

VI Potrošnja energije u SČ

1. Jedinica za napajanje

1.1 Tipovi baterija

2. Opcione jedinice u SČ

3.1 Lokalizaciona jedinica

3.2 Mobilizator

3.3 Generator električne energije

3.4 Energy Harvesting

3. Tehnike za efikasno korišćenje energije

2.1 Duty Cycle metoda

4. Profil energetske potrošnje

6.1 Softverske tehnike za uštedu

- Osnovni cilj je svake BSM je da ima što **duži životni vek**
- Osnovni preduslov za to je **efikasno upravljanje potrošnjom** el.energije
- Osnovni izvor električne energije u većini SČ-ova je **baterija** koja je **limitirana kapacitetom energije** kojom ona raspolaže (<0.5 Ah, 1.2 V).
- U većini slučajeva **zamena baterija je jako otežana**, čak nemoguća zbog nepristupačnih terena kao i velikog broja SČ-ova.
- Kod višeskokovitih BSM-a faktor upravljanja potrošnjom električne energije još **više dolazi do izražaja**.
- Problemi u funkcionisanju nekog od SČ u mreži može prouzrokovati **promenu mrežne topologije**, što zahteva reorganizaciju mreže kao i pronalaženje novih puteva usmeravanja podataka.
- U ina SČ-ova ima najmanje dva različita režima rada:
 - a. aktivan režim rada (*active*)** u kome se vrši očitavanje senzora, obrada očitanih podataka i razmena tih podataka sa susednim SČ-ima;
 - b. neaktivan režim rada (*idle*)** - kada SČ ne izvršava ni jedan zadatak.
- U aktivnom režimu rada SČ troši **znatno više energije** nego u neaktivnom režimu rada.

6.1 Softverske tehnike za uštedu

- U idealnim uslovima SČ **ne bi trebao da troši el.energiju** u neaktivnom režimu jer je ona nepotrebno izgubljena.
- **Potpuno isključenje SČ nije izvodljivo**, jer zbog funkcije koju obavlja neki delovi SČ moraju uvek da budu aktivni.
- Konvencionalne tehnike za smanjivanje potrošnje el.energije, **ne daju zadovoljavajuća rešenja** za racionalnu potrošnju el.energije u BSM-a.
- Kako je svaka količina energije koja se uštedi jako dragocena ovde treba uvesti i **razne tehnike za uštedu na svim nivoima**.
- To podrazumeva ne samo smanjenje potrošnje u svakom SČ, već razne tehnike **za produžavanje životnog veka** aplikacije koja radi u BSM.
- To znači da je neophodno **sagledavanje ukupne potrošnje u celoj mreži**
- Rešavanje ovog problema obično se svodi na uštedu potrošnje energije na tri nivoa: **hardveru SČ-a, operativnom sistemu** i na **nivou aplikacije**.
- Najveći potrošač je **komunikacija** jer za prenos samo **1 bita informacije** troši istu količinu el.energije koju potroši MCU za oko **1000 naredbi**
- Ovo nam jasno ilustruje odnos potrošnje, i **praktično eliminiše sve optimizacije** koje bi se radile na algoritmu za procesiranje podataka

6.1 Jedinica za napajanje

- Jedinica za napajanje predstavlja **ključni deo svakog SČ** jer od njenog funkcionisanja zavisi rad svih ostalih komponenti SČ.
- Najčešće se sastoji od:
 - a. **baterijskog izvora** jako ograničenog kapaciteta,
 - b. **DC-DC pretvarača**
 - c. **alternativnih kola** koja omogućuju korišćenje energije iz prirode.
- Svi delovi SČ se napajaju iz **ove jedinice** pa se, zbog **ograničenog kapaciteta** koja ona ima, kao osnovni zahtev postavlja da rad svih jedinica u SČ bude energetska efikasan.
- Zbog malih gabarita, normalno je da su **baterije prva pomisao** za rešavanje problema napajanja kod mobilnih uređaja.
- Postoje **dva aspekta** u razvoju ove jedinice kako bi se omogućio maksimalni životni vek SČ:
 - I. Da se postigne **što veća gustina skladištenja energije** koja se smešta u bateriju kako bi njen kapacitet bio veći,
 - II. Da se omogući **njeno dopunjavanje ili korišćenje energije iz prirodnih izvora** (*energy scavenging unit*).

6.1 Parametri baterije

Napon	Nominalni napon baterije	V
Kapacitet	Količina energije kojom baterija raspolaže	mAh
Specifična snaga	Količina energije po jedinici mase, prikazuje se u jedinicama energija/masa	W/kg
Energetska gustina	Količina energije po jedinici zapremine, prikazuje se u jedinicama energija/zapremina	Wh/l, Wh/dm³
Unutrašnja otpornost /izlazna struja	Karakteriše sposobnost baterija za napajanjem/ maksimalna izlazna struja	mA
Samopražnjenje	Struja curenja i starost baterije	%
Životni vek	Broj ciklusa dopunjavanja baterije pre nego što otkaže	ciklusi
Procedura punjenja	Način punjenja baterije	da/ne

6.1 Jedinica za napajanje

- Gotovo svi prvi SČ su kao **osnovno napajanje** imali bateriju.
- Sa pojavom energetski zahtevnijih aplikacija, dolazi do korišćenja **alternativnih izvora** jer neki standardni kapacitet AA baterije od **2.2-2.5Ah**, pri naponu 1.5V, **nije mogao da garantuje dug životni vek SČ**.
- Vrlo je važno da se uradi pravilan izbor batertije za SČ jer od toga najviše zavisi **dizajn SČ-a** kao i **efikasnost aplikacije** koja se izvršava
- Mnogi parametri utiču na izbor adekvatnog napajanja baterije, ali presudnu ulogu u tome igra **vrsta BSM aplikacije**.
- Postoji veoma veliki broj različitih baterija, ali se one u principu dele na **primarne** (nepunjive) i **sekundarne** (punjive).
- Primarne i sekundarne baterije razlikuju se i prema **energetskoj gustini**.

	Energija [J/cm ³]				
Tip baterije	Zinc-air	Lithium	Alkaline	NiMHd	NiCd
Primarna	3780	2880	1200		
Sekundarna		1080		860	650

6.1 Jedinica za napajanje

- Posmatrano sa systemske strane jedna **dobra baterija** treba da ima:
 1. **veliku energetska gustinu**
 2. **veliku specifična energiju;**
 3. **mali napon** po ćeliji (0.5-1.0 V);
 4. **efikasno konfigurisanje ćelija** baterije da bi se izbegla potreba za DC/DC konvertorima;
 5. **mogućnost dopunjavanja** baterija.
- Zadnjih godina razvijen je **veliki broj različitih baterija**
- Po kvalitetu i rasprostranjenosti izdvojila su se **tri tipa tih baterija**:
 1. **NiMh – Nikl metal hibridne** baterije (*Nickel–metal hydride*),
 2. **Li-Ion – Litijum jonske** baterije (*Lithium-ion*)
 3. **Li polimer – Litijum polimer** baterije (*Lithium-ion polymer*).
- Svaki od ovih tipova baterija ima **jedinstvene karakteristike** koje odgovaraju ili ne odgovaraju za primenu u BSM.
- Poznavanje specifičnosti ovih baterija u pogledu njihovog **nominalnog napona, kapaciteta, energetske gustine, vremena punjenja i pražnjenja i specifične snage** predstavlja prvi korak u izboru odgovarajućeg rešenja

6.1 Tipovi baterija

Tip baterije	Punjeve	Napon [V]	Kapacitet [mAh]	Gustina pakova. [Wh/dm ³]	Specifič. energija [Wh/kg]	Koeficient samopraž./mesec [%]	Efikasnost [%]
Alkaline-MnO₂	ne			347			
Silver Oxide	ne			500			
Li/ MnO₂	ne			550			
Zinc Air	ne			1150			
Scaled Lead Acid	da	6	1300	90			70-90
Lead-acid	da	2.0		60-75	30-40	3-20	
Nickel Cadmium	da	1,2	1100	50-150	40-60	10	70-90
Nickel Metal Hydrid	da	1.2	2500	140-300	30-100	30	66
Lithium-Ion	da	3.6-3.7	740	200-270	160	5	99.9
Lithium-polymer	da	3.7	930	300-415	130-200	1-2	99.8

6.1 NiMh-Nikl metal hibridne bat.

- Unapređena NiCd tehnologija koja koristi **manje opasne materijale**
- Najveće poboljšanje odnosi se na **veći kapacitet**, koji može biti i do **dva-tri puta veći** u odnosi na NiCd baterije.
- NiMH su **osetljive na način čuvanja i uslove punjenja**, imaju veoma izražen **efekat samopražnjenja i gube napon** na nižim temperaturama
- Pune baterije mogu **da otkažu** pri radu na niskim temperaturama (0°C)
 1. Nominalan napon iznosi **1.25V**
 2. Srednji kapacitet **2.2Ah - 3.0Ah**
 3. Specifična snaga (snaga/težina) je **250-1000W/kg**
 4. Energetska gustina **100Wh/l**
 5. Mali broj ciklusa punjenja-pražnjenja od **500 do 1000** ciklusa
 6. Izraženo samopražnjenje **20%-30%** mesečno
 7. Brzo vreme punjenja.
- NiMh baterije mogu se konfigurisati do **10 ćelija** koje daju nominalni napon od **12.5V**.
- Ove baterije su **dobar izbor ako se traže jeftine baterije** sa skromnim naponskim karakteristikama

6.1 Li-Ion - Litijum jonske baterije

- Spadaju u noviji tip baterija koje imaju **neke prednosti** u odnosu na prethodne, ali je **cena daleko veća** u odnosu na NiCd i NiMH baterije
- Ne pate od **memorijskog efekta** i **ne menjaju karakteristike**
- **Veliko zagrevanje**, u bilo kom trenutku, prilikom **punjenja ili redovnog rada** je glavni uzrok propadanja Li-Ion baterija.
- Li-Ion baterije imaju **kraće vreme punjenja i veliki kapacitet**.
- Li-Ion baterija prilikom punjenja **vrlo brzo postigne 70-80%** kapaciteta, dok je za punjenje do **100%** potrebno **još toliko vremena**.
- Li-Ion baterije pune se **složenim i vrlo preciznim postupkom**
- Li-Ion baterija dolazi sa **ugrađenom zaštitnom elektronikom** koja kontroliše **rad ćelija, punjenje**, a posebno **temperaturu baterije**.
 1. **Nominalan napon** iznosi **3.6 V**, **kapacitet** od preko **3Ah**,
 2. **specifična snaga** (snaga/težina) je **1800 W/kg**,
 3. energetska gustina **160 Wh/kg**, **srednje vreme** punjenja
 4. **mali broj ciklusa** punjenja-pražnjenja od **300 do 500 ciklusa**,
 5. **veoma malo samopražnjenje** **5%-10%** mesečno
- Li-Ion baterije mogu se **konfigurisati** do **7 ćelija** u napon od **25.2V**.

6.1 Li-polymer baterije

- Li-polymer baterije predstavljaju **novu generaciju** baterija, sa svojstvima vrlo **sličnim Li-Ion** baterijama od koje se očekuje da **unaprede karakteristike baterija**.
- Karakteriše ih **veći kapacitet**, **manja cena** proizvodnje i **moгуćnost oblikovanja u takoreći proizvoljne forme**.
- Nedostatak su im **kraći vek trajanja**, **nemogućnost pražnjenja i punjenja jačom strujom** i **veća osetljivost na niske temperature**.
- Imaju vrlo slične karakteristike kao i Li-ion baterije i to:
 1. nominalan napon **3.7 V**,
 2. kapacitet preko **3 Ah**,
 3. specifična snaga (snaga/težina) je **1800 W/kg**,
 4. energetska gustina **160 Wh/kg**,
 5. mali broj ciklusa punjenja-pražnjenja od **300 do 500** ciklusa,
 6. veoma malo samopražnjenje od **1-2 %** mesečno i
 7. srednje vreme punjenja.
- Ove baterije mogu se konfigurisati do **7 ćelija** koje daju napon **25.9V**

6.2 Opcione jedinice

1. Lokalizaciona jedinica

- U nekim primenama BSM-a, neophodno je **poznavanje lokacije SČ-a** u prostoru ili u odnosu na druge SČ-ove.
- U tom slučaju, za određivanje lokacije SČ-a koristi se **jedinica za koordinaciju i lokalizaciju**.
- Njena osnovna uloga je **da uskladi rad različitih mrežnih uređaja** tj. da sinhroniše rad mreže, kao i da u svakom trenutku **locira tačan položaj SČ** koji je kod ovakvih mreža jako važan.
- Ona može da se sastoji od **GPS** (*Global Positioning System*) modula ili od softverskog modula koji se sastoji od odgovarajućih **lokalizacionih algoritama** koji na osnovu proračuna određuju lokaciju SČ-a.

2. Mobilizator

- U primenama BSM-a u kojima postoji potreba za mobilnošću SČ-ova, koristi se jedinica za mobilnost kojom se pokreće SČ
- To znači da ona radi u jako bliskoj interakciji sa senzorskom i procesorskom komponentom, jer je potrebno da na osnovu podataka koje senzor daje procesoru izdaje odgovarajuće komande za kretanje

6.2 Opcione jedinice

3. Generatori električne energije

- Najveći problem kod prethodne jedinice je **potreba za znatno većom količinom energije**, potreban je dodatni alternativni izvori energije.
- Proces uzimanja energije iz prirode, tj. iz okruženja SČ, i njeno **pretvaranje u odgovarajuću električnu energiju** poznat je pod terminom ***energy harvesting*** ili ***power scavenging***.
- Tehnika je pogodna za aplikacije koje trebaju da **periodično rade**
- Upravo se takav režim rada **koristi kod BSM-a**, pa su SČ-ovi idealni kandidati da koriste ovu tehniku.
- Dodatna prednost ove tehnike je da su **uređaji za prikupljanje** ove energije obično **jako mali**.
- Postoje SČ-ovi koji **uopšte nemaju svoje izvore** za napajanje već samo koriste energiju koju uzimaju iz prirode.
- Takvi SČ-ovi su gabaritno mali ali imaju jednu manu a to je da mogu da **rade samo ako su stvoreni uslovi** za preuzimanje energije iz prirode
- Korišćenjem ove tehnike životni vek BSM može se **produžiti nekoliko puta** čak u nekim slučajevima i **obezbediti njen doživotni rad**.

6.2.4 Energy Harvesting

- Postoje **različiti prirodni resursi** koji se mogu koristiti kao potencijalna energija za napajanje SČ-a.
- Svaki od njih ima **različiti stepen iskorišćenja** koji opet zavisi u mnogome od tipa BSM aplikacije.
- U **različite prirodne izvore** koji se mogu iskoristiti za prikupljanje energije spadaju:

1.energija vetra i tečnosti,

2.solarna energija od svih oblika izvora svetla,

3.toplotna energija iz peći i drugih izvora grejanja,

4.mehanička energija usled vibracija,

5.ljudska energija koja zavisi od ljudskog kretanja, ljudske kože i krvi,

6.elektromagnetna energija koja se nalazi u induktorima, kalemovima i transformatorima

7.hemijska energija iz prirode ili bioloških procesa.

6.2.4 Fotonaponska čelija

- Verovatno **najpoznatiji i najkorišćeniji** alternativni izvor energije.
- Vršiti pretvaranje **svetlosne energije u električnu energiju**.
- Kako je svetlosna energija najzastupljeniji vid energije u prirodi, ona se i **najviše koristi kao izvor energije** za napajanje SČ-ova.
- Kod projektovanja ovakvog napajanja moramo uzeti u obzir **dve osnovne činjenice**, tj. uslova, koji moraju da budu ispunjeni:
 1. Svetlosni izvor treba da omogući **dovoljnu količinu energije** za napajanje SČ
 2. Treba obezbediti **način za skladištenje ove energije** u slučajevima kada nema dovoljno svetlosti.
- Sunčeva svetlost je **najzastupljeniji izvor energije** koji nam omogućava da dobijemo oko **1mW/mm²** (sunčan dan) ili **1μW/mm²** (sobno svetlo)
- **Efikasnost** ove konverzije iznosi do **30 %**.

6.2.4 Mehanička energija

- Svako pomeranje nekog tela u prirodi može da dovede do **generisanja tri različita tipa energije: vibracione, kinetičke i mehaničke energije.**
- Sve ove vrste mogu se pretvoriti u električnu energiju koristeći **sledeće mehanizme konverzije:**

1. Piezoelektrični efekat

- ✓ U prirodi postoje neki materijali koji mogu da **konvertuju mehaničku energiju u električnu** – piezoelektrični materijali.
- ✓ Na takve materijale može se **dejstvovati nekom silom**, kojom se izaziva **vibracija ili deformacija** takvog materijala da bi **generisali elek. impuls.**
- ✓ Karakteristike piezoelektričnih materijala zavise od **starosti materijala, pritiska i temperature** kojoj su izloženi.
- ✓ Jedna dobra osobina ovih materijala da mogu potpuno **samostalno da generišu relativno veliku energiju** i to bez dodatnog izvora napajanja
- ✓ Loše osobine ovih pretvarača odnose se da su piezelektrični materijali **jako skupi** a uz to i **krti**, tako da veoma lako dolazi do njihove **trajne deformacije** ukoliko se dejstvuje malo jačom silom.
- ✓ **Napon** koji oni mogu da daju kreće se u okviru **2 – 10 V**

6.2.4 Mehanička energija

2. Elektrostatički efekat

- ✓ Ovde se mehanička energija iz prirode pretvara u električnu.
- ✓ Princip konverzije svodi se na **promenu kapaciteta kondenzatora** kod koga je moguće tu promenu vršiti **pomeranjem ploča kondenzatora**.
- ✓ Elektrostatički generatori su u suštini **mehanički uređaji** koji imaju mogućnost da proizvedu električnu energiju **pod dejstvom neke sile**.
- ✓ U ovom slučaju to mogu da budu **vibracije** koje dolaze iz prirode (**vetar, elektromagnetni talasi**).
- ✓ Jedna od glavnih prednosti ovih konvertora je da oni predstavljaju **jeftino rešenje** koje se lako može ugraditi u SČ
- ✓ Omogućavaju da se **generiše veliki napon (2 – 10 V)**.
- ✓ **Mane** ovog rešenja su:
 - a. da je elektrostatički generator **jako osetljiv na parazitne kapacitete**,
 - b. potreba da se kontrolišu **jako male razdaljine od μm**
 - c. potreban je **dodatan izvor za napajanje** promenljivog kondenzatora, tj. on inicijalno treba da se napuni nekom energijom

6.2 Elektromagnetni i termoelektrični efekat

Elektromagnetni efekat

- ✓ Koristi se princip **elektromagnetne indukcije** - proces generisanja napona u provodniku promenom magnetnog polja oko tog provodnika.
- ✓ Osnovna prednost ovakvog generisanja električne energije je da nema **nikakvih mehaničkih kontakta** između bilo kojih delova konvertora, **njihova dugovečnost i nije potreban dodatan** izvor za napajanje.
- ✓ Veliku manu predstavljaju gabariti, jer su elektromagnetni materijali **dosta masivni i skupi**, pa tako **nisu prikladni** za integraciju u SČ.
- ✓ Naponi koje ovi uređaji mogu da daju su **mali** i kreću se max. do **0.1V**

Termoelektrični generatori

- ✓ Iz fizike je dobro poznat princip termoelektriciteta koji kaže da ako dođe do kontakta **dva tela različite temperature** tada dolazi do **generisanja napona** između ta dva tela koja su u dodiru.
- ✓ Ovaj efekat je **iskorišćen za generisanje** potrebne energije za SČ.
- ✓ Tako na primer **ljudsko telo** u dodiru sa nekim predmetima iz prirode može da posluži **kao izvor termalne energije** koja će putem **termoelektričnog generatora** biti pretvorena u električnu energiju

6.2.4 Energy Harvesting

Harvesting tehnologije	Energija
Foto čelija–direktna sunčeva svetlost	15 mW/cm ²
Foto čelija – oblačno vreme	0,15 mW/cm ²
Foto čelija – u prostoriji	0,006 mW/cm ²
Foto čelija – stona lampa < 60 W	0,57 mW/cm ²
Piezoelektrični materijal	330 μW/cm ²
Vibracije – mikrotalsana pečnica	0,01-0,1 mW/cm ²
Termoelektrični efekat–10 °C razlike	40 μW/cm ²
Buka – 100 dB	9,6-4 mW/cm ²
Ljudsko telo – u mirovanju	1,8 mW
Nuklearna reakcija	80mW/cm ³ 1E6mWh/cm ³

6.3 Tehnike za efikasno korišćenje energije

1. Clock Gating

- Jedna od **starijih tehnika** za smanjivanje efektivne potrošnje energije
- Metod **isključuje dinam.komponentu** napajanja za neaktivne delove SČ
- U početku ona je radila na **nivou blokova**, tako što su pojedini blokovi SČ koji su neaktivni smeštali u pasivan (*standby*) režimu rada.
- Današnja rešenja su omogućila da **clock gating radi sa čipovima**
- Kontrolna kola mogu jednostavno odlučiti **da ne generišu potrebne takt impulse** za komponente koje nisu promenile svoje stanje.
- Na taj način, ostala je **samo statička komponenta napajanja** koja je potrebna da zadrži trenutno stanje u komponenti.

2. Voltage islands

- U hardverskoj arhitekturi SČ postoje blokovi **koji rade sa različitim vremenskim tajmingom** tj. sa različitim brzinama - frekvencijama.
- Što je **frekvencija rada** pojedinih blokova **veća**, **veća je i potrošnja**
- Međutim ti 'brzi' blokovi **provedu jedan određen period u čekanju** na 'sporije' blokove, zbog neophodne međusobne sinhronizacije.
- Zato se ti 'brzi' blokovi, **privremeno isključe sa napajanja** sve dok se **ne postigne vremenska sinhronizacija** sa drugim sporijim blokovima.

6.3 Tehnike za efikasno korišćenje energije

3. Power gating

- Podrazumeva **isključivanje napona napajanja** na pojedinačnim blokovima kako bi se **prekinula i statička i dinamička** komponenta potrošnje energije u njima.
- Ova tehnika podrazumeva da postoji relativno **složen mehanizam**, koji treba da utvrdi **kako organizovati sekvencu gašenja i paljenja**, a da se postigne efekat smanjenja potrošnje energije.
- Potrebno je **dovoljno ranije predvideti** buduće aktivnosti bloka, sa ciljem da se **predvidi sledeće uključivanje** tj. *power-up* sekvencu.
- Neadekvatan izbor mehanizma paljenja i gašenja često može da prouzrokuje **kontra efekat** tj. povećanu potrošnju energije.

4. Dynamic voltage frequency scaling

- Kombinacija prethodne dve tehnike *voltage islands* i *power gating*.
- Dizajner **podešava napon i frekvenciju** kod svakog bloka u toku rada, tako da one **zavise samo od trenutnog zadatka** koji se izvršava.
- Ovo je dosta zahtevna tehnika jer je **potrebno detaljno poznavanje performansi** koje treba da zadovolji aplikacija koja se izvršava

6.3 Tehnike za efikasno korišćenje energije

5. Dynamic threshold voltage control

- Dinamički kontroliše prag provođenja pojedinih skupova tranzistora, na taj način da izbor tačke curenja-nasuprot-brzina (leakage-versus-speed) zavisi samo od trenutnih veza tih tranzistora u izabranom bloku.
- Danas, ovaj pristup se uglavnom koristi samo kod nekoliko naprednih proizvođača CPU jedinica.

6. Skaladištenje energije

- Puno puta se odustaje od većih performansi SČ-a a sve u cilju smanjivanja potrošnje SČ-a i produženja njegovog životnog veka.
- Zbog prirode potrošnje SČ-a, koja je u principu jako intenzivna veoma mali deo vremena (<1 %) životnog veka SČ-a, oni su idealan medijum za kombinovanjem statičke i dinamičke energije koja se, kada uslovi dozvoljavaju, prikuplja iz prirodnih izvora i skladišti.
- Kondenzatori mogu da se koriste da efikasno smanje impedansu izvora za napajanje u trenucima intenzivnog zahteva za energijom
- Tako današnji ultra kondenzatori mogu da skladište i do 10 mJ/mm^3 , što iznosi skoro 1 % od energetske gustine litijum ćelija.

6.3.1 Duty Cycle metoda

- Potrošnja elektr. energije direktno zavisi od **aplikacije i arhitekture SČ**.
- **Neke karakteristike** potrošnje energije **zajedničke su** kod svih SČ-ova:
 - ✓ Primopredajna jedinica u svakom SČ-u je **najveći potrošač energije** (za **1kb** na **100m**, potrebna energija od oko **3J**, što je ekvivalentno energiji koju potroši MCU snage **100MIPS/W** za 3 miliona naredbi)
 - ✓ Prenos se obično vrši na **relativno malim rastojanjima** (max. **100 m**).
 - ✓ **Veličina paketa** koji se prenose je takođe **mala** (**64B** do **128B**)
 - ✓ Obično su **periode između slanja** podataka **dosta velike**.
 - ✓ Potrošnja primopredajne jedinice, kada se ona nalazi u **prijemnom režimu** rada, **znatno veća** nego kada je u **predajnom režimu** rada.
- Vremenski gledano SČ veliki procenat svog radnog veka provede u prijemnom režimu rada pa je **mного efikasnije smanjiti potrošnju u prijemnom** u odnosu na **predajni režim** rada primopredajnika.
- Činjenica je da kod većine primopredajnih jedinica **potrošnja u idle režimu rada** (kada primopredajnik nije ni u predajnom ni u prijemnom režimu rada) **približno ista** je kao i kada se nalazi u **druga dva režima rada tj. na prijemu ili predaji**.

6.3.1 Duty Cycle metoda

- Potrošnja SČ-a mnogo zavisi od **režima rada** u kome se on nalazi.
- Kako je ta potrošnja **najmanja u *sleep* režimu rada**, sasvim je logično da ukoliko se želi znatno smanjenje potrošnje energije SČ-a, tada čvor treba da provede **najveći deo svog životnog veka** u tom režimu rada.
- Idealno bi bilo da se primopredajnik uključi **samo kada ima podataka** za prijem/slanje, a da sve ostalo vreme bude isključen.
- To bi podrazumevalo da SČ-ovi **naizmenično prelaze iz jednog u drugi režim rada** i to sve u zavisnosti od aktivnosti i potreba BSM-e.
- Ovakav metod rada u kome se ciklično menja režim rada SČ definiše se kao radni ciklus - ***Duty Cycle (DC)***
- Pod ***Duty Cycle*** podrazumevamo odnos **dela vremena koji SČ-ovi provedu u aktivnom režimu rada** u odnosu **na ceo svoj životni vek** rada
- Sa gledišta efikasnosti uštede potrošene energije u SČ-u, potrebno da **DC faktor bude što je moguće manji**.
- Više SČ uvek izvršavaju **jedan kooperativan zadatak** pa je potrebno uskladiti njihov rad u pogledu aktivnih i neaktivnih perioda rada.
- Za to se koriste odgovarajući ***sleep/wakeup scheduling*** algoritmi

6.3.1 Duty Cycle metoda

- **Duty Cycle** predstavlja efikasnu i često korišćenu tehniku koja je postala neizostavan deo gotovo svake aplikacije u BSM.
- Princip rada ove tehnike je vrlo jednostavan: držati SČ što duže u režimu smanjene energetske potrošnje (*idle* ili *sleep*), a što manje vremena u režimu normalne potrošnje energije (*active*).
- Ovaj jednostavan princip nije lako primeniti jer on zahteva i neke dodatne tehnike kako bi se obezbedio pouzdan rad svih SČ-ova u BSM
- Pre svega potrebna je precizna vremenska sinhronizacija svih SČ-ova
- **Duty Cycle** predstavlja jako efikasnu tehniku koja se može primeniti i na ostale komponente u SČ-u.
- Ako u SČ-u imamo nezavistan kvarcni oscillator (**LVO**-Lokalni Vremenski Oscilator) koji radi nezavisno od sistemskog (**SVO** - Sistemski Vremenski Oscilator), tada postoji mogućnost da periodično isključimo i procesor (*idle/sleep mode*) tj. ukinemo rad **SVO**.
- Da bi se održao normalan rad lokalnog sata i beleženje lokalnog vremena, LVO nastavlja da radi i generiše signale za lokalni sat, kako bi se obezbedilo pravovremeno aktiviranje SČ-a i prelazak u *active mode*

6.3.1 Duty Cycle metoda

➤ Metod *Duty Cycle* se može primeniti na **dva komplementarna načina**:

1. Na osnovu topologije BSM

- ✓ Postoji puno **redundantnih SČ** koji učestvuju u komplementarnim ili istim rutama između izvornog SČ do glavnog SČ (*sink*).
- ✓ Bira se **minimalni podskup SČ** koji su aktivni kako bi obezbedili rutu.
- ✓ Svi ostali redundantni SČ-ovi koji učestvuju u istim (komplementarnim) rutama mogu da budu u **neaktivnom stanju**
- ✓ Izbor optimalne rute i odgovarajućih SČ-ova u izabranoj ruti poznata je kao **upravljanje topologijom mreže**.
- ✓ Cilj je da se na osnovu mrežne redundancije **produži životni vek BSM**

2. Kontrola potrošnje energije aktivnih SČ koji održavaju rutu

- ✓ SČ **ne moraju da budu aktivni sve vreme** već će menjati režim svog rada, aktivan/neaktivan, u zavisnosti od **aktivnosti i potrebe mreže**.
- Obe ove primene omogućavaju razvoj **energetski efikasnih protokola**
- Zadatak protokola je da vrše pronalaženje različitih ruta, a sve u cilju **balansirane potrošnje** svih SČ-ova
- Na taj način obezbeđuju **dug životni vek** aplikacije u BSM.

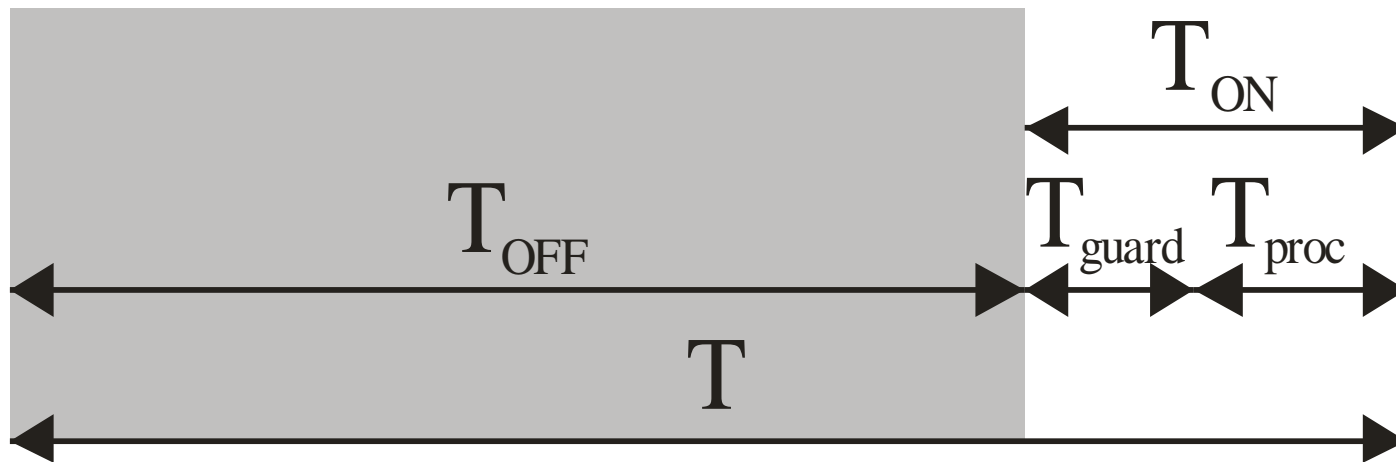
6.3.1 Duty Cycle definicija

➤ Vremenski intervali tokom kojih su komponente SČ-a uključene ili isključene poznati su kao:

1. **aktivna** (*active*) perioda (T_{ON})
2. **neaktivna** (*sleep*) perioda (T_{OFF}).

➤ **Ukupan vremenski interval** aktivnosti SČ-a, T_{Σ} , može se predstaviti:

$$T_{\Sigma} = T_{OFF} + T_{ON}$$



6.3.1 Duty Cycle metoda

- Deo vremena koji SČ provede u aktivnom režimu rada u odnosu na kompletnu periodu aktivnosti SČ, poznat je kao *Duty Cycle* (DC):

$$DC = \frac{T_{ON}}{T_{\Sigma}} = \frac{T_{proc} + T_{guard}}{T_{proc} + T_{guard} + T_{OFF}}$$

- ✓ T_{proc} odgovara **vremenu procesorske obrade** koje je potrebno za prihvatanje podataka sa senzora, obradu podataka i prenos poruka
- ✓ T_{guard} predstavlja **rezervno vreme** koje se dodaje aktivnom vremenu kako bi obezbedili da dva SČ-a sigurno mogu da usklade svoje aktivne periode rada (T_{ON}) i **uspešno obave komunikaciju**.
- Ako je SČ aktivan 10ms u periodu od 1s ima DC faktor **1% - 10ms/1s**
- SČ koji primenjuju ovu tehniku moraju **da imaju sinhronizovane satove** kako bi se njihovi periodi, T_{OFF} i T_{ON} , poklopili.
- Ukoliko ne dođe do poklapanja ovih perioda, komunikacija između tih SČ-ova **neće moći da se uspostavi** jer će doći do raskoraka, jedan SČ će biti **aktivan** (T_{ON}) dok je drugi **neaktivan** (T_{OFF}), ili obrnuto.

6.3.1 Duty Cycle metoda

- Da bi se ovo izbeglo uvedeno je **zaštitno vreme** T_{guard}
- Zaštitno vreme treba da **kompenzira vremensku razliku** u lokalnim satovima SČ-ova, do koje dolazi iz činjenice da **postoji relativno odstupanje u frekvencijama** dva SČ koji žele da komuniciraju.
- Odstupanje u frekvencijama doprinosi da postoje **veoma male razlike u vremenima** koje beleže ta dva SČ
- Te razlike mogu da dovedu do **desinhronizacije** tj. da jedan SČ počne **da šalje poruke** pre nego što drugi SČ **uđe u aktivni režim** rada
- T_{guard} treba da **proširi aktivni interval** za period koji će **kompenzovati max. odstupanje frekvencije** između dva kvarcna oscilatora u SČ
- Ovo vreme je **direktno proporcionalno dužini neaktivnog perioda** i iskazano je na sledeći način:

$$T_{guard} = 2 * T_{\Sigma} * s_x$$

- ✓ s_x ($\Delta f/f$) **relativna razlika u frekvencijama** dva oscilatora u SČ,
- ✓ T_{Σ} predstavlja **period sinhronizacije** između dva SČ.

6.4 Profil energetske potrošnje

- Zbog ograničene količine energije kojom raspolaže SČ, potrošnja energije u SČ-u mora **biti strogo kontrolisana**
- Glavni potrošači su **MCU, RF primopredajnik i senzorska jedinica.**
- Za samo **jednu naredbu MCU** potroši oko **1nJ**.
- Veličina samog SČ diktira nam da zapremina baterija mora da bude što manja, **maksimalno do 1mm³** što prema trenutnom razvoju tehnologije znači da možemo da smestimo **maksimalno oko 1J**.
- To znači da ako bi SČ sa takvom baterijom **radio ceo dan** potrošnja tog SČ ne bi smela da bude više od $1/(24 \cdot 60 \cdot 60) \text{ Ws/s} \approx \mathbf{11.5 \mu W}$.
- Ni jedan MCU pa ni SČ **ne može da radi** sa ovako malom snagom.
- Moraju se **primeniti sve raspoložive tehnike** za smanjivanje potrošnje.
- Ključna stvar za rešavanje ovog problema je činjenica da SČ najveći **deo vremena ne radi ništa** već samo osluškuje svoju okolinu.
- Prva pomisao je tada da se SČ **periodično uključuje/isključuje.**
- Međutim, **priroda rada BSM to ne dozvoljava**, jer se može desiti da se **propusti neki bitni događaj ili promena.**
- Zato je mnogo efikasnije da se on uvede u **stanje smanjene potrošnje**

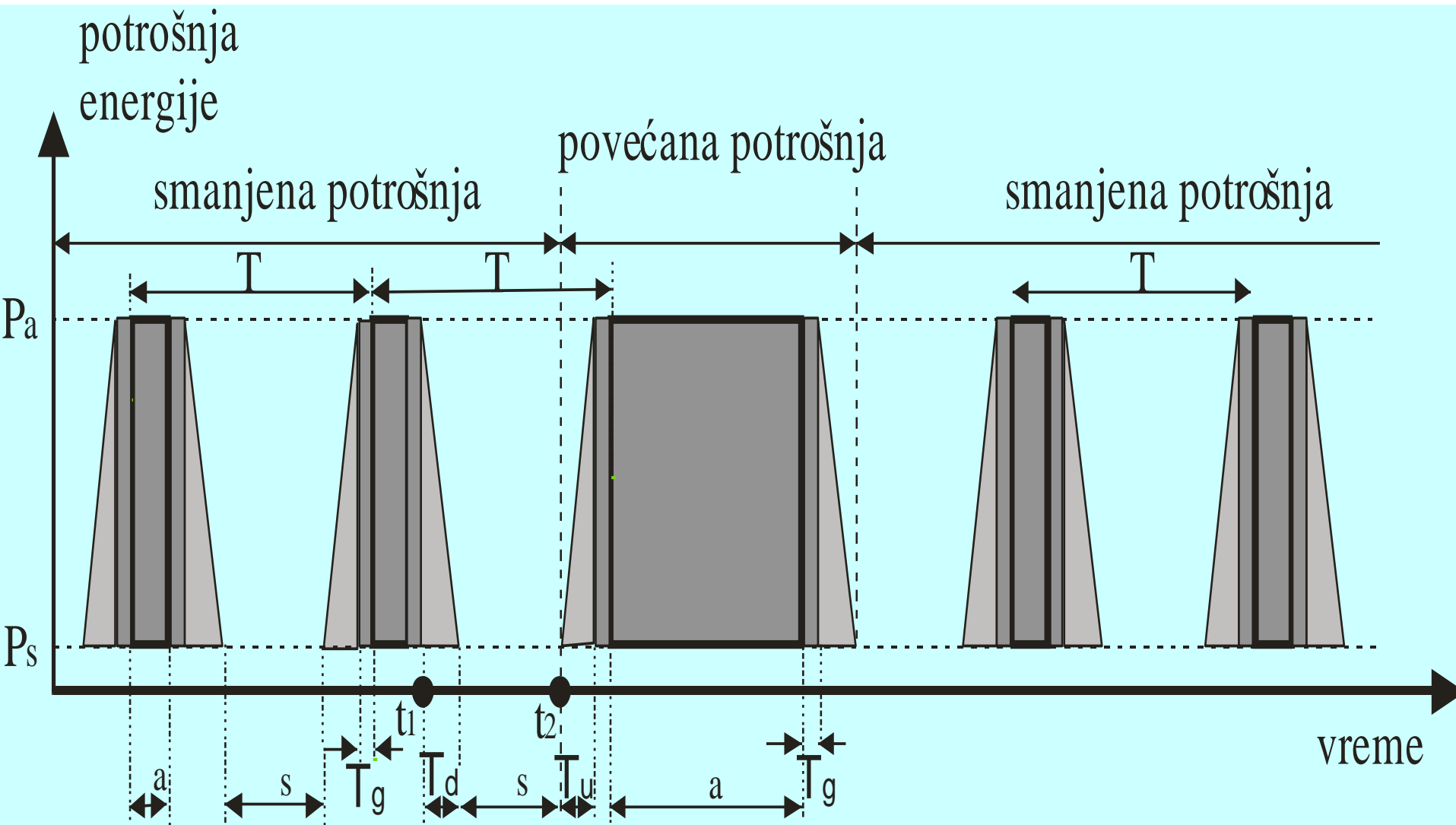
6.4 Profil energetske potrošnje

- Ukoliko dođe do promena u nadgledanom regionu, SČ će biti u stanju **da se ponovo prebaci u aktivno stanje** i tu promenu zabeleži.
- Ova je dobro poznata tehnika još iz standardnih PC računara gde je slična tehnika **Advanced Configuration and Power Interface (ACPI)**
- Ovi režimi mogu se **uvesti za sve komponente** SČ, posebno za MCU, RF primopredajnik, memoriju i senzorsku jedinicu.
- Različiti tipovi SČ-ova obično **podržavaju različite režime rada** sa **različitim energetske karakteristikama**:
 1. **MCU** tipični režimi rada su: **active, idle i sleep,**
 2. **RF primopredajnik**: prijem, slanje, prijem i slanje, oba isključena,
 3. **Senzor i memoriju**: uključeni ili isključeni.
- Uobičajena terminologija je da se govori da je **komponenta u dubljem (deeper) režimu** smanjene potrošnje ako se **manje energije troši.**
- Izbor pravih stanja **se komplikuje** zato što u izboru režima rada utiču dve komponente: **vreme i potrošnja.**
- Uobičajeno je da **dublji režim rada**, koji ima manju potrošnju, **zahteva više vremena da se sistem probudi** i ponovo vrati u aktivni režim

6.4 Profile energetske potrošnje

- Dva pristupa koriste se **za smanjenje energije** koja se troši u SČ:
 1. **Ciklični** (*Duty Cycle*)-sastoji se od **periodičnog aktiviranja SČ** u tačno određenim vremenskim intervalima u kojima SČ odradi sve zadatke
 2. **Adaptivni** (*adaptive*) - ovde je SČ u stanju da **dinamički menja svoj režim rada** u zavisnosti od realnih događaja koje posmatra.
- Kod projektovanja aplikacije, zbog čestog menjanja režima rada SČ, posebnu pažnju treba obratiti na izbor **dva radna parametra**:
 1. **Kašnjenje** (*wake-up latency*) - **vremenski period** koji je potrebno da protekne pre nego se pristupi očitavanju senzora.
 2. **break-even cycle** - **odnos potrošnje energije** između SČ kod koga je aktivirana politika upravljanja u odnosu na SČ koji tu politiku nema.
- U radu SČ-a možemo da razlikujemo dve osnovne faze:
 1. **Faza smanjene potrošnje** - *idle* ili *sleep* režim rada u kome SČ **provede najveći deo svog radnog života** i kome nema promena. SČ se periodično budi i proverava da li došlo do neke promene
 2. **Faza povećanje potrošnje** - jako **intezivne operacije** koje SČ treba da obavi. U tu fazu SČ ulazi **ako detektuje promenu na sensorima**.

6.4 Profile energetske potrošnje



6.4 Profile energetske potrošnje

- Postavlja se prosto pitanje: *U kom trenutku da SČ promeni režim rada i da li je to energetski opravdano?*
- Da bi dali odgovor na ovo pitanje pretpostavimo da je u trenutku t_1 potrebno doneti odluku o tome da li da SČ pređe iz režima povećane potrošnje u režim smanjene potrošnje i tako smanji potrošnju energije u SČ od P_a do P_s , ili da SČ ostane i dalje u aktivnom režimu rada sa povećanom potrošnjim od P_a .
- Ako SČ ostane aktivan i događaj se desi u trenutku t_2 , onda je nepotrebno potrošena energija $E_a = P_a (t_2 - t_1)$ za ceo vremenski period dok se događaj nije dogodio.
- Potrošena energija može se prikazati formulom kao:

$$E_a = T_d P_a + T_s P_a$$

6.4 Profile energetske potrošnje

- Sa druge strane ako u trenutku t_1 SČ odluči da pređe u režim smanjene potrošnje to zahteva dodatni vremenski period T_d , koji je potreban da SČ **pređe iz aktivnog u neaktivni režim rada**.
- Prosečna potrošnja tokom ovog perioda približno je $(P_a + P_s)/2$, a potrošnja SČ tokom neaktivnog režima rada je P_s , sve do trenutka t_2
- Nakon toga potrebno je opet predvideti novi vremenski period, P_u , koji je potreban da se SČ **iz neaktivnog režima rada vrati u aktivni režim**
- U ovom slučaju važi ista pretpostavka kao i za period T_d , tj. da je prosečna potrošnja tokom ovog perioda:
$$E_u = T_u * \frac{P_a + P_s}{2}$$
- Ovde treba dodati i period T_g koji je neophodan **da bi se eliminisala nepodudarnost u vremenima** do koje dolazi zbog frekventne nestabilnosti oscilatora na osnovu kojih se formira vreme
- Ovo vreme je **direktno proporcionalno dužini perioda T** i može se predstaviti sledećom formulom:
$$T_{guard} = 2 * T * s_x$$
 gde je s_x ($\Delta f/f$) relativna **razlika u frekvencijama** dva oscilatora koja služe za formiranje vremena u SČ-ima.

6.4 Profile energetske potrošnje

- Tako sada imamo, da je **energija koja je potrebna da bi se ostvario režim smanjene potrošnje** (*switching mode*) jednaka:

$$\begin{aligned} E_S &= E_d + E_s + E_u + E_g \\ &= T_d \frac{P_a + P_s}{2} + T_s P_s + T_u \frac{P_a + P_s}{2} + 2s_x T_a + T_d + T_s + T_u P_a \end{aligned}$$

- Jasno je da kada želimo da uštedimo energiju, tj. da uvođenje ovog režima smanjene potrošnje bude opravdano, **potrebno je da bude ispunjen uslov** da je $E_a > E_s$.
- Sada može da se izvede uslov koji treba da bude zadovoljen u pogledu **minimalnog trajanja perioda smanjene potrošnje** T_s , da bi se isplatilo da SČ menja svoje režime rada, i to je prikazano sledećom jednačinom

$$T_s > \frac{2ks_x T_a + 2T_{du} + T_{du}}{k(1 - 2s_x) - 1}$$

6.4 Profile energetske potrošnje

gde je $k = P_a / P_s$, tj. predstavlja odnos potrošnje u aktivnom i neaktivnom režimu rada dok je $T_{du} \approx T_d \approx T_u$.

➤ U idealnim uslovima kada je frekvencija oscilatora u oba SČ ista, $s_x=0$, jednačina postaje:

$$T_s > T_{du} \frac{P_s}{P_a - P_s}$$

➤ Na osnovu ovoga možemo da zaključimo:

1. Da bi postigli što veću uštedu energije u SČ, potrebno je da period kada se SČ nalazi u režimu smanjene potrošnje (T_s) bude što duži.
2. Potrebno je da period koji je potreban da SČ pređe iz aktivnog u neaktivni režim rada (T_{du}) bude što kraći
3. Potrošnja energije u neaktivnom stanju, tj. režimu smanjene potrošnje (P_s) treba da bude što manja.

Hvala na pažnji !!!



Pitanja

? ? ?