

5. Primarne baterije i elementi za skladištenje energije

Primarne baterije i alternativni izvori energije (engl. *energy harvesters*) su najčešći izvori energije autonomnih senzora. Skladišne jedinice (sekundarne baterije i superkondenzatori) su važne za konverziju energije. S obzirom na njihove sličnosti, primarne i sekundarne baterije su opisane u ovom poglavlju. Takođe su objašnjeni superkondenzatori i istaknute su glavne razlike između njih i sekundarnih baterija. Predstavljena su jednostavna strujna kola za modelovanje baterija (primarnih i sekundarnih) i kondenzatora. Na kraju je analizirano kombinovano korišćenje baterija i superkondenzatora (*hibridno skladištenje*), kao i njihova primena na autonomne senzore.

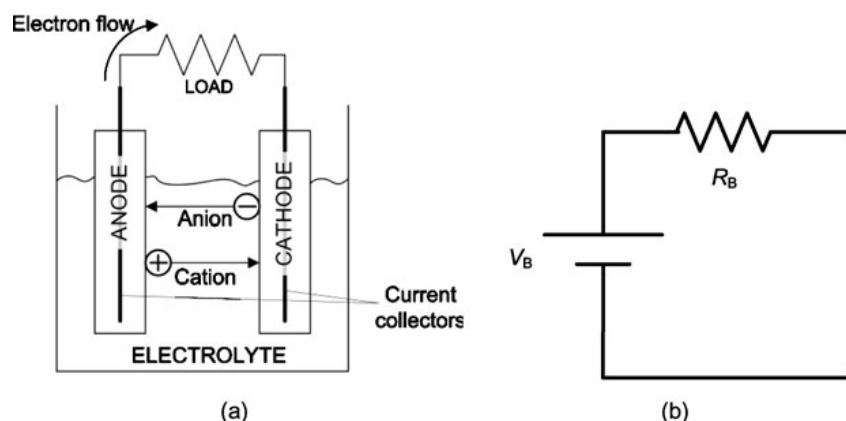
5.1. BATERIJE

Ovaj odeljak počinje opštim pregledom baterija, a zatim se analizira kako profil potrošnje autonomnog senzora može da utiče na napon baterije i njene performanse. Na kraju su opisane najpopularnije primarne i sekundarne baterije.

5.1.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE

Baterije generišu električnu energiju pomoću hemijskih reakcija. One obuhvataju jednu ili više osnovnih elektrohemijskih jedinica, poznatih kao ćelije, koje su vezane redno ili paralelno kako bi se dobio željeni napon i struja, odnosno kapacitet. Svaka ćelija sadrži negativnu elektrodu (*anodu*), pozitivnu elektrodu (*katodu*) i jonski provodnik (*elektrolit*). Anoda i katoda su fizički izolovane, dok elektrolit predstavlja medijum za transfer naelektrisanja (preko jona) unutar ćelije, između anode i katode (slika 5.1. (a)). U praktičnim ćelijama anoda i katoda su mehanički odvojene pregradnim materijalom, koji je propustljiv za elektrolit.

Baterija jednostavno može biti modelovana pomoću osnovnog električnog modela prikazanog na slici 5.1. (b), pri čemu V_B predstavlja napon otvorenog kola a R_B evivalentnu serijsku otpornost. Vrednost V_B opada sa smanjenjem unutrašnjeg skladištenog naelektrisanja (Q). Suprotno tome, vrednost R_B zavisi od hemijskih svojstava, dizajna baterije i temperature. U odeljku 5.2 predstavljen je složeniji model za različite tipove baterija i objašnjena je njegova validnost.



Slika 5.1. (a) Elektrohemijska ćelija pri pražnjenju i (b) osnovni električni model.

Većina baterija se klasifikuje kao *primarne* ili *sekundarne* baterije. Primarne baterije ne mogu da se na jednostavan način dopune pa se stoga obično koriste jednom i zatim se odlažu. One se najčešće koriste kod jednostavnih kućnih uređaja (npr. daljinski upravljači, igračke i satovi) i poželjne su za dugoročnu upotrebu u uređajima koji zahtevaju malu jačinu struje. Suprotno tome, sekundarne baterije mogu lako da se dopune. Sve veća primena prenosnih uređaja (npr. muzičkih uređaja i mobilnih telefona) je zaslužna za razvoj sekundarnih baterija, za koje je razvijen veliki broj hemijskih rešenja.

Sve baterije, bez obzira na tip ili hemijsko rešenje, poseduju zajedničke parametre i osobine koje su opisane u nastavku: kapacitet, napon, gustina energije, gustina snage, samopražnjenje, dubina pražnjenja, status punjenja i temperaturni efekti.

5.1.1.1. KAPACITET BATERIJE

Kapacitet baterije (C) je ukupno električno naelektrisanje koje može biti izvučeno iz potpuno napunjene baterije pod određenim uslovima pražnjenja (stopa pražnjenja, krajnji napon i temperatura). Isporučivi kapacitet baterije je direktno povezan sa količinom katodnih i anodnih materijala (tj. aktivnih materijala) koje baterija poseduje. Za sekundarne baterije proizvođači obično izražavaju kapacitet u Ah. Međutim, za primarne baterije proizvođači obično daju krivu pražnjenja pod određenim opterećenjem (obično, otpornost). Stopa pražnjenja za primarne baterije obično je izražena kao broj časova tokom kojih baterija može da napaja određeno opterećenje (npr. stopa pražnjenja od 10h označava da opterećenje iscrpi bateriju za 10h). Proizvođači koriste multiplikatore ili podmultiplikatore od C kako bi izrazili jačinu struje punjenja ili pražnjenja. Na primer, baterija kapaciteta 100 mAh ($1C$) koja je ispražnjena na $0,2C$ (20 mA) trajaće 5 h. Očigledno je da ovo nije sasvim tačno, pošto je C jedinica naelektrisanja, a ne jedinica za jačinu struje. Ali i pored toga, ovaj sistem ostaje u širokoj primeni. Osim toga, komercijalne baterije imaju normalizovane veličine za opseg kapaciteta.

5.1.1.2. NAPON BATERIJE

Napon otvorenog kola zavisi od standardnog potencijala aktivnih materijala koji su upotrebljeni, kao i od preostale količine naelektrisanja. Litijum je našao široku primenu u anodama primarnih i sekundarnih baterija, pošto nudi najveći standardni potencijal u poređenju sa svim ostalim hemijskim tipovima baterija.

Kriva pražnjenja baterije pokazuje na koji način se napon, koji se isporučuje do određenog opterećenja, menja u odnosu na preostalo Q ili u odnosu na vreme. Ovaj napon takođe zavisi od unutrašnje impedanse baterije, kao i od temperature. Neke baterije predstavljaju ravnije krive pražnjenja, kao što će biti prikazano u nastavku ovog poglavlja.

Nominalni napon je opšteprihvaćena tipična vrednost napona pri pražnjenju. Ipak, nije nužno reprezentativna tačka krive pražnjenja.

5.1.1.3. GUSTINA ENERGIJE I GUSTINA SNAGE

Gustina energije je energija koja se može dobiti iz baterije po jedinici zapremine (Wh/l) ili mase (Wh/kg). Praktična gustina energije zavisi od količine aktivnog materijala unutar baterije (i shodno tome, od C) i od vrste aktivnih materijala (i shodno tome, od nominalnog napona). Pored aktivnih materijala, praktična baterija zahteva elektrolit, strujni kolektor, separator, posudu i priključke (slika 5.1. (a)). Dakle, pošto je veća zapremina, ili masa, potrebna ovim komponentama, pre nego aktivnim materijalima, gustina energije će se smanjiti. Neke baterije su dizajnirane da poboljšaju gustinu energije, obezbeđujući više prostora za aktivne materijale.

Gustina snage predstavlja snagu koja se može izdvojiti iz baterije po jedinici zapremine (W/l) ili mase (W/kg). Ona uglavnom zavisi od unutrašnje impedanse baterije, koja je usko vezana sa površinom strujnog kolektora i provodnosti elektrolita. Neke baterije su specijalno dizajnirane da unaprede gustinu snage kroz smanjenje unutrašnje impedanse. Ove baterije imaju spiralni oblik, čime se maksimizuje površina strujnog kolektora. Baterije sa velikom gustinom snage takođe imaju i visoku struju samopražnjenja. Međutim, baterije dizajnirane za poboljšanje gustine snage imaju manju gustinu energije za iste dimenzije baterije (i obrnuto). Ipak, ovaj kompromis između gustine energije i gustine snage je naglašeniji kod malih baterija. Male baterije generalno pokazuju veću unutrašnju impedansu od većih baterija sa istim hemijskim karakteristikama. Impedansa baterije varira sa ekstrahovanim naelektrisanjem i povećava se sa smanjenjem temperature. Kod sekundarnih baterija impedansa se obično povećava sa povećanjem broja ciklusa.

5.1.1.4. SAMOPRAŽNENJE

Baterije se same prazne kada su skladištene (odnosno kada se ne koriste) zbog pojave neželjenih hemijskih reakcija. *Samopražnjenje* (ili *curenje*) se povećava sa povećanjem temperature. Kod primarnih baterija samopražnjenje definiše njihov životni vek (takođe poznat i kao *rok trajanja* primarnih baterija). Suprotno tome, samopražnjenje sekundarnih baterija tokom skladištenja nema trajni efekat na njihov životni vek, pošto one mogu biti jednostavno dopunjene pre upotrebe. I pored toga, samopražnjenje može biti jednako važno kao i potrošnja snage autonomnog senzora.

5.1.1.5. DUBINA PRAŽNENJA I STATUS PUNJENJA

Dubina pražnjenja baterije ukazuje na količinu naelektrisanja koja je potrošena. Suprotno tome, *status punjenja* ukazuje na nivo preostalog naelektrisanja. Ipak, kako bi se dobili konkrentni podaci o ovim parametrima, baterija mora ostati nepovezana u kolo dovoljno dug vremenski period.

5.1.1.6. TEMPERATURNI EFEKTI

Brzina hemijskih reakcija se povećava sa povećanjem temperature: kao opšte pravilo, brzina reakcije se udvostručava za svako povećanje temperature od 10°C. Ovaj princip ima korisne posledice (npr. baterije pokazuju bolje performanse jer se njihov otpor smanjuje), ali i negativne (npr. smanjenje životnog veka baterije zbog povećanog curenja). Donja granica za opseg radne temperature baterije delom je određena tačkom smrzavanja elektrolita.

5.1.1.7. RAZLIKE IZMEĐU PRIMARNIH I SEKUNDARNIH BATERIJA

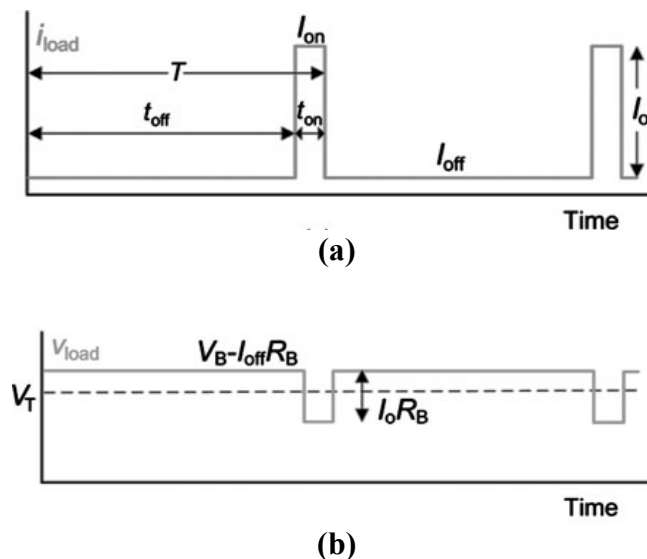
Glavna razlika između primarnih i sekundarnih baterija je u tome što sekundarne baterije mogu da se dopune, dok primarne ne mogu. Pored toga, termin *životni vek* ima drugačije značenje za svaki tip baterije. Kao što je ranije pomenuto, životni vek (ili rok trajanja) primarnih baterija je ograničen njihovim samopražnjenjem, i obično je definisan kao vreme potrebno da baterija dođe do 90% svog početnog kapaciteta. Suprotno tome, životni vek sekundarnih baterija definisan je kao trajanje zadovoljavajućih performansi mereno u godinama (*kalendarski život*) ili u broju ciklusa punjenja/pražnjenja (*životni ciklus*). Kriterijum za sekundarne baterije - kraj životnog veka – definisan je kao vreme potrebno da baterija dođe do 80% svog originalnog kapaciteta. Broj ciklusa punjenja/pražnjenja obično se povećava sa smanjenjem dubine pražnjenja. Na kalendarski život i životni ciklus utiču brojni uslovi, uključujući temperaturu tokom punjenja i pražnjenja, dubinu

pražnjenja, struju punjenja i struju pražnjenja, metod kontrole punjenja, izloženost prekomernom punjenju i/ili prekomernom pražnjenju i uslovi i dužina skladištenja.

Sekundarne baterije generalno imaju manju gustinu energije nego primarne baterije, pošto zahtevaju dizajn koji olakšava punjenje i maksimizuje životni ciklus. Na primer, sekundarne baterije zahtevaju sigurnosne ventile za oslobađanje gasa, u slučaju pojave visokog unutrašnjeg pritiska. One takođe pokazuju i veći stepen samopražnjenja i, shodno tome, nije preporučljivo da se upotrebljavaju kao glavni izvor energije autonomnih senzora.

5.1.2. BATERIJE I AUTONOMNI SENZORI

Autonomni elektronski sistemi i senzorska kola su u osnovi impulsna opterećenja male snage. Model opterećenja može biti pojednostavljen razmatranjem potrošnje struje tokom „sleep” režima (I_{off}) i prosečne potrošnje struje u aktivnom režimu (I_{on}). Ako je ovo impulsno opterećenje povezano na bateriju, napon opterećenja (v_{load}) će opadati tokom vremena aktivnog režima, usled unutrašnje impedanse baterije (R_B na slici 5.1. (a)). Ova situacija je ilustrovana na slici 5.2., gde su T , t_{on} i t_{off} period, interval vremena u aktivnom stanju i interval u „sleep” režimu, respektivno, za impusnu struju (i_{load}), i $I_o = I_{on} - I_{off}$. Prosečna struja je $I_{c,av} = DI_o + I_{off}$, gde je D radni ciklus autonomnog senzora ($D = t_{on}/T$), koji može biti prilagođen (kada god to dozvoljava primena) kako bi se dobila željena struja. Iako je I_{off} nekoliko puta manja od I_{on} , njen doprinos $I_{c,av}$ je dominantan u primenama za koje je $D < I_{off}/I_{on}$. R_B i odgovarajući pad napona imaju neke neželjene efekte na autonomni senzor (uglavnom u pogledu životnog veka) koji su izraženiji pri većim vrednostima R_B . Na primer, autonomni senzori će prestati sa radom kada v_{load} padne ispod minimalno dozvoljenog napona napajanja (V_T na slici 5.2 (b)). Pored toga, određena snaga rasipa se na R_B tokom t_{on} , čime se smanjuje efikasnost kada se energija dobija iz baterije. Dakle, baterije sa malim R_B su poželjne za glavni izvor energije autonomnih senzora.



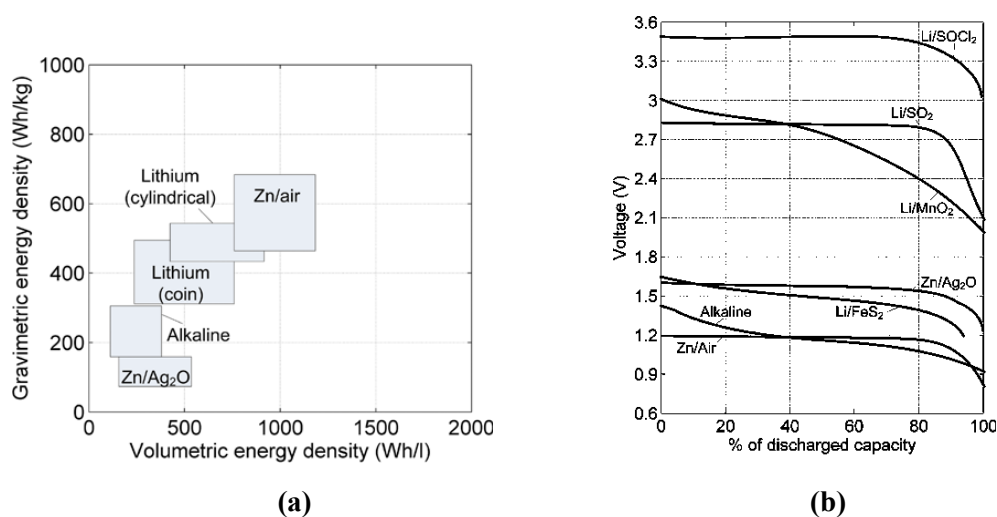
Slika 5.2. (a) Potrošnja struje u senzorskom čvoru i (b) rezultujući profil napona baterije

5.1.3. PRIMARNE BATERIJE

Primarne baterije se dele u četiri kategorije, na osnovu njihovih hemijskih reagenasa:

- Alkalne (Zn/alkaline – MnO_2): ove baterije su najčešće korišćene primarne baterije i koriste se uređajima za svakodnevnu primenu, kao što su daljinski TV uređaji, kalkulatori i igračke.
- Litijumske (Li/XX): koriste se u igračkama i medicinskim uređajima koji zahtevaju veću pouzdanost, duži životni ciklus i malo samopražnjenje.
- Cink – vazduh (Zn/Air): uglavnom se koristi kod slušnih aparata.
- Srebro – oksid (Zn/Ag₂O): uglavnom se koristi u satovima.

Alkalne, cink-vazduh i srebro–oksid baterije imaju anode na bazi cinka, koje ima dobre elektrohemijske performanse, prilično veliki rok trajanja i nisku cenu. Nasuprot tome, litijumske baterije daju najveći standardni potencijal - baterije koje koriste litijumsku anodu imaju veće ćelijske napone.



Slika 5.3. (a) Gravimetrijska gustina energije iscrtana u odnosu na volumetrijsku gustinu energije za najčešće korišćene primarne baterije i **(b)** profili pražnjenja napona pri stopama pražnjenja od 30h do 100h za najčešće tipove primarnih baterija.

Slika 5.3. (a) pokazuje gravimetrijsku gustinu energije u odnosu na volumetrijsku gustinu energije za četiri glavna tipa primarnih baterija. Iako litijumski materijal nudi najveću gustinu energije, baterije cink–vazduh imaju veće gravimetrijske i volumetrijske gustine energije, koje su rezultat posedovanja katode zasnovane na vazduhu, koja nije sadržana unutar ćelije i prema tome omogućuje veći prostor za anodu. Slika 5.3. (b) pokazuje profile pražnjenja napona za najčešće tipove baterija. Cink-vazduh, srebro–oksid i neke litijumske baterije imaju ravan profil pražnjenja.

Osnovne karakteristike zajedničkih primarnih baterija su rezimirane u Tabeli 5.1. Unutrašnja impedansa ovih baterija je obično izmerena pri 1 kHz. Iako baterije cink–vazduh nude veću gustinu energije, njihova velika unutrašnja impedansa čini ih nepodobnim za autonomne senzore. Osim toga, one se izrađuju samo u obliku dugmeta, sa kapacitetima manjim od 1Ah. Dodatno, pošto su cink-vazduh baterije otvorene za vazduh (koji je njihov katodni materijal), one su osetljivije na promene u okruženju (npr. na temperaturu i vlažnost). Srebro-oksid baterije su veoma skupe, dostupne samo u malim kapacitetima i imaju relativno visoku unutrašnju impedansu. Litijumske baterije nude najbolji kompromis između gustine energije i unutrašnje impedanse, ali su obično veoma skupe. Konačno, cene alkalnih baterija su umerene ali imaju relativno malu gustinu energije i zakrivljen profil pražnjenja.

Litijum–jon baterije su specijalni tip litijumskih baterija namenjenih za dugoročno mikroampersko pražnjenje, zbog njihove relativno visoke otpornosti. Životni vek ovih baterija može da

se produži i do 25 godina. One imaju male kapacitete do 0,5 Ah i mogu da rade pri temperaturama od 0°C do 100°C. Obično se koriste u pejsmejkerima. Litijum-tionil hloridne baterije su namenjene za uređaje sa veoma niskom konstantnom strujom i umerenom impulsnom strujom. One mogu da se koriste do 20 godina u širokom opsegu temperatura (-55°C do 155°C).

Tabela 5.1. Osnovne karakteristike sva četiri glavna tipa primarnih baterija

Tip baterije	Alkalna	Litijumska	Cink-vazduh	Srebro-oxid
Unutrašnja impedansa [$m\Omega$]	Niska (desetine)	Umerena (stotine)	Visoka (hiljade)	Visoka (hiljade)
Profil pražnjenja (slika 5.3. (b))	Nagib	Ravan / Nagib	Ravan	Ravan
Rok trajanja ili životni vek (godine)	4 do 5	10 do 20	3 do 4	4 do 5
Radna temperatura [°C]	-20 do 55	-20 do 55*	0 do 50	0 do 55

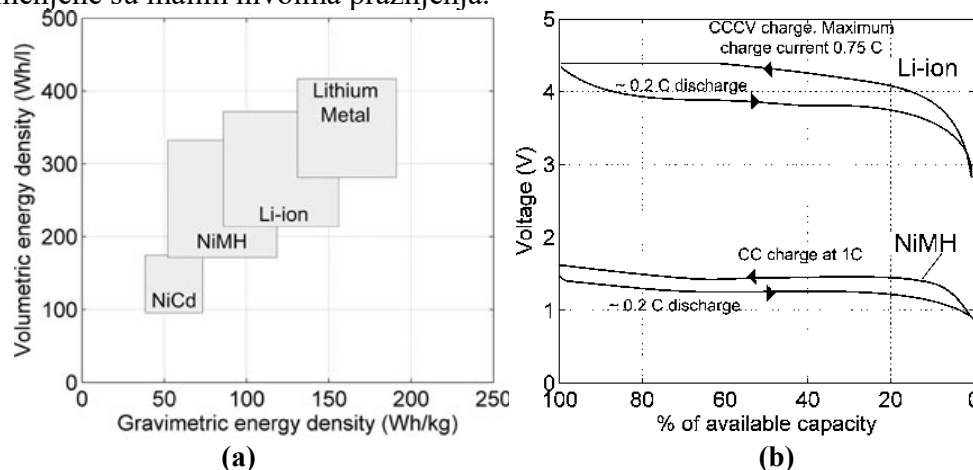
*LiSOCl₂ može da radi u opsegu temperatura od -60 °C do 85 °C

5.1.4. SEKUNDARNE BATERIJE

Najviše primenjivane sekundarne baterije za prenosive uređaje i uređaje malih dimenzija su:

- Litijumske baterije (Li –ion ili Li - polimer)
- Nikl-Metal-Hidridne baterije (NiMH)

Slika 5.4. (a) pokazuje grafikon volumetrijske gustine energije u odnosu na gravimetrijsku gustinu energije za tipične sekundarne baterije. Baterije zasnovane na metal–litijumu nude veće gustine energije ali su prisutni i veći bezbedonosni rizici. Baterije koje koriste legure litijuma u negativnoj elektrodi (tj. baterije LiAl/MnO₂ oblika dugmeta) impliciraju manje rizike, ali uz manju gustinu energije i loš životni ciklus pri dubokoj dubini pražnjenja. Ove baterije se prodaju u obliku kovanice–novčića, i namenjene su malim nivoima pražnjenja.



Slika 5.4. (a) Volumetrijska gustina energije iscrtana u odnosu na gravimetrijsku gustinu energije za uobičajene tipove sekundarnih baterija **(b)** krive punjenja (pri 1 C i 0,75 C) i pražnjenja (pri 0,2 C) za Li–ion i NiMH baterije.

Litijum jonske baterije koriste umetnuta litijumska jedinjenja kao pozitivne i negativne materijale: njihovo ime potiče od razmene litijumskih jona, koje se javlja između pozitivnih i negativnih elektroda kada se baterija poveže na kolo. One su postale najpopularnije litijumske baterije, pošto su relativno bezbedne i nude znatno veće gustine energije. Litijum jonska ćelija, zasnovana na litijum gvožđe fosfatu (LiFePO_4) kao katodi, obezbeđuje veći životni ciklus (proizvođač navodi do 2000 ciklusa), manje bezbednosnih problema i veću toleranciju na prekomerno punjenje. Međutim, gustine energije i naponi ovih ćelija su relativno niski (nominalni napon iznosi 3,2 V). Što se tiče drugih parametara, kao što je unutrašnja impedansa i radna temperatura, ove baterije “oponašaju” standardne Li – jonske baterije. Komercijalne LiFePO_4 ćelije su dizajnirane za industriju električnih vozila i imaju relativno visoke kapacitete (u većini slučajeva $> 5 \text{ Ah}$).

Slika 5.4. (b) pokazuje krive punjenja i pražnjenja za Li-ion i NiMH baterije. Kao što se može videti sa grafika, tokom punjenja je napon baterija veći od napona tokom pražnjenja, što se jednostavno može objasniti efektom unutrašnje impedanse. Li-ion baterije imaju veće opsege napona od NiMH baterija.

Glavne karakteristike tri najčešća tipa sekundarnih baterija navedene su u Tabeli 5.2. Litijum polimerske baterije su Litijum jonske baterije koje koriste elektrolite zasnovane na polimeru, koji omogućavaju tanji pa čak i fleksibilniji dizajn. One mogu biti konstruisane na bezbroj načina kako bi se uklopile u raspoloživi prostor. Preporučljiv metod punjenja zavisi od hemije i može biti odlučujući u dizajniranju bloka za regulisanje energije autonomnih senzora. Profili pražnjenja napona ovih baterija obično pokazuju veći nagib od profila primarnih baterija.

Sekundarne baterije su veoma osetljive na prekomerno punjenje i potpuno pražnjenje, i usled toga obično zahtevaju zaštitna kola. Kada se pune Li – jonske i Li – polimerske baterije, napon je ograničen na 4,1 V ili 4,2 V iz bezbednosnih razloga. Li - ion baterije se najčešće prodaju sa ugrađenim zaštitnim kolima koja isključuju ćeliju u slučajevima kada su struja punjenja ili temperatura ćelije previsoke. Opseg njihove radne temperature zavisi od toga da li su punjene ili pražnjene. Njihovo samopražnjenje se računa na sobnoj temperaturi ($RT = 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) i povećava se sa povećanjem temperature. Uprkos većim početnim troškovima u poređenju sa primarnim baterijama, sekundarne baterije nude manje troškove po ciklusu. Litijumske baterije su obično skuplje od NiMH baterija. Uprkos tome što nemaju izražen memorijski efekat, NiMH baterije bi trebale imati cikluse potpunog punjenja i pražnjenja svakih nekoliko meseci.

Paket baterija uvek mora obuhvatati baterije istog kapaciteta, statusa punjenja i životnog ciklusa kako bi se izbegla promena polariteta bilo koje od ćelija. Pored toga, aktivna i pasivna kola mogu da se koriste za održavanje napona pojedinih ćelija u istom opsegu, iako to troši određenu količinu energije. Ovaj metod se naziva *balansiranje ćelija*.

Baterije tanke prevlake – filma su čvrste litijumske baterije posebno dizajnirane za integraciju na slijumске pločice, jer su veoma tanke (reda veličine mikrometara). Razvijene su Li – jonske i metal – litijumske baterije tankog filma. Ova tehnologija bi mogla omogućiti svakom integrisanom kolu da ima nezavisan ugrađen izvor za napajanje. Ovi elementi mogu izdržati visoke temperature (250°C) tokom kratkih perioda vremena i ne sadrže tečne elemente. Pokazuju životni vek od nekoliko hiljada ciklusa pri sobnoj temperaturi i nekoliko stotina ciklusa pri 150°C . Ove baterije poseduju gustine energije od $100 \mu\text{Wh}/\text{cm}^2$ do $1000 \mu\text{Wh}/\text{cm}^2$, u zavisnosti od katode i gustine snage (pod konstantnim pražnjenjem) koje iznose do $10 \text{ mW} / \text{cm}^2$. Prema tome, unutrašnja impedansa ovih baterija je prilično visoka u poređenju sa Li – jonskim ćelijama, sa kojima su u drugim parametrima prilično izjednačene.

Tabela 5.2. Osnovne karakteristike tri glavna tipa sekundarnih baterija.

Tip baterije	Li – ion	Li polymer	NiMH
Unutrašnja impedansa Z [m Ω]	30 do nekoliko hiljada	40 do nekoliko hiljada	50 do nekoliko hiljada
Profil pražnjenja (slika 5.4. (b))	Pod nagibom	Pod nagibom	Pod nagibom
Preporučljiv metod punjenja	Konstantna struja Konstantan napon (CCCV)	CCCV	Konstantna struja (CC) sa prekidom punjenja
Tolerancija na prekoračenje napona	Rizik od eksplozije	Rizik od oštećenja	Povećanje temperature
Opseg temperature °C - punjenje - pražnjenje	0 do 40	0 do 45	0 do 45*
	-20 do 60	-20 do 60	-20 do 60*
Samopražnjenje (% mesečno)	2	2,5	15 do 25
Životni ciklus (broj ciklusa)	500 – 1000	300 – 500	300 – 500
Kalendarski životni vek (godina)	> 5	> 5	4 – 6

* Ovo su dozvoljeni opsezi temperature; ipak, ćelija treba da radi što je bliže moguće RT-u

Punjenje sekundarnih baterija sa električne mreže zahteva zaštitna kola za baterije. Ova kola dopremaju odgovarajući napon i struju do baterije, u zavisnosti od njene dubine pražnjenja. Kada se energija sakuplja iz okruženja, struja punjenja je obično prilično niska, čime se umanjuju potrebe za kompleksnim kolima za punjenje i zaštitu baterija.

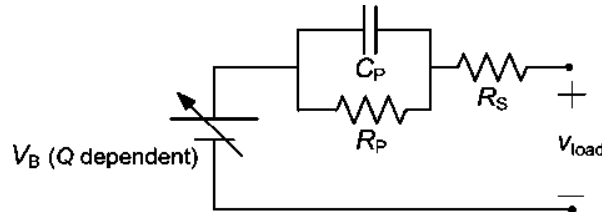
5.2. KARAKTERIZACIJA BATERIJA

Unutrašnja impedansa baterija zavisi od različitih faktora uključujući hemijska svojstva baterije, veličinu i konstrukciju ćelije, broj povezanih ćelija, tip povezivanja i tip kontakta. Proizvođači obično obezbeđuju krive sa naponom baterija koji je u funkciji preostalog kapaciteta baterije za različita konstantna opterećenja (prikazane na slici 5.3. (b) i 5.4. (b)). Međutim, podaci dobijeni iz ovih grafova nisu dovoljni za predviđanje ponašanja napona baterija koje su priključene na impulsno opterećenje, kao što je autonomni senzor (slika 5.2. (a)). Dakle, predviđanje tranzijentnog odziva napona napajanja autonomnih senzora male snage zahteva odgovarajući električni model baterija. Ovaj model može biti koristan za predviđanje trajnosti autonomnih senzora, usled prisustva čestih padova napona (odjeljak 5.1.2.), kao i za merenje napona otvorenog kola kako bi se lako odredila dubina pražnjenja baterije. Poznavanje tranzijentnog odziva baterije omogućuje da se odredi kada je postignut napon otvorenog kola.

Među različitim modelima predloženim za baterije, čini se da su najpouzdaniji električni modeli. Min i Rincon – Mora su predložili model koji obuhvata i napon otvorenog kola kako bi se simulirao tranzijentni odziv korišćenjem dve mreže otpornik – kondenzator (RC). U nastavku će biti objašnjena pojednostavljena verzija ovog modela, koji koristi mrežu sa samo jednim RC parom.

5.2.1. UPROŠĆENI MODEL

Slika 5.5 pokazuje predloženi model baterije za predviđanje tranzijentnog odziva napona baterije pod impulsnim strujnim opterećenjem. Ovaj model je često korišćen za merenja elektrohemijske impedanse, i predstavlja pojednostavljenu verziju Randlesove ćelije. Napon izvora (V_B) modeluje napon otvorenog kola, koji zavisi od Q . Serijski otpor (R_S) potiče od omskih kontakata strujnog kolektora i elektroda, dok paralelni otpornik (R_P) modeluje jonsku otpornost elektrolita. Kondenzator (C_P) modeluje kapacitivni efekat dvostrukog sloja, koji se javlja na površini između elektroda i elektrolita. Napon na kontaktima baterije je jednak naponu koji je dostupan opterećenju (v_{load}).



Slika 5.5. Predloženi model baterije.

Da bi se procenili parametri modela (R_S , R_P i C_P), teorijski se nalizira kako v_{load} varira dok se jedinični impuls struje i_{load} izvlači iz baterije. Impedansa baterije u s-domenu je data kao:

$$Z_B(s) = \frac{R_S \tau s + R_S + R_P}{\tau s + 1} \quad (5.1)$$

pri čemu je

$$\tau = R_P C_P \quad (5.2)$$

Impuls struje baterije može biti izražen u vremenskom i kompleksnom s-domenu, kao što je prikazano u (5.3) i (5.4), respektivno:

$$i_{LOAD}(t) = I_o(u(t) - u(t - t_{on})) \quad (5.3)$$

$$I_{load}(s) = I_o \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{-st_{on}}}{s} \right) \quad (5.4)$$

gde je $u(t)$ step funkcija, a impuls započinje u $t = 0$ i završava se u $t = t_{on}$. Ovaj i_{load} je sličan usamljenom impulsu na slici 5.2 (a) pri čemu je $I_{off} = 0$; shodno tome, $I_o = I_{on}$. Takođe, $I_{off} \neq 0$ može na jednostavan način biti razmotreno dodavanjem konstantne struje na i_{load} . Napon v_{load} se menja prema:

$$\begin{aligned} v_{load}(t) &= V_B - I_o(R_S + R_P) \left\{ \left[1 - \frac{R_P}{R_S + R_P} e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \times u(t) - \left[1 - \frac{R_P}{R_S + R_P} e^{-\frac{(t-t_{on})}{\tau}} \right] \times u(t - t_{on}) \right\} = \\ &= V_B - I_o \left\{ R_S + R_P \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \times u(t) - \left[R_S + R_P \left(1 - e^{-\frac{(t-t_{on})}{\tau}} \right) \times u(t - t_{on}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (5.5)$$

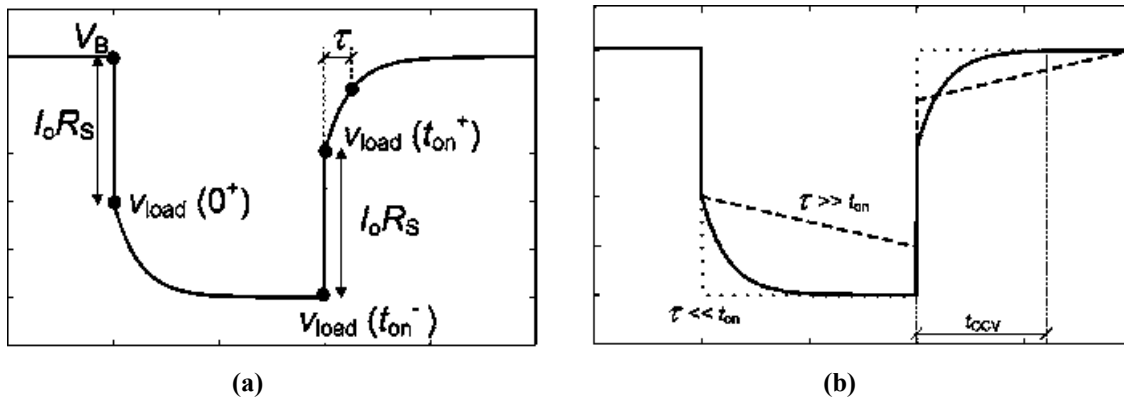
Slika 5.6. (a) pokazuje vremensku predstavu jednačine (5.5). Trenutne promene napona u $t = 0$ i $t = t_{on}$ nastaju usled R_S , dok je eksponencijalno ponašanje tokom preostalog vremena rezultat R_P i C_P . Vrednosti za R_S , R_P i C_P mogu biti procenjene iz (5.5) sa najmanje tri različite tačke. Biraju se tačke koje su označene na slici 5.6. (a). Prvo se izvodi R_S iz inicijalnog pada napona pri $t = 0$; zatim se očitava vrednost τ sa grafikona; i konačno se dobijaju vrednosti R_P i C_P . Analitički izrazi koji odgovaraju R_S , R_P i C_P prikazani su u nastavku u (4.6) - (4.8).

$$R_S = \frac{V_B - v_{load}(0^+)}{I_o} \quad (5.6)$$

$$R_P = \frac{\frac{V_B - v_{load}(t_{on}^-)}{I_o} - R_S}{(1 - e^{-\frac{t_{on}}{\tau}})} = \frac{v_{load}(0^+) - v_{load}(t_{on}^-)}{I_o(1 - e^{-\frac{t_{on}}{\tau}})} \quad (5.7)$$

$$C_P = \frac{\tau}{R_P} \quad (5.8)$$

Na slici 5.6 (b), t_{ocv} uzima u obzir vreme koje mora proći posle deaktivacije impulsne struje pre merenja napona otvorenog kola (V_B) sa celovitom greškom. Što je manja dozvoljena greška, to je duže trajanje t_{ocv} . Tačkaste i isprekidane linije predstavljaju slučajeve $\tau \ll t_{on}$ i $\tau \gg t_{on}$, respektivno. Veće vrednosti τ impliciraju duže trajanje t_{ocv} , ali manje padove napona.



Slika 5.6. Vremenska predstava jednačine (5.5): (a) tačke odabrane za procenu vrednosti R_S , R_P i C_P i (b) karakteristike napona u funkciji od τ .

Kada I_{off} nije zanemarljiva, izmerena vrednost pri $t = 0$ (V_B) jednaka je napon otvorenog kola minus $I_{off}(R_S + R_P)$. Ipak, R_S , R_P i C_P se procenjuju korišćenjem istih jednačina koje su prethodno korišćene. Pretpostavka je tačna kad god je I_{off} prisutna dovoljno dugo pre $t = 0$. Pod ovim okolnostima, napon otvorenog kola i shodno tome dubina pražnjenja, mogu biti dobijeni samo ako je poznato I_{off} . Tačke koje se koriste da bi se izračunalo R_S , R_P i C_P mogu biti odabrane tako da algoritam može biti automatizovan ili čak implementiran u mikrokontroler male snage, korišćenjem prostih jednačina. Dakle, ako je „ponašanje“ struje autonomnog senzora dobro okarakterisano (slika 5.2 (a)), onda R_S , R_P i C_P mogu biti dobijeni preko ponašanja v_{load} za vreme aktivacije autonomnog senzora. U ovom slučaju, informacije o bateriji mogu biti dobijene bez povezivanja autonomnog senzora. Ipak, odgovarajuća merenja zahtevaju da T i t_{on} budu prekrojena prema očekivanoj vrednosti τ .

5.2.2. VERIFIKACIJA UPROŠĆENOG MODELA

Ovde će biti navedeni eksperimentalni rezultati. Testirano je devet tipova različitih baterija (četiri primarne i pet sekundarnih), koje su najzastupljenije. Na osnovu merenja i izraza (5.6) – (5.8) izračunate su vrednosti za R_S , R_P i C_P na sobnoj temperaturi i za potpuno napunjene baterije a zatim su upoređene dobijene vrednosti sa vrednostima koje je specificirao proizvođač. Rezultati merenja i specifikacije proizvođača dati su u tabeli 5.3. (prve četiri su primarne baterije, a poslednjih pet sekundarne).

Kao što je uočljivo iz tabele, baterije cink – vazduh i srebro – oksid, koje imaju manje kapacitete, pokazale su veću unutrašnju impedansu. Za cink – vazduh i alkalne baterije, suma R_S i R_P blizu je vrednosti impedanse koju dao proizvođač tih baterija. Međutim, nisu dostupni podaci proizvođača za preostale dve primarne baterije. Kada pogledamo podatke za sekundarne baterije, možemo uočiti da su baterije sa najnižim kapacitetima dale najveće vrednosti za R_S i R_P .

Baterija ML2016 je takođe testirana pri sobnoj temperaturi i različitim vrednostima napona otvorenog kola. Ovde su se otpornosti povećavale sa smanjenjem napona otvorenog kola, odnosno sa povećanjem dubine pražnjenja, što je standardno ponašanje. C_P i τ se takođe povećavaju sa porastom dubine pražnjenja.

Za 675 Cink – vazduh primarnu bateriju i sekundarnu bateriju NP FE1 Li –ion, otpornost i kapacitivnost su takođe mereni pri potpunoj napunjenosti baterije i na temperaturi od 0°C i – 20 °C. Kao što je očekivano, otpornost se povećala sa padom temperature.

Kako bi se proverio predloženi model prikazan na slici 5.5., upoređen je tranzijentni odziv napona za šest tipova testiranih baterija u odnosu na podatke dobijene putem simulacija (Matlab). Za simulacije su se koristile izmerene vrednosti R_S , R_P i C_P iz tabele 5.3. i impuls struje sa istom amplitudom i širinom kao u eksperimentalnim testovima. Korišćenjem jednačine (5.9) izračunat koren srednje kvadratne greške (ϵ_{rms}) za svaku bateriju. Ova greška je bila manja od 3% za sve baterije, osim za bateriju cink – vazduh. Ovo može biti usled toga što je amplituda impulsa struje koji je korišćen u eksperimentu bila prevelika, što je vodilo do većih grešaka u karakterizaciji.

$$\epsilon_{rms} (\%) = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{(v_{simulated} - v_{experimental})^2}{[V_B - v_{load}(t_{on})]^2} \right)} \quad (5.9)$$

Tabela 5.3. Glavne karakteristike testiranih baterija koje daje proizvođač i odgovarajuće izmerene vrednosti

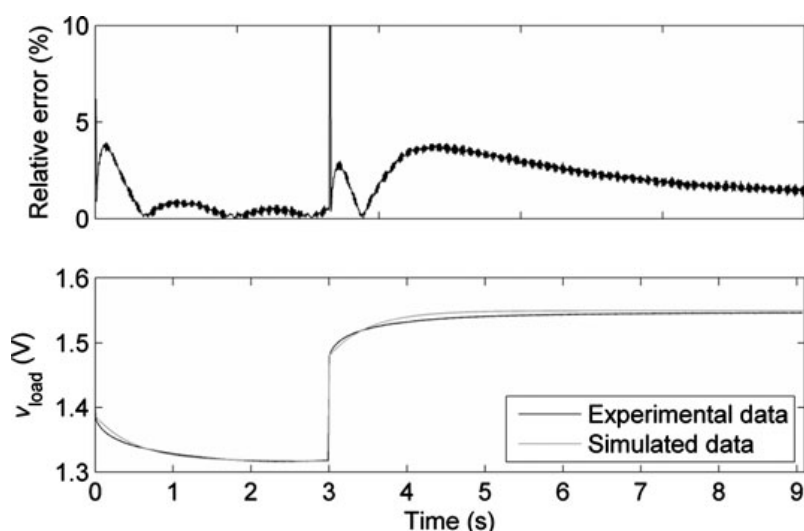
PODACI PROIZVOĐAČA				IZMERENE VREDNOSTI		
Baterija (proizvođač)	Nominalni Kapacitet (mAh)	Nominalni napon (V)	Impedansa na 1000 Hz (mΩ) (podaci od proizvođača)	R_S [Ω]	R_P [Ω]	C_P [mF]
V357 Srebro – oksid (Varta)	165	1,55	Nije specificovano	3.26	1.403	361
675 Cink – vazduh (Duracell)	600	1,4	3000	0.863	3.38	79
E92 Alkaline (Energizer)	1250	1,5	150-300 ^b	0.134	0.026	5450
CR2 Litijum (Panasonic)	1400	3	Nije specificovano	0.35	0.096	320
ML 2016 Litijum	25	3	Nije specificovano	11.24	8.31	1.7

(Maxell)						
GP17AAAH2X^a NiMH (GP)	170	2,4	< 400	0.481	0.524	135
NP FE1 Litijum – jonska (Energizer)	450	3,6	Nije specificovano	0.084	0.171	76
Litijum – polimer (Varta)	550	3,7	130	0.119	0.125	217
GP 130AAM NiMH (GP)	1300	1,2	17-38	0.104	0.076	184

a baterijsko pakovanje koje se sastoji od dve redno povezane ćelije.

b Mereno pri direktnoj struji metodom dualnog impulsa: iz baterije se izvlači impulsna struja od 100 ms, a zatim se procenjuje otpor iz pada napona, na kraju impulsa.

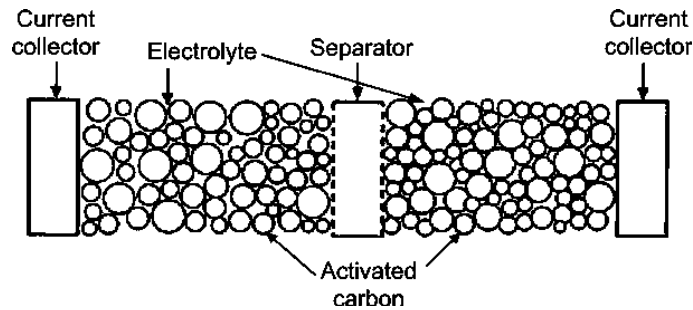
Na slici 5.7. prikazana je relativna greška za srebro – oksid bateriju, kao i uslovi pri kojima je model podešen. Kao što je uočljivo sa slike, relativno velika greška se javlja pri $t = 3$ s, odmah pošto se impulsna struja isključi. Za preostale podatke, ponašanja napona u eksperimentalnim i simuliranim uslovima bila su prilično slična, a relativna greška je bila manja od 4%.



Slika 5.7. Relativna greška i dobijeni i simulirani podaci, za $t_{on} = 3$ s i $I_o = 50$ mA (za srebro – oksid bateriju).

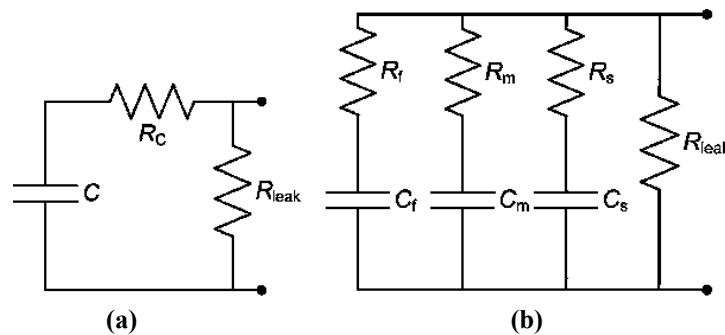
5.3. SUPERKONDENZATORI

Superkondenzatori, koji se još nazivaju *ultrakondenzatori* i *dvoslojni kondenzatori*, odlikuju se elektrodama od aktivnog ugljenika koje imaju veoma velike površine i koje mogu biti odvojene na razmaka reda veličine molekula. Ove karakteristike omogućuju veće kapacitete po jedinici površine u poređenju sa klasičnim kondenzatorima. Pored toga, za razliku od klasičnih kondenzatora, superkondenzatori nemaju dielektrik između dve elektrode, i punjenje/praznjenje se javlja u sloju koji apsorbuje jone, koji se formira na površini elektroda (slika 5.8.). Iako su njihove dve elektrode jednake, kako bi se produžio životni vek, polaritet ne sme biti obrnut. Elektrode su premazane elektrolitima koji omogućuju transfer naelektrisanja putem jona. Postoje dva tipa elektrolita: *organski* i *vodeni*. Organski elektroliti daju veći napon po ćeliji kao i veće gustine energije, dok vodeni elektroliti poseduju manje razlike u naponu od ćelije do ćelije.



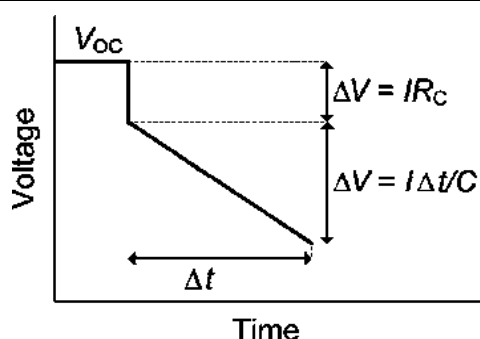
Slika 5.8. Struktura kondenzatora

Slika 5.9. pokazuje jednostavan električni model superkondenzatora, koji se također koristi i za redovne kondenzatore, pri čemu je C nominalna vrednost kondenzatora, R_C modeluje ekvivalentnu serijsku otpornost (ESR) i R_{leak} modeluje struju curenja superkondenzatora. Postoje i kompleksniji modeli, kao što su oni koji uključuju nekoliko RC grana vezanih paralelno. Slika 5.9. (b) pokazuje primer sa tri RC grane i paralelno vezano R_{leak} koje modeluje curenje kod superkondenzatora. Glavna grana ($R_f C_f$) je ekvivalentna CR_C na slici 5.9. (a). Druge RC grane modeluju duže vremenske konstante (od sekundi ili minuta do dana). Shodno tome, potpuno punjenje ili pražnjenje superkondenzatora može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana. Očigledno, sporije RC grane ne mogu da skladište ili isporuče energiju tako brzo kao glavna grana. Ipak, C_f je mnogo veće od preostalog kapaciteta modela, i shodno tome veća je i njegova odgovarajuća dostupna energija. Struja curenja je struja koja prolazi kroz R_{leak} onda kada je kondenzator napunjen ili ispražnjen (tj. kondenzatori svih grana), do nekog fiksiranog napona.



Slika 5.9. (a) Prost model strujnog kola superkondenzatora i
(b) Složeniji model strujnog kola superkondenzatora.

Slika 5.10. pokazuje ponašanje napona superkondenzatora pod opterećenjem sa strujom oblika step funkcije, korišćenjem pojednostavljenog modela na slici 5.9. (a). Prvo R_C prouzrokuje početni pad napona kada se priključi opterećenje, a zatim napon superkondenzatora linearno opada (kao što je slučaj kod klasičnih kondenzatora). Superkondenzatori dizajnirani za "podršku" imaju relativno visoku R_C (veliki pad napona za stepenasta opterećenja), ali takođe imaju visoku vrednost R_{leak} (malo curenje). Suprotno tome, superkondenzatori sa veoma niskim vrednostima za R_C (deset do nekoliko stotina mili oma) imaju relativno visoku vrednost R_{leak} (veliko curenje).



Slika 5.10. Pražnjenje superkondenzatora pod stepenastim strujnim opterećenjem

Za superkondenzatore se dimenzije i struja curenja povećavaju sa nominalnim kapacitetom. Curenje struje takođe raste sa povećanjem temperature (slično baterijama) i sa povećanjem napona. Struja curenja se mora uzeti u obzir u slučaju aplikacija sa prosečno niskom potrošnjom struje. R_C se takođe povećava pri niskim temperaturama, ali u maloj meri.

Maksimalni napon na koji može biti povezan superkondenzator određen je probijem rastvarača u elektrolitu. Maksimalni napon i određena struja punjenja/pražnjenja ne smeju biti premašeni. Osim ovoga, druge specijalne mere ne moraju biti preduzete za punjenje/pražnjenje. Kada se koriste grupe serijski vezanih superkondenzatora, potencijalne razlike između njih mogu dovesti do toga da napon jednog superkondenzatora premaši maksimalni dozvoljeni napon. Dakle, kako bi se napon svih superkondenzatora održao u bezbednom opsegu, mora biti razmotreno balansiranje napona. Ovo se obično vrši balansirajućim otpornikom koji se paralelno vezuje sa superkondenzatorom. Međutim, otpornik za balansiranje povećava curenje superkondenzatora. Kompanija AVX navodi da superkondenzatori sa vodenastim elektrolitima ne zahtevaju balansiranje, i oni bez problema mogu da funkcionišu pri višim naponima, bez dodatnog curenja, rednim vezivanjem nekoliko ćelija. Oni proizvode superkondenzatore sa nominalnim naponima do 16 V.

U tabeli 5.4. navedene su najvažnije karakteristike superkondenzatora. U poređenju sa sekundarnim baterijama (tabela 5.2.), superkondenzatori poseduju gustine energije koje su između jedan i dva puta manje. Međutim, njihove gustine snage mogu biti mnogo veće (i obrnuto, njihove unutrašnje impedanse mogu biti znatno manje). Superkondenzatori imaju neograničen rok trajanja kada se skladište u ispražnjenom stanju i umereno “starenje” kada se čuvaju pri nominalnom naponu. Dodatno, njihova dubina pražnjenja može lako da se dobije merenjem napona otvorenog kola. Međutim, napon linearno opada sa dubinom pražnjenja, što čini složenijom prethodnu fazu regulisanja energije, kao i narednu fazu regulisanja snage. Osim toga, superkondenzatori sa dobrim performansama snage mogu biti prilično skupi. Ovo može biti rešeno istovremenim korišćenjem superkondenzatora i baterija u vidu *hibridnih skladišnih jedinica*, koje mogu pružiti gustine energije i gustine snage koje su podesne za senzorske čvorove WSN-a. U odeljku 5.5. opisane su performanse hibridnih skladišnih jedinica koje se koriste za autonomne senzore.

Tabela 5.4. Osnovne karakteristike superkondenzatora

Kapacitet	Jedinica μAh – stotina mAh (jedinica mF – stotina F)
Gustina energije (mWh/cm^3)	1-10
Serijski otpor	Jedinica od $\text{m}\Omega$ do desetina Ω
Curenje	Jedinica ili desetina od μA

Maksimalni napon (V/ćeliji)	2,3 – 2,75 (organski elektrolit) 1 (vodeni elektrolit)
Karakteristike punjenja	Maksimalni napon ne sme biti premašen
Karakteristike pražnjenja	Linearno
Opseg temperature (°C)	-20 do 70
Broj ciklusa	100.000
“Starenje” (10 godina pri sobnoj temperaturi i nominalnom naponu)	15 – 30 % gubici 40 % povećanja ESR

5.4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U cilju dobijanja parametarskih vrednosti za model kola predstavljen na slici 5.9. (a), potrebno je izvršiti određene eksperimente.

5.4.1. SERIJSKA OTPORNOST

Najrelevantnije parametarske vrednosti superkondenzatora, i izmerene vrednosti R_c su navedene u tabeli 5.5. Kao što je uočeno u tabeli, izmerene vrednosti odgovaraju specifikaciji vrednosti koje su dali proizvođači. Vrednost R_c za prva tri superkondenzatora je veoma visoka, pošto je njihova namena predviđena za back-up aplikacije u kojima se odvođe male struje (reda veličine mikroampera) i pad napona usled R_c je zanemarljiv.

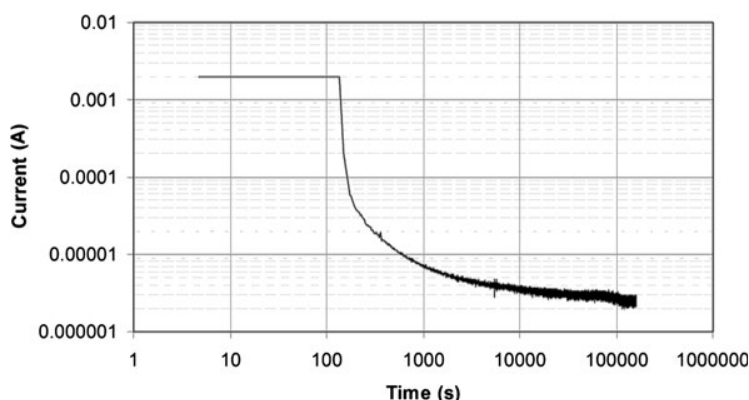
Vrednosti R_c pri temperaturama od 0°C i 25 °C za četiri tipa superkondenzatora prikazane su u tabeli 5.6. Vrednosti pri temperaturi od 25 °C su u saglasnosti sa vrednostima predstavljenim u tabeli 5.5. Kao što je uočljivo u tabeli, R_c je bilo veće pri nižoj temperaturi.

Tabela 5.5. Glavne parametarske vrednosti testiranih superkondenzatora, merene na sobnoj temperaturi

Superkondenzator	Kapacitet [F]	Maksimalni radni napon [V]	R_c [Ω] proizvođač (na 1kHz)	R_c [Ω] izmereno (na 1kHz)
SD series (Panasonic)	0.1	5.5	≤ 75	53
SG series (Panasonic)	0.47	5.5	≤ 30	6.15
SG series (Panasonic)	1	5.5	≤ 30	5.65
HW series (Panasonic)	1	2.3	$< 1^a$	0.215
BZ series (AVX)	0.1	5.5	0.096 ^a	0.095
BZ series (AVX)	1	5.5	0.050 ^a	0.032
PC4 (Maxwell)	4	2.5	0.290 ^a	0.120
PC10 (Maxwell)	10	2.5	0.130 ^a	0.105

5.4.2. STRUJA CURENJA

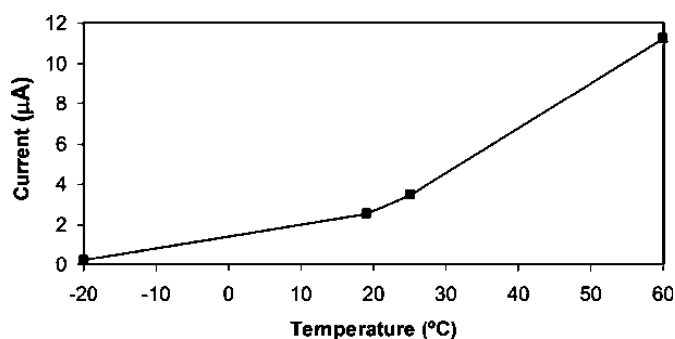
Slika 5.11. pokazuje (u logaritamskoj razmeri) grafik struje koja je merena pri punjenju superkondenzatora, prvo pri konstantnoj struji a zatim pri konstantnom naponu. Kao što se može videti sa slike, struja je prvo imala konstantnu vrednost od 2 mA (konstantno punjenje), a zatim, kada je napon dostigao vrednost od 3,3 V (odnosno glavna grana modela na slici 5.9. (b) je bila u potpunosti napunjena), jačina struje postepeno opada. Superkondenzatoru je potrebno nekoliko dana da se potpuno napuni i struja je progresivno opadala kako se veći broj grana (slika 5.9.) punio. Posle 10^5 sekundi, jačina struje koju je davao izvor energije stabilizovala se na $2,6 \mu\text{A}$, što može da se smatra strujom curenja (tj. strujom koju je izvukao otpornik R_{leak}).



Slika 5.11. Struja koju je isporučio izvor energije tokom punjenja superkondenzatora (BZ serija 0,1 F, AVX) na sobnoj temperaturi

Curenje je mereno pri samo jednoj vrednosti napona. Prema tome, napon je morao biti regulisan kako bi se dobila veza između napona kondenzatora i curenja. Između merenja je bio potrebno određeno vreme kako bi se struja curenja stabilizovala.

Struja curenja pri različitim temperaturama i naponu od 3,3 V je iscrtana na slici 5.12. Kao što je uočljivo sa grafika, struja curenja ostaje manja od $12 \mu\text{A}$, što je za jedan red veličine niže od struje koja je specifikovana od strane proizvođača pri temperaturi od $70 \text{ }^\circ\text{C}$, za pun opseg proizvoda ($< 100 \mu\text{A}$).



Slika 5.12. Struja curenja pri naponu od 3,3 V, iscrtana u odnosu na temperaturu

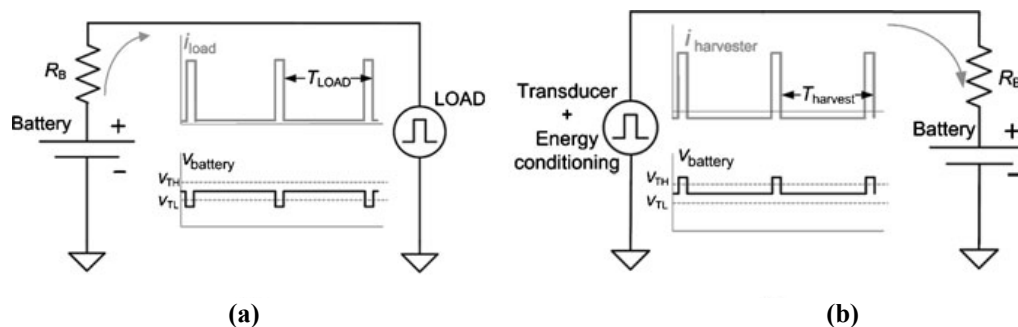
5.5. HIBRIDNI SISTEMI

Pošto su kondenzatori komplementarni sa baterijama, oni se koriste za povećanje energetske sposobnosti baterija, čak i u komercijalnim proizvodima. Skladišne jedinice koje koriste bateriju i kondenzator uporedo poznate su kao *hibridni sistemi*.

U nastavku će biti predstavljena teoretska analiza koja daje smernice za dizajn i odabir najboljih superkondenzatora za poznato opterećenje. Iako je akcenat stavljen na bežične senzorske čvorove, analiza i rezultati su primenljivi i na druge uređaje male snage sa impulsnim profilom potrošnje struje.

5.5.1. POSTAVKA PROBLEMA

Napajanje autonomnih senzora omogućeno je preko primarnih baterija ili prikupljanjem spoljašnje energije i skladištenjem te energije u sekundarne (punjive) baterije. Odabir odgovarajućeg tipa baterije nije jednostavan, usled različitih ograničenja naglašanih u odeljku 5.1. Usled unutrašnjih impedansi baterije (slika 5.1. (b)) i strujnog profila autonomnih senzora (slika 5.2. (a)), pad napona preko terminala baterije se pojavljuje tokom vremena aktivacije (slika 5.2. (b)). Ovaj fenomen je ilustrovan na slici 5.13. (a). Kada napon baterije padne ispod minimalno dozvoljenog napona napajanja (V_{TL} na slici 5.13. (a)), senzorski čvor prestaje sa radom, čime se sprečava izvlačenje raspoložive energije iz baterije i, shodno tome, smanjuje se trajnost čvora. Pored toga, određena snaga (a time i energija) gubi se preko unutrašnje impedanse baterije. Male baterije imaju značajnu unutrašnju impedansu. Jedan način da se smanji unutrašnja impedansa baterija jeste povećanje površine na kojoj se odvija elektrohemijaska reakcija. Međutim, ovo smanjuje gustinu energije i povećava curenje, a samim tim smanjuje trajnost (odeljak 5.1). Alternativno, superkondenzator može biti paralelno vezan sa baterijom da bi se smanjila ekvivalentna impedansa skladišne jedinice.



Slika 5.13. Ponašanje napona baterije (a) pod impulsnim strujnim opterećenjem i (b) kada se energija prikuplja a potom isporučuje kao impulsna struja

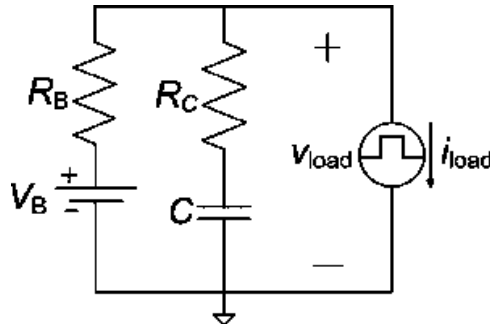
Osim impulsnog ponašanja opterećenja autonomnih senzora, kada se energija prikuplja iz okruženja, struja iz transduktora ili iz faze regulisanja energije takođe može imati impulsni oblik. Da bi se sačuvala energija i povećala efikasnost pri malim strujama, faza kondicioniranja energije ne funkcioniše konstantno. Dakle, snaga iz transduktora se skladišti u kondenzatoru i periodično se prebacuje u vidu jakih strujnih impulsa na bateriju. Kada struja ulazi u bateriju njen napon se povećava ($I_o R_B$) (slika 5.13. (b)), tako da je I_o (koja može biti reda veličine nekoliko stotina miliampera) maksimalna jačina struje koja je „ubrizgana” u bateriju tokom punjenja. Sekundarne baterije obično nisu tolerantne na prepunjavanje (odeljak 5.1.4.), pa dizajneri obično uključuju kolo za zaštitu od prekomernog napona kako bi zaustavili punjenje baterije kada se dođe do gornje granice napona (V_{TH} na slici 5.13. (b)). Dakle, kada baterija radi na naponu približnom ovoj gornjoj granici, ili kada je proizvod $I_o R_B$ veliki, zaštitno kolo će prerano delovati i skladišteno naelektrisanje neće biti veliko koliko je očekivano. Osim toga, određena snaga se disipira na R_B . Prema tome, hibridne skladišne jedinice mogu pozitivno uticati na autonomne senzore tako što će na efikasniji način eksploatisati energiju i tako što će sprečiti prerane prekide struje punjenja.

Za analize opisane u narednim odeljcima, razmotren je slučaj impulsnog opterećenja. Takođe će metodologija jednostavno biti adaptirana na impulsni izvor energije prostim razmatranjem negativne I_o i I_{off} koji takođe uzimaju u obzir potrošnju energije faze regulisanja energije, kada nema prenosa

energije u bateriju. Konačno, prilikom „žetve” energije, obe situacije mogu biti zadovoljene, i prema tome kondenzator koji zadovoljava najrestriktivniji uslov će verovatno biti dovoljan kako za punjenje tako i za pražnjenje baterije.

5.5.2. MODEL STRUJNOG KOLA

Na slici 5.14. prikazan je električni model hibridne skladišne jedinice i senzorski čvor (opterećenje), modelovan kao “slivnik” impulsne struje (slika 5.2. (a)). Baterija je modelovana kolom sa slike 5.1. (a), i superkondenzator kolom sa slike 5.9. (a). R_{leak} nije prikazano na slici 5.14., ali je njen efekat razmotren u jednačinama kao deo struje curenja skladišne jedinice (I_{leak}). U ostatku ovog odeljka predstavljeni su proračuni napona, snage opterećenja, i postignuta produženja trajnosti. Dati su izrazi za odabir odgovarajućeg superkondenzatora za hibridnu skladišnu jedinicu.



Slika 5.14. Električni model hibridne skladišne jedinice i senzorski čvor (opterećenje)

5.5.3. NAPON I SNAGA OPTEREĆENJA

Pod pretpostavkom da je V_B konstantno i da je inicijalni napon kondenzatora jednak V_B , napon opterećenja je dat kao:

$$v_{load}(t) = V_B - V_{off_leak} - I_o R_B \sum_{n=0}^N \left\{ \left[1 - \frac{R_B}{R_B + R_C} e^{-\omega_\beta(t-nT)} \right] \times u(t-nT) - \left[1 - \frac{R_B}{R_B + R_C} e^{-\omega_\beta(t-nT-t_{on})} \right] \times u(t-nT-t_{on}) \right\} \quad (5.9)$$

gde $V_{off_leak} = (I_{off} + I_{leak})R_b$ predstavlja doprinos struja I_{leak} i I_{off} padu napona, $u(t)$ je jedinična step funkcija, n je ceo broj koji predstavlja broj impulsa i $\omega_\beta = \frac{1}{(R_b + R_c)C}$. Napon opterećenja tokom

impulsa N teži:

$$v_{load}(NT + t) = V_B - V_{off_leak} - I_o R_B \left[1 - \frac{R_B}{R_B + R_C} e^{-\omega_\beta t} \left(\frac{1 - e^{-\omega_\beta(T-t_{on})}}{1 - e^{-\omega_\beta T}} \right) \right] - \left(1 - \frac{R_B}{R_B + R_C} e^{-\omega_\beta t} e^{\omega_\beta t_{on}} \right) \times [u(t - NT - t_{on}) - u(t - NT - T)] \quad (5.10)$$

Ova aproksimacija je dovoljno dobra za $NT > \frac{10}{\omega_\beta}$. Na kraju aktivnog vremena impulsa N , napon opterećenja je minimalan i uzima sledeću vrednost:

$$v_{load}(NT + t_{on}) = V_B - \Delta v_{load} \quad (5.11)$$

pri čemu je maksimalni pad napona na unutrašnjoj impedansi baterije (Δv_{load}) dat preko:

$$\Delta v_{load} = V_{off_leak} + I_o R_B \left[1 - \frac{R_B}{R_B + R_C} \frac{e^{-\omega_\beta t_{on}} - e^{-\omega_\beta T}}{1 - e^{-\omega_\beta T}} \right] \quad (5.12)$$

Alternativno, iz (5.10), prosečna snaga opterećenja može biti izračunata kao:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{load} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{load}(NT+t) \cdot i_{load} \cdot dt = \\ &= \frac{I_o \cdot t_{on}}{T} \left[V_B - V_{off_leak} - I_o R_B + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} \frac{(1 - e^{-\omega_\beta(T-t_{on})})(1 - e^{-\omega_\beta t_{on}})}{\omega_\beta t_{on}(1 - e^{-\omega_\beta T})} \right] + I_{off} (V_B - V_{off_leak} - I_o R_B \frac{t_{on}}{T}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

a prosečan gubitak snage (P_{loss}) je:

$$\bar{P}_{loss} = \bar{P}_B - \bar{P}_{load} \quad (5.14)$$

pri čemu je

$$\bar{P}_B = V_B (I_o \cdot D + I_{leak} + I_{off}) \quad (5.15)$$

prosečna snaga koju omogućuje baterija.

Pod pretpostavkom da je $t_{on} \ll T$, i razmatranjem C (shodno tome i ω_β), kao parametra dizajna, (5.12) i (5.13) mogu biti asimptotski procenjeni u tri zone:

- Zona 1: $\omega_\beta t_{on} \gg 1, \omega_\beta T \gg 1$
- Zona 2: $\omega_\beta t_{on} \ll 1, \omega_\beta T \gg 1$
- Zona 3: $\omega_\beta t_{on} \ll 1, \omega_\beta T \ll 1$

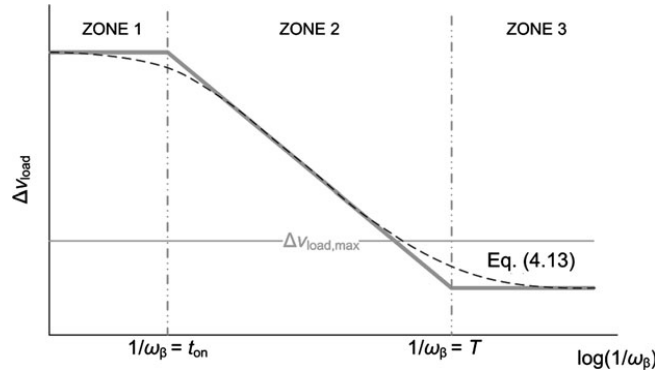
Prelaskom iz zone 1 u zonu 3, Δv_{load} se smanjuje kako se povećava C (i shodno tome, smanjuje se i ω_β).

Procena (5.12) u ove tri zone daje tri asimptote iscrtane na slici 5.15. Odgovarajući izrazi su:

$$\text{Zona 1} \rightarrow \Delta v_{load} = V_{off_leak} + I_o R_B = V_{off_leak} + I_o (R_B \parallel R_C) + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} \quad (5.16a)$$

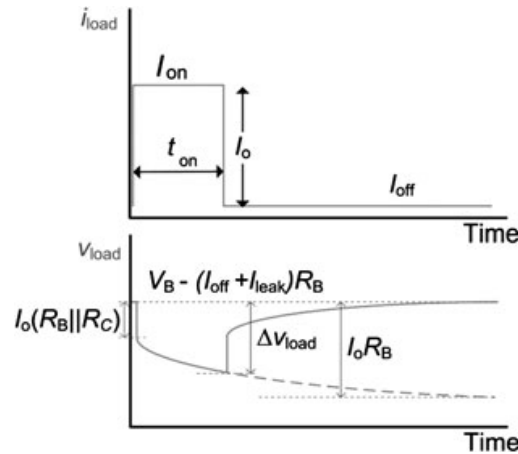
$$\begin{aligned} \Delta v_{load} &= V_{off_leak} + I_o (R_B \parallel R_C) + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} \omega_\beta t_{on} = \\ \text{Zona 2} \rightarrow & \\ &= V_{off_leak} + I_o (R_B \parallel R_C) + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} \omega_\beta DT \end{aligned} \quad (5.16b)$$

$$\text{Zona 3} \rightarrow \Delta v_{load} = V_{off_leak} + I_o (R_B \parallel R_C) + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} D \quad (5.16c)$$



Slika 5.15. Δv_{load} u odnosu na $1/\omega_{\beta}$. Δv_{load} se smanjuje kada se C povećava.

Kao primer, slika 5.16. pokazuje profil napona opterećenja u zoni 2, u kojoj su posmatrani inicijalni pad napona i Δv_{load} . Prelaskom iz zone 1 u zonu 3, sa porastom C opada Δv_{load} , što se dešava i sa maksimalnom strujom koju daje baterija. U zoni 1 hibridna skladišna jedinica se ponaša kao jedinstvena baterija. U zoni 3 pad napona je minimalan, i opada sa smanjenjem vrednosti R_C i D .



Slika 5.16. Tranzijentna karakteristika napona opterećenja pod uticajem impulsne struje opterećenja

Iz (5.13) i (5.15) rezultujući izrazi za gubitak snage u tri zone su:

- Zona 1 $\rightarrow \bar{P}_{loss} = I_o D [V_{off_leak} + I_o R_B] + P_{off_leak}$ (5.17a)

- Zona 2 $\rightarrow \bar{P}_{loss} = I_o D \left[V_{off_leak} + I_o (R_B \parallel R_C) + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} \frac{t_{on}}{2} \omega_{\beta} \right] + P_{off_leak}$ (5.17b)

- Zona 3 $\rightarrow \bar{P}_{loss} = I_o D \left[V_{off_leak} + I_o (R_B \parallel R_C) + I_o \frac{R_B^2}{R_B + R_C} D \right] + P_{off_leak}$ (5.17c)

pri čemu je

$$P_{off_leak} = I_{off} [V_{off_leak} + I_o R_B D] + I_{leak} V_B \quad (5.18)$$

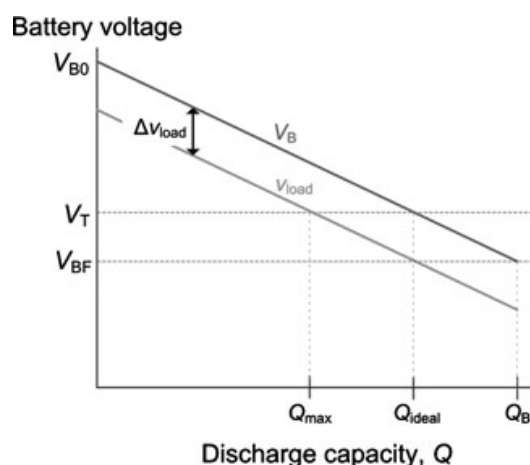
Ovo generiše grafik koji je analogan onom na slici 5.15. Dakle, \bar{P}_{loss} je minimalno u zoni 3.

5.5.4. PRODUŽENJE VREMENA RADA

U odeljku 5.5.3. pretpostavljeno je da je V_B konstantno ali V_B zapravo opada sa smanjenjem Q . Proizvođači obično daju grafike napona baterije koji zavisi od ekstrahovane količine naelektrisanja pri različitim stopama pražnjenja (slike 5.3. (b) i 5.4. (b)). Dakle, vreme rada može biti procenjeno posle pada napona baterije ispod određenog praga napona. Kao aproksimacija prvog reda i u okviru određenog opsega, možemo pretpostaviti da V_B linearno opada sa Q , tako da je:

$$V_B(t) = V_{B0} - kQ(t) \quad (5.19)$$

gde V_{B0} odgovara naponu otvorenog kola baterije koja je u potpunosti napunjena a k (V/As) je konstanta koja može biti izvedena sa grafova pražnjenja.



Slika 5.17. Linearna aproksimacija V_B i v_{load} , koji su iscrtani u odnosu na kapacitet pražnjenja

Slika 5.17. predstavlja (5.19) i (5.11) iscrtane u odnosu na Q . Kao što je uočljivo, razlika između dva grafika se povećava kako se povećava Δv_{load} . Q_{max} je maksimalno naelektrisanje koje može biti ekstrahovano dok napon ne padne na vrednost napona praga (V_T), Q_{ideal} je naelektrisanje koje može biti izvučeno iz baterije pri $\Delta v_{load} = 0$, a Q_B odgovara ukupnom raspoloživom naelektrisanju baterije. V_{BF} odgovara naponu otvorenog kola baterije kada nema naelektrisanja. Kada je $V_T = V_{BF}$, $Q_{ideal} = Q_B$. Relativno ekstrahovano naelektrisanje je dato kao:

$$\frac{Q_{max}}{Q_{ideal}} = 1 - \frac{\Delta v_{load}}{(V_{B0} - V_T)} \quad (5.20)$$

gde Δv_{load} može biti izračunato iz (5.12), i izvršena je sledeća pretpostavka : $V_{B0} > V_T > V_{BF}$. Vreme rada (t_r) može biti procenjeno kao:

$$t_r = \frac{Q_{max}}{DI_o + I_{off} + I_{leak}} \quad (5.21)$$

Dakle, Q_{max} i vreme rada se povećavaju ako se Δv_{load} smanjuje. Vreme rada se takođe povećava sa smanjenjem D . Međutim, za male vrednosti D , doprinos I_{off} i I_{leak} može biti dominantan, pa se t_r ne može dodatno povećavati. Minimalna vrednost Δv_{load} (slika 5.15., zona 3) postiže se kad god je:

$$C \gg \frac{T}{(R_C + R_B)} \quad (5.22)$$

Iz (5.16c) se vidi da kondenzator sa niskom vrednosti R_C dodatno smanjuje Δv_{load} . Smanjenje vrednosti D , postignuto smanjenjem t_{on} ili povećanjem T , takođe dovodi do smanjenja Δv_{load} . Ipak, iz (5.22) može da se zaključi da povećanje T dovodi do veće vrednosti C , što znači veće dimenzije kondenzatora i, za isti tip kondenzatora i proizvođača, povećanje troškova. Radni režim u zoni 2 (slika 5.15.), koji vodi do nižih vrednosti C , podesan je kad god postignuto Δv_{load} omogućuje da se željeno naelektrisanje (Q_{max}) dobije iz baterije. Iz (5.20), maksimalan dozvoljen pad napona (slika 5.15., $\Delta v_{load,max}$) može biti izveden za željenu vrednost Q_{max} . Dakle, optimalni kondenzator (minimalna vrednost) može biti izračunat iz (5.16b) kao :

$$C > \frac{I_o t_{on} \left(\frac{R_B}{R_B + R_C}\right)^2}{\Delta v_{load,max} - V_{off_leak} - I_o (R_C \parallel R_B)} \quad (5.23)$$

što, kada god je $R_C \ll R_B$ može biti aproksimirano na :

$$C > \frac{I_o t_{on}}{\Delta v_{load,max} - V_{off_leak} - I_o R_C} \quad (5.24)$$

Kao što je uočljivo iz ovih jednačina, potrebna vrednost C se povećava sa povećanjem I_o , t_{on} i R_C , i sa smanjenjem $\Delta v_{load,max}$.

Kad god senzorski čvor zahteva konstantan napon napajanja (V_{CC}) ili napon baterije nije u skladu sa opsegom napona senzorskog čvora, potrebno je uključiti i regulator napona između jedinice za skladištenje energije i V_{CC} . Čak i kada nije striktno potreban regulator napona, njegovo korišćenje može da poveća ukupnu efikasnost. Upotreba regulatora napona dovodi do konstantne vrednosti \bar{P}_{load} . Dakle, iz (5.14) se vidi da će \bar{P}_B opadati sa smanjenjem \bar{P}_{loss} . Usled toga će vreme rada dodatno da se povećava. Iz (5.17a) - (5.17c) očigledno je da je \bar{P}_{loss} manje kada se koristi hibridna skladišna jedinica. \bar{P}_{loss} može biti fiksirano na mali deo \bar{P}_{load} , kako bi se smanjilo nepotrebno rasipanje snage na unutrašnju otpornost baterije. Zatim, može biti odabrana odgovarajuća vrednost C iz (5.17b), na sličan način kao što je prethodno urađeno kada se fiksiralo $\Delta v_{load,max}$.

Dakle, kada se baterije velike impedanse povežu paralelno sa odgovarajućim kondenzatorom, njihova snaga i jačina stuje se poboljšavaju, a vreme rada autonomnih senzora može biti produženo, kroz smanjenje unutrašnjeg pada napona (što znači da se više energije može ekstrahovati iz baterije) i smanjenje snage gubitaka (što povećava efikasnost ekstrahovane energije koja je prenetna do opterećenja).

5.5.5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Ovde je ukratko dat pregled eksperimentalnih rezultata. Izvršeni su ubrzani (visoka vrednost D) testovi trajnosti korišćenjem pojedinačnih baterija i skladišnih jedinica. U ovim testovima su I_{off} i I_{leak} bile mnogo niže od srednje potrošnje struje i nisu uticali na dužinu trajanja.

Takođe su izvršeni testovi sa komercijalnim bežičnim senzorskim čvorom. U tabeli 5.6. navedene su glavne karakteristike tri odabrane baterije (jedne primarne i dve sekundarne). R_B vrednosti u tabeli 5.6. su istog reda veličine kao izmerene vrednosti $R_S + R_P$, navedene u tabeli 5.3. Maksimalno odstupanje je uočeno za litijumsku bateriju. Ovo može biti objašnjeno jer su se različite baterije istog tipa koristile za dva eksperimenta. Procenjeno je $\Delta v_{load,max}$ za krive pražnjenja, kako bi se iskoristilo 95 % ukupnog kapaciteta baterije (Q_B) kada napon padne ispod krajnje vrednosti opsega napona (1,4 V za primarnu bateriju i 2 V za sekundarne baterije).

Tabela 5.6. Odabrane baterije i njihove glavne karakteristike

Baterija	Tip	Kapacitet [mAh]	Opseg napona [V]	Nominalni napon [V]	R_B [Ω] proizvođača	R_B [Ω] izmereno	$\Delta v_{load,max}$ [mV]
V357 (Varta)	Primarna srebro - oksid	165	1.6 – 1.4	1.55	6 ^a	4.79	20
ML 2016 (Maxell)	Sekundarna litijumska	25	3.2 – 2	3	Nije specificirano	14	80
GP17AAA2X ^b (GP)	Sekundarna NiMH	170	2.9 – 2	2.4	0.24 ^c	0.93	150

^a Nije omogućeno od strane proizvođača. Vrednosti merene pri 1000 Hz i 100% naelektrisanju.

^b Baterijski paket koji se sastoji od dve redno vezane ćelije GP17AAA.

^c Ova vrednost može biti dobijena udvostručavanjem tipične vrednosti proizvođača za interni otpor GP17AAA baterije pri 1000 Hz.

Poslednjih pet superkondenzatora u tabeli 5.5 razmotreno je za korišćenje u hibridnim skladišnim jedinicama. Izmerene vrednosti R_C za ove superkondenzatore su jedan do dva reda veličine niže od izmerenih vrednosti za R_B . (tabela 5.6)

Zatim je procenjena odgovarajuća vrednost C u hibridnoj skladišnoj jedinici. Za NiMH bateriju dodavanje superkondenzatora ne dovodi do unapređenja performansi, pošto je unutrašnja impedansa već dovoljno niska. Za preostale dve baterije su odabrani odgovarajući kondenzatori. Hibridne skladišne jedinice su uvek imale dužu trajnost u poređenju sa odgovarajućim samostalnim baterijama.

Konačno, dobijen je profil pražnjenja litijumske baterije i odgovarajuće skladišne jedinice kada je senzorski čvor korišćen kao opterećenje. Trajnost samostalne baterije je bila 8h i 50 min. Trajnost hibridne skladišne jedinice je proširena na 10 h i 16 min, pri povećanju od 16%. Zatim je dodat MAX1920 buck konvertor konfigurisan da pruži regulisani izlazni napon blizu 2 V. Za pojedinačnu bateriju, buck konvertor je produžio trajnost od tačke od 7h do na 8h 8 min. Za hibridnu skladišnu jedinicu, vreme trajanja je produženo na 10h i 51 min, pri $V_T = 2$ V. Dakle, rezultujuće produženje trajnosti hibridne skladišne jedinice u poređenju sa pojedinačnom baterijom je bilo 2 h i 43 min (povećanje od 33 %), što je duže nego kada se dc/dc konvertor nije koristio. Strateško korišćenje funkcije isključivanja kod dc/dc konvertora može da smanji potrošnju energije tokom „sleep” režima senzorskog čvora. Ovo bi moglo biti korisno, na primer, kada se primopredajnik napaja preko konvertora, a mikrokontroler se direktno napaja od baterije, čime je omogućena kontrola signala prekida.

Među mnogim tipovima primarnih baterija, litijumske baterije su najpodesnije za autonomne senzore: one nude duži skladišni životni vek, veću gustinu energije i visok napon. Ipak, znatno su skuplje i imaju manji spektar primene od alkalnih baterija.

Dostupne skladišne jedinice uključuju dobro poznate uređaje kao i novije uređaje koji su i dalje u razvoju. Litijum jonske baterije nude veću gustinu energije i manje curenje od drugih baterija, ali su prisutna bezbednosna pitanja i generalno zahtevaju komplikovaniju šemu punjenja. Pored toga, njihov napon može premašiti maksimalni ulazni napon koji prihvataju komercijalni bežični senzori: prema tome, njihova upotreba može zahtevati fazu kondicioniranja snage. Litijumske baterije tankog filma dobijaju na značaju jer nude najbolje karakteristike od svih Li – ion baterija i lako se integrišu u čip. NiMH baterije su jednostavne za upotrebu i jeftine, i njihov metod punjenja može jednostavno da se implementira, ali imaju manju gustinu energije i lošije performanse curenja. Pored toga, njihov nedostatak je memorijski efekat, što može da smanji njihov kapacitet ako se ne koriste pravilno.

Superkondenzatori su ponekad poželjni usled njihovih gotovo neograničenih ciklusnih performansi, ali je njihov napon linearno zavistan od uskladištenog naelektrisanja, i prema tome

njihova upotreba može zahtevati faze kondicioniranja energije i snage, što zauzvrat može dovesti do smanjenja ukupne efikasnosti. Osim toga, njihova gustina energije je i dalje jedan do dva puta manja od gustine energije sekundarnih baterija i superkondenzatori visokih performansi su mnogo skuplji od sekundarnih baterija.

Najbolja opcija za određeni autonomni senzor zavisi od željenih parametara za optimizaciju (npr. dimenzija, cena ili životni ciklus). Kada se energija prikuplja iz okruženja, struja punjenja je obično prilično niska, i shodno tome postoji minimalna potreba za kompleksnim kolima za punjenje i zaštitu. U ovim slučajevima mogu biti razmotrena prosta kola za zaštitu od previsokog ili preniskog napona. Autonomni senzori zahtevaju superkondenzatore sa serijskom otpornošću reda veličine milioma. Pošto superkondenzatori za back-up aplikacije imaju serijske otpornosti od nekoliko Ω do nekoliko desetina Ω , oni nisu pogodni za autonomne senzore.

Hibridne skladišne jedinice obuhvataju paralelno vezane bateriju i superkondenzator. One se koriste za produženje vremena rada bežičnih senzorskih čvorova male snage. Superkondenzatori sa malom serijskom otpornošću prvenstveno pomažu pri korišćenju baterija visoke otpornosti. Usled toga, omogućena je upotreba baterija koje bi u suprotnom a priori bile isključene iz upotrebe.