

Ispitivanje karakteristika baterije na dinamička opterećenja

Semeš, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:200:856160>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

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**

Stručni studij

**Ispitivanje karakteristika baterije na dinamička
opterećenja**

Završni rad

Mario Semeš

Osijek, 2023. godina.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 20.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit
na preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Mario Semeš
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4728, 08.10.2021.
OIB Pristupnika:	54249494840
Mentor:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 1:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Krešimir Miklošević
Naslov završnog rada:	Ispitivanje karakteristika baterije na dinamička opterećenja
Znanstvena grana završnog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada	
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.09.2023.

Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:

Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.

Datum:

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

Osijek, 15.10.2023.

Ime i prezime studenta:

Mario Semeš

Studij:

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika

Mat. br. studenta, godina upisa:

4728, 08.10.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Ispitivanje karakteristika baterije na dinamička opterećenja**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Venco Ćorluka

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 studenta:

Sadržaj

1. UVOD	8
2. OPĆENITO O BATERIJI.....	9
2.1. Povijest baterije	9
2.2. Karakteristike	10
2.3. Vrsta baterije	11
2.3.1. Primarne baterije.....	11
2.3.2. Sekundarne baterije.....	12
2.3.3. Nikal kadmij baterije.....	14
2.3.4. Nikal - metal-hibrid baterije (NiMH).....	15
2.3.5. Olovne baterije.....	16
2.3.6. Litij ionske baterije	17
3. STATIČKE KARAKTERISTIKE	19
3.1. Napon baterije	19
3.2. Kapacitet baterija.....	20
3.3. Unutarnji otpor baterija	21
3.4. Gustoća baterijske energije	21
3.5. Samo pražnjenje.....	22
4. DINAMIČKI MODEL.....	23
4.1. Dinamičko punjenje i pražnjenje.....	24
4.2. Dinamička opterećenja kapaciteta.....	28
4.3. Električni modeli	29
4.3.1. Theveninov model	29
4.3.2. Model sa impedancijom	30
4.4. Modeli hibridne električne baterije	31
4.5. Čenov model baterije	32
5. REZULTATI I MJERENJE	33
5.1. Rezultati	34
5.2. Analiza rezultata.....	36

6. ZAKLJUČAK.....	40
7. LITERATURA	41
8. SAŽETAK.....	43
9. ŽIVOTOPIS.....	44

1. UVOD

Baterije, iako davno izumljene u današnjem svijetu se počinju vrlo intenzivno koristiti tako da možemo reći da još nismo na vrhuncu te iskoristivosti. Napredak tehnologije omogućiti će nam bolje performanse i širi raspon namjene. Baterija je u suštini prijenosni uređaj u kojemu je pohranjena električna energija. Sastoji se od pozitivnog pola i negativnog pola, te elektrolita koji nam daje/proizvodi energiju. U radu su navedene podjele baterija, vrste koje koristimo danas. Spomenute su primjene i način kako rade i što sadržavaju. Dalje se bazira na statičkim uvjetima koji karakteriziraju bateriju i dinamičkim. Predstavljene su modeli koji se koriste za ispitivanje dinamičkih opterećenja, te na kraju prikazani rezultati mjerenja i simulacije.

2. OPĆENITO O BATERIJI

U nastavku će se spomenuti karakteristike baterija, nešto malo o njihovoj povijesti, kako su nastale i navesti vrste baterija. Svaka vrsta baterija ima različite materijale izrade kao i karakteristike koje ovise o proizvodnji.

2.1. Povijest baterije

Uvijek je postojala misao o nekakvom skladištenju viška energije bilo dobivene ili proizvedene. Prvi put, davne 1749. godine se spominje riječ baterija od strane Benjamina Franklina koji ju je tako nazvao kako bi opisao međusobno povezane kondenzatore u sklop koje je tada koristio u svojim pokusima. Nakon Franklina, javnosti je postao poznat fizičar po imenu Luigi Galvani. Luigi je otkrio da se mrtva životinja (prilikom seciranja žabe) trza te to nazvao „životinjski elektricitet“ . 1800. godine Alessandro Volta, po kojemu i danas napon nosi mjernu jedinicu naziva Volt, otkrio je da se radi o posredniku između dva metala te prvi konstruirao pravu bateriju(galvanski članak) koju je karakteriziralo mala potrošnja u mirovanju, stabilna energija ali naravno da su bili prisutni i nedostaci poput curenja elektrolita i baterije su bile kratkog životnog vijeka. Kako je vrijeme odmicalo odvijali su se sve napredniji pokusi te su se pojavljivale sve naprednije baterije. 1859. godine pojavljuje se prva punjiva baterija od strane Gaston Plantea. Prva cink-uglična baterija izumljena je od čovjeka imena Sakizo Yai, ali je patentirana od strane njemačkog i danskog znanstvenika. To je bila takozvana „suha baterija“ koja za elektrolit nije imala tekućinu nego neki drugi medij.

4. Gustoća energije : količina energije koja se izračunava po masi odnosno jednom kilogramu mase. Izražava se u J/kg.
5. Samo pražnjenje : gubi se energija i kapacitet zbog kemijskog sastava i procesa.
6. C : struja koja se može isporučiti odstrane baterije. Odnosi se na udio u kapacitetu te se računa tako da ako je baterija vrijednosti 3 Ah, 1C predstavlja maksimalno 3 A struje.

2.3. Vrsta baterije

Baterije su podijeljene u dvije glavne skupine: primarne i sekundarne baterije. Sekundarne baterije označavaju baterije koje se mogu ponovo puniti, dok primarne baterije kada se jednom napune, taj proces nije moguće ponoviti. Navedeni su glavni predstavnici sekundarnih baterija jer se te baterije najviše koriste u današnjem svijetu. Primarne imaju i dalje značajnu, ali manju upotrebu u uređajima koji ne zahtijevaju velika opterećenja i ponovno punjenje.

2.3.1. Primarne baterije

„Jednostavno rečeno, primarne baterije su one baterije koje jednom iskoristite i više ih ne možete napuniti. Radi se o baterijama koje kada potroše svoje resurse postaju neupotrebljive i više nije moguće povratiti njihov kapacitet.“[3] Kemijska reakcija je jednosmjerna te se proces ne može obrnuti. U većini slučajeva prilikom ponovnog punjenja desi se da baterija eksplodira ili se zapali te može doći do izlivanja. Ova vrsta baterija je bila bolje izvedbe i izdržljivija nego sekundarne, imala je veću trajnost i relativno nisku cijenu. Kao problem se pokazalo zagrijavanje te sama ta jednokratna upotreba. Većinom se i dan danas koriste u nekim uređajima koji ne zahtijevaju ponovno punjenje i proizvodi sa izuzetno niskim cijenama. Ovu skupinu baterija podijelili smo u nekoliko grupa. To su : cink - ugljikove baterije, alkalne baterije, cink - klorid baterije i baterije bazirane na srebrovom oksidu. Najjednostavnija i najjeftinija izvedba ovih baterija su cink-ugljikove baterije koje su veoma rasprostranjene u današnjem svijetu. Lako se prepoznaju pomoću oznaka (D i C, AAA, AA) , gdje cink predstavlja anodu, katodu magnezijev dioksid, a elektrolite amonijev ili cinkov klorid. Što se tiče alkalnih baterija , one imaju puno veći kapacitet ali i nalaze se u višem cjenovnom rangu. Napon im je jednak vrijednosti 1.5 V, te su one najzastupljenije baterije iz ove grupe. Poboljšana verzija cink karbonskih baterija naziva se alkalne baterije i one imaju

veću snagu i duži period trajanja. Prah od cinka je anoda, katoda je magnezijev oksid, te je elektrolit od lužine i to većinom kalijev hidroksid.

2.3.2. Sekundarne baterije

Kada se govori o sekundarnim baterijama misli se na punjive baterije koje su nam poznatije pod nazivom akumulatori. Ponovno punjenje se odvija tako da se struja reverzibilno propušta kroz strujni krug te puni bateriju do gotovo maksimalnog početnog kapaciteta. Prilikom punjenja pazi se da punjenje bude energetske učinkovito, te da se produži životni vijek baterije smanjenjem fizičkih promjena. Sekundarne baterije, prema namjeni dijelimo u dvije grupe:

1. Baterije koje služe poput spremnika energije te su spojeni na izvor preko kojeg se pune. Energiju daju po potrebi pa su savršen izbor za vozila koji koriste električnu energiju, izvori energije koji zahtijevaju pričuvu te brzo ponovno podizanje sustava.

„2. Primjene u kojima su sekundarne baterije korištene kao primarni izvor energije i koriste se kao primarne baterije, ali se nakon korištenja ponovno pune.“[5]. Koriste se u razne svrhe, najčešće su to alati, elektronika koja se troši i u situacijama u kojima je povoljnije koristiti punjive baterije.

Punjive baterije se često izrađuju od takozvanih mokrih ćelija ili ćelija sa rastopljenom soli. Mokre ćelije kao elektrolit imaju tekućinu za razliku od suhih, te rade dobro pri visokim temperaturama.



Slika 2.2.: Baterije sa pripadajućim punjačem [20]

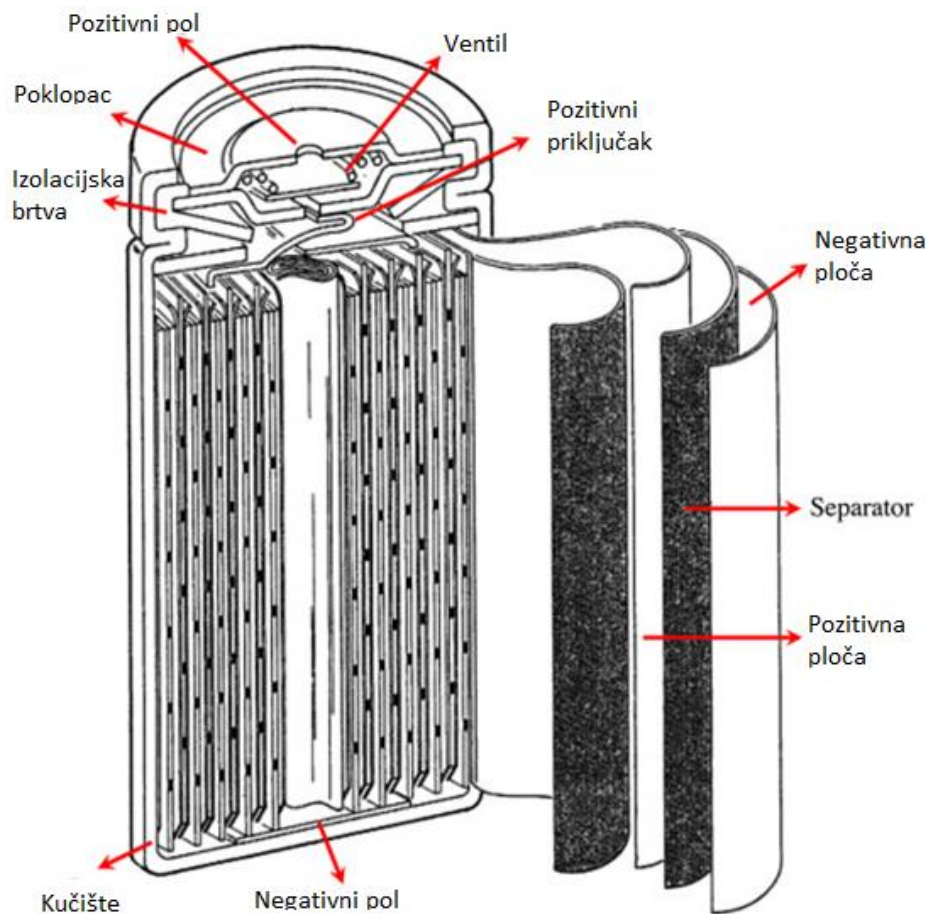
“ Najčešće korištene sekundarne baterija na tržištu su nikal - kadmij, nikal – metal – hidrid, olovne baterije i litij - ionske .“[4]

2.3.3. Nikal kadmij baterije

Nikal kadmijeve baterije nastale su 1899. godine u Švedskoj. Izumio ih je Waldmar Jungner, te je njihova upotreba bila ograničena do 1932. godine zbog visokih troškova. Tek 1947. godine dolazi do značajnog napretka i stvaranja zapečaćene baterije bez održavanja. Što se tiče principa rada, nikal kadmij baterije „, proizvode električnu energiju zbog reverzibilne interakcije kadmija s nikal oksid - hidroksidom i vodom, što rezultira stvaranjem nikal hidroksida i kadmij hidroksida, što uzrokuje pojavu elektromotorne sile. Ni-Cd baterije se proizvode u hermetički zatvorenim kućistima koji sadrže elektrode odvojene neutralnim separatorom.“[6]. Negativnu elektrodu sačinjava čelična mreža sa kadmijem koji je prešan, dok pozitivnu elektrodu čini folija koja je prekrivena tvarima poput nikla – oksida – hidroksida koji je pomiješan sa materijalom koji ima svojstvo vodljivosti. Većinom isporučuju napon u vrijednosti oko 1,2 V. Ni-cd baterije pronalazimo u različitim proizvedenim oblicima kao što su hermetički oblik, disk i dr. Ova vrsta baterija koristi se u uređajima koji zahtijevaju veliku struju i sa velikim opterećenjima. Najbolji primjeri primjene su u tramvajima, električnim automobilima, avionima i helikopterima, te nekakvim manjim uređajima kao što su uređaj za brijanje, radio stanice, električnim alatima i sl. U današnje vrijeme zbog utjecaja na okoliš nastoji se smanjiti proizvodnja i uporaba ove vrste baterija. Kao prednosti se ističu dug životni i radni vijek, izdržavanje velikih opterećenja, nizak trošak, te velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja. Nedostatci nisu toliko izraženi, ali su vidljivi prilikom korištenja. Glavni nedostaci su: nekoliko ciklusa punjenja i ispražnjivanja kako bi se postigao puni kapacitet, izraženo samo pražnjenje pri skladištenju, veća masa i velika toksičnost kadmija prilikom nepropisnog odlaganja.

2.3.4. Nikal - metal-hibrid baterije (NiMH)

“Nikal metal - hibridna baterija punjiva je baterija koja je sastavljena od nikla i vodikovih iona. Ima otprilike 30% više prostora za skladištenje energije od nikal - kadmij baterije. Lakše su od nikal - kadmij baterija, ima duži vijek trajanja i nije štetno po okoliš“[7]. Osim toga, očituje se dobra stabilnost, visoka stopa punjenja i pražnjenja, te široka upotreba. Ova vrsta baterija ima efekt pamćenja. „Dubokim pražnjenjem punjive baterije od nikal – metal - hibrida otprilike svaka tri mjeseca može se učinkovito ublažiti efekt pamćenja.“ [7]. Najčešće se koriste u medicinske svrhe i u kućanstvu za razno razne stvari koje ne zahtijevaju nekakvu specijalnu izvedbu i tehnologiju.



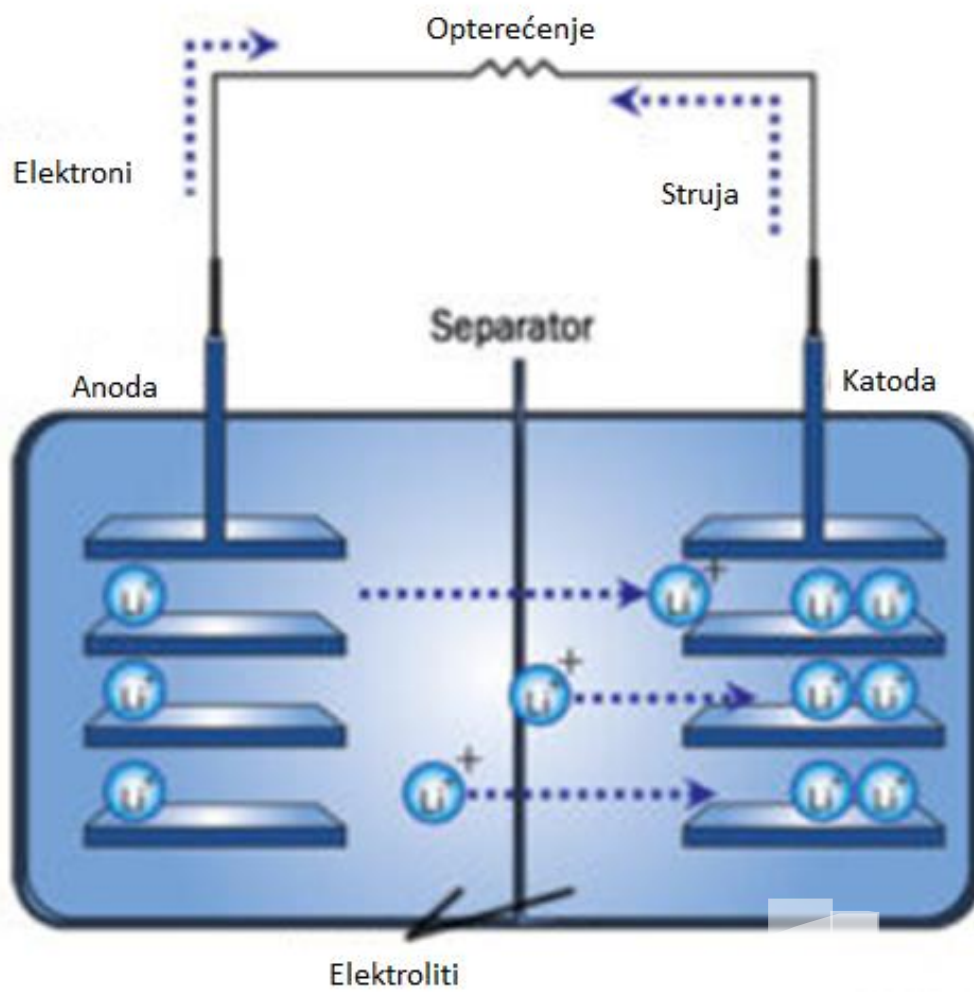
Slika 2.3.: Nikal-metal-hibrid baterija [18]

2.3.5. Olovne baterije

Kod baterija s olovnom kiselinom, „elektroda je uglavnom napravljena od olova, a elektrolit je vrsta skladišne baterije otopine sumporne kiseline. Reprezentativni simbol olovne baterije je Pb-A ili LA, gdje Pb označava olovo u periodnom sustavu elemenata, L je prefiks engleske riječi za olovo, A je prefiks engleskog imena za kiselinu“[8]. Olovne baterije su vrlo široko rasprostranjene upravo zbog jednostavnosti njihove izvedbe i proizvodnje. Nisu financijski ne pristupačne za proizvode kojima se koriste i omogućavaju gotovo najveće i najduže napajanje na tržištu. „Jedan od najvažnijih izuma bio je zapečaćenje pločaste elektrode C. Faurea 1881. godine. To je uključivalo zamjenu čvrstih metalnih negativnih elektroda pastom od finih čestica sadržanih u olovu ili rešetki od olovne legure. Radeći to, površina reakcije se znatno povećava. Još jedan značajan napredak bio je razvoj zapečaćenih stanica tijekom posljednjih nekoliko desetljeća. To se ponekad naziva ventilom regulirana tehnologija olovne kiseline(VRLA).“[9]. Ventilom regulirana tehnologija olovne kiseline „radi na principu rekombinacije kisika korištenjem elektrolita. Rekombinaciju kisika omogućuje ventil za regulaciju tlaka koji je tijekom normalnog pogona zatvoren, a nakon porasta tlaka, otvara se ispuštajući plinove.“ [4]. Olovne baterije podijeljene su u četiri vrste: prijenosne, stacionarne, vučne i SLI (eng. Starting - lightingignition) baterije. Stacionarne baterije većinom se koriste kao izvori u kojima ne smije doći do prekida i najčešće u telekomunikaciji. Prijenosne baterije su malih veličina i lagane pa se koriste u raznim alatima i uređajima. Vučne baterije korisne su u električnim pogonima poput industrijskih mašina. Dok su SLI baterije najrasprostranjenije u automobilskoj industriji. Rade u uvjetima niske temperature i nije im potrebno puno održavanja.

2.3.6. Litij ionske baterije

Litij ionske baterije su baterije novije baterije od dosad navedenih. Kako je znanje napredovala i tehnologija, došlo je do pojave litija u današnjim baterijama koji je omogućio veliki elektrokemijski potencijal. Dobile su naziv „jer litijevi ioni prelaze s negativne elektrode anode na pozitivnu katodu prilikom procesa pražnjenja i obrnuto, s pozitivne na negativnu prilikom procesa punjenja.“[10]. Svi elementi se nalaze u elektrolitu koji je zaslužan za gibanje iona, dok se u sredini nalazi separator koji je pregrada dvaju elektroda. Ovakve baterije imaju jako malo nedostataka gdje se kao glavni ističe visoka cijena, dok se kao prednost pokazuju velika gustoća energije, malo samo pražnjenje, ne postoji efekt pamćenja, jako mali unutarnji otpor i sl. Litij ionske baterije smo podijelili u nekoliko skupina od kojih su se 3 pokazale ne baš najboljim izborom, te kao takve ostale zapamćene po lošim karakteristikama. Litij – kobalt - oksid, litij – mangan - oksid i litij – titan - oksid, od kojih je LMO najpoznatija i koja je slijedila rušenju ugleda drugima. Ostale 3 vrste su se pokazale kao bolji izbor a to su: litij-željezo-fosfatne baterije ili litijev ferofosfat baterije (LFP baterije), NCA (litij-nikal-kobalt) baterije i NMC baterije(nikal-mangan-kobalt). Litij-željezo-fosfatne baterije su baterije koje ne sadrže rijetke metale, nisu zapaljive, dugotrajne su i imaju vrlo nisku cijenu. Većinom se koriste u Kini kod raznih proizvođača i u standardnim modelima Tesle. Druge baterije su NCA baterije koje se mogu pronaći isto kod proizvođača Tesla automobila kao njihove baterije. Skuplje su oko 40% od FPA baterija, lagane su, velikih gustoća i relativno zapaljive. Treća vrsta se naziva NMC baterije koje u sebi sadrže nikal kobalt i mangan. Većinom su to litij ionske baterije. Koriste se u Europi i Koreji, vrlo slične NCA baterijama.



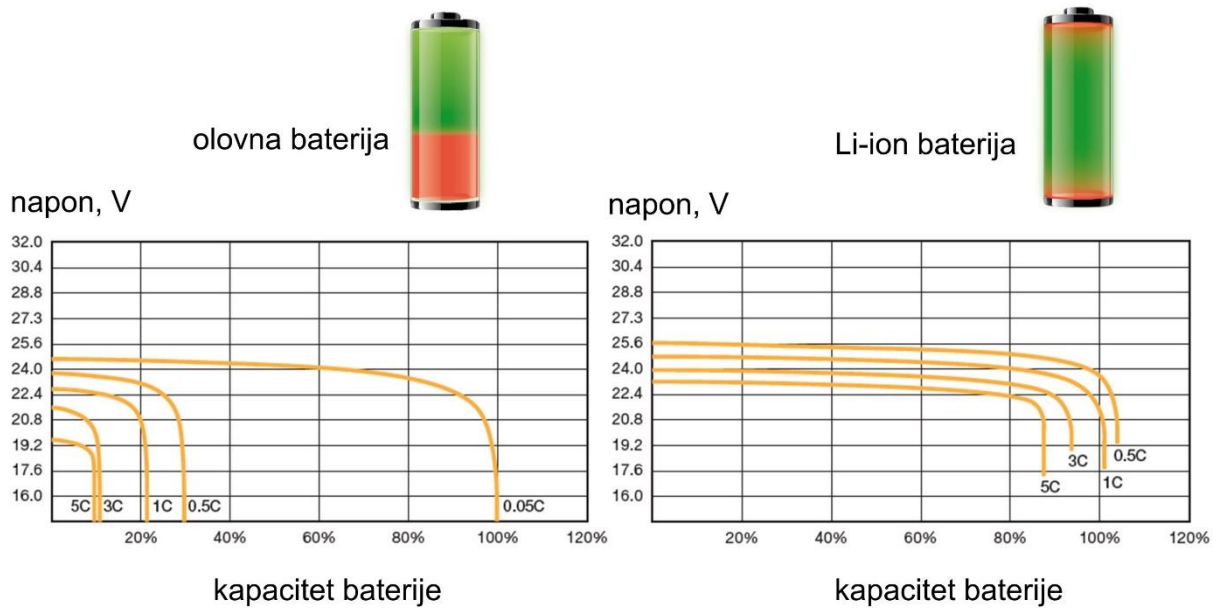
Slika 2.4.:Mehanizam pražnjenja litij ionske baterije [17]

3. STATIČKE KARAKTERISTIKE

Kao što sama riječ kaže statičke karakteristike baterije označavaju glavne karakteristike baterije koje se ne mijenjaju sa vremenom nego se odnose na njeno trenutno stanje. Prilikom zanimanja i želje za informiranjem poznate su neke odlike baterije koje određuju vrstu i namjenu. To su napon, kapacitet, unutarnji otpor, gustoća energije i samopražnjenje. Svaka vrsta baterija može imati različite vrijednosti navedenih karakteristika zbog različitog načina rukovanja i proizvodnje, kao i napretka znanja i tehnologije.

3.1. Napon baterije

Napon baterije prikazuje karakteristika koja se odnosi na električni potencijal između negativnog i pozitivnog pola. U nekim baterijama napon ne odgovara zahtjevnom naponu te se uslijed proizvodnje povezuju više baterija odnosno ćelija kako bi se doveo veći napon, što je slučaj kod akumulatora. Nazivni napon se malo teže mjeri, ali se može bolje aproksimirati za praktične sustave. Granični napon označava granicu do koje se baterija može ispraznit bez ikakvog nastalog oštećenja. Ovisi od baterije do baterije odnosno vrste, brzine pražnjenja i njezinoj temperaturi.



Slika 3.1.: Zavisnost napona i kapaciteta o struji pražnjena Li-ion baterije i olovne baterije [16]

3.2. Kapacitet baterija

Kapacitet baterije predstavlja mjeru napunjenosti za pohranu baterija. Izražava se u Ah, te označava masu aktivnog materijala sadržanog u bateriji. Kapacitet kao takav je maksimalna energija koja se može dobiti iz baterije u određenim uvjetima. Prave vrijednosti kapaciteta baterije se razlikuju od nominalnog jer ovise o starosti baterije, održavanju, načinima punjenja i pražnjenja i temperaturi. Kapacitet baterije, odnosno pohranjena energija se većinom mjeri u vat satima (Wh), kilovat satima (kWh) i amper satima (Ah) . Za mjeru kapaciteta najčešće se upotrebljava Ah koji prikazuje broj sati u kojima baterija pruža struju pri nazivnom naponu baterije. Čimbenici poput punjenja i pražnjenja utječu na kapacitet baterije kao što utječe i temperatura. Potpunim pražnjenjem, iako je to gotovo nemoguće, ispitujemo kapacitet kroz jedinicu vremena. Pri visokim temperaturama kapacitet baterije se povećava, ali i smanjuje

dugotrajnost baterije. Kapacitet se smanjuje prilikom učestalog brzog punjenja i pražnjenja baterije, dok se povećava sa sporim.

3.3. Unutarnji otpor baterija

Statička karakteristika koja ukazuje na sposobnost otpuštanja električne energije ili drukčije rečeno nekakvu struju pražnjenja baterije. Označava otpor na protok struje koja protječe unutar baterije, te može utjecati na ostale čimbenike poput napona i pražnjenja baterije. Ukoliko je potrebna veća snaga baterije, otpor treba biti sto manji da bi se to postiglo. Manji otpor je poželjan, te se općenito mijenja s vremenom i stanjem baterije.

3.4. Gustoća baterijske energije

Količina energije pohranjene u određenom djelu prostora ili mase tvari se definira kao gustoća energije. To je električna energija koju oslobađa prosječna jedinica mase ili volumena baterije. Kao takvu, gustoću energije baterije dijeli se u dvije veličine: težina baterijske gustoće energije = baterijski kapacitet \times dio za pražnjenje / težina, jedinica je Wh/ kg (vat sat / kg) i volumenska gustoća energije baterije = baterijski kapacitet \times platforma za pražnjenje / volumen, gdje je jedinica Wh / L (vat sat / litra). Sa većom gustoćom energije baterije, više je pohranjeno električne energije po jedinici težine i volumena. Kemijski sastav baterije, odnosno vrsta i tip proizvedene baterije ovisi o gustoći energije. Osim kemijskoga sastava, na bateriju utječe i proizvodni proces. Većom gustoćom zbijanja glavnog materijala postiže se veći kapacitet baterije. Kako bi se povećala gustoća baterije za sada ne postoji bolji način i jednostavniji, nego se proizvode baterije većih razmjera kao sto su u električnim automobilima, te im se mijenja kemijski sastav.

3.5. Samo pražnjenje

Kao što riječ govori dolazi do spontanog pražnjenja baterije, kada trošilo nije spojeno. To se događa uslijed nekorištenja, te često za posljedicu ima smanjenje vijeka baterije. U početku baterije imaju manje punjenje nego kasnije, dok se ne dosegne određena razina. Kako bi se to postiglo potrebno je izvršiti nekoliko ciklusa punjenja i pražnjenja do određene razine kako se ne bi štetilo bateriji. Na brzinu samopražnjenja u današnjem svijetu utječe nekoliko čimbenika od kojih su najčešći nečistoća i temperatura. Osim njih utječe i vrsta same baterije, struja punjenja, električna energija i kemijske reakcije. Litij ionske baterije općenito imaju najmanje samopražnjenje koje iznosi oko 2-3% mjesečno, što im omogućava životni vijek od preko 10 godina.



Slika 3.2.: Usporedba broja ciklusa Li-ion i olovne baterije [16]

4. DINAMIČKI MODEL

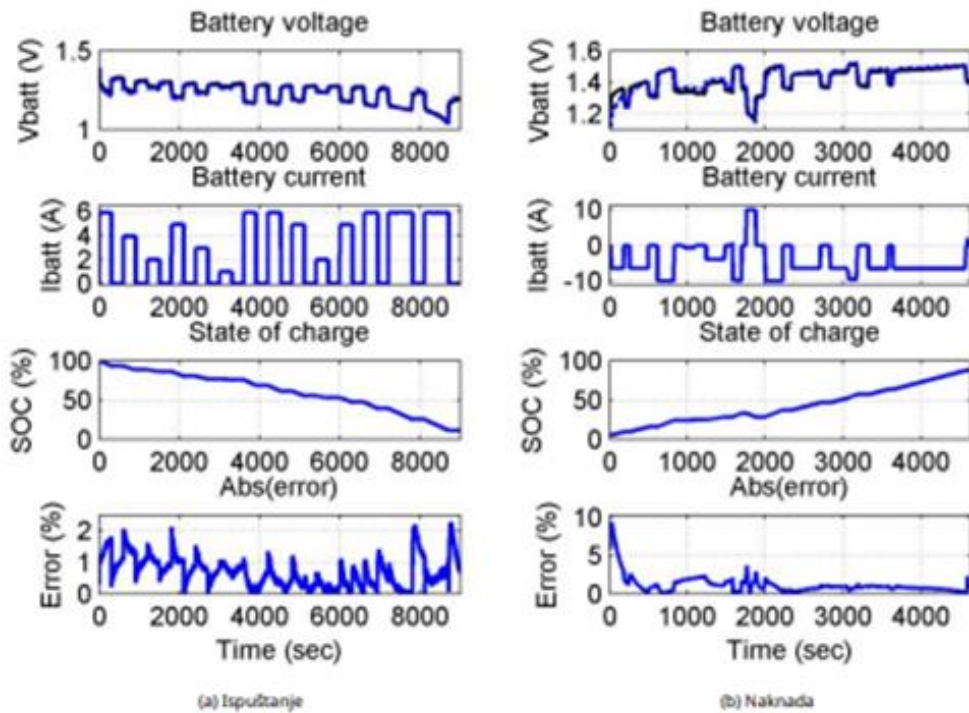
„Dinamički modeli pružaju uvid u stanja baterije i omogućuju korištenje sistemskih alata za identifikaciju optimalnih konfiguracija i putanja baterije. Ovi modeli trebaju biti dinamični kako bi uzeli u obzir vremenske promjene varijabli stanja u ćeliji, daju uvid u spore i brze procese.“[11]. Dinamičke karakteristike baterija u novom dobu znače puno zbog toga što se svakodnevno koriste u uređajima poput pametnih telefona, električnih vozila i sl. Nije ujednačeno pražnjenje i punjenje, također snaga potrebna kroz vrijeme stoga se ispituju baterije na dinamička opterećenja. Razlog ispitivanja je pristup kako bi se dobile vrijednosti koje bi pospješile postojeće nedostatke baterija te kako bi se izvršila daljnja optimizacija i tehnološki napredak baterija koje se koriste dinamično. Najčešće se koriste eksperimentalne metode utvrđivanja a tako i mjerne metode pomoću softverske podrške.“ Većina studija o dinamičkom radu baterije i procjeni stanja su na razini sustava. Obično sadrže sofisticiranu matematičku analizu i alate za procjenu, ali minimalno uzimaju u obzir procese i materijale u baterijama. Spajanje stručnjaka za baterije sa stručnjacima za sustave omogućit će povećanu upotrebu znanja o procesima i dinamici baterija za pouzdaniji i štedljiviji rad baterije. Nadalje, poznavanje zahtjeva i ograničenja ćelija u pogledu stabilnog, dinamičkog rada koristiti će stručnjacima za ćelije i materijale jer im omogućuje da svoje ćelije prilagode za veće dinamičke performanse.“[11]. Modeli koji opisuju sve dinamičke procese nisu izvedivi ni upotrebljivi, uvijek moraju bit prilagođeni svrsi namjene.

4.1. Dinamičko punjenje i pražnjenje

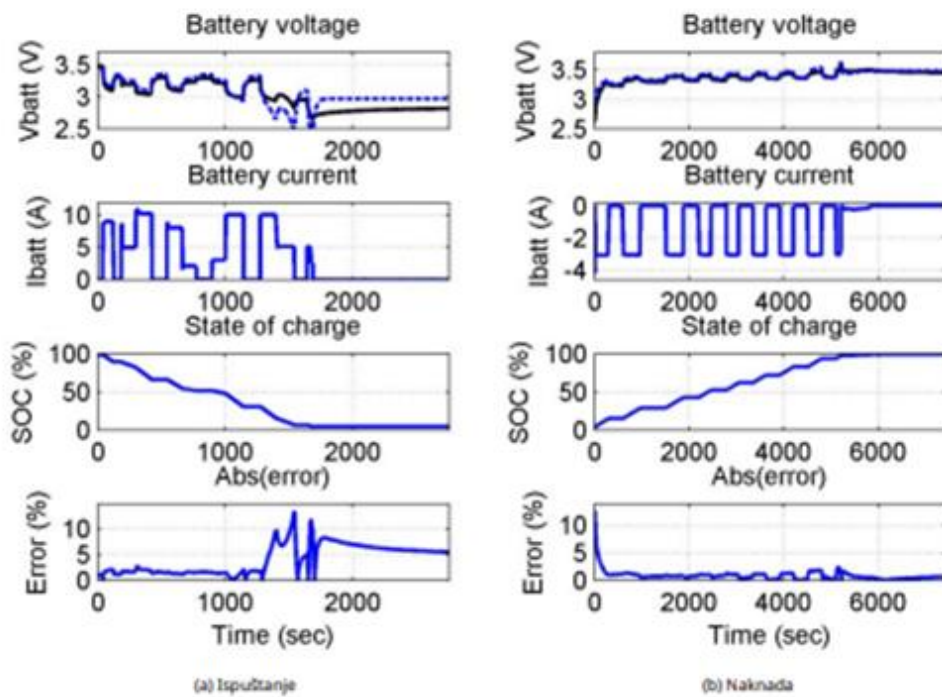
Dinamičko punjenje i pražnjenje jako je bitan čimbenik kod baterije. Može ovisiti o brzini reakcije i o sigurnosti samog sustava, te ostalom djelovanju koje može izazvati. Iako se najčešće koriste litij ionske baterije, druge izvedbe nisu izostavljene. Brzina punjenja i pražnjenja ovisi o vrsti te jačini baterije, što se vidi u tablici 4.1. i na slikama 4.1. – 4.5.

Tablica 4.1.: Parametri baterije [12]

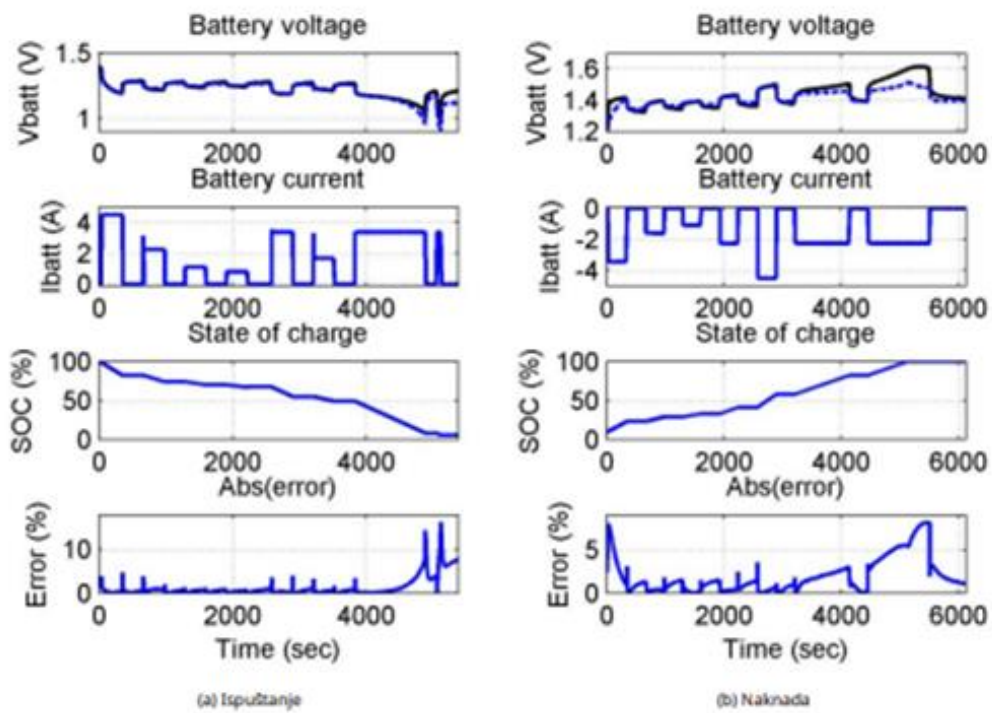
Tip Parametri	Voditi- Kiselina 12V 7.2Ah	NiCd 1.2V 2.3Ah 3.3V 2.3Ah	Li-Ion 1.2V 6.5Ah	NiMH
$E_0(V)$	12.4659	<u>1.2705</u>	3.366	<u>1.2816</u>
$R(\Omega)$	0,04	0,003	0,01	0,002
$K(\Omega \text{ ili } V/(Ah))$	0,047	0,0037	0,0076	0,0014
$A(V)$	0,83	0,127	0,26422	0,111
$B(Ah)$	125	4.98	26.5487	2.3077



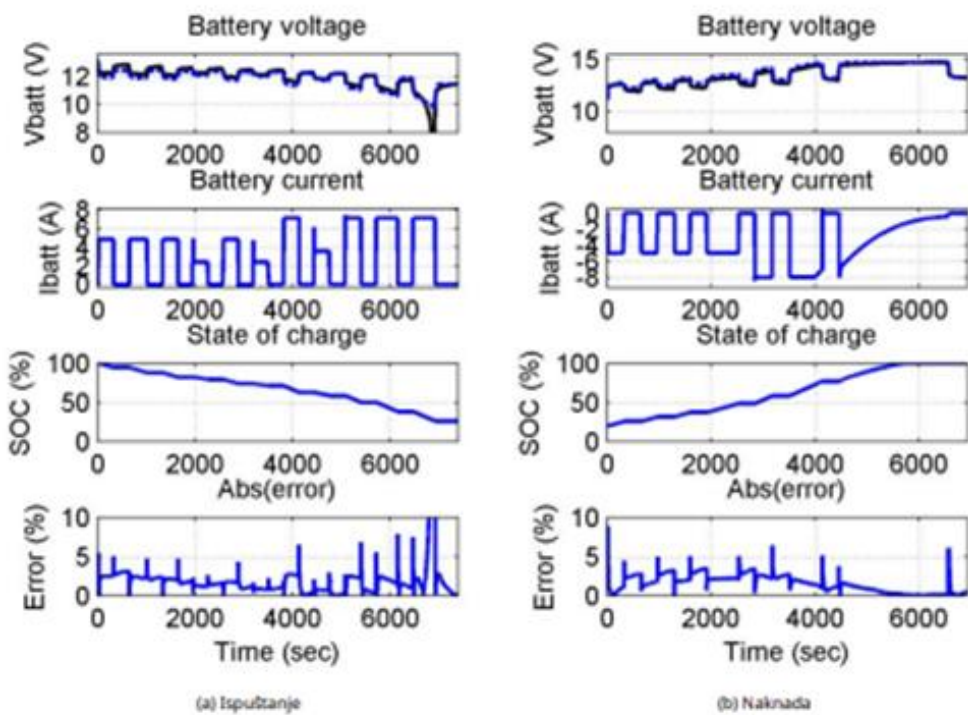
Slika 4.1.: Dinamičko punjenje i pražnjenje NiMH baterije od 6,5 Ah i 1,2 V [12]



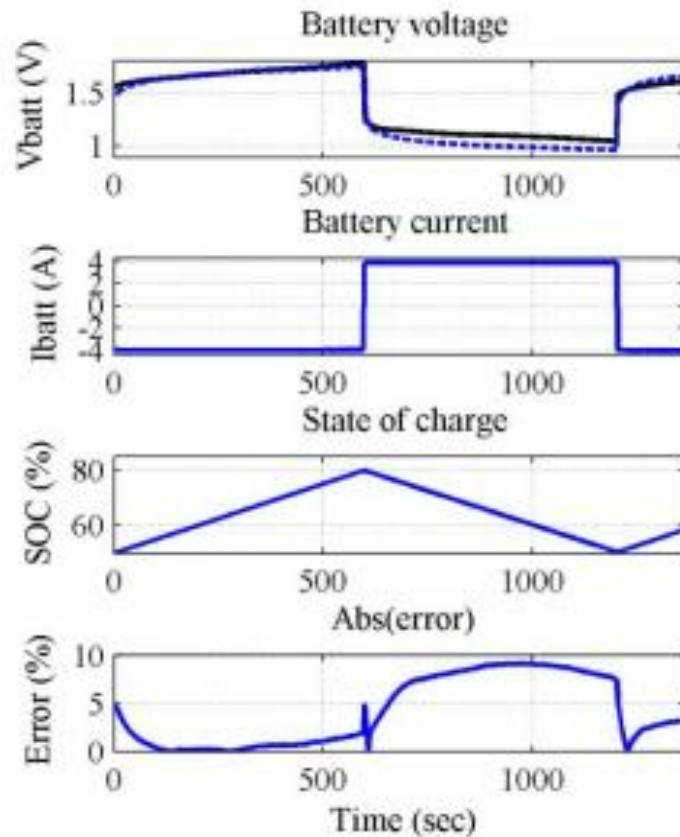
Slika 4.2.: Dinamičko punjenje i pražnjenje Li-ion baterije od 2,3 Ah i 3,3 V [12]



Slika 4.3.: Dinamičko punjenje i pražnjenje NiCd baterije od 2,3 Ah i 1,2 V [12]



Slika 4.4.: Dinamičko punjenje i pražnjenje olovne baterije od 7,2 Ah i 12 V [12]



Slika 4.5.: Dinamičko punjenje i pražnjenje NiMH baterije od 2,0 Ah i 1,2 V [12]

„Ova eksperimentalna validacija pokazala je da čak i ako se parametri modela izvlače iz stabilnog stanja krivulje, moguće je točno simulirati (greška unutar $\pm 5\%$) dinamičko ponašanje baterije za proces punjenja i pražnjenja. Valjanost glavnog modela je uključena između 100% i 20 % SOC za NiMH, NiCd i Li-Ion baterije i između 100 % i 30 % za olovno-kiselinski akumulator jer Peukert efekt nije modeliran. Također, ponašanje modela kada se struja naglo mijenja od punjenja do pražnjenja koherentno je s eksperimentalnim rezultatima. Konačno, model dobro predstavlja fenomen histereze za NiMH bateriju (model također predstavlja učinak za NiCd bateriju i mali učinak koji se pojavljuje s olovno-kiselim akumulatorom).“[12]

4.2. Dinamička opterećenja kapaciteta

„Gubitak kapaciteta/propadanje je pojava koja se opaža kod upotrebe punjivih baterija gdje se količina napunjenosti koju baterija može isporučiti pri nazivnom naponu smanjuje s uporabom. Općenito, smatra se da je baterija upotrebljiva sve dok ne dostigne 80% svoje osnovne granice. Nuspojave i postupci smanjenja vrijednosti mogu potaknuti različite neželjene učinke, uzrokujući ograničenu nesreću u baterijama s litijevim česticama. Redovito se starenje događa zbog brojnih nepredvidivih stvari i reakcija koje se cijelo vrijeme događaju na boljim mjestima u bateriji, a stopa kvarenja varira između određenih faza usred ciklusa, ovisno o potencijalu, fokusu susjedstva, temperaturi i smjeru trenutne struje.“[13]. Događa se starenje materijala, a miješanje materijala mogu ubrzati starenje. Predviđa se vijek baterije prilikom kojeg se u obzir mora uzeti i utjecaj temperature, ali i pojavu nesreće. „Element za podešavanje granice može se definirati kao:

$$CCF = 1 - (\text{Kalendarski životni gubici} + \text{ciklusni životni gubici}) \quad (4-1)$$

Tada se preostali iskoristivi kapacitet baterije može definirati kao:

$$\text{Upotrebljivost} = C \text{ inicijalni} \times CCF \quad (4-2)$$

Do gubitaka pohrane dolazi kada je baterija neaktivna. Njegova se jednadžba može napisati kao:

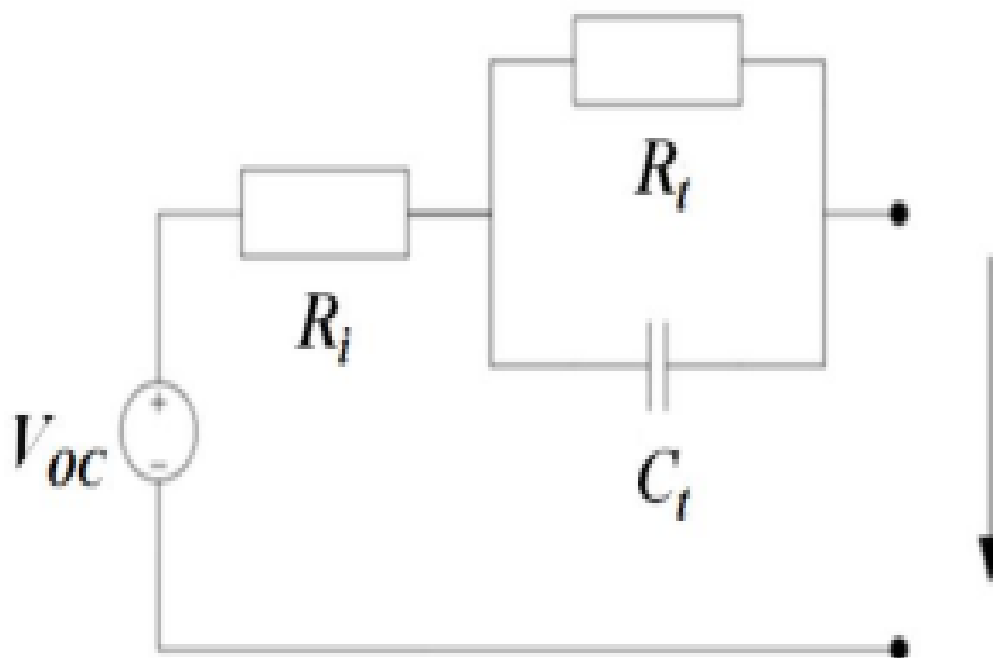
$$\% \text{ gubitka pohrane} = 1.544 \cdot 10^7 \cdot \exp(40498 / (8.3143 \cdot T)) \cdot t \quad (4-3)$$

Gdje je temperatura T u Kelvinima.“[13]

4.3. Električni modeli

4.3.1. Theveninov model

Theveninov model koji predviđa ponašanje baterije sastoji se od mreže koju čine izvor napona, V_{oc} , serijski otpornik, R_i , i paralelna mreža otpornik-kondenzator (RC), R_t i C_t što je prikazano na slici.



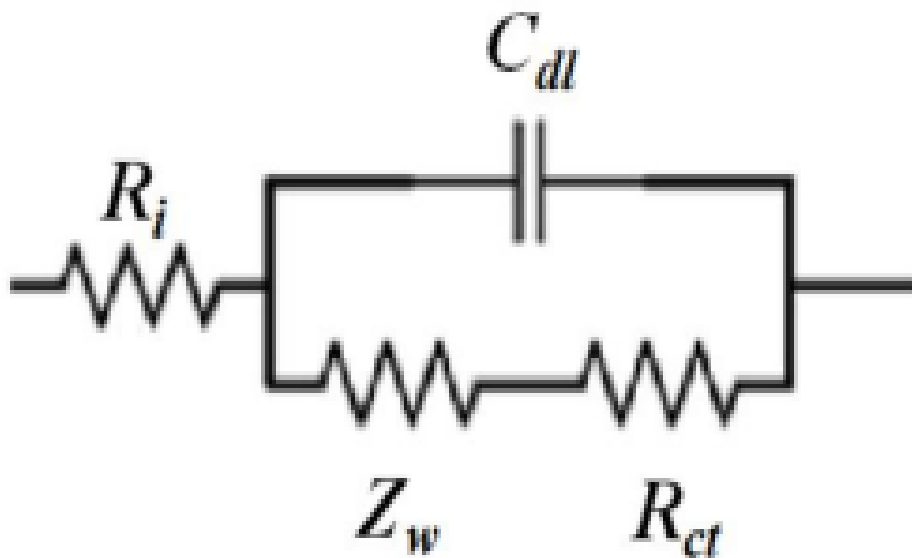
Slika 4.6.: Theveninov krug sa elementima [14]

R_t otpor predstavlja baterijsku polarizaciju, tj. odstupanje između napona otvorenog kruga i napona na terminalu kao rezultat struje punjenja i pražnjenja. „Theveninovi električni modeli koriste eksperimentalne podatke baterijskih ćelija za izradu tablica pretraživanja svakog parametara u krugu. Ograničenje električnih modela Thevenina je zahtjev za eksperimentalne podatke za utvrđivanje potrebnih RC parametara korištenih u modelu. Theveninovi električni modeli obično imaju jednu ili dvije RC mreže kako bi broj parametara bio mali koji se moraju izdvojiti iz eksperimentalnih podataka; međutim, može se dodati više mreža za modele drugih

efekata.“[14]. Većinom se preko Theveninova modela određuje točnost izlaznog napona na temelju povlačenja struje.

4.3.2. Model sa impedancijom

Za modele sa impedancijom kao reprezentant se uzima Randleov model koji opisuje ponašanje baterije. On sadrži komponente Z_w -koncentracijska polarizacija, R_{ct} -aktivacijsku polarizacijski otpor, R_i -omski otpor i C_{dl} -dvoslojni kapacitet. Događa se razdvajanje litija na ione litija i elektrone preko procesa ionizacije uslijed utjecaja aktivacijskog polarizacijskog otpora na prijenos naboja baterije.

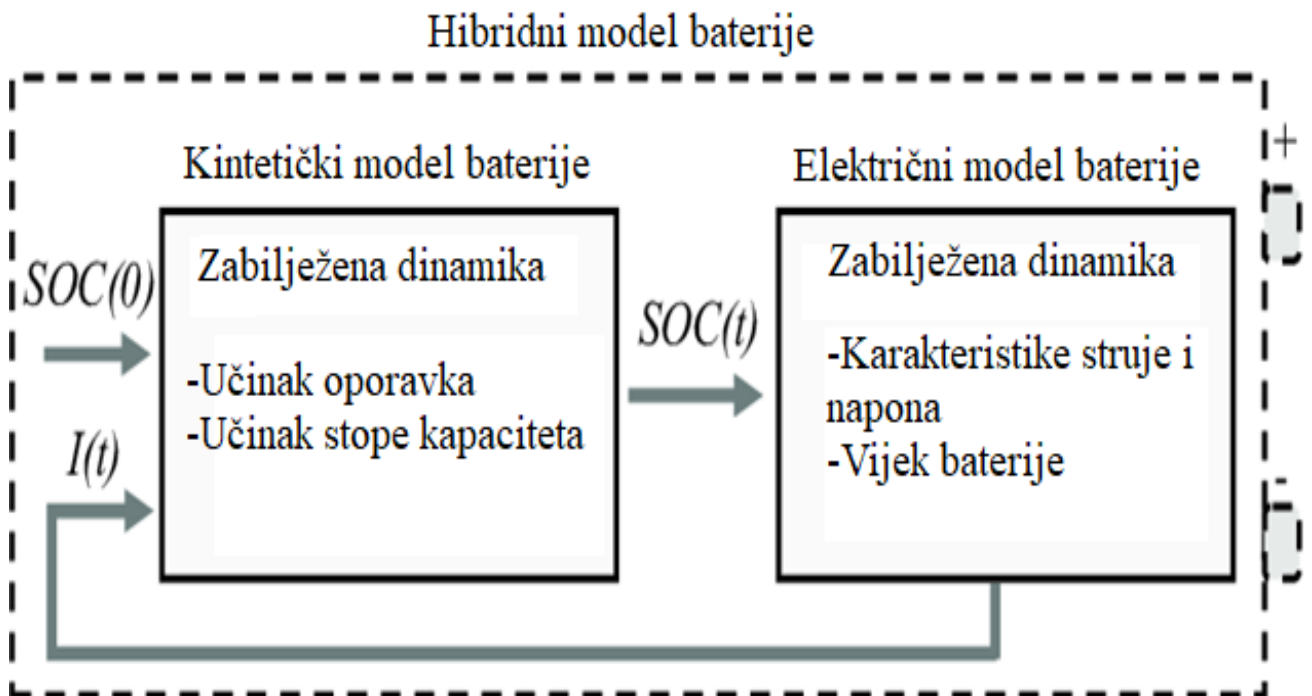


Slika 4.7.: Randleov model baterije [14]

„Modeli impedancije obično koriste metodu poznatu kao elektrokemijska impedancija. Randleov krug sadrži omski otpor, R_i , aktivacijsku polarizaciju spektroskopija (EIS) za prikupljanje eksperimentalnih podataka. U EIS metodi, impedancija baterije mjeri se pomoću frekvencijskog odziva sinusoidnog ulaza. Rezultirajući izlazni odgovor ovisi o impedanciji baterije. EIS podaci predstavljeni su Nyquistovim ili Bodeovim grafom.“[14]

4.4. Modeli hibridne električne baterije

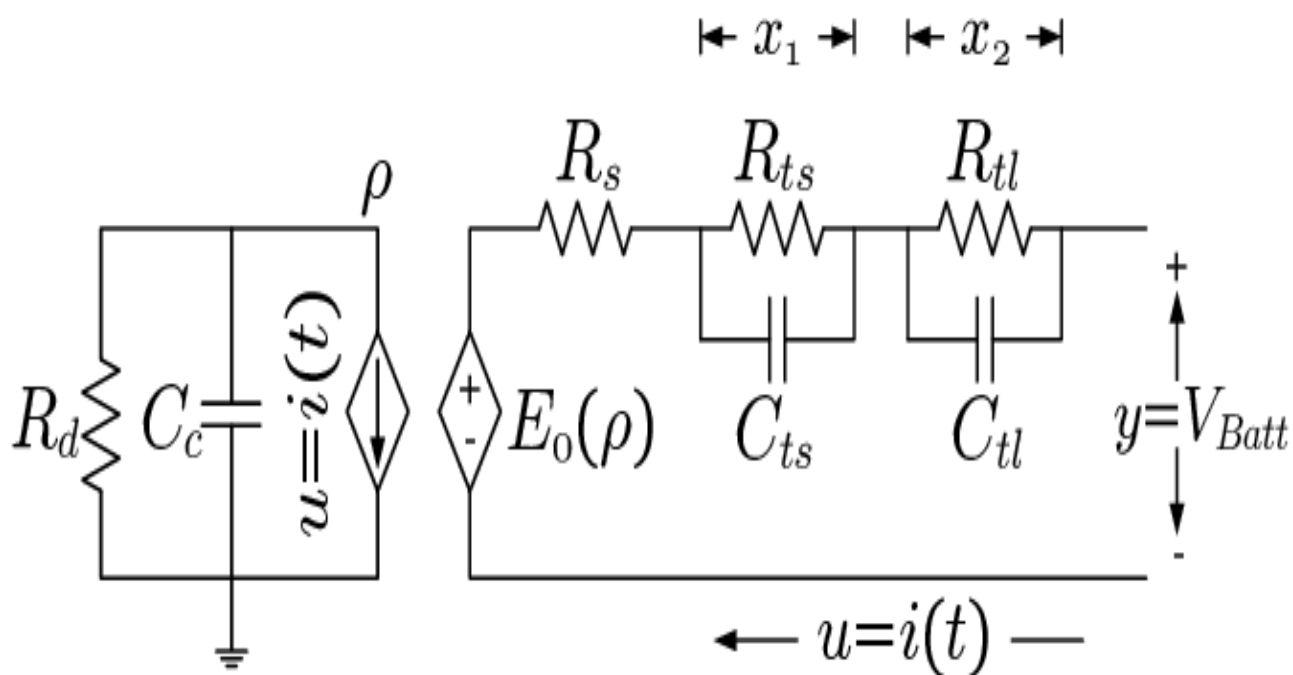
Ovaj model baterije predstavlja hibrid između električnih i elektrokemijskih modela. Sastoji se od jedne baterijske ćelije i najveći uzrok promjenama je utjecaj temperature. Temelj ovog modela su karakteristike pražnjenja i pomoću njih se očitavaju vrijednosti. Eksperimentom je dokazano da se ova vrsta modela podudara sa tehničkim listom koji daje proizvođač ali ne i koliko. Problem je što tokom niske temperature i pri visokom protoku očitani podaci ne mogu dati točne vrijednosti.



Slika 4.8: Model hibrid električne baterije

4.5. Čenov model baterije

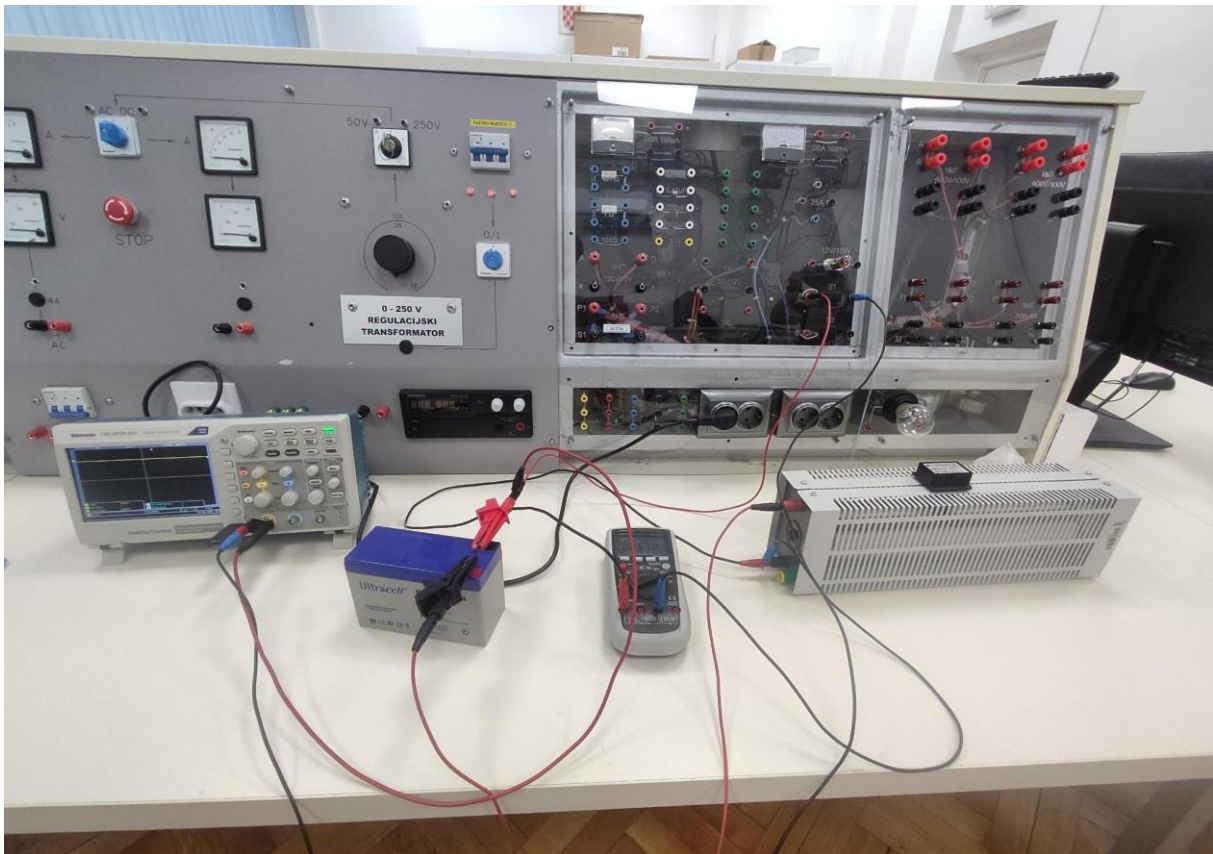
Min Chen „predstavlja model električne baterije koji modelira dinamičke karakteristike baterija. Chenov model predlaže kombinaciju Theveninovog modela ekvivalentnog kruga, modela impedancije i modela temeljen na vremenu izvođenja.“[14]. Chen je mjerio podatke na temelju napunjenosti baterije. Pokus se pokazao izuzetno točan s malim odstupanjem, ali nije prihvaćen u potpunosti. U modelu nije koristio čimbenike poput temperature i broja ciklusa te model nije bio održiv. Kasnije dolazi do raznih modifikacija ove vrste modela od strane drugih ljudi.



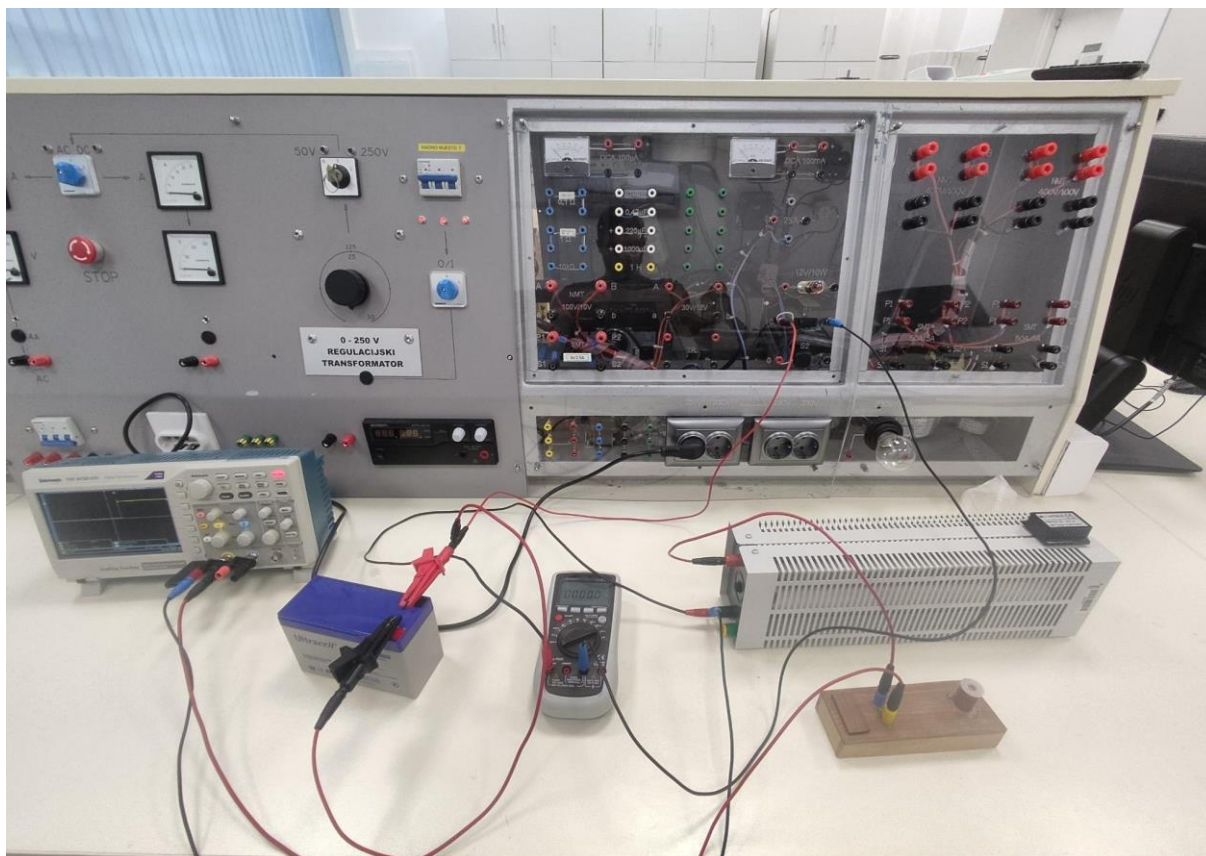
Slika 4.9.: Čenov model baterije [15]

5. REZULTATI I MJERENJE

Prilikom izvođenja pokusa dinamičkog pražnjenja baterije korištena je olovna punjiva baterija napona 12 V i kapaciteta 7 Ah. Na digitalnom multimetru izmjeren je „stvarni“ napon od 13,036 V koji smo spojili na pomični otpornik maksimalne vrijednosti 10 Ω . Osim na multimetru, mjerenje je izvršeno i na osciloskopu te su podatci poput napona i indukcije snimljeni. Mjerena je struja koja se koristila, naknadno je ubačena i zavojnica kako bi dobili različite rezultate te mogli usporediti i analizirati dinamičke uvjete i njihov utjecaj na bateriju. Na slici 5.1. i 5.2. vidimo kako su elementi strujnog kruga bili spojeni i mjereni u tom trenutku. Korištena je i jedna sklopka koja je služila za brzo isključivanje i uključivanje kako bi bolje zabilježili signal.



Slika 5.1.: Izgled cjelokupnog pokusa mjerenja bez zavojnice



Slika 5.2.: Izgled cjelokupnog pokusa mjerenja sa zavojnicom

5.1. Rezultati

U različitim vremenskim intervalima, mijenjana je vrijednost otpora i u tim trenucima zabilježena grafička vrijednost napona. Osim napona prikazane su i vrijednosti struje koja opada gdje je uočljivo samopražnjenje baterije. Vrijednost napona je dobivena računskim putem pomoću formule 5-1.

$$U = I \times R \quad (5-1)$$

Tablica 5.1.: Rezultati očitanih i izračunatih vrijednosti pokusa bez zavojnice

Mjerni broj mjerenja	Napon (V)	Napon Računski dobiven (V)	Struja (A)	Otpor (Ω)	Vremenski pomak očitavanja struje (s)	Nova očitana vrijednost struje kao prikaz samopražnjenja (A)
1.	12,785	12,730	1,273	10	180	1,140
2.	12,530	12,518	1,669	7,5	300	1,639
3.	12,441	12,470	2,150	5,8	180	1,132
4.	12,342	12,377	2,526	4,9	120	2,503
5.	12,296	12,000	4,000	3	120	3,979

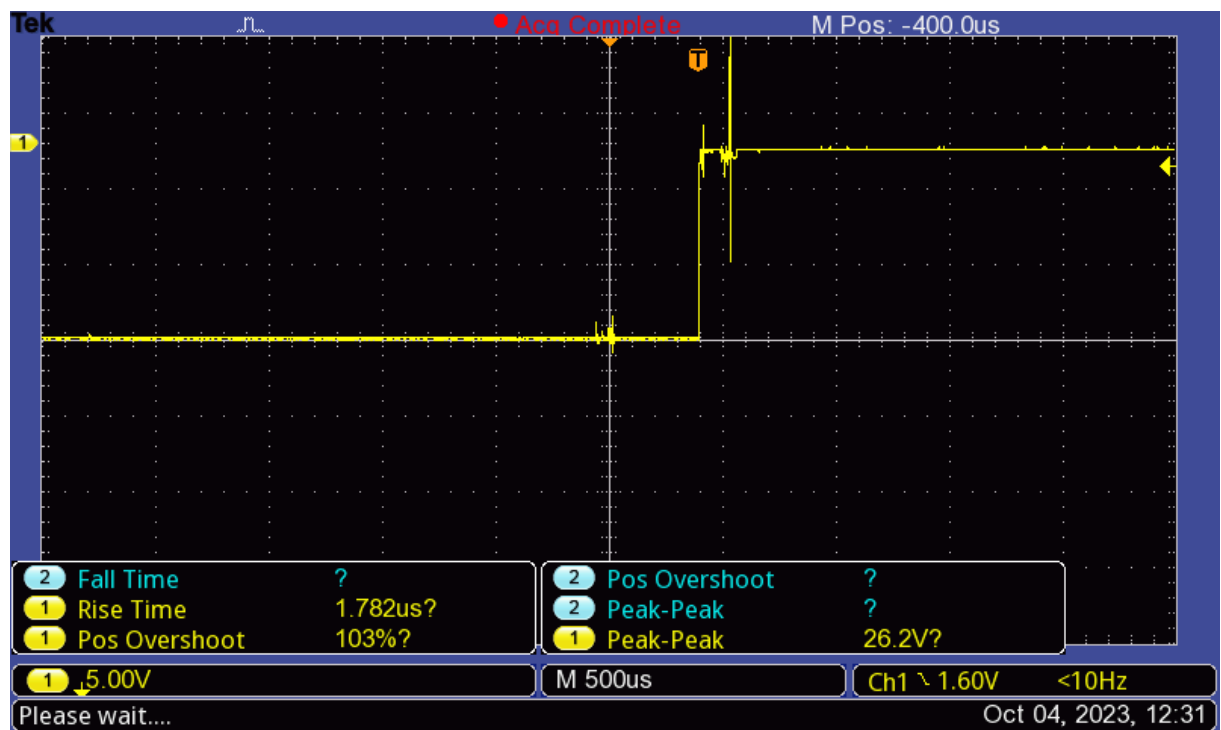
Tablica 5.2.: Rezultati očitanih i izračunatih vrijednosti pokusa sa zavojnicom

Mjerni broj mjerenja	Napon (V)	Struja (mA)	Otpor (Ω)	Vremenski pomak očitavanja struje (s)	Nova očitana vrijednost struje kao prikaz samopražnjenja (A)
1.	12,253	38,900	10	180	38,564
2.	12,208	38,641	7,7	120	38,377
3.	12,185	38,698	5,5	120	38,550
4.	12,172	38,736	4	120	38,663
5.	12,160	39,051	2,3	120	38,882

Na zavojnici je izmjerena vrijednost induktiviteta od 451,7 mH i vrijednost otpora 326,8 Ω .

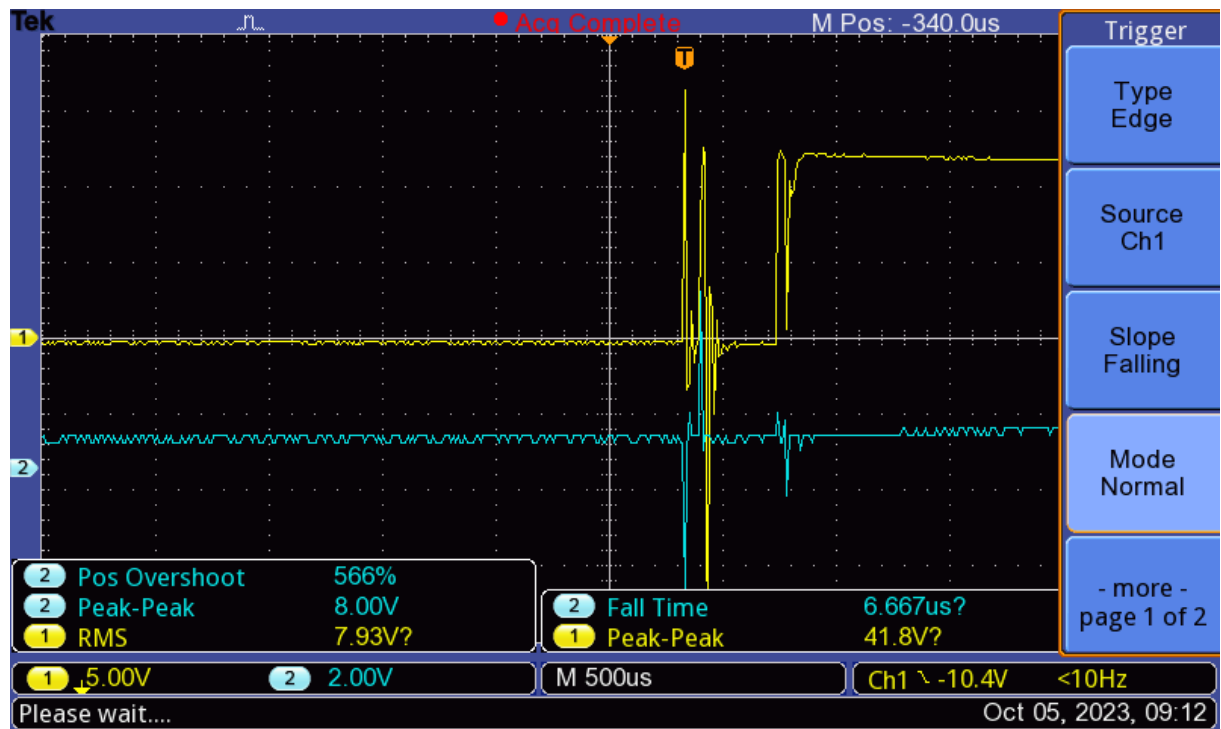
5.2. Analiza rezultata

Vrijednost rezultata danih u tablici 5.1. i 5.2. prikazuju relativno malu pogrešku mjerenja i računa koja je posljedica nepreciznosti mjernih instrumenata, starosti i očuvanja. Pojavljuju se i pogreške prilikom zaokruživanja vrijednosti koje su pokušane svesti na minimum. Mjerenje je provedeno više puta(u slučaju s zavojnicom i bez zavojnice po pet puta) kroz određeni vremenski period. Uočava se promjena mjerene vrijednosti struje u vremenskim razmacima od 300 do 120 sekundi između pohrane vrijednost. To je posljedica utjecaja opterećenja na bateriju koja se polako prazni i isporučuje sve manju struju. Smanjenjem otpora vidljivo je kako se struja povećava što je dokazano formulom 5-1. Veći otpor je prouzrokovao brže pražnjenje baterije što potvrđuje veći zahtjev za izvor i potrošnju. Dodavanjem zavojnice u strujni krug struja se naglo smanjila i mjerena je u mA. Iako se baterija i dalje praznila, mjerenje je pokazalo da je struja rasla opadanjem otpora kao i u prošlom slučaju. Kao neobičnu pojavu na slikama 5.3. – 5.6. i veliku oscilaciju uzrokovala je sklopka prilikom uključivanja. Grafički prikaz je varirao te bio nepregledan u potpunosti prilikom te pojave. Promjene su uočljive u oba slučaja te zavojnica nije puno utjecala na izgled grafičkog prikaza.



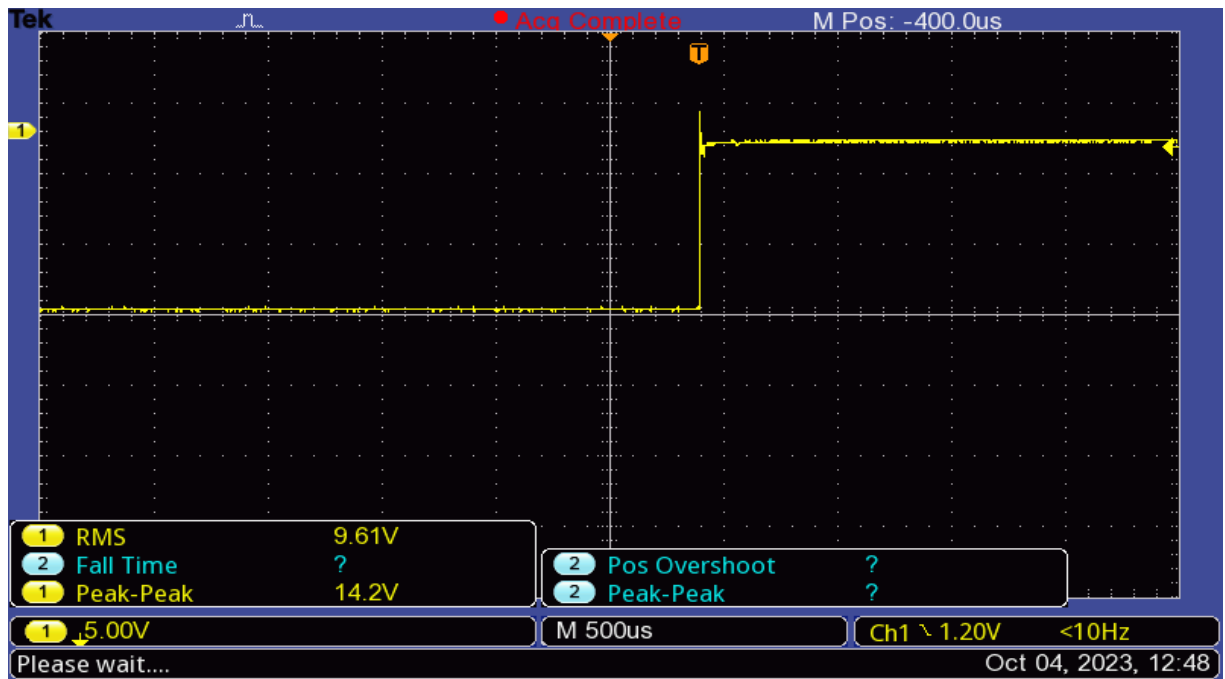
Slika 5.3.: Grafički prikaz prvog mjerenja bez zavojnice

Na slici 5.3. vidljivo je kako je vrijednost iznosila otprilike 12,5 V (jedan odjeljak iznosi 5 V) što je prikazivalo napunjenost baterije te koji napon isporučuje. Sklopka je bila u stanju isključenosti pa strujni krug nije vodio. Napon je bio iznosa 0 V. Nakon uključivanja sklopke dogodi se veliki porast iznosa napona i uočljivo je da dođe do iznenadnog odstupanja što je posljedica uključivanja.



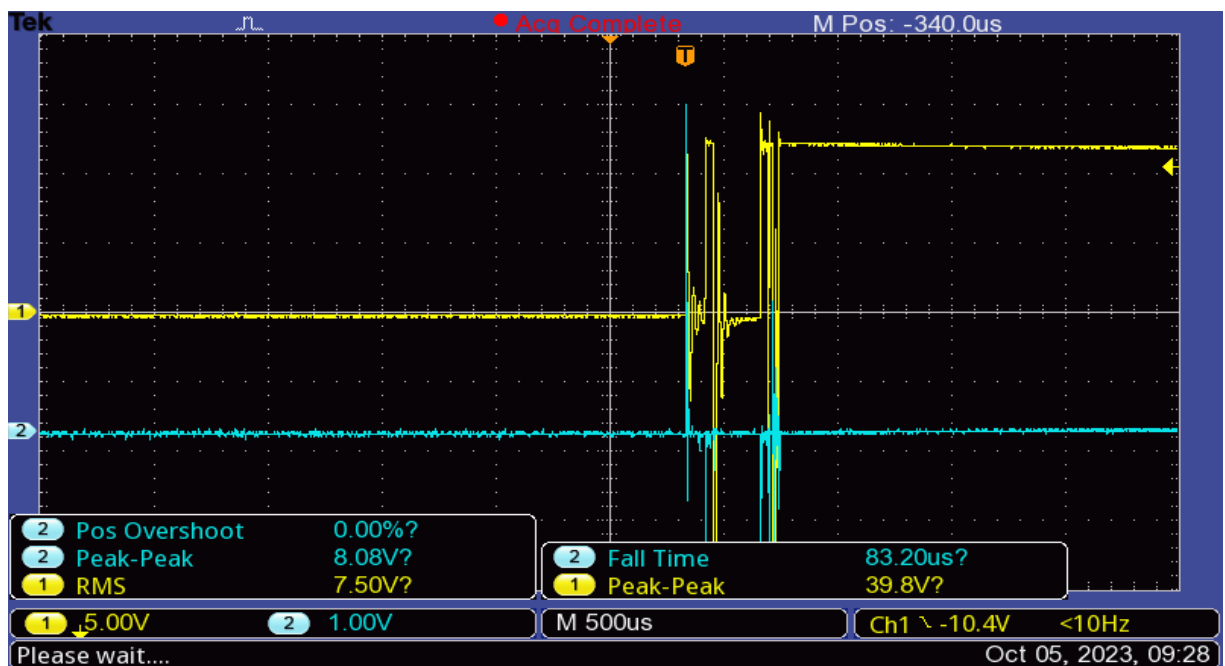
Slika 5.4.: Grafički prikaz prvog mjerenja sa zavojnicom

Grafički prikaz slike 5.4. prikazuje vrijednosti napona prilikom dodavanja zavojnice u strujni krug. U oba slučaja odnosno mjesta mjerenja uočene su vrlo nerazmjerne oscilacije. One su posljedica uključivanja strujnog kruga, ali se razlikuju od slučaja bez zavojnice. Napon i nakon uključivanja je ima određeno odstupanje te nije uravnoteženo paljenje. Napon iznosi otprilike 12,2 V što ukazuje na pražnjenje baterije. Otpor u oba navedena slučaja je bio maksimalni i iznosio 10 Ω .



Slika 5.5.: Grafički prikaz petog mjerenja bez zavojnice

Slika 5.5. prikazuje napon baterije bez primjene zavojnice u strujnom krugu u kojem je otpor iznosio $3\ \Omega$. Velike promjene sa promjenom otpora nisu baš uočljive osim snimljene karakteristike koja ima puno manju oscilaciju odnosno amplitudu pogreške prilikom uključivanja sklopke. Prikaz je vrlo jasan i pokazuje ustaljene vrijednosti.



Slika 5.6.: Grafički prikaz petog mjerenja sa zavojnicom

U slučaju koji je prikazan slikom 5.6. najveće su oscilacije. Otpor je $2,3 \Omega$, dok napon iznosi otprilike $12,2 \text{ V}$. Oscilacije su bile prisutne i pri većem otporu, ali razlika je samo u postizanju ustaljene vrijednosti napona koji je najteže bilo u ovom slučaju. Zavojnica utječe na brzinu postizanja određene vrijednosti napona.

6. ZAKLJUČAK

Iako po nekima davno izumljene, baterije su izum današnjice. Koriste se zadnjih otprilike dvjesto godina te još uvijek nisu doživjele svoj vrhunac. Načinjene su od tvari koja proizvodi električnu energiju, pozitivnog i negativno pola. S razvitkom tehnologije i baterije se razvijaju i kao take podijeljene su u određene grupe. Grupe se često razlikuju po materijalu izrade te tako poznajemo nikal - kadmij, nikal – metal - hibrid, olovne i litij - ionske baterije. Naravno da postoji još puno vrsta ali tu u radu su navedene ove vrste kao glavne predstavnice baterija. Da bi se baterija mogla uopće zvati baterija mora biti prijenosna i sadržavati karakteristike poput napona, kapaciteta, gustoće naboja i unutarnjeg otpora. Ovisi o proizvođaču i uloženom trudu baterije istih karakteristika se mogu razlikovati po dugovječnosti i kvaliteti izrade. Kako se sve više koriste u raznim pogledima i situacijama, baterije teže biti što manjih dimenzija, a omogućiti što duži i efikasniji rad. Rad baterije ovisi o njenim opterećenjima odnosno o trošilu kojemu je potrebna energija. Predstavljeni su modeli koji pokazuju ovisnost dinamičkih opterećenja na baterije jer opterećenja gotovo nigdje nisu statička te to ovisi o brzini potrošnje baterije. Navedeni modeli predstavljaju prikaz mjerenja te odziv o opterećenjima kroz vrijeme. Iako postoje uređaju i matematički proračuni, potrošnja baterije na dinamička opterećenja će imati bolje rezultate u budućnosti te točnije analize radi efikasnosti i poboljšavanja iste.

7. LITERATURA

- [1]: Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima, članak 4.3, [online dostupno]:https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_10_111_2147.html, pristup: 18.06.2023.
- [3]: Baterije- vrste, tehnologija izrade i način rada, [dostupno online]: [Baterije – vrste, tehnologija izrade i način rada | PC CHIP](#), pristup: 19.06.2023.
- [4]: I. Hećimović: Punjive baterije i prateći elektronički sklopovi- Završni rad, Osijek, 2020.
- [5]: A. Premec: Dimenzioniranje baterije i projektiranje sustava upravljanja besprekidnog napajanja zasnovanog na solarnim panelima – Završni rad, Zagreb, 2018.
- [6]: Nikal- kadmijeve baterije, [dostupno online]: <https://power.bigbadmole.com/hr/akkumulatory/batarei/ni-cd.html>, pristup: 20.06.2023.
- [7]:Što je metal- nikal- hibridna baterija, [dostupno online]: <https://ba.manly-battery.com/info/what-is-a-nickel-metal-hydride-battery-does-ni-60074235.html>, pristup: 20.06.2023.
- [8]:Što je olovno- kiselinska baterija, [dostupno online]: <https://ba.manly-battery.com/info/why-do-lead-acid-batteries-have-to-be-fully-di-66652257.html>, pristup: 20.06.2023.
- [9]: Robert A. Huggins - Energy Storage Fundamentals, Materials and Applications- Second Edition, Lead- acid batteries, 2016.
- [10]: I. Beljan: Litij- ionske baterije- Završni rad, Osijek, 2021.
- [11]: U. Krewer, F. Roder, E. Harinath, Richard D. Braatz, B. Bedurftig, and R. Findeisen: Dynamic Models of Li-Ion Batteries for Diagnosis and Operation: A Review and Perspective, 2018.
- [12]: O. Tremblay, Louis-A. Dessaint: Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, Norveška, 2009.
- [13]: S. Ghose, Adel El-Shahat: Modelling and Simulation of Grid Connected Lithium-ion Battery Using HOMER, Georgia, USA, 2017.

[14]: James J. Liu: Analysis of a Modified Equivalent Circuit Model for Lithium-Ion Battery Modules in CubeSats, 2016.

[15]: Čenov i Morin model baterije, [dostupno online]: https://www.researchgate.net/figure/Chen-and-Moras-battery-model_fig2_259504195 , pristup: 26.09.2023.

[16]: Osnove rada s LFP baterijama, [dostupno online]: <https://www.schracktrainingcenter.com/kb/osnove-rada-s-lfp-baterijama/> , pristup: 26.09.2023.

[17]: How lithium-ion batteries work, [dostupno online]: <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm> , pristup: 26.09.2023.

[18]: Nickel-metal hybrid battery, [dostupno online]: https://bmet.fandom.com/wiki/Nickel-metal_hydride_battery , pristup: 26.09.2023.

[19]: Voltin niz, [dostupno online]: https://hr.wikipedia.org/wiki/Voltin_niz , pristup: 27.09.2023.

[20]: GTF, [dostupno online]: <https://www.aliexpress.com/i/1005003064818406.html> , pristup: 27.09.2023.

8. SAŽETAK

Zadatak završnog rada bio je istražiti kako se mijenjaju karakteristike baterija pri dinamičnim opterećenjima. Započeto je sa osnovnima informacijama o baterijama, njihovim vrstama te njihove razne primjene. Navedene su statičke karakteristike, odnosno karakteristike koje opisuju bateriju. Nakon toga su predstavljeni modeli i razna istraživanja o promjenama karakteristika baterija ovisno o opterećenjima koja mogu biti promjenjiva. Dokazi su potkrijepljeni slikama i tablicama. U labosu je odrađena simulacija i mjerenje kako bi se uistinu ispitali rezultati i potvrdili ili negirali. Napravljene su analize i donijeti zaključci, te evidentirani u radu.

Ključne riječi: baterija, dinamičke karakteristike, statičke karakteristike

Abstract

Examination of battery characteristics on dynamic loads

The task of the assignment was to research the changes of the battery characteristics during dynamic loads. It was started with basic informations about batteries, their species and their various applications. Static characteristics are listed, apropos characteristics which describe batteries. After that, there are represented models and various researches about changes within batteries characteristics depending on the loads that can be variable. The evidence is corroborated with pistures and tables. Simulation and measurement were done in conclusion which were recorded in the final assignment.

Key words: battery, dynamic characteristics, static characteristics

9. ŽIVOTOPIS

Mario Semeš rođen je 18.01.2001. u Osijeku. Započinje školovanje u Osnovnoj Školi „Tin Ujević“. Nakon završetka osnovnoškolskog obrazovanja upisao se u Tehničku školu i prirodoslovnu gimnaziju Ruđera Boškovića u Osijeku. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u rodnom gradu upisuje 2019. godine, smjer elektrotehnika i informacijske tehnologije. 2021. godine prebacuje se na stručni studij Automatike. U slobodno vrijeme bavi se sportom i voli provoditi vrijeme u prirodi.