

# Energetske karakteristike različitih tehnologija pohrane električne energije

---

**Antunović, Mario**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:379744>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**ENERGETSKE KARAKTERISTIKE RAZLIČITIH  
TEHNOLOGIJA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

**Završni rad**

**Mario Antunović**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 07.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime studenta:</b>  | Mario Antunović   |
| <b>Studij, smjer:</b>   | Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija   |
| <b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>   | 4340, 19.09.2019.   |
| <b>OIB studenta:</b>  | 21625693417   |
| <b>Mentor:</b>  | Prof.dr.sc. Damir Šljivac   |
| <b>Sumentor:</b>  | Matej Žnidarec  |
| <b>Sumentor iz tvrtke:</b>  |   |
| <b>Naslov završnog rada:</b>  | Energetske karakteristike različitih tehnologija pohrane električne energije  |
| <b>Znanstvena grana rada:</b>   | <b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>   |
| <b>Predložena ocjena završnog rada:</b>   | Izvrstan (5)  |
| <b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b> | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda<br>Razina samostalnosti: 3 razina |
| <b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>   | 07.09.2020.   |
| <b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>   | 15.09.2020.   |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:         | Potpis:   |
|   | Datum:  |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 19.09.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Mario Antunović

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4340, 19.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Energetske karakteristike različitih tehnologija pohrane električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## SADRŽAJ:

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b> .....  | 1  |
| <b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....   | 1  |
| <b>2. SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE</b> .....   | 2  |
| <b>2.1. Mehanički sustavi za pohranu električne energije</b> .....                                      | 2  |
| <b>2.1.1. Crpno-akumulacijske hidroelektrane</b> .....  | 3  |
| <b>2.1.2. Komprimirani zrak</b> .....   | 4  |
| <b>2.1.3. Zamašnjaci</b> .....  | 5  |
| <b>2.2. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije</b> .....                                | 6  |
| <b>2.2.1. Olovne baterije</b> .....   | 10 |
| <b>2.2.2. Nikal-kadmij baterije</b> .....   | 11 |
| <b>2.2.3. Natrij-sumpor baterije</b> .....  | 12 |
| <b>2.2.4. Litij-ionske baterije</b> .....   | 13 |
| <b>2.2.5. Vanadij-redoks protočna baterija (VRFB)</b> .....   | 14 |
| <b>2.2.7. Cink-brom protočna baterija (ZBB)</b> .....   | 16 |
| <b>2.2.8. Polisulfid-bromid protočna baterija (PSB)</b> .....   | 17 |
| <b>2.3. Kemijski sustavi za pohranu električne energije</b> .....                                       | 17 |
| <b>2.3.1. Vodik (H<sub>2</sub>)</b> .....   | 17 |
| <b>2.3.2. Power-to-gas (P2G)</b> .....  | 19 |
| <b>2.4. Električni sustavi pohrane električne energije</b> .....  | 20 |
| <b>2.4.1. Super-kondenzator</b> .....   | 20 |
| <b>2.4.2. Super-vodljivi magnetski svitak (SMES)</b> .....  | 22 |
| <b>2.5. Toplinski sustavi pohrane električne energije</b> .....   | 24 |
| <b>2.5.1. Otopljene soli</b> .....  | 24 |
| <b>3. ANALIZA PERFORMANSI RAZLIČITIH ELEKTROKEMIJSKIH TEHNOLOGIJA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE</b> ..... | 26 |
| <b>3.1. Punjač/pražnjač baterija Junsu iCharger 4010 Duo</b> .....                                      | 26 |
| <b>3.2. Litij – ion tehnologija</b> .....   | 29 |
| <b>3.2.1. Panasonic NCR18650B</b> .....   | 30 |
| <b>3.2.2. LG 18650HG2</b> .....   | 33 |
| <b>3.2.3. SONY US18650VTC5</b> .....  | 36 |
| <b>3.3. Ni-MH tehnologija</b> .....   | 39 |
| <b>3.4. Usporedba različitih tehnologija baterija</b> .....   | 41 |
| <b>4. ZAKLJUČAK</b> .....   | 42 |
| <b>LITERATURA</b> .....   | 43 |

# 1. UVOD

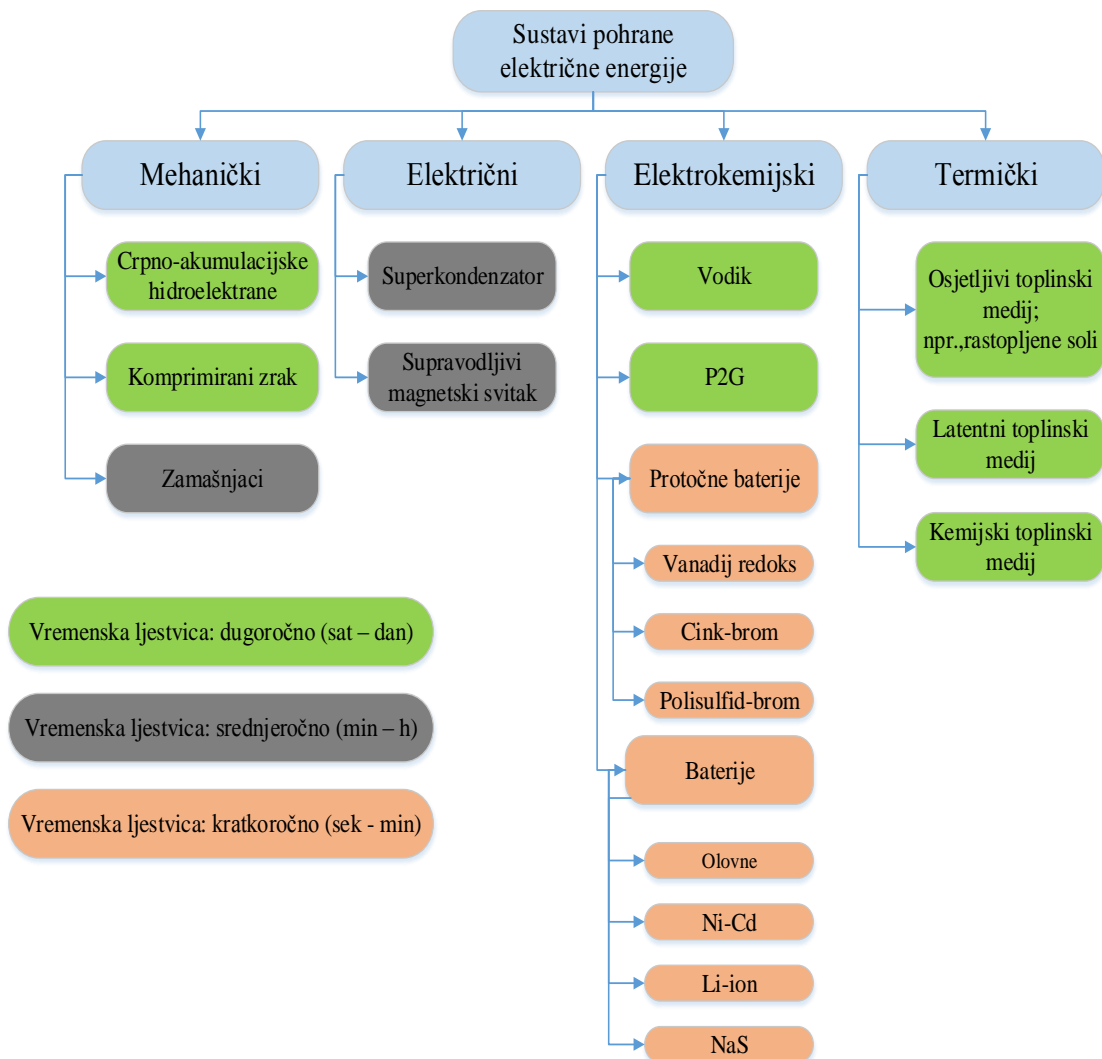
U ovom radu biti će opisani različiti oblici pretvorbe električne energije u svrhu njezine pohrane. Nakon uvoda slijedi poglavlje u kojem će se razmotriti i grafički klasificirati nekoliko dostupnih tehnologija za skladištenje električne energije koje se mogu koristiti u elektroenergetskim sustavima. Također, biti će opisana i njihova načela rada, glavne komponente i najrelevantnije karakteristike. Na samom kraju poglavlja biti će opisana tehnologija pohrane toplinske energije. U trećem poglavlju biti će vidljivi rezultati dobiveni punjenjem i pražnjenjem različitih modela elektrokemijskih spremnika energije. Grafičkom analizom dobiti će se uvid u tijek procesa punjenja i pražnjenja, a proračunom će se odrediti učinkovitost svakog modela. U četvrtom poglavlju će biti prikazan zaključak završnog rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada jeste opisati sustave za pohranu električne energije, njihova načela rada te prednosti i nedostatke. Korištenjem uređaja za punjenje/pražnjenje baterija Jushi iCharger 4010Duo obaviti cikluse punjenja i pražnjenja nekoliko različitih elektrokemijskih spremnika električne energije, prikazati postupak te snimiti rezultate. Grafičkom analizom rezultata prikazati dvije faze punjenja/pražnjenja litij-ionskih baterija te dati uvid u energetske učinkovitost svakog modela baterije na temelju usporednog proračuna.

## 2. SUSTAVI POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električnu energiju je kao takvu teško pohraniti u velikim razmjerima, ali može se pretvoriti u druge oblike energije koji se kasnije mogu iskoristiti za generiranje električne energije. Prema tome, kao što je prikazano na slici 2.1., sustave pohrane električne energije možemo razvrstati na mehaničke, električne, (elektro)kemijske i termičke [1]. Važno je napomenuti da svaki od tih sustava ima ograničenja u pogledu energije koju mogu pohraniti.



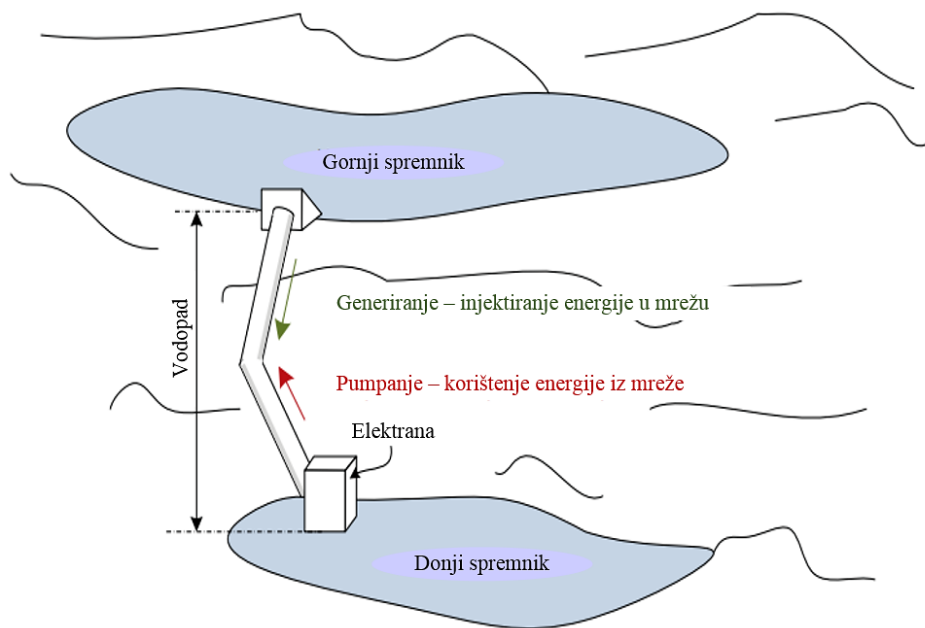
**Slika 2.1.** Grafički prikaz podjele sustava za pohranu električne energije [1]

### 2.1. Mehanički sustavi za pohranu električne energije

Mehanički sustavi za pohranu električne energije s kojima se najčešće susrećemo su crpno-akumulacijske hidroelektrane, komprimirani zrak i zamašnjaci.

### 2.1.1. Crpno-akumulacijske hidroelektrane

Kada govorimo o elektroenergetskom sustavu najčešće korištena i najzrelija tehnologija za pohranu električne energije su upravo crpno-akumulacijske elektrane [1]. Kod klasične crpno-akumulacijske hidroelektrane postoje gornji i donji spremnik vode pa se tako u procesu punjenja voda, korištenjem energije iz mreže, crpi iz nižeg spremnika u viši kao što se može vidjeti na slici 2.2. Zatim se, ovisno o potražnji, voda iz tog spremnika propušta u donji spremnik kako bi se pokrenula turbina koja je povezana na generator i tako proizvela električna energija za mrežu.



**Slika 2.2.** Princip rada akumulacijske hidroelektrane [1]

Glavni problem ove tehnologije je, osim položaja i nadmorske visine, efikasnost kružnog procesa (pumpanje-generiranje) koja je otprilike 0,7 što bi značilo da nam se za svaki uloženi MWh kod pumpanja, vrati 0,7 MWh generiranjem. Pohranjena energija proporcionalno raste s volumenom vode u gornjem spremniku i visinom vodopada prema formuli:

$$E_{PHS} = \rho \cdot g \cdot H \cdot V \quad (2-1)$$

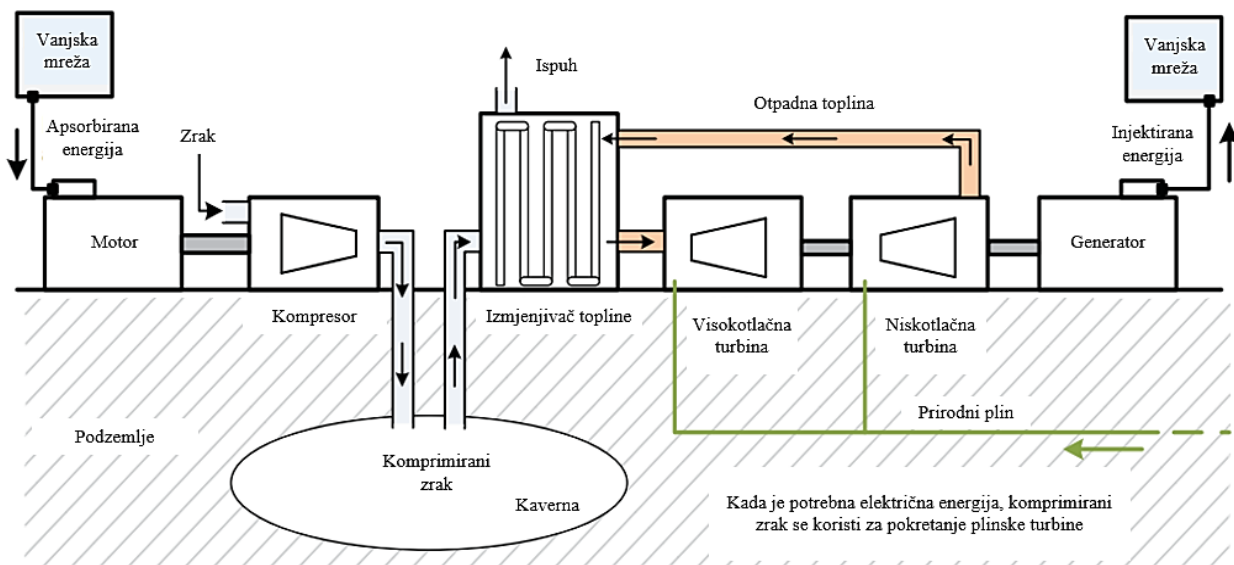
Gdje je  $E_{PHS}$  pohranjena energija u džulima,  $\rho$  gustoća vode,  $g$  akceleracija sile teže,  $H$  je visina vodopada, a  $V$  volumen vode pohranjene u gornjem spremniku. Prednost im je uvijek trajanja (50 godina i više), u usporedbi s baterijama kojima je vijek trajanja od 8 do 15 godina. Ovaj sustav pohrane je moguće realizirati na par načina pa je tako za gornji spremnik je moguće iskoristiti visoke brane, a za donji je moguće potopiti rudnike koji su napušteni. Jedan od najnovijih primjera



takvog rudnika je rudnik Prosper-Haniel u Njemačkoj koji će postati akumulacija crpno-akumulacijske elektrane čija je snaga procijenjena na 200MW. Također postoje rješenja koja koriste rudnike ispod razine mora gdje bi se koristila tehnologija vodenih okna, odnosno voda koja oscilira u oknima i komprimirani zrak kojeg valovi stvaraju u njima bi pokretali turbinu.

### 2.1.2. Komprimirani zrak

Sustav skladištenja energije u komprimirani zrak (slika 2.3.) već je odavno poznata tehnologija koja datira iz 1870.-ih godina kada je korištena za opskrbu kućanstava energijom i za industrijske primjene [1]. Energija se skladišti u obliku komprimiranog zraka na način da se korištenjem električne energije (kada je potražnja za njom niska) zrak komprimira u podzemni spremnik pod tlakom između 40-70 bar-a i s temperaturom približnoj okolišu[1]. Također se zrak može pohraniti u posebno izrađenim spremnicima visoke čvrstoće koji su relativno velikih dimenzija, a samim time im je i cijena visoka pa nisu praktični. Kada je potrebno proizvesti električnu energiju komprimirani zrak se ispušta iz spremnika, spaljuje i širi u visokotlačnoj i niskotlačnoj plinskoj turbini gdje se pretvara u rotacijsku energiju. Turbina preko osovine pokreće generator koji onda proizvodi električnu energiju.



Slika 2.3. Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom [1]

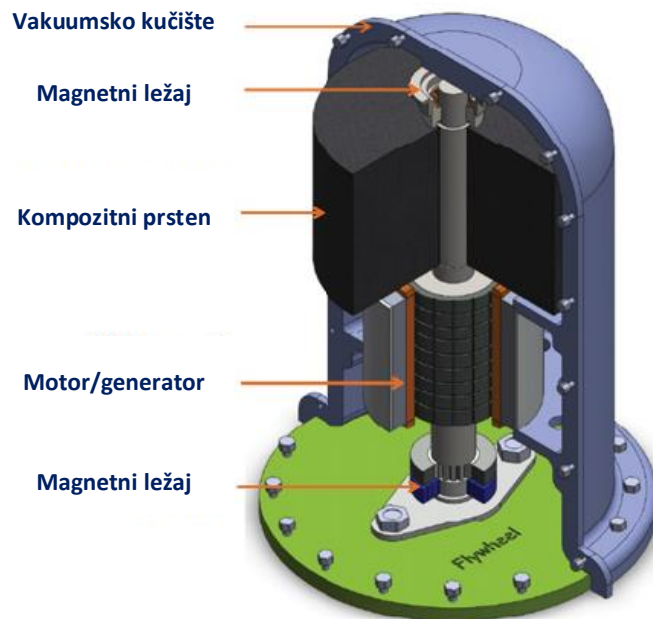
Kao podzemni spremnici mogu poslužiti napušteni rudnici ili slane spilje koje su hermetički zatvorene. Tijekom kompresije zraka sa atmosferskog tlaka na tlak u spremniku (oko 70 bara) dolazi do zagrijavanja zraka, stoga ga je potrebno ohladiti prije pohrane. Oslobođena toplina može

se pohraniti i kasnije upotrijebiti za ekspanziju ili širenje zraka u turbini tijekom proizvodnje električne energije. Ovakav sustav pohrane nazivamo adijabatskim i on ima znatno veću korisnost od dijabatskog, gdje se oslobođena toplina ne pohranjuje, budući da nema potrebe za dodatnim spaljivanjem prirodnog plina prije ekspanzije u turbini. Međutim, jedini ovakav sustav na komprimirani zrak koji se komercijalno upotrebljava je dijabatski, a razlog tomu je njegova jednostavnost. Postoje dvije takve elektrane u svijetu, jedna u Njemačkoj (slane spilje kao spremnik), a druga u McIntoshu u Alabami.

Prednost ovakvih postrojenja je mogućnost pohrane velike količine energije, a nedostatak je učinkovitost (za dijabatski proces tek oko 50 %) i pronalazak prikladne lokacije za spremnik. Vijek trajanja im je približno 40 godina, a energetska učinkovitost 71%[1].

### **2.1.3. Zamašnjaci**

Zamašnjak je rotacijski mehanički uređaj kod kojega se ulazna električna energija pohranjuje u obliku kinetičke energije u rotoru, odnosno rotirajućoj masi, koja se nalazi u okruženju sa vrlo niskim trenjem. Ta rotirajuća masa se ubrzava pomoću elektromotora koji ujedno služi i kao generator kada je rotacijsku energiju potrebno pretvoriti u električnu, odnosno kada se smanjuje brzina vrtnje rotacijskog diska. Nakon toga se zamašnjak puni energijom na način da ga se opet ubrza pomoću elektromotora. Pohranjena energija će biti veća ukoliko je brzina vrtnje veća. Osnovne komponente zamašnjaka prikazane su na slici 2.4., a to su rotirajući prsten koji je spojen na osovinu, magnetni ležajevi i motor koji može raditi i kao generator[1].



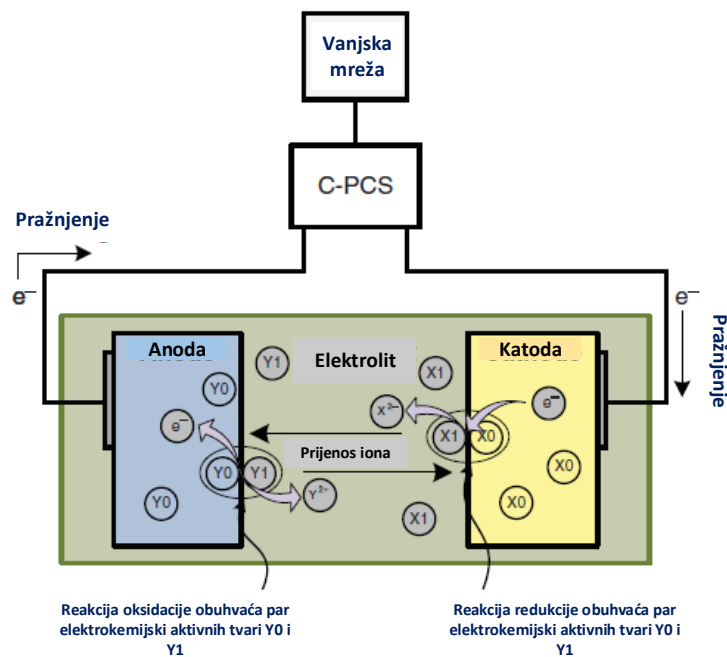
**Slika 2.4.** *Ogledna topologija zamašnjaka[1]*

Kako bi se povećala učinkovitost zamašnjak se smješta u vakuumsko kućište radi smanjenja otpora zraka i koriste se magnetni ležajevi, a rotirajuće tijelo se izrađuje od čvrstih ugljičnih vlakana. Na takav način zamašnjaci mogu ostvariti brzine i do 60000 okretaja u minuti, za razliku od prvih zamašnjaka kojima je brzina bila ograničena tek na nekoliko tisuća okretaja u minuti. Prednosti su im dug životni vijek, gustoća energije i snage, jeftino održavanje i zanemariv utjecaj na okoliš. Ali, s obzirom na veliki koeficijent samo-pražnjenja, njihova upotreba je ograničena samo na kratkotrajnu pohranu. Također se koriste za kontrolu frekvencije i naponsku stabilnost.

## **2.2. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije**

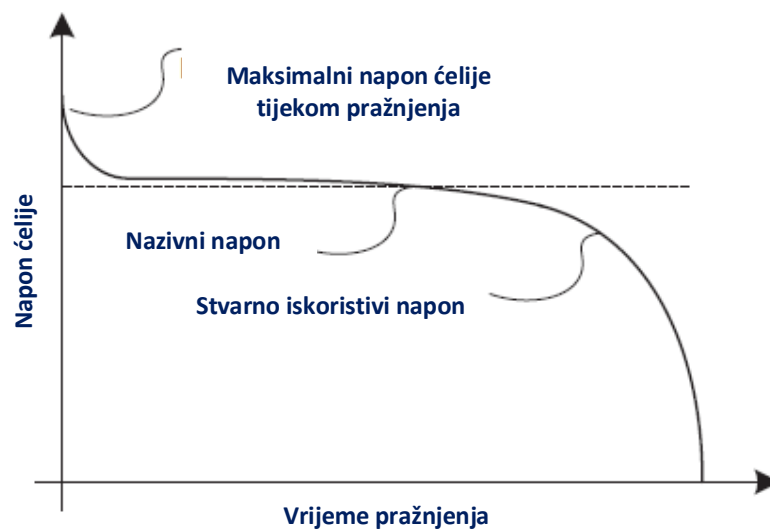
Električna energija se općenito može pohraniti unutar elektrokemijskih spremnika na način da ju se pretvori u kemijsku energiju prilikom punjenja, a zatim se ta ista energija pretvara u električnu tijekom pražnjenja. Ovaj sustav pohrane električne energije se bazira na elektrokemijskim reakcijama redukcije i oksidacije. Svrha baterijske ćelije je da osigura uvjete potrebne za odvijanje tih elektrokemijskih reakcija, čime se ostvaruje protok iona i elektrona između područja u kojima se oni nalaze. Kako bi se omogućio protok iona i elektrona, baterijska ćelija mora imati dva strujna kruga, unutarnji i vanjski. Princip rada baterije je prikazan na slici 2.5., zajedno sa osnovnim dijelovima[1]. Baterijska ćelija sastoji se od dvije elektrode koje su uronjene u elektrolit. Prilikom punjenja negativna elektroda (anoda) prima elektrone, odnosno na

njoj se događa redukcija, a pozitivna elektroda (katoda) gubi elektrone, odnosno na njoj se događa oksidacija. Budući da elektroni ne prolaze kroz elektrolit, do pražnjenja dolazi samo kada je na vanjski strujni krug spojeno trošilo. Tijekom pražnjenja baterije propušta se struja kroz trošilo, odnosno anoda oksidira, a katoda reducira elektrone. Dodavanjem vanjskog izvora može se promijeniti smjer struje i na taj način dolazi do ponovnog punjenja baterije.



Slika 2.5. Princip rada baterije[1]

Napon otvorenog kruga može se izmjeriti voltmetrom i on se razlikuje od napona ćelije kojeg ona ima tijekom pražnjenja koji je prikazan na slici 2.6. [1].

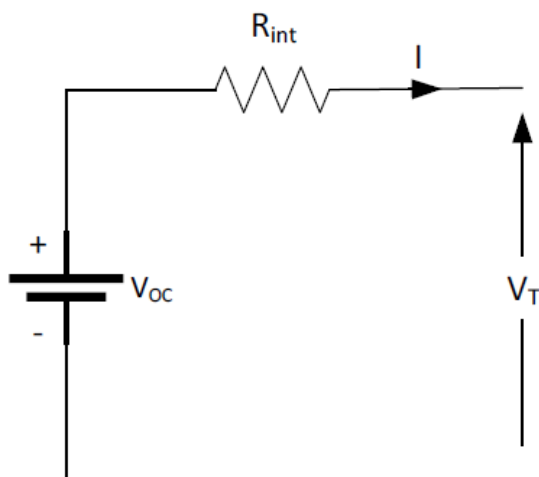


Slika 2.6. Karakteristika naponskog pražnjenja baterijske ćelije[1]

U idealnom slučaju bi napon ćelije u svakom trenutku odgovarao naponu otvorenog kruga, međutim, promjene opterećenja i stanja napunjenosti (engl. state of charge, SoC) utječu na taj iznos napona budući da se kapacitet smanjuje povećanjem opterećenja. Dvije osnovne veličine koje opisuju bateriju jesu njen kapacitet  $C$  izražen u amper-satima (Ah) i napon  $V$  izražen u voltima (V).

Kod jednostavnog modela baterije (slika 2.7.) u obzir se uzima i njen unutrašnji otpor pa je stoga napon na izvodima jednak naponu otvorenog kruga samo u slučaju kada nije priključeno trošilo. Međutim, kada se trošilo priključi, napon na izvodima baterije se računa kao[9]:

$$V_T = V_{OC} - R_{int} \cdot I \quad (2-2)$$



**Slika 2.7.** Jednostavni model baterije[9]

Što je veći unutarnji otpor baterije, veći su gubitci, odnosno manja je maksimalna raspoloživa snaga[9].

Snaga pražnjenja/punjenja sekundarnih baterija izražava se u vatima (W), a računa se kao umnožak struje i napona na izvodima, odnosno:

$$P = I \cdot V_T \quad (2-3)$$

Energija pražnjenja/punjenja dobije se pomoću snage prema formuli:

$$E = \frac{P}{3600} \quad (2-4)$$

Stanje energije (engl.state of energy, SoE) u vat-satima (Wh) dobije se kao umnožak trenutnog kapaciteta baterije i napona na njenim izvodima:

$$SoE = C \cdot V_T \quad (2-5)$$

Da bi ovaj model bio još točniji u obzir se mora uzeti ovisnost napona o stanju napunjenosti, ovisnost otpora o stanju napunjenosti, kao i o temperaturi. Prema tome, gornja formula poprima oblik[9]:

$$V_T = V_{OC} - R_{int}(SoC) \cdot I \quad (2-6)$$

Unutarnji otpor može se izraziti kao[9]:

$$R_{int}(SoC) = \frac{R_0}{SoC^K} \quad (2-7)$$

gdje su  $R_0$ ,  $SoC$  i  $K$  redom: početni unutarnji otpor, trenutno stanje napunjenosti i faktor kapaciteta koji se računa iz krivulja opterećenja koje daje proizvođač.

Trenutno stanje napunjenosti dobije se prema formuli[9]:

$$SoC = 1 - \frac{A \cdot h}{C_{10}} \quad (2-8)$$

Gdje  $A$  predstavlja potrebnu struju u amperima,  $h$  vrijeme rada u satima i  $C_{10}$  kapacitet za 10 sati rada pri referentnoj temperaturi.

Postotno stanje napunjenosti dobije se kao omjer trenutnog kapaciteta baterije i nazivnog kapaciteta baterije:

$$SoC [\%] = \frac{C}{C_n} \cdot 100 \quad (2-9)$$

Bitan parametar kod sekundarnih baterija je i njihova maksimalna struja pražnjenja. Ona se dobije iz iznosa nazivnog kapaciteta i izražena je u C-ovima, npr. 1C odgovara struji koja će bateriju isprazniti u vremenu od jednog sata.

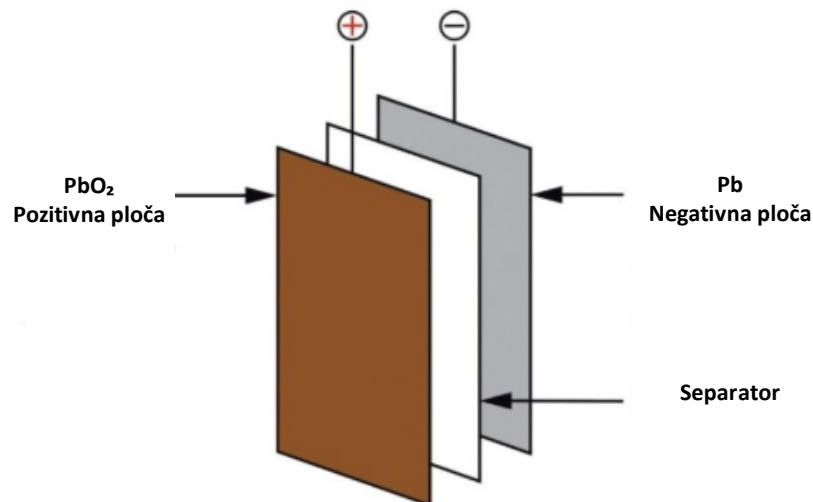
Poznato je da elektrokemijski aktivne tvari, koje se koriste za izgradnju baterijskih ćelija, osiguravaju različite napone otvorenog kruga. S druge strane karakteristike poput starenja, raspona radne temperature i vremenski odziv ovise o tehnologijama koje se koriste. Najstariji tip baterije je olovna, za čije je istraživanje i razvoj utrošeno više od 140 godina, a popularne su još i nikal-kadmij, litij-ion, protočne baterije itd.[1].

### 2.2.1. Olovne baterije

Olovne baterije su najšire korištena tehnologija punjivih baterija na svijetu. Pouzdanost i sigurnost ove tehnologije je na visokoj razini što ih, zajedno sa dobro uspostavljenom bazom dostavljača u svijetu, čini dominantnim baterijama u pogledu MWh proizvodnje. Pored toga, ove baterije se naveliko recikliraju. Dizajnirane su tako da se više od 90% njihovog materijala na kraju radnog vijeka može ponovno iskoristiti. Danas prosječna olovna baterija sadrži preko 80% recikliranog materijala i gotovo svo olovo sačuvano u procesu reciklaže se koristi za proizvodnju novih olovnih baterija[3].

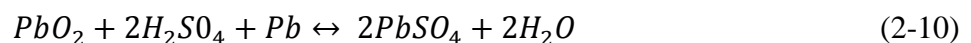
Već dugo vremena se uspješno primjenjuju u području pohrane električne energije, a budući da se njihovo istraživanje provodi već preko 140 godina, poznata su nam njihova ograničenja i mogućnosti.

Kada je napunjena (slika 2.8.), olovna baterija ima dva pola i to jedan pozitivan od olovnog dioksida, a drugi negativan od čistog olova[1]. Polovi su uronjeni u elektrolit i međusobno električki izolirani separatorom, ali unatoč tome on propušta kretanje iona elektrolita.



Slika 2.8. Topologija olovne baterije[1]

Globalne reakcije oksidacije i redukcije u ćeliji mogu se opisati reverzibilnom jednačbom[4]:



Olovni dioksid i olovo reagiraju sa sumpornom kiselinom prilikom pražnjenja čime se smanjuje gustoća elektrolita te dolazi do stvaranja olovnog sulfata na polovima i vode. Obrnuta reakcija se događa prilikom punjenja.

Olovne baterije mogu biti klasičnog otvorenog tipa s tekućim elektrolitom kod kojih je potrebno povremeno nadoknaditi vodu koja ishlapi iz elektrolita i olovne baterije s regulacijskim ventilom koje su zapečaćene i ne zahtijevaju održavanje osim povremenih sigurnosnih provjera, a ventil služi za reguliranje tlaka zraka u bateriji.

Koriste se u gotovo svim vozilima, od onih sa start-stop tehnologijom do električnih vozila. Također se koriste u industriji gdje osiguravaju napajanje telekomunikacijskih uređaja, za regulaciju frekvencije i u fotonaponskim sustavima. Najbolje olovne baterije mogu postići 5000 ciklusa na 70% dubini pražnjenja što im osigurava životni vijek blizu 15 godina intenzivnog korištenja [3].

Jedan od problema koji se javlja kod olovnih baterija prilikom punjenja i pražnjenja je sulfacija. Naime, prilikom tih ciklusa dolazi do nepovratnog taloženja kristala olovnog sulfata na elektrode, odnosno takav olovni sulfid više se ne može procesom punjenja pretvoriti u čisto olovo i olovni dioksid čime je smanjen kapacitet baterije.

### **2.2.2. Nikal-kadmij baterije**

Nikal-kadmij baterije se koriste i u prijenosnoj i u općoj stacionarnoj primjeni. Kod prijenosne primjene baterija je u zapečaćenom obliku, dok je za industrijske primjene otvorenog tipa. Nikal-metal hibrid baterije predstavljaju konkurenciju ovom tipu baterija na polju alkalnih baterija [1].

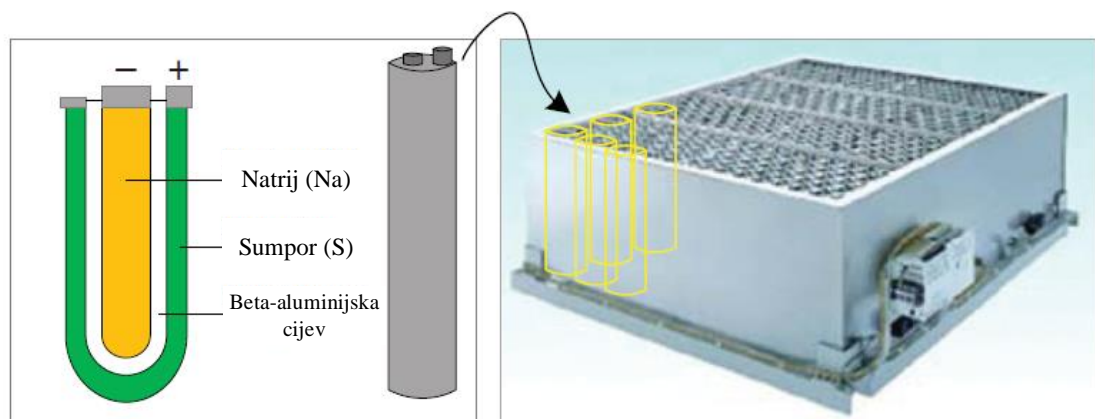
Unatoč cijeni koja je znatno veća u usporedbi s olovnim baterijama, nikal-kadmij baterije imaju dugačak životni vijek (preko 3500 ciklusa), pouzdanost i malo održavanje što ih čini relevantnom tehnologijom. Problem ovih baterija je i materijal od kojeg su izrađene budući da je on toksičan i samim time opasan po zdravlje ljudi stoga ga je potrebno što više reciklirati. Također postoji problem memorijskoga efekta, odnosno ako se baterija konstantno puni prije nego što se potpuni isprazni, smanjit će se njen kapacitet. Ovo se događa samo kod zapečaćenih nikal-kadmij baterija.

Nikal-kadmij baterije ulogu pronalaze u nekim ranijim sustavima za pohranu električne energije, a najznačajniji je Golden Valley Electric Association BESS, veličine 27MW za 15 minuta koji je pušten u pogon 2003. godine. Također se koriste za stabilizaciju vjetro-energetskih sustava, a jedan takav je pušten u pogon na otoku Bonaire-u 2010.godine kao dio projekta u kojem bi otok postao prva zajednica sa cjelokupnom energijom koja dolazi od održivih izvora [3].



### 2.2.3. Natrij-sumpor baterije

Natrij-sumporne (NaS) baterije prvotno je razvio Ford Motor Company u šezdesetim godinama prošlog stoljeća, a potom je tehnologija prodana japanskoj tvrtki NGK.[3] Cijenom usporedive sa olovno-kiselinskim baterijama, predstavljaju jednu od najviše obećavajućih tehnologija za stacionarnu primjenu i upravo u te svrhe tvrtka NGK sada proizvodi baterijske sustave. Građa ćelije se razlikuje od onih koje su prethodno objašnjene u radu. Negativna elektroda sastoji se od otopljenog natrija, a pozitivna od otopljenog sumpora te su međusobno razdvojeni krutim elektrolitom od beta-aluminija što je prikazano na slici 2.9.



**Slika 2.9.** Shematski prikaz ćelije NaS baterije i baterijskog modula[1]

Temperatura baterije se mora održavati većom od 300°C budući da elektrode trebaju biti u tekućem stanju. Na toj temperaturi keramički elektrolit dobro provodi ione koji nastaju kemijskim reakcijama unutar ćelije.[1]

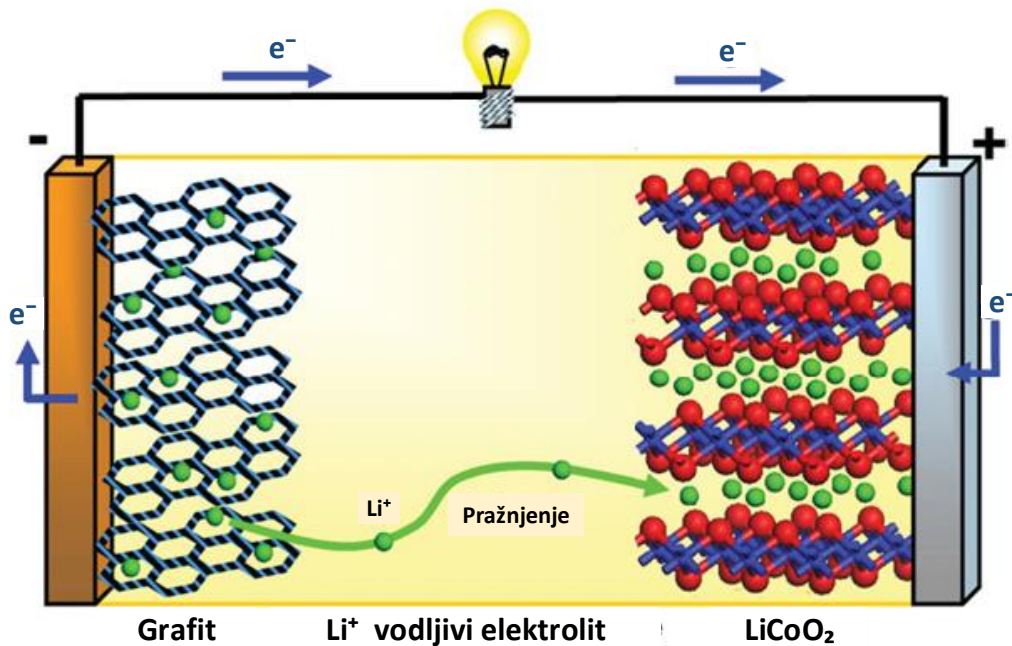
Ove baterije karakterizira visoka korisnost (85%) i gustoća energije ( $151\text{kWh}/\text{m}^3$ ), zajedno sa jako niskim koeficijentom samo-pražnjenja, niskim održavanjem, i gotovo 90% mogućnosti recikliranja[1]. Važno je napomenuti da održavanje radne temperature od oko 350°C ne utječe znatno na smanjenje korisnosti baterije (iako je potrebno uložiti vanjsku energiju za grijanje) jer reakcije koje se odvijaju unutar ćelije oslobađaju toplinu, odnosno egzotermne su.

NaS tehnologija predstavljena je na više od 190 mjesta u Japanu. Preko 270MW pohranjene energije pogodne za 6 sati pokrivanja vrhova opterećenja. U Abu Dhabiju, 15 NaS sustava u koordinaciji pružaju 108 MW pohranjene energije kako bi se odgodila ulaganja u fosilna goriva i pružile usluge odziva frekvencije i upravljanje naponom [3].

## 2.2.4. Litij-ionske baterije

Nakon što je 70-ih godina prošlog stoljeća razvijen koncept litij-ionske baterije, prvi komercijalni proizvod je stvoren 1991.godine.[3]

Kao što možemo vidjeti na slici 2.10., aktivni materijal katode (pozitivna elektroda) je litijev metalni oksid, a anode (negativne elektrode) uglavnom karbon (obično grafit) i atomi litija koji se nalaze unutar elektrode[1]. Vodljivi elektrolit su otopljene soli na bazi litija.



Slika 2.10. Shematski prikaz Li-ion baterijske ćelije[1]

Litij-ionske ćelije se obično ugrađuju u module s višestrukim ćelijama koje su povezane serijski i/ili paralelno, a zatim se moduli povežu u nizove koji su kontrolirani sustavima za upravljanje baterijama. Primjer jednog takvog modula prikazan je na slici 2.11.[1].



**Slika 2.11.** Litij-ionski baterijski sklop u IREC laboratoriju[1]

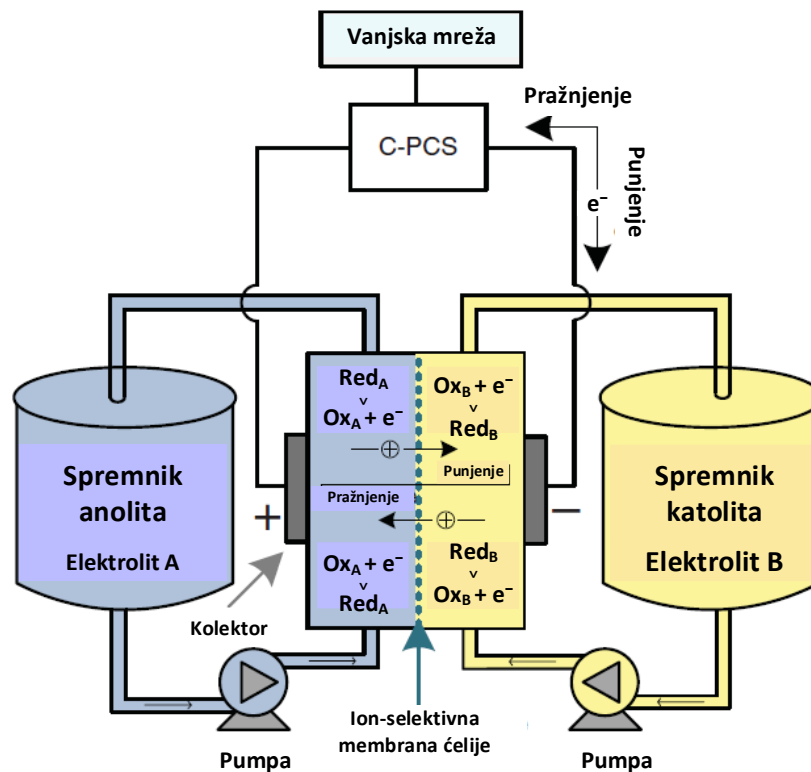
Napon ćelije kod ove tehnologije je visok (doseže 3.7V) što zajedno sa malom težinom litija rezultira vrlo visokom specifičnom energijom (oko 75-125 Wh/kg). Gustoća energije je također vrlo visoka pa su stoga litij-ion baterije prikladne za prijenosne primjene, npr. kod mobitela i elektroničkih uređaja. Dosta truda se ulaže u razvoj materijala koji bi bili prikladni za stvaranje ćelija većih dimenzija sa svrhom pohrane električne energije i primjene u elektromobilnosti. Karakterizira ih i mogućnost brzog punjenja i pražnjenja te relativno visoka učinkovitost od 78%[1].

Za ispravan rad litij-ion baterije zahtijevaju uzak raspon napona i temperature pa se javlja potreba za zaštitnim sklopovima. U nekim prilikama može doći do prekomjernog zagrijavanja što, budući da se koristi zapaljiv organski elektrolit, može uzrokovati eksploziju. Iz tog razloga je kod ove tehnologije potrebno obratiti pozornost na sigurnost i utjecaj na okoliš.

### **2.2.5. Vanadij-redoks protočna baterija (VRFB)**

Princip rada protočnih baterija (slika 2.12.) zasniva se na elektrokemijskim reakcijama redukcije i oksidacije, kao što je to bio slučaj s prethodno opisanim sekundarnim baterijama[1].

Razlika leži u tome što elektrolit ovdje nije trajno pohranjen unutar ćelije nego imamo dva elektrolita u odvojenim spremnicima.



Slika 2.12. Princip rada protočnih baterija[1]

Tijekom punjenja se oba elektrolita pumpaju kroz elektrokemijske ćelije gdje se elektrokemijski aktivni materijal otopljen u elektrolitu A oksidira na negativnoj elektrodi, a onaj u elektrolitu B reducira na pozitivnoj elektrodi[1]. Obrnuti proces se odvija procesom pražnjenja.

Vanadij-redoks protočna baterija pohranjuje energiju pomoću iona vanadija u različitim oksidacijskim stanjima, pri čemu svaki od njih ima različit broj iona oko jezgre. U negativnoj polu-ćeliji nalaze se  $V^{2+}$  i  $V^{3+}$ , a u pozitivnoj polu-ćeliji  $V^{4+}$  i  $V^{5+}$ . Te aktivne kemijske tvari su otopljene u sumpornoj kiselini koja služi kao elektrolit i pohranjene su u dva različita spremnika. Elektrode koje se nalaze u različitim odjeljcima ćelije su na bazi ugljika. Pulu-ćelije su odvojene propusnom membranom od polimera koja dopušta difuziju iona vodika.

Prilikom pražnjenja ion vanadija u negativnoj polu-ćeliji  $V^{2+}$  oksidira i pretvara se u  $V^{3+}$  pri čemu se otpušta elektron u vanjski krug. U pozitivnoj polu-ćeliji ion  $V^{5+}$  (u obliku  $VO_2^+$ ) prima taj elektron iz vanjskog kruga (reducira) i nastaje  $V^{4+}$  u obliku  $VO^{2+}$ . Pri tome ioni vodika difundiraju kroz probusnu membranu. Tijekom punjenja događa se obrnuti proces, a rezultat je napon ćelije otvorenog kruga od 1.4V – 1.6V. Uloga pumpi je da otopina elektrolita može strujati

ćelijom te prolazeći jedna pokraj druge, uz propusnu membranu, stvaraju naboj tijekom kretanja elektrona naprijed/nazad pri punjenju i pražnjenju.

Radna temperatura ovih baterija je između 10 i 40°C, a primjenjuju se i pomoćni rashladni sustavi u slučaju da temperatura okoline premaši 40-45°C što im daje prednost budući da sustav može ostati u pogonu[3]. Brojne prednosti ih čine vodećom tehnologijom za pohranu električne energije, a neke od njih su: pohrana energije korištenjem elektrolita (za razliku od npr. litij-ionskih gdje je potreban veći broj ćelija za povećanje kapaciteta pohrane, ovdje je to moguće povećanjem količine elektrolita i veličine spremnika), elektrolit nije zapaljiv zbog visokog udjela vode, mogućnost pražnjenja do kraja bez utjecaja na performanse baterije, mogućnost ekstrahiranja vanadija i recikliranja ostalih komponenata te dug vijek trajanja.

Trenutno je instalirano preko 100 postrojenja s ovom tehnologijom sa procijenjenim kapacitetom preko 209 800 kWh energije[5].

### **2.2.7. Cink-brom protočna baterija (ZBB)**

Cink-brom protočna baterija predstavlja hibridnu verziju protočne baterije. Sastoji se od dva različita spremnika u kojima se nalaze vodeni elektroliti s otopljenom cink-bromid soli i odvojeni su mikro-poroznom poliolefinskom membranom. Ti elektroliti se pumpaju u različitim odjeljcima i struje kroz elektrode koje su načinjene od kompozita ugljika i plastike (zbog korozije).

Tijekom punjenja se debeli sloj metala cinka nakuplja na negativnu elektrodu, a u međuvremenu se ioni bromida pretvaraju u brom na pozitivnoj elektrodi gdje reagira sa organskim otapalima iz elektrolita i tako se stvara gusto ulje koje tone na dno spremnika katolita. To ulje kasnije treba biti pomiješano s ostatkom katolita kako bi se omogućilo pražnjenje. Tijekom pražnjenja metal cinka oksidira i otapa se u tekućem elektrolitu. Otpuštaju se dva elektrona koja prolaze vanjskim krugom i dolaze do katode gdje molekule broma reduciraju i nastaju ioni bromida koji su topivi u elektrolitu[3].

Prednost ove tehnologije je visok napon ćelije u praznom hodu (oko 1,7V), dobivanje dva elektrona od jednog atoma cinka što rezultira visokom gustoćom energije. Međutim, materijali za izradu su skupi i brom je iznimno otrovan prilikom udisanja. Kao i kod vanadij protočnih baterija, moguće je korištenje aktivnih sustava hlađenja kada temperatura okoline premaši 35 °C. U usporedbi s vanadij-redoks protočnim baterijama, imaju veću specifičnu energiju (70-90 Wh/kg) [1], ali i dalje su ograničene na stacionarne primjene.

### **2.2.8. Polisulfid-bromid protočna baterija (PSB)**

Ova vrsta protočne baterije sadrži dva različita elektrolita koja su pohranjena u odvojenim spremnicima. U području anode nalazi se natrijev polisulfid, a u katodnom području natrijev bromid. Između ta dva elektrolita odvija se reverzibilna kemijska reakcija, a odvojeni su separatorom koji je načinjen od poliolefinskih listova. Kao i kod cink-brom protočne baterije, elektrode su izrađene od ugljično-plastičnog kompozita.

Tijekom procesa pražnjenja natrijev polisulfid u anodi oksidira pri čemu gubi elektrone koji odlaze u vanjski krug i smanjuju broj aktivnih kemijskih tvari u katodi. Polimerni separator dopušta razmjenu natrijevih iona između dva spremnika. Napon između elektroda može postići iznos od 1,5V[1].

Kao i kod ostalih protočnih baterija, kapacitet pohrane im ovisi o volumenu spremnika (elektrolita u njemu), prikladne su za pohranu na duže razdoblje zbog izrazito malog koeficijenta samo-pražnjenja. Ne zahtijevaju previše održavanja iako, za razliku od vanadij redoks protočnih baterija, sadrže dva različita elektrolita između kojih dolazi do izmjene iona natrija. Zbog izrazito niske specifične energije, ove baterije su ograničene na stacionarne primjene.

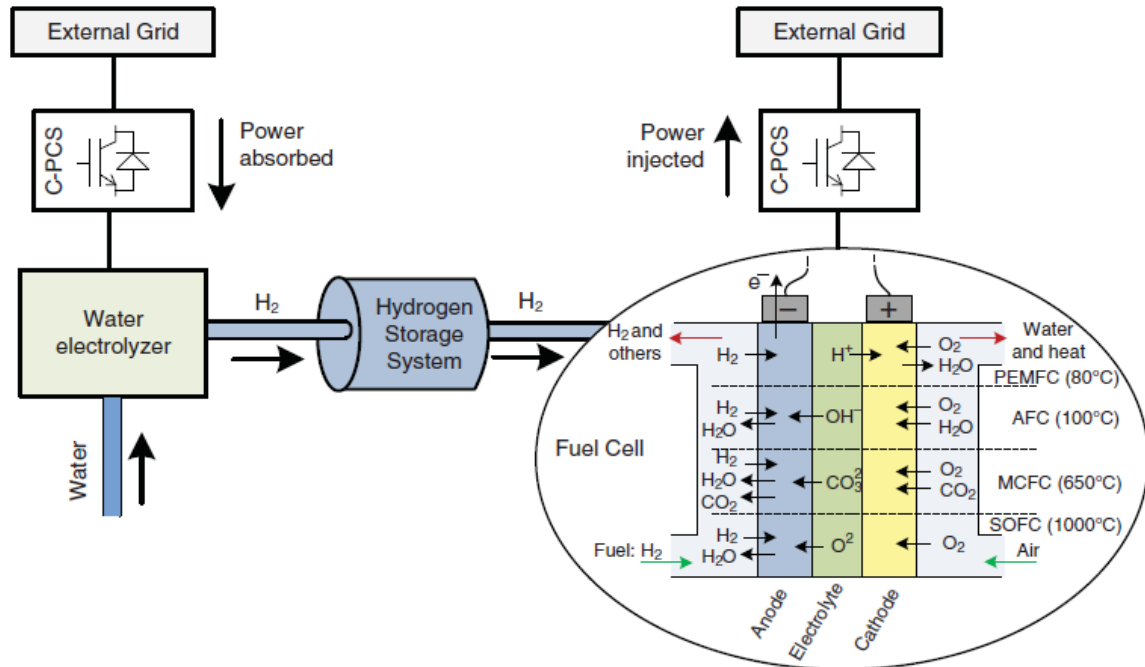
## **2.3. Kemijski sustavi za pohranu električne energije**

Električnu energiju moguće je pretvoriti u plin (vodik ili sintetički metan) koji se može koristiti u različitim primjenama i biti dostavljen krajnjim korisnicima putem plinovoda. Vodik je, osim iz fosilnih goriva, moguće dobiti i elektrolizom vode te rasplinjavanjem biomase. Kao takav se može koristiti u gorivim ćelijama za proizvodnju električne energije ili kao gorivo za pokretanje plinskih turbina. Zbog visoke zapaljivosti vodika, njegov udio u ukupnom prirodnom plinu koji se transportira plinovodima mora biti, prema europskim uredbama (ovisno o zemlji), između 0,2 i 12%. Također može se koristiti, zajedno sa ugljičnim dioksidom, za proizvodnju sintetičkog metana[1].

### **2.3.1. Vodik ( $H_2$ )**

Vodik je izrazito zapaljiv plin kojega je moguće dobiti iz fosilnih goriva, elektrolizom vode ili pak rasplinjavanjem biomase i kasnije iskoristiti u različite primjene. Jedan takav sustav regenerativne gorive ćelije koji obuhvaća proizvodnju vodika u elektrolizeru vode, medij za

pohranu vodika, te kasnije njegovo korištenje u gorivoj ćeliji za proizvodnju električne energije prikazan je na slici 2.13. [1]. Za napajanje elektrolizera moguće je koristiti obnovljive izvore energije, kao npr. energiju vjetra ili sunca.



**Slika 2.13.** Koncept regenerativne gorive ćelije[1]

Elektrolizer dakle rastvara vodu na vodik i kisik, a razlikujemo alkalnu elektrolizu (AFC-alkaline fuel cell) i elektrolizu pomoću protonski vodljive membrane (PEMFC- proton exchange membrane) te se obje odvijaju pri niskim temperaturama. Još jedna opcija koja je u razvoju i mogla bi zamijeniti ove prijašnje su visoko-temperaturni elektrolizeri koji vodu prvo pretvaraju u paru pri visokim temperaturama (800-1000 °C) koristeći toplinu (npr. toplinu otpuštenu kod nuklearnih reaktora), a zatim se razdvaja na molekule vodika i ione kisika (na katodi) koji difuzijom prolaze kroz čvrsti difuzni elektrolit (SOFC – solid oxide fuel cell) do anode gdje nastaju molekule kisika. Postoje još i otopljeni karbonatni gorivni članci (MCFC – molten carbonate fuel cell) koji rade na temperaturama preko 600 °C.

Nakon što je proizveden, vodik je potrebno pohraniti. Male količine vodika moguće je pohraniti u tlačnim posudama, spremnicima od čvrstog metala ili pak nano-cjevčicama koje mogu pohraniti vodik visoke gustoće. Veće količine vodika mogu se pohraniti u podzemnim solnim pećinama i to do 500 000 m<sup>3</sup> pri tlaku od 200 bara što bi značilo oko 100GWh pohranjene energije[3]. Takav vodik, zajedno sa kisikom, sudjeluje u kemijskoj reakciji unutar gorive ćelije pri čemu nastaju tri proizvoda: električna energija, voda i toplina. Gorive ćelije se

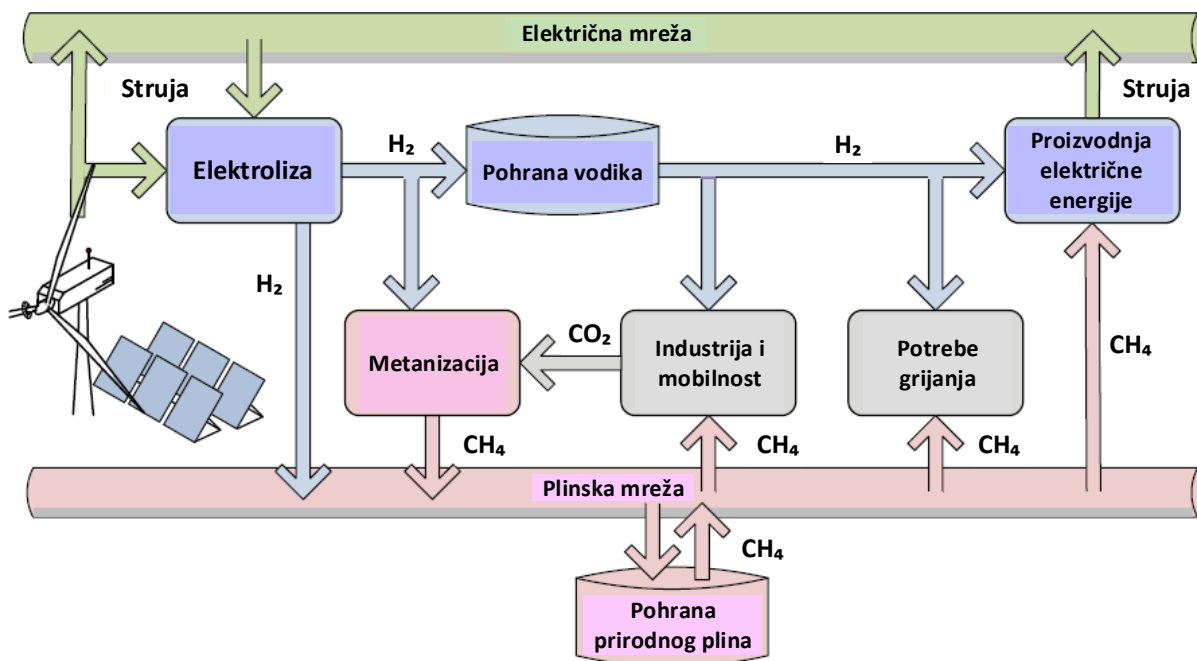
sastoje od pozitivne i negativne elektrode te elektrolita (krutog ili tekućeg) koji dopušta razmjenu iona između područja anode i katode. Najčešće korištena je goriva ćelija sa protonski vodljivom membranom (radi na 80°C) koja je prigodna za industrijske primjene, pa se tako na tržištu mogu pronaći s nazivnom snagom oko 100kW. Tamo gdje je potrebna veća snaga (reda nekoliko MW) prigodne su gorivne ćelije s oksidnim člancima (rade na temperaturi od 650°C) koje se na tržištu mogu pronaći s nazivnom snagom oko 2 MW[1].

Kapacitet pohrane energije im ovisi o volumenu pohranjenog vodika, a sukladno tome ove ćelije mogu pružati energiju, ovisno o opterećenju, i do nekoliko sati. Prednosti su im visoka snaga te veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja nego kod protočnih i sekundarnih baterija, a mana je zapaljivost vodika pa su stoga potrebne određene zaštitne mjere. Osim toga, veliki nedostatak je i niska energetska učinkovitost koja je, kada se u obzir uzmu učinkovitosti elektrolizera i gorivne ćelije zajedno, tek oko 40%.

### **2.3.2. Power-to-gas (P2G)**

Power-to-gas sustav ( slika 2.14.) se odnosi na pretvorbu električne energije (obično iz obnovljivih izvora poput vjetra ili sunca) u plin koji može biti korišten kao gorivo za različite primjene (npr. tercijarni sektor, plinska mreža, mobilnost i industrija). Dobiveni plin je vodik, koji se može pretvoriti u sintetički metan kada reagira s ugljikovim dioksidom u prisutnosti biokatalizatora. Takvi plinovi se mogu dostaviti krajnjim potrošačima pomoću plinovoda koji imaju veliki kapacitet za transport[1]. Proizvedeni vodik može biti iskorišten kao gorivo, bilo za transport ili kao sirovina za industriju. Također se može pohraniti i ponovno iskoristiti kao gorivo u gorivim ćelijama ili za pokretanje plinskih turbina te, za razliku od baterija, može se pohraniti u većim količinama tijekom dužeg vremena [8]. Proizvedeni sintetički plin može zamijeniti prirodni plin koji se koristi u plinskim mrežama, ali vodik, ako se koristi u plinskim mrežama, ima određena ograničenja s obzirom na njegov udio u prirodnom plinu zbog sigurnosnih razloga i njegove visoke zapaljivosti.





Slika 2.14. Power-to-gas koncept[1]

Energetska učinkovitost procesa korištenja električne energije za proizvodnju vodika je oko 70%, a kada to pomnožimo sa učinkovitošću pretvorbe vodika u električnu energiju, učinkovitost korištenja odika može pasti i do 40%. Proces pretvorbe električne energije u vodik, pa zatim proizvodnje sintetičkog metana ima učinkovitost oko 50-60%. Ovi postotci dakako ovise o mediju za pohranu, gubicima u transportu i tehnologiji elektrolizera, pored drugih faktora[1].

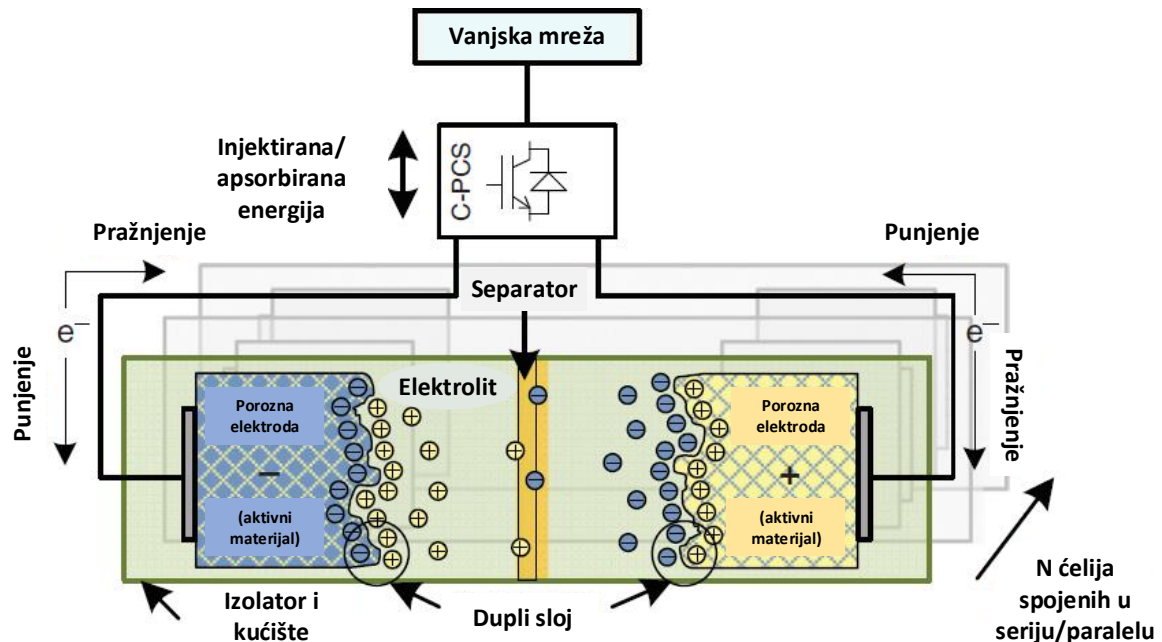
## 2.4. Električni sustavi pohrane električne energije

### 2.4.1. Super-kondenzator

Super-kondenzatori se temelje na elektrokemijskim ćelijama koje sadrže dvije vodljive elektrode, elektrolit i poroznu membranu koja dozvoljava razmjenu iona između dvije elektrode. Iz toga se može uočiti da je gore navedena konfiguracija slična konfiguraciji elektrokemijskih ćelija baterija. Glavna razlika je u tome što se kod super-kondenzatora elektrokemijske reakcije ne odvijaju u ćelijama, ali je energija pohranjena u njima elektrostatički[1].

Na slici 2.15. moguće je vidjeti kako dovođenjem napona na elektrode dolazi do njihovog polariziranja, isto se događa i s elektrolitom. Rade na principu dvostrukih slojeva koji predstavljaju kondenzatore, a nastaju razmjenom pozitivnih i negativnih iona putem elektrolita. Pozitivni i negativni naboji elektrode i elektrolita (ovisno radi li se o katodi ili anodi) razdvojeni su slojem

solventnih molekula koji se ponaša kao dielektrik između njih. Kao rezultat postojanja električnog polja između pozitivnog i negativnog sloja iona (na obje strane gdje se spajaju elektroda i elektrolit), javlja se napon između njih.



**Slika 2.15.** Ilustrativna topologija super-kondenzatora[1]

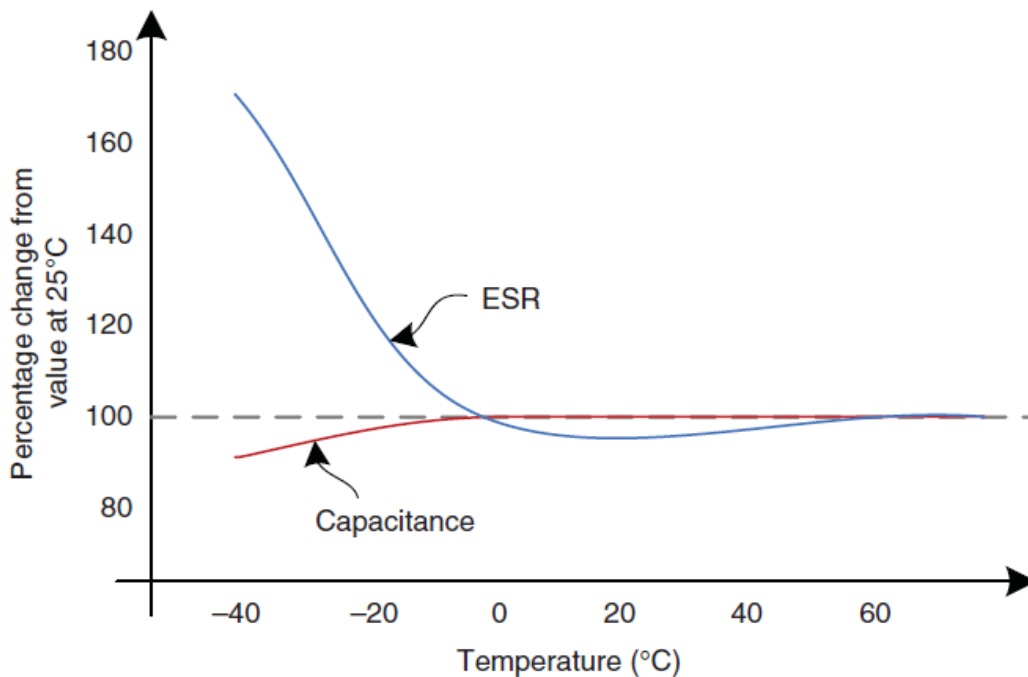
Prema tome, energija koju super-kondenzator može pohraniti ovisi o naponu između slojeva izraženog u voltima - V (na kvadrat jer postoje dvije strane gdje se pojavljuje dupli sloj) te kapacitetu izraženom u faradima (F):

$$E_{SC} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (2-11)$$

Probojni napon dielektrika između slojeva mora biti što veći kako bi napon između njih bio veći, što znači da izbor dielektrika uvelike utječe na količinu energije koju super-kondenzator može pohraniti. Korištenjem elektrolita na bazi vode moguće je postići napon od 1V, dok s organskim elektrolitima on može porasti do 2,5V[1]. Osim toga, koriste se i različiti materijali elektroda kako bi se povećao kapacitet i površina na kojoj dolazi do raspodjele iona.

Važna karakteristika ovog sustava pohrane je i vremenska konstanta  $\tau$  koja predstavlja vrijeme potrebno za pražnjenje 63,2% punog kapaciteta strujom ograničenom samo unutarnjim otporom – ESR-om, odnosno ekvivalentnim serijskim otporom (eng. Equivalent Series Resistance), super-kondenzatora. ESR predstavlja gubitke super-kondenzatora koji su povezani s

kretanjem iona unutar elektrolita i kroz separator. Obično mu je iznos u mili-ohmima i ovisan je o temperaturi kao što je prikazano na slici 2.16.[1].



**Slika 2.16.** Karakteristika ovisnosti kapacitivnosti i ESR-a o temperaturi [1]

Karakterizira ih visoka nazivna snaga, životni vijek koji doseže milijun ciklusa (mogu se usporediti sa zamašnjacima), učinkovitost do 80%, visoka specifična gustoća snage koja je oko 10 puta veća nego kod konvencionalnih baterija, ali im je specifična gustoća energije oko 10 puta manja što ih čini neprikladnim za pohranu energije na duža razdoblja. U prilog tomu ide i visok stupanj samo-pražnjenja (do 20% nazivnog kapaciteta u samo 12h) te visoka cijena u usporedbi sa npr. zamašnjacima (oko 10 puta veća cijena po kWh)[1,2].

#### 2.4.2. Super-vodljivi magnetski svitak (SMES)

Ovaj sustav je jedini koji pohranjuje energiju u magnetnom polju kojega stvara istosmjerna struja svojim protjecanjem. Ta struja neprekidno kruži supravodljivom zavojnicom sve dok se ne pojavi potreba za njenim iskorištenjem i bude ispražnjena [6]. Supravodljiva zavojnica mora biti ohlađena ispod kritične temperature supravodljivosti materijala (-269 do -193°C [7]) od kojeg je načinjena jer tek tada se postiže izrazito mali otpor, odnosno supravodljivost, te istosmjerna struja može protjecati bez stvaranja velikih gubitaka u vidu disipacije topline. Iz toga se može zaključiti da magnetsko polje unutar zavojnice može biti stvoreno i očuvano prolaskom vrlo male struje kroz nju, a najviše energije se troši za postizanje uvjeta supravodljivosti (izrazito niske temperature)[1].

Rashladni sustavi koji dovode materijal zavojnice do stanja supravodljivosti obično koriste dušik i helij[6]. Slika 2.17. prikazuje ilustrativnu topologiju sustava pohrane energije supravodljivim magnetskim svitkom.



**Slika 2.17.** Ilustrativna topologija SMES sustava. Tekući helij je pohranjen u spremnicima na lijevoj strani slike, dok se supravodljiva zavojnica nalazi u desnom spremniku.[1]

Količina energije koju supravodljivi magnetski svitak može pohraniti, izražena u džulima, jednaka je umnošku samo-indukcije zavojnice  $L$  izražene u henrijima (H) i kvadrata struje koja kroz nju prolazi  $I$  u amperima (A). Prema tome formula glasi:

$$E_{SMES} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (2-12)$$

Postoje dvije vrste ovakvih sustava, jedan se zasniva na zavojnicama visoke temperature (oko  $-203,15^{\circ}\text{C}$ ), a drugi na zavojnicama niske temperature (oko  $-268,15^{\circ}\text{C}$ ).

Neke od glavnih prednosti ovih sustava su visoka energetska učinkovitost (oko 90%) jer sustavi hlađenja također ne troše previše energije, sposobnost pohrane i injektiranja velikih količina energije u vrlo kratkom vremenu, velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja (do 15000 pri 100% dubini pražnjenja) te mali utjecaj na okoliš jer se ne odvijaju kemijske reakcije kao što je to kod baterija [1]. Međutim, ovi sustavi su ograničeni samo za kratke primjene zbog visokog stupnja samo-pražnjenja (10-15% nazivnog kapaciteta po satu) i jako brzo se isprazne pri punom kapacitetu pražnjenja[1]. Ova tehnologija poboljšava kvalitetu energije pri kritičnim opterećenjima i osigurava prijenos energije tijekom trenutnih padova napona i nestanka struje, poboljšava izravnavanje opterećenja između obnovljivih izvora (vjetar, sunce) i prijenosne i distributivne mreže[7].

## 2.5. Toplinski sustavi pohrane električne energije

Ovi sustavi apsorbiraju, pohranjuju i nakon toga iskorištavaju pohranjenu toplinsku energiju za različite primjene kao što su grijanje i proizvodnja električne energije. Ovisno o mediju razlikujemo osjetljivi (kruti, tekući ili plinoviti), latentni i kemijski toplinski medij. U ovom poglavlju će konkretno biti opisana pohrana toplinske energije u otopljenim solima.

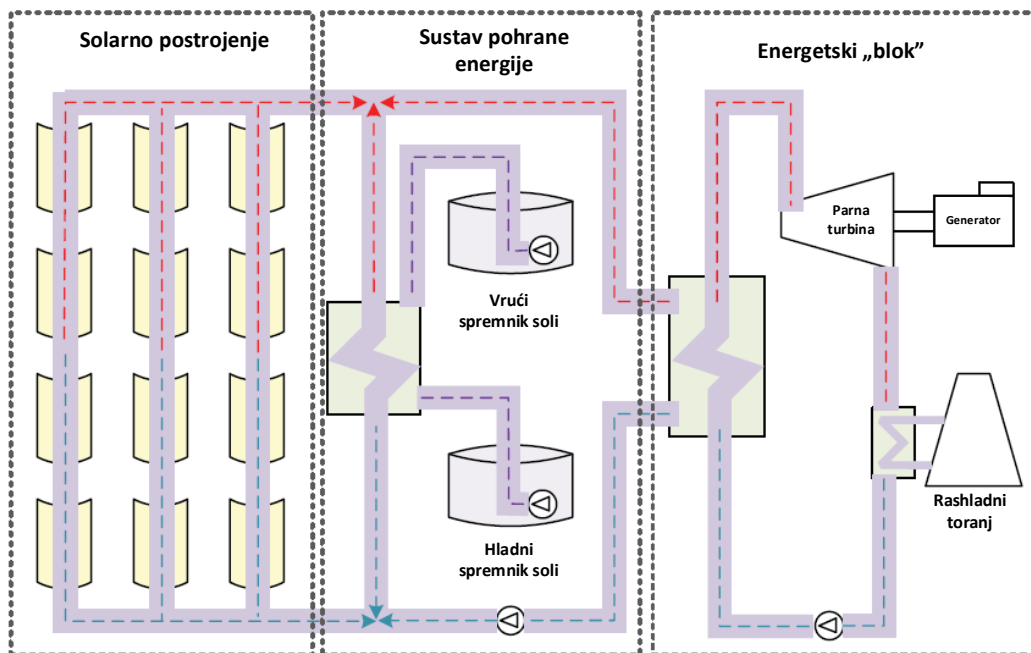
### 2.5.1. Otopljene soli

Ovaj način pohrane toplinske energije je najviše zastupljen zbog svoje jednostavnosti i zrelosti tehnologije i to posebno u solarnim elektranama. Kapacitet pohrane osjetljivih medija ovisi o specifičnom toplinskom kapacitetu medija (izraženog u kJ/kgK) koji je izoliran od okoline kako bi se smanjili gubici. Mehanizmi prijenosa topline u ovim sustavima se zasnivaju na razlikama u temperaturama, dok je kod latentnog medija temperatura konstantna. Kod njih se toplinska energija pohranjuje/otpušta tijekom faznih prijelaza materijala (npr. iz tekućeg u kruto stanje). Postoje još i kemijski mediji za pohranu topline koji se zasnivaju na egzotermnim kemijskim reakcijama u tvari koja je razdvojena na dva dijela koja se endotermnom reakcijom kasnije mogu ponovno spojiti[1].

Kao što možemo vidjeti na slici 2.18., toplina se prikuplja pomoću paraboličnih kolektora koji usmjeravaju sunčevo zračenje prema izoliranim cijevima u kojima se nalazi radni medij (npr. termalno ulje ili otopljena sol). Nakon što je zagrijan, prolazi kroz, u ovom slučaju, dva izmjenjivača topline. Svrha prvoga je kako bi se toplina predala otopini soli koja se pumpa iz „hladnog“ spremnika i zatim pohranjuje u „vrućem“ spremniku radi iskorištenja tijekom oblačnih razdoblja ili razdoblja bez sunca. Ovi spremnici moraju biti dobro toplinski izolirani kako bi se spriječio gubitak topline u okolinu. U drugom izmjenjivaču topline/generatoru pare toplina se predaje vodi koja se pumpa iz odvojenog sustava kako bi se proizvela para koja zatim pokreće sklop parna turbina/generator. Nakon što je predao toplinu za stvaranje pare, radni medij se ponovno zagrijava pomoću kolektora. Vruća para se hladi i kondenzira, te se nastala voda ponovno pumpa kroz sustav za generiranje pare. Dakle, ovaj sustav funkcionira i bez spremnika otopljene soli, ali onda ne bismo mogli proizvoditi električnu energiju razdobljima s manje ili bez sunca.

Ovaj način pohrane može spriječiti prestanak rada parnih turbina tijekom isprekidane proizvodnje pare (oblačna razdoblja, manje sunca), kao i u razdobljima kada nema sunčeve

svjetlosti. Takav primjer je solarna elektrana u Andasolu, gdje je sustav pohrane toplinske energije dovoljno velik da može pružiti do 7,5h neprekidne proizvodnje električne energije u razdobljima bez sunca[1].



**Slika 2.18.** Topologija solarne elektrane sa sustavom za pohranu energije pomoću otopljenih soli[1]

### 3. ANALIZA PERFORMANSI RAZLIČITIH ELEKTROKEMIJSKIH TEHNOLOGIJA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju će se analizirati rezultati punjenja/pražnjenja različitih ispitivanih elektrokemijskih tehnologija pohrane električne energije. Konkretno su to 3 različita modela litij-ionskih baterija i 1 nikal-metal-hibrid baterija.

Grafičkom analizom će se prikazati ciklusi punjenja i pražnjenja kod kojih se jasno vide dvije dvije faze punjenja/pražnjenja litij-ionskih baterija. Prva faza u kojoj je struja punjenja/pražnjenja konstantna i druga kod koje je napon konstantan.

Punjenje i pražnjenje se provodi pri nazivnim faktorima za pojedini model baterije kako bi se mogla obaviti međusobna usporedba. Na temelju uložene energije za punjenje i dobivene energije prilikom pražnjenja dobit će se uvid u cikličku učinkovitost različitih modela baterija.

#### 3.1. Punjač/pražnjač baterija Junsi iCharger 4010 Duo

Uređaj koji je služio za testiranje baterija je punjač/pražnjač Junsi iCharger 4010 Duo koji je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1. Junsi iCharger 4010 Duo punjač

Junsi iCharger 4010 Duo ima mogućnost punjenja/pražnjenja različitih tehnologija baterija, a to su: litij-ionske, litij-polimerne, litij-željezo-fosfatne, nikal-metal-hibridne, nikal-kadmijeve i olovne.

Kod punjenja je moguće odabrati iznos struje punjenja, punjenje s balansiranjem ili bez njega (ako imamo više baterija spojenih u seriju gdje je potrebno nadzirati napon svake ćelije

zasebno kako ne bi premašio preporučenu vrijednost), vršni napon punjenja te iznos struje pri kojoj se punjenje završava, a ona se definira u postotcima podešene maksimalne struje punjenja. Struja kod koje se prekida mjerenje se odabire upravo zato što punjač prvo puni bateriju konstantnom strujom dok ona ne dosegne vršnu vrijednost napona, a zatim taj napon ostaje konstantan, a struja punjenja opada.

U slučaju da se baterija neće koristiti određeno vrijeme, postoji i način rada za pohranu baterije. Ovdje se namješta željeni napon ćelije koji želimo održati konstantnim (uz moguća odstupanja do nekih 0,2V), odnosno ako napon bude veći ili manji od te vrijednosti uređaj će prazniti odnosno puniti bateriju dok se ponovno ne dostigne željena vrijednost napona.

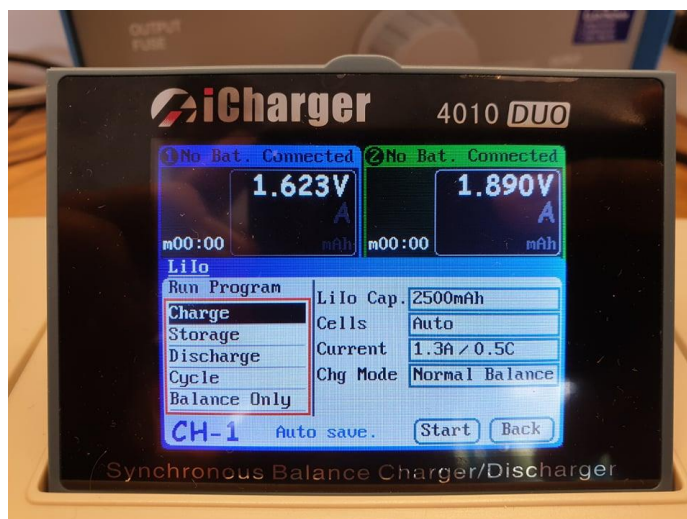
Kod pražnjenja se odabire struja pražnjenja, donji napon pražnjenja i vrijednost struje pri kojoj se završava pražnjenje, a ona se definira u postocima struje pražnjenja. Slično kao i kod punjenja, baterija se prvo prazni konstantnom strujom, napon opada do podešene vrijednosti, a zatim on ostaje konstantan, a struja pražnjenja opada.

Kod cikličkog načina rada odabire se način rada punjenje/pražnjenje ili pražnjenje/punjenje, broj tih ciklusa te vrijeme odmora između punjenja i pražnjenja.

Za razliku od litijevih baterija, olovne i niklove imaju samo programe punjenja, pražnjenja i cikličkog rada. Kod punjenja nikal-metal-hibrid i nikal-kadmijevih baterija odabire se samo struja punjenja i dva načina rada (normalni i tzv. refleksni koji se koristi kada želimo smanjiti temperaturu ćelije).

Uređaj se spojnim vodičima spaja na istosmjerni izvor napajanja te sadrži dva kanala (CH-1 i CH-2) na koja je moguće spojnim vodičima priključiti držač za baterije. Potrebno je paziti na polaritet baterija jer će u suprotnom uređaj izbaciti grešku. Punjač se preko USB kabela spaja sa računalom gdje je preko određene aplikacije moguće vidjeti rezultate punjenja/pražnjenja, odnosno napon, struju, kapacitet, temperaturu, vrijeme itd. Nakon što odaberemo željeni kanal i tip baterije, otvaraju se padajući izbornici (slika 3.2.): u lijevom odabiremo vrstu radnje koju želimo (punjenje, pražnjenje, ciklički rad, pohrana, balansiranje), a u desnom parametre (struju punjenja/pražnjenja, donji napon pražnjenja, gornji napon punjenja, kapacitet baterije itd.). Prelazak između izbornika ostvaruje se tipkom TAB/SYS. Nakon što je sve podešeno, pokrećemo radnju i snimamo rezultate (slika 3.3.). Osim što se rezultati prikazuju grafički u programu, također se izvoze u Excel formatu datoteke nakon čega je moguće vršiti obradu istih.





**Slika 3.2.** Padajući izbornik



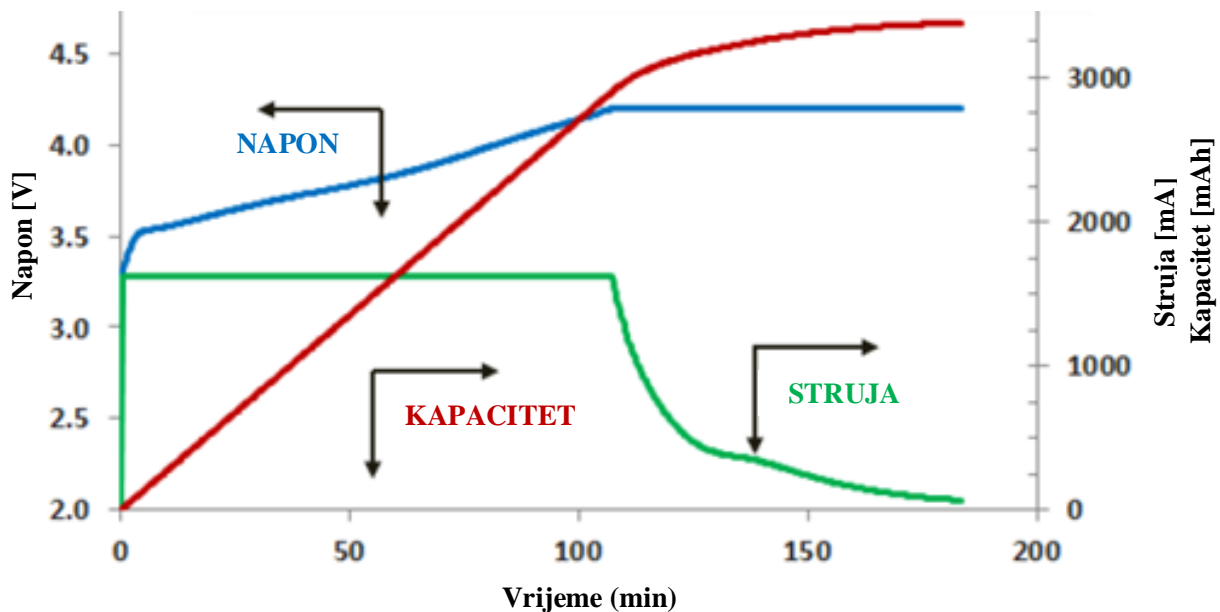
**Slika 3.3.** Uređaj podešen za rad na dva kanala

*Tablica 3. 1. Tehničke karakteristike uređaja*

|  |  |
|--|--|
| Ulazni napon                               | 9,0 – 50,0V (DC)                             |
| Maksimalna ulazna struja                   | <65A   |
| Maksimalna struja punjenja/pražnjenja      | 70A (sinkroni način) 40A (asinkroni način)   |
| Maksimalna snaga punjenja                  | 2000W (kanal 1400W pri naponu >23,5V)        |
| Maksimalna snaga pražnjenja                | 200W (kanal 130W)                            |
| Maksimalna snaga regenerativnog pražnjenja | 2000W (kanal 1400W)                          |
| Maksimalna snaga dodatnog pražnjenja       | 3200W (kanal 1600W pri 40V/40A)              |
| Maksimalna struja pri balansiranju         | 2,4A (sinkroni način) 1,2A (asinkroni način) |

## 3.2. Litij – ion tehnologija

Kod ove tehnologije punjenje (slika 3.4.) se odvija na način da punjač prvo puni sa konstantnom strujom (CC-engl.constant current) koja se postavlja ovisno o nazivnim faktorima određenog tipa baterije, a kada napon dosegne vršnu vrijednost on se drži konstantnim (CV-engl. constant voltage). U tom dijelu struja postepeno opada te će punjač prekinuti punjenje kada struja padne ispod određenog postotka postavljene struje punjenja. Slična stvar se odvija i kod pražnjenja, samo što u tom slučaju struja počine postepeno opadati onda kada napon padne na postavljenu vrijednost donjeg napona pražnjenja. Pražnjenje se prekida na isti način kao i kod punjenja.



**Slika 3.4.** CC-CV karakteristika punjenja litij-ionske baterije [10]

Konkretni modeli litij-ionskih baterija nad kojima će se vršiti analiza su: Panasonic NCR18650B, LG 18650HG2 i SONY US18650VTC5. Svaki od tih tipova imaju različite kapacitete i nazivne faktore punjenja/pražnjenja koji će biti tablično prikazani za svaki tip zasebno. Faktor C označava koliko će se brzo baterija isprazniti od nazivne vrijednosti kapaciteta do njene maksimalne ispražnjenosti, tj. 1C faktor označava da će struja pražnjenja isprazniti cijelu bateriju za jedan sat. Isto vrijedi i za proces punjenja baterije.

### 3.2.1. Panasonic NCR18650B

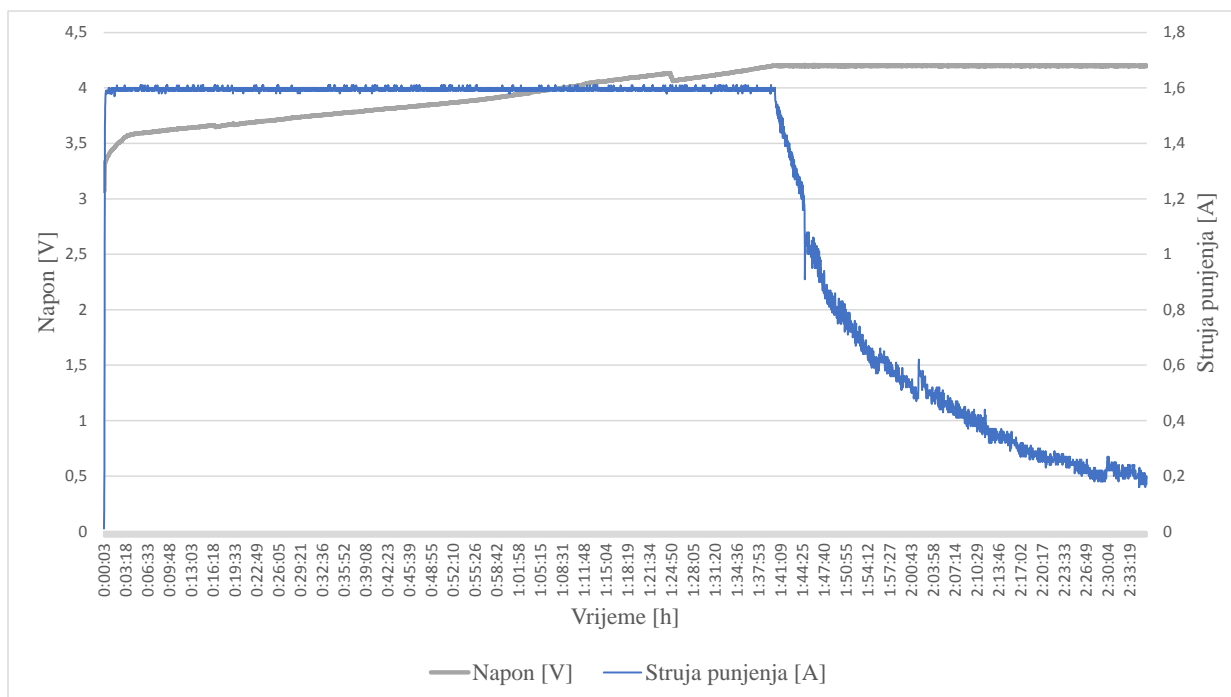
Ovaj tip baterije karakterizira visoka gustoća energije, dugačak životni vijek i vrijeme rada što je čini pogodnom za prijenosne uređaje, računala, mobitele i slično[10]. U tablici 3.2. prikazane su tehničke karakteristike proizvođača za ovaj članak. Na slici 3.5. prikazan je izgled ovog modela baterije. Nazivni faktor C punjenja za ovaj model iznosi 0,5C, a maksimalni faktor pražnjenja je 2C.

Tablica 3.2. Tehničke karakteristike Panasonic NCR18650B baterijskog članka [10]

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Nazivni kapacitet [mAh]          | 3200 |
| Nazivni napon [V]                | 3,6  |
| Vršni napon punjenja [V]         | 4,2  |
| Nazivna struja punjenja [A]      | 1,6  |
| Donji napon pražnjenja [V]       | 2,5  |
| Maksimalna struja pražnjenja [A] | 6,4  |

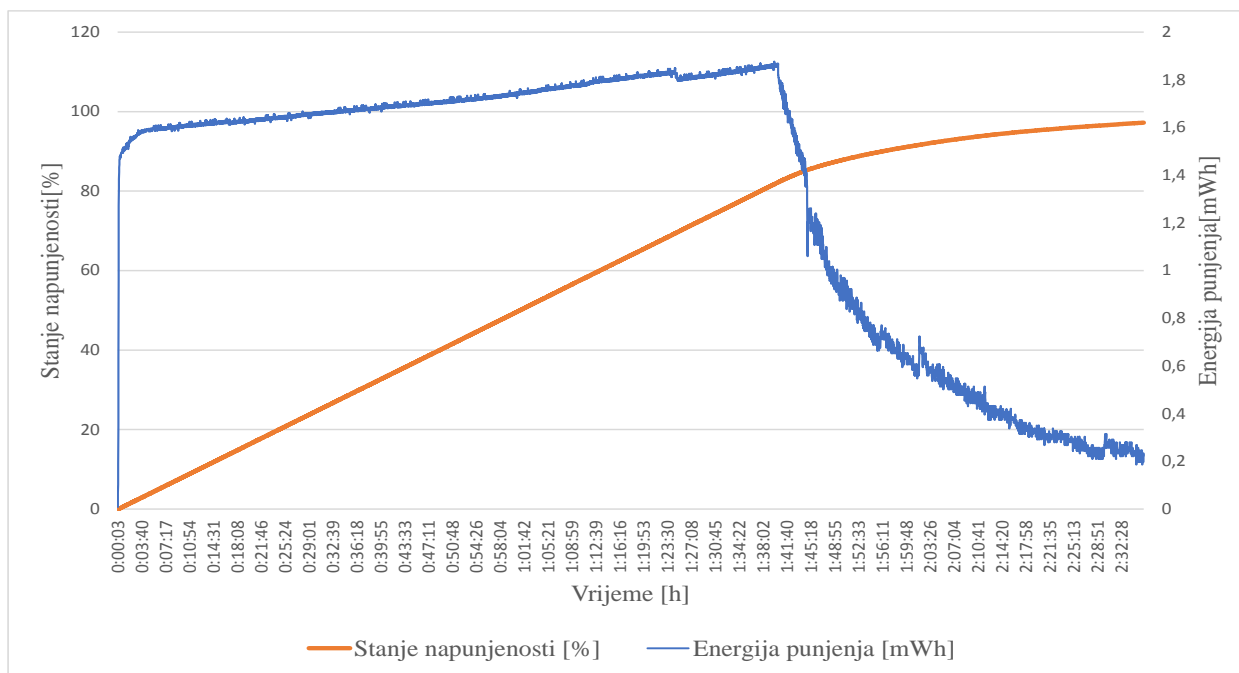


Slika 3.5. Izgled Panasonic NCR18650B baterijskog članka



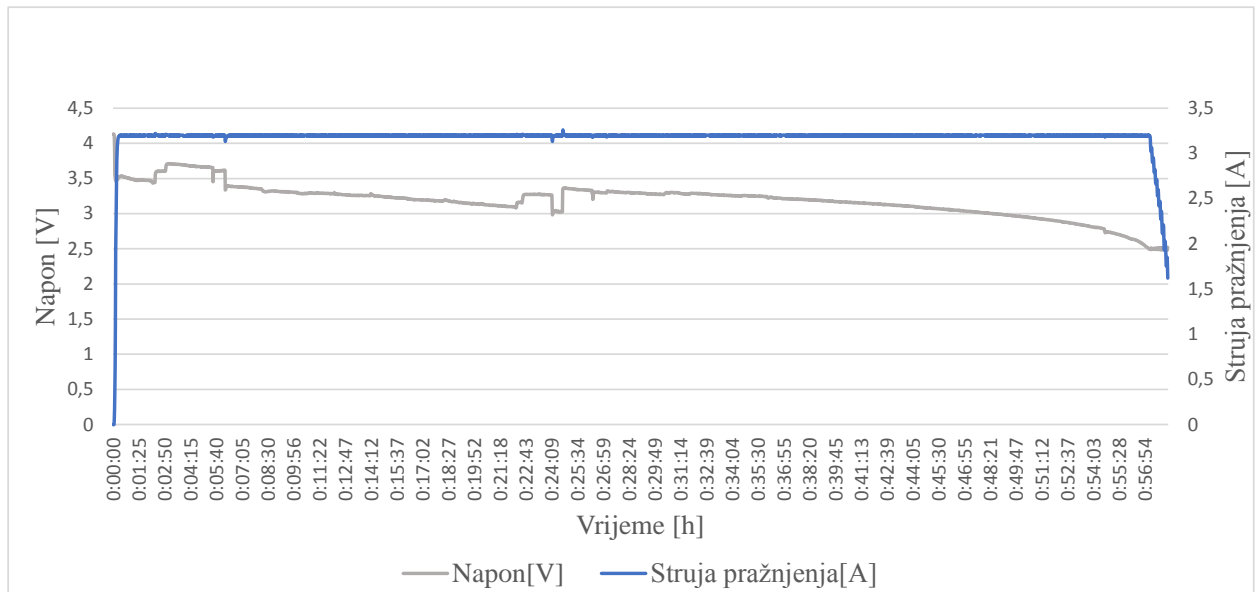
**Slika 3.6.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (0,5C)

Iz grafičke analize (slika 3.6.) vidljivo je da vrijednost napona raste po predviđenoj putanji do trenutka u kojem se dosegne vršni napon. Nakon toga vrijednost napona ostaje konstantna i ona odgovara vršnoj vrijednosti napona punjenja. Vrijednost struje punjenja, koja je bila konstantna do tog trenutka, počinje opadati po predviđenoj putanji dok njen iznos ne padne na 10% nazivne struje punjenja, nakon čega proces punjenja završava.



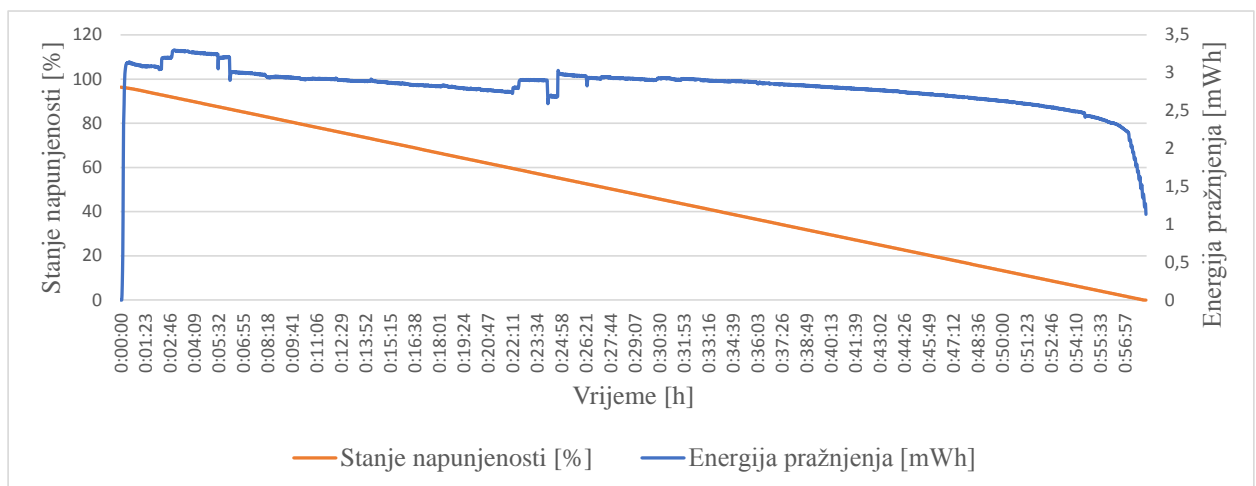
**Slika 3.7.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (0,5C)

Prema slici 3.7. može se zaključiti da stanje napunjenosti ima najveći (linearan) porast do trenutka dostizanja vršnog napona, odnosno u intervalu kod kojeg energija punjenja raste. Nakon trenutka dostizanja vršnog napona, energija punjenja, kao i struja, počinje opadati. Stanje napunjenosti i dalje raste, ali manjim intenzitetom, sve dok se proces punjenja ne prekine.



**Slika 3.8.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu ((1C))

Iz grafičke analize (slika 3.8.) vidljivo je da vrijednost napona pada do trenutka u kojem se dosegne donji napon pražnjenja nakon čega ostaje konstantan. Vrijednost struje pražnjenja, koja je bila konstantna do tog trenutka, počinje opadati po predviđenoj putanji dok njen iznos ne padne do 10% nazivne struje pražnjenja, nakon čega proces pražnjenja završava.



**Slika 3.9.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (1C)

Prema slici 3.9. može se zaključiti da stanje napunjenosti linearno pada tijekom cijelog procesa pražnjenja. Nakon što napon padne na vrijednost donjeg napona pražnjenja, energija pražnjenja, kao i struja, počinje opadati. Proces se prekida kada iznos struje padne na 10%

početne struje pražnjenja. Ta donja vrijednost struje je jedan od parametara koji se podešava na uređaju prilikom pokretanja procesa punjenja/pražnjenja i ista se koristi za sva mjerenja u radu. Mogući razlog skoka/pada napona i energije pražnjenja u oba grafa jeste pomicanje baterije tijekom pražnjenja.

### 3.2.2. LG 18650HG2

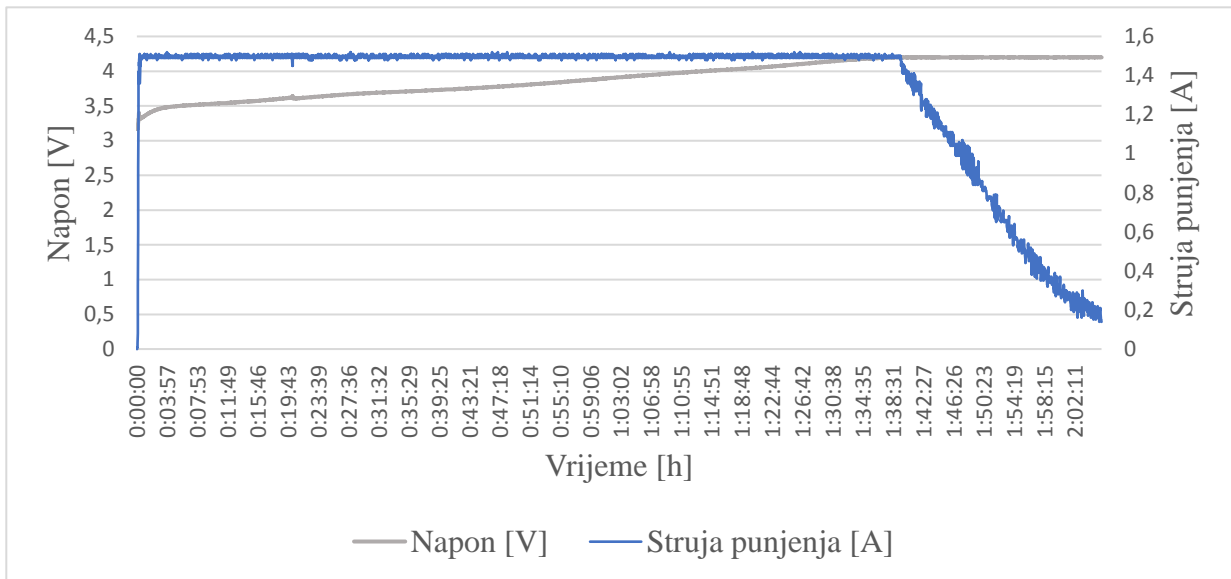
Ovaj model baterije je također pogodan za prijenosne uređaje, računala, mobitele i slično. U tablici 3.3. prikazane su tehničke karakteristike proizvođača za ovaj članak. Na slici 3.10. prikazan je izgled ovog modela baterije. Nazivni faktor C punjenja iznosi 0,5C, a maksimalna struja pražnjenja 20A koja bi odgovarala 6,67C faktoru pražnjenja.

Tablica 3.3. Tehničke karakteristike LG 18650HG2 baterijskog članka [11]

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Nazivni kapacitet [mAh]          | 3000 |
| Nazivni napon [V]                | 3,6  |
| Vršni napon punjenja [V]         | 4,2  |
| Nazivna struja punjenja [A]      | 1,5  |
| Donji napon pražnjenja [V]       | 2,5  |
| Maksimalna struja pražnjenja [A] | 20   |

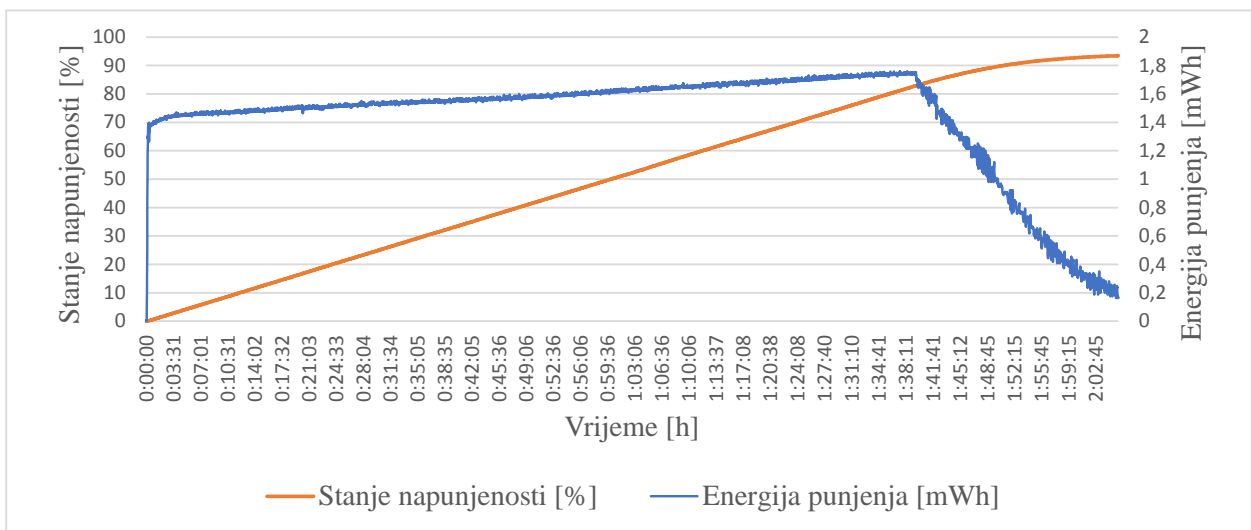


Slika 3.10. Izgled LG 18650HG2 baterijskog članka



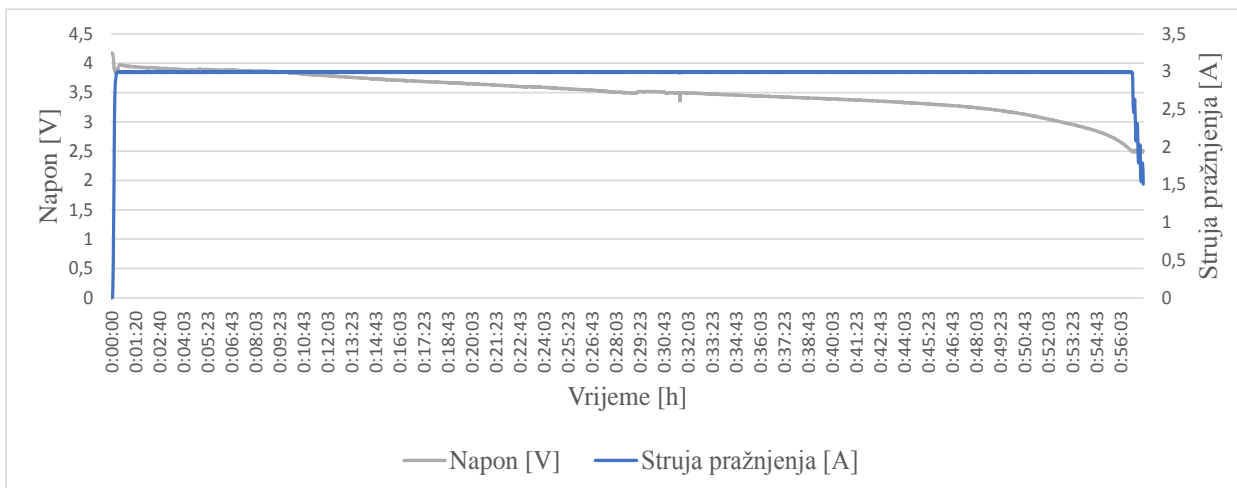
**Slika 3.11.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (0,5C)

Iz grafičke analize (slika 3.11.) vidljivo je da se krivulje napona i struje punjenja ponašaju jednako kao u slučaju za prethodni model baterije.

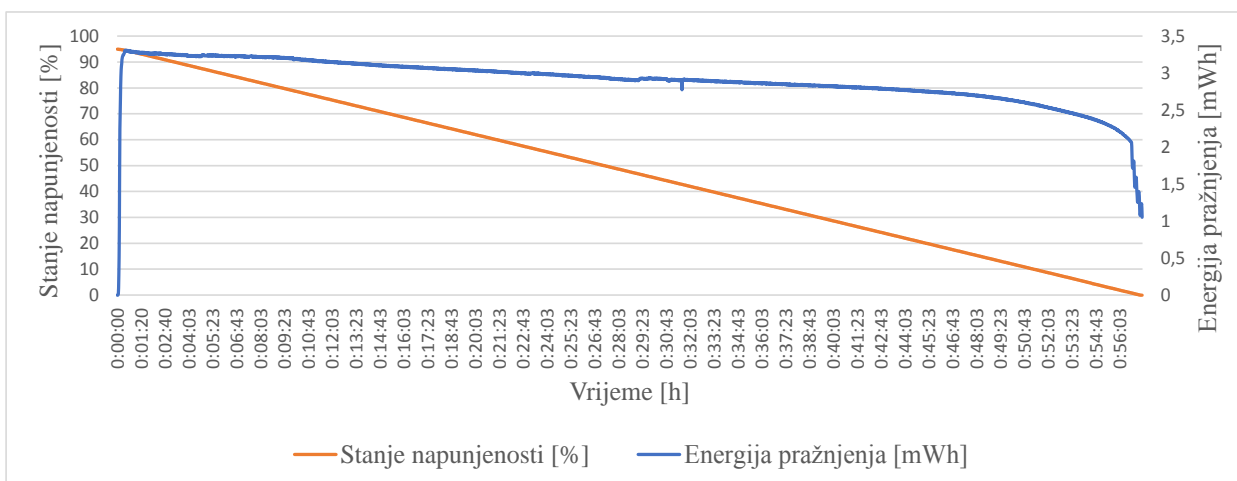


**Slika 3.12.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (0,5C)

Prema slici 3.12. može se zaključiti da krivulje stanja napunjenosti i energije punjenja imaju isti trend kao i kod prethodnog modela baterije.



**Slika 3.13.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu (1C)



**Slika 3.14.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (1C)

Također na slikama 3.13. i 3.14. krivulje stanja napunjenosti i energije pražnjenja imaju isti trend kao i kod prethodnog modela baterije, s tim da u ovom slučaju nema toliko skokova i padova napona.



### 3.2.3. SONY US18650VTC5

Ovaj model baterije je pogodan za primjenu u prijenosnim uređajima, kao i prethodna dva. U tablici 3.4. prikazane su tehničke karakteristike proizvođača za ovaj članak. Na slici 3.15. prikazan je izgled ovog modela baterije. Nazivni faktor C punjenja za ovaj model iznosi 1C, a maksimalna struja je jednaka kao i kod prethodnog modela, s tim da u ovom slučaju ona odgovara 8C faktoru pražnjenja.

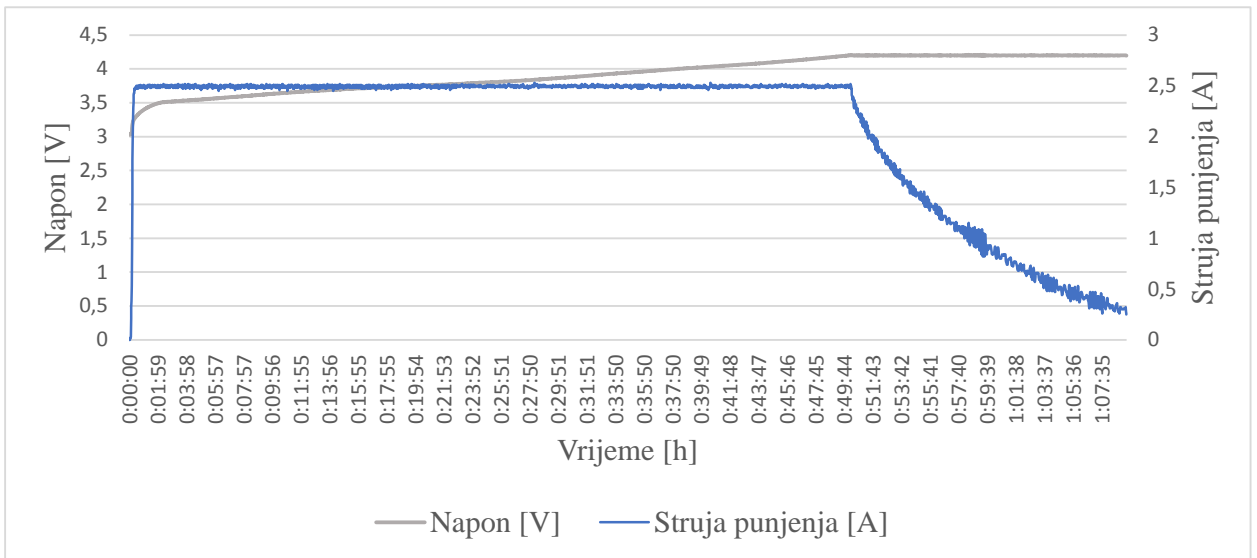
Tablica 3.4. Tehničke karakteristike SONY US18650VTC5 baterijskog članka [12]

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Nazivni kapacitet [mAh]          | 2500 |
| Nazivni napon [V]                | 3,6  |
| Vršni napon punjenja [V]         | 4,2  |
| Nazivna struja punjenja [A]      | 2,5  |
| Donji napon pražnjenja [V]       | 2,5  |
| Maksimalna struja pražnjenja [A] | 20   |

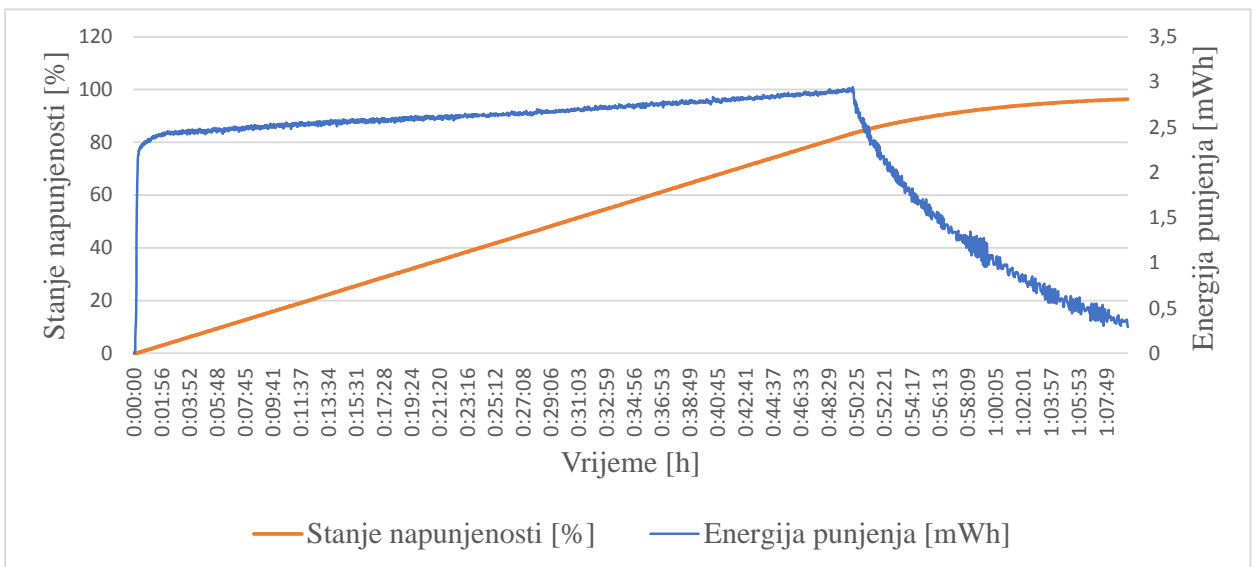


Slika 3.15. Izgled SONY US18650VTC5 baterijskog članka

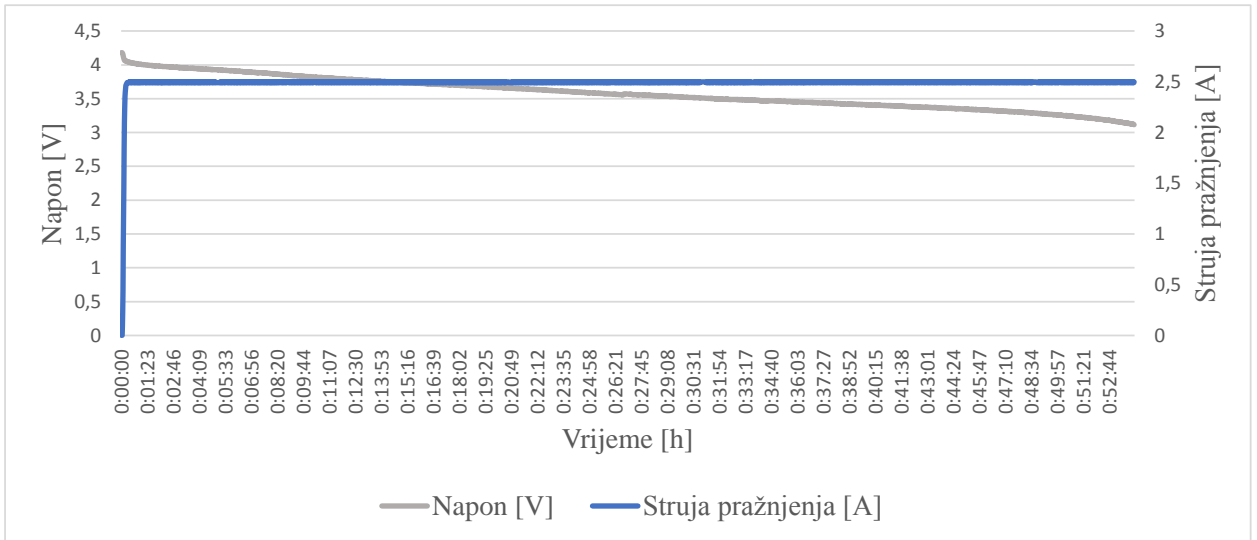
Slike 3.16. i 3.17. prikazuju ovisnosti napona, struje punjenja, stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu te imaju isti trend kao i kod prvog modela baterije koji je testiran. Razlika je samo u nazivnim parametrima.



**Slika 3.16.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (1C)

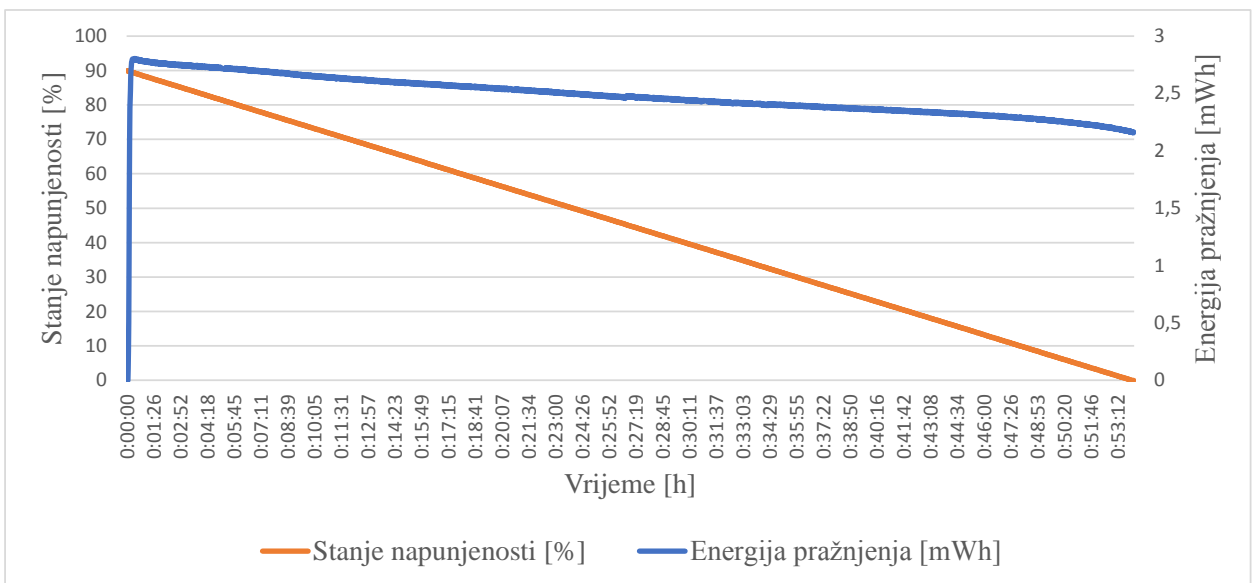


**Slika 3.17.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (1C)



**Slika 3.18.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu (1C)

Prema slici 3.18. vidljivo je da struja pražnjenja kod ovog modela, za razliku od prethodna dva, ima konstantnu vrijednost tijekom cijelog procesa pražnjenja, a napon se smanjuje. Razlog tomu je što se baterija ispraznila prije nego što je napon pao na vrijednost donjeg napona pražnjenja. Slika 3.19. to prikazuje još jasnije jer se izravno vidi da je stanje napunjenosti palo na vrijednost 0, a energija pražnjenja još nije počela naglo opadati.



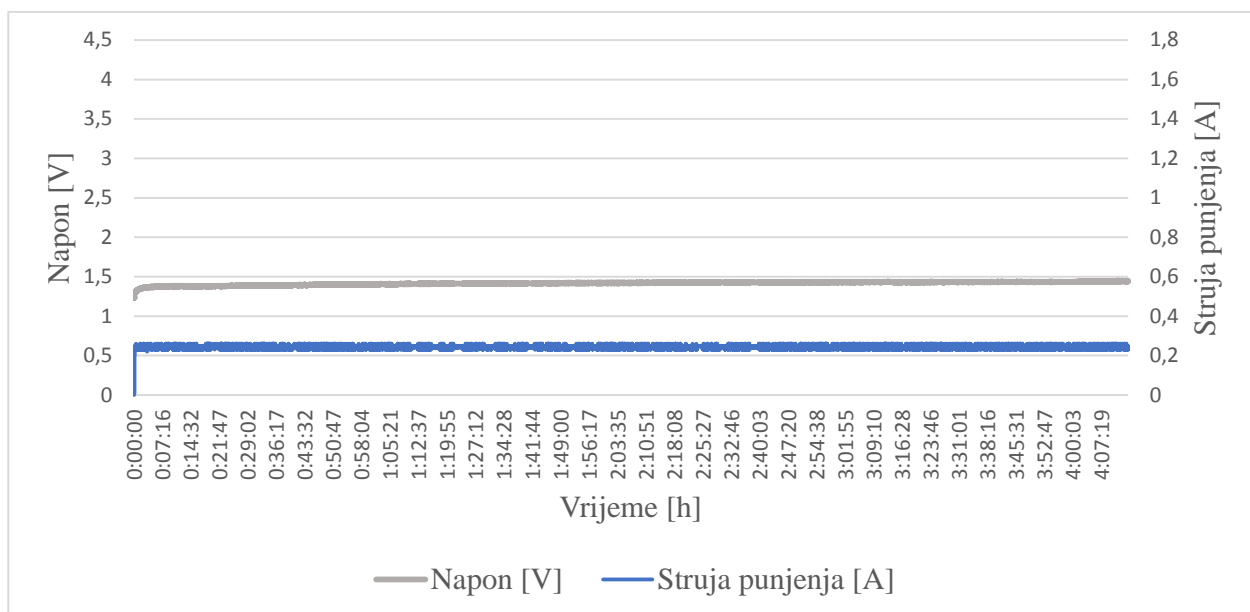
**Slika 3.19.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (1C)

### 3.3. Ni-MH tehnologija

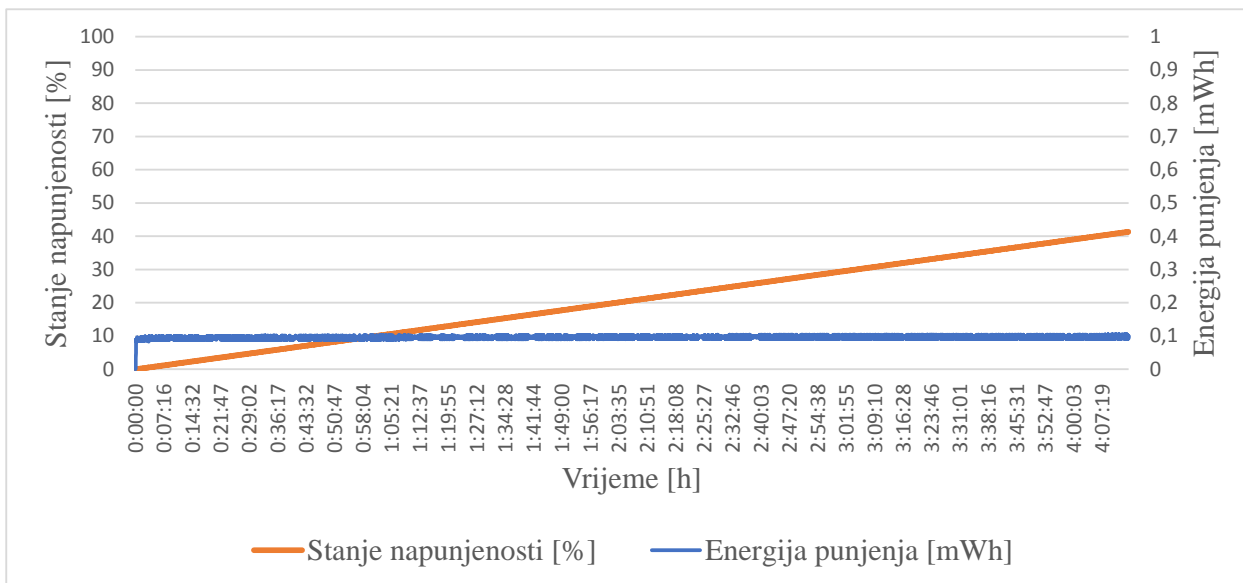
Ovaj model baterije je pogodan za primjenu u prijenosnim svjetiljkama, bežičnim tipkovnicama i slično. Tehničke karakteristike proizvođača za ovaj članak razlikuju se od prethodne tehnologije jer nisu izravno definirane struje punjenja i pražnjenja, kao ni vrijednosti vršnog napona punjenja i donjeg napona pražnjenja. Nazivni kapacitet iznosi 2500mAh, a nazivni napon 1,2V. Na slici 3.15. prikazan je izgled ovog modela baterije.



Slika 3.20. Izgled Panasonic Eneloop PRO BK3HCDE4BE baterijskog članka

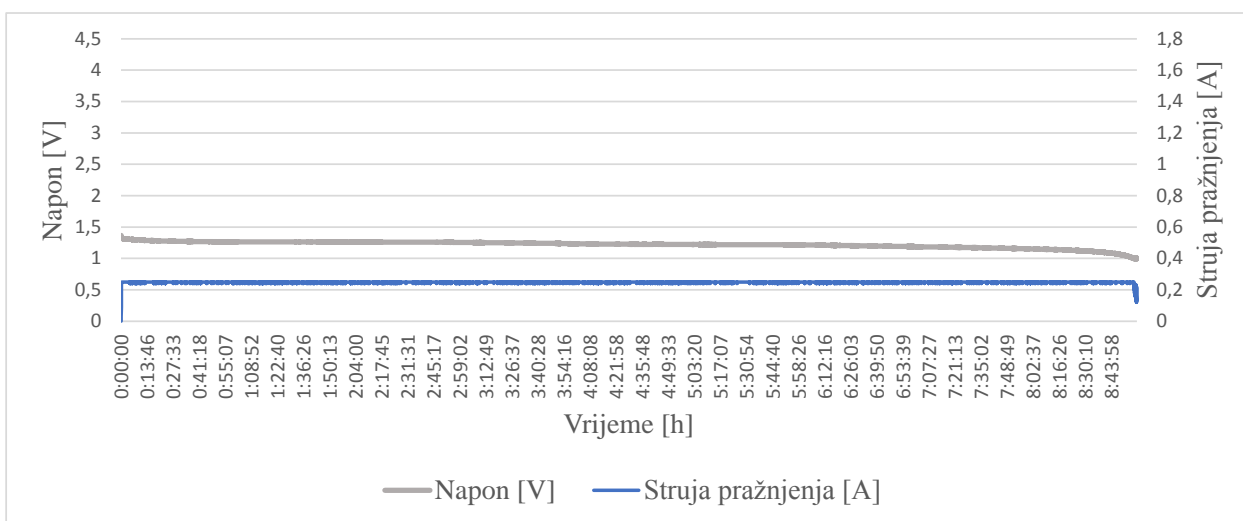


Slika 3.21. Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (0,1C)

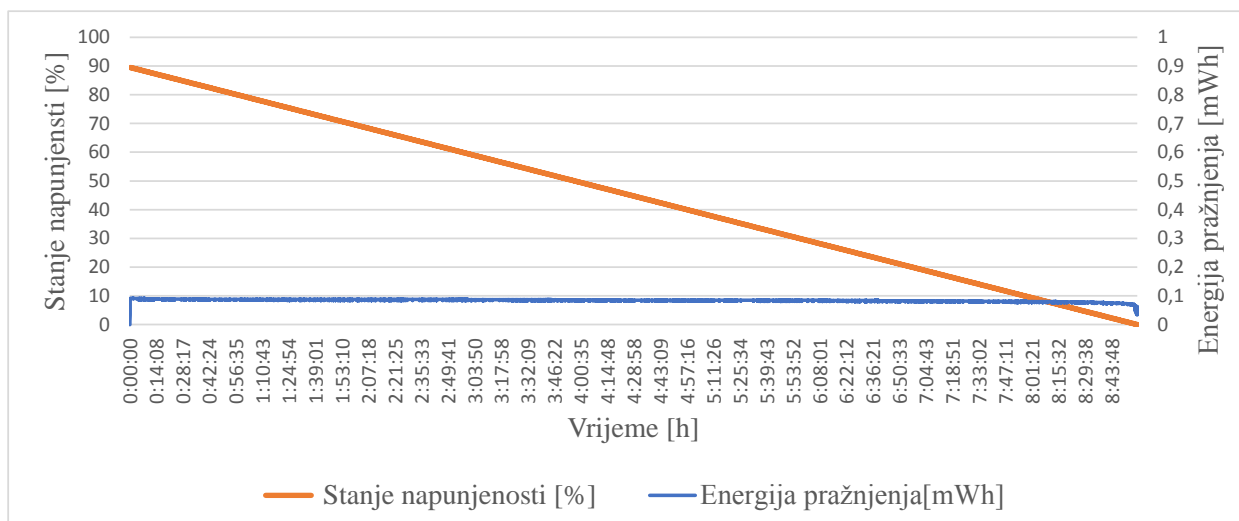


**Slika 3.22.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (0,1C)

Prema slikama 3.21. i 3.22. vidi se kako je struja punjenja konstantna (kao i energija punjenja) za cijelo vrijeme punjenja (otprilike 4h), odnosno stanje napunjenosti se linearno povećava. Budući da je kod ove tehnologije struja punjenja ograničena na 0,1C, procjenjuje se da bi punjenje trajalo 10h i iz tog razloga ovo mjerenje nije išlo do potpune napunjenosti, a samim time nije moguće ni izračunati učinkovitost ovog modela.



**Slika 3.23.** Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu (0,1C)



**Slika 3.24.** Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (0,1C)

Prema slikama 3.23. i 3.24. vidi se kako je struja pražnjenja konstantna (kao i energija pražnjenja) za cijelo vrijeme pražnjenja (blizu 9h), odnosno stanje napunjenosti se linearno smanjuje. Budući da je kod ove tehnologije struja pražnjenja jako mala procjenjuje se da bi pražnjenje sa 100% napunjenosti trajalo 10h. Iz grafova je vidljivo kako su iznosi napona, struje i energije pražnjenja/punjenja znatno manji nego kod litij-ionske tehnologije.

### 3.4. Usporedba različitih tehnologija baterija

Za usporedbu različitih tehnologija baterija izrazito je važna učinkovitost kružnog procesa (engl. Round-trip efficiency) ili ciklička učinkovitost. Ona se računa kao kvocijent energije koju baterija može isporučiti do maksimalne ispražnjenosti i energije koju je potrebno uložiti da bi se ona napunila, odnosno:

$$\mu = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} \quad (3-1)$$

Prema rezultatima za cikličku učinkovitost iz tablice 3.5. vidljivo je kako sva 3 ispitivana modela baterija imaju visoku učinkovitost, s time da za jednake faktore C punjenja i pražnjenja model LG 18650HG2 ima najvišu učinkovitost. Ako za svaki model povećamo faktor C punjenja, uz jednak faktor C pražnjenja, učinkovitost bi im bila manja jer se povećava energija punjenja. Takav slučaj izmjeren je kod baterije SONY. Namješten je nazivni faktor C punjenja ovog modela baterije, odnosno 1C, energija punjenja povećala se na 9280,823 mWh, a učinkovitost se smanjila na 86,33%.

*Tablica 3.5. Ciklička učinkovitost različitih modela litij-ionskih baterija*

| Tip       | Faktor punjenja C [1/h] | Faktor pražnjenja C [1/h] | Energija pražnjenja $E_{OUT}$ [mWh] | Energija punjenja $E_{IN}$ [mWh] | Ciklička učinkovitost [%] |
|-----------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Panasonic | 0,5                     | 1                         | 9723,17                             | 12301,21                         | 79,04                     |
| LG        | 0,5                     | 1                         | 9962,259                            | 10769,55                         | 92,51                     |
| SONY      | 1                       | 1                         | 8012,291                            | 8828,503                         | 90,75                     |

## 4. ZAKLJUČAK

Povećanjem opsega proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora raste i potreba za njezinim pohranjivanjem. Jedan od problema koji se pojavljuje kod ovog načina proizvodnje je isprekidana dostupnost obnovljivih izvora pa iz tog razloga može doći do razlika u potražnji i proizvodnji u određenom trenutku, odnosno mreža postaje nestabilna. Takav slučaj imamo kod vjetroelektrana i solarnih elektrana jer ne možemo utjecati na vremenske uvjete. U rješavanju ovoga problema značajnu ulogu imaju sustavi za pohranu električne energije. Razlog tomu je što oni omogućuju pohranu viška energije kada je potražnja niska, a kada se potražnja poveća ili dosegne svoj vrhunac, pohranjena energija se može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Na taj način se osigurava pouzdanost i kontinuiranost isporuke električne energije prema potrošačima.

U radu je prikazan proces punjenja/pražnjenja nekoliko modela baterija te usporedni proračun energetske učinkovitosti različitih elektrokemijskih spremnika električne energije. Postoje različite tehnologije elektrokemijskih spremnika električne energije, a one koje su korištene u praktičnom dijelu su litij-ion i nikal-metal-hibrid tehnologija. Uređaj koji je služio za punjenje pražnjenje je Junsu iCharger 4010Duo koji se putem USB kabela povezuje s računalom te izvozi željene podatke u Excel. Iz podataka o struji i naponu jasno se da zaključiti kako tijekom punjenja/pražnjenja litij-ionskih baterija ima dvije faze: prva u kojoj je struja punjenja/pražnjenja konstantna, a napon raste/pada i druga u kojoj je napon punjenja/pražnjenja konstantan, a struja pada. Oba ciklusa, i punjenje i pražnjenje, se prekidaju kada struja padne na određeni postotak nazivne struje. Grafičkom obradom podataka u Excelu se jasno može prikazati gore opisani tijekom punjenja/pražnjenja. Usporednim proračunom cikličke učinkovitosti zaključuje se kako je model proizvođača LG najisplativiji.

Korištenjem ovih sustava dugoročno je moguće ostvariti značajne uštede, a iako na prvu njihova cijena nije mala, provode se brojna istraživanja s ciljem poboljšanja ovih tehnologija, što dovodi i do smanjenja ovih troškova. Važno je spomenuti da potpomažu i sustave koji su zaduženi za pokrivanje baznog opterećenja u trenutcima naglih promjena potražnje, jer, za razliku od elektrana koje su zadužene za pokrivanje tog dijela, mogu brzo i točno reagirati na promjene opterećenja što čini sustav znatno fleksibilnijim.

## LITERATURA

- [1] Francisco Díaz-González, et al.: "Energy Storage in Power Systems", John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [2] International Electrotechnical Commission – IEC "Electrical Energy Storage", white paper, 2011., dostupno na: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf> [17.05.2020.]
- [3] Energy Storage Association, dostupno na: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/solid-electrode-batteries/>, [19.05.2020.]
- [4] Schrack Technik, dostupno na: <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/kontrola-baterije/>, [19.05.2020.]
- [5] Smart Energy International, dostupno na: <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/storage/the-vanadium-redox-flow-battery-a-game-changer-for-energy-storage-safety/>, [22.05.2020.]
- [6] Bethel Afework, et.al.: Energy Education, 2018., dostupno na: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Superconducting\\_magnetic\\_energy\\_storage](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Superconducting_magnetic_energy_storage), [23.05.2020.]
- [7] SuperPower Inc., dostupno na: <http://www.superpower-inc.com/content/superconducting-magnetic-energy-storage-smes>, [02.06.2020.]
- [8] Power, 2019., dostupno na: <https://www.powermag.com/why-power-to-gas-may-flourish-in-a-renewables-heavy-world/>, [03.06.2020.]
- [9] Gaizka Saldaña et al.: "Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation", Energies, No. 2750, Vol. 12, 2019
- [10] SANYO Energy (U.S.A) Corporation, podaci o bateriji, dostupno na: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf> [27.08.2020.]
- [11] LG Chem (Mobile Battery Division), High power cell development team, 2014., podaci o bateriji, dostupno na: <https://www.nkon.nl/sk/k/hg2.pdf> [27.08.2020.]
- [12] Sony Energy Devices Corporation, 2013., podaci o bateriji, dostupno na: <https://www.powerstream.com/p/us18650vtc5-vtc5.pdf> [27.08.2020.]



## SAŽETAK

U ovom radu opisani su različiti sustavi za pohranu električne energije: mehanički, električni, elektrokemijski i termički. Opisane su njihove prednosti i nedostaci te područja primjene, kao i stvarni primjeri gdje se oni primjenjuju. U praktičnom dijelu izvršena je analiza različitih elektrokemijskih spremnika energije na temelju punjenja i pražnjenja istih. Tehnologije koje su testirane jesu litij-ionska i nikal-metal-hibridna, a uređaj koji je koristio za punjenje pražnjenje je Junsi iCharger 4010Duo. Usporedbom rezultata učinkovitosti kružnog procesa različitih modela litij-ionskih baterija donesen je zaključak o najisplativijoj izvedbi. Rezultati i analize svih ciklusa punjenja/pražnjenja izvedeni su u programskom paketu EXCEL.

**Ključne riječi:** Pohrana, učinkovitost, kapacitet, elektrolit, napon, baterija, stanje napunjenosti

## ENERGY CHARACTERISTICS OF DIFFERENT ELECTRICITY STORAGE TECHNOLOGIES

### ABSTRACT

This paper describes different systems for storing electricity: mechanical, electrical, electrochemical and thermal. Their advantages and disadvantages of the field of application are described, as well as real examples of where they are applied. In the practical part, the analysis of different electrochemical energy tanks was performed based on their charging and discharging. The technologies tested are lithium-ion and nickel-metal-hybrid, the device used for charging discharges is the Junsi iCharger 4010Duo. By comparing the results of the cycle efficiency of different models of lithium-ion batteries, a conclusion was made about the most cost-effective performance. The results and analyzes of all charge / discharge cycles were performed in the EXCEL software package.

**Key words:** Storage, efficiency, capacity, electrolyte, voltage, battery, state of charge

## PRILOZI

### POPIS SLIKA

#### Sustavi pohrane električne energije:

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 2. 1.</b> Grafički prikaz podjele sustava za pohranu električne energije [1].....   | 2  |
| <b>Slika 2. 2.</b> Princip rada akumulacijske hidroelektrane [1].....  | 3  |
| <b>Slika 2. 3.</b> Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom [1].....   | 4  |
| <b>Slika 2. 4.</b> Ogledna topologija zamašnjaka [1].....  | 5  |
| <b>Slika 2. 5.</b> Princip rada baterije [1].....  | 7  |
| <b>Slika 2. 6.</b> Karakteristika naponskog pražnjenja baterijske ćelije [1].....  | 7  |
| <b>Slika 2. 7.</b> Jednostavni model baterije [9].....   | 8  |
| <b>Slika 2. 8.</b> Topologija olovne baterije [1].....   | 10 |
| <b>Slika 2. 9.</b> Shematski prikaz ćelije NaS baterije i baterijski modul [1].....  | 12 |
| <b>Slika 2. 10.</b> Shematski prikaz Li-ion baterijske ćelije [1].....   | 13 |
| <b>Slika 2. 11.</b> Litij-ionski baterijski sklop u IREC laboratoriju [1].....   | 13 |
| <b>Slika 2. 12.</b> Princip rada protočnih baterija [1].....   | 14 |
| <b>Slika 2. 13.</b> Koncept regenerativne gorive ćelije [1].....   | 17 |
| <b>Slika 2. 14.</b> Power-to-gas koncept [1].....  | 19 |
| <b>Slika 2. 15.</b> Ilustrativna topologija super-kondenzatora [1].....  | 20 |
| <b>Slika 2. 16.</b> Karakteristika ovisnosti kapacitivnosti i ESR-a o temperaturi [1].....   | 21 |
| <b>Slika 2. 17.</b> Ilustrativna topologija SMES sustava. Tekući helij je pohranjen u spremnicima na lijevoj strani slike, dok se supravodljiva zavojnica nalazi u desnom spremniku [1]..... | 22 |
| <b>Slika 2. 18.</b> Topologija solarne elektrane sa sustavom za pohranu energije pomoću otopljenih soli [1].....   | 24 |

#### Analiza performansi različitih elektrokemijskih tehnologija pohrane električne energije:

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 3. 1.</b> Juns iCharger 4010 Duo punjač.....   | 27 |
| <b>Slika 3. 2.</b> Padajući izbornik.....   | 28 |
| <b>Slika 3. 3.</b> Uređaj podešen za rad na dva kanala.....   | 28 |
| <b>Slika 3. 4.</b> CC-CV karakteristika punjenja litij-ionske baterije.....   | 29 |
| <b>Slika 3. 5.</b> Izgled Panasonic NCR18650B baterijskog članka.....   | 30 |
| <b>Slika 3. 6.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu za punjenje s nazivnim faktorom C.....                            | 31 |
| <b>Slika 3. 7.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu za punjenje s nazivnim faktorom C.....             | 31 |
| <b>Slika 3. 8.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu za pražnjenje s nazivnom strujom pražnjenja.....                | 32 |
| <b>Slika 3. 9.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu za pražnjenje s nazivnom strujom pražnjenja..... | 32 |
| <b>Slika 3. 10.</b> Izgled LG 18650HG2 baterijskog članka.....  | 33 |
| <b>Slika 3. 11.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (0,5C).....  | 34 |
| <b>Slika 3. 12.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (0,5C).....                                       | 34 |
| <b>Slika 3. 13.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu (1C).....  | 35 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 3. 14.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (1C)            | 35 |
| <b>Slika 3. 15.</b> Izgled SONY US18650VTC5 baterijskog članka .....  | 36 |
| <b>Slika 3. 16.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (1C).....                        | 37 |
| <b>Slika 3. 17.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (1C)...           | 37 |
| <b>Slika 3. 18.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu (1C).....                      | 38 |
| <b>Slika 3. 19.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (1C)            | 38 |
| <b>Slika 3. 20.</b> Izgled Panasonic Eneloop PRO BK3HCDE4BE baterijskog članka .....                              | 39 |
| <b>Slika 3. 21.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje punjenja o vremenu (0,1C).....                      | 39 |
| <b>Slika 3. 22.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije punjenja o vremenu (0,1C)            | 40 |
| <b>Slika 3. 23.</b> Grafički prikaz ovisnosti napona i struje pražnjenja o vremenu (0,1C).....                    | 40 |
| <b>Slika 3. 24.</b> Grafički prikaz ovisnosti stanja napunjenosti i energije pražnjenja o vremenu (0,1C)<br>..... | 41 |

## **POPIS TABLICA**

### **Analiza performansi različitih elektrokemijskih tehnologija pohrane električne energije:**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tablica 3. 1.</b> Tehničke karakteristike uređaja.....                                 | 27 |
| <b>Tablica 3. 2.</b> Tehničke karakteristike Panasonic NCR18650B baterijskog članka ..... | 29 |
| <b>Tablica 3. 3.</b> Tehničke karakteristike LG 18650HG2 baterijskog članka .....         | 32 |
| <b>Tablica 3. 4.</b> Tehničke karakteristike SONY US18650VTC5 baterijskog članka .....    | 35 |
| <b>Tablica 3. 5.</b> Ciklička učinkovitost različitih modela litij-ionskih baterija.....  | 40 |