

# Punjive baterije, karakteristike i modeli

---

**Bičak, Mateo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:200:796258>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**PUNJIVE BATERIJE, KARAKTERISTIKE I MODELI**

**Završni rad**

**Mateo Bičak**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Mateo Bičak
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4931, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165088540
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Punjive baterije, karakteristike i modeli
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U završnom radu potrebno je opisati građu modernih i široko korištenih vrsta. Opisati kemijske i fizikalne procese na kojima se zasniva rad (pohranjivanje energije) u punjivim baterijama. Predstaviti najčešće korištene modele baterija. Načiniti usporednu analizu parametara različitih tehnologija baterija. Opisati prednosti i nedostatke pojedinih tehnologija baterija i područja njihove primjene. Opisati modele baterija te mjerne postupke određivanja parametara predstavljenih modela. Provesti mjerenja određivanja parametara jednostavnijih modela baterija. Izlaganje u završnom radu je potrebno poduprijeti
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	18.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	25.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	26.09.2024.

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

Osijek, 26.09.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Mateo Bičak
<b>Studij:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4931, 27.07.2021.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Punjive baterije, karakteristike i modeli**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

i sumentora

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 pristupnika:

---

**SADRŽAJ**

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. OPĆENITO O BATERIJAMA</b> .....	<b>2</b>
2.1. Povijest baterija .....	2
2.2. Podjela baterija .....	3
2.2.1. Primarne baterije .....	4
2.2.2. Sekundarne baterije.....	5
2.3. Građa baterije .....	6
2.4. Princip rada baterije .....	8
2.4.1. Pražnjenje .....	9
2.4.2. Punjenje.....	11
<b>3. PARAMETRI BATERIJA</b> .....	<b>13</b>
3.1. Napon.....	13
3.2. Kapacitet .....	14
3.2.1. C-razina (eng. <i>C-rate</i> ).....	15
3.3. Energija .....	15
3.4. Unutarnji otpor .....	16
3.5. Stanje napunjenosti (eng. <i>state of charge, SOC</i> ).....	17
3.6. Razina ispražnjenosti (eng. <i>depth of discharge, DOD</i> ).....	17
3.7. Životni vijek.....	18
<b>4. MODELI BATERIJA</b> .....	<b>19</b>
4.1. Model s idealnim naponskim izvorom.....	19
4.2. Model s naponski upravljanim naponskim izvorom.....	20
4.3. Rint model.....	22
4.4. Theveninov model .....	23
<b>5. TEHNOLOGIJE PUNJIVIH BATERIJA</b> .....	<b>26</b>

---

5.1. Olovne baterije .....	26
5.2. Nikal-kadmij baterije.....	28
5.3. Nikal-metal hidrid baterije.....	29
5.4. Litij-ion baterije .....	30
6. ODREĐIVANJE OSNOVNIH PARAMETARA.....	33
6.1. Određivanje kapaciteta.....	33
6.2. Određivanje unutarnjeg otpora .....	35
6.3. Određivanje stanja napunjenosti baterije .....	37
7. PREGLED LITERATURE .....	40
8. ZAKLJUČAK.....	42
POPIS UPOTREBLJENE LITERATURE .....	43
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA .....	49
SAŽETAK.....	51
ABSTRACT .....	51
ŽIVOTOPIS.....	52
PRILOZI.....	53

---

## 1. UVOD

Razvoj i primjena modernih punjivih baterija značajno su olakšale svakodnevni život te su unaprijedile način na koji koristimo energiju u svakodnevnim uređajima, industriji i transportu. Baterije igraju ključnu ulogu u tom procesu zato što one pružaju električnu energiju koja sve to pokreće. Električna energija u bateriji nastaje elektrokemijskim procesima koji će se detaljnije pojasniti u nastavku rada. Bitno je naglasiti da su se baterije značajno razvile od svoje prve pojave te se svakodnevno usavršavaju kako bi se dobile što veće performanse i što manji gubici.

U ovom završnom radu bit će dana osnovna teorijska podloga o baterijama krećući od samog početka pa do danas. Biti će opisani elektrokemijski procesi koji se odvijaju u samoj bateriji tijekom punjenja i pražnjenja, nakon čega će se predstaviti temeljni parametri svake baterije koji pobliže opisuju svojstva i karakteristike pojedinih baterija. Osim toga, rad će predstaviti najčešće korištene modele baterija čije razumijevanje je ključno za optimizaciju performansi baterija i njihovih aplikacija prilikom dizajniranja i izrade samih baterija. Uz to biti će provedena usporedna analiza parametara različitih tehnologija baterija, uključujući olovne baterije, litij-ionske baterije, nikal-kadmijeve baterije i nikal-metal hidridne baterije. Ova analiza će obuhvatiti prednosti i nedostatke pojedinih tehnologija te njihova specifična područja primjene. Za kraj završnog rada biti će opisane razne metode koje se koriste za dobivanje ključnih parametara baterije poput kapaciteta, unutarnjeg otpora te stanja napunjenosti.

### 1.1 Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je opisati građu modernih i široko korištenih vrsta. Opisati kemijske i fizikalne procese na kojima se zasniva rad (pohranjivanje energije) u punjivim baterijama. Predstaviti najčešće korištene modele baterija. Načiniti usporednu analizu parametara različitih tehnologija baterija. Opisati prednosti i nedostatke pojedinih tehnologija baterija i područja njihove primjene. Opisati modele baterija te mjerne postupke određivanja parametara predstavljenih modela. Provesti mjerenja određivanja parametara jednostavnijih modela baterija. Izlaganje u završnom radu je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shemama.

## 2. OPĆENITO O BATERIJAMA

Baterija je uređaj koji izravno vrši pretvorbu kemijske energije pohranjene u njezinim aktivnim komponentama direktno u električnu energiju, kada je to potrebno, putem elektrokemijske oksidacijsko-redukcijske reakcije [1]. Njihova povijest seže daleko u prošlost, ali najznačajniji napredak je postignut tek u posljednjih nekoliko desetljeća, zahvaljujući razvoju novih tehnologija i materijala. Napredak baterija je dosta spor u usporedbi s razvojem procesora i sličnih elektroničkih tehnologija, u kojima se broj tranzistora u integriranom krugu udvostruči svake dvije godine, dok se kapacitet litij-ionskih baterija povećava samo za 8% svake godine [2]. No, danas su baterije svakodnevni dio našeg života, možda čak i više nego što mislimo. Koristimo ih u svemu te su svuda oko nas, od malih prijenosnih uređaja kao što su mobiteli, laptopi, alati pa sve do automobila i velikih sustava za pohranu energije.

### 2.1. Povijest baterija

Povijest baterija proteže se tisućama godina unazad, ali najznačajniji napredak se dogodio tijekom posljednjih nekoliko stoljeća. Izraz "baterija" je prvi put bio upotrijebljen davne 1749. godine od strane američkog znanstvenika i izumitelja Benjamina Franklina kako bi u svojim pokusima s električnom strujom mogao opisati skup povezanih kondenzatora. Iako je riječ baterija prvi put spomenuta u osamnaestom stoljeću, povijesni tragovi nas vraćaju daleko u prošlost, točnije oko 250 godina prije Krista, u malo selo nedaleko od Bagdada gdje su arheolozi 1936. godine pronašli zdjele načinjene od terakote koje su na sebi imale zarolanu pločicu bakra. Tim otkrićem znanstvenici pretpostavljaju da zdjela načinjena od terakote predstavlja prvu galvansku ćeliju te je zato prozvana "bagdaskom baterijom" [3].

Daljnijim pogledom u budućnost nailazimo na talijanskog liječnika i fizičara Luigia Gavanija koji je 1780. otkrio pojavu "životinjskog elektriciteta" tako što je prilikom seciranja žabe, koja je prilikom seciranja bila pričvršćena na brončanu kuku, primijetio trzaj noge kada ju je dotaknuo metalnim skalpelom. Gavanij je došao do zaključka da interakcija različitih metala može proizvesti mišićnu kontrakciju. Zainteresiran otkrićima Gavanija, drugi talijanski fizičar, Alessandro Volta, je krenuo eksperimentirati sa različitim materijalima. Kroz razne eksperimente je došao do zaključka da neke tekućine mogu generirati konstantni tok električne energije ukoliko se koriste kao vodič. Nastavkom eksperimentiranja, Volta je 1800. godine izumio prvu pravu bateriju koju je nazvao "Voltin elektrostatički stup" [4]. Prva prava baterija se sastojala od niza nasloženih bakrenih (Cu) i cinkovih (Zn) diskova između kojih se nalazila tkanina natopljena



slanom vodom. Ova baterija je proizvodila kontinuiranu stabilnu struju, a svaka ćelija je davala 0,76 V. Napon se može povećati s većim brojem naslaganih ćelija [5]. Nedostatak ove baterije je bio kratak životni vijek te curenje elektrolita, tj. slane vode, koje bi prouzrokovalo kratki spoj između diskova. S ciljem poboljšanja Voltine baterije, englez John Frederic Danielli je 1836. godine izumio poboljšanu bateriju koju je nazvao "Daniellovom ćelijom". Danielli je napravio bateriju koja je koristila poroznu barijeru kako bi odvojila bakreni i cinkov sulfat koji su služili kao elektrolit. Iako ova baterija nije savršena, znatno je pouzdanija i uvelike je produžila životni vijek baterije za razliku od Voltinog elektrostatičkog stupa [6].

Veliki napredak kod baterija je ostvario francuski fizičar Gaston Planté tako što je 1859. godine izumio prvu olovnu bateriju koja ima mogućnost punjenja. Ova tehnologija se koristi i dan danas za pokretanje automobila. Nedostatak ove baterije je bila njena težina i glomaznost za količinu energije koju je davala [3]. Sve prijašnje baterije su koristile tekući elektrolit koji je sklon curenju te predstavlja sigurnosni rizik i ograničava upotrebu u prijenosnim uređajima. Kao odgovor na potrebe za pouzdanijom i sigurnijom baterijom, njemački znanstvenik Carl Gassner je 1886. godine izumio prvu "suhu ćeliju" koristeći elektrolit u obliku paste. Ovo je bio početak u razvoju prijenosnih alkalnih baterija [6]. Novije doba je obilježilo razvoj litij-ionske baterije kada je Sony predstavio svoje prve komercijalne Li-ion baterije 1991. godine koje su imale visoku energetska gustoću, dugi životni vijek te su bile lagane i dolazile su u malim dimenzijama. One su mahom preuzele tržište i sada su u gotovo svim prijenosnim uređajima te automobilima[4].

### 2.2. Podjela baterija

Prije sam glavne podjele baterija, bitno je razlikovati pojam ćelije od baterije, iako se one često znaju pomiješati u svakodnevnom govoru. Ćelija je osnovna elektrokemijska jedinica koja pruža izvor električne energije direktno iz kemijske energije. Sastoji se od elektroda, tj. anode (negativna elektroda) i katode (pozitivna elektroda), separatora, elektrolita, spremnika i priključnica [1]. Više povezanih ili čak jedna sama ćelija može predstavljati bateriju. Ovisno o primjeni baterije, tj. potrebnom naponu, struji ili kapacitetu, biramo način na koji će se ćelije spojiti. Paralelni spoj više ćelija se koristi kada se želi ostvariti veći kapacitet i veća struja, ukupni napon baterije je jednak naponu ćelije radi Kirchhoffovog zakona za napone, dok se serijski spoj koristi kada se želi ostvariti veći napon, jer se prema Kirchhoffovog zakona za napone, ukupan napon baterije se dobiva zbrojem napona serijsko povezanih ćelija [7]. Osim načina spajanja ćelija, baterije možemo podijeliti prema raznim kriterijima, ali ona najosnovnija podjela je podjela na primarne i sekundarne, tj. punjive i nepunjive baterije.

### 2.2.1. Primarne baterije

Glavna karakteristika primarnih baterija je njihova ne mogućnost punjenja, tj. elektrokemijska reakcija kojom se dobiva električna energija kod ovog tipa baterija nije reverzibilna te samo punjenje ovih baterija nije preporučljivo zato što može doći do zapaljenja, eksplozije, ili curenja štetnih plinova iz baterije puknućem vanjske stjenke radi nastanka prevelikog pritiska zagrijavanjem baterije [8]. Iako im je ponovo punjenje mana, one su i dalje u uporabi radi svoje jednostavnosti, niske cijene i dugog vijeka trajanja kada se ne koriste. Najčešće ih možemo pronaći u manjim elektroničkim uređajima poput igračka, satova, daljinskih upravljača ili u uređajima koji imaju nisku potrošnju energije te u onim uređajima kod kojih ponovo punjenje nije moguće kao kod pacemakera [9].

Ovaj tip baterija se u literaturi često zna povezati s pojmom suhe ćelije (eng. *Dry cell*) zato što se taj pojam odnosi na najčešće upotrebljavanu tehnologiju za proizvodnju ćelije kod primarnih baterija [10]. Naziv suhe ćelije su dobile zato što ne koriste tekući elektrolit, već se koristi elektrolitska pasta ili gel elektrolit. Najčešći primjeri ovog tipa baterija cink-ugljične, alkalne i litijske baterije. Cink-ugljične baterije postoje više od sto godina te su bile najraširenije primarne baterije radi svoje niske cijene, dobrih performansi i dostupnosti [1]. Dolaze u raznim dimenzijama i oblicima te imaju standardizirane oznake: AAA, AA, C, D i 9V baterije te ih je moguće vidjeti na slici 2.1. [11].



Slika 2.1. Tipovi alkalnih baterija [12]

Kao što samo ime kaže, glavni materijali ove baterije su cink i ugljik, gdje se cink koristi kao kapsula same baterije i ima ulogu anode, a ugljik se u obliku grafitnog štapića nalazi u sredini ćelije te ima ulogu katode. Oko grafitnog štapića se nalazi praškasta smjesa mangan oksida i

ugljika, dok je elektrolit u obliku paste načinjen od smjese amonijeva klorida i cinkova klorida [10]. Alkalne baterije dolaze na tržište kao poboljšana verzija cink-ugljičnih baterija s nekoliko puta dužim vijekom trajanja, kapacitetom i gotovom dvostrukom energetsom gustoćom. Katoda je u pravilu načinjena od mangan oksida u prahu, a anoda od cinka u prahu. Katodu od anode razdvaja papirnati separator natopljen kalijevim hidroksidom koji služi kao elektrolit [13]. Kompozicija ovih kemijskih materijala omogućuje dobavu više energije pri većim strujnim opterećenima za razliku od cink-ugljične baterije [14]. Radi svih ovih sigurnosnih i energetske poboljšanja, alkalne baterije su preuzele tržište kao vodeće primarne baterije, iako se u razvijenim zemljama one počinju sve manje koristiti radi uporabe punjivih baterija, njihova potražnja je sve veća u zemljama u razvoju radi svoje jednostavnosti i pristupačnosti, kako cijenom tako i kvalitetom.

### 2.2.2. Sekundarne baterije

Razvojem tehnologije i tržišta javlja se potreba za ekonomičnijom, izdržljivijom i ekološki prihvatljivijom baterijom. Ove zahtjeve ispunjavaju sekundarne baterije koje su poznatije pod nazivom punjive baterije, što je istovremeno glavna razlika između njih i primarnih baterija koje se ne mogu ponovo napuniti. Prijelaz sa primarnih baterija na sekundarne se postepeno događao radi tehnološkog razvoja baterija, boljih metoda punjenja i pristupačnije cijene [15]. Neke od najzastupljenijih sekundarnih baterija su: olovne, nikal-kadmij, nikal-metal hibridne te litij-ionske baterije. Sekundarne baterije pronalazimo u mnogim područjima svakodnevnog života, od električnih uređaja kao što su mobiteli, laptopi, pametni satovi pa do bežičnih kućanskih aparata poput usisivača, električnih brijanja i sušila za kosu [16]. U posljednje vrijeme, sekundarne baterije su postale glavni izvor napajanja za električna i hibridna vozila. Pokrenuti su mnogi razvojni programi s ciljem poboljšanja performansi postojećih baterijskih sustava i razvojem novih sustava koje će ispuniti nove nadolazeće zahtjeve [1]. Područje gdje se primjenjuju sekundarne baterije možemo svrstati u dvije glavne kategorije:

1. Primjene gdje sekundarne baterije služe kao uređaji za pohranu energije koji se obično pune iz glavnog izvora energije te isporučuju električnu energiju po potrebi, kada glavni izvor energije nije dostupan ili ne može podnijeti zadano opterećenje. Primjeri su automobilski i zrakoplovni sustavi, neprekidna napajanja i pričuveni izvori napajanja, te hibridne primjene [1].

2. Primjene gdje se sekundarne baterije koriste kao primarni izvor električne energije koje se onda nakon pražnjenja ponovo puni bilo to u uređaju u kojem je ispražnjena ili pomoću odvojenog uređaja za punjenje. Uporaba baterija na ovaj način omogućuje veću uštedu troškova jer se baterije ne moraju konstantno mijenjati za nove. Primjeri gdje se sekundarna baterija koristi kao primarni izvor energije su većina potrošačke elektronike, električna vozila, alati, itd. [1].

Ovaj tip baterije se može ponovo električno napuniti nakon što se isprazni tako da se propusti struja suprotnog smjera od onog smjera struje koja teče tijekom pražnjenja [1]. Ponovnim punjenjem, kemijski spojevi unutar baterije se mogu ponovo rekonstruirati ukoliko je primijenjen električni potencijal na elektrodama veći od električnog potencijala same ćelije. Ovim postupkom se energija ubrizgava u ćeliju koja omogućava kretanje pozitivnih iona, tj. kationa i elektrona od pozitivne elektrode nazad prema negativnoj elektrodi što uzrokuje pohranu naboja [7]. Osim svoje mogućnosti ponovnog punjenja, sekundarne baterije imaju veću gustoću energije, mali unutarnji otpor, linearnu karakteristiku pražnjenja te imaju povoljne karakteristike prilikom rada na niskim temperaturama [1]. Iako su neke izvedbe sekundarnih baterija slične primarnim, sekundarne baterije se pojavljuju u puno raznovrsnijim izvedbama i dimenzijama kako bi zadovoljile određene uvijete ovisno o njihovoj namjeni. Razne izvedbe sekundarnih baterija je moguće vidjeti na slici 2.2.



Slika 2.2. Tipovi sekundarnih baterija [17]

### 2.3. Građa baterije

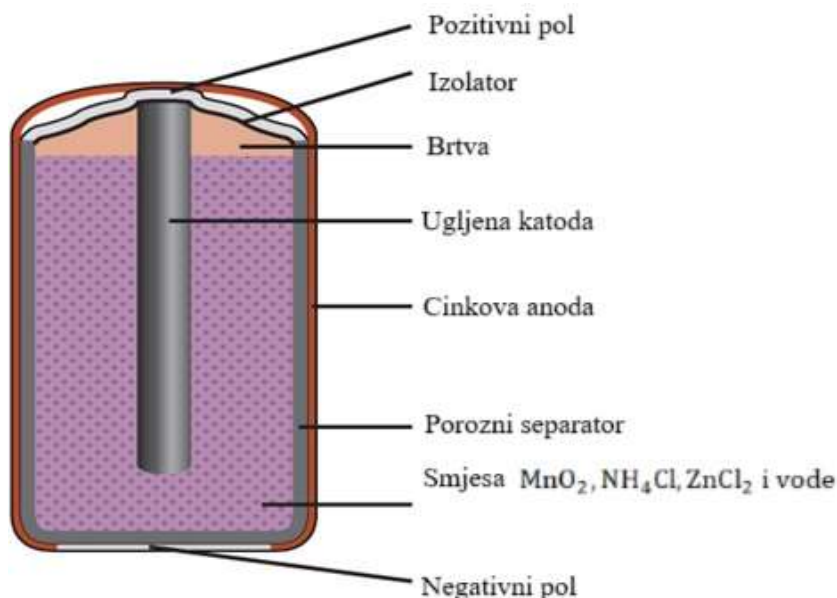
Kako bi se najjednostavnije shvatila općenita građa baterije, u ovom dijelu završnog rada će se opisati sastav ćelije, koja nije ništa drugo nego "građevni blok" same baterije, tj. ćelija predstavlja

osnovnu elektrokemijsku jedinicu koja pruža izvor električne energije. Kao što je bilo prethodno navedeno, baterija se može sastojati od jedne ćelije ili više serijsko ili paralelno povezanih ćelija. Primjer jedne takve baterije je olovna baterija koja je poznatija pod nazivom akumulator te najčešće dolazi u izvedbi sa šest serijsko povezanih ćelija. Svaka ćelija sadržava anodu (negativnu elektrodu), katodu (pozitivnu elektrodu), elektrolit te separator.

Elektrode su najčešće načinjene od praškastih kompozita aktivnih materijala koji su potrebni za nastajanje elektrokemijske reakcije, odabir odgovarajućih materijala za anodu i katodu uvelike utječe na napon same ćelije i kapacitet [18]. Standard je da elektrode imaju poroznu strukturu što rezultira velikom površinom elektrode, unutar samih geometrijskih dimenzija elektrode, što rezultira uniformnom raspodjelom struje [1]. Anoda je elektroda iz koje struja teče u vanjski krug, tj. izvire elektroni i nastaju pozitivni ioni [19]. Tijekom elektrokemijske reakcije, na ovoj elektrodi nastaje proces oksidacije. Materijali koji se koriste za izradu anode su najčešće metali poput cinka, litija i olova te moraju biti efikasan reducens, kemijski stabilni te moraju imati dobru vodljivost i trebaju biti ekonomski isplativi [1]. Katoda je elektroda prema kojoj struja teče u vanjskom krugu, tj. tu dolaze elektroni sa anode i nastaju negativni ioni [19]. Na ovoj elektrodi uvijek nastaje proces redukcije tijekom elektrokemijske reakcije. Za izradu katode su često korišteni sulfidi, kisik ili metalni oksidi poput nikal-oksihidroksida, olovnog dioksida, litij-kobalt oksida, litij-željezo-fosfata te mangan dioksida [20]. Ovi katodni materijali su odabrani zato što su efikasni oksidansi, stabilni su u kontaktu s elektrolitom te imaju povoljan radni napon [1].

Elektrolit je tvar koja omogućuje ionsku vodljivost između anode i katode, čime se omogućuje provođenje električne struje kroz vanjski krug. Prema definiciji Alexandra Volte elektrolit se može definirati kao sloj koji izolira elektrone, tj. ne propušta ih, a provodi ione [21]. Njegovo izolacijsko svojstvo je neophodno jer bez njega dolazi do kratkog spoja unutar ćelije. Elektrolit se može pojaviti u tekućem ili čvrstom stanju te obično sadrži otopljene soli, kiseline ili alkale [21]. Elektroliti koji vode u čvrstom stanju sadrže kristalne ionske spojeve u kojima se električni naboj prenosi ionima kroz šupljine u kristalnoj rešetci, dok tekući elektroliti svoju vodljivost dobivaju rastavljanjem elektrolita na ione otapanjem ili taljenjem procesom elektrolitske disocijacije [22]. Osim što mora spriječiti kratki spoj unutar ćelije, elektrolit mora biti kemijski stabilan i inertan u odnosu na druge komponente s kojima je u dodiru, to se odnosi na elektrode s kojima elektrolit ne smije reagirati kako bi se spriječile neželjene reakcije i kako bi se osigurale dugotrajne i učinkovite elektrokemijske reakcije.

Separator je porozna membrana koja je smještena između pozitivne i negativne elektrode te ih fizički odvaja te tako predstavlja još jednu mjeru opreza koja sprječava kratki spoj unutar ćelije, dok istovremeno omogućava prolaz ionima kroz elektrolit. Isto kao i elektrolit, separator sadrži svojstva ionske propusnosti i elektronske nepropusnosti. Dolaze u obliku gel elektrolita ili poroznih inertnih materijala ispunjenih elektrolitom [18].



Slika 2.3. Poprečni presjek cink-karbonske baterije [23]

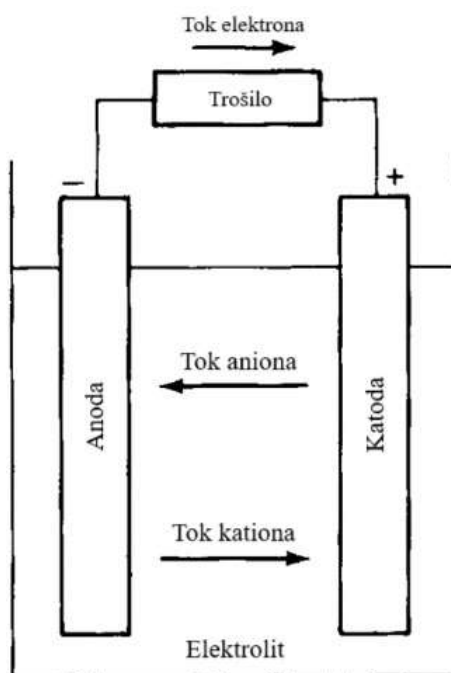
## 2.4. Princip rada baterije

Kako bi rad baterije bio u potpunosti jasan potrebno je razumjeti osnovne elektriciteta. Najjednostavnije rečeno, elektricitet je tip energije proizveden tokom elektrona. Elektroni se inače nalaze u elektronskom omotaču atoma, no poznato je da atom može dobiti ili izgubiti jedan ili više elektrona. Tada se ti atomi nazivaju ioni. Atom je neutralan kada ima isti broj protona, pozitivno nabijenih čestica, i isti broj elektrona, negativno nabijenih čestica. Ukoliko atom sadrži više elektrona nego protona, on postaje negativno nabijeni ion, tj. anion, a ukoliko atom sadrži više protona od elektrona, on postaje pozitivno nabijeni ion, tj. kation [24]. Kako bi uopće imali protok elektrona, potrebno je imati mjesto iz kojeg će elektroni teći i mjesto prema kojemu će teći, ta mjesta su kod baterije elektrode. Elektroni putuju od negativne elektrode, tj. anode, k pozitivnoj elektrodi, tj. katodi, putem vanjskog kruga (npr. pomoću bakrene žice) ukoliko imamo razliku potencijala na elektrodama.

Kemijske reakcije koje su zastupljene u bateriji su oksidacija i redukcija, češće poznatije kao redox reakcijom. Do ovih kemijski reakcija se dolazi kada različiti materijali unutar ćelije stupe u kontakt te atomi počnu reagirati jedni s drugima. Redox reakcija se može podijeliti u dvije polu-reakcije koje će se u idućem poglavlju objasniti na tipu nikal-kadmijeve ćelije. Prva polu-reakcija se odvija na anodi, gdje materijal anode oksidira u doticaju s elektrolitom te gubi elektrone. Druga polu-reakcija nastaje na katodi gdje se materijal katode reducira te želi primiti elektrone dobivene oksidacijskom reakcijom. Radi ovih kemijskih reakcija, na anodi se nakuplja višak elektrona, a na katodi manjak elektrona što stvara razliku potencijala između ove dvije elektrode. Elektroni imaju tendenciju da se kreću prema mjestu s manjkom elektrona, u ovom slučaju to mjesto je katoda. Prepreku im stvara separator koji fizički odvaja anodu od katode te sprječava protok elektrona unutar ćelije što bi u suprotnom izazvalo kratki spoj ili samopražnjenje. Radi toga elektroni trebaju alternativnu rutu kako bi došli do katode. Ukoliko na elektrode spojimo vanjski krug sa ili bez tereta, elektroni će poteći sa anode ka katodi i obaviti će rad te će tako zatvoriti vanjski krug. Osim što sada imamo protok elektrona, u isto vrijeme je potreban i tok pozitivnih iona kako bi se stanje naboja uravnotežilo. Kationi, tj. pozitivni ioni se mogu kretati jedino putem elektrolita, dok se elektroni mogu kretati jedino preko vanjskog kruga. Da bi imali neutralno stanje naboja na anodi, moramo imati jednak broj proizvedenih elektrona i kationa. Istovremeno, katoda mora izbalansirati negativni naboj elektrona koji dolaze s anode tako da privlači katione iz elektrolita, isto tako je moguća i suprotna reakcija gdje katoda ispušta anione u elektrolit kako bi se uravnotežilo stanje naboja na anodi. Ovaj tok iona kroz elektrolit omogućava elektrodama da nastave sudjelovati u elektrokemijskim reakcijama sve dok postoji zatvoren krug između anode i katode [25].

### 2.4.1. Pražnjenje

Pražnjenje započinje onog trenutka kada se na ćeliju priključi vanjsko trošilo. Tada se zatvara vanjski krug i nastaje tok elektrona iz anode, koja je oksidirala, preko vanjskog trošila prema katodi, koja se reducirala kako bi mogla prihvatiti dolazeće elektrone. Električni krug se zatvara u elektrolitu u kojemu nastaje tok kationa od anode do katode i tok aniona od katode do anode [1]. Na sljedećoj slici je prikazana pojednostavljena shema ćelije u procesu pražnjenja na kojoj se vidi smjer kretanja elektrona i iona.



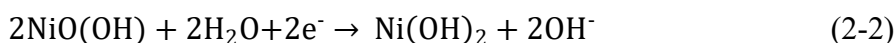
**Shema 2.1.** Praznjenje ćelije [1]

Detaljniji prikaz reakcija koja se događaju tijekom praznjenja će biti opisane na tipu nikal-kadmijeve ćelije čija je anoda načinjena od kadmija, katoda od nikal oksid-hidroksida, a elektrolit koji se koristi je kalijev hidroksid (KOH). U sljedećim kemijskim polu-reakcijama, lijeva strana kemijske jednadžbe će sadržavati sudionike koji ulaze u proces, a na desnoj strani će biti spojevi koji nastaju tom reakciju, tj. produkt reakcije.

Tijekom praznjenja nastaje oksidacija materijala anode tj. kadmija, koji reagira s ionom hidroksida, koji je nastao elektrolitskom disocijacijom kalijevog hidroksida. Kao produkt ove reakcije se dobiju dva slobodna elektrona i kadmijev hidroksid, što je prikazano sljedećom jednadžbom [1]:

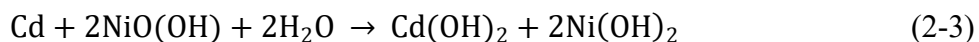


Na katodi se reducira nikal oksid-hidroksid u nikal hidroksid i ione hidroksida, primajući elektrone iz prošle polu-reakcije kao što je vidljivo u sljedećoj jednadžbi [26]:



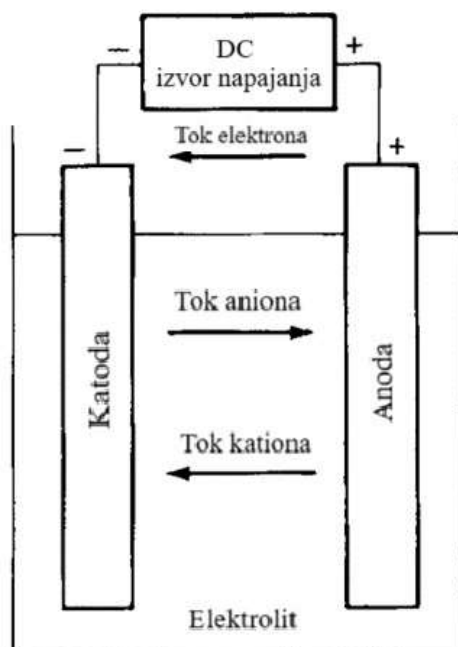
Kombinacijom ovih dviju polu-reakcija možemo dobiti cjelokupnu reakciju koja prilikom praznjenja ćelije, kadmij pretvara u kadmij hidroksid na anodi, a nikal oksid-hidroksid pretvara u nikal hidroksid na katodi. Cjelokupna reakcija praznjenja se može prikazati sljedećom jednadžbom [26]:





### 2.4.2. Punjenje

Punjenje je moguće samo kod sekundarnih baterija, što je slučaj kod nikal-kadmij baterije gdje se nastale reakcije tijekom pražnjenja mogu vratiti u prvobitno stanje. Ukoliko se na elektrode primjeni veći električni potencijal od električnog potencijala same ćelije, poteći će struja suprotnog smjera od onog smjera koja je prisutna prilikom pražnjenja. Time se ubrizgava energija nazad u ćeliju, uzrokujući kretanje kationa i elektrona od pozitivne elektrode nazad prema negativnoj elektrodi [7]. Pošto je sad smjer struje obrnut, oksidacija nastaje na pozitivnoj elektrodi, a redukcija na negativnoj elektrodi. Dolazi do zamjene terminologije, tj. prema definiciji, anoda se definira kao elektroda gdje nastaje oksidacija, dok kod katode nastaje redukcija, tijekom punjenja pozitivna elektroda predstavlja anodu, a negativna elektroda katodu [1]. Dakle negativna elektroda je anoda samo onda kada se ćelija prazni, a kada se ćelija puni onda je katoda. Isti princip vrijedi za pozitivnu elektrodu. Na sljedećoj slici je moguće vidjeti pojednostavljenu shemu ćelije u procesu punjenja:

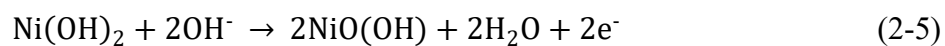


**Shema 2.2.** Punjenje ćelije [1]

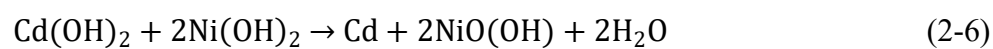
Reakcija na negativnoj elektrodi koja se događa tijekom punjenja nikal-kadmijeve ćelije je prikazana sljedećom jednačbom [1]:



Na pozitivnoj elektrodi nastaje oksidacija nikal oksid-hidroksida pri čemu se oslobađaju elektroni kao što je vidljivo na sljedećoj jednažbi [1]:



Cjelokupni proces punjenja nikal kadmijeve baterije prikazan je sljedećom jednažbom [1]:



### 3. PARAMETRI BATERIJA

Razvojem tehnologije, raste i važnost razumijevanja različitih parametara baterija koje izravno utječu na njihovu učinkovitost, vijek trajanja i sigurnost. Parametri poput napona, kapaciteta, energije, gustoće energije su samo neke od brojnih parametara koje pružaju ključne informacije koje pomažu pri odabiru odgovarajuće baterije za specifičnu primjenu. Svaka karakteristika igra ključnu ulogu u određivanju performansi baterije. Njihovo razumijevanje omogućuje uvid na način kojim se mogu postići najbolje performanse u različitim uvjetima i aplikacijama.

#### 3.1. Napon

Napon je jedan od ključnih parametara pri dizajniranju i odabiru baterije, a definiran je kao razlika električnog potencijala između pozitivne i negativne elektrode. Razlika električnog potencijala na elektrodama daje "potisnu snagu" elektronima koja ih pokreće i tako kreira usmjeren tok elektrona, tj. dobivamo tok električne struje. On ovisi o razlici potencijala između reakcija koje se događaju na pozitivnoj i negativnoj elektrodi te što je ta razlika veća, više će rada moći obaviti isti broj elektrona [25]. Kako bi se baterija mogla u potpunosti opisati, u literaturi se koriste nekoliko različitih vrsta napona kao što su:

- Teorijski napon: opisuje se standardnim potencijalom ćelije koji ovisi o aktivnim materijalima u ćeliji [1]. On predstavlja razliku potencijala između katode i anode u idealnim uvjetima (uvjeti gdje nisu uračunati gubici). Može se izračunati koristeći se standardnim elektrodnim potencijalima oksidacijskih i redukcijских polu-reakcija koje se odvijaju na anodi i katodi [1]. Standardni potencijal elektrode je tablična vrijednost. Na sljedećem primjeru je moguće vidjeti izračun standardnog potencijala za cink/klorid ćeliju [1]:



$$E^0 = 1,36 \text{ V} - (-0,76) \text{ V} = 2,12 \text{ V} \quad (3-3)$$

- Napon otvorenog kruga (eng. *open-circuit voltage*, OCV): napon baterije ili ćelije kada kroz bateriju ne teče struja, tj. kada nema opterećenja. Napon otvorenog kruga je blizak

vrijednosti teorijskog napona te ovisi o stanju napunjenosti (eng. *state of charge*, SOC) [18].

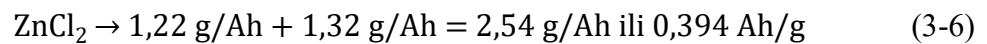
- Napon zatvorenog kruga (eng. *closed-circuit voltage*, CCV): napon baterije ili ćelije kada se prazni, tj. kada je na bateriju spojeno opterećenje. Napon zatvorenog kruga se može opisati kao funkcija opterećenja ili strujnog odvoda kojeg ćelija treba isporučiti [1].
- Nominalni napon: napon koji se uzima kao referentni ili nazivni napon baterije. Dodjeljuje ga proizvođač [27].
- Radni napon: predstavlja stvarniju sliku napona baterije ili ćelije pod opterećenjem te je u praksi niži od napona otvorenog kruga [1].
- Isključni napon: baterija se nikad ne isprazni do nula volta, nego do minimalne dozvoljene naponske vrijednosti. Isključni napon definira ispražnjeno stanje baterije [1].

### 3.2. Kapacitet

Kapacitet je drugi glavni parametar kojim se definiraju baterije. Može se definirati kao količina energije koju baterija može pohraniti i isporučiti, a mjeri se u vat-satima [Wh], kilovat-satima [kWh], amper-satima [Ah] ili miliamper-satima [mAh]. Najčešća mjera kapaciteta je Ah koji opisuje koliku struju baterija može pružiti tijekom jednog sata. Ukoliko amper-sate pomnožimo sa nazivnim napon baterije, dobit ćemo energetske kapacitet izražen u vat-satima. Kapacitet se odnosi na količinu naboja koju baterija može isporučiti pri nazivnom naponu te je direktno proporcionalan količini elektrodnih materijala [28]. Ova proporcionalnost je vidljiva ukoliko usporedimo veliku i malu ćeliju sa istim kemijskim sastavom. Mala ćelija će imati manji kapacitet od veće ćelije, iako je napon na obje ćelije isti. Ovime se može zaključiti da je napon ćelije više baziran na kemijskom sastavu, tj. više ovisi o materijalima ćelije, dok je kapacitet više baziran samom količinom tih materijala [29]. No, kao što svi znaju, kapacitet se vremenom smanjuje, tj. materijali koji su unutar same baterije se troše što na kraju dovodi do slabijih kemijskih reakcija i kapacitet opada. Osim vremena, na gubitak kapaciteta također utječu i drugi faktori poput temperature, broja ciklusa te režima punjenja i pražnjenja [30].

Isto kao i kod napona, kada govorimo o kapacitetu postoje teorijski i nominalni, tj. nazivni kapacitet. Nazivni kapacitet je definiran od strane proizvođača te se koristi kao standardna vrijednost koja karakterizira bateriju ili ćeliju, a odnosi se na kapacitet pri konstantnoj struji pražnjenja na temperaturi od 20 °C [31]. Dok je teorijski kapacitet određen količinom aktivnih materijala u ćeliji te je obično veći od nazivnog kapaciteta. Izražava se kao ukupna količina

elektriciteta koja je uključena u elektrokemijske reakcije te se može prikazati pomoću kulona [C] ili amper-sata [Ah]. Teorijski kapacitet računa samo aktivne materijale koji sudjeluju u elektrokemijskoj reakciji, izostavljajući elektrolit, a izračunava se iz ekvivalentne težine reaktanata. Primjer izračuna teorijskog kapaciteta će biti prikazan na primjeru nikal/klorid ćelije [1]:



### 3.2.1. C-razina (eng. *C-rate*)

Usko povezano s kapacitetom dolazi i izraz C-rate kojim se izražava brzina pražnjenja (ili punjenja) baterije u odnosu na njezin maksimalni kapacitet. 1C predstavlja onu jačinu struje pražnjenja koja će u potpunosti isprazniti bateriju za 1 sat. Na primjer, C-rate od 1C za bateriju čiji je kapacitet 10 Ah odgovara struji pražnjenja od 10 A tijekom jednog sata. Ukoliko je C-rate 2C, za istu bateriju ćemo imati struju pražnjenja od 20 A, ali će se tada baterija isprazniti za pola sata. Ukoliko za C-rate uzmemo 0,5C, imat ćemo struju pražnjenja od 5 A tijekom dva sata [29]. Općenito gledano, vrijeme da se baterija potpuno isprazni za zadani C-rate je moguće izračunati pomoću recipročne vrijednosti samog C-ratea, na primjer 1C odgovara vremenu pražnjenja od jednog sata, 2C odgovara vremenu od pola sata, 5C odgovara vremenu od dvanaest minuta, dok vrijednosti poput 0,5C odgovaraju vremenu pražnjenja od dva sata, a 0,05C odgovara vremenu od dvadeset sati ( $0,05^{-1} = \frac{1}{0,05} = 20\text{h}$ ). Iznos struje pražnjenja za dani C-rate se računa tako da se C-rate pomnoži s kapacitetom baterije. Isto tako treba naglasiti da odnos između C-ratea i struje pražnjenja nije linearna radi unutarnjeg otpora baterije i nepotpune iskorištenosti aktivnih materijala pri visokim strujama pražnjenja. To znači da će se baterija koja se prazni pri 10C isprazniti nešto prije šest minuta, dok će se baterija koja se prazni pri 0,1C isprazniti za nešto više od deset sati.[7]

### 3.3. Energija

Energija je ključan parametar baterije koji određuje njihovu sposobnost pohranjivanja i isporučivanja električne energije. Baterija pohranjuje energiju u elektrokemijskom obliku te se

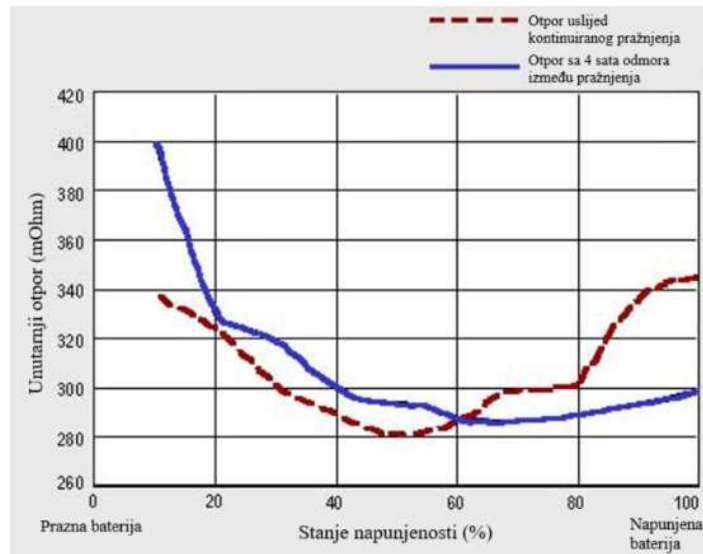
može osloboditi po potrebi kako bi se obavio rad. Za uvid u cjelovitu sliku o energiji baterije potrebno je uzeti u obzir kapacitet i napon baterije. Nazivni energetska kapacitet ćelije prikazuje količinu električne energije izraženu u vat-satima [Wh] ili kilovat-satima [kWh] koju ćelija može pohraniti, a izračunava se kao umnožak nazivnog kapaciteta i nazivnog napona ćelije [7]. Na primjer, baterija kapaciteta 10 Ah i napona 2 V sadržava energetska kapacitet od 20 Wh. Kada se govori o energiji, može doći do zabune sa snagom pošto su im mjerne jedinice slične. Energija i snaga predstavljaju različite veličine za određenu brzinu pražnjenja. Snaga se definira kao trenutna brzina kojom se energija oslobađa, a mjeri se u vatima [W] ili kilovatima [kW] te ju je moguće izračunati kao umnožak struje i napona. Kao i kod ostalih elektroničkih naprava, maksimalna snaga koja se može isporučiti je ograničena unutarnjim otporom [7].

Specifična energija i gustoća energije su također usko povezani pojmovi s kapacitetom i energijom baterije. Specifičnom energijom se definira količina pohranjene energije po jedinici mase izražene u vat-satima po kilogramu [Wh/kg], dok se gustoća energije definira kao količina pohranjene energije po jedinici volumena izražene u vat-satima po litri [Wh/L]. Baterija s visokom specifičnom energijom će biti lakša od one koja ima nisku specifičnu energiju s tim da količina pohranjene energije ostane ista. Dok će baterija s visokom energetska gustoćom biti manja od one koja ima nisku energetska gustoću s tim da količina pohranjene energije ostane nepromijenjena. Ove povoljne karakteristike mogu uvelike smanjiti dimenzije i težinu baterije te ih je moguće postići koristeći se reaktivnijim kemijskim spojevima. Nedostatak toga je što takvi reaktivni kemijski spojevi često nisu stabilni što uvelike smanjuje sigurnost same baterije [7].

### **3.4. Unutarnji otpor**

Unutarnji otpor baterije se definira kao otpor protoku električne struje unutar baterije ili ćelije. Može se prikazati kao zbroj ionskih i elektronskih otpora komponenti ćelije. U elektronski otpor ubrajamo otpor materijala od kojih je baterija napravljena, poput metalnih poklopaca, grafitni štapovi, provodljivi katodni materijali i sl. Dok ionski otpor obuhvaća čimbenike koji utječu na kretanje iona unutar ćelije. To uključuje vodljivost elektrolita, poroznost elektrode, površinu elektrode itd. [1]. Unutarnji otpor je jako varijabilna veličini te se mijenja tijekom punjenja i pražnjenja. Ta promjena najviše zavisi o temperaturi, upotrebi, starosti baterije te o stanju napunjenosti [27]. Unutarnji otpor će biti najveći kada imamo minimalno stanje napunjenosti, tj. kada je baterija ispražnjena. Prilikom pražnjenja, unutarnji otpor se smanjuje i dolazi do najmanje

vrijednosti na pola stanja napunjenosti te od tog trenutka opet počinje rasti [32]. Ovaj proces je moguće vidjeti na slici 3.1.



Slika 3.1. Promjena unutarnjeg otpora u ovisnosti sa SOC-om [32]

### 3.5. Stanje napunjenosti (eng. *state of charge*, SOC)

Stanje napunjenosti se može definirati kao postotak maksimalno mogućeg pohranjenog naboja koji je prisutan unutar baterije [33]. Stanje napunjenosti je bez dimenzijski koeficijent koji se izražava kao omjer trenutne količine naboja u bateriji i maksimalne količine naboja koju baterija može pohraniti. Za primjer će se uzeti baterija kojoj je kapacitet 10 Ah. Nakon što se isprazni za 2 Ah ostati će još 8 Ah u bateriji, što nam daje stanje napunjenosti od 80 %. Stanje napunjenosti od 100 % označava potpuno napunjenu bateriju, a stanje napunjenosti od 0 % označava potpuno ispražnjenu bateriju. Isto tako, bitno je naglasiti da se napon otvorenog kruga (OCV) mijenja sa stanjem napunjenosti. Baterija koja je potpuno napunjena će imati veći napon otvorenog kruga nego ispražnjena baterija. Poznavanjem parametra stanja napunjenosti baterije, možemo osigurati da ne dođe do prekomjernog punjenja ili pražnjenja što može naštetiti bateriji smanjujući performanse i vijek trajanja baterije.

### 3.6. Razina ispražnjenosti (eng. *depth of discharge*, DOD)

Slično kao i stanje napunjenosti, razina ispražnjenosti predstavlja postotak naboja baterije koji je ispražnjen u odnosu na maksimalno moguć pohranjen naboj. Za primjer će se uzeti baterija kojoj

je kapacitet 10 Ah. Nakon što se isprazni za 2 Ah ostati će još 8 Ah u bateriji, što nam daje razinu ispražnjenosti od 20 %. Razina ispražnjenosti se može koristiti kao alternativna metoda za prikazivanje stanja napunjenosti [33].

### **3.7. Životni vijek**

Životni vijek baterije se odnosi na broj ciklusa koje baterija može proći prije nego što se počne degradirati i zadržavati manje naboja. Svaki put kada se baterija napuni i isprazni, prolazi kroz jedan ciklus [34]. Životni ciklus baterije se odnosi na broj ciklusa tijekom kojeg će nominalni kapacitet baterije opasti ispod 80 %. Baterija se može i dalje koristiti nakon toga, ali će kapacitet padati sve više svakim novim ciklusom.

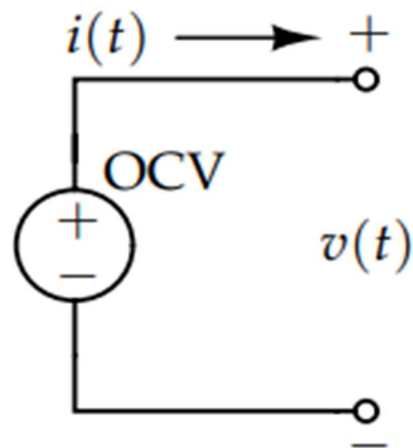


## 4. MODELI BATERIJA

Modeliranje baterija predstavlja ključan alat u razumijevanju rada i optimizaciji performansi baterijskih sustava. Budući da unutarnje stanje baterije nije direktno vidljivo ni mjerljivo, modeli baterija omogućuju istraživačima i inženjerima da proučavaju, procjenjuju i predviđaju stvarno ponašanje baterije bez potrebe za provođenjem štetnih testova. Svrha ovih modela jest da repliciraju složene elektrokemijske procese i druge fenomene koji se odvijaju unutar baterije, čime se omogućuje analiza termičkog ponašanja baterije, predviđanje performansi, stanja napunjenosti, napona, dostupne energije, životnog vijeka i ostalih parametara [35]. Osim što se modeli koriste za predviđanje performansi i karakteristika baterije, oni isto tako pridonose razvoju učinkovitijih sustava za upravljanje baterijama (eng. *Battery Management Systems*, BMS) te novih baterijskih tehnologija. Prednost tih modela je ta što omogućuju simulaciju radnog stanja baterije. Ukoliko imamo i model tereta, moguće je povezati ta dva modela i tako dobiti cjelovitu sliku ponašanja tog sustava. Ovisno o primjeni i složenosti, bitno je izabrati odgovarajući tip modela. Glavni tipovi modela koji se koriste su: elektrokemijski, matematički, ekvivalentne sheme, termalni i kombinirani modeli. U ovom radu će se поближе objasniti modeli zasnovani na ekvivalentnim shemama.

### 4.1. Model s idealnim naponskim izvorom

Modele možemo definirati kao niz jednadžbi koje opisuju fizikalna svojstva, tj. u ovom slučaju modeli se koriste kako bi se opisalo ponašanje punjive baterije. Cilj je prikazati odziv punjive baterije na neku pobudu, pri čemu se promatra kako reagira napon baterije na primjenu struje, to se može postići modelom ekvivalente električne sheme zato što se ta shema ponaša ekvivalentno kako bi se ponašala i prava fizička baterija. Prednost ovog modela je ta što omogućuje uvid u odziv ćelije za različite primjene te za različite pobude. Druga prednost je ta što ovaj model stvara podlogu koja se koristi u daljnjem razvoju algoritama baterije poput algoritama upravljanja baterijom, optimizacije performansi baterije ili pak za razne zaštitne algoritme. Za početak će se baterija predstaviti najjednostavnijim modelom ekvivalentne sheme, tj. modelom s idealnim naponskim izvorom koji je prikazan na sljedećoj shemi:



**Shema 4.1.** Model s idealnim naponskim izvorom [7]

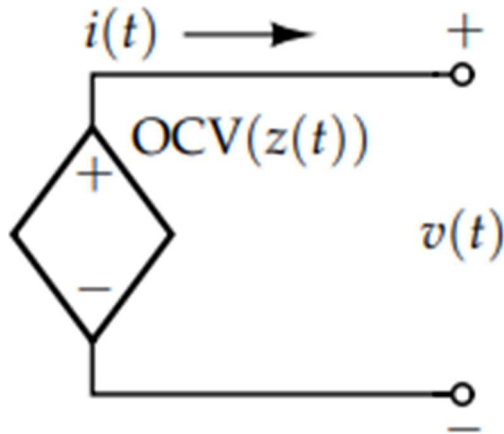
U ovom modelu napon ćelije je definiran kao nezavisni naponski izvor što zapravo znači da je napon ćelije konstantan i može se zapisati sljedećom jednačbom [7]:

$$v(t) = OCV \quad (4-1)$$

Gdje  $v$  predstavlja napon ćelije, a  $OCV$  predstavlja napon otvorenog kruga. Napon otvorenog kruga u ovom slučaju nije funkcija struje pražnjenja niti ovisi o prethodnoj upotrebi. Sve dok trošilo nije spojeno, napon ćelije će biti jednak naponu otvorenog kruga. Korištenjem ovog modela nije moguće dobiti dovoljno precizne rezultate koji bi opisali kako funkcionira prava fizikalna baterija radi upotrebe idealnog naponskog izvora koji ne računa padove napona koji nastaju tijekom korištenja baterije. Napon fizikalne ćelije ovisi o struji pražnjenja, učestalosti korištenja, temperaturi i slično, ali nam ipak ovaj model daje dovoljno dobru podlogu za daljnju nadogradnju koja će se odvijati kroz nadolazeća potpoglavlja [7].

## 4.2. Model s naponski upravljanim naponskim izvorom

Prijašnji model s idealnim naponskim izvorom se može dodatno poboljšati tako da se umjesto idealnog naponskog izvora koji daje konstantni napon, koristi model s upravljanim naponskim izvorom. Korištenjem upravljanog naponskog izvora, moguće je prikazati ovisnost napona otvorenog kruga o stanju napunjenosti. Model s naponski upravljanim naponskim izvorom je prikazan na shemi 4.2.



**Shema 4.2.** Model s naponski upravljanim naponskim izvorom [7]

Stanje napunjenosti (*SOC*) je u ovom slučaju označeno simbolom  $z$ . Kako bi kvantificirali stanje napunjenosti, potrebno je znati koliko naboja sadržava potpuno napunjena baterija u odnosu sa na količinu naboja kada je ta baterija ispražnjena [7]. To se može postići uvođenjem novog parametra u model, tj. uvođenje ukupnog kapaciteta koji će se tretirati kao konstanta. Ukupni kapacitet se može definirati kao ukupna količina naboja koja je uklonjena tijekom pražnjenja baterije od  $z = 100\%$  do  $z = 0\%$  [7]. Vrijednost ukupnog kapaciteta se može razlikovati od ćelije do ćelije, a označava se simbolom  $Q$  te se mjeri u amper-satima [Ah] ili miliamper-satima [mAh]. No, u stvarnosti, kapacitet nije konstantan tijekom cijelog životnog vijeka baterije, on se postupno smanjuje radi nepoželjnih kemijskih reakcija koje je nemoguće zaustaviti. Ta degradacija kapaciteta je radi jednostavnosti modela trenutno zanemarena te se uzima da je ukupni kapacitet konstantna vrijednost. Poznavajući činjenicu da baterije nisu idealni uređaji, potrebno je uračunati i gubitke u trenutni model kako bi ga dodatno poboljšali. To se postiže uvođenjem kulonske efikasnosti koja je bezdimenzionalna veličina te je pri punjenju jednaka 1, a pri pražnjenju je jednaka ili manja od 1. Kulonska efikasnost se označava simbolom  $\eta$  te označava onaj dio naboja koji se pri punjenju nije upotrijebio u kemijskim reakcijama koje podižu stanje napunjenosti, već se potrošio na neželjene reakcije [7]. Prilikom definiranja modela za kulonsku efikasnost se uzima vrijednost 1 za vrijeme punjenja, a za vrijeme pražnjenja se uzimavrijednost manja od 1 ili vrijednost koja je jako blizu 1, poput 0,99. Implementiranjem ovih novih parametara u model, moguće je prikazati kako se mijenja stanje napunjenosti ovisno o ulaznoj struji, ukupnom kapacitetu i kulonskoj efikasnosti. Negativni predznak ulazne struje označava punjenje, a pozitivni pražnjenje baterije. Ovu ovisnost je moguće prikazati sljedećom diferencijalnom jednačbom [7]:

$$\dot{z}(t) = -i(t) \frac{\eta(t)}{Q} \quad (4-2)$$

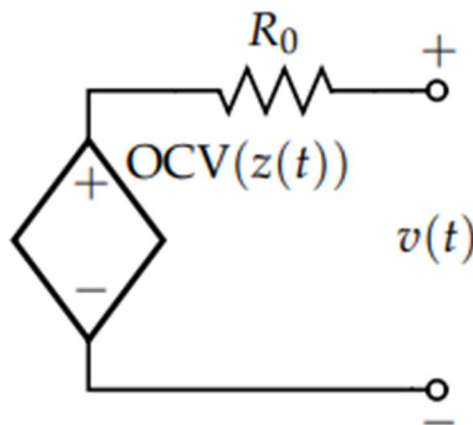
Napon ćelije je sada moguće zapisati kao funkciju od stanja napunjenosti koja je prikazana sljedećom jednačbom [7]:

$$v(t) = OCV(z(t)) \quad (4-3)$$

Gdje je  $v(t)$  napon ćelije, a  $OCV$  je napon otvorenog kruga. Jednačba (4-3) opisuje promjenu napona ćelije pri različitim stanjima napunjenosti.

### 4.3. Rint model

Prethodni modeli punjivih baterija opisuju samo statičko ponašanje baterija. Kako bi se postupno opisalo dinamičko vladanje baterije uzrokovano vremenski promjenjivom ulaznom strujom, potrebno je objasniti polarizaciju. Polarizacija se odnosi na bilokakvo smanjenje napona ćelije ili čak nastajanje suprotnog napona ćelije zbog promjena na elektrodama kada teče struja [19]. Smanjenje napona je moguće primijetiti ukoliko se na bateriju spoji nekakvo trošilo. Taj pad napona je moguće djelomično modelirati tako što se na prethodni model s naponski upravljanim naponskim izvorom serijski spoji otpor. Novi model je prikazan na sljedećoj shemi:



Shema 4.3. Rint model baterije [7]

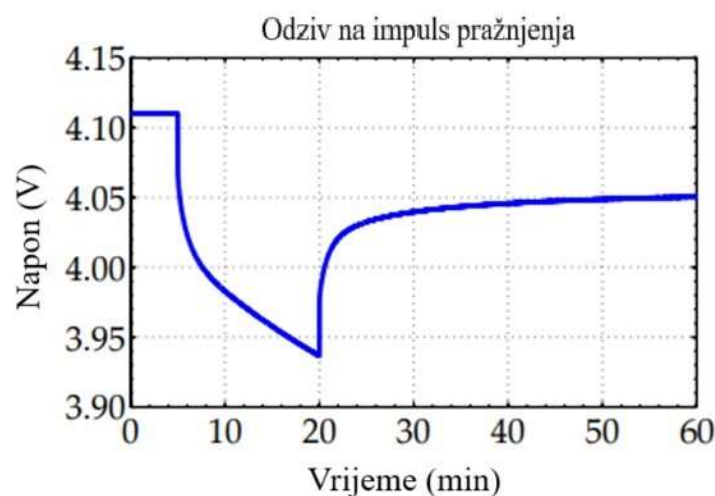
Gdje  $R_0$  predstavlja unutarnji otpor baterije po kojemu je i nazvan sam model ( $R_{int}$ , eng. *internal resistance*, unutarnji otpor). Osim što se dodavanje serijskog otpora u model parcijalno modelira efekt polarizacije, ono isto tako označuje i disipaciju energije u obliku topline što dovodi do zaključka da nemamo idealnu energetska efikasnost [7]. Diferencijalna jednačba kojom se opisuje stanje napunjenosti ostaje ista kao ona opisana u prethodnom poglavlju (4-2) gdje je bila riječ o modelu s naponski upravljanim naponskim izvorom, dok jednačba napona ćelije podliježe sitnim promjenama što je moguće vidjeti na sljedećoj jednačbi [7]:

$$v(t) = OCV(z(t)) - i(t)R_0 \quad (4-4)$$

Novom jednađbom napona ćelije je moguće zaključiti da je prilikom punjenja napon ćelije veći od napona otvorenog kruga. To možemo vidljivo iz same jednađbe ukoliko "uvrstimo" predznak ulazne struje u jednađbu (4-4), znajući da je ulazna struja negativnog predznaka tijekom punjenja, a pozitivnog predznaka tijekom pražnjenja baterije. Zato je napon ćelije manji od napona otvorenog kruga prilikom pražnjenja. Ovaj model se smatra dovoljno dobrim da bude podloga za jednostavnije električne krugove koje sadržavaju baterije u svom dizajnu, no nikako nije povoljan za složenije sustave gdje je potreban precizniji model baterije [7].

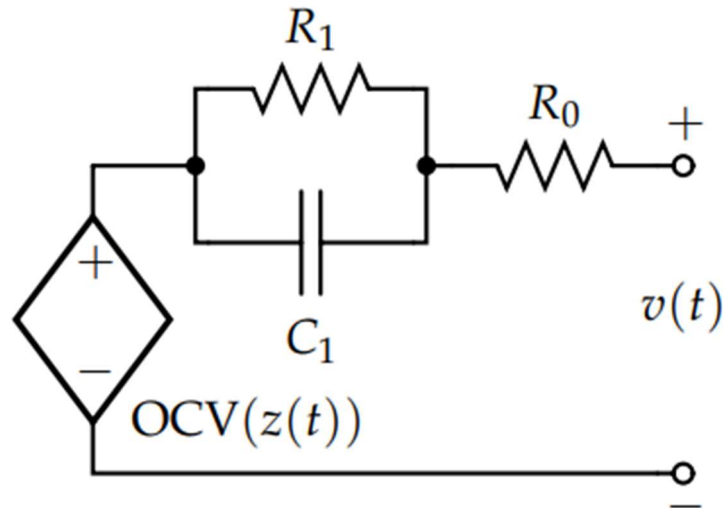
#### 4.4. Theveninov model

Kako bi upotpunili dinamičko ponašanje baterije potrebno je opet nadograditi prethodni Rint model da bi se efekt polarizacije mogao potpuno objasniti. Polarizacija, kao što je prethodno navedeno, predstavlja bilokakvo odstupanje napona ćelije od napona otvorenog kruga kada teče struja kroz ćeliju. Ta odstupanja, u stvarnim ćelijama, nisu trenutna, već imaju složenu dinamiku gdje napon zbog polarizacije prvo naglo padne pa onda još lagano pada s vremenom kada struja teče kroz ćeliju te onda opet naglo poraste pa krene lagano rasti do stanja ravnoteže kada ćelija nije opterećena, tj. kada više ne teče struja. Ovo djelovanje polarizacije je prikazano slikom 4.1. gdje se ćelija prazni konstantnom strujom od pete do dvadesete minute nakon koje se teret odspaja i prestaje protok struje te se ćelija ostavlja da miruje [7].



**Slika 4.1.** Polarizacija napona litij-ionske baterije [7]

Prijašnjim modelom su bili opisani nagli pad i rast napona, no sada gledajući na sliku 4.1., vidljivo je da osim tog naglog pada i rasta napona postoji još i lagani, postupni pad i rast napona koji se definira kao difuzijski napon. Modeliranjem difuzijskog napona se uvelike povećava preciznost samog modela da opiše dinamiku baterije. Difuzijski napon se može modelirati tako da se u Rint model doda paralelno spojeni otpornik  $R_1$  i kondenzator  $C_1$  kao što je moguće vidjeti na shemi 4.4.:



**Shema 4.4.** Theveninov model baterije [7]

Dodavanjem paralelnog spoja otpora i kapaciteta u shemu 4.4., dobiva se model baterije koji je poznatiji pod nazivom Theveninov model. U ovom modelu se također ne mijenja diferencijalna jednačba koja opisuje stanje napunjenosti te je ista kao i jednačba (4-2) prikazana na samom početku ovog poglavlja, dok se jednačba napona ćelije uz male promjene može zapisati na sljedeći način [7]:

$$v(t) = OCV(z(t)) - R_1 i_{R_1}(t) - R_0 i(t) \quad (4-5)$$

Gdje je  $i_{R_1}$  struja koja prolazi otporom  $R_1$  te njihov umnožak predstavlja difuzijski napon. No, kako bi se potpuno vidjela matematička podloga difuzijskog napona potrebno je zapisati i diferencijalnu jednačbu struje koja prolazi kroz otpor  $R_1$  [7]:

$$\frac{di_{R_1}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} i_{R_1}(t) + \frac{1}{R_1 C_1} i(t) \quad (4-6)$$

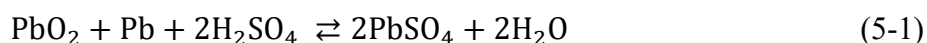
Na prikazanoj diferencijalnoj jednadžbi prvog reda umnožak  $R_1$  i  $C_1$  predstavljaju vremensku konstantu. Vremenska konstanta je pojam koji označava vrijeme potrebno da sustav dođe u mirno stanje te ako pogledamo sliku 4.1 možemo vidjeti da baterija ulazi u stanje mirovanja tek nakon pola sata nakon što se prestala prazniti. Dodavanjem još nekoliko paralelnih spojeva otpora i kapaciteta, inače su još dva ili tri paralelna spoja dovoljna, povećava preciznost modela koja gotovo savršeno opisuje dinamiku ćelije.

## 5. TEHNOLOGIJE PUNJIVIH BATERIJA

Početak punjivih baterija počeo je sredinom 19-og stoljeća kada je Gaston Planté, francuski fizičar, izumio prvu punjivu bateriju. Bila je to olovna baterija čija se poboljšana izvedba koristi i dan danas u vozilima. Razvojem tehnologije, danas imamo puno naprednije baterije s boljim performansama, nego prije dvadesetak godina. Danas punjive baterije predstavljaju temelj za prijenosnu elektroniku, električna vozila i sustave za pohranu energije. Postoje različite tehnologije koje su danas u primjeni te se međusobno razlikuju ovisno o kapacitetu, energetske gustoći, životnom vijeku, troškovima proizvodnje te utjecajem na okoliš. Neke od najčešćih korištenih tehnologija su: olovne, nikal-kadmij, nikal-metal hidrid te litij-ionske baterije. Kako bi se izabrala odgovarajuća tehnologija pogodna za specifičnu primjenu, potrebno razlikovati pojedine tehnologije te znati njihove prednosti i nedostatke.

### 5.1. Olovne baterije

Olovne baterije su baterije koje su revolucionirale način na koji gledamo baterije. One su prve baterije koje su imale mogućnost ponovnog punjenja i dalje su tehnologija koja se koristi u današnje vrijeme u pokretnim i stacionarnim sustavima. Olovna baterija se inače sastoji od više serijski povezanih ćelija kako bi se postigao veći napon baterije. Čelije ili članci se sastoje od nekoliko naslaganih pločica koje su načinjene od olova (Pb) i olovnog dioksida (PbO<sub>2</sub>), gdje je olovo korišteno za anodu, a olovni dioksid za katodu. Kako bi se postigao veći kapacitet umjesto samo dvije pločice po članku, koriste se dva sloga ploča [36]. Između njih se nalazi separator koji sprječava unutarnji kratki spoj. Za elektrolit se koristi sumporna kiselina (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) razrijeđena s vodom u koju se urone pločice kako bi se stvorio jedan funkcionalni članak. Kemijska reakcija koja se odvija u olovnoj bateriji se može zapisati sljedećom kemijskom jednadžbom [1]:



Proces pražnjenja se odvija ukoliko se jednadžbu gleda s lijeva prema desno, a proces punjenja se odvija ako se jednadžbu (5-1) promatra s desna na lijevo. Ove reakcije se odvijaju unutar baterijskih članaka te svaki od njih daje napon od 2 V, a njih šest serijski povezanih daje 12 V što je tipičan napon olovne baterije, no moguće su i izvedbe od 24 V. One sadrže dvanaest serijski povezanih članaka. Male olovne baterije obično imaju kapacitet oko 1 Ah, što ih čini pogodnima za uređaje s manjim energetske potrebama, dok s druge strane, velike baterije za duboki ciklus



moгу imati kapacitet veći od 200 Ah što im omogućuje pohranu značajnih količina energije, a koriste se u sustavima obnovljivih izvora energije, poput solarnih ili vjetro-električnih sustava [37].

Postoji nekoliko tipova olovnih baterija: poplavljene, zatvorene olovne baterije s regulacijom ventila (eng. *valve regulated lead-acid*, VRLA), baterije s upijajućim izolatorima od staklene vune (eng. *absorbent glass mat*, AGM) i GEL baterije. Poplavljene baterije su zapravo klasične olovne baterije s poklopcem na vrhu spremnika koji služi za dodavanje destilirane vode, VRLA baterije imaju potpuno zapečaćenu konstrukciju, tj. nemaju poklopac. Ovom vrstom je održavanje svedeno na minimum kao i mogućnost prolijevanja elektrolita. No, glavna prednost ovog tipa jest tlačni ventil koji dopušta izlazak plinu koji je nastao tijekom punjenja i pražnjenja. AGM baterije su slične VRLA baterijama. Ključna razlika je u tome što AGM baterije sadrže upijajući izolator od staklene vune koji potpuno upije sav elektrolit što za rezultat sprječava curenje elektrolita i omogućuje montiranje AGM baterije u bilo kojoj orijentaciji. Uvelike se primjenjuju u start-stop sustavima i vozilima koja mogu zahtijevati velika opterećenja. Primjer AGM olovne baterije je moguće vidjeti na slici 5.1. GEL baterije su napredna verzija AGM baterije jer on sadrže elektrolit u obliku gela, što dodatno smanjuje rizik od curenja [38]. Jedna od glavnih prednosti olovnih baterija je njihova niska cijena u usporedbi s drugim vrstama punjivih baterija. Osim toga, imaju dobre performanse na niskim i visokim temperaturama, imaju visoku gustoću energije i sposobne su isporučiti veliku struju za pokretanje motora ili napajanje velikih opterećenja. Međutim, olovne baterije imaju ograničen životni vijek i njihova učinkovitost se može smanjiti ukoliko nastane previše ponovljenih dubokih pražnjenja. Veliki nedostatak je smanjenja kapaciteta pri brzom pražnjenju gdje se kapacitet može smanjiti do 50%. Također su teške i mogu predstavljati opasnost ukoliko se njima ne rukuje ispravno, jer sadrže olovo i sumpornu kiselinu [39].



Slika 5.1. AGM olovne baterije [40]

Naspram svih nedostataka, olovne baterije su i dalje u primjeni. Radi izobilja glavnih materijala od kojih su načinjene, olovnim baterijama se dobiva visoka energetska gustoća po niskoj cijeni naspram ostalih punjivih baterija te je zato tehnologija nastala sredinom 19-tog stoljeća i dan danas prvi odabir baterije za pokretanje automobila i ostalih vozila s unutarnjim izgaranjem.

## 5.2. Nikal-kadmij baterije

Nikal-kadmij (Ni-Cd) baterija predstavlja prvu komercijalno dostupnu punjivu bateriju opće namjene. Nastala je 1899. godine od strane švedskog inženjera Waldmara Jungnera, a usavršio ju je Thomas Edison 1901. godine [41]. Ove baterije imaju dugu povijest primjene u različitim industrijama zbog svojih specifičnih karakteristika. Tijekom 20-tog stoljeća, NiCd baterije su bile prvi izbor za napajanje prijenosne elektronike, medicinske opreme i električnih alata zato što su nudile dobre performanse pri niskim temperaturama, veću gustoću energije te su bile dizajnirane da izdrže veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja od tada jedine alternative za punjive baterije koja je bila olovna baterija [41]. Kod nikal-kadmij baterija anoda je načinjena od kadmija, katoda od nikal oksid-hidroksida, a elektrolit koji se koristi je kalijev hidroksid (KOH) koji je vodljiva baza, ali se ne troši tijekom reakcija. Tijekom punjenja, nikal-oksidi hidroksid se reducira u nikal-hidroksid, dok kadmij oksidira u kadmij hidroksid, a tijekom pražnjenja, ove reakcije se odvijaju u suprotnom smjeru. Princip rada ove baterije i kemijske reakcije koje se događaju su detaljnije opisane u poglavlju 2.4.1. Ove baterije karakterizira visoka izlazna struja, koja ih čini pogodnima za primjene u električnim alatima i sličnim uređajima koji zahtijevaju puno energije u kratkom vremenu. Uz to što imaju visoku izlaznu struju ove baterije imaju nizak unutarnji otpor što omogućuje učinkovitu isporuku energije čak i pod visokim opterećenjima. Tijekom cijelog životnog vijeka, nikal-kadmij baterije dostavljaju stabilan napon u iznosu 1,2 V tijekom pražnjenja, tj. napon je gotovo konstantan tijekom cijelog vremena pražnjenja [42]. Izvedbe AA tipa imaju prosječan kapacitet oko 600 mAh, kao što je moguće vidjeti na slici 5.2., dok veće ćelije mogu doseći kapacitet do 50 Ah. [37]

Usprkos svim prednostima, nikal-kadmij baterija ima i lošu stranu radi koje je upotreba ove baterije opala u posljednjih nekoliko godina. To je korištenje toksičnog kadmija koji ima razorno djelovanje na okoliš i ljudsko zdravlje te je radi toga Europska unija počela zabranjivati proizvodnju ovih baterija [43]. Osim toga ove baterije imaju nisku energetska gustoću što rezultira s niskim vremenom upotrebe te se na to nadovezuje i memorijski efekt koji će to vrijeme dodatno skratiti. Memorijski efekt smanjuje kapacitet baterije ukoliko se baterija ne isprazni do kraja prije

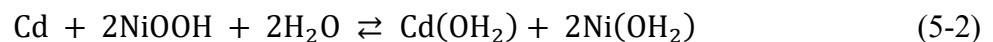
ponovnog punjenja [42]. Radi ovih nedostataka, primarno radi korištenja štetnog kadmija, nastaje potreba za novom baterijom koja će zamijeniti nikal-kadmij bateriju. To će biti nikal-metal hidrid baterija koja će biti opisana u sljedećem potpoglavlju.



Slika 5.2. Nikal-kadmij baterije [44]

### 5.3. Nikal-metal hidrid baterije

Nikal-metal hidrid (NiMH) baterije nastaju krajem 20-og stoljeća kao poboljšana i ekološki prihvatljivija alternativa na štetne nikal-kadmij baterije. Njena anoda je načinjena od legure metala koje apsorbiraju vodik umjesto kadmija, a katoda je načinjena od nikal-oksida hidroksida kao i kod nikal-kadmij baterije, dok se za elektrolit koristi kalijev hidroksid (KOH) koji ne sudjeluje direktno u elektrokemijskoj reakciji. Kemijska reakcija koja se odvija u nikal-metal hidridnoj bateriji se može zapisati sljedećom kemijskom jednadžbom [1]:



Korištenjem ove tehnologije naspram nikal-kadmij moguće je dobiti dva do tri puta veći kapacitet od nikal-kadmij baterije istih dimenzija, ali isto tako sa znatno većom gustoćom energije pružajući znatno bolji omjer snage i mase, čak do 40% više nego kod nikal-kadmij baterije [45]. No, ova baterija nije savršena te ima nešto veće samopražnjenje od svog prethodnika. To se najčešće da primijetiti kada su ove baterije uskladištene, odnosno dok se ne koriste. Efekt samopražnjenja se može reducirati raznim aditivima, koji onda štetno djeluju na gustoću energije te ju smanjuju [45]. Životni vijek im je isto tako dosta niži nego kod nikal-kadmij baterije, koje mogu podnijeti više od dva puta više ciklusa pražnjenja. Duboki ciklus pražnjenja pri visokim strujama samo pridonose

pogoršanju performansi pa ih je poželjno izbjegavati. Kao i kod litij-ionskih baterija, ovaj tip baterije ima nešto složenije punjenje u usporedbi s nekim drugim tehnologijama baterija.

Glavna prednost nikal-metal hidridne baterije je ta što ima gotovu dvostruku gustoću energije u usporedbi s nikal-kadmijevom baterijom te ima gotovo identičan radni napon kao i nikal-kadmij baterija što uvelike olakšava zamjenu nikal-kadmijeve baterije za ekološki prihvatljiviju nikal-metal hidridnu bateriju. Za AA i AAA izvedbe kapacitet nikal-metal hidridne baterije iznosi od 600 mAh pa do 2,5 Ah, a za veće izvedbe koje se često koriste u električnim vozilima imaju kapacitet i preko 100 Ah [37]. Primjer jedne nikal-metal hidridne baterije koja se upotrebljava u električnim vozila je moguće vidjeti na slici 5.3.



**Slika 5.3.** Nikal-metal hidridna baterija za električna vozila [46]

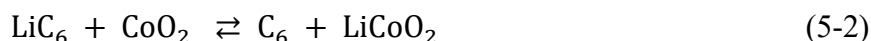
Isto tako, memorijski efekt je kod ove baterije puno manje izražen, ali je u jednu ruku prisutan [47]. NiMH svoju primjenu pronalaze u hibridnim vozilima, radi visoke energetske gustoće, velikog kapaciteta, robusnosti, sigurnosti i ostalih povoljnih performansi. Te su postale standardna tehnologija koja se koristi za izradu punjivih AA i AAA baterija, zbog svoje prihvatljivije cijene proizvodnje naspram ostalih alkalnih baterija [48].

#### **5.4. Litij-ion baterije**

Litij-ion (Li-ion) baterije su svojom tehnologijom revolucionarizirale tržište punjivih baterija te su postale industrijski standard za prijenosne električne uređaje poput mobitela, laptopa, električnih alata, električnih romobila, bicikala i sl. te se sve više počinju implementirati u električne automobile daljnjim razvojem tehnologije. U usporedbi s ostalim punjivim baterijama, litij-ion

baterije imaju niz prednosti poput visoke gustoće energije, visoke specifične energije, visokog nazivnog napona, niskog samopražnjenja, odličnog životnog vijeka te su znatno lakše od ostalih punjivih baterija [48].

Anoda Litij-ion baterije je inače načinjena od ugljika (C), dok se za katodu obično koristi litijev metalni oksid poput litij-kobalt oksida ( $\text{LiCoO}_2$ ), litij-željezo-fosfata ( $\text{LiFePO}_4$ ) ili pak litij-mangan oksida ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). Elektrode odvaja separator kako ne bi došlo do unutarnjeg kratkog spoja. Za elektrolit se koriste otopljenje soli na bazi litija. Tijekom pražnjenja, litijevi ioni prelaze s anode na katodu i obrnuto tijekom punjenja, litijevi ioni prelaze s katode na anodu. Takav kemijski proces koji se odvija u litij-ionskoj bateriji se može zapisati sljedećom kemijskom jednadžbom [1]:



Zbog ove strukture i reakcija, litij-ion baterije nude značajno bolju energetska gustoću naspram ostalih punjivih baterija. To im omogućuje dugotrajnije korištenje bez čestog punjenja što je ključan faktor u mobilnoj tehnologiji i električnim vozilima. Kombinacijom ovih materijala, moguće je dobiti 3.7 V na elektrodama [49]. Što je gotovo tri puta veći napon od nikal-kadmij i nikal-metal hidridnih baterija. Osim većeg napona, Li-ion baterije imaju jako visoku učinkovitost koja doseže čak 98%. Obično kapacitet litij-ion ćelije varira između 1,5 Ah i 3,5 Ah što ih čini prikladnima za prijenosne elektroničke uređaje poput prijenosnih računala i mobitela, dok veće litij-ion prizmatične ćelije mogu imati kapacitet od 20 Ah pa sve do preko 200Ah što je povoljno za električna vozila pružajući im dovoljnu snagu za dugotrajnu vožnju i visoke performanse vozila [37]. Dodatak tome, ove baterije imaju nisko samopražnjenje što im omogućava da mogu dugo zadržati energiju čak i kada se ne koriste ili kada su uskladištene. Litij-ion baterije dolaze u mnogo izvedbi i formata, neke od najpopularnijih izvedba su cilindrične ćelije koje se mogu pojaviti u 18650, 2170 ili 4680 formatu, gdje prva dva broja označavaju promjer, a druga dva broja označavaju duljinu baterije u milimetrima. Zatim postoje litijeve vrećice (eng. *pouch cell*) koje se mogu pojaviti u različitim dimenzijama ovisno o zahtjevima proizvođača. Ova izvedba se najviše primjenjuje u pametnim telefonima i laptopima. Uz cilindrične i litijske vrećice, prizmatična ćelija je zadnja izvedba koja se najčešće koristi u industrijskim vozilima radi svoje robusnosti [50]. Primjere ovih izvedbi litij-ionskih baterija je moguće vidjeti na slici 5.4.



**Slika 5.4.** Različite izvedbe litij-ionskih baterija [50]

Litij-ionske baterije mjesečno gube samo oko 5% svog kapaciteta, u usporedbi s 20% mjesečno kojeg gube NiMH baterije. Prednost litij-ionskih baterija je što nemaju memorijski učinak pa ih se ne mora potpuno isprazniti prije punjenja kao ne bi došlo do smanjenja kapaciteta. Još jedna prednost je ta što mogu podnijeti tisuće ciklusa pražnjenja [51]. Poznavajući baterije, svaka ima neki nedostatak. U ovom slučaju to je potpuno pražnjenje i prekomjerno punjenje što se može riješiti ugradnjom sustava za upravljanje baterijom. Li-ion baterije su osjetljive na visoke temperature koje ubrzavaju proces razgradnje materijala kao i utjecaj prevelikog skladišnog napona. Ipak, konstantna istraživanja i razvoj tehnologije omogućava daljnja poboljšanja ovog tipa baterija kako bi se omogućila šira i sigurnija primjena ove tehnologije punjivih baterija

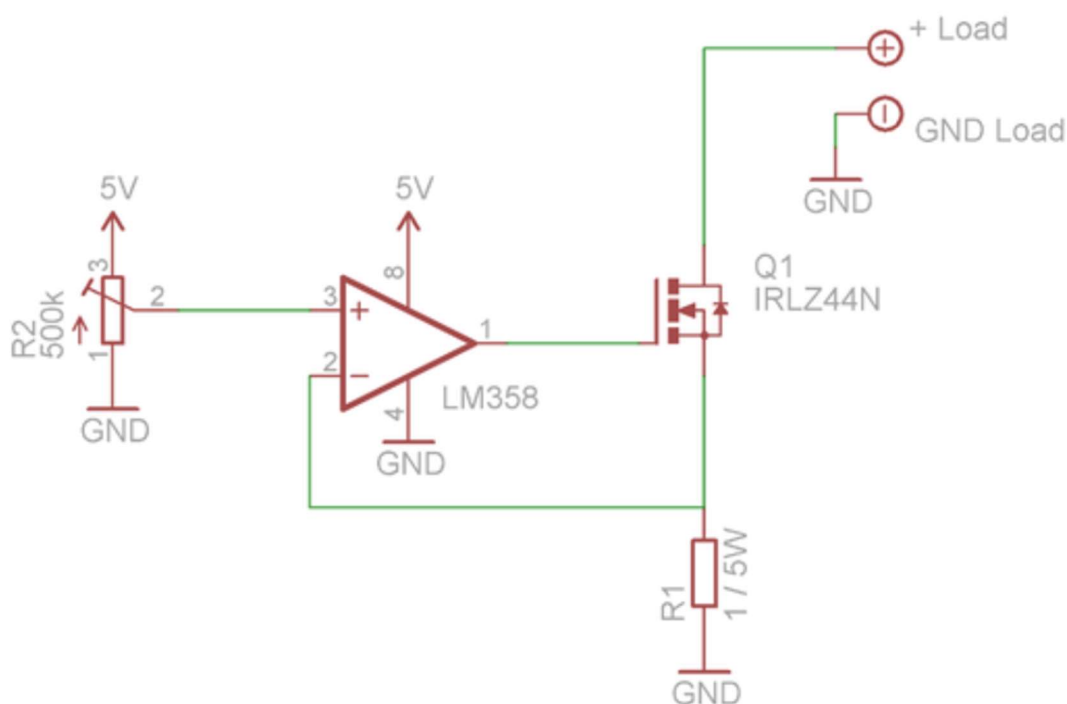
## 6. ODREĐIVANJE OSNOVNIH PARAMETARA

Postoji mnogo parametara koji se koriste za opisivanje karakteristika punjivih baterija, no kapacitet, unutarnji otpor i stanje napunjenosti su tek neki od najosnovnijih parametara pomoću kojih je moguće opisati najvažnije karakteristike punjivih baterija te tako dobiti uvid u performanse i stanje zdravlja baterija. Kod nepunjivih baterija, parametri poput napona otvorenog kruga (OCV) i unutarnjeg otpora su dovoljni kako bi se dobila cjelovita slika o stanju baterije. Ovisno vrsti baterije, bila ona punjiva ili nepunjiva, potrebno je izabrati odgovarajuću metodu kojom će se dobiti željeni parametar, naime neke metode zahtijevaju da se baterija potpuno isprazni kako bi se moglo doći do željenog parametra što nije povoljno ukoliko se ta metoda provodi na nepunjivoj bateriji. Korištenje takvih metoda na nepunjivim baterijama će za rezultat dovesti do praznih, neupotrebljivih baterija nakon provođenja testa.

### 6.1. Određivanje kapaciteta

Kapacitet baterije je jedan od najvažnijih parametara koji govori koliko električne energije baterija može pohraniti i isporučiti, a najčešće se izražava u amper-satima [Ah] ili miliamper-satima [mAh]. Upravo je kapacitet parametar koji prvi zapne za oko kada je riječ o odabiru baterije te ga je zato potrebno moći i precizno odrediti. Metode koje mjere napon otvorenog kruga i unutarnji otpor, iako jednostavne i bitne, ne daju dovoljno korelacijskih podataka da se pouzdano može dobiti podatak o kapacitetu baterije. Jedan od jednostavnijih i preciznijih načina određivanja kapaciteta baterije je korištenje sklopa koji omogućuje konstantno strujno opterećenje. Ovaj sklop se koristi za testiranje izvora napajanja, baterija ili manjih solarnih panela, kako bi se provjerila njihova sposobnost održavanja performansi pod određenim strujnim opterećenjem [52]. Korištenjem sklopa koji omogućuje konstantno strujno opterećenje, može se dobiti puno preciznija mjera kapaciteta, nego kada se koristi samo paralelno spojen otpornik sa baterijom. Metoda s otpornikom daje neprecizne rezultate zato što se pražnjenjem baterije smanjuje sami napon baterije, a poznavajući Ohm-ov zakon, ukoliko je otpor konstantan i napon se smanjuje, smanjivati će se i struja. Zato je metoda s konstantnim strujnim opterećenjem puno povoljnija jer ona omogućuje da se baterija tijekom cijelog postupka prazni konstantnom strujom neovisno o promjeni napona baterije. To se postiže tako da se na sklopu s konstantnim strujnim opterećenjem unaprijed postavlja određena vrijednost struje koja će povlačiti iz izvora, tj. baterije čiji se

kapacitet želi odrediti, te će pomoću povratne veze ta struja držati konstantnom. Takav jednostavni sklop je prikazan na shemi 6.1.



**Shema 6.1.** Sklop s konstantnim strujnim opterećenjem [52]

Već prije spomenuta povratna veza, radi na principu uspoređivanja zadane, referentne vrijednosti i stvarne vrijednosti. Taj se proces odvaja u operacijskom pojačalu koji je na shemi označen kao LM358. On uspoređuje napon na neinvertirajućem ulazu (označen brojem 3 na shemi 6.1.) koji se zadaje pomoću potenciometra (označen kao  $R2$  na shemi 6.1.) s naponom na invertirajućem ulazu (označen brojem 2 na shemi 6.1.) koji nastaje kao pad napona na otporniku za mjerenje struje  $R1$  (eng. *shunt resistor*). Cilj operacijskog pojačala je da uspoređuje ova dva ulaza i da osigurava napon na izlazu (označen brojem 1 na shemi 6.1.) koji je potreban kako bi MOSFET (označen kao  $Q1$  na shemi 6.1.) proveo. MOSFET vodi sve dok ima napona na upravljačkoj elektrodi, a taj napon će postojati sve dok se ne pojavi napon na invertirajućem ulazu koji je veći od napona na neinvertirajućem ulazu operacijskog pojačala. Taj napon je zapravo pad napona na otporniku  $R1$  koji nastaje kada se baterija spoji na navedeni sklop i struja poteče otpornik  $R1$ . Pošto je sada napon na invertirajućem ulazu veći od napona na neinvertirajućem ulazu, izlaz operacijskog pojačala više nije aktivan i MOSFET više ne vodi što onda zatvara protok struje k otporniku  $R2$  i pad napona na njemu postaje 0 V, tj. sada je opet napon na neinvertirajućem ulazu veći nego napon na invertirajućem ulazu pa će MOSFET provesti i ponoviti ovaj ciklus. Pošto se ovaj ciklus



ponavlja frekvencijom većom od 100 kHz, MOSFET se zagrijava pa je na njega potrebno staviti pasivni hladnjak kako bi se disipirala nastala toplina [52].

Provedba samog testa za određivanje kapaciteta još zahtjeva nezavisni izvor napajanja koji će napajati sami sklop te je još potreban jedan multimetar koji će mjeriti napon baterije kao bi se znalo kada treba prekinuti test. Kada napon baterije padne do isključnog napona (on predstavlja ispražnjeno stanje baterije) potrebno je odspojiti bateriju od sklopa, ukoliko se to ne učini i baterija se nastavi dalje prazniti, što može dovesti do ireverzibilnih posljedica za zdravlje baterije te u konačnici i smanjenje samog kapaciteta. Prije samog mjerenja, bateriju je potrebno u potpunosti napuniti te je potrebno na potencionometru namjestiti željenu struju pražnjenja. Mjerenje počinje onda kada se baterija spoji na sklop s konstantnim strujnim opterećenjem i tada treba početi mjeriti vrijeme. Kada baterija dosegne napon isključenja potrebno ju je odspojiti od sklopa i zaustaviti vrijeme. Kapacitet se može izračunati sljedećom formulom [53]:

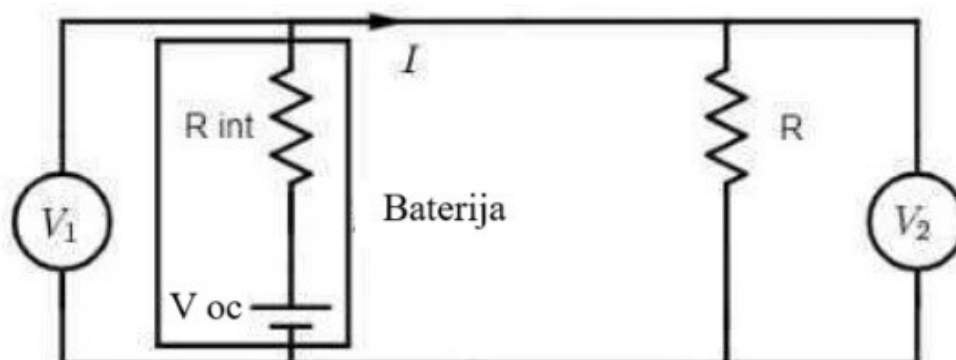
$$C = I \cdot t \quad (6-1)$$

Gdje  $C$  predstavlja kapacitet,  $I$  predstavlja zadanu konstantnu struju pražnjenja, a  $t$  označava ukupno potrebno vrijeme da se baterija isprazni, a izražava se u satima. Kao rezultat, kapacitet se može dobiti u amper-satima [Ah] ili miliamper-satima [mAh] ovisno o zadanoj konstantna struja pražnjenja.

## 6.2. Određivanje unutarnjeg otpora

Unutarnji otpor je bitna karakteristika baterije zato što ona diktira maksimalnu izlaznu struju koju baterija može isporučiti. To se može lako zaključiti poznavanjem Ohm-ovog zakona koje govori kako je struja količnik napona i otpora. Što je unutarnji otpor baterije veći to će baterija imati manju izlaznu struju, a što je taj otpor manji time će i sama izlazna struja biti veća. U idealnom svijetu taj otpor bi poželjno trebao biti jednak nuli što bi za rezultat dalo najveću moguću izlaznu struju bez ikakvih dodatnih gubitaka, no to u realnosti nije tako pa se taj otpor u praksi želi svesti na što manje vrijednosti. Unutarnji otpor se isto tako može koristiti kao dobar pokazatelj za starosti baterije. Ukoliko se uspoređi unutarnji otpor potpuno nove baterije i baterije korištene nekoliko mjeseci ili godina, unutarnji otpor korištene baterije će biti nešto veći za razliku od nove baterije ukoliko je malo korištena, ali ako je baterija izvršila nekoliko stotina ciklusa onda bi ta razlika mogla biti i po nekoliko puta veća [54].

Određivanje unutarnjeg otpora baterije se može jednostavno provesti korištenjem multimetra i jednog otpornika poznate vrijednosti kao što je moguće vidjeti na shemi 6.2.



**Shema 6.2.** Mjerenje unutarnjeg otpora [55]

Prvi korak u određivanju unutarnjeg otpora baterije je mjerenje napona baterije bez dodatnog otpornika. Time se dobiva napon otvorenog kruga (eng. *open circuit voltage*, OCV) koji će biti označen kao  $V_1$ . Zatim otpornik  $R$  spojimo kao što je prikazano na shemi 6.2. i s multimetrom ponovo izmjerimo napon baterija. Taj novo izmjereni napon će biti označen kao  $V_2$  te bi po iznosu trebao biti nešto manji od napona  $V_1$  dobivenog prethodnim mjerenjem. Kao bi se dobila vrijednost unutarnjeg otpora  $R_{int}$  potrebno je izračunati struju  $I$  i pad napona na unutarnjem otporu  $V_{int}$ . Struja koja protječe ovim krugom se može izračunati sljedećom jednadžbom [55]:

$$I = \frac{V_2}{R} \quad (6-2)$$

Dok se pad napona na unutarnjem otporu može opisati pomoću Kirchoffovog zakona za napone kao što je vidljivo na sljedećoj jednadžbi [56]:

$$V_{int} = V_1 - V_2 \quad (6-3)$$

Poznavajući Ohm-ov zakon i potrebne veličine, moguće je odrediti unutarnji otpor [55]:

$$R_{int} = \frac{V_{int}}{I} \quad (6-4)$$

Jednadžbu (6-4) je moguće zapisati i na drugi način uvrštavanjem jednadžbi (6-2) i (6-3) kako bi se skratio postupak računanja [55]:

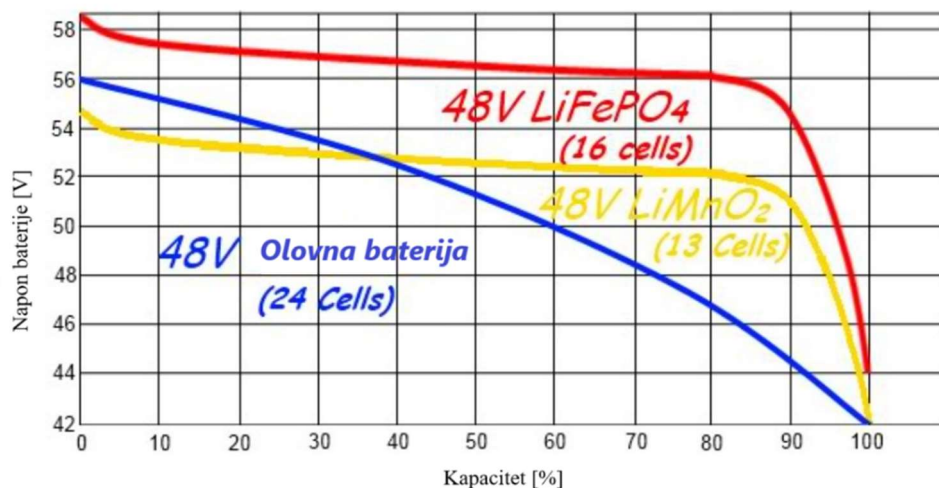
$$R_{\text{int}} = \frac{(V_1 - V_2) \cdot R}{V_2} \quad (6-4)$$

### 6.3. Određivanje stanja napunjenosti baterije

Još jedna bitna karakteristika koja je daje ključan podatak o stanju baterije je stanje napunjenosti baterije (eng. SOC). Stanje napunjenosti se može definirati kao postotak maksimalno mogućeg pohranjenog naboja koji je prisutan unutar baterije, tj. stanje napunjenosti pokazuje koliko je energije dostupno za korištenje u bateriji. Na primjer, baterija kojoj je stanje napunjenosti 70%, a nominalni kapacitet joj iznosi 100 Ah, znači da je 70 Ah pohranjeno u baterije i spremno za korištenje.

Poznavanje ovog parametra je od velike važnosti iz nekoliko razloga. Ono pomaže u planiranju rada, primjerice kod električnih vozila kako bi se osiguralo da vozilo može doći do odredišta bez potpunog pražnjenja baterije. Isto tako, pravilno praćenje stanje napunjenosti može produžiti životni vijek baterije, budući da često pražnjenje na vrlo niske vrijednosti ili punjenje na maksimalne vrijednosti stanja napunjenosti, može ubrzati degradaciju baterije. [37]

Jedna od najčešće korištenih metoda za procjenu stanja napunjenosti je mjerenje napona otvorenog kruga baterije (eng. OCV) i uspoređivanja ga sa naponom napunjene baterije. Ova metoda se i dalje koristi, radi svoje jednostavnosti, u aplikacijama gdje velika preciznost nije potrebna, već je dovoljan okvirni podatak o stanju napunjenosti. Radi različitih krivulja napona pražnjenja, neke tehnologije baterija su povoljnije od drugih za primjenu ove metode, npr. olovne baterije imaju strmiju krivulju napona pražnjena od litij-ionskih baterija pa se kod njih stanje napunjenosti može lakše i preciznije odrediti na temelju napona otvorenog kruga, dok je kod litij-ionskih baterija ta krivulja dosta "ravna" te se oko 80% krivulje nalazi u tom području što uvelike otežava očitavanje stanja napunjenosti [56]. Krivulje napona pražnjenja za litij-ionske i olovne baterije je moguće vidjeti na slici 6.1.



**Slika 6.1.** Krivulja napona pražnjenja za olovne i litij-ionske baterije [57]

Određivanje stanja napunjenosti baterije se provodi u više mjerenja te je za provedbu ovog mjerenja potreban samo voltmetar kojim se mjeri napon otvorenog kruga. Ova metoda zahtjeva mjerenje u neopterećenom stanju zato što bilokakav teret priključen na bateriju stvara pad napona koji može narušiti podatke mjerenja. Primjer podataka koji se mogu dobiti ovom metodom je moguće vidjeti u tablici 6.1.

**Tablica 6.1.** Ovisnost stanja napunjenosti o naponu otvorenog kruga [58]

Stanje napunjenosti baterije [%]	Napon otvorenog kruga [V]
100%	12,7 V
90%	12,6 V
80%	12,5 V
70%	12,3 V
60%	12,2 V
50%	12,1 V
40%	12,0 V
30%	11,9 V

20%	11,8 V
10%	11,7 V
0%	11,4 V

Tablicom 6.1. prikazane su okvirne vrijednosti koje je moguće očekivati od 12 V olovne baterije prilikom određivanja stanja napunjenosti. Kao što je moguće vidjeti, vrijednosti napona se kontinuirano smanjuju za 0,1 V uz veće promjene kada je baterija potpuno ispražnjena. Podaci dobiveni ovom usporednom metodom mogu biti neprecizni radi utjecaja visokih ili niskih temperatura na bateriju te samih materijala od kojih je baterija načinjena.

## 7. PREGLED LITERATURE

Autori D. Linden i T. B. Reddy su u literaturi [1] detaljno opisali gotovo sve što je potrebno znati o baterijama od samog uvoda u svijet baterija pa do raznih tehnologija koje se koriste za proizvodnju baterija. Internetska stranica [2] daje pogled kojom se brzinom razvija napredak baterija. Za opis „Bagdadske baterije“ korištena je internetska stranica [3], dok je za otkrića Luigia Gavanija i Alessandra Volte korištena internetska stranica [4]. Podaci korišteni za opis prve prave baterije su dobiveni s internetske stranice [5]. za daljni razvoj baterija korištena je internetska stranica [6] koja daje uvid nastanak daniellove ćelije te nastanak suhih ćelija. Literatura [7] korištena je za detaljan opis modela baterija baziranih na ekvivalentnim shemama koja je također služila za izvor pojedinih shema i slika u tom području. Ista se literatura koristi za opisivanje nekih osnovnih parametara baterije. Za predstavljanje glavnih karakteristika primarnih baterija korištena je internetska stranica [8], dok su mjesta primjene opisane pomoću internetske stranice [9]. za opis suhe ćelije i građu cink-uglične baterije, korištena je stranica [10]. Tipovi i oblici primarnih baterija koje se danas koriste su opisani pomoću internetske stranice [11], dok je slika koja prikazuje razne tipove alkalnih baterija preuzeta s [12]. Nastavak tome opis građe te prednosti alkalnih baterija, naspram cink-ugličnih baterija, pomogla su internetske stranica [13] i [14]. Ključne informacije za razumijevanje sekundarnih baterija su iznesene uz pomoć internetske stranice [15], a područja primjene sekundarnih baterija su dane internetskom stranicom [16]. slika raznih tipova sekundarnih baterija je preuzeta s internetske stranice [17]. Za opis građe baterija i opis pojedinih dijelova baterije su korištene internetske stranice [18], [19], [20], [21] i [22], dok je slika poprečnog presjeka cink-karbonske baterije preuzeta sa stranice [23]. Kako bi princip rada baterije bio upotpunosti jasan potrebno je opisati osnove elektriciteta za koje je pomogla stranica [24]. Detaljan opis elektrokemijskih reakcija i parametara baterije se temelji na internetskoj stranici [25]. Proces punjenja i pražnjenja te pripadajuće sheme i kemijske jednadžbe korištene za opis reakcija u nikal-kadmij ćeliji potkrepljene su literaturom [1]. internetska stranica [26] je korištena kako bi se prikazala cjelokupna reakcija pražnjenja nikal-kadmij baterije. Definicija nominalnog napona te unutarnjeg otpora je dana uz pomoć stranice [27]. Definicija i značenje kapaciteta kao i faktori koji utječu na njega su potkrijepljeni internetskim stranicama [28], [29], [30], [31]. C-razina je parametar usko povezan s kapacitetom pa se za njegov opis koristila već spomenuta internetska stranica [29]. internetska stranica [32] je pružila detaljne informacije za razumijevanje unutarnjeg otpora kao i sliku koja opisuje promjenu unutarnjeg otpora u ovisnosti sa stanjem napunjenosti. Stanje napunjenosti i razina ispražnjenosti su ključni pojmovi u

razumijevanju stanja baterije te su podaci za njihovo opisivanje preuzeti sa stranice [33]. za uvid u životni vijek baterije je korištena internetska stranica [34]. Uvod u razne modele baterija omogućava stranica [35]. Za predstavljanje olovnih baterija koristila se internetska stranica [36] dok je stranica [37] pružila konkretne podatke o iznosima kapaciteta pojedinih tehnologija punjivih baterija. Razni tipovi olovnih baterija poput, VRLA, AGM i GEL baterija su opisane pomoću sljedeće internetske stranice [38], dok je slika jedne takve baterije preuzeta sa [40]. Prednosti ovih baterija potkrepljene su stranicom [39]. povijest nikal-kadmij baterije je opisana uz pomoć sljedećih internetskih stranica: [41] i [42], dok su loše strane iznesene pomoću internetske stranice [43]. slika nikal-kadmijeve baterije je preuzeta s internetske stranice [44]. internetska stranica [45] je korištena kao bi se opisala nikal-metal hidridna baterija te se naveli njeni prednosti i nedostaci. Slika nikal-metal hidridne baterije koja se koristi u električnim automobilima je preuzeta s elektroničkog izvora [46]. Primjena i tipovi ove baterije su izneseni uz pomoć [47] i [48] internetske stranice. Za opis litij- ionskih baterija te njihove prednosti i mane, poslužili su sljedeći internetski izvori: [48], [49] i [51], dok je internetska stranica [50] pružila informacije o raznim izvedbama litij-ionskih baterija kao i sliku koja prikazuje te izvedbe. Za opis sklopa s konstantnim strujnim opterećenjem i njegovom shemom, koristila se stranica [52] koja je isto tako dala detaljan opis kako provesti mjerenje kojim će se odrediti kapacitet baterije. Sa internetske stranice [53] je preuzeta formula kojom se konačno može izračunati kapacitet. Za opisivanje postupka određivanja unutarnjeg otpora pomogla je internetska stranica [54], dok je internetska stranica [55] pružila shemu koja se koristi pri samom mjerenju kao i potrebne jednadžbe za izračunavanje unutarnjeg otpora. Za opis metode mjerenja stanja napunjenosti baterije je korištena internetska stranica [56], dok se za primjer rezultata mjerenja koristila stranica [58]. Krivulje napona pražnjenja litij-ionske i olovne baterije su preuzete sa internetske stranice [57.]

## 8. ZAKLJUČAK

Temeljem ovog završnog rada, može se zaključiti kako je razvoj punjivih baterija potpuno promijenio tijek kako funkcionira današnji svijet. Punjive baterije su sveprisutne, na svakom pogledu. Velika je šansa da se jedna punjiva baterija nalazi upravo pored vas ili čak na vašoj ruci iako to ni ne zamjećujete. Razvojem tehnologije uvelike su se povećale performanse punjivih baterija te su moguće izvedbe kakve znanstvenici prije 50 godina nisu mogli sanjati. Punjive su baterije postale temeljna tehnologija koja omogućuje mobilnost i održivost u mnogim industrijama, od potrošačke elektronike pa do obnovljivih izvora energije. Glavna prednost punjivih baterija je njihova mogućnost ponovnog punjenja nakon što se isprazne, čime se uvelike smanjuje količina otpada te se smanjuje potreba za proizvodnjom jednokratnih baterija. Time, punjive baterije pomažu pri ostvarenju globalnog cilja za smanjenjem ugljičnih emisija te potiču upotrebu obnovljivih energetske rješenja poput električnih vozila i solarnih sustava za pohranu energije. Unatoč svim pozitivnim aspektima, punjive baterije imaju svoja ograničenja. Kao što je u radu spomenuto, svaka baterija ima svoj životni ciklus nakon kojeg počinje postupna degradacija samih materijala baterije što prouzrokuje pad kapaciteta i gubljenje sveukupne učinkovitosti. Trenutno rješenje na taj problem je zamijene samih baterija što za posljedicu ima stvaranje e-otpada te se povećava potražnja za novim punjivim baterijama. Proizvodnja novih baterija zahtjeva znatnu količinu rijetkih metala što može izazvati ozbiljne ekološke i etičke probleme, uključujući iscrpljivanje prirodnih resursa i stvaranje loših radnih uvijete u rudarskim regijama. Uračunavajući ove izazove, budućnost punjivih baterija uvelike ovisi o inovaciji i usavršavanju novih i postojećih tehnologija, kao i samih modela baterija kako bi se povećala efikasnost i održivost novih baterija.



**POPIS UPOTREBLJENE LITERATURE**

- [1] D. Linden, T. B. Reddy: Handbook of batteries, McGraw-Hill, 2001.
- [2] Battery university, BU-002: Introduction, 2021., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-002-introduction>, pristupljeno: 14.3.2024.
- [3] M. Janton, Povijest baterija: kako su nastale?, Marketing odjel, dostupno na: [https://www.marketing-odjel.com/povijest\\_baterija](https://www.marketing-odjel.com/povijest_baterija), pristupljeno: 14.3.2024
- [4] Battery university, BU-101: When was battery invented?, 2022., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-101-when-was-the-battery-invented>, pristupljeno: 14.3.2024
- [5] J. Alarco, P. Talbot, The history and development of batteries, Phys.org, 2015., dostupno na: <https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>, pristupljeno: 14.3.2024
- [6] Battery Industry, A brief history od the battery, dostupno na: <https://batteryindustry.tech/a-brief-history-of-the-battery/>, pristupljeno: 14.3.2024
- [7] G. L. Pleet: Battery Management Systems: Battery Modeling, Volume I, Artech House, 2015., ISBN-13: 978-1-63081-023-8
- [8] T. Bishop, You can recharge alkaline batteries but should you?, Paleblue, 2021., dostupno na: <https://paleblueearth.com/blogs/news/you-can-recharge-alkaline-batteries-but-should-you>, pristupljeno: 16.3.2024.
- [9] ScienceDirect, Primary Battery, 2011., dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/primary-battery>, pristupljeno: 16.3.2024.
- [10] GeeksforGeeks, Dry Cell, 2024., dostupno na: <https://www.geeksforgeeks.org/dry-cell/>, pristupljeno: 17.3.2024.
- [11] T. Bishop, Battery Types, Technologies, and Common Sizes, Paleblue, 2023., dostupno na: <https://paleblueearth.com/blogs/news/types-of-batteries/>, pristupljeno: 17.3.2024.
- [12] Harding Energy, Primary, dostupno na: <https://www.hardingenergy.com/primary/>, pristupljeno: 31.8.2024.

- [13] Unacademy, Alkaline Battery, dostupno na: <https://unacademy.com/content/jee/study-material/physics/alkaline-battery/>, pristupljeno: 18.3.2024.
- [14] Battery university, BU-103: Global Battery Markets, 2021., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-103-global-battery-markets>, pristupljeno: 18.3.2024.
- [15] Battery university, Will Secondary Batteries replace Primaries?, 2016., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/will-secondary-batteries-replace-primaries>, pristupljeno: 20.5.2024.
- [16] SKinno News, What are secondary batteries?, 2024. dostupno na: <https://skinnonews.com/global/archives/17623>, pristupljeno: 20.5.2024.
- [17] Indiamart, BIS Certification, dostupno na: <https://www.indiamart.com/proddetail/bis-of-sealed-secondary-cells-batteries-22012462191.html> pristupljeno: 31.8.2024.
- [18] M.Winter, R. J. Brodd, What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?, American Chemical Society, 2004., dostupno na: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/cr020730k>, pristupljeno: 22.5.2024.
- [19] Hrvatska tehnička enciklopedija, Barij-baterija, dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/baterija.pdf>, pristupljeno: 22.5.2024.
- [20] Battery university, BU-104b: Battery Building Blocks, 2021., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-104b-battery-building-blocks>, pristupljeno: 22.5.2024.
- [21] E. B. Tettes, Understanding Battery Types, Components and the Role of Battery Material Testing in Development and Manufacture, 2023., dostupno na: <https://www.technologynetworks.com/applied-sciences/articles/understanding-battery-types-components-and-the-role-of-battery-material-testing-in-development-and-376993>, pristupljeno: 25.5.2024
- [22] Hrvatska enciklopedija, Elektrolit, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektroliti>, pristupljeno: 25.5.2024.

- [23] Harding Energy, Primary, dostupno na: <https://www.hardingenergy.com/primary/>, pristupljeno: 31.8.2024
- [24] Hrvatska enciklopedija, Atom, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/atom>, pristupljeno: 25.5.2024
- [25] Australian Academy of Science, How a battery works, dostupno na: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>, pristupljeno: 2.6.2024.
- [26] Quarktwin Technology, Nickel-cadmium battery working principle and repair methods, 2023., dostupno na: <https://www.quarktwin.com/blogs/battery/nickel-cadmium-battery-working-principle-and-repair-methods/54>, pristupljeno: 2.6.2024.
- [27] MIT Electric Vehicle Team, A Guide to Understanding Battery Specifications, 2008., dostupno na: [https://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](https://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf), pristupljeno: 2.6.2024.
- [28] Commercial Solar Electric Systems, Interpreting Battery Parameters and Specification Sheets, dostupno na: <https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/896>, pristupljeno: 2.6.2024.
- [29] Solar Energy, Components of PV Systems, dostupno na: [https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar\\_energy\\_section\\_19\\_3\\_3.pdf](https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar_energy_section_19_3_3.pdf), pristupljeno: 2.6.2024.
- [30] M. Kraljević, Baterije -vrste, tehnologija izrade i način rada, PCCHIP, 2016., dostupno na: <https://pcchip.hr/ostalo/tech/baterije-vrste-tehnologija-izrade-i-nacin-rada/>, pristupljeno: 2.6.2024.
- [31] I. S. Stojković, Materijali za konverziju energije: ispitivanje i primena, dostupno na: <https://www.ffh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2019/04/Doktorske-studije-Ivana-Stojkovic-Simatovic.pdf>, pristupljeno: 2.6.2024.
- [32] Battery university, How does Internal Resistance affect Performance?, 2021., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/how-does-internal-resistance-affect-performance>, pristupljeno: 2.6.2024.

- [33] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. L. Regtien, Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications, Springer Science+Business Media B.V, 2008., ISBN 978-1-4020-6944-4
- [34] Anker, Understanding Battery Capacity: A Comprehensive Guide, dostupno na: <https://www.anker.com/blogs/others/battery-capacity-guide>, pristupljeno: 2.6.2024.
- [35] Monolithic Power Systems, Significance of Battery Modeling, dostupno na: <https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/battery-modeling/significance-of-battery-modeling>, pristupljeno: 3.6.2024.
- [36] Hrvatska enciklopedija, Električni akumulator, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektricni-akumulator>, pristupljeno: 13.6.2024.
- [37] Monolithic Power Systems, Battery Parameters, dostupno na: [https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/introduction-to-battery-technology/battery-parameters?srsltid=AfmBOoq0VfBJYhXJxxybMeUI\\_p4rnrVsfbzll\\_pkV8bVUbfC8WPScxvS](https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/introduction-to-battery-technology/battery-parameters?srsltid=AfmBOoq0VfBJYhXJxxybMeUI_p4rnrVsfbzll_pkV8bVUbfC8WPScxvS), pristupljeno: 13.6.2024.
- [38] JYC Battery, What are the types of lead-acid batteries?, 2023., dostupno na: <https://www.jycbattery.com/what-are-the-types-of-lead-acid-batteries/>, pristupljeno: 13.6.2024.
- [39] Bazen Green, što je olovna baterija, dostupno na: <https://www.basengreen.com/hr/what-is-a-lead-storage-battery/>, pristupljeno: 13.6.2024.
- [40] Spaceflight Power, What are the difference between the two lead acid battery types?, 2021., dostupno na: <https://www.spaceflightpower.com/what-are-the-difference-between-the-two-lead-acid-battery-types/>, pristupljeno: 13.6.2024.
- [41] A. Huang, Nikal-kadmijeva baterija: opsežan vodič za kupce, SEL, 2024., dostupno na: <https://hr.shieldenchannel.com/blogs/portable-power-station/nickel-cadmium-battery>, pristupljeno: 13.6.2024.
- [42] City Labs, The Importance of Nickel-Cadmium Batteries, 2024., dostupno na: <https://citylabs.net/nickel-cadmium-batteries/>, pristupljeno: 13.6.2024.

- [43] Energy2store, Nikal-kadmij (NiCd) u odnosu na LiFePO<sub>4</sub> (LFP) - koja je baterija bolja?, dostupno na: <https://www.energy2store.hr/nikal-kadmij-u-odnosu-na-lifepo4-koja-je-baterija-bolja/>, pristupljeno: 13.6.2024.
- [44] Ubuy, 12 Packs 1.2V AA 700mAh Rechargeable Batteries for Solar Lights and Household Devices, dostupno na: <https://www.u-buy.com.ng/product/BTGZSYEBK-12-packs-1-2v-aa-700mah-ni-cd-rechargeable-batteries-for-solar-lights-lawn-landscape-lighting-aa-size?st=es>, pristupljeno: 31.8.2024.
- [45] Battery university, BU-203: Nickel-based Batteries, 2021., dostupno na: [https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries#google\\_vignette](https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries#google_vignette), pristupljeno: 15.6.2024.
- [46] T. Romarez, Nickel-Metal-Hydride Batteries for Plug-in Hybrid Vehicles Improve Energy Density, Electric cars guide, 2015., dostupno na: <https://www.electriccarsguide.com.au/latest-news/hydride-battery-for-hybrid-vehicles-improve-energy-density/>, pristupljeno: 15.6.2024.
- [47] Pasonic, Nickel metal hydride handbook, 2003., dostupno na: <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-nickel-metal-hydride-battery-overview-ams-en-38956.pdf>, pristupljeno: 15.6.2024.
- [48] Monolithic Power Systems, Types of Batteries, dostupno na: <https://www.monolithicpower.com/jp/learning/mpscholar/battery-management-systems/introduction-to-battery-technology/types-of-batteries>, pristupljeno: 15.6.2024.
- [49] City labs, Lithium Batteries Explained, 2023., dostupno na: <https://citylabs.net/what-are-lithium-batteries/>, pristupljeno: 15.6.2024.
- [50] LinkedIn, Comparison Between Three Types of Lithium Ion Battery Cell - Cylindrical Cell, Prismatic Cell, Pouch Cell, 2023., dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/comparison-between-three-types-lithium-ion-battery-cell-cliff-lee>, pristupljeno: 15.6.2024.
- [51] HowStuffWorks, How Lithium-ion Batteries Work, dostupno na: <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm#pt1>, pristupljeno: 15.6.2024.

- [52] GreatScottLab, DIY Constant Current Load, AUTODESK Instructables, dostupno na: <https://www.instructables.com/DIY-Constant-current-load/>, pristupljeno: 10.9.2024.
- [53] Rekoser, How to measure battery capacity, 2023., dostupno na: <https://rekoser.com/blog/how-to-measure-battery-capacity/>, pristupljeno: 10.9.2024.
- [54] HIOKI, Why is it Important to Measure Battery's Internal Resistance, dostupno na: <https://www.hioki.com/us-en/learning/electricity/internal-resistance.html>, pristupljeno: 10.9.2024.
- [55] Physics Forums Insight, How to Measure Internal Resistance of a Battery, 2023., dostupno na: <https://www.physicsforums.com/insights/how-to-measure-internal-resistance-of-a-battery/>, pristupljeno: 10.9.2024.
- [56] Battery University, BU-903: How to Measure State-of-charge, 2021., dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge>, pristupljeno: 11.9.2024.
- [57] Battery Power Tips, How to read battery discharge curves, 2021., dostupno na: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>, pristupljeno: 11.9.2024.
- [58] Missouri Wind and Solar, Measuring Battery State of Charge, dostupno na: <https://windandsolar.com/blog/measure-battery-state-of-charge/>, pristupljeno: 11.9.2024.

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

Tablica 8.1 Popis korištenih oznaka i simbola

Oznaka ili simbol	Naziv	Mjerna jedinica
Cu	Bakar	-
Zn	Cink	-
KOH	Kalijev hidroksid	-
Cd	Kadmij	-
OH <sup>-</sup>	Hidroksid	-
e	Elektron	-
Cd(OH) <sub>2</sub>	Kadmijev hidroksid	-
NiO(OH)	Nikal oksid-hidroksid	-
Ni(OH) <sub>2</sub>	Nikal hidroksid	-
H <sub>2</sub> O	Voda	-
Cl	Klor	-
E <sup>0</sup>	Standardni potencijal elektrode	V
OCV	Napon otvorenog kruga	V
SOC	Stanje napunjenosti	-
C	Kapacitet	Ah
DOD	Razina ispražnjenosti	-
BMS	Sustav za upravljanje baterijom	-
$v(t)$	Napon ćelije	V
$z$	Količina uklonjenog naboja	-
$Q$	Ukupni kapacitet	Ah
$\eta$	Kulonska efikasnost	-
$i(t)$	Ulazna struja	A
$R_0$	Unutarnji otpor	$\Omega$
$R_1$	Otpornik korišten za modeliranje difuzijskog napona	$\Omega$
$C_1$	Kondenzator korišten za modeliranje difuzijskog napona	F
Pb	Olovo	-
PbO <sub>2</sub>	Olovni dioksid	-
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sumporna kiselina	-
PbSO <sub>4</sub>	Olovov-sulfat	-
VRLA	Zatvorena olovna baterije s regulacijom ventila	-
AGM	Olovna baterija s upijajućim izolatorom od staklene vune	-
Ni-Cd	Nikal-kadmij	-
NiMH	Nikal-metal hidrid	-
M	Legura na bazi metala	-
MH	Metal-hidrid	-
C	Ugljik	-
LiCoO <sub>2</sub>	Litij-kobalt oksid	-
LiFePO <sub>4</sub>	Litij-željezo-fosfat	-
Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Litij-mangan oksid	-
LiC <sub>6</sub>	Litij-grafitni interkalacijski spoj	-

---

$\text{CoO}_2$	Kobaltov oksid	-
LM358	Operacijsko pojačalo	-
$R_1$	Otpornik za mjerenje struje	$\Omega$
$R_2$	Potenciometar	$\Omega$
Q1	Metal-oksid-poluvodički tranzistor s efektom polja	-
$I$	Struja pražnjenja	Ah
$t$	Vrijeme	h
$V_1$	Napon otvorenog kruga	V
$V_2$	Napon prilikom mjerenja	V
$R$	Otpor poznate vrijednosti	$\Omega$
$R_{int}$	Unutarnji otpor	$\Omega$



**SAŽETAK**

U završnom radu objašnjena je povijest baterija, kako su nastale te kako su se vremenom unaprjeđivale. Navedena je glavna podjela na primarne i sekundarne baterije te je opisana građa baterije. Navedene su njene glavne komponente te je opisan princip rada na temelju punjenja i pražnjenja. Nakon upoznavanja s osnovama, opisani su i predstavljeni glavni parametri pomoću kojih se može dobiti cjelokupna slika o stanju baterije. Opisani su najzastupljeniji modeli koji se zasnivaju na ekvivalentnim shemama, nakon čega su navedene najzastupljenije tehnologije punjivih baterija uz njihove prednosti i mane. Na kraju završnog rada su opisane metode koje se koriste za određivanje osnovnih parametara baterije.

**Ključne riječi:** punjive baterije, sekundarne baterije, primarne baterije, litij-ionske baterije, nikal-metal hidridne baterije, nikal-kadmij baterije, olovne baterije, modeli temeljeni na ekvivalentnim shemama, Theveninov model.

**ABSTRACT**

The final thesis describes history of the batteries, how they originated, and how they have improved over time. The main classification into primary and secondary batteries is provided, along side with a description of the battery structure. The key components are listed, and the operating principle is described based on charging and discharging. After an introduction to the basics of the battery, the main parameters used to gain a comprehensive understanding of the battery's condition are presented and described. The most common models, based on equivalent circuits, are described, followed by an overview of the most relevant rechargeable battery technologies, along with their advantages and disadvantages. Finally, the methods used to determine the basic battery parameters are explained.

**Key words:** rechargeable batteries, secondary batteries, primary batteries, lithium-ion batteries, nickel-metal hydride batteries, nickel cadmium batteries, lead-acid batteries, models based on equivalent circuits, Thevenin's model.

**ŽIVOTOPIS**

Mateo Bičak rođen je 25.09.2002. godine u Pakracu, sa prebivalištem u Daruvaru. U Daruvaru je 2017. godine, sa izvrsnim uspjehom završio osnovnu školu „Vladimira Nazora“, te se upisuje u srednju "Tehničku školu Daruvar" i pohađa obrazovni program Tehničar za mehatroniku koju završava 2021. godine. Tehnička škola Daruvar ima pravo predložiti učenika za dobivanje izravnog upisa na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Zbog izvrsnog uspjeha tijekom srednje škole Mateo je predložen za izravan upis te 2021. godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike i informacijskih tehnologija na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Korisnik je stipendije koju mu je dodijelio gradonačelnik grada Daruvara Damir Lneniček na temelju ostvarenog izvrsnog uspjeha tijekom pohađanje osnovne i srednje škole, čija prava ostvaruje od srednje škole do završetka studija. Tijekom studija redovito polaže sve ispite.

U Osijeku, 18. rujna 2024.



---

Mateo Bičak

---

**PRILOZI**

<b>Popis slika</b>	<b>Stranica</b>
Slika 2.1. Tipovi alkalnih baterija	4
Slika 4.2. Tipovi sekundarnih baterija	6
Slika 2.5. Poprečni presjek cink-karbonske baterije	8
Slika 3.1. Promjena unutarnjeg otpora u ovisnosti sa SOC-om	17
Slika 4.1. Polarizacija napona litij-ionske baterije	23
Slika 5.1. AGM olovne baterije	27
Slika 5.2. Nikal-kadmij baterije	29
Slika 5.3. Nikal-metal hidridna baterija za električna vozila	30
Slika 5.4. različite izvedbe litij-ionskih baterija	32
Slika 6.1. Krivulja napona pražnjenja za olovne i litij-ionske baterije	38
<b>Popis shema</b>	
Shema 2.1. Pražnjenje ćelije	10
Shema 2.2. Punjenje ćelije	11
Shema 4.1. Model s idealnim naponskim izvorom	20
Shema 4.2. Model s naponski upravljanim naponskim izvorom	21
Shema 4.3. Rint model baterije	22
Shema 4.4. Theveninov model baterije	24
Shema 6.1. Sklop s konstantnim strujnim opterećenjem	34
Shema 6.2. Mjerenje unutarnjeg otpora	36
<b>Popis tablica</b>	
Tablica 6.1. Ovisnost stanja napunjenosti o naponu otvorenog kruga	38
Tablica 8.1. Popis korištenih oznaka i simbola	48