



## Uvod u ugradbene računalne sustave (mikrokontrolere)

Ivica Čulina<sup>1</sup>

### Uvod

Od druge polovice 20. stoljeća ubrzano se razvija računalna tehnologija. Danas je taj tempo razvoja posebno ubrzan te smo svjedoci sve veće prisutnosti računalnih tehnologija u svakom aspektu ljudskog djelovanja. Paralelni razvoj računalnih mreža (Internet) omogućio je povezivanje računala na globalnu mrežu te dao dodatnu polugu sve većoj digitalizaciji društva. Razvijena zapadna društva doživljavaju fundamentalni preokret u svome gospodarskom i društvenom djelovanju. Budućnost je sve više okrenuta prema smanjenju uporabe fosilnih goriva te optimizaciji potrošnje energije i prirodnih resursa (Zelena i digitalna agenda). Ključnu ulogu u toj tranziciji igrat će pametni, računalni intenzivni sustavi spojeni na Internet.

Ovdje ćemo ukratko opisati ugradbene računalne sustave (mikrokontrolere). Disciplina inženjerstva koja pokriva područje zove se *Ugradbeno računalno* (eng. *Embedded computing/engineering*). Ugradbeno računalstvo je dinamično i multidisciplinarno područje u kojem su potrebna znanja i vještine iz računalstva i elektronike. Ugradbeni inženjer (eng. *Embedded engineer*) radi na području gdje se spajaju program (software) i sklopovlje računala (hardware).

**Napomena.** U ovom području engleski je standardni jezik. Većina naziva je prevedena na hrvatski jezik, a u zagradi je dan originalni engleski naziv. Razlog tome je da su engleski nazivi standard te ih je potrebno naučiti kako bismo se mogli snalaziti u literaturi i po želji proširiti znanje iz ovog područja. Neki nazivi nisu prevedeni. Skraćenica *PC* (eng. *Personal Computer*) označava standardnu x86/x64 arhitekturu. Skraćenica *MCU* (eng. *Microcontroller Unit*) označava mikrokontroler.

### Što su ugradbeni računalni sustavi (1)?

Kako bismo odgovorili na ovo pitanje moramo prvo imati jasnu sliku što je računalo, tj. računalni sustav, odnosno razumjeti *arhitekturu* i *način rada računala*. Zato ćemo u nastavku prvo detaljnije razmotriti što je uopće računalo/računalni sustav, njegovu arhitekturu i način rada, kako bismo postepeno došli do razumijevanja ugradbenog računala, odnosno mikrokontrolera.

Prosječnom čovjeku riječ “kompjutor” odmah asocira slike PC-a – stolnog računala ili laptopa. Neki upućeniji će možda proširiti pojam na servere u data centrima ili

<sup>1</sup> Autor je dipl. ing. elektrotehnike, stručni suradnik na Veleučilištu Velika Gorica; e-pošta: ivica.culina@hotmail.com

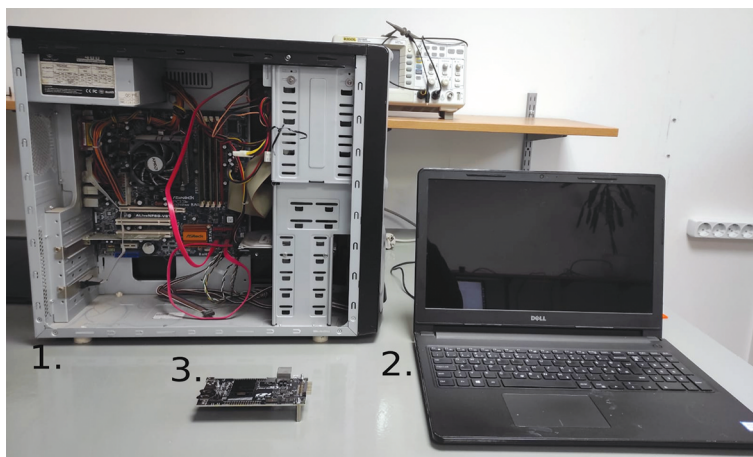
pametne telefone (smartphones) u našim džepovima. No stvarnost je da smo (većinom nesvjesno) okruženi velikim brojem malih “kompjutora” i da oni čine tako važan dio našeg svakodnevnog života. U skoro svakom uređaju koji nas okružuje (perilice rublja, hladnjaci, televizori, daljinski upravljači, pećnice, automobili,...) nalazi se mali “kompjutor” – tehničkim rječnikom *ugradbeni računalni sustav* (eng. *Embedded computer*).

---

## Što je računalno?

---

Na slici 1 nalaze se: otvoreno kućište stolnog računala, laptop i ugradbeno računalo – razvojna pločica s ARM mikrokontrolerom. Na upit “Pokažite mi kompjutor na slici” prosječan čovjek bi pokazao na sliku laptopa. Zašto je tomu tako? Na laptopu su jasno vidljivi ulazno/izlazni uređaji pomoću kojih korisnik komunicira s računalom – tipkovnica, ekran i miš (touchpad). Kada bismo zatvorili kućište stolnog računala, priključili monitor, tipkovnicu i miš tada bi i ta slika bila poznatija te bi je identificirali s “kompjutorom”.



Slika 1.

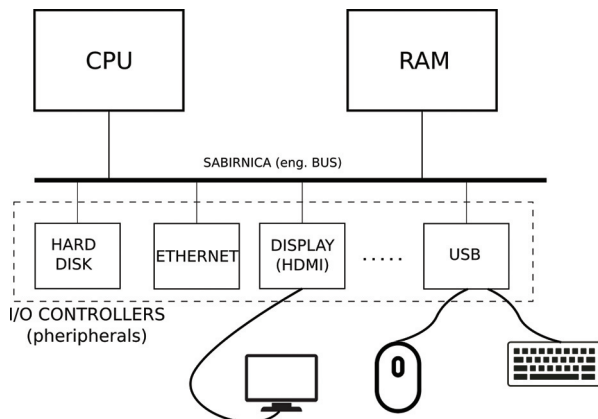
Računalno je programabilni stroj što ga čini univerzalnim strojem. Isto hardversko sklopovlje može obavljati razne zadatke ovisno o programu koji trenutno izvršava. Tako, primjerice, na osobnom računalu možemo pisati tekst, gledati video, slušati glazbu, rješavati zadatke iz matematike, itd. – sve na istom sklopovlju (hardware) ovisno o programu koji se izvršava. Kao zorni primjer možemo uzeti pametne telefone (smartphones) koji su najobičnija računala s dodanim sklopovljem za komunikaciju putem mobilne mreže. Pojava smartphonea izbacila je iz uporabe mnoge uređaje: mp3 playere, digitalne bilježnice, satove, budilice, radio-aparate, fotoaparate, itd.

Zašto? Zato što je smartphone računalo – ukoliko trebamo neku funkcionalnost dovoljno je pronaći i instalirati odgovarajući program (aplikaciju). Primjerice, ukoliko trebamo diktafon više ne kupujemo zasebni uređaj. Dovoljno je da naše računalo (smartphone) ima odgovarajuće vanjske jedinice (mikrofon i zvučnik). Pokretanjem odgovarajućeg programa (aplikacije) naše računalo (smartphone) se pretvara u – diktafon!

U nastavku ćemo pogledati arhitekturu računala te način na koji mu govorimo što da radi – programiranje.

## Arhitektura računala

Na slici 2 je prikazana shema osnovne arhitekture računala.



Slika 2.

Osnovni dijelovi računala su:

1. CPU (eng. Central Processing Unit), odnosno procesor/mikroprocesor
2. RAM (end. Random Access Memory), odnosno radna memorija
3. sabirnica (eng. BUS)
4. trajna memorija (hard disk)
5. ulazno/ izlazno sklopovlje (I/O controllers/ peripherals).

**Procesor** je “mozak” računala. Ima sposobnost izvršavanja naredbi programa te kontrolira sve ostale dijelove računala.

**RAM**, odnosno radna memorija, je “kratkotrajna memorija” – u njemu se nalaze naredbe i podatci programa koji procesor trenutno izvršava. Nakon gašenja računala sadržaja RAM-a se gubi (eng. Volatile memory).

**Sabirnica** je “živčani sustav” računala – to je skup paralelnih žica (primjer za moderne 64-bitne arhitekture sabirnica se sastoji od 64 linije za podatke) kroz koje teku podatci (električni signali) kroz sustav. Sva komunikacija između dijelova računala se odvija preko sabirnice

**Trajna memorija** – memorijski uređaji koji trajno čuvaju svoj sadržaj i nakon prekida napajanja (eng. Nonvolatile memory). Primjeri su hard disk i flash memorije (npr. USB stick). Svi instalirani programi spremljeni su u trajnoj memoriji te ih prilikom pokretanja operacijski sustav učitava u radnu memoriju.

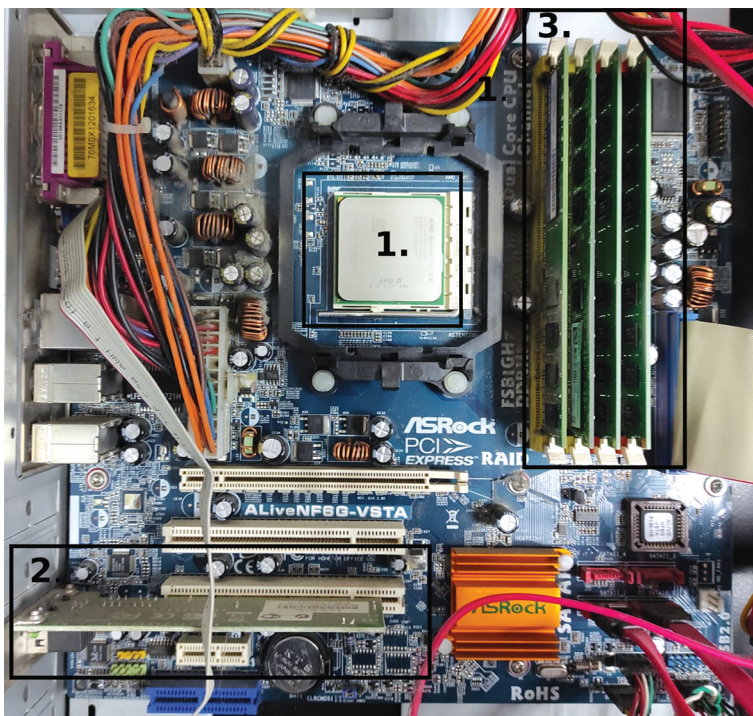
**Ulazno/izlazno sklopovlje** – hardver koji implementira specifične funkcije te omogućuje komunikaciju računala s vanjskim svijetom (npr. mrežna kartica, WIFI kartica, grafička kartica, ... ).

---

## Usporedba PC-a i ugradbenog računala

---

Sada pogledajmo kako arhitektura na slici 2 izgleda fizički na stolnom računalu (PC-u), a kako na ugradbenom računalu (mikrokontroleru).



Slika 3.

Na slici vidimo matičnu ploču osobnog računala (PC). Možemo reći da ona implementira **sabirnicu** i većinu **ulazno/izlaznog** sklopovlja.

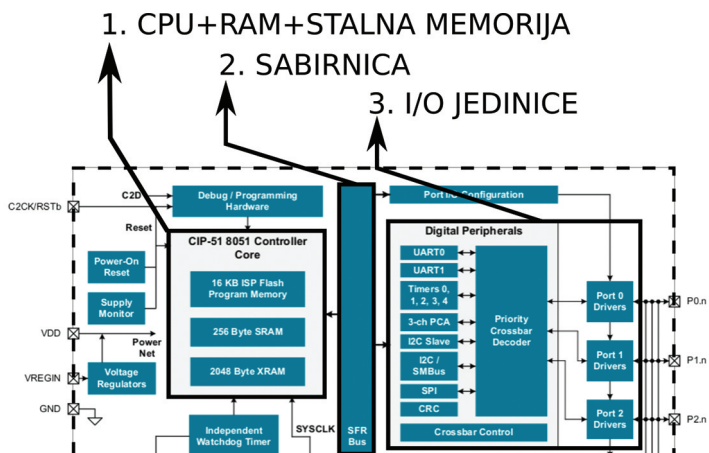
Na njoj vidimo spojene: **CPU**, **mrežnu karticu** (primjer I/O jedinice) i **RAM memoriju**.

---

## Kako ta ista arhitektura izgleda na mikrokontroleru?

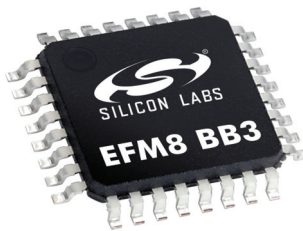
---

Na slici 4 nalazi se isječak shematskog prikaza arhitekture EFM8 mikrokontrolera preuzet iz tehničke dokumentacije. Podebljanim kvadratima naglašeni su dijelovi arhitekture. Dio unutar iscrtkane linije je sam čip, a dio izvan je vanjski prostor (vidljive nožice čipa za spajanje)



Slika 4.

Na slici 5 prikazan je fizički čip mikrokontrolera EFM8 – cijelo računalo se nalazi na tome čipu veličine 5 mm × 5 mm!



Slika 5.

Sada dolazimo do glavne sličnosti i razlike:

**Sličnost:** arhitektura računala je konceptualno jednaka na stolnom računalu i mikrokontroleru. Imamo sve jednake dijelove (CPU, sabirnica, RAM, ...)

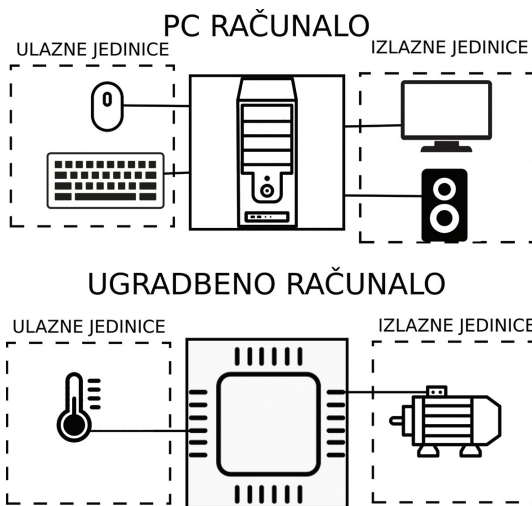
**Razlika:** kod stolnog računala arhitektura je implementirana pomoću matične ploče na koju se spajaju svi ostali dijelovi (CPU, RAM, hard disk, I/O kartice, ...). Kod mikrokontrolera svi dijelovi računala se nalaze zajedno integrirani na istoj pločici silicija (integrirani krug) odnosno na jednom čipu (eng. Chip). Zbog toga se ugradbeno računalo (mikrokontroler) također zove računalo na čipu (eng. Computer on chip/System on chip).

Možemo povući sljedeće paralele i razlike između ugradbenog računala i PC-a:

- PC računalo je fizički građeno spajanjem komponenta na matičnu ploču, MCU je samo jedan čip i sve komponente računala nalaze se integrirane na tome čipu.
- Arhitektura i način rada MCU-a i PC-a je fundamentalno jednaka.
- PC računalo je puno veće snage i memorije (primjerice, prosječni PC možda raspolaže s 2 GB RAM-a dok mali 8-bitni MCU ima tek 0.256 Kb).
- PC računalo je rađeno da izvršava razne programe i radi interaktivno s korisnikom, dok je ugradbeno računalo programirano (u tvornici) za jedan specifičan zadatak te korisnik najčešće nije niti svjestan da računalo uopće postoji.
- PC računalo (gotovo uvijek) dolazi s operacijskim sustavom (Linux, Windows) dok mikrokontroler programiramo “od nule”, tj. ne postoji nikakva systemska programska podrška.

- PC računalo obično ima stalnu memoriju u obliku hard diska na kojem se nalazi operacijski sustav, instalirani programi i podatci. Na mikrokontrolerima je stalna memorija implementirana na flash tehnologiji (kao i kod USB sticka). Na njoj se nalazi kôd koji će mikrokontroler izvršavati. Kôd je učitani u tvornici i u pravilu se ne mijenja tijekom vijeka proizvoda.

Pogledajmo primjere PC i ugradbenog računala sa spojenim vanjskim jedinicama (slika 6). PC računalo komunicira s korisnikom (tipkovnica, miš, monitor, zvučnik). Ugradbeno računalo je dio proizvoda/ stroja te komunicira s vanjskim fizičkim svijetom – prima ulazne veličine putem *senzora* (primjerice senzor temperature), te djeluje na okolinu putem *aktuatora* (primjerice elektromotor).



Slika 6.

## Osnove rada i programiranja računala

Računalo radi na način da procesor redom dohvaća i izvršava naredbe koje se nalaze u radnoj memoriji (RAM-u). Pogledajmo primjer (beskorisnog) Python programa koji u beskonačnoj petlji zbraja dvije varijable i rezultat pridružuje trećoj varijabli.

```
a = 11
b = 20
while(True):
    r = a + b
```

Sada pogledajmo kako bi mogao izgledati strojni kôd (nakon prevođenja programa) na nekom fiktivnom procesoru.

Na slici 7 je prikazan sadržaj RAM-a tijekom izvršavanja programa. Umjesto strojnog kôda (nule i jedinice), naredbe i brojevi prikazani su tekstualno (opisno).

Procesor započinje izvršavanje programa izvršavanjem naredbe koja se nalazi na adresi 0 u radnoj memoriji. Naredba zbraja sadržaj na memorijskoj lokaciji 3 (11) sa sadržajem na memorijskoj lokaciji 4 (20). Recimo da je rezultat (31) spremljen u interni akumulator procesora.

ADRESA	SADRŽAJ MEM. LOKACIJE	OPIS
0	ZBROJI SADRŽAJ MEMORIJSKE LOKACIJE 3 I 4	naredba
1	SPREMI REZULTAT NA MEMORIJSKU LOKACIJU 5	naredba
2	SKOČI NA MEM. LOK. 0	naredba
3	11	varijabla (a)
4	20	varijabla (b)
5	31	varijabla (r)

→  
CPU redom  
dohvaća i  
izvršava  
naredbe

Slika 7.

Nakon izvršenja naredbe procesor automatski počinje izvršavati naredbu na sljedećoj memorijskoj lokaciji: adresa 1. Naredba sprema vrijednost iz akumulatora na memorijsku lokaciju 5 (31). Sljedeća naredba na adresi 2 kaže procesoru da prekine linearno izvršavanje naredbi, odnosno da “skoči” na memorijsku lokaciju 0 i dohvati sljedeću naredbu s te lokacije.

Program je samo niz strojnih naredbi (eng. *Opcodes*) koje dani procesor razumije. Strojne naredbe su samo binarni kôdovi u obliku nula (0) i jedinica (1). Prije izvršavanja programa njegov strojni kôd učita se u RAM memoriju i procesor počne redom dohvaćati i izvršavati naredbe programa. Tako računalo služi kao univerzalni stroj – izvršava ono što mu je rečeno u naredbama programa. Sva komunikacija s vanjskim jedinicama i memorijom odvija se preko sabirnice.

## Instrukcijski skup

Kao što su rečenice sastavljene od riječi, programi su sastavljeni od naredbi. Unikatan za svaki procesor (CPU) je njegov instrukcijski skup (eng. *Instruction set*). To je skup primitivnih strojnih naredbi koje dani procesor može izvršavati. Riječ je o repertoaru niskih, primitivnih naredbi tipa “zbroji (*add*)”, “makni (*move*)”, ili “skoči (*jump*)”. Računalo je u stanju izvršavati samo naredbe koje njegov procesor razumije. Tako svaki program, bez obzira u kojem je programskom jeziku napisan, na kraju biva preveden (kompajliran) u strojni jezik za dati procesor.

## Programska podrška i alati

Skup programa koji nam omogućava razvoj softvera za dani procesor/ platformu zove se *toolchain* (engleski naziv).

*Toolchain* se sastoji od:

1. *kompajlera* (eng. *Compiler*) – prevodi kôd pisan u višem programskog jeziku (npr. C jeziku) u asemblerski kôd (vidi opis niže);
2. *assemblera* (eng. *Assembler*) – prevodi asemblerski kôd u strojni kôd za dani procesor;<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Rezultat ova dva koraka je *objektni kôd* (eng. *Object code*). Objektni kôd još nije spreman za izvršavanje. Sve reference na varijable i skokove u kôdu su *relativne*. Nedostaju stvarne memorijske lokacije, fizičke adrese na kojima će se kôd izvršavati.

3. *linkera* (eng. *Linker/Loader*) – dovršava pretvorbu kôda za izvršavanje. Spaja sve objektne datoteke (eng. *Object files*) iz predhodnog koraka u konačni program, te zamjenjuje relativne memorijske lokacije s apsolutnim (stvarnim) memorijskim lokacijama na koje će program i varijable biti učitan. Kôd je sada spreman za izvršavanje.

Proces izgradnje programa (pretvorbe pisanog kôda u strojni kôd) zove se *Build process* (ili samo *build*).

**Napomena.** Pojam “kompajler”(eng. *Compiler*) često se služi kao istoznačnica za *toolchain*.

Kod razvoja kôda za PC računalo, *toolchain* koji koristimo zove se *native toolchain*, tj. *native compiler*. Kompajler (kao program) se izvršava na istom računalu (istoj arhitekturi) na kojem će se izvršavati strojni kôd kojeg će kompajler proizvesti. Kod razvoja kôda za ugradbeno računalo *toolchain* koji koristimo zove se *Cross compiler* (*cross toolchain*). Ovdje imamo situaciju da se kompajler izvršava na PC-u (računalo kojim se služimo za razvoj kôda), a njegov izlaz (strojni kôd) je namijenjen izvršavanju na nekom drugom računalu (mikrokontroleru).

Programi pisani za ugradbena računala imaju posebne zahtjeve po pitanju veličine, efikasnosti i robusnosti. Kôd se najčešće izvršava direktno, bez prisustva operacijskog sustava, tj. kažemo da se “izvršava na metalu” (eng. *Bare metal*). Također, naš program ima interakciju s najnižim dijelovima računala, tj. sa sklopovljem (interni registri procesora, registri vanjskih jedinica, . . .) te je potrebno odabrati programski jezik koji ima sposobnost takvog pristupa. Zato se mikrokontroleri programiraju u relativno “niskim” jezicima – C i/ili assembler.

Kada uspoređujemo sa standardnom PC platformom, naš aplikacijski kôd se izvršava u urednom okruženju koje pruža operacijski sustav (npr. Linux ili Windows). Sam kôd operacijskog sustava je vrlo sličan kôdu za ugradbene sustave, tj. izvršava se “direktno na metalu” i ima direktnu interakciju sa sklopovljem (hardverom).

---

## C programski jezik

---

Iako je C programski jezik po definiciji viši programski jezik, u biti je vrlo “nizak”. Ima jednostavnu strukturu i mogućnost direktnog pristupa memorijskim lokacijama (putem pokazivača, eng. *Pointers*). C jezik je nastao zbog potrebe njegovih autora da sebi olakšaju pisanje operacijskog sustava koji su do tada pisali u assembleru. Ukoliko ste se susreli s C jezikom u programiranju na PC računalu lako ćete se snaći u C programu pisanom za mikrokontroler (riječ je o istom programskom jeziku). Glavna razlika je što u ugradbenom okruženju nemamo operacijski sustav, odnosno ne možemo koristiti većinu funkcija iz standardne C biblioteke (eng. *Standard C Library – libc*). Također, moramo imati C *cross-compiler*. Za C jezik se često kaže da je “assembler na steroidima”. Kôd napisan samo u C jeziku, svejedno se ne može samostalno izvršavati na mikrokontroleru. Uvijek je dio kôda potrebno napisati direktno u strojnom jeziku – odnosno assembleru.

---

## Assembler (eng. *Assembler, Assembly language*)

---

Programiranje u assembleru zapravo je identično programiranju u strojnom jeziku, jer radimo direktno s procesorom i između nas ne stoji niti jedan sloj apstrakcije koji pruža



viši jezik. Svaka naredba napisana u assembleru odgovara direktno strojnoj naredbi datog procesora. Assembler nam samo olakšava pisanje programa u strojnom jeziku jer za nas obavlja niz mehaničkih zadataka koje bi inače trebali sami raditi na papiru. Assembler tako mijenja binarni kôd naredbe za mnemonikom (eng. mnemonics) – naziv naredbe koji je lakše zapamtiti nego niz nula i jedinica. Primjerice, naredba za zbrajanje dva broja na procesoru može imati strojni kôd “11001110” i biti predstavljena u assembleru kroz mnemoniku naredbe “ADD”. Dodatno, assembler olakšava rad s memorijom – ne moramo sami pratiti memorijske lokacije na koje će biti smještene naredbe i podatci, već assembler to radi automatski za nas. Procesor ne može direktno izvršavati program napisan u assemblerskom jeziku. Kôd je potrebno prvo “kompajlirati” u assembleru koji će ga prevesti u strojni kôd (niz nula i jedinica) koji se može učitati u radnu memoriju računala.

---

## Što su ugradbeni računalni sustavi (2)?

---

Umjesto zaključka, referirajmo se na prethodnu raspravu i navedimo glavne značajke ugradbenog računalnog sustava. Svejedno zapamtimo: “Ugradbeni računalni sustav, odnosno mikrokontroler, je *računalo*.” Odnosno, sve značajke koje su nam poznate u radu s PC računalom, vrijede i za mikrokontroler.

Značajke ugradbenog računalnog sustava:

**1. Računalo na chipu (“computer on chip”)**

Cijela “matična ploča”, odnosno svi dijelovi arhitekture računala nalaze se integrirani na jednoj pločici silicija.

**2. Programiran za specifičnu namjenu**

Program koji izvršava mikrokontroler razvijen je za specifičnu namjenu proizvoda u koji se ugrađuje, te nema “instalacije aplikacija”. Zato se software za ugradbeno računalo naziva firmvare (eng. *firmware*). Program je razvijen prilikom projektiranja uređaja i učitani u trajnu memoriju (Flash) mikrokontrolera prilikom sastavljanja proizvoda.

**3. Ograničeni resursi**

U odnosu na veličine na koje smo navikli kôd PC računala, resursi mikrokontrolera su minijaturni. Radna memorija (RAM) je često veličine 0.2 Kb, a trajna memorija (FLASH) veličine 2 Kb. Brzina rada procesora često je reda veličine 1 MHz.

**4. Na prvi pogled ne izgleda kao računalo**

Standardne vanjske uređaje koje vežemo uz riječ “kompjutor” ne nalazimo na ugradbenom računalu. Nije rađen za interakciju s korisnikom nego najčešće kao dio stroja/proizvoda u koji je ugrađen.

**5. Bogat ulazno/izlaznim jedinicama**

Kako je rađen za interakciju s fizičkim vanjskim svijetom na ugradbenom računalu nalazimo niz sklopovlja koje nije prisutno na PC-u. Mnoštvo sklopovlja za primanje informacija iz vanjskog svijeta (senzori) i sklopovlja za djelovanje u vanjskom svijetu (aktuatori)

Ovdje smo prošli osnovne principe rada računala te iznijeli kratki pregled tehničkog područja ugradbenog računalstva. Naglasili smo sličnosti i razlike između ‘standardnog’ i ugradbenog računala. Kako bismo zbilja usvojili navedena znanja potrebno je vježbati i raditi sa stvarnim sustavima. Zato kao nastavak na ovaj teorijski uvod slijedi radionica *Razvoj ugradbenih sustava s EFMS mikrokontrolerima*.