



Sveprisutno računarstvo

5. Energija

- Izvori napajanja
- Tehnologije izvedbe i potrošnja
- Upravljanje potrošnjom
- ESP32 i upravljanje potrošnjom

Creative Commons



[Sveprisutno računarstvo](#) by Hrvoje Mlinarić & Igor Čavrak, FER
is licensed under [CC BY-NC-SA 4.0](#)

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

This license requires that reusers give credit to the creator.

It allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, for noncommercial purposes only.

If others modify or adapt the material, they must license the modified material under identical terms.

BY: Credit must be given to you, the creator.

NC: Only noncommercial use of your work is permitted.

SA: Adaptations must be shared under the same terms.

Potrošnja energije – ugradbeni sustavi

- Manja potrošnja postaje važnija od većih performansi
- Moderni uređaji:
 - prijenosni
 - opremljeni mikrokontrolerom
 - baterijski napajani
 - malih dimenzija
- Potrošnja
 - Koliko prosječno trošimo? Koliko dugo će trajati baterija? (energija)
 - Koliko grijemo? (snaga)
 - Koliko trošimo vršno? (snaga)



Izvori napajanja

Potrošnja i napon napajanja

- Izvor napajanja je:

- regulator
 - linearni
 - switching, ili
- Baterija
- Prikupljanje energije iz okoline

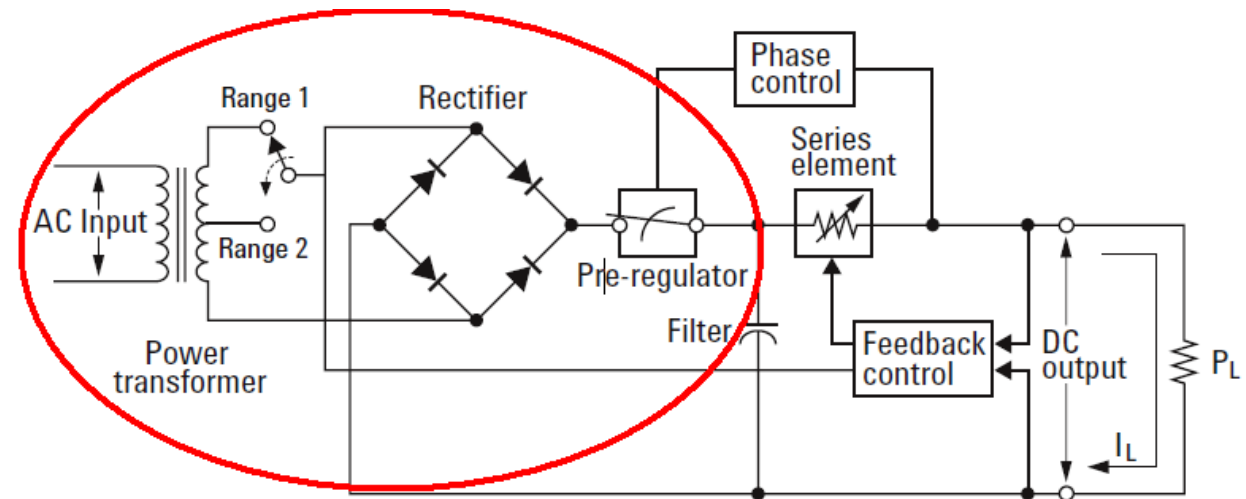
- Zahtjevi

- efikasnost
- stabilnost
 - veća potrošnja – veća nestabilnost, veći gubici
- točnost napona

Napajanje – ulazni napon



- Istosmjerni ili izmjenični?
- Iznos, odstupanje, smetnje?
- Izmjenični ulazni napon
 - treba proći ispravljanje i filtriranje
 - na primjeru jednostavnog serijskog regulatora:



Napajanje – regulatori napona

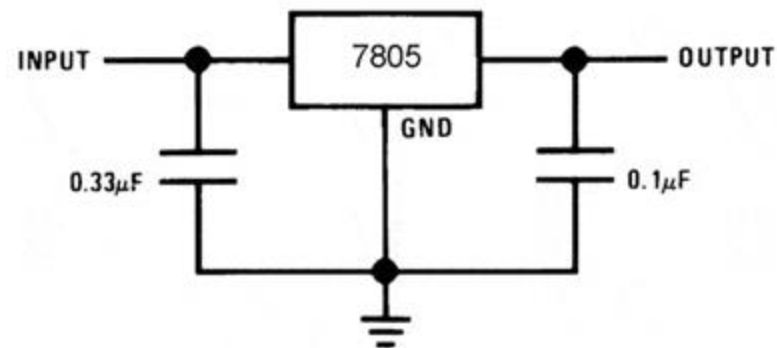


- Regulator prilagođava ulazni istosmjerni napon radnom naponu mikrokontrolera
- Princip rada – izlazni napon se uspoređuje s internim referentnim naponom, razlika se pojačava i upravlja izlazom regulatora
 - problemi (prisjetite se PID regulatora!):
 - brzina odziva
 - stabilnost
 - nadvišenje, itd.
- Regulator se sastoji od
 - u potpunosti od diskretnih komponenti ili
 - (češće) od integriranog sklopa i nekoliko komponenti

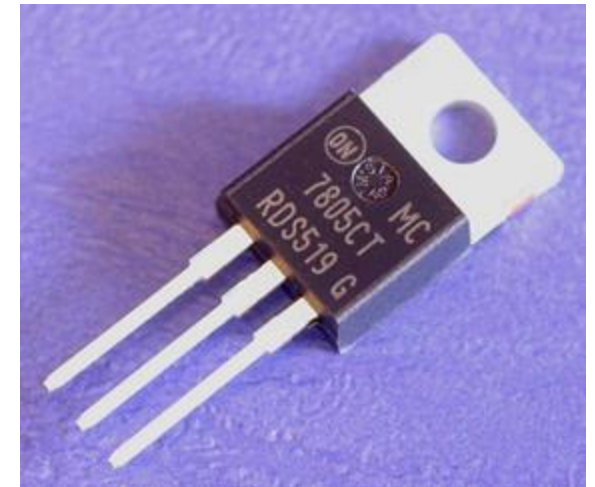
Napajanje – regulatori napona



- Dva osnovna tipa integriranih regulatora:
 - **Linearni ili serijski** (princip rada potencimetra)
 - Prednost: jednostavna realizacija, manje vanjskih komponentata
 - Nedostatak: neželjena disipacija energije proporcionalna je traženom padu napona i jakosti struje
 - Primjer: 3.3V napajanje, 2.5V napon jezgre -> 24% energije troši se beskorisno



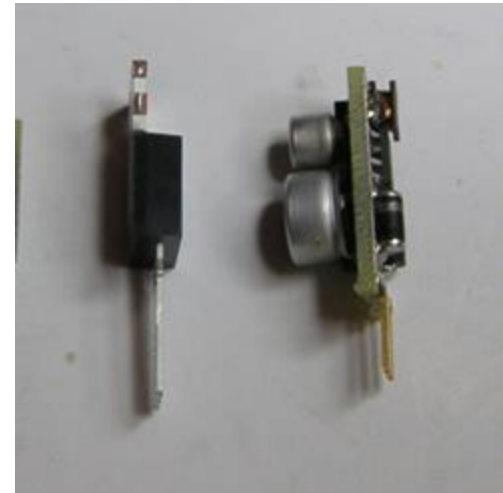
- **Preklopni** (*switching regulator*)



Preklopni (*switching*) regulator napona



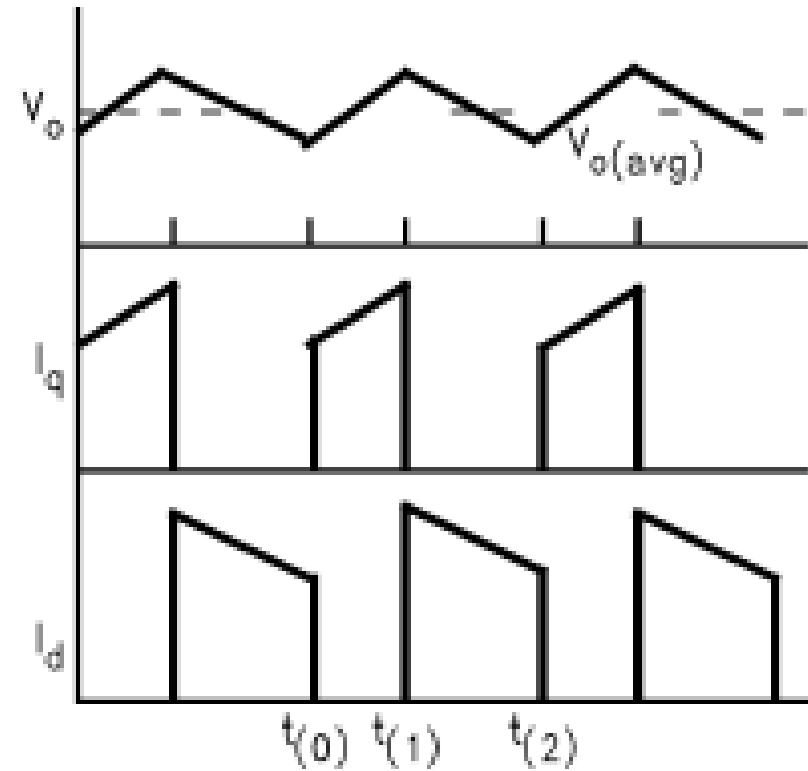
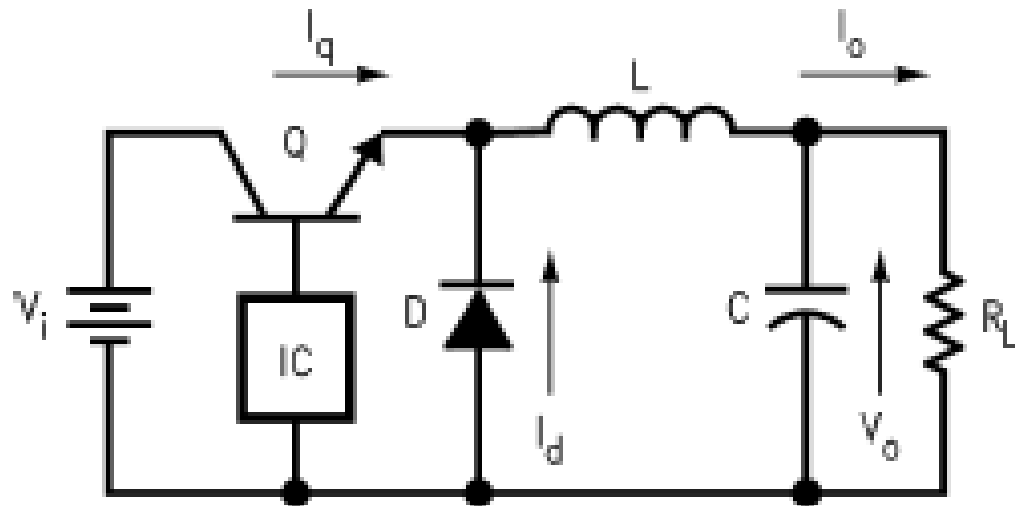
- Pulsno-širinska modulacija struje kroz zavojnicu
- Efikasniji od linearnog
 - Za prilagodbu napona sa 3.3V na 1.5V postotak neiskorištene energije smanjuje se sa 54% na otprilike 10%
- Nedostaci
 - Potrebno je dodati vanjsku zavojnicu (viša cijena)
 - Veća emisija elektromagnetskog zračenja (EMI) jer radi na području oko 1MHz



Preklopni (*switching*) regulator napona



- npr. preklopni *step-down/buck* regulator:





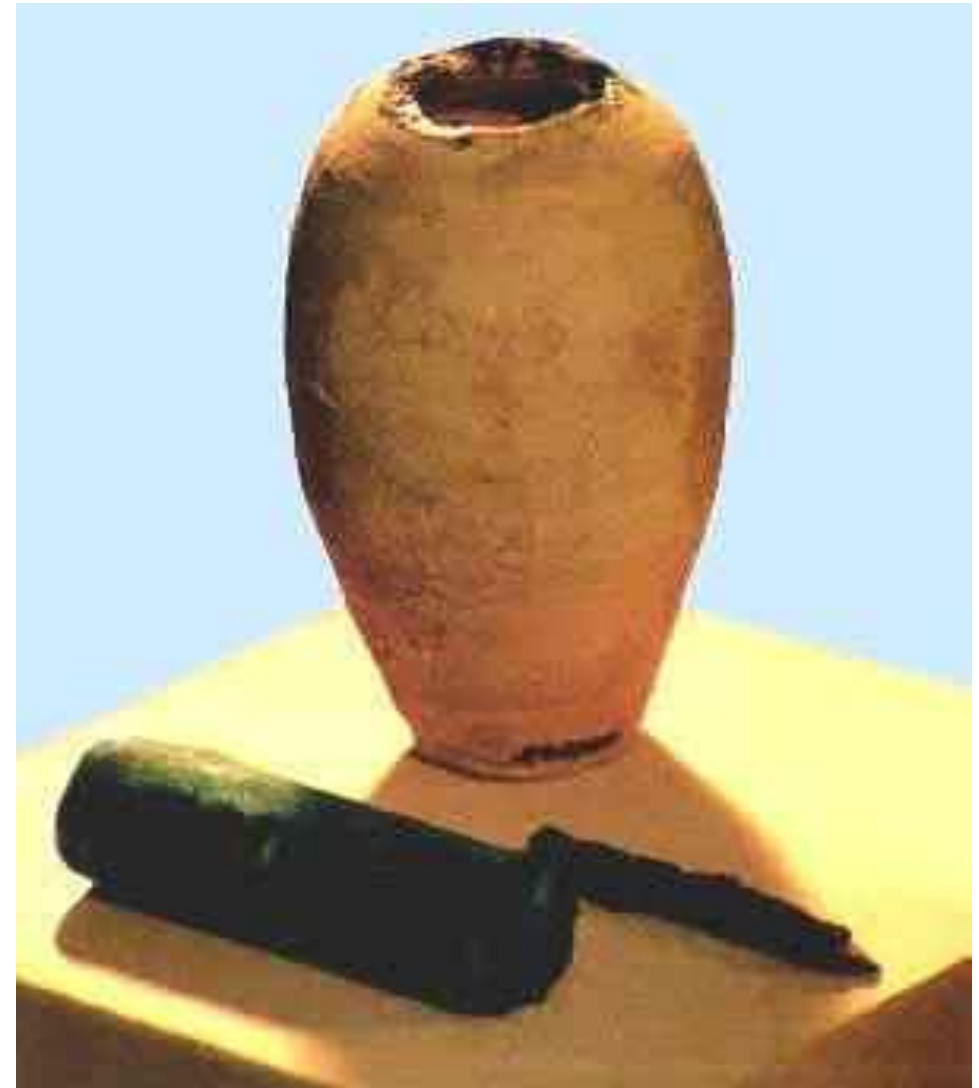
- **Krajnosti**

- preklopni regulator (regulaciju i generiranje PWM signala) moguće je ostvariti i mikrokontrolerom
- regulator napona može biti i integriran u sâm mikrokontroler - *on-chip* regulator napona

- U istom sustavu treba izbjegavati više naponskih regulatora (ako je to moguće)



- Kemijski izvor električne energije
 - Pretvara energiju pohranjenu u kemijskim vezama u električnu (direktno)
- Prve baterije u upotrebi još prije nekoliko tisuća godina
 - Egipćani? – elektroliza za zaštitu metala, 4000 g. p.n.e
 - Bagdadska baterija – 250 g. p.n.e – bakar, željezo i ocat
- Moderna baterija – Galvanski članak
 - Luigi Galvani – 1791. – *životinjski elektricitet*
 - Alessandro Volta – 1800. – prva moderna baterija





- Osnovna podjela

- Primarne

- Proces pretvorbe kemijske u električnu energiju je jednosmjernan

- Sekundarne

- Proces pretvorbe kemijske u električnu energiju je dvosmjernan, povrat baterije u početno stanje dovođenjem električne energije (akumulator, punjiva baterija)

- Primarne baterije

- Jednokratne

- Velik izbor oblika i kapaciteta

- Najčešće cink-ugljik (Zn-C) ili alkalne baterije (Zn-MnO₂)



- Karakteristike baterije ovise prvenstveno o kemijskom sastavu baterije – *kemiji* baterije
 - Zasnovane na olovu (Pb)
 - Zasnovane na niklu (Ni)
 - Zasnovane na litiju (Li)
 - ...
- Po agregatnom stanju elektrolita
 - *Mokre ćelije (wet cells)*
 - *Suhe ćelije (dry cells)*
 - Elektrolit vezan, npr. u obliku gela



- Na osnovi nikla

- Nikal-kadmij (NiCd)

- Srednja gustoća energije
 - Trajna, otporna
 - Visoke struje pražnjenja, velik temperaturni raspon
 - Otrovni metali, vrlo štetna po okoliš

- Nikal-metal-hidrid (NiMh)

- Viša gustoća energije
 - Kraći životni vijek
 - Štetna po okoliš

- Na osnovi litija

- Litij-ion (Li-ion)

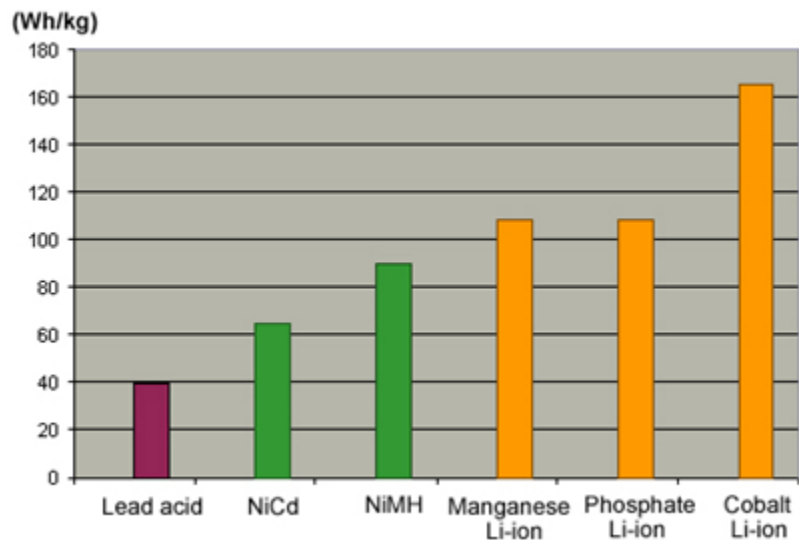
- Velika gustoća energije, mala težina, manje štetna po okoliš
 - Osjetljivija – potrebna zaštita od prevelikih napona i struja



- Olovo (Pb)
 - Niska cijena
 - Niska gustoća energije
 - Otpornost
 - Ali: potrebna zaštita od prepunjenja, prepražnjenja, ...
 - Velike struje pražnjenja
 - Velika težina
 - Štetna po okoliš – olovo, elektrolit je kiselina
- Posebne primjene (vozila, pomoćna napajanja, ...)

Usporedba baterija

Tip baterije	NiCd	NiMH	Olovne	Lilon (kobalt)	Lilon (fosfat)
Gustoća energije [Wh/kg]	45-80	60-120	30-50	150-190	90-120
Životni ciklus (pad do 80% kap.)	1500	300-500	200-300	300-500	>1000
Brzo punjenje	1h	2-4h	8-16h	1.5-3h	>= 1h
Podnosi prepunjenje	umjereno	slabo	dobro	jako slabo	jako slabo
Samopražnjenje (mjesečno)	20%	30%	5%	<10%	<10%
Napon ćelije	1.25V	1.25V	2V	3.6V	3.3V
Radna temperatura	-40 do 60	-20 do 60	-20 do 60	-20 do 60	-20 do 60
Otrovnost	Visoka	Relativno niska	Visoka	Niska	

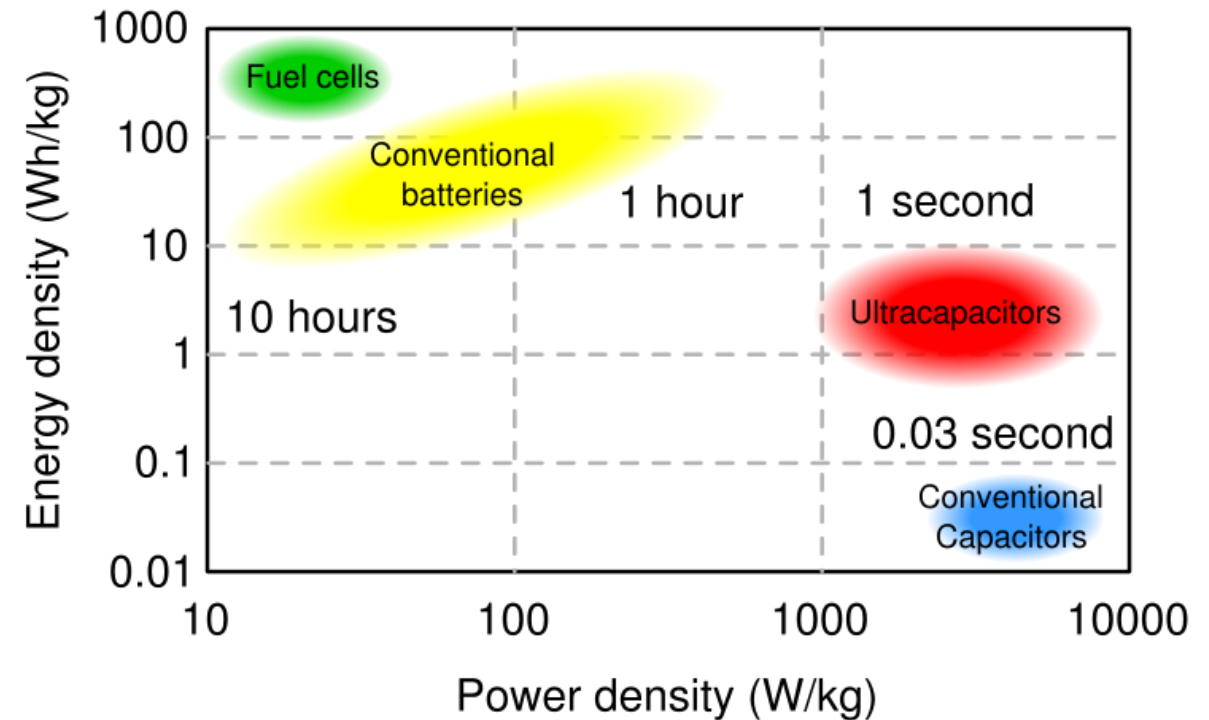


Gustoća pohrane energije

Izvor: Battery University, <http://www.batteryuniversity.com>

Ostali tipovi baterija

- Gorive ćelije (*fuel cells*), protočne ćelije (*flow cells*)
 - Kemijski reaktor koji pretvara kemijsku energiju *goriva* u električnu energiju
 - Najčešće – kemijski procesi *redukcije* i *oksidacije* (u osnovi, *gorenje*)
 - Redox – ćelije
 - Punjenje – promjena/dopuna rezervoara *goriva*
 - *Brzo* punjenje – slično vozilima na fosilna goriva
- Superkondenzatori
 - Kondenzatori velike gustoće energije (1000x više u odnosu na klasične kondenzatore)





Tehnologije izvedbe i potrošnja

- Pinovi napajanja – V_{CC} ili V_{DD}
- Pinovi uzemljenja – GND ili V_{SS}
- V_{CC}
 - potječe od bipolarnih tranzistora – kolektori tranzistora (C-C) spojeni zajedno na napajanje
- V_{DD}
 - slično, ali s MOSFET-oma – odvodi (*drain*) spojeni zajedno (D-D) na napajanje, uvodi (*source*) spojeni zajedno (S-S) na uzemljenje – V_{SS}
- Često - V_{CC} i GND neovisno o tehnologiji izrade

- Što troši?

- CMOS - $V_{DD} \leftrightarrow V_{SS}$ statički ne troši
- izlaz na ulaz – samo kapacitivni teret

- Parazitni kapaciteti

- pri promjeni stanja (*switching power*),
nabijanje/pražnjenje prividnih "kondenzatora", energija/promjena stanja je:

$$E_t = \frac{1}{2} C_L V_{DD}^2 \quad \sim 1 \text{ pJ}$$

- gubi se, prelazi u toplinu

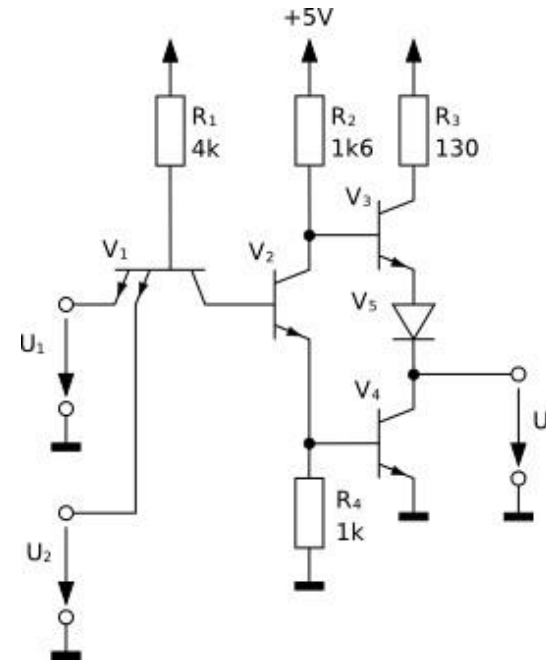
- Potrošnja kratkog spoja (*short-circuit power*)
 - u kratkom trenutku vodi i P i N tranzistor (neznatno u usporedbi s promjenom stanja – 10% do 20%)
- Potrošnja “curenja” (*leakage current*)
 - dio nA po vratima, zanemariv u aktivnom stanju (ali problem kod dugog stajanja)

Potrošnja i tehnologija izvedbe

- Tehnologija izvedbe mikrokontrolera:

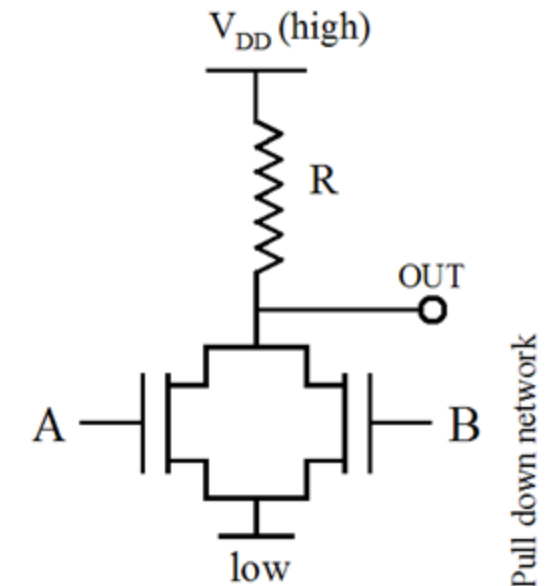
- TTL

- Transistor-Transistor Logic
 - troši i u statičkom stanju



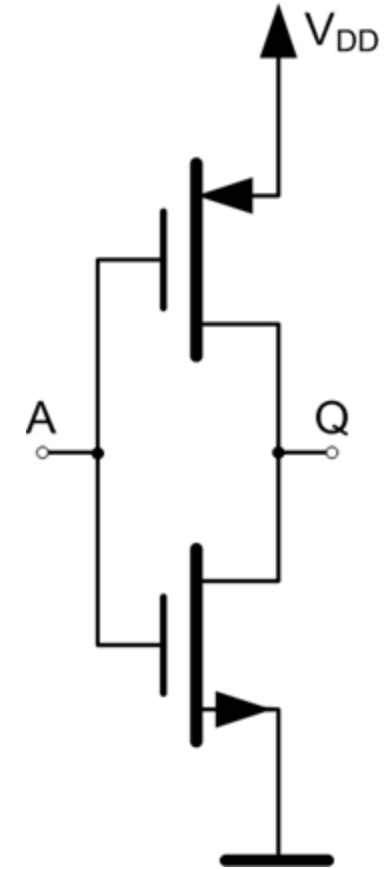
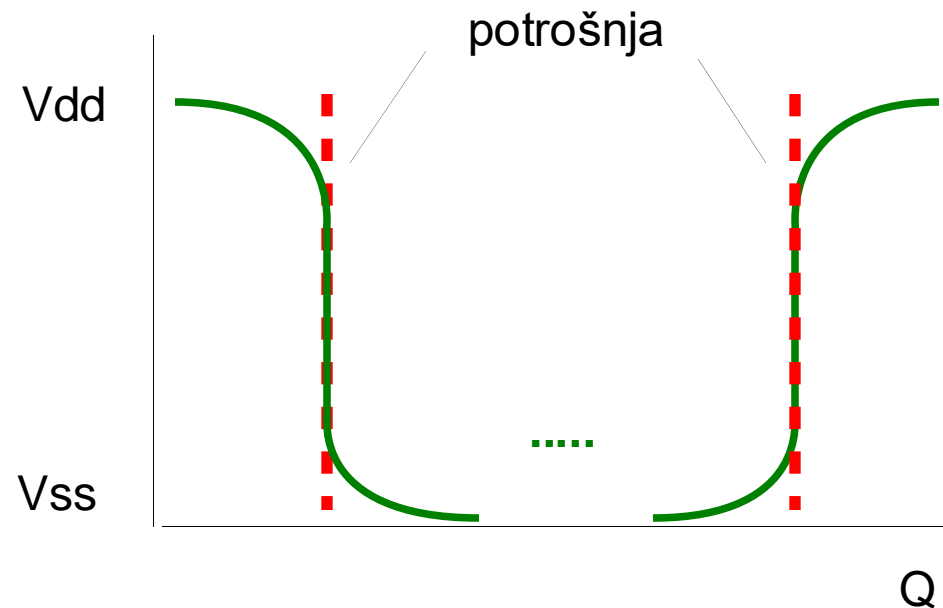
- NMOS

- MOSFET tipa N
 - Otpornik manjeg otpora ubrzat će promjenu stanja no porasti će disipacija



Potrošnja i tehnologija izvedbe

- Tehnologija izvedbe - nastavak
 - CMOS (*complementary metal–oxide–semiconductor*)
 - Visoka otpornost na smetnje
 - Vrlo niska potrošnja u statičkom stanju (kada nema promjena)
 - Sporost zbog parazitnih kapaciteta



$$P_C = \frac{1}{2} f V_{DD}^2 * \sum (A_g C_L^g)$$

f = frekvencija

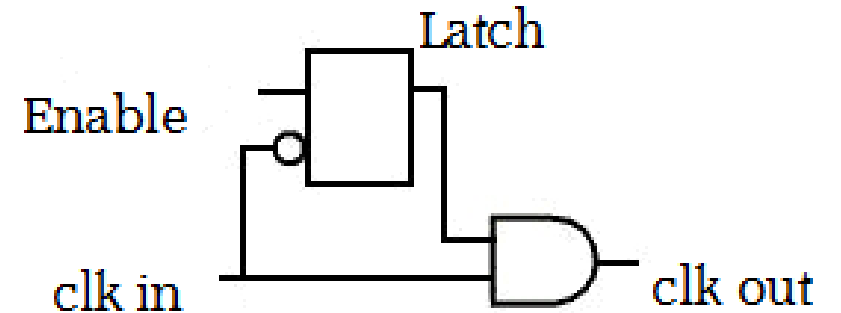
A_g = *activity factor* (linija takta ima $A_g=2$ promjene u taktu)

C_L^g = *gate load capacitance*

- Kapacitet je vezan uz proizvodni proces/tehnologiju dakle projektant ima utjecaj, uz to treba smanjiti:
 - V_{DD} (kvadratno)
 - A_g (isključivati sklopove koji ne rade)
 - broj tranzistora (vrata)
 - frekvenciju takta (pogotovo u kombinaciji s V_{DD})
 - tu je pitanje MIPS/W

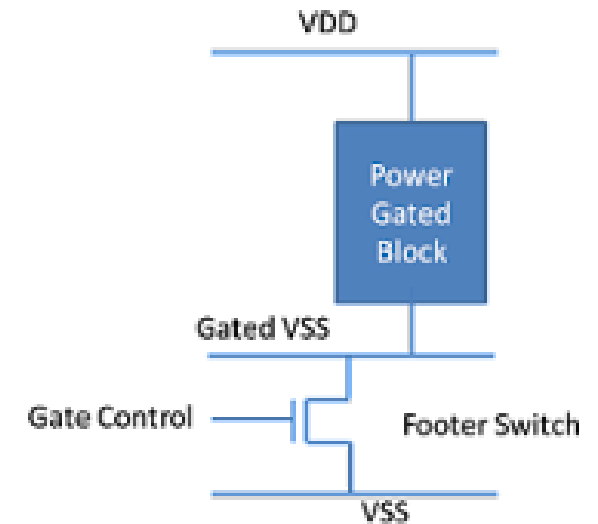
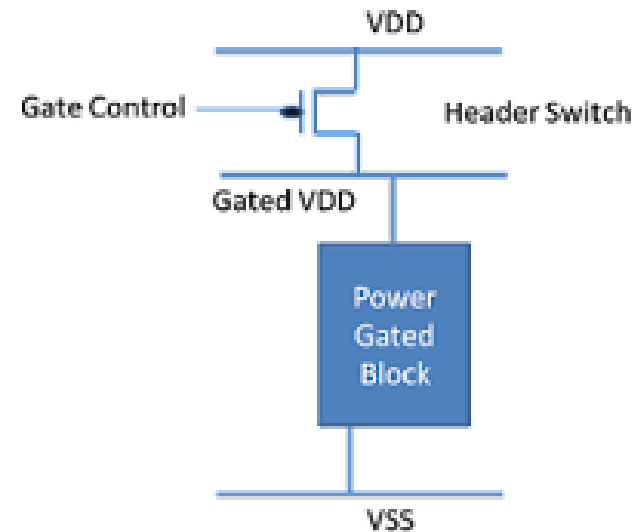
Clock gating

- Upravljanjem dostavom signala vremenskog vođenja dijelovima mikrokontrolera
 - Nema promjena stanja – nema aktivne potrošnje
 - Ostaje uključeno napajanje – potrošnja curenja nije spriječena
 - Brzo uključivanje i isključivanje (stanja su očuvana)



Power gating

- Upravljanje napajanjem pojedinih dijelova mikrokontrolera
 - Automatski od strane mikrokontrolera
 - Programski
- Eliminacija *potrošnje curenja* (nema napona – nema struje :))
- Problemi:
 - Daleko kompliciranija izvedba od *clock gating-a*
 - Izolacija isključenih blokova od aktivnih blokova
 - Sporiji početak rada (stabilizacija napona ...) – *rump-up time*
 - Čuvanje stanja blokova (pohrana u memoriju, napajani dijelovi blokova ...)



Snimanje profila potrošnje

- ULP mikrokontroleri vrlo agresivno koriste clock i/ili power gating za minimizaciju potrošnje energije
 - Vrlo teško teoretski procijeniti potrošnju sklopa
- Praktično – snimanje stvarne potrošnje sklopa po segmentima izvršavanja programa
- Ispitivanje ponašanja sklopa pod različitim stanjima napajanja i potrošnje
- Procjena trajanja rada sklopa na baterijskom napajanju

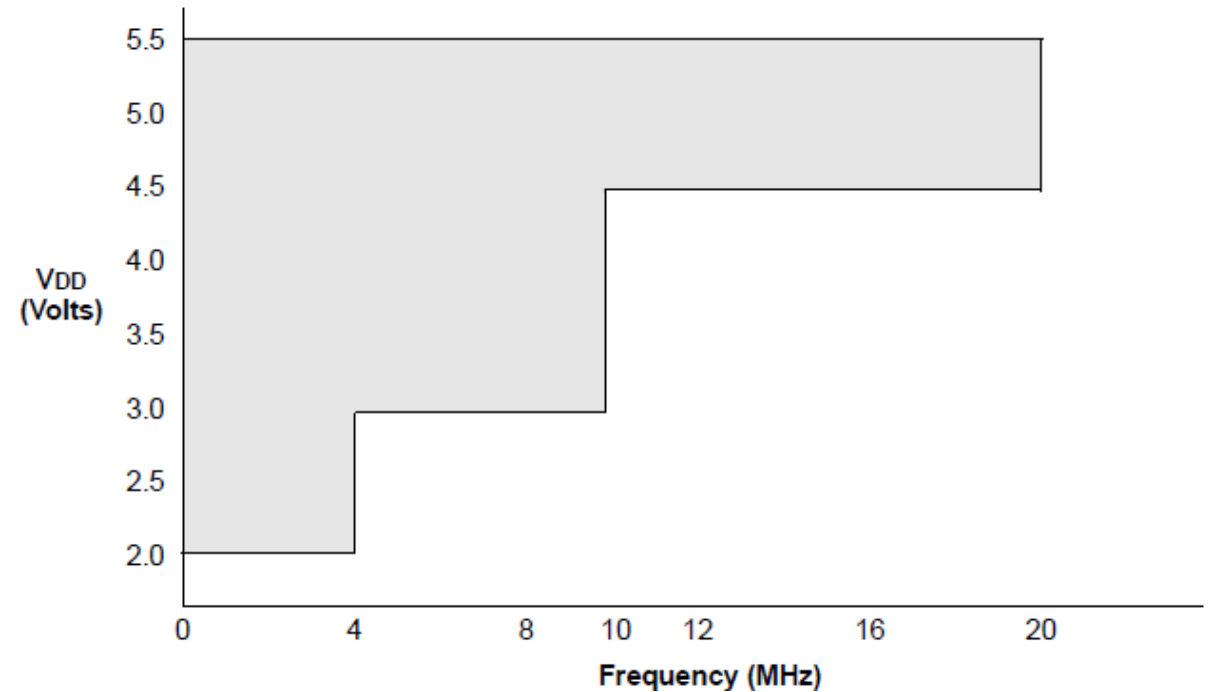




Upravljanje potrošnjom

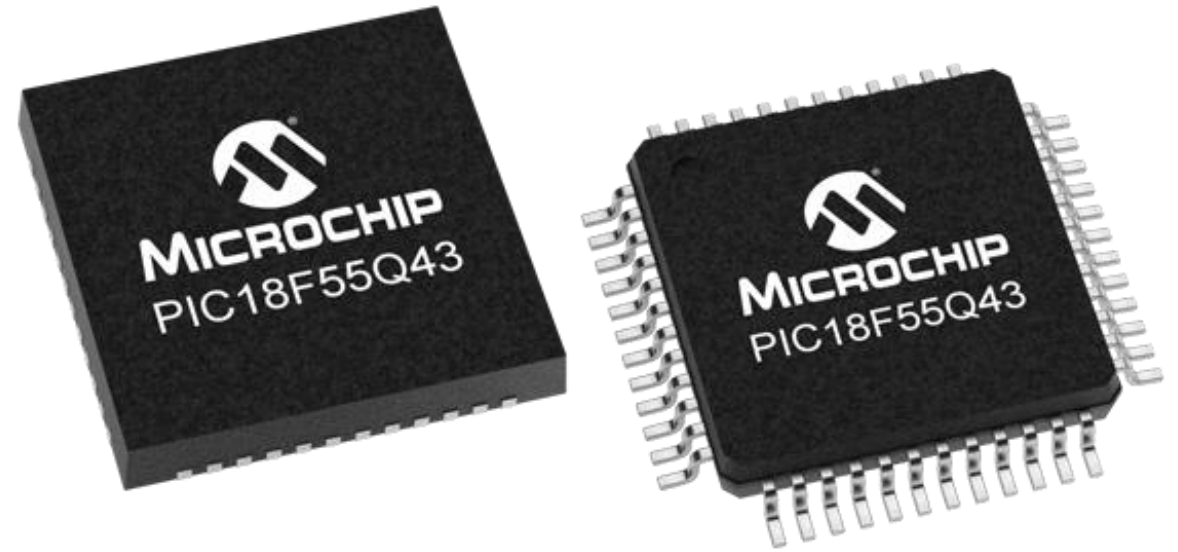
Potrošnja i napon / frekvencija

- Napon napajanja (V_{DD} , V_{CC}):
 - Minimalni potreban napon napajanja ovisi o ciljanoj frekvenciji
 - Viša željena frekvencija rada traži viši napon napajanja za pouzdan rad, što neminovno rezultira višom potrošnjom
- Proizvođač definira dopuštene kombinacije napona napajanja i radnog takta
 - npr. za PIC12F675, $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 125^{\circ}\text{C}$



PIC modovi rada

- Načini rada kod mikrokontrolera PIC18
 - spavanje (***sleep***) – jezgra i vanjske jedinice ignoriraju takt
 - mirovanje (***idle***) – jezgra ignorira takt, vanjske jedinice rade na vanjskom ili internom taktu
 - izvođenje (***run***) – jezgra i vanjske jedinice rade na vanjskom ili internom taktu
- Prelazak na niži takt oscilatora
 - većina mikrokontrolera ima mogućnost korištenja alternativnog (unutarnjeg ili vanjskog) oscilatora nižeg takta
 - u trenutku kad više nije potrebno brzo izvođenje, prelazi se na niži takt (npr. 32 kHz)



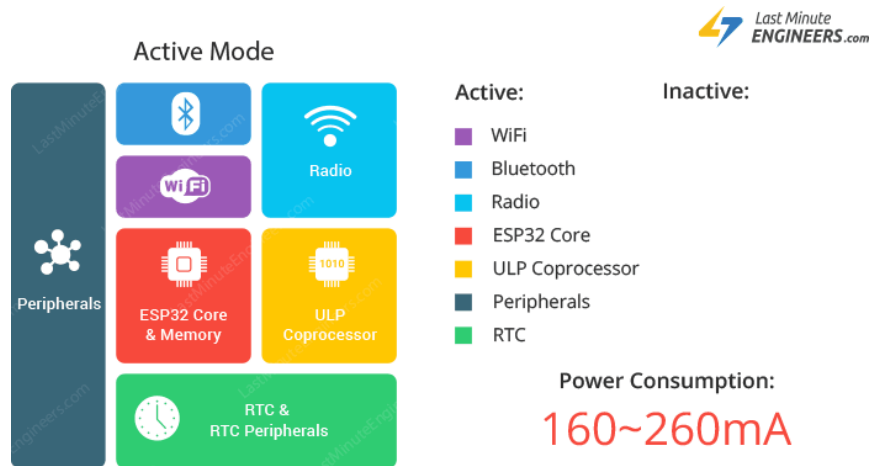
ESP32 modovi rada



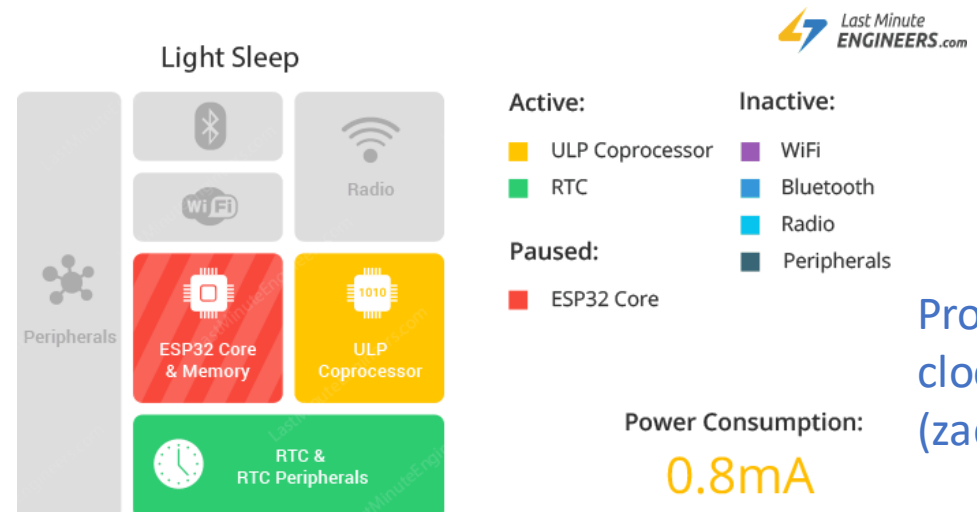
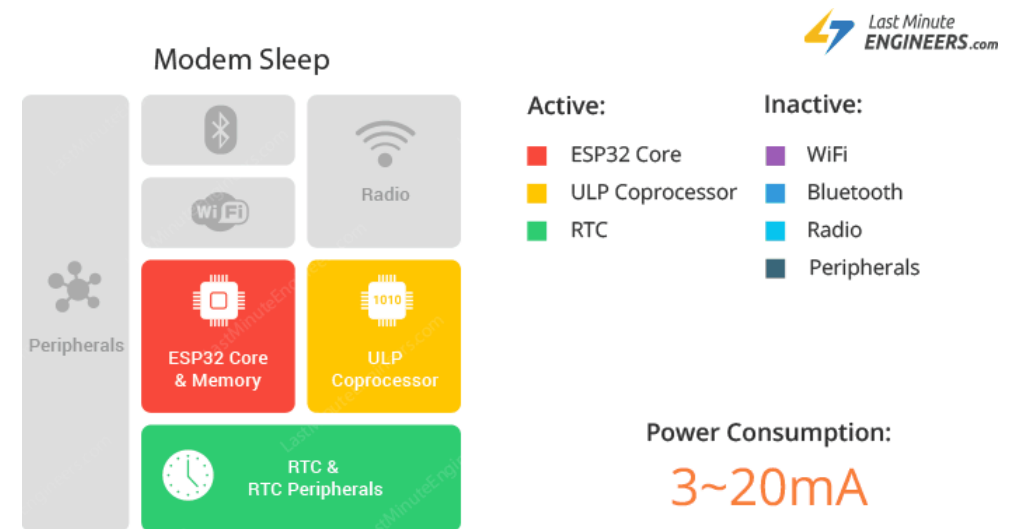
Modovi rada ESP32:

1. Active Mode
2. Modem Sleep Mode
3. Light Sleep Mode
4. Deep Sleep Mode
5. Hibernation Mode

ESP32 modovi rada



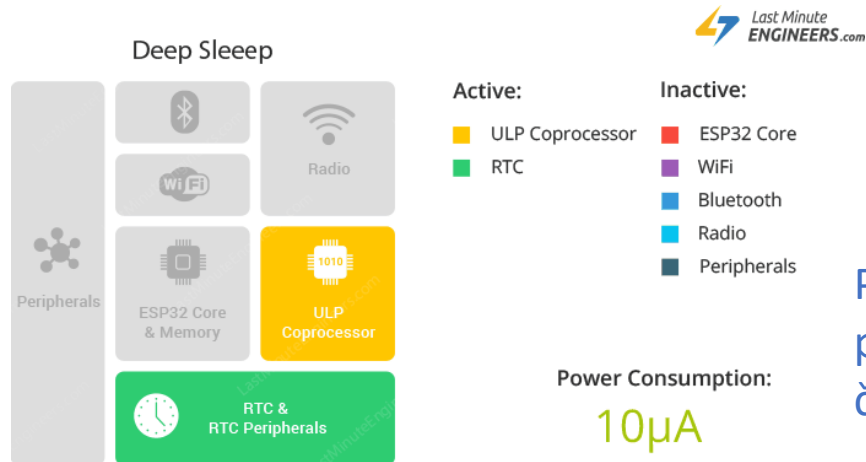
Mode	Power Consumption
Wi-Fi Tx packet 13dBm~21dBm	160~260mA
Wi-Fi/BT Tx packet 0dBm	120mA
Wi-Fi/BT Rx and listening	80~90mA



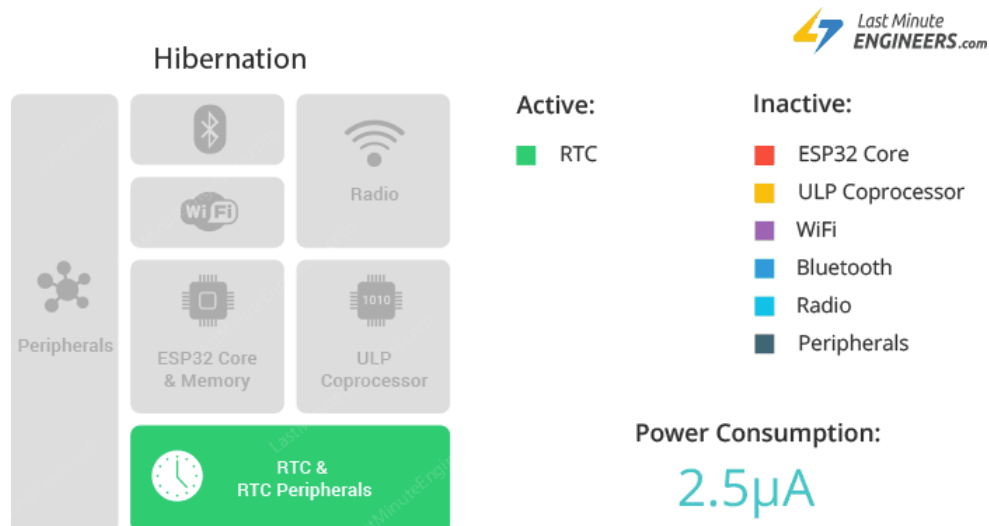
Procesor i memorija
clock-gated
(zadržavaju stanje)

ESP32 modovi rada

- Upravljanje frekvencijom signala vremenskog vođenja



Procesor i memorija
power-gated (gubi se stanje),
čuva se stanje memorije u RTC-u

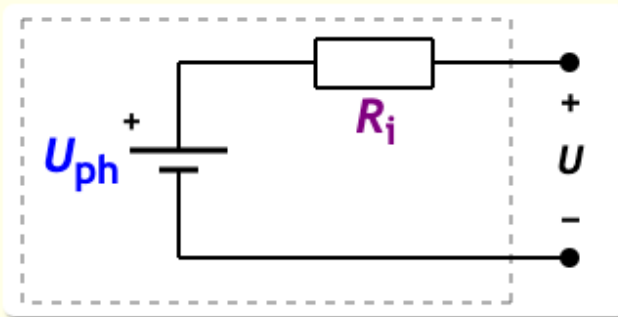


Snaga ili energija?

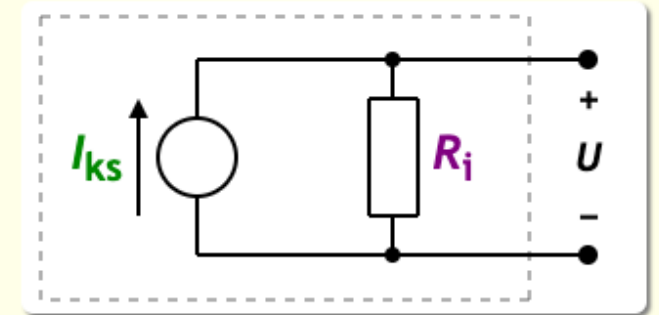
Prevelika potrošnja s obzirom na izvor napajanja

- brownout?
- oštećenje izvora?

realni naponski izvor



realni strujni izvor



https://osnove.tel.fer.hr/VJEZBEOE/DC_7.htm?x=1