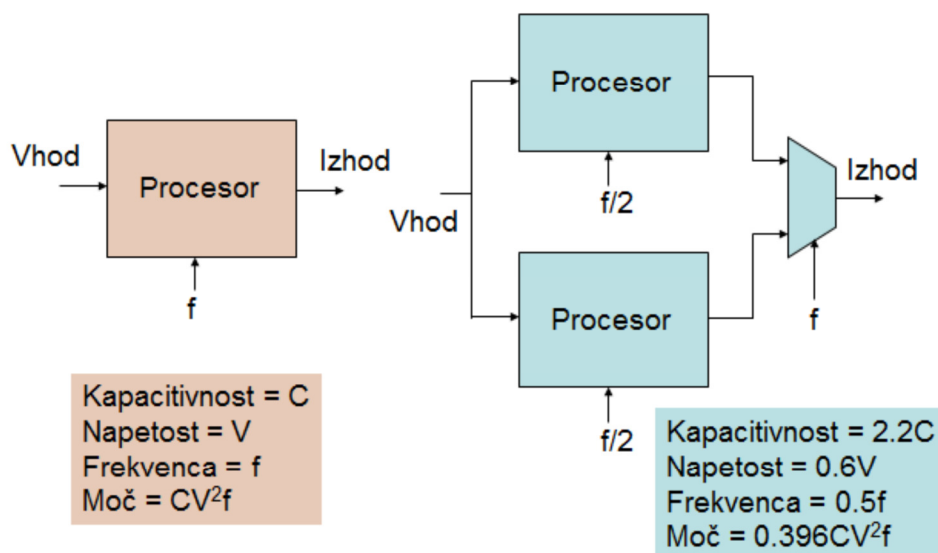
Vedno zmogljivejši procesorji za svoje delovanje potrebujejo vedno več električne energije, to pa posledično pomeni, da moramo z njih odvajati vedno večje količine toplote. Kot je leta 2009 izjavil tehnični direktor Intela, Pat Gelsinger, bi lahko procesorji čez deset let delovali s frekvencami med 10 in 30 GHz in obdelali trilijon

operacij na sekundo, a bi taki čipi ustvarjali toliko toplote na površino kot jedrski reaktor. [46]



Slika 6.2: Toplota, ki jo je bilo treba odvajati s površine procesorja, se je v času enojedrnih procesorjev nevzdržno večala. Vir: Intel

Rešitvi problema sta dve – preprostejši procesorji (kot je bil npr. v času procesorjev Pentium 4 mobilni Intel Pentium M) ali pa procesorji, ki so sestavljeni iz več delovnih jeder.



Slika 6.3: Energijo, ki je potrebna za delovanje procesorja, je moč zmanjšati z večjedrnim sistemom. Vir: Vishwani D. Agrawal, Auburn University

V svetu osebnih računalnikov so bili najprej (leta 2006) na voljo dvojedni procesorji (najprej kar dve silicijevi ploščici, povezani med seboj), nato štirijedni, danes največ šestjedni (v strežniških procesorjih tudi več). Intel je sicer že pred leti v laboratoriju

predstavil procesor z desetinami jeder, a je to v praksi izvedel le v nesojeni grafični kartici Larabee, zdaj znani kot matematična pospeševalna enota Intel Xeon Phi.



Slika 6.4: Intel Xeon Phi, matematični koprocessor z največ 61 jedri. Vir: Intel [47].

Razlog, da danes jeder v splošnonamenskih procesorjih ni več, je težavno vzdrževanje skladnosti predpomnilnikov in kompleksnost pisanja splošne programske opreme, ki bi znala v popolnosti izkoristiti večjedrne sisteme.

Iz istega razloga se danes razvoj mobilnih procesorjev ustavlja pri bolj ali manj štirijedrnih sistemih. Popolnoma običajni so pametni telefoni s štirijedrnimi procesorji (SoCi) ARM, Intelovi procesorji Atom v telefonih so še vedno enojedrni, v tablicah večinoma dvojedrni. S podporo Hyperthreadingu, ki procesorju doda navidezno dodatno jedro. Večjedrni procesorji v telefonih in tablicah so opazno hitrejši od enojedrnih različic pri isti delovni frekvenci. To je treba pripisati večnitnemu operacijskemu sistemu (Android, iOS, v zadnjem času Windows 8), seveda pa je res, da se hitrost s številom jeder ne večja linearno. Razen seveda pri specializiranih preizkusih, ki procesorju zadajo zelo dobro paraleliziran problem.

Ker je v pametnih telefonih in tablicah vsaj tako pomembna varčnost kot hitrost, v svetu ARM prihaja nova inovacija – t. i. varčna jedra. Govor je o »majhnih« procesorskih jedrih, ki od »velikih« prevzamejo delo, ko je obremenjenost sistema manjša. »Majhna« jedra so počasnejša, a varčnejša, s čimer naprava pridobi na akumulatorski neodvisnosti. Prva je tako zamisel izvedla nVidia v svojem sistemu SoC Tegra 3, ki ima vgrajena štiri hitra jedra Cortex-A9 in eno počasnejše jedro Cortex-A9 za varčevalno delo. [48]

Novejši je ARM-ov lastni sistem big.LITTLE [49], ki v podobni kombinaciji kombinira hitra jedra Cortex-A15 in združljiva jedra Cortex-A7. Jedra A15 so zelo hitra, a pri isti frekvenci potrebujejo tudi veliko več električne energije kot jedra A9 [50], zato se kombinacija s počasnejšimi, toda zelo varčnimi jedri A7 sliši zelo logično. big.LITTLE zna kombinirati eno hitro jedro z več počasnimi, enako število hitrih in počasnih, eden od načinov (big.LITTLE MP) pa predvideva tudi hkratno delovanje vseh procesorjev, hitrih in počasnih.

Prvi sistem SoC, ki uporablja sistem big.LITTLE, je Samsungov Exynos 5 octa, ki je svet ugledal v telefonu Samsung Galaxy S4 (model i9500 – na ameriškem trgu). Exynos

5 octa ima 4 jedra A15 in 4 jedra A7, v telefonu pa ni omogočeno hkratno delovanje vseh osmih jeder. Telefona mi ni uspelo preizkusiti, prva poročila pa pravijo, da je energijsko potratnejši kot različica i9505, ki uporablja »običajen« štirijedrni procesor Qualcomm Snapdragon 600 [51].

6.4 Operacijski sistemi

Prvi operacijski sistem za pametne telefone je bil Microsoftov sistem Windows CE, ki je najprej tekel na ročnih računalnikih, pozneje pa, pod različnimi imeni (Palm PC, Windows Phone ...), tudi na pametnih telefonih.

Na slednjih kljub temu ni nikoli doživel pretirane priljubljenosti, veliko bolje se je prijel sistem Symbian, predvsem na telefonih Nokia in Sony Ericsson. Ta je kraljeval še pred nekaj leti, dokler ni mobilnega sveta pretresel Apple s svojim pametnim telefonom iPhone in vanj nameščenim sistemom iOS.

Zelo hitro ga je uspelo nekoliko prekopirati Googlu, katerega sistem Android je danes prevladujoč in je nameščen v veliki večini pametnih telefonov. Android je odprtokodni sistem. To pomeni, da ga lahko izdelovalci v svoje telefone nameščajo zastonj, obenem pa ga nadgrajujejo s svojimi specifičnimi dodatki, kar je gotovo ključno za njegov nesluten uspeh. Android sicer teče na procesorjih ARM (tako kot Applov iOS), a tudi na Intelovih procesorjih z arhitekturo x86. To v praksi pomeni, da lahko izdelovalci v telefonih uporabljajo tudi Intelove procesorje Atom.

Na trgu deluje še Microsoft s svojim sistemom Windows 8 Phone, ki je ravno tako prirejen (tudi) za procesorje ARM, glavni ponudnik pa je finska Nokia, ki jo je Microsoft nedavno kupil.

Tako iOS kot Android sta sistema »unix«, prvi temelji na BSD, drugi na Linuxu, od nedavna ima Android kar linuxno jedro. Za razliko od Symbiana in Windows Phone oba že od vsega začetka podpirata tudi večjedrne procesorje.

7. poglavje

7 Meritve

Izmeriti, ali je neki procesor hitrejši od drugega in ali je pri tem tudi varčnejši ali ne, je bolj ali manj nemogoča naloga. Uporabimo lahko sicer različne merilne programe, a je končni rezultat vedno le ocena, saj je končni rezultat odvisen od preveč spremenljivk in predvsem načinov rabe.

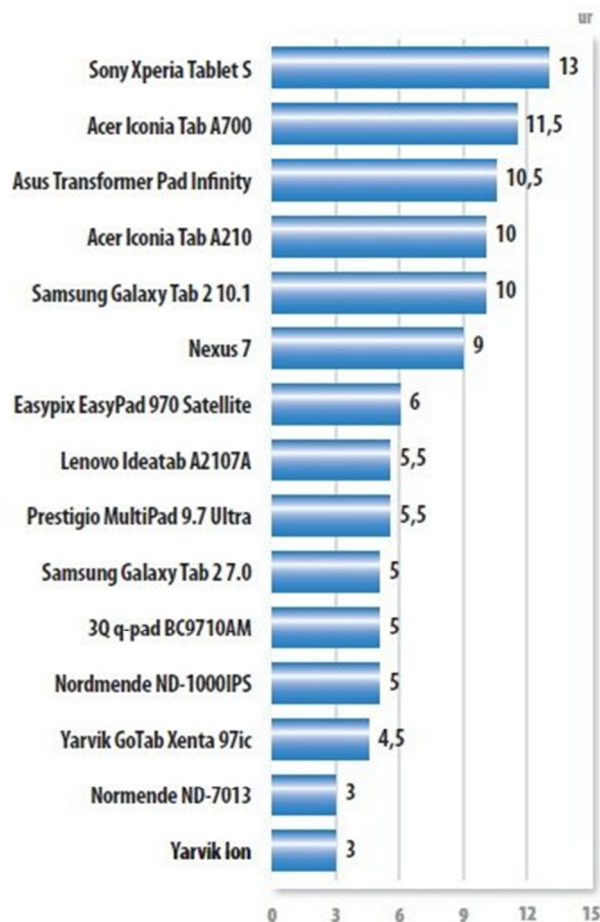
7.1 Težave

7.1.1 Varčnost

Varčnost nekega procesorja (ali SoCa) je v resnici pomembna samo v sklopu neke naprave, katere varčnost ocenjujemo – kako varčen je telefon, kako varčna je tablica. Koliko časa zdržita, preden ju je treba priklopiti na električno vtičnico. Žal je odgovor, ki naj bi ga dal neki merilni program ali postopek, docela odvisen od tega, kaj točno uporabnik (ali merilni program, ki »posnema« uporabnika) s telefonom ali tablico počne. Pri telefonu je problem še posebej zapleten, saj lahko s telefonom telefoniramo, pošiljamo sporočila SMS, do interneta dostopamo prek 3G/4G ali Wifi, s telefonom poslušamo glasbo ali gledamo filme, igramo igre, telefon uporabljamo kot daljinec in še marsikaj. In prav vsak uporabnik je pri tem početju nekoliko samosvoj in drugačen. Samo kot zgled – nekateri telefonirajo 8 ur na dan, nekateri sploh ne, a zato napišejo po sto elektronskih sporočil.

Pri osebnih računalnikih (predvsem z operacijskim sistemom Windows) je to nekoliko lažje, zato so tam že dolgo na voljo specializirani programi (npr. Sysmark Mobilemark), ki z najbolj priljubljenimi programi (Microsoft Office, Adobe Photoshop ...) izvajajo nekatere operacije in merijo, koliko časa traja, da prenosni računalnik do konca iztroši svoj akumulator. Toda celo to je ocena in ne natančna meritev, saj uporabniki uporabljamo različne programe na različne načine in različno dolgo. Nekateri, recimo, samo brskajo po internetu, drugi več tipkajo, tretji gledajo videe po Youtubu.

Pri reviji Monitor so se merjenja varčnosti tablic lotili z nenehnim predvajanjem video posnetka, a je to le bolj ali manj nenatančna ocena.



Slika 7.1.1: Primerjava akumulatorske zmogljivosti tablic – koliko ur je preizkušana tablica zmogla predvajati testni film. Vir: revija Monitor [52].

7.1.2 Hitrost

Oceniti hitrost nekega sistema je težava, ki je stara že toliko kot računalniki. Najmanj natančna oziroma v resnici popolnoma nenatančna ocena je primerjava frekvence delovanja procesorja. Pri isti frekvenci sta lahko dva procesorja različnih arhitektur popolnoma različno hitra, ker ukaze izvajata popolnoma drugače. Na hitrost vpliva stopnja paralelizma v procesorju, »inteligentnost« procesorja (predvidevanje vejitve ...), način izvajanja ukazov (mikrooperacije ali strojna izvedba) in še marsikaj.

Boljša rešitev je meritev hitrosti izvajanja nekega algoritma, po možnosti takega, ki dobro uporabi vse dele procesorja (celoštevilčni, del za plavajočo vejico ...). Tak test npr. ima SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation). Kljub temu je **SPEC CPU 2006** (<http://www.spec.org/cpu2006/>) le sintetičen test, ki o hitrosti, ki je deležen uporabnik pri svojem delu, ne pove prav veliko. Uporabniki pač uporabljajo druge programe in ne SPEC CPU 2006. Poleg tega še vedno veljajo iste težave, ki sem jih navedel pri oceni varčnosti – različni uporabniki počnejo različne stvari različno časa.

Za diplomsko nalogo sem namesto testnih programov SPEC, ki so že nekoliko zastareli, raje izbral podobno sintetičen test **Geekbench 3** (<http://www.primatelabs.com/geekbench>), ki se je v zadnjem času uveljavil kot eden ključnih testov, s katerim se meri hitrost telefonov in tablic. Razlog za to je, da so ga avtorji prevedli in ga prodajajo tako za sisteme Android in Apple iOS kot tudi za

Windows, OSX in celo Linux. Geekbench je sestavljen iz več testov, ki so vsi po vrsti tudi večnitni in vsebujejo podporo 64-bitnim procesorjem. Primerja hitrost delovanja celoštevilčne aritmetike (algoritmi blowfish, bzip2, stiskanje bitnih slik s knjižnico libjpeg), aritmetike s plavajočo vejico (mandelbrot, filtri za ostrenje bitne slike ...), hitrost dela s pomnilnikom (branje/pisanje registrov v pomnilnik/iz njega, branje/pisanje pomnilnika s funkcijami knjižnice stdlib) in hitrost dela nad tokom podatkov (stream).

Realnejša rešitev za merjenje hitrosti nekega sistema (ne pa tudi samo procesorja) bi bil sintetičen testni program, ki vsaj delno »počne« nekaj podobnega kot uporabnik. Zgled je testni program **Sunspider** (<http://www.webkit.org/perf/sunspider/sunspider.html>), ki meri hitrost izvajanja Javascripta v spletnem brskalniku. To načeloma pomeni, da so rezultati bolj ali manj primerljivi na različnih platformah. Ker se Javascript uporablja za bogate spletne strani, kot sta Gmail ali Facebook, lahko primerjalna ocena hitrosti v Sunspiderju načeloma pokaže razlike v hitrosti, ki bi jih pri delu z Gmailom in Facebookom občutil tudi uporabnik. Res pa je, da Javascript ne podpira večnitnosti, zato večjedrni procesorji v njem nimajo prednosti.

Podoben merilni program je **Browsermark** (<http://browsermark.rightware.com/>), ki deluje kot spletna aplikacija in meri, kako hitro spletni brskalnik opravi določena opravila. Zato so rezultati načeloma primerljivi med različnimi platformami, od osebnih računalnikov do telefonov. V diplomski nalogi ga nisem uporabil, saj je rezultat, ki ga program vrne, precej odvisen tudi od hitrosti grafičnega podsistema.

Še boljša rešitev za oceno hitrosti sistema bi bil testni program, ki bi poskušal posnemati realno delo »povprečnega« uporabnika telefona ali tablice, podobno kot počne program **Sysmark** (<http://bapco.com/products/sysmark-2012>) na osebnih računalnikih z Windows. Slednji v nekakšnem makru izvaja različne operacije s programi MS Office, Adobe Photoshop, Adobe Indesign in še nekaterimi, med delovanjem pa meri čas delovanja celotnega postopka in s tem izmeri hitrost celotnega sistema. Žal takega ali podobnega programa za mobilne naprave ni.

7.1.3 Programska oprema

Pri meritvah hitrosti je seveda zelo pomembna (kar se da enaka) programska oprema, ki teče pod samim testnim programom – operacijski sistem in brskalnik, če je govor o izvajanju Javascripta. Ker se v diplomski nalogi držim primerjave ARM-ovih in Intelovih procesorjev oz. sistemov SoC, je edina logična izbira za test operacijski sistem Android, ki ga je Intel z Googlovo pomočjo priredil tudi za delovanje na Intelovih procesorjih x86 (v osnovi je Android nastal na procesorjih ARM[53]) Če bi bili zelo natančni, bi se seveda lahko spotaknili tudi ob morebitno (ne)optimiziranost dokaj nove različice za x86 in še kaj, a če se preizkušanja lotimo s stališča uporabnika, je tak pomislek odveč – uporabnik bo pač uporabil tisto, kar je trenutno na trgu, optimizirano ali pa ne.

Še majhna niša je, ki bi teoretično omogočila primerjavo hitrosti sistema na procesorju ARM in x86 – Googlovi prenosniki Chromebook. Žal so bili le nekateri izmed prvih modelov narejeni na podlagi Intelovih procesorjev, današnji modeli vsi tečejo s procesorji ARM.

7.1.4 Strojna oprema

Ključni problem ocenjevanja mobilnih procesorjev in sistemov SoC je seveda zelo raznolika strojna oprema, ki je nameščena »okoli« procesorjev. Od sestavnih delov SoC do pomnilnika in vodil.

Sistemi SoCi v različnih telefonih se lahko razlikujejo po podrazličicah (vsebujejo tudi omrežni del, GPS ali še kaj), to pa se lahko na hitrosti pozna ali pa tudi ne. Vsekakor pa se poznajo razlike v frekvencah delovanja in v nizkonivojskih nastavitvah načina višanja in nižanja frekvenc (koraki, t. i. »governer«). Zelo se poznajo tudi razlike v dodatni strojni opremi, kot so predpomnilniki, pa v izvedbi in hitrosti glavnega pomnilnika ter še kaj.

Pri izvedbi diplomskega dela sem se postavil na stališče uporabnika, ki ga načeloma ne zanima (in tudi ne ve), kakšna strojna oprema je v okolici procesorja, ki je v njegovem telefonu ali tablici, zanima ga le njegova uporabniška izkušnja. Ali je njegov telefon/tablica dovolj hiter ali ne.

7.2 Zasnova meritev

Osnova meritev je že prej omenjeni program Geekbench, s katerim sem želel primerjati hitrosti procesorjev ARM in Intel Atom v modernih telefonih in tablicah. Zaradi primerjave sem med preizkušane dodal tudi starejši mini prenosnik (t. i. »netbook«) s procesorjem Atom N270 in dva računalnika s procesorji Core. Eden je danes povprečen model i5 za prenosnike, drugi pa vrhunski šestjedrni i7 za delovne postaje. Zaradi širine primerjave so operacijski sistemi, na katerih sem poganjal testni program, različni.

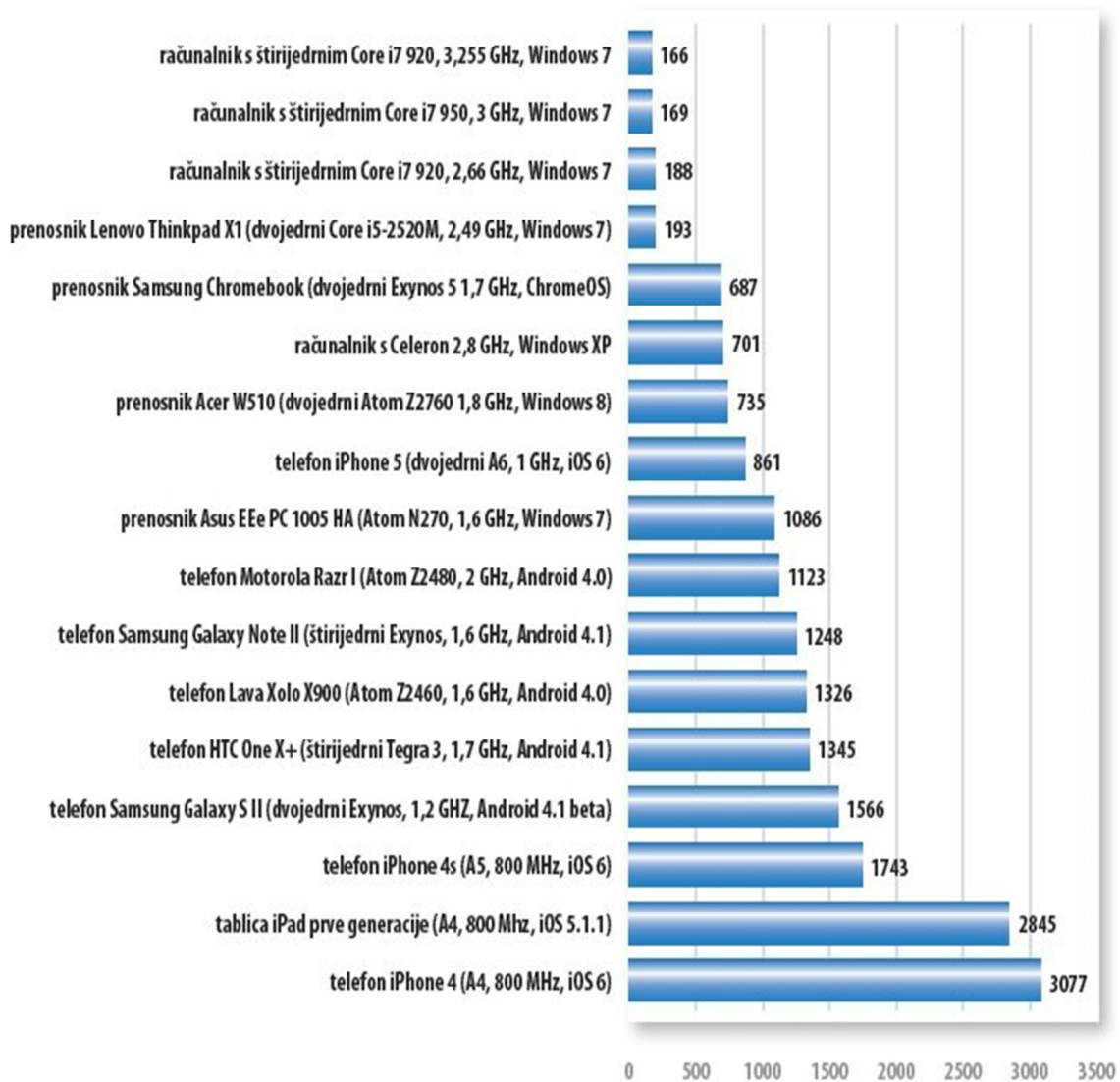
Lotil sem se tudi preizkušanja s spletnim merilnim programom **Sunspider** (<http://www.webkit.org/perf/sunspider/sunspider.html>). Tega sem zastavil nekoliko širše in preskočil okvir procesorjev na mobilnih telefonih/tablicah. Tudi za potrebe članka v reviji Monitor me je namreč zanimalo, kako se današnji mobilni telefoni in tablice hitrostno obnesejo v primerjavi z današnjimi osebnimi računalniki in osebnimi računalniki, starimi nekaj let. V ta namen sem poleg nekaj novih in starih osebnih računalnikov za primerjavo hitrosti zbral nekaj mobilnih telefonov Android s sistemi ARM, dva telefona Android s procesorji Intel Atom, Appleove telefone in tablice, starejši »netbook« s procesorjem Atom, tablico Windows 8 s procesorjem Atom in Googlov Chromebook s procesorjem ARM.

Na vseh sistemih sem test Sunspider izvajal v zadnjem brskalniku Google Chrome, razen na Applovih napravah, kjer se je Chrome izkazal kot zelo počasen, zato sem tam uporabil vgrajeni Safari. Vrednosti za Apple zato, strogo gledano, niso relevantne, čeprav z uporabniškega stališča so.

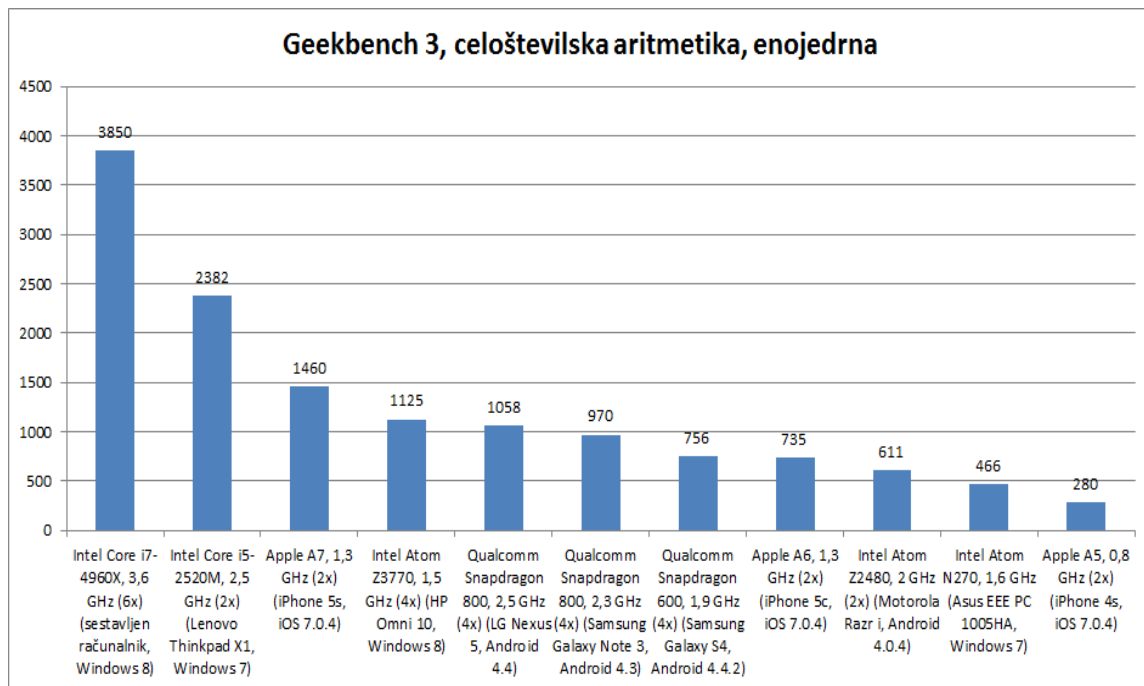
7.3 Rezultati

Ker sodobni testni programi vedno izpišejo rezultate, ki nekoliko »nihajo«, sem vsako meritev izvedel petkrat, nato pa najslabšo in najboljšo zbrisal. Iz preostalih treh sem izračunal povprečje. Take povprečne rezultate meritev sem predstavil v spodnjih grafikonih.

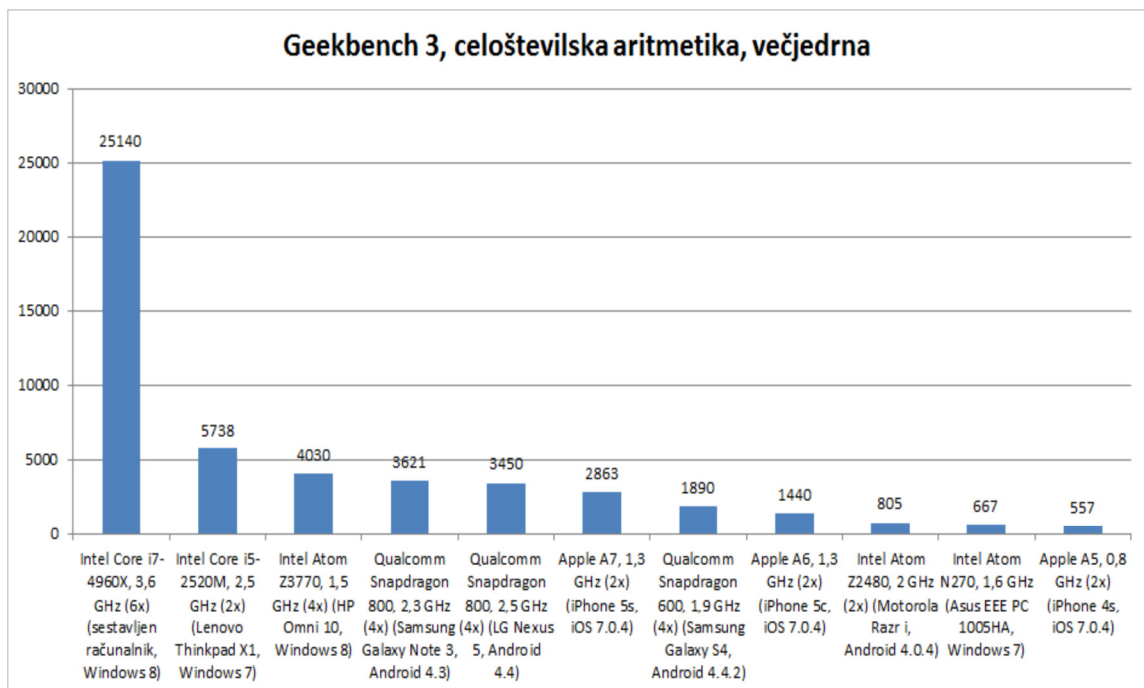
Ker sem meritve v programu Sunspider izvajal v drugem časovnem obdobju, testni telefoni, tablice in računalniki niso enaki onim, ki sem jih uporabljal pri meritvah z Geekbenchem.



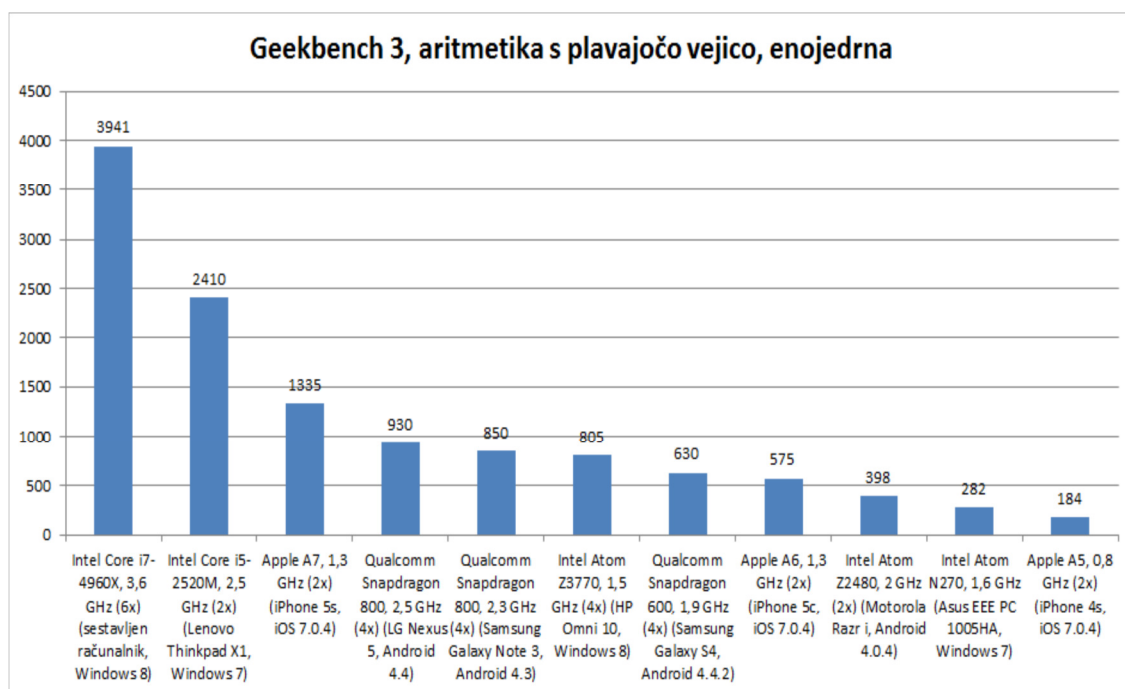
Slika 7.2: Primerjava hitrosti različnih sistemov v testnem programu Sunspider. Manj je bolje. Vir: Lastne meritve, objavljeno tudi v reviji Monitor [33].



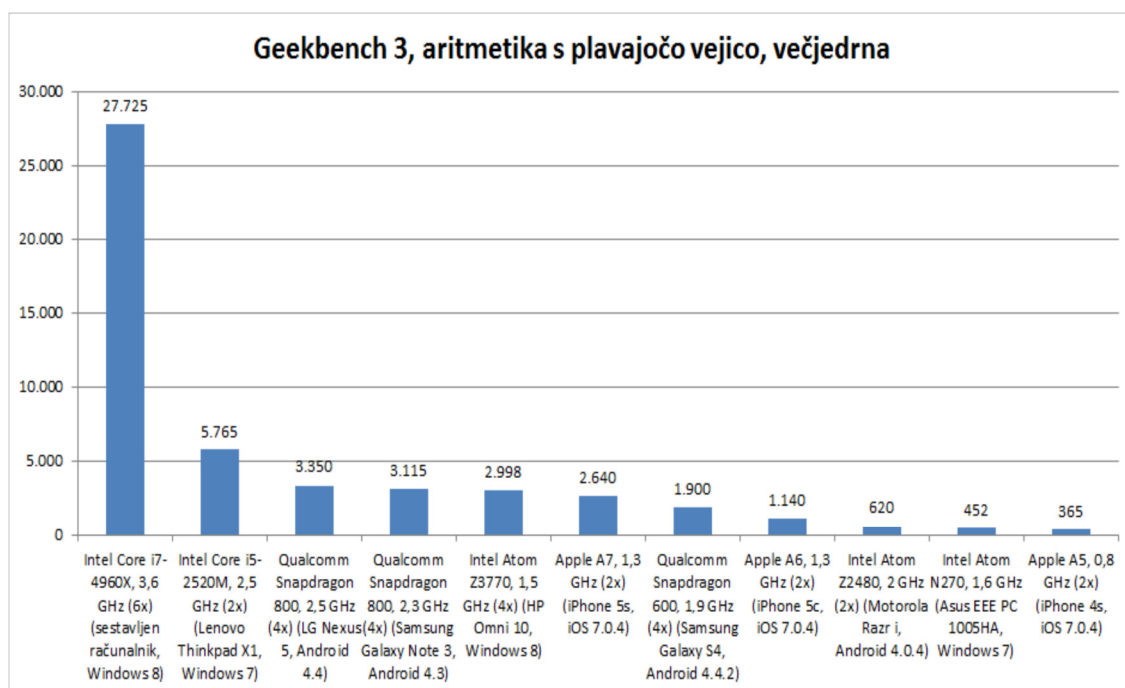
Slika 7.3; Meritve hitrosti celoštevilčne aritmetike za samo eno jedro. Rezultat so točke, več je bolje.



Slika 7.4 Meritve hitrosti celoštevilčne aritmetike za več jeder. Rezultat so točke, več je bolje.



Slika 7.5; Meritve hitrosti aritmetike s plavajočo vejico za samo eno jedro. Rezultat so točke, več je bolje.



Slika 7.6; Meritve hitrosti aritmetike s plavajočo vejico za več jeder. Rezultat so točke, več je bolje.

7.4 Obrazložitev rezultatov

Iz meritev, ki sem jih izvedel, je očitno, da je hitrost različnih procesorjev v neposredni povezavi z varčnostjo. Procesorji Intel Core i5 in i7, ki so namenjeni osebnim računalnikom in jih lahko hladimo tudi aktivno (z ventilatorji in celo vodno) in večinoma ne delujejo na akumulatorje, nimajo omejitev, ki se jih morajo držati procesorji Atom in ARM, namenjeni pametnim telefonom in tablicam. Največja poraba vrhunskega procesorja Core i7 4960X je tako polnih 130 W, vendar zato vsebuje kar šest jeder s frekvenco 3,6 GHz, vsako jedro pa premore še 64 KB prvonivojskega in 256 KB drugonivojskega predpomnilnika, celoten procesor pa še kar 15 MB tretjenivojskega predpomnilnika [54]. Procesor je od najhitrejšega mobilnega procesorja kar šestkrat hitrejši pri delu s celimi števili in celo osemkrat pri delu s plavajočo vejico! Tudi če se omejimo le na eno samo jedro, je prednost od tri- do štirikratna.

Med mobilnimi procesorji je očitno, da je Intel z novo generacijo procesorjev Atom (Z3770) hitrostno ujel do nedavna najhitrejšo procesorje iz tabora ARM. Če se omejimo na enojedro hitrost, ki je pri delu s pametnimi telefoni in tablicami ključna, je Intelov SoC celo najhitrejši, a je nujno opomniti, da gre pri modelu Z3770 za SoC, ki ga Intel namenja zgolj tablicam in ga odsvetuje za rabo v pametnih telefonih. To pomeni, da ima za slednje previsoko porabo. In seveda – omeniti je treba najnovejši Applov SoC A7, ki po hitrosti krepko odstopa od drugih mobilnih procesorjev. Še posebej bije v oči, da je A7 daleč najhitrejši, kljub temu da deluje pri razmeroma nizki delovni frekvenci (1,3 GHz). Ocenjujem, da je to prednost še najbolj pridobil s tretjenivojskim predpomnilnikom, ki je velik 4 MB, a je v telefonu iPhone 5s nameščen v ločenem vezju [55]. Zato se velika večina ukazov dovolj majhnih programov (kar testni program Geekbench gotovo je) izvaja v hitrem predpomnilniku in ne v počasnejšem pomnilniku. Opozoriti sicer velja, da ima A7 le dve jedri in je zato pri večjedrnih meritvah dokaj na repu meritev.

Očiten je tudi korenit napredek v hitrosti mobilnih procesorjev, saj so nekaj let stari procesorji Atom, ki še danes poganjajo nekdanje mini prenosnike (»netbooke«), pri izvajanju celoštevilčne aritmetike dvakrat in pri izvajanju aritmetike s plavajočo vejico štirikrat počasnejši od današnjih procesorjev Atom. Še večji je napredek Applovih procesorjev, saj so procesorji v dveh letih (iPhone 4s s procesorjem A5 je bil predstavljen konec leta 2011) napredovali kar za petkrat v celoštevilčni in za sedemkrat v aritmetiki s plavajočo vejico!

8. poglavje

8 Sklepne ugotovitve

Izdelava procesorjev za mobilne naprave je vedno kompromis med zmogljivostjo in energijsko potratnostjo, le da se ga Intel in ARM lotevata z nasprotnih začetnih položajev. Intel izdeluje vrhunske procesorje za osebne računalnike, delovne postaje in strežnike, a v zadnjem času vedno več energije vlaga v energijsko varčne različice procesorjev Atom. ARM pa po drugi strani izdeluje izredno varčne procesorje (oz. procesorske arhitekture) in jih v zadnjem času nadgrajuje z naprednimi zmogljivostmi, tako da že postajajo dovolj hitri celo za uporabo v strežnikih.

Osnova za procesorje, ki so dovolj varčni za pametne telefone in tablice, je dovolj konservativna arhitektura (krajši cevovodi, zaporedno izvajanje ukazov). Napredna arhitektura sicer nekoliko pohitri delovanje, a tudi krepko poveča porabo električne energije, to pa je v varčnih napravah nevzdržno. Dodaten strojni korak k varčnosti je izdelava procesorjev z več jedri, čeprav se slednje kot prednost izkaže večinoma le v teoriji in pri sintetičnih testih. Testni programi, kot je v tej diplomski nalogi uporabljeni GeekBench, sicer znajo uporabiti vsa jedra, aplikacije v realnem svetu pa večinoma ne, zato na enojedrnem, dvojedrnem ali celo štirijedrnem procesorju tečejo približno enako hitro. Žal testnih programov, ki bi numerično potrdili to »opisno« izkušnjo uporabnika pametnega telefona, ni.

Kot je razvidno iz meritev, ki sem jih izvedel, so najnovejši štirijedrni Intelovi procesorji Atom (z arhitekturo »Baytrail«) hitrostno že ujeli najhitrejše procesorje ARM predzadnje generacije (Qualcomm Snapdragon 800), a jih zaradi previsoke porabe energije Intel še ne namenja vgradnji v pametne telefone. To mi je v osebnem pogovoru potrdil tudi Intelov predstavnik za Slovenijo. Trenutno jih je najti le v nekaterih redkih tablicah z Windows 8. Po drugi strani Applov procesor A7, ki temelji na zadnji arhitekturi ARMv8 (in mu pomaga tudi zelo velik predpomnilnik), hitrostno daleč odstopa, tako od drugih procesorjev ARM kot od procesorjev Intel Atom.

Trenutno stanje kaže, da Intel v svojem arzenalu še vedno nima procesorja, ki bi ga izdelovalci telefonov in tablic z veseljem zgrabili in z njim nadomestili procesorje ARM. Da bi se to zgodilo, bi morali biti njegovi procesorji Atom veliko hitrejši in vsaj enako varčni kot procesorji iz tabora ARM, trenutno pa se lahko kosajo le s predzadnjo različico slednjih.

9 Slike

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 3.1: Intel Atom S1200. Vir: Intel [19]..... | 7 |
| Slika 3.2: Arhitektura NetBurst, ki je bila uporabljena v procesorjih Pentium 4, se je zaradi zelo dolgih cevovodov (celo 31 stopenj) izkazala za energetske zelo potratno, zato jo je nadomestila varčnejša arhitektura Core. Vir: Intel [20]..... | 8 |
| Slika 3.3: Apple A5, eden izmed sistemov SoC, ki temeljijo na arhitekturi ARM. Vir: Anandtech [27]. | 10 |
| Slika 3.4: Meritve porabe neposredno na vezju telefona/tablice kažejo, da procesor ARM Cortex-A15 (Exynos 5250) med delom potrebuje nekajkrat več energije kot starejši procesorji ARM in Intel Atom. Vir: Anandtech [30]..... | 11 |
| Slika 4.1: Blok diagram SoC na podlagi ARM - ARM CoreLink system IP. Vir: ARM [31]..... | 13 |
| Slika 4.2: Procesor, ki podpira Hyperthreading, ima dva logična procesorja z lastnima naboroma večine registrov. Vir: Intel [20] | 16 |
| Slika 5.1.: Telefoni z operacijskim sistemom Android vgrajeni procesor po potrebi poganjajo z različnimi frekvencami. Kot je videti, je pri procesorjih ARM na voljo precej več procesorskih stanj kot pri Intelovem procesorju Atom. Levo – Nexus 4, Qualcomm Snapdragon S4 Pro, 1,5 GHz, desno – Lava Xolo X900, Intel Atom Z2460, 1,6 GHz. Na varčnost telefona to ne vpliva. | 20 |
| Slika 6.1: Poraba značilnega prenosnika v mirovanju s procesorjem Intel Core i5 (2520M) je okoli 11 W. To je veliko več od porabe povprečnega pametnega telefona ob polni rabi. | 21 |
| Slika 6.2: Toplota, ki jo je bilo treba odvajati s površine procesorja, se je v času enojedrnih procesorjev nevzdržno večala. Vir: Intel | 23 |
| Slika 6.3: Energijo, ki je potrebna za delovanje procesorja, je moč zmanjšati z večjedrnim sistemom. Vir: Vishwani D. Agrawal, Auburn University..... | 23 |
| Slika 6.4: Intel Xeon Phi, matematični koprocesor z največ 61 jedri. Vir: Intel [47]. ... | 24 |
| Slika 7.1.1: Primerjava akumulatorske zmogljivosti tablic – koliko ur je preizkušana tablica zmogla predvajati testni film. Vir: revija Monitor [52]. | 28 |
| Slika 7.2: Primerjava hitrosti različnih sistemov v testnem programu Sunspider. Manj je bolje. Vir: Lastne meritve, objavljeno tudi v reviji Monitor [33]..... | 31 |
| Slika 7.3; Meritve hitrosti celoštevilčne aritmetike za samo eno jedro. Rezultat so točke, več je bolje. | 32 |
| Slika 7.4 Meritve hitrosti celoštevilčne aritmetike za več jeder. Rezultat so točke, več je bolje. | 32 |
| Slika 7.5; Meritve hitrosti aritmetike s plavajočo vejico za samo eno jedro. Rezultat so točke, več je bolje. | 33 |

Slika 7.6; Meritve hitrosti aritmetike s plavajočo vejico za več jeder. Rezultat so točke, več je bolje. 33

10 Tabele

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1; Arhitekture in družine procesorjev ARM. Vir: ARM..... | 5 |
| Tabela 4.1;; Ocenjene hitrosti današnjih grafičnih vmesnikov v primerjavi z eno starejšo in eno moderno grafično kartico za namizne računalnike. Vir: revija Monitor [34]..... | 14 |
| Tabela 4.2; Nekaj najpogostejših sistemov SoC na podlagi ARM. Vir: spletne strani izdelovalcev | 15 |
| Tabela 4.3; Ključni sistemi SoC na podlagi Intel Atom. Vir: Intel | 17 |

11 Viri

- [1] Top 500 Supercomputer sites. <http://www.top500.org/>
- [2] (2011, Feb.) Worldwide PC Microprocessor Unit Shipments Flat. <http://www.idc.com/about/viewpressrelease.jsp?containerId=prUS22708211>
- [3] Intel Atom Processor for Smartphone and Tablet. <http://ark.intel.com/products/family/70095>
- [4] (2013, Oct.) Applied Micro X-Gene ARMv8 64-bit server showcased at Red Hat Summit. <http://community.arm.com/groups/processors/blog/2013/10/09/applied-micro-x-gene-armv8-64-bit-server-showcased-at-red-hat-summit>
- [5] The Story of the Intel® 4004. <http://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-story-of-intel-4004.html>
- [6] (2013, Sep.) New Intel Mobile Products, Initiatives to Simplify, Accelerate Developer Innovation. http://newsroom.intel.com/community/intel_newsroom/blog/2013/09/11/new-intel-mobile-products-initiatives-to-simplify-accelerate-developer-innovation
- [7] (1985, July) 8088, 8-bit HMOS microprocessor, data sheet. <http://www.datasheetarchive.com/dl/Scans-002/Scans-0047756.pdf>
- [8] Anand Lal Shimpi. AnandTech CPU Bench. <http://www.anandtech.com/bench/CPU/44>
- [9] (2005, June) Apple to Use Intel Microprocessors Beginning in 2006. <http://www.apple.com/pr/library/2005/06/06Apple-to-Use-Intel-Microprocessors-Beginning-in-2006.html>
- [10] Systems based on IBM POWER. <http://www-03.ibm.com/systems/hardware/browse/power/>
- [11] R. Islam, Intel Corp, A. Sabbavarapu, and R. Patel, "Power reduction schemes in next generation Intel® ATOM™ processor based sOc for handheld applications," in *VLSI Circuits (VLSIC), 2010 IEEE Symposium*, June 2010, pp. 173 - 174. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5560308&abstractAccess=no&userType=>
- [12] Anand Lal Shimpi. (2008, Apr.) Intel's Atom Architecture: The Journey Begins. <http://www.anandtech.com/show/2493/4>
- [13] Jonathan Dorn Michelle McDaniel. University of Virginia. http://www.cs.virginia.edu/~skadron/cs8535_s11/Intel_Atom.pdf
- [14] Apple Newton MessagePad. <http://www.computinghistory.org.uk/det/4021/Apple-Newton-MessagePad/>
- [15] ARM Holdings plcQ4 2011 Results. <http://phx.corporate-ir.net/External.File?item=UGFyZW50SUQ9OTE4Mjd8Q2hpbGRJRDR0tMXxUeXBIPtM=&t=1>
- [16] ARMv8-A Architecture. <http://www.arm.com/products/processors/armv8-architecture.php>
- [17] ARM, *ARM® Architecture Reference Manual, ARMv8, for ARMv8-A architecture profile*.

- [18] ARM John Goodacre. (2013, Nov.) The Evolution of the ARM Architecture Towards Big Data and the Data-Centre. <http://virtical.upv.es/pub/sc13.pdf>
- [19] Intel. <http://newsroom.intel.com/servlet/JiveServlet/showImage/2771/AtomS1200chip1.jpg>
- [20] Intel, *Intel 64 and IA-32 Architectures*.: Intel.
- [21] Anand lal Shimpi. Anandtech. <http://www.anandtech.com/show/6936/intels-silvermont-architecture-revealed-getting-serious-about-mobile/2>
- [22] Intel Atom™ Processor N270. <http://ark.intel.com/products/spec/SLB73>
- [23] Mobile Intel 945GSE Express Chipset. <http://ark.intel.com/products/36549/Intel-82945GSE-Graphics-and-Memory-Controller>
- [24] Intel 945GC Express Chipset. <http://ark.intel.com/products/34505/Intel-82945GC-Graphics-and-Memory-Controller>
- [25] Intel Atom Processor N450. <http://ark.intel.com/products/42503/>
- [26] Anshel Sag. (2013, June) Bright side of news. <http://www.brightsideofnews.com/news/2013/6/22/qualcomm-snapdragon-800-benchmarking-day.aspx>
- [27] Anandtech. <http://images.anandtech.com/doci/4971/AppleA5.jpg>
- [28] ARM, *ARM Architecture Reference Manual, ARMv7-A and ARMv7-R edition*.
- [29] ARM Richard Grisenthwaite. Cortex A8 Processor. http://esd.et.ntust.edu.tw/downloads/2012_embeddedApplication/ARM%20Architecture%20RichardGrisenthwaite.pdf
- [30] Anand Lal Shimpi. Anandtech. <http://www.anandtech.com/show/6536/arm-vs-x86-the-real-showdown/9>
- [31] ARM. http://www.arm.com/images/CoreLink_500.jpg
- [32] Intel. Product Brief: Intel® Core i5 Processor with Intel® HD Graphics. <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/core/core-i5-brief.html>
- [33] Gašper Forjanič. (2013, Feb.) Mobilna moč. <http://www.monitor.si/clanek/mobilna-moc/125417/>
- [34] Gašper Forjanič, "Mobilna moč," *Monitor*, pp. 58-60, Feb. 2013.
- [35] (2012, Jan.) Intel Raises Bar on Smartphones, Tablets and Ultrabook Devices. http://newsroom.intel.com/community/intel_newsroom/blog/2012/01/10/intel-raises-bar-on-smartphones-tablets-and-ultrabook-devices
- [36] Intel. Intel Atom z3000 for android tablets. <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/atom/atom-z3000-android-tablets-brief.html?wapkw=android+atom+processor>
- [37] (2007, Jan.) All about System Power States (S0-S5). <http://software.intel.com/en-us/blogs/2007/01/10/all-about-system-power-states-s0-s5>
- [38] William Van Winkle. (2010, May) Meet Moorestown: Intel's Atom Platform For The Next 10 Billion Devices. <http://www.tomshardware.com/reviews/intel-atom-moorestown-smartphone,2624-7.html>
- [39] Nikilesh Balakrishnan. (2012, Aug.) EPCC, The University of Edinburgh. <http://www.epcc.ed.ac.uk/sites/default/files/Dissertations/2011-2012/Submission-1126390.pdf>
- [40] (2013, Sep.) Intel Atom Processor Z36xxx and Z37xxx Series Datasheet.

- <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/datasheets/atom-z36xxx-z37xxx-datasheet-vol-1.pdf>
- [41] Boris Šavc. (26. Mar.) Računalnik na brskalni pogon.
<http://www.monitor.si/clanek/racunalnik-na-brskalni-pogon/142242/>
- [42] Zhonghong Ou, Aalto Univ., Helsinki, Finland Dept. of Comput. Sci. & Eng., Bo Pang, Yang Deng, and J.K. Nurminen, "Energy- and Cost-Efficiency Analysis of ARM-Based Clusters," in *Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2012 12th IEEE/ACM International Symposium*, Ottawa, 2012, pp. 115 - 123.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6217412&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6217412
- [43] Luiz Marcos Garcia Gonçalves Rafael Vidal Aroca, "Towards green data centers: A comparison of x86 and ARM architectures power efficiency," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, pp. 1770 - 1780, Dec. 2012.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731512002122>
- [44] Adrian Kingsley-Hughes. (2012, June) Calxeda 5-watt Web server outshines Intel's Xeon CPU in power efficiency. <http://www.calxeda.com/news-item/calxeda-5-watt-web-server-outshines-intels-xeon-cpu-in-power-efficiency/>
- [45] Timothy Prickett Morgan. (2012, Aug.) Intel: Xeon breaks Calxeda's ARM in Apache benchmark.
http://www.theregister.co.uk/2012/08/13/xeon_vs_calxeda_arm_apache_bench/
- [46] (2009) The technology industry is headed for a meltdown, warns Intel's chief technology officer. <http://news.cnet.com/2009-1023-252033.html>
- [47] Intel. http://newsroom.intel.com/servlet/JiveServlet/showImage/38-5572-2661/Xeon_Phi_Family.jpg
- [48] NVIDIA Tegra MOBILE PROCESSORS. <http://www.nvidia.com/object/tegra-3-processor.html>
- [49] big.LITTLE Processing.
<http://www.arm.com/products/processors/technologies/biglittleprocessing.php>
- [50] Travis Lanier. Exploring the Design of the Cortex-A15 Processor.
http://www.arm.com/files/pdf/at-exploring_the_design_of_the_cortex-a15.pdf
- [51] Brad Molen. Samsung Galaxy S 4 with Exynos Octa-core: what's different?
<http://www.engadget.com/2013/05/06/samsung-galaxy-s4-octacore-review/>
- [52] Boris Šavc, "Prihodnost računalništva," *Monitor*, pp. 46-61, Nov. 2012.
- [53] (2011, Sep.) Intel and Google to Optimize Android Platform for Intel Architecture.
http://newsroom.intel.com/community/intel_newsroom/blog/2011/09/13/intel-and-google-to-optimize-android-platform-for-intel-architecture
- [54] Intel Core i7-4960X Processor Extreme Edition.
<http://ark.intel.com/products/77779>
- [55] Dick James. (2013, Oct.) Inside the Apple A7 from the iPhone 5s – Updated.
<https://www.chipworks.com/en/technical-competitive-analysis/resources/blog/inside-the-a7/>
- [56] Cortex-A9 processor power control.
<http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.ddi0388f/Chdejddj.html>
- [57] ARM. The V5TE ARM Instruction Set including DSP extensions.
<http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dvi0022a/ar01s02s1>

4.html

- [58] ARM. ARM1176JZF-S Technical Reference Manual. <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.ddi0301h/ch01s04s03.html>
- [59] ARM. ARM Processor Architecture. <http://www.arm.com/products/processors/instruction-set-architectures/index.php>
- [60] One laptop per child. <http://one.laptop.org/>
- [61] Jure Forstnerič. (2012, Apr.) Novi spopad. <http://www.monitor.si/clanek/novi-spopad2/125021/>