



M. Kovačić\*

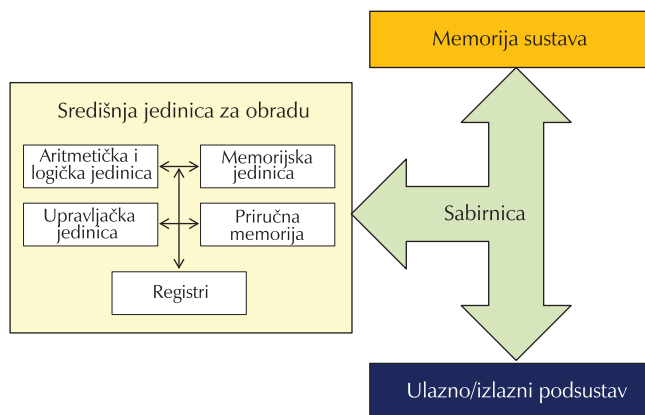
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije  
Sveučilišta u ZagrebuZavod za polimerno inženjerstvo i organsku  
kemijsku tehnologiju procesa, Savska cesta 16, 10 000 Zagreb

## Tiha revolucija u digitalnoj revoluciji

Izum mikroprocesora jedan je od najvažnijih iz druge polovice 20. stoljeća, ako ne i među najvažnijim inovacijama čovječanstva uopće. Mikroprocesor je omogućio strelovit tehnološki razvoj te je otvorio vrata nizu drugih inovacija i proizvoda koji su izravno i neizravno promijenili našu svakodnevicu. Današnja osobna računala, pametni telefoni, televizori, satovi i druga potrošačka elektronika oslanjaju se na brze, kompaktne i jeftine mikroprocesore, pri čemu se sve veći naglasak stavlja na energetske učinkovitost. Upravo potražnja za energetski učinkovitim te bržim mikroprocesorima na mala vrata uvodi tiha revoluciju u našu digitalnu svakodnevicu, koju možda na prvu nećemo ni uočiti.

Za izum prvog komercijalnog mikroprocesora zaslužan je tim inženjera (Federico Faggin, Ted Hoff i Stanley Mazor) korporacije Intel, koji su sada već pomalo davne 1971. osmislili Intel 4004 mikroprocesor. Prva komercijalna primjena mikroprocesora bila je u digitalnom kalkulatoru.<sup>1</sup> Izum mikroprocesora značajan je zbog integriranja velikog broja pojedinačnih digitalnih krugova i funkcija u jednom cjelovitom čipu, čime se ostvaruje ne samo znatna ušteda u proizvodnji elektroničkih uređaja već se mogu i drastično poboljšati računске performanse. (Mikro)procesor u ulozu središnje jedinice računala za obradu (engl. *central processing unit*, CPU) računala predstavlja svojevrstan "mozak" računala, koji izvršava programe (softver) i upravlja drugim komponentama računala (hardver, sklopovlje). Mikroprocesor u ulozu središnje jedinice u računalu i drugim pametnim računalima možemo prikazati pojednostavljenom skicom na slici 1. S pojednostavljene sheme vidljivo je da mikroprocesor objedinjava niz funkcija u jedno pakiranje, što je nekoć zahtijevalo diskretne komponente. Nadalje, mikroprocesore možemo općenito kategorizirati s obzirom na njihovu "arhitekturu", odnosno logički okvir izvršavanja programskih naredbi te procedura kojim se upravlja komponentama mikroprocesora odnosno njegovim memorijskim registrom prikazanim ulazno-izlaznim sustavom, podatkovnim sabirnicama i sl. Nešto kasnije Intel je ponovno obilježio računalnu povijest predstavljanjem mikroprocesora 8086 (1978.), koji je upotrijebljen u epohalnom IBM PC-u, čime je daljnji razvoj osobnih računala neraskidivo vezan s tzv. x86 CISC (engl. *Complex Instruction Set Computer*) arhitekturom. Arhitekture mikroprocesora možemo podijeliti na tzv. RISC (engl. *Reduced Instruction Set Computer*) te prethodno spomenuti CISC.

RISC arhitekturu karakteriziraju kratke i fiksne instrukcije koje mikroprocesor može odraditi u jednom ciklusu, dok CISC ima složene instrukcije koje se često izvršavaju tijekom više ciklusa. Praktična posljedica toga je da programeri koji razvijaju softver za RISC mikroprocesore moraju pisati složenije programe u odnosu na CISC mikroprocesore, jer CISC zahtijeva manje opsežan programski kod za izvršavanje istih funkcija zato što su mnoge operacije već implementirane u instrukcije unutar mikroprocesora. Primjerice, u CISC arhitekturi množenje dviju varijabli u glavnoj memoriji može se izvesti pomoću jedne naredbe, pri čemu je potrebno specificirati lokacije množenika i množitelja u memoriji te lokaciju u memoriji za pohranu umnoška. Zatim upravljačka jedinica



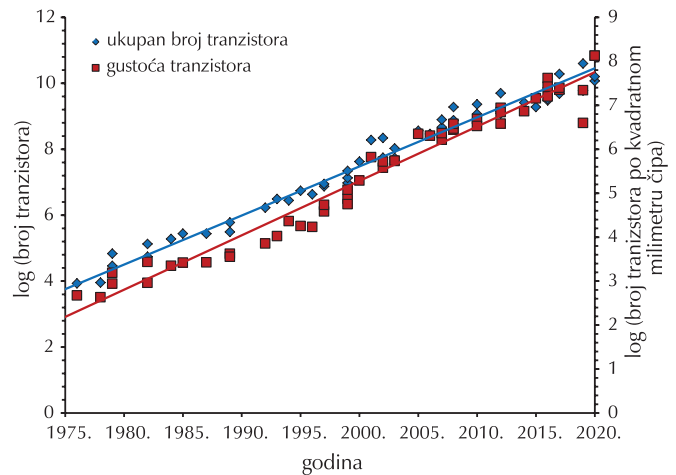
Slika 1 – Pojednostavljen prikaz ustrojstva računala s mikroprocesorom

CISC procesora razloži složenu naredbu na nekoliko pojedinačnih operacija, što je potrebno eksplicitno definirati RISC mikroprocesoru zasebnim naredbama. Primjerice, kod RISC mikroprocesora potrebno je zadati naredbu kojom se učitava množenik iz memorije i pohranjuje u registar mikroprocesora, zatim naredbu za učitavanje i pohranu množitelja u registar, naredbu za množenje dviju vrijednosti u registru te naredbu za pohranu vrijednosti umnoška u radnu memoriju. Iz prethodnog primjera razvidno je da jednostavan program množenja dvaju brojeva zahtijeva četiri naredbe za RISC, a svega jednu naredbu za CISC. Doduše, CISC procesor ne može tu operaciju izvesti u jednom taktu, već su mu također potrebna minimalno četiri takta da bi izvršio množenje. Prednost CISC arhitekture je potreba za manjim kapacitetom radne memorije za izvršenje programa, zato što mikroprocesor sam "interpretira" i izvodi dijelove programskog koda koji "nedostaju". Međutim, CISC procesori nauštrb jednostavnog programa zahtijevaju dodatno sklopovlje u upravljačkoj jedinici koje razlučuje i interpretira složene instrukcije. Stoga se pred upravljačku jedinicu CISC procesora postavlja teži zadatak, što rezultira nužno većim brojem potrebnih tranzistora i većim potrebnim radnim taktom u odnosu na RISC arhitekturu da bi se ostvarile slične računске performanse.<sup>2</sup> No budući da je radna memorija bila svojedobno izrazito skupa, računala temeljena na CISC arhitekturi bila su konkurentnija na tržištu jer su se programi mogli izvršavati s manje ugrađene radne memorije. Nekoć se radilo o vrlo izraženim uštedama, jer su se cijene radne memorije kretale oko nekoliko tisuća USD po megabajtu, dok su danas cijene manje od centa po megabajtu.<sup>3</sup> IBM-ovi umotvorci PC-a u kasnijim intervjuima obrazložili su i druge razloge odabira Intelova rješenja, poput tadašnje zrelosti Intelove tehnologije, dostupnosti odgovarajućeg softvera te boljih performansi u odnosu na tadašnja rješenja.<sup>4</sup> Međutim, IBM-ov odabir zacrtao je smjer daljnjeg razvoja osobnih računala, s obzirom na to da su mikroprocesori u novijim generacijama osobnih računala i sličnih računala (engl. *IBM PC compatible*) uvelike zadržali kompatibilnost s prethodnim generacijama mikroprocesora a, naravno, s godinama su dodavane nove instrukcije u x86 arhitekturu koje su je osuvremenile i uskladile s zahtjevima vremena. Budući da je radna memorija postajala je sve jeftinija,

\* Doc. dr. sc. Marin Kovačić  
e-pošta: [mkovacic@fkit.hr](mailto:mkovacic@fkit.hr)

ta konkurentna prednost CISC-a nad RISC-om uvelike je nestala, a dodatni zahtjevi postavljeni pred upravljačku jedinicu postali su sve veći kako je rastao broj tranzistora mikroprocesora te kako su dodavane nove instrukcije. Važna posljedica toga danas je veća specifična potrošnja električne energije x86 arhitekture.<sup>2</sup> Stoga ne iznenađuje što prijenosni uređaji, poput pametnih telefona, satova, tableta te drugih kojima je energetska učinkovitost ključna, danas rabe gotovo isključivo RISC, odnosno ARM (engl. *Advanced RISC Machines*, ARM) mikroprocesore. Ogromna potražnja za takvim uređajima rezultirala je izrazito velikom potražnjom za ARM mikroprocesorima, pri čemu je u posljednjem kvartalu 2020. isporučeno gotovo 7 milijardi ARM mikroprocesora, a procijenjena vrijednost tržišta RISC procesora već višestruko nadmašuje vrijednost tržišta CISC (x86) procesora.<sup>5,6</sup> Doduše, primat na tržištu računala, uključujući poslužitelje, i dalje imaju x86, odnosno noviji x86-64 (64-bitni) mikroprocesori. Međutim, ARM ozbiljno prijeti i tom tržištu zahvaljujući svojoj energetske učinkovitosti, koja postaje sve važniji čimbenik i u segmentu fiksnih računala, a osobito u domeni poslužitelj u podatkovnim centrima. Općeniti porast internetskog prometa te sve veća potražnja za tzv. *cloud*-uslugama zahtijeva sve veće kapacitete podatkovnih centara. Procjenjuje se da mrežni podatkovni promet raste eksponencijalno, pri čemu je u razdoblju od 2007. do 2017. godišnji svjetski podatkovni promet porastao s  $5 \cdot 10^{10}$  gigabajta na  $1.1 \cdot 10^{12}$  gigabajta. Podatkovni centri, odnosno *data*-centri centralizirani su objekti u kojima su smješteni poslužitelji, mrežna i prateća oprema za potrebe pružanja *cloud*-usluga, vođenje baza podataka te poslovnih aplikacija neposredno su odgovorni za znatne emisije stakleničkih plinova. Procjenjuje se da su podatkovni centri u svijetu odgovorni za više od 200 TWh potrošnje električne energije godišnje. Usporedbe radi, potrošnja električne energije u Republici Hrvatskoj kreće se oko 19 TWh.<sup>7,8</sup> Trenutačno su podatkovni centri odgovorni za oko 0,3 % svih emisija ugljikova dioksida, a cijeli ICT sektor oko 2 % globalnih emisija, što ICT svrstava rame uz rame emisijama iz zračnog prijevoza.<sup>7</sup> Stoga ne čudi što informatička industrija pod pritiscima utjecaja na okoliš sve veću pozornost usmjerava ka energetski učinkovitim ARM mikroprocesorima. Primjerice, trenutačno najbrže superračunalo na svijetu, japanski "Fugaku", rabi više od 150 000 ARM mikroprocesora, a ujedno je svrstan i u top 10 energetski najučinkovitijih superračunala.<sup>9,10</sup> Do prije nekoliko godina ARM mikroprocesori bili su rezervirani isključivo za primjenu u pametnim telefonima, tabletima i televizorima. Štoviše, problem energetske učinkovitosti postaje sve važniji imajući na umu da se proizvođači mikroprocesora približavaju fizičkoj granici moguće daljnje minijaturizacije tranzistora, odnosno u bliskoj budućnosti neće biti moguće na istoj površini silicija proizvesti znatno veću količinu tranzistora, kao što je to bio trend do sada (slika 2).<sup>11</sup>

Dosadašnji trend minijaturizacije tranzistora pozitivno se odrazio i na energetske učinkovitost, pri čemu su mikroprocesori s manjim tranzistorima energetski učinkovitiji od onih s većim tranzistorima. Najnovije generacije mikroprocesora već se proizvode s debljinom poluvodičkih elemenata od 5 nm. Za proizvodnju takvih i manjih tranzistora, potrebni su izvori kratkovalnog vakuum ultraljubičastog zračenja ( $\lambda = 13,5 \cdot 10^{-9}$  m), što izrazito poskupljuje proizvodnju mikroprocesora. Izgledno je da će daljnje smanjenje proizvodnog procesa tranzistora rezultirati povećanjem cijene mikroprocesora, obrnuto od dosadašnjih trendova.<sup>12</sup> Stoga je izgledno da će u skoroj budućnosti povećanje energetske učinkovitosti arhitektura biti u fokusu proizvođača mikroprocesora, a možemo očekivati da će ARM postupno zauzimati i sve veći udio u tržištu poslužitelja te osobnih računala zbog svoje energetske učinkovitosti. U prilog tome ide i prošlogodišnja Appleova najava prelaska s Intelovih x86-64 mikroprocesora na ARM, odnosno ARM64, što ukazuje na potencijalni budući širi trend prelaska proizvođača osobnih računala na ARM arhitekturu. Takvo što prije desetak godina bilo je gotovo nezamislivo, jer je Microsoft kao uvjerljivo najzastupljeniji proizvođač operativnih sustava na svijetu uvelike omogućio dominaciju x86 pa i x86-



Slika 2 – Prikaz ovisnosti broja tranzistora i "gustoće" tranzistora po jedinici površini čipa. Podatci preuzeti s [https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count).

64 arhitektura na tržištu osobnih računala. Međutim, situacija se počela mijenjati 2017. godine kad je Microsoft najavio podršku za ARM64, pri čemu su razvili tzv. x86 emulator za aktualni Windows 10, odnosno softver koji omogućava izvršavanje programa za CISC procesore na RISC platformi.<sup>13</sup>

Uspješna emulacija x86-64 mogla bi poljuljati hegemoniju na tržištu osobnih računala, pri čemu se krajnjim korisnicima ne bi uskratila funkcionalnost softvera koji upotrebljavaju, a pružila se mogućnost nabavke energetski učinkovitijih računala. Stoga u bliskoj budućnosti možemo očekivati daljnju integraciju te brisanje granica između pametnih telefona, tableta, televizora i osobnih računala. Međutim, nepovoljni ekološki učinci života u "oblaku" (*cloud*) postat će vjerojatno sve izraženiji tijekom ovog desetljeća, za što informatički sektor još nema odgovarajuće rješenje.

## Literatura

- URL: <https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/chip-hall-of-fame-intel-4004-microprocessor> (19. 4. 2021.).
- R. Vidal Aroca, L. M. Garcia Gonçalves, Towards green data centers: A comparison of x86 and ARM architectures power efficiency, *J. Parallel Distr. Com.* 72 (2012) 1770–1780, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.08.005>.
- URL: <https://jcm.it.net/memoryprice.htm> (19. 4. 2021.).
- URL: <https://uk.pcmag.com/opinion/111756/why-the-ibm-pc-used-an-intel-8088> (19. 4. 2021.).
- URL: <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/arm-ecosystem-ships-a-record-6-7-billion-arm-based-chips-in-the-final-quarter-of-2020/> (19. 4. 2021.).
- URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microprocessor-market> (19. 4. 2021.).
- URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y> (19. 4. 2021.).
- URL: [https://www.hera.hr/hr/docs/HERA\\_izvjesce\\_2018.pdf](https://www.hera.hr/hr/docs/HERA_izvjesce_2018.pdf) (19. 4. 2021.).
- URL: <https://www.arm.com/blogs/blueprint/fujitsu-a64fx-arm> (19. 4. 2021.).
- URL: <https://www.top500.org/lists/green500/2020/11/> (2. 4. 2021.).
- URL: <https://www.forbes.com/sites/linleygwen-nap/2020/10/12/apple-moores-law-is-running-out/> (24. 4. 2021.).
- T. B. Hook, Power and technology scaling into the 5 nm node with stacked nanosheets, *Joule* 2 (2018) 1–4, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.10.014>.
- URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/uwp/porting/apps-on-arm> (24. 4. 2021.).