

Eksperimentalna karakterizacija i dizajn modela ćelije baterijskog spremnika energije

Špoljarić, Marko

Master's thesis / Diplomski 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:200:979758>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**Eksperimentalna karakterizacija i dizajn modela ćelije
baterijskog spremnika energije**

Diplomski rad

Marko Špoljarić

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Marko Špoljarić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Automobilsko računarstvo i
Mat. br. pristupnika, god.	D-39ARK, 06.10.2019.
JMBAG:	0165061452
Mentor:	prof. dr. sc. Željko Hederić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Tomislav Barić
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Željko Hederić
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Željko Špoljarić
Naslov diplomskog rada:	Eksperimentalna karakterizacija i dizajn modela ćelije baterijskog spremnika energije
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U ovom diplomskom radu opisan je proces mjerenja baterijske ćelije INR18650-35E i usporedba dobivenih rezultata sa rezultatima dobivenim simulacijom baterijske ćelije u Matlabu. Nadalje, izrađen je 3D model i 2D tehnički crtež samog baterijskog paketa koji se sastoji od navedene ćelije. student Marko Špoljarić
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	10.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	18/07/2024
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	28.07.2024.

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

Osijek, 28.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Marko Špoljarić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Automobilsko računarstvo i komunikacije
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-39ARK, 06.10.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Eksperimentalna karakterizacija i dizajn modela ćelije baterijskog spremnika energije**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Željko Hederić

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:

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Željku Hedariću na usmjeravanju i pomoći u pripremi i izradi diplomskog rada te ostalim profesorima i djelatnicima fakulteta na podršci i pomoći kroz sve godine studija.

Također zahvaljujem obitelji i bližnjima na svesrdnoj i bezuvjetnoj podršci.

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1 Zadatak završnog rada.....	1
2. PREGLED PODRUČKA – BATERIJSKI SPREMNICI ENENERIJE	2
2.1 Baterijska ćelija	4
2.2 Baterijski blokovi	7
2.3 Baterijski paket.....	8
2.4 Balansiranje ćelija	9
2.5 Utjecaj temperature na rad ćelije.....	10
3. MJERENJE DINAMIČKOG RADA BATERIJSKE ĆELIJE	11
3.1 Postupak punjenja i pražnjenja.....	12
3.2 Obrada podataka u Matlabu	14
4. MODELIRANJE BATERIJSKOG PAKETA	19
4.1 Modeliranje u Matlabu	23
4.2 Modeliranje u SolidWorksu	27
4.2.1 Postupak izrade:	30
4.3. Rezultati	33
5. ZAKLJUČAK	35
LITERATURA.....	36
POPIS SLIKA	38
SAŽETAK.....	40
ABSTRACT	41
ŽIVOTOPIS	42

1.UVOD

U suvremenom dobu sve veći naglasak stavlja se na razvoj održivih i energetske učinkovitih tehnologija, a baterijski paketi su ključni elementi mnogih takvih tehnoloških sustava. Iz tog razloga, istraživanje i razvoj baterijskih tehnologija postaje izuzetno važno područje. Ovaj rad se bavi izradom modela baterijskog paketa korištenjem SolidWorks-a.

U početnoj fazi, provodi se precizno mjerenje stanja napunjenosti (SoC) jedne od ćelija baterijskog paketa. Dobiveni podaci detaljno se analiziraju i obrađuju koristeći Matlab, alat za numeričku analizu i simulacije. Koristeći te podatke, stvara se simulacijski model SoC-a za istu ćeliju unutar Matlab-a.

Ključna svrha ovog rada je usporedba stvarnih rezultata SoC-a ćelije baterijskog paketa s rezultatima simulacije, pri čemu se koristi Shepardov model. Shepardov model je široko priznat i korišten model za predviđanje ponašanja baterija, što ga čini relevantnim za ovo istraživanje.

Kroz ovaj rad, nastojimo istražiti koliko je Shepardov model sposoban precizno simulirati ponašanje SoC-a baterijske ćelije, što može imati značajan utjecaj na razvoj boljih baterijskih tehnologija i njihovu primjenu u energetske učinkovitim sustavima. Ovaj multidisciplinarni pristup koji kombinira inženjering u SolidWorks-u, analizu podataka u Matlab-u te primjenu Shepardovog modela obećava dublje razumijevanje i unapređenje performansi baterijskih paketa u budućnosti.

1.1 Zadatak završnog rada

Cilj ovog rada je analizirati karakteristike punjenja i pražnjenja baterijske ćelije INR18650-35E, koristeći iCharger 4010 DUO. Nakon prikupljanja relevantnih podataka, istraživači će primijeniti Matlab za analizu i obradu tih podataka kako bi detaljno razumjeli ponašanje baterijske ćelije tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja. Kroz ovo istraživanje, cilj je bolje razumjeti performanse navedene baterijske ćelije i doprinijeti unapređenju razvoja baterijskih tehnologija. Osim toga, rezultati će se usporediti s Shepardovim modelom kako bi se procijenila preciznost tog modela u simuliranju ponašanja baterijske ćelije INR18650-35E.

2. PREGLED PODRUČKA – BATERIJSKI SPREMNICI ENERGIJE

Baterija je elektrokemijski uređaj koji kemijsku energiju sadržanu u aktivnim materijalima pretvara izravno u električnu energiju i obrnuto [1]. U automobilskim sustavima za punjenje baterija se puni preokretom ovog postupka. Iako se izraz "baterija" često koristi, osnovna elektrokemijska jedinica je "ćelija". Baterija se sastoji od jedne ili više ovih ćelija, povezane serijski ili paralelno, ili obje, ovisno o željenom izlaznom naponu i kapacitetu. U svrhu pravilnog razumijevanja problematike baterijskih spremnika energije potrebno je definirati određene pojmove koji se odnose na fizička i elektrokemijska svojstva ćelije kao dio baterijskog paketa.

Kapacitet – Količina energije koju sadrži elektrokemijski sustav ovisi o vrsti aktivnih materijala u ćeliji, koji određuju napon, i količini aktivnih materijala, što određuje kapacitet u Ah [2]. Ukupno raspoloživ kapacitet predstavlja kada se baterija isprazni određenom strujom pražnjenja (definirano kao C razina) od 100%-tnog stanja napunjenosti (engl. State of Charge, skraćeno SoC) do napona kraja pražnjenja (minimalni dopušteni napon) [3].

C razina – C razina je bez dimenzijska mjera brzine kojom se baterija prazni u odnosu na svoj maksimalni kapacitet [2]. Ako je baterija sposobna za punjenje ili pražnjenje pri "C razini 1", to znači da se baterija puni ili prazni brzinom koja odgovara njenom nominalnom kapacitetu. Ako je C razina veća od 1, to znači da se baterija puni ili prazni brže nego što iznosi njen nominalni kapacitet. Primjerice, za bateriju kapaciteta 1000 mAh (mili amper-sati), C razina 1 bi značila da se punjenje ili pražnjenje odvija brzinom od 1000 mA (mili ampera). Ako bi C razina bila 2C, tada bi punjenje ili pražnjenje bilo brzinom od 2000 mA, što je dvostruko brže od nominalnog kapaciteta baterije.

C razina je važna informacija za odabir odgovarajućeg punjača ili uređaja za bateriju i može utjecati na brzinu punjenja i pražnjenja, te na ukupno trajanje baterije. Maksimalna isporučena struja baterije može se odrediti putem C faktora.:

$$I_{max} = C_{razina} \cdot C \quad (2-1)$$

I_{max} – maksimalna struja koju materija može isporučiti,

C – kapacitet baterije.

Stanje napunjenosti – Stanje napunjenosti (engl. State of Charge, SoC) je izraz sadašnjeg kapaciteta baterije kao postotka maksimalnog kapaciteta. [3]:

$$SoC = \frac{C_{bat}}{C_{max}} \quad (2-2)$$

SoC – stanje napunjenosti baterije,

C_{bat} – trenutni kapacitet baterije,

C_{max} – maksimalni kapacitet baterije.

Dubina ispražnjenosti – Dubina ispražnjenosti (engl. *Depth of Discharge*, skraćeno *DoD*)

Postotak ispražnjenog kapaciteta baterije izražen kao postotak maksimalnog kapaciteta.

Pražnjenje na najmanje 80% DoD naziva se dubokim pražnjenjem [3]:

$$DoD = 100\% - SoC \quad (2-3)$$

DoD – dubina ispražnjenosti baterije.

Unutarnji otpor – Otpor unutar baterije, općenito različit za punjenje i pražnjenje, također ovisi o stanju napunjenosti baterije. Kako se unutarnji otpor povećava, učinkovitost baterije se smanjuje, a toplinska stabilnost se smanjuje kako se veći dio energije punjenja pretvara u toplinu [3].

Nominalni napon – Referentni napon za koji je tehnički registrirana proizvedena baterija, napon u normalnom radnom stanju rada u pravilu je maksimalni napon napunjenosti baterije (puna baterija). Ukoliko bi se baterija spojila na veći napon vanjskog izvora, tada baterija postaje trošilo i "upija" energiju izvora da bi se punila [3].

Granični napon – Minimalni dopušteni napon. Taj napon općenito definira "prazno" stanje, odnosno daljnje smanjenje napona ukazuje na početak nepovratnog procesa degradacije elektrokemijskih procesa u ćeliji [3].

Specifična energija – Nominalna energija baterije po jedinici mase, koja se ponekad naziva i gravimetrijska gustoća energije [3]:

$$E_{spec} = \frac{C_{naz} \cdot V_{naz}}{m} \quad (2-4)$$

E_{spec} – specifična energija baterije,

C_{naz} – nazivni kapacitet baterije,

V_{naz} – nazivni napon baterije,

m – masa baterije.

Specifična snaga – Maksimalna raspoloživa snaga po jedinici mase. Specifična snaga karakteristika je kemije i pakiranja baterija [3]:

$$P_{spec} = \frac{I_{max} \cdot V_{naz}}{m} \quad (2-5)$$

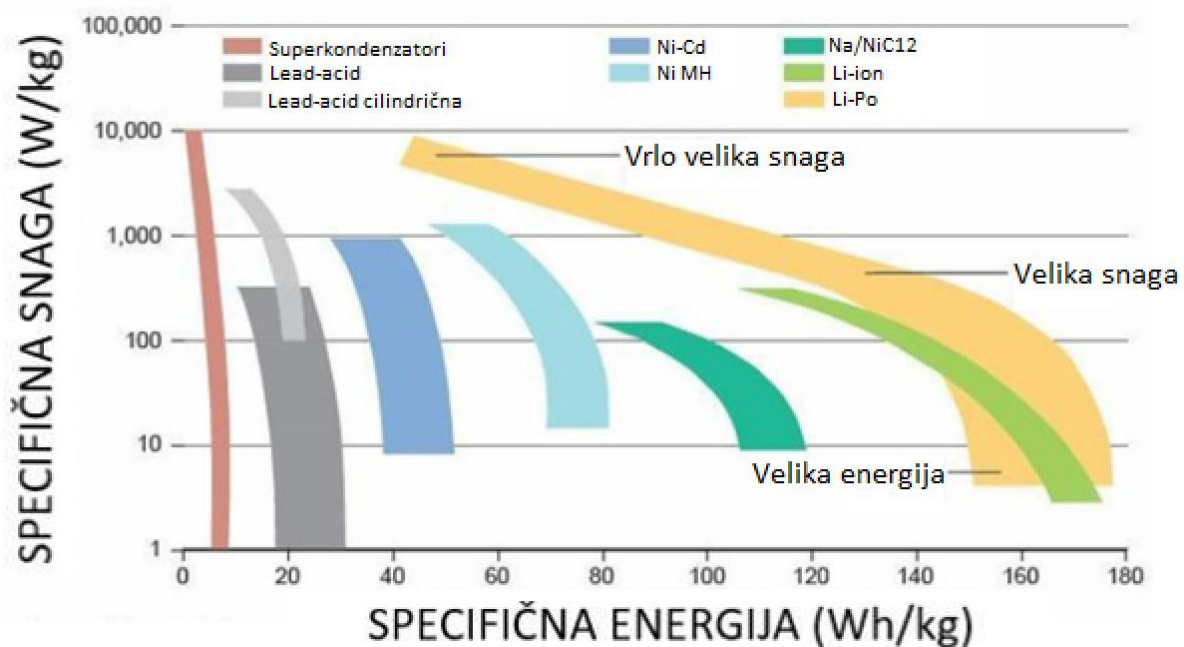
P_{sec} – specifična snaga baterije,

I_{max} – maksimalna struja koju baterija može isporučiti,

V_{naz} – nazivni napon baterije,

m – masa baterije.

Na Slici 2.1 je prikazana usporedba specifične energije i specifične snage baterija različitih tehnologija.



Slika 2.1. Specifična energija i specifična snaga baterija [4]

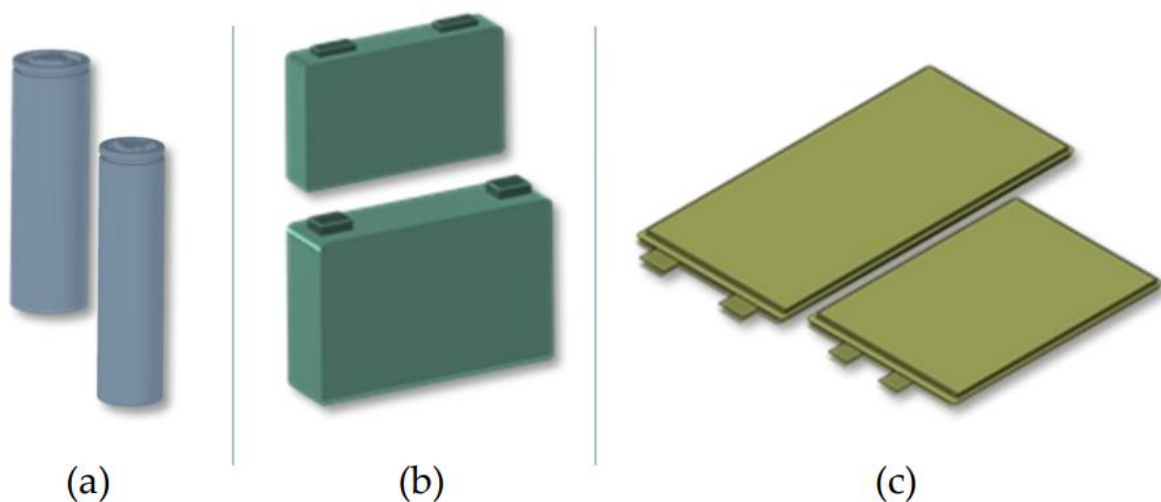
2.1 Baterijska ćelija

Ćelija je osnovna elektrokemijska jedinica koja se sastoji od tri glavne komponente.

- Anoda ili negativna elektroda - redukcijska elektroda ili elektroda za gorivo - koja oslobađa elektrone na vanjski krug i oksidira se tijekom elektrokemijske reakcije;
- Katoda ili pozitivna elektroda - oksidacijska elektroda - koja prihvaća elektrone vanjski krug i smanjuje se tijekom elektrokemijske reakcije;
- Elektrolit - ionski vodič - koji osigurava medij za prijenos naboja, kao ioni, unutar ćelije između anode i katode. Elektrolit je obično tekućina, kao što su voda ili druga otapala, s

otopljenim solima, kiselinama ili lužinama za poboljšanje ionskih provodljivost. Neke baterije koriste krute elektrolite, koji su ionski vodiči na radnoj temperaturi ćeliji [1].

Tri formata ćelija obično se koriste u automobilskoj industriji: cilindrične, vrećaste i prizmičke. Glavna razlika između formata ćelija leži u dizajnu kućišta ćelije i rasporedu katode, anode i separatora. Prizmičke i cilindrične ćelije pakirane su u tvrdo kućište, obično izrađeno od aluminija ili nehrđajućeg čelika. Vrećaste ćelije pakirane su u višeslojne aluminijske kompozitne folije. Cilindrične ćelije sadrže elektrode omotane sa separatorima u obliku rolade. Prednost cilindrične forme je da se vrlo jednostavno i masovno proizvode (baterijski izvor AA, AAA forme), ali imaju vrlo nezgodno svojstvo da kod impulsnog izboja energije (kada se od ćelije zahtjeva veća količina energije u kratkom periodu - brzi start EV) imaju problema sa unutarnjim magnetskim poljem koje reducira aktivnu plohu elektroda. Poništavanje tog efekta dovelo je do razvoja pločastih verzija za primjenu u EV [5].

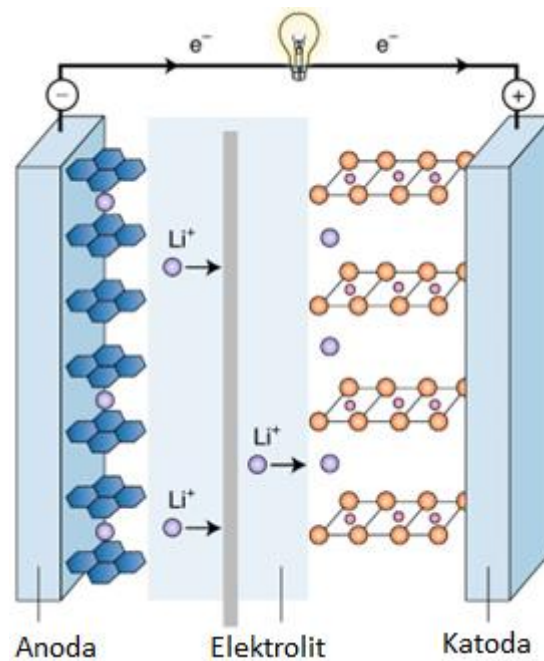


Slika 2.2. Standardni formati ćelija: (a) cilindrične ćelije; (b) prizmičke ćelije; (c) vrećaste ćelije[5].

Postoji nekoliko vrsta baterijskih ćelija, uključujući litij-ionske, nikal-kadmijumske (NiCd), nikal-metal-hidridne (NiMH) i olovno-kiselinske ćelije. Zbog svoje popularnosti u ovom diplomskom radu fokusirat ćemo se na Litij-ionske ćelije.

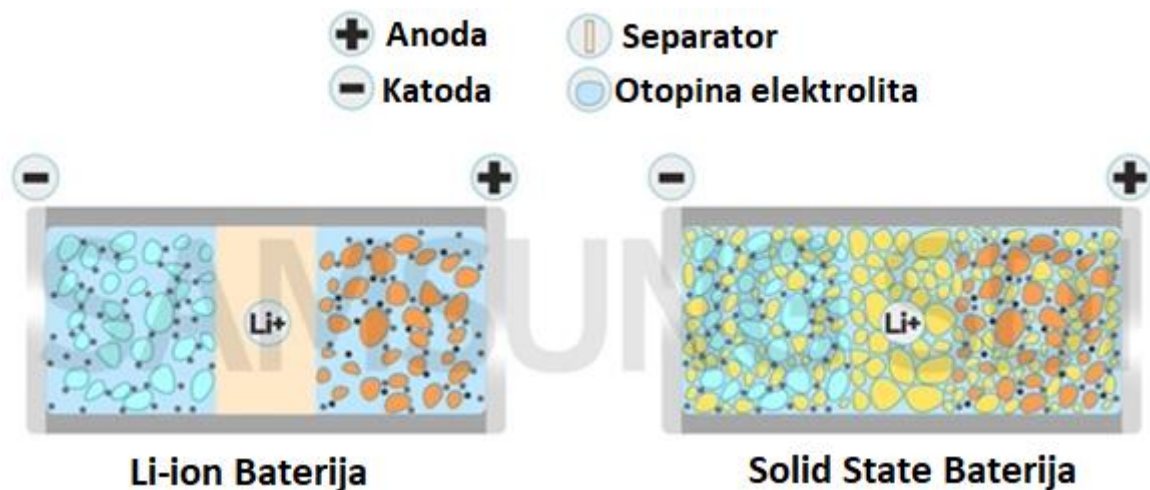
Litij-ionska (Li-ion) baterija je punjiva baterija koja koristi litij kao elektrode i elektrolit za skladištenje električne energije. Sastoji se od anode (negativne elektrode), koja obično sadrži grafita i gdje se litij ioni skladište tijekom punjenja, te katode (pozitivne elektrode), koja može biti izrađena od različitih materijala. Elektrolit omogućuje transport litij iona između anode i katode, dok separator sprječava direktan kontakt između njih. Baterijski paketi s litij-ionskim

baterijama imaju veću učinkovitost tijekom punjenja i pražnjenja od mnogih drugih alternativa, što može rezultirati duljim vijekom trajanja u usporedbi s drugim vrstama baterija poput olovnih akumulatora [6]. Druge prednosti su visoka energijske gustoće, brzo punjenje, nisko samo pražnjenje i široka primjena u mobilnim uređajima, električnim vozilima i drugim aplikacijama. Jedan od nedostataka litij-ionskih baterija je što se ne smiju potpuno isprazniti, što skraćuje njihov vijek trajanja. Također, nije preporučeno pražnjenje baterije s visokim strujama jer to može uzrokovati oštećenja. Ove nedostatke često se izbjegava korištenjem elektroničkih sklopova za zaštitu i upravljanje punjenjem i pražnjenjem baterije.



Slika 2.3. Komponente punjive Li-ion baterije.

Solid-state baterije pojavile su se u posljednjem desetljeću kao alternativna baterijska strategija, s očekivanom većom sigurnošću i gustoćom energije[7]. Solid-state baterije su napredni tip ćelija koje koriste čvrsti elektrolit umjesto tekućeg ili gel elektrolita kao u tradicionalnim baterijama poput litij-ionskih, razlika je prikazana na slici 2.4. Ove baterije nude veće prednosti u sigurnosti, gustoći energije, vijeku trajanja i otpornosti na temperature. Sigurnije su zbog nepostojanja zapaljivog tekućeg elektrolita, što smanjuje rizik od požara i eksplozija. Imaju veću gustoću energije i traju dulje zbog manje degradacije materijala. Nadalje, bolje podnose ekstremne temperature. Iako još uvijek prolaze kroz fazu istraživanja, njihov potencijal za poboljšanje performansi i sigurnosti baterijskih sustava čini ih važnim za buduće primjene u električnim vozilima, prijenosnim uređajima i skladištenju energije.



Slika 2.4. Struktura Li-ionske ćelije i solid state ćelije

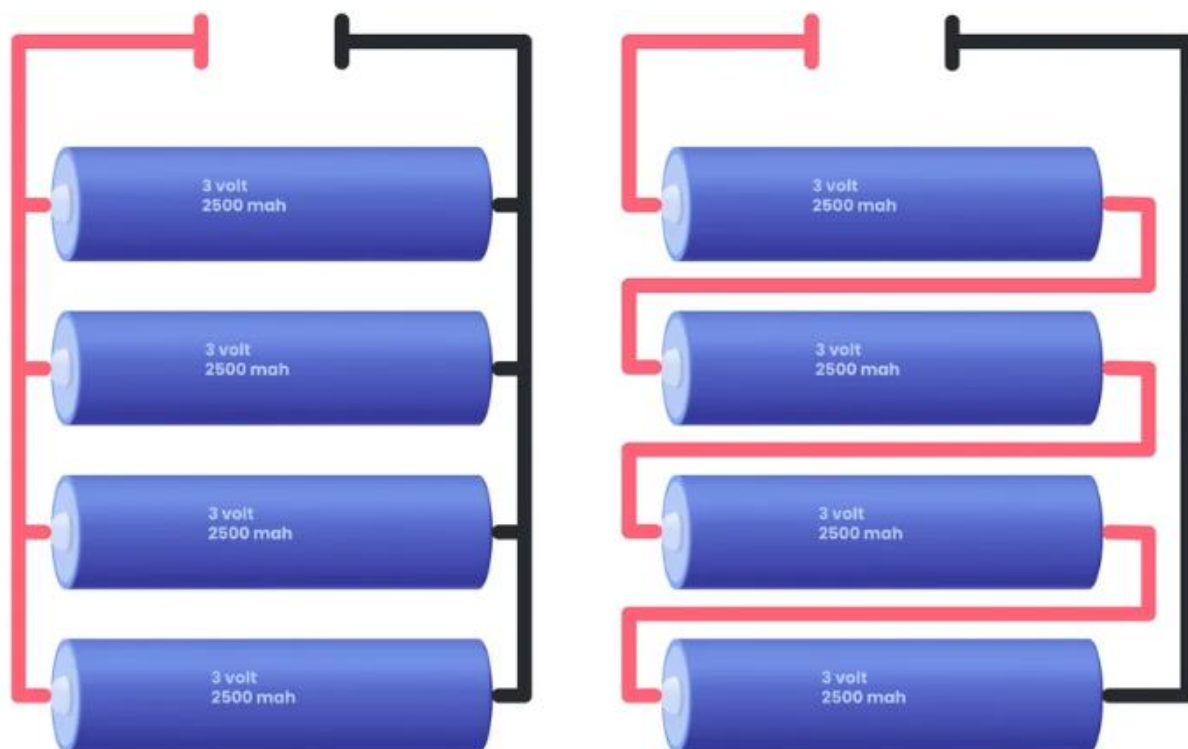
2.2 Baterijski blokovi

Baterijski blokovi predstavljaju skupinu baterijskih ćelija povezanih na različite načine kako bi se postigle željene naponske i strujne karakteristike. Postoje dva osnovna načina spajanja baterijskih ćelija u blokove: serijsko i paralelno spajanje, svaki s vlastitim prednostima i manama.

U serijskom spajanju, ćelije su povezane tako da se naponi zbrajaju, što omogućuje postizanje visokog napona, ali zahtijeva pažljivo balansiranje zbog mogućnosti neravnomjernog pražnjenja i potencijalnog kvara cijelog bloka ako jedna ćelija ne radi pravilno.

Dok paralelno spajanje, povećava ukupni kapacitet zbrajanjem kapaciteta ćelija, čime se produžuje radni vijek između punjenja i poboljšava pouzdanost jer kvar jedne ćelije ne onemogućuje rad cijelog bloka. Međutim, paralelno spajanje zahtijeva deblje vodiče i naprednije termalno upravljanje zbog veće struje. Na slici 2.5. se može vidjeti primjer serijskog i paralelnog spoja ćelija.

Često se koristi i kombinacija serijskog i paralelnog spajanja kako bi se optimizirali i napon i kapacitet, omogućujući fleksibilnost u dizajnu baterijskih paketa. Na primjer, serijski povezani blokovi se mogu dalje povezati u paralelu za povećanje kapaciteta. Takva konfiguracija, iako složenija, omogućuje prilagodbu specifikacijama sustava, uključujući sigurnost, učinkovitost i troškove, uz potrebu za sofisticiranim sustavima upravljanja baterijama (BMS) kako bi se osigurala optimalna funkcionalnost.



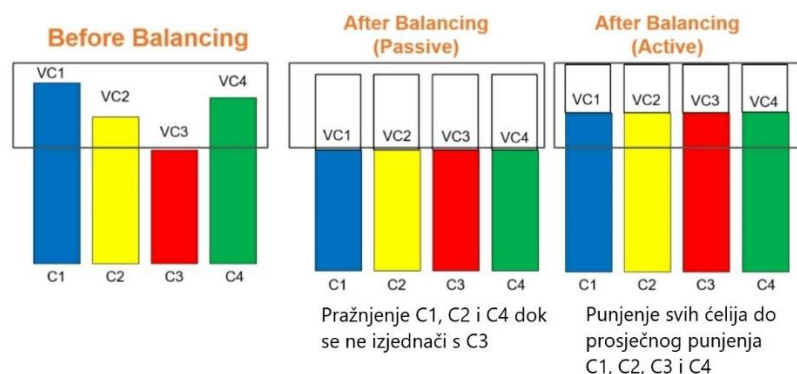
Slika 2.5. Paralelni spoj (lijevo) i serijski spoj (desno)

2.3 Baterijski paket

Baterijski paket je kompletan sklop baterijskih blokova, često obuhvaćajući mehaničke, električne i termalne komponente potrebne za sigurno funkcioniranje. Paket obično sadrži više blokova povezanih u seriju ili paralelu, kao i upravljačku elektroniku koja nadzire i balansira napone, temperature i druge parametre blokova i cijelog paketa. Paket je dizajniran da isporučuje energiju za specifične primjene, kao što su električna vozila, skladištenje energije ili prijenosni uređaji. Baterijski paketi uključuju napredne sustave upravljanja baterijama (BMS) koji osiguravaju sigurnost, optimizaciju performansi i dugovječnost. Za zaštitu baterijskog paketa upotrebljavaju se čvrsta kućišta koja štite od fizičkih oštećenja, termalne izolacijske materijale koji sprečavaju širenje topline i sigurnosne ventile koji oslobađaju pritisak u slučaju pregrijavanja. Ugrađenim sensorima za praćenje napona, struje i temperature u stvarnom vremenu, omogućujući rano otkrivanje problema i preventivno održavanje. Noviteti u pakiranju uključuju modularne dizajne i sofisticirane sustave hlađenja, čime se povećava pouzdanost i sigurnost. Modularni dizajn baterijskog paketa se bazira na izradi paketa koji se sastoji od nekoliko manjih, samostalnih modula ili blokova baterija. Svaki modul sadrži grupu baterijskih ćelija povezanih zajedno unutar zasebnog kućišta. Glavna karakteristika modularnog dizajna je mogućnost fleksibilne konfiguracije i skaliranja baterijskog paketa prema specifičnim potrebama aplikacije.

2.4 Balansiranje ćelija

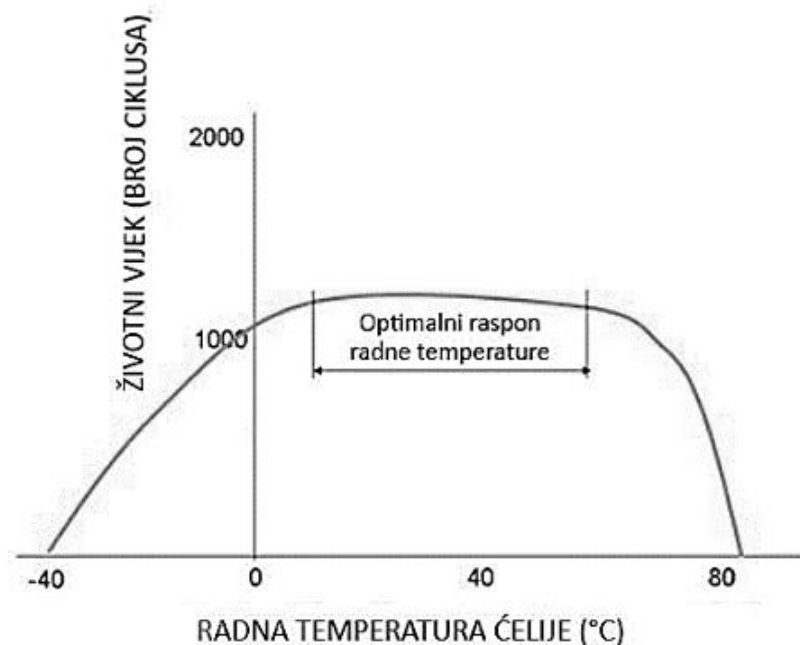
Balansiranje ćelija važan je dio bilo kojeg sustava upravljanja baterijama. Ne postoje dvije potpuno iste ćelije. Čak i ćelije proizvedene pod istim uvjetima i koje dolaze iz iste serije mogu imati manje promjene zbog svoje elektrokemijske prirode. Tipični paketi baterija za električna vozila (EV) mogu imati više od stotinu ćelija [1]. Ovisno o načinu postavljanja tih dugih nizova ćelija, neke ćelije mogu imati malo drugačije temperaturne uvjete tijekom rada. Također u stacionarnom načinu rada te razlike mogu postojati zbog uvjeta okoline. Stopa samopražnjenja litij-ionskih ćelija vrlo je ovisna o temperaturi [2]. Dakle, razlike među ćelijama imaju tendenciju povećanja s normalnim ciklusom i starenjem, što dovodi do neravnoteže SoC-a ćelija. Budući da su ćelije u nizu, dijele istu struju. To znači da će ćelija s višim SoC-om postići svoj maksimalni napon na priključku prije nego što će ostale moći postići potpuno punjenje. S druge strane, ćelija s najnižim SoC-om postići će svoj najmanji napon pri pražnjenju prije nego što ostale mogu isporučiti svoj puni kapacitet. Nastavak punjenja ili pražnjenja u tim uvjetima će dovesti do prekomjernog punjenja ćelije s najvišim SoC-om ili prekomjernog pražnjenja ćelije s najnižim SoC-om. Na taj će način korisni kapacitet biti niži od nazivnog kapaciteta. Zatim, kako bi se uspostavio siguran rad, produžio vijek trajanja baterije i optimizirao njezin korisni kapacitet, trebalo bi postići pravilno pojedinačno balansiranje ćelija [1]. Topologije balansiranja ćelija mogu se kategorizirati kao pasivno i aktivno balansiranje. Metode pasivnog balansiranja uklanjaju višak naboja iz naelektriziranih ćelija kroz pasivni otporni element, sve dok se naboj ne podudara s onima s najnižim nabojem u paketu. Otporni element bit će ili u fiksnom načinu rada ili sklopka. Metode aktivnog balansiranja ćelija uklanjaju naboj iz naelektriziranih ćelija i isporučuju ga u ćelije s najnižim nabojem. Različite se topologije koriste prema aktivnom elementu koji se koristi za pohranu energije, poput kondenzatora i / ili induktivne komponente, kao i upravljačkih sklopki ili pretvarača. Različita rješenja razlikuju se u složenosti, učinkovitosti i vremenu odziva [8].



Slika 2.6. Pasivno i aktivno balansiranje ćelija

2.5 Utjecaj temperature na rad ćelije

Temperatura ima vrlo jak utjecaj na rad Li-ion ćelije[9]. Glavni utjecaji temperature uključuju: kapacitet, vijek trajanja i sigurnost. Kapacitet litij-ionske ćelije varira s temperaturom i brzinom pražnjenja. Pri normalnim radnim temperaturama učinkovitost ćelije je vrlo visoka, ali pri niskim temperaturama dolazi do značajnog pada učinkovitosti, posebno pri visokim brzinama pražnjenja, što može dovesti do ozbiljnih pogrešaka u procjeni stanja napunjenosti (SOC). Ovaj fenomen nije svojstven samo litij-ionskim ćelijama, jer i druge kemije ćelija također pokazuju pogoršanje performansi pri niskim temperaturama [1]. Na slici 2.7. opisan je idealni raspon radne temperature Li-ionske ćelije. Rad izvan ovog raspona uzrokuje ozbiljan gubitak kapaciteta. Taj gubitak kapaciteta je dijelom privremen, a dijelom trajan. Propadanje cikličkog vijeka razlikuje se pri visokim i niskim temperaturama, budući da različiti mehanizmi degradacije pogoršavaju bateriju. Pri niskim temperaturama dolazi do gubitka kapaciteta zbog veće aktivacijske energije potrebne za kemijske reakcije i slabije difuzije iona. Međutim, ovaj gubitak kapaciteta je privremen i vraća se kada se temperatura vrati na nominalnu razinu. Niska temperatura pri normalnom pražnjenju nema trajni utjecaj na smanjenje kapaciteta, ali tijekom punjenja može doći do fenomena nakupljanja litija. Nakupljanje litija događa se zbog sporije interkalacije na anodi u usporedbi s brzinom reintegracije [9].



Slika 2.7. Ovisnost životnog ciklusa Li-ionske ćelije i temperature [10]

Visoke temperature mogu dovesti do pregrijavanja, što može izazvati termalni bijeg, koji može rezultirati požarom ili eksplozijom.

3. MJERENJE DINAMIČKOG RADA BATERIJSKE ČELIJE

Za potrebe određivanja karakteristika ćelija potrebno je provoditi pokuse punjenja i pražnjenja ćelija (baterijska ćelija INR18650-35E, slika 3.1) korištenjem posebnog uređaja (upravljanog punjača iCharger 4010 DUO, slika 3.2). iCharger 4010 DUO je napredni uređaj koji omogućava upravljanje procesom punjenja i pražnjenja, prema ugrađenim procedurama ili korisnički zadanim. Tijekom punjenja, uređaj omogućuje korisnicima postavljanje različitih parametara kao što su napon punjenja, struja punjenja i različiti režimi kako bi se postigla optimalna punjenja baterije. Ovaj proces omogućuje bateriji da se napuni na maksimalni kapacitet uz poštivanje sigurnosnih ograničenja. S druge strane, tijekom pražnjenja, iCharger 4010 DUO omogućuje korisnicima kontrolirano pražnjenje baterijske ćelije pri željenim strujama i napone pražnjenja. Ovaj sustav precizno bilježi sve relevantne podatke o punjenju i pražnjenju, uključujući kapacitet baterije, napon, struju i vrijeme, što omogućuje detaljnu analizu performansi INR18650-35E ćelije i usporedbu stvarnih rezultata s očekivanim vrijednostima.



Slika 3.1. Baterija INR18650-35E



Slika 3.2. iCharger 4010 DUO

3.1 Postupak punjenja i pražnjenja

Baterija INR18650-35E karakterizira se različitim C razinama za punjenje i pražnjenje kako bi se definirala brzina tih procesa. U ovom slučaju, za punjenje i pražnjenje ove ćelije korištene su tri različite C razine. Standardno punjenje primjenjuje se kada baterija puni prema uobičajenim standardima i proizvođačkim preporukama, te u ovom kontekstu iznosi 0.5C. Konkretno, to znači da se baterija puni strujom od 1,700 mA[11], što predstavlja brzinu punjenja od 0.5C s obzirom na njezin kapacitet od 3,400 mAh[11]. S druge strane, ciklus trajanja odnosi se na testiranje baterije kroz niz ciklusa punjenja i pražnjenja kako bi se procijenila njezina trajnost. U ovom slučaju, brzina tijekom ciklusa iznosi 1,020 mA[11], što predstavlja 0.3C. Što se tiče pražnjenja, maksimalna dopuštena brzina pražnjenja iznosi 2.35C, dok su za ciklus trajanja i standardno pražnjenje korištene C razine od 1C i 0.2C, respektivno. Ove C razine su važne jer određuju kako brzo se baterija može puniti i pražnjenje, što utječe na njezinu učinkovitost i vijek trajanja u različitim primjenama.

Punjenje INR18650-35E baterije:

1. Povezivanje punjača: Priključite iCharger 4010 DUO s upravljanim izvorom Rigol DP811, koji isporučuje stabilnih 40 volta i 5 ampera i uključuje odgovarajuće kablove.
2. Odabir načina punjenja: Uključuje se punjač i odabire se odgovarajući način punjenja za bateriju. Ovdje se odabire LiPo (ili odgovarajući za litij-ionske baterije) način punjenja jer je INR18650-35E litij-ionska baterija.
3. Postavljanje parametra punjenja: Konfigurira se punjač s točnim postavkama za punjenje baterije. Bitan je oprez, struja punjenja mora biti unutar sigurnih granica za bateriju, provjeravanjem u specifikacije baterije [11].
4. Spajanje baterije: Spaja se bateriju na izlazne stezaljke punjača, provjeravajući ispravnu polarizaciju pri spajanju.

Pražnjenje INR18650-35E baterije:

1. Spajanje baterije: Povezivanje baterije s ulaznim stezaljkama punjača, pazeći na ispravnu polarizaciju.
2. Odabir načina pražnjenja: Uključuje se punjač i odabire se odgovarajući način pražnjenja, koji može uključivati "Pražnjenje," "Skladištenje" ili "Ciklus" ovisno o potrebama. Za obično pražnjenje, "Pražnjenje" je dovoljno.

3. Postavljanje parametra pražnjenja: Konfigurira se punjač s odgovarajućim parametrima pražnjenja, uključujući struju pražnjenja. Ova struja treba biti unutar sigurnih granica za bateriju, što možete provjeriti u specifikacijama baterije [11].

Kada je sve pravilno postavljeno, pokreće se postupak punjenja i/ili pražnjenja. Punjač će pratiti i kontrolirati postupak punjenja i/ili pražnjenja, prikazujući važne informacije poput napona, struje i kapaciteta na svom zaslonu. Tijekom punjenja i pražnjenja potrebno je povremeno provjeriti zaslon punjača radi upozorenja ili neobičnih očitavanja. Litij-ionske baterije treba pažljivo nadgledati tijekom punjenja zbog sigurnosti. Više informacija može se pronaći unutar korisničkog priručnika iCharger 4010 DUO [12]. Kada punjač naznači da je baterija potpuno napunjena i/ili ispražnjena, potrebo je odvojiti bateriju od punjača pazeći da kablovi ne dođu u kontakt. Prikazano na Slici 3.3.



Slika 3.3. Postupak punjenja i pražnjenja

3.2 Obrada podataka u Matlabu

Podaci dobiveni tijekom procesa punjenja ćelije pohranjuju se u CSV formatu kako bi se omogućila jednostavna i strukturirana analiza. Nakon što su podaci pohranjeni u ovom formatu, lako ih je uvesti u program poput Microsoft Excela radi daljnje obrade. Potom, što su podaci obrađeni i analizirani u Excelu, mogu se eksportirati u Matlab. Matlab je programski platforma posebno dizajnirana za inženjere i znanstvenike kako bi analizirali i projektirali sustave i proizvode koji transformiraju naš svijet. MATLAB jezik baziran je na matricama koji omogućuje najprirodniji izraz računalne matematike [13]. Matlab omogućuje naprednu obradu podataka, modeliranje i generiranje detaljnih grafikona koji pružaju dublje razumijevanje performansi baterijske ćelije.

```
measurement1 = {'Discharge1.csv', 'Charge1.csv'};           % Measurement files
measurement2 = {'Discharge2.csv', 'Charge2.csv'};
measurement3 = {'Discharge3.csv', 'Charge3.csv'};

capInitial = 3.35;                                         % Nominal capacity of the cell in Ah
minV = 2.65;                                               % Minimum voltage of the cell in V
maxV = 4.2;                                                 % Maximum voltage of the cell in V
```

Slika 3.4. Prvi dio Matlab koda

U prvom dijelu Matlab koda slika 3.4., postavlja varijable koje će se koristiti za analizu podataka iz CSV datoteka koje su navedene u tri skupa datoteka (mjerjenja pražnjenja i punjenja). Također postavlja početne vrijednosti za nominalni kapacitet baterije, minimalni napon baterije i maksimalni napon baterije. Navedene varijable i njihove vrijednosti bit će korištene u kasnijem dijelu programa.

```
clear all
clc
%% Inicijalizacija
headers = {'Zeit [s]', 'Input [V]', 'Voltage [V]', 'Current [A]', ...
          'Capacity [mAh]', 'Power [W]', 'Energy [Wh]', 'Cell 1 [V]', ...
          'Cell 2 [V]', 'Cell 3 [V]', 'Cell 4 [V]', 'Cell 5 [V]', ...
          'Cell 6 [V]', };
fields = {'time', 'voltageInput', 'voltageOutput', 'current', 'capacity', ...
         'power', 'energy', 'cell1', 'cell2', 'cell3', 'cell4', 'cell5', ...
         'cell6'};

run configFile.m
```

Slika 3.5. Drugi dio Matlab koda

Drugi dio Matlab koda koji se vidi na slici 3.5. služi za pripremu radnog okruženja i inicijalizaciju varijabli prije obrade i analize podataka. Prvo, koriste se naredbe 'clear all' i 'clc' kako bi očistili sve postojeće varijable i pročistili komandni prozor, čime se osigurava čisto radno okruženje. Nakon toga, sekcija označena komentarom "Inicijalizacija" definira dvije važne varijable: headers i fields. Headers sadrži nazive stupaca koji se očekuju u podacima koji će se kasnije učitati iz datoteke, dok fields sadrži nazive polja koja će se koristiti za pohranu tih podataka u MATLAB strukturi. Ključna funkcija ovog koda je 'run configFile', gdje se poziva skripta 'configFile' koja je vidljiva na slici 3.4.

```
%% Import podataka

for numFiles = 1:length(measurement1)
[~, sheets]=xlsfinfo(measurement1{numFiles});
fprintf('\nReading: %s\n',measurement1{numFiles});
PULSEDData=[];
tic

for theField = 1:length(fields)
    PULSEDData.(fields{theField}) = [];
end

    for theSheet = 1:length(sheets)
        fprintf('\n Processing sheet: %s\n', sheets{theSheet});
        [num,txt,row] = xlsread (measurement1{numFiles}, sheets{theSheet});
        for theHeader = 1:length(headers),
            ind = strcmp(txt,headers{theHeader});
            PULSEDData.(fields{theHeader})=[PULSEDData.(fields{theHeader});num(:,ind==1)];
        end
    end

t = toc;
fprintf('\n    Import of %s finished in %.1fs\n',measurement1{numFiles},t)

name = strsplit(measurement1{numFiles},'.');

data1.(name{1}) = PULSEDData;
save('Measurements1.mat','data1');

end
```

Slika 3.6. Treći dio Matlab koda

Treći dio Matlab koda koji se nalazi na slici 3.6. provodi postupak uvoza podataka iz Excel datoteka radi daljnje analize. Petlja 'for' iterira kroz niz 'measurement1', koji sadrži nazive Excel datoteka koje se trebaju učitati. Za svaku datoteku, kod koristi funkciju 'xlsfinfo' za dobivanje informacija o dostupnim listovima unutar Excel datoteke. Nakon toga, kod ispisuje poruku koja označava koja se datoteka trenutno učitava. Varijabla 'PULSEDData' inicijalizira se kao prazna

struktura koja će sadržavati učitane podatke, a zatim se petljom 'for' inicijaliziraju prazna polja unutar te strukture prema definiranim poljima u nizu 'fields'. Sljedeći korak uključuje učitavanje podataka iz Excel datoteke za svaki dostupni list i provjeru usklađenosti stupaca s definiranim zaglavljima ('headers'). Učitani podaci dodaju se u odgovarajuće polje unutar strukture 'PULSEDData'. Nakon što su svi listovi učitani i podaci pohranjeni u strukturi, kod mjeri ukupno vrijeme uvoza koristeći 'tic' i 'toc' funkcije, a zatim ispisuje to vrijeme. Naziv datoteke se razdvaja kako bi se dobilo osnovno ime datoteke, a učitani podaci pohranjuju se u Matlab datoteku ('Measurements1.mat') koristeći funkciju 'save'. Ovaj kod se ponavlja za tri različite Excel datoteke kako bi se dobili ('Measurements2.mat') i ('Measurements3.mat') koji u sebi sadrže podatke o punjenju i pražnjenju baterije. Ovaj kod olakšava uvoz, pripremu i pohranu podataka iz Excel datoteka za daljnju analizu.

```
run configFile.m

% Load configuration file
load('Measurements1.mat')
load('Measurements2.mat')
load('Measurements3.mat')
```

Slika 3.7. Četvrti dio Matlab koda

Četvrti dio Matlab koda je izrazito kratak i prikazan je na slici 3.7., kod prvo izvršava skriptu 'configFile.m' pomoću naredbe 'run configFile.m'. Nakon toga, kod koristi funkcije 'load' za učitavanje tri različite Matlab datoteke: 'Measurements1.mat', 'Measurements2.mat', i 'Measurements3.mat'. Ove datoteke sadrže podatke koji su prethodno učitani, pripremljeni i pohranjeni u strukturi, kako je opisano u prethodnim dijelovima koda. Korištenjem 'load' funkcije, podaci i strukture koje su pohranjeni u tim datotekama ponovno se učitavaju u MATLAB okruženje kako bi bili dostupni za daljnju analizu i obradu.


```

figure('units','normalized','outerposition',[0 0 0.5 0.5])
plot(data1.Charge1.capacity,data1.Charge1.cell1)
hold on
plot(data2.Charge2.capacity,data2.Charge2.cell1)
hold on
plot(data3.Charge3.capacity,data3.Charge3.cell1)
legend('0.2C','0.3C','0.5C','Location','northwest')
title('Krivulje punjenja')
xlabel('Kapacitet (mAh)')
ylabel('Napon (V)')
grid on
hold off

set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
print('Figures/Charge.png','-dpng','-r600')

figure('units','normalized','outerposition',[0 0 0.5 0.5])
plot(data1.Discharge1.capacity*(-1),data1.Discharge1.cell1)
hold on
plot(data2.Discharge2.capacity*(-1),data2.Discharge2.cell1)
hold on
plot(data3.Discharge3.capacity*(-1),data3.Discharge3.cell1)
legend('0.2C','1C','2.35C','Location','Best')
title('Krivulja pražnjenja')
xlabel('Kapacitet (mAh)')
ylabel('Napon (V)')
grid on
hold off

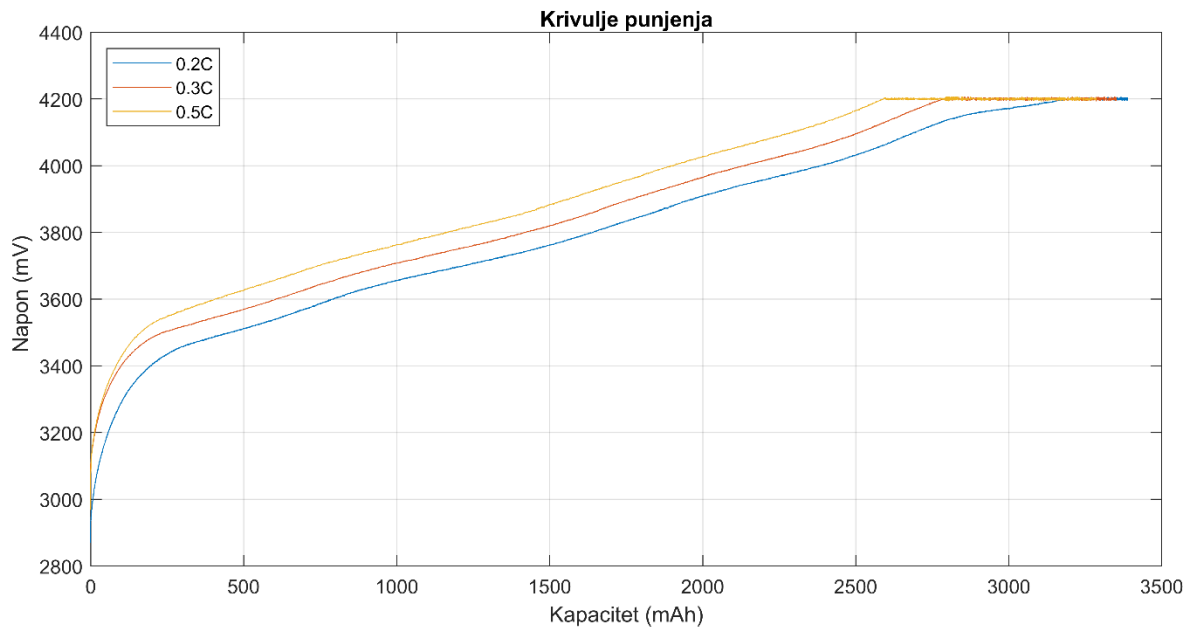
set(gcf,'PaperPositionMode','auto')
print('Figures/Discharge.png','-dpng','-r600')

```

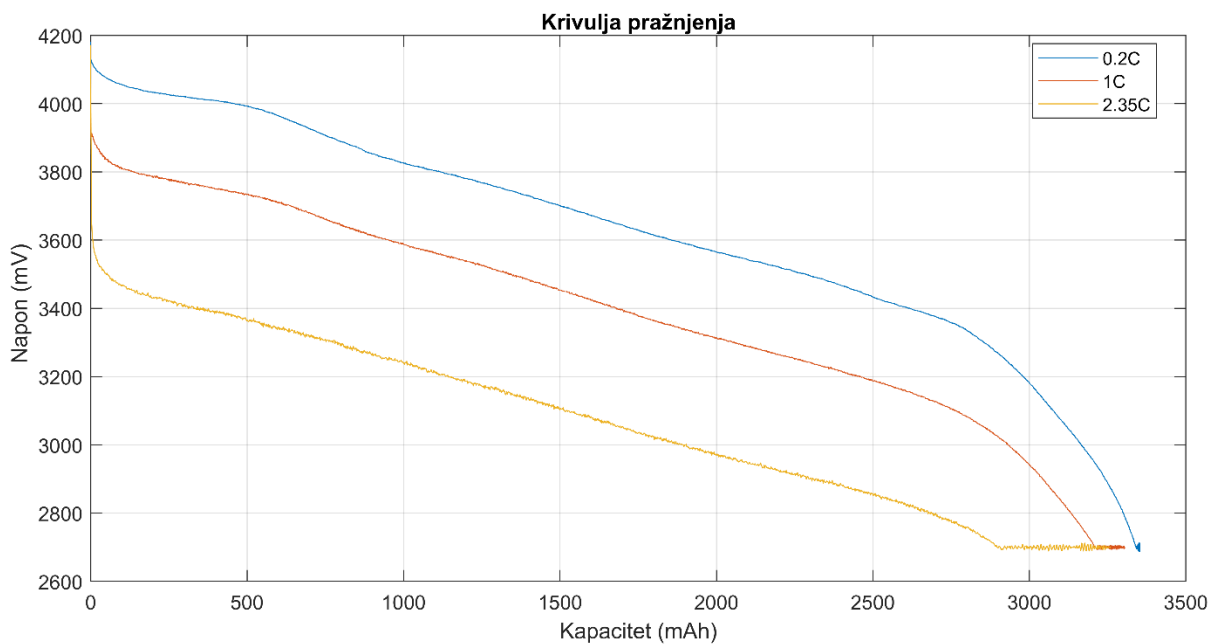
Slika 3.8. Peti dio Matlab koda

Peti dio Matlab koda koji se nalazi na slici 3.8. generira dvije grafičke figure koje vizualiziraju krivulje punjenja i pražnjenja baterija iz različitih skupova podataka. Prvo se stvara nova figura s postavkama za veličinu i poziciju pomoću 'figure' naredbe. Zatim, za svaki od tri skupa podataka, koristi se 'plot' funkcija kako bi se iscrtale krivulje koje prikazuju kapacitet baterije u mili amper-satima (mAh) u ovisnosti o naponu u voltima (V). Nakon svakog plot poziva, 'hold on' naredba omogućuje dodavanje više krivulja na isti graf. Naredba 'legend' dodaje legendu s oznakama ("0.2C", "0.3C", "0.5C" za krivulje punjenja i "0.2C", "1C", "2.35C" za krivulje pražnjenja) kako bi se lakše razumjelo što svaka krivulja predstavlja. Naslov grafikona ('title'), oznake osi ('xlabel' i 'ylabel'), te prikaz mreže ('grid on') dodaju se radi poboljšanja

čitljivosti grafa. Nakon svih tih postavki, 'hold off' se koristi kako bi se onemogućilo daljnje dodavanje elemenata na graf. S 'set(gcf,'PaperPositionMode','auto')' postavkom se omogućava automatsko pozicioniranje za ispis na papiru. Konačno, s print naredbom se sprema trenutno prikazana figura kao visokokvalitetna PNG datoteka s nazivom ("Charge.png" i "Discharge.png") i rezolucijom od 600 DPI. Ovaj kod omogućava generiranje i spremanje grafičkih prikaza krivulja punjenja koji se može vidjeti na slici 3.9. i krivulje pražnjenja baterija koja se može vidjeti na slici 3.10.



Slika 3.9. Krivulje punjenja



Slika 3.10. Krivulje pražnjenja

4. MODELIRANJE BATERIJSKOG PAKETA

Pri izradi baterijskog paketa, važno je izbjegavati miješanje baterije različitih kemija. Različite kemije podrazumijeva da je elektrokemijski sastav ćelije drugačiji, te da imaju različite karakteristike punjenja, pražnjenja i temperature, te miješanje može rezultirati neusklađenim radom baterija. To može uzrokovati neravnomjerno punjenje ili pražnjenje, nejednaku raspodjelu napona i kapaciteta, te potencijalno nepredvidljive probleme kao što su pregrijavanje ili curenje elektrolita. Stoga, kada se izrađuje baterijski paket, koristite se baterije iste kemije kako bi se osigurala kompatibilnost, sigurnost i optimalna izvedba cijelog sustava.

Također, preporučeno je korištenje ćelija sa istim stanjem napunjenosti (SOC) jer postojanje naponske različitosti ćelija u paralelnom spoju uzrokuje pojavu unutrašnjeg napona (ćelija nižeg napona se puni na račun ćelije višeg napona) koji bespovratno prazni obje ćelije. S druge strane, kod serijskog spoja ista struja prolazi kroz obje ćelije koje imaju drugačiju radnu točku, pa se različito dopunjavaju ili prazne - napunjenija ćelija se ne može do kraja isprazniti, a ćelija nižeg napona se ne može nikada potpuno napuniti, što potencijalno smanjuje njezin kapacitet, skraćuje vijek trajanja i može uzrokovati oštećenje. Nadalje, korištenje baterijskih ćelija s različitim SOC-om može otežati upravljanje baterijskim sustavom i smanjiti učinkovitost.

Kod spajanja ćelija u paralelne veze baterije, koriste se vodiči jednake duljine. Tako se osigurava jednak otpor za svaku bateriju u paralelnom spoju, čime se omogućuje ravnoteža opterećenja. To sprečava preopterećenje jedne baterije u odnosu na druge i time se smanjuje mogućnost nejednake distribucije opterećenja i skraćivanja vijeka trajanja baterijskog sustava. Osim toga, korištenje vodiča iste duljine smanjuje gubitke energije zbog otpora u samom vodiču, što poboljšava učinkovitost baterijskog sustava. Naposljetku, jednolike duljine vodiča olakšavaju instalaciju i identifikaciju povezivanja, smanjujući mogućnost pogrešaka tijekom montaže i olakšavajući upravljanje i održavanje baterijskog sustava.

U ovom diplomskom radu rađena su mjerenja na bateriji, sastavljena je od već navedene litij-ionska punjive ćelija INR18650-35E čije se specifikacije mogu naći na [11]. Povezano je 30 ćelija u paralelu i 13 takvih paralelnih blokova u seriju, kao što se može vidjeti na slici 4.1.



Slika 4.1. Baterijski paket

Koristeći parametre jedne ćelije baterijskog paketa i jednostavnim Matlab kodom prikazanim na Slici 4.2. možemo izračunati ukupni kapacitet i napon baterijskog paketa.

```
% Karakteristike pojedinačne ćelije
kapacitet_celije = 3.4; % Kapacitet pojedinačne ćelije u Ah (amper-sati)
napon_celije = 3.6; % Napon pojedinačne ćelije u V (voltima)

% Broj ćelija u seriji i paralelno
broj_celija_serija = 13;
broj_celija_paralela = 30;

% Ukupni kapacitet paketa
kapacitet_paketa = kapacitet_celije * broj_celija_paralela;

% Ukupni napon paketa
napon_paketa = napon_celije * broj_celija_serija;

% Rezultati
disp(['Ukupni kapacitet baterijskog paketa: ', num2str(kapacitet_paketa), ' Ah']);
disp(['Ukupni napon baterijskog paketa: ', num2str(napon_paketa), ' V']);
```

```
Ukupni kapacitet baterijskog paketa: 102 Ah
Ukupni napon baterijskog paketa: 46.8 V
```

Slika 4.2. Parametri paketa

Za povezivanje ćelija izabrana je traka od nikla, pri čemu je svaka traka izrađena od 99.9% čistog nikla dimenzija 0.2mm x 6mm. Svaka nikl traka je sposobna nositi struju od 3.125 ampera, s mogućnošću izdržavanja do 12 ampera. Materijali i dimenzije su pažljivo izabrani uzimajući u obzir proračune same baterije i njezine potrebe.

Jedan od bitnih faktora u izradi baterije je izolacija, baterija je obavijena kapton trakom, materijal koji je otporan na visoke temperature. Kapton traka pruža izolaciju i zaštitu unutar paketa, sprečavajući kratke spojeve i osiguravajući sigurnost baterijskog sistema (slika 4.3).



Slika 4.3. Kapton traka

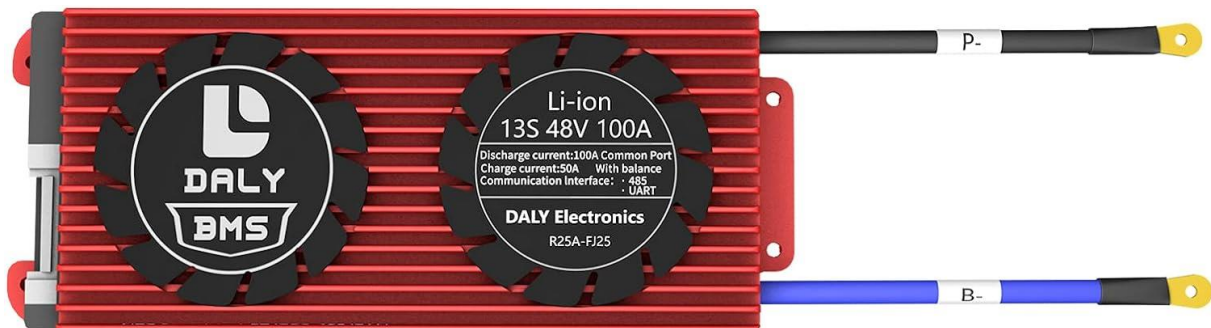
Uz kapton traku za izolaciju koristi se i EVA(Etilen-vinil-acetat) folija, fleksibilna i termički stabilna folija koja štiti baterijske ćelije od mehaničkih oštećenja, korozije te osigurava termičku izolaciju unutar baterije (Slika 4.4.). Ovi materijali će znatno produžiti životni vijek baterije.



Slika 4.4. EVA folija

Baterija svojim radom generira toplinu, kako bi se regulirala temperatura baterije koristi se hladnjak (engl. heat sink) koji upija i odvodi toplinu. On djeluje kao pasivni rashladni sistem i sprječava pregrijavanje baterije. Na taj način, pomaže u sprječavanju oštećenja komponenata zbog pregrijavanja, poboljšava performanse i dugovječnost uređaja.

Za upravljanje baterijom koristi se (BMS). To je elektronski sistem koji nadgleda, upravlja i štiti bateriju. Za ovu bateriju izabran je Daly 13s 48V 100A Bluetooth (Slika 4.5.) koji podržava baterijske pakete sa 13 serijski spojenih ćelija, naponom od 48V i maksimalnom strujom do 100A. Ovaj BMS pruža funkcije kao što su balansiranje ćelija, zaštita od prenapona, preniskog napona, preopterećenja i pregrijavanja, kao i mogućnost povezivanja putem Bluetootha radi daljinskog nadgledanja i upravljanja.



Slika 4.5. Daly 13s 48V 100A Bluetooth

Modeliranje baterije je proces stvaranja matematičkog ili računalnog modela koji opisuje ponašanje baterije tijekom različitih uvjeta punjenja, pražnjenja i rada. Modeli baterije mogu se kategorizirati u elektrokemijski model, matematički model, i električni ekvivalentni model kruga. Vrsta modeliranja koja se koristi ovisi o području primjene. Primjerice, elektrokemijski modeli široko se koriste od strane istraživača i proizvođača tijekom razvojne faze. Matematički modeli se često koriste u istraživačke svrhe i izazovno je izvoditi matematičke modele za baterije jer su kompleksna elektrokemijska pojava. Električni ekvivalentni modeli su jednostavni, lako se izvode, i manje su precizni [14].

Elektrokemijski modeli izvode se izravno uzimajući u obzir elektrokemijske reakcije koje se događaju unutar baterije. Parametri elektrokemijskog modela su obilni i stoga je vremenski zahtjevno odrediti sve parametre. Stoga se samo nekoliko parametara dobiva putem eksperimentiranja [15].

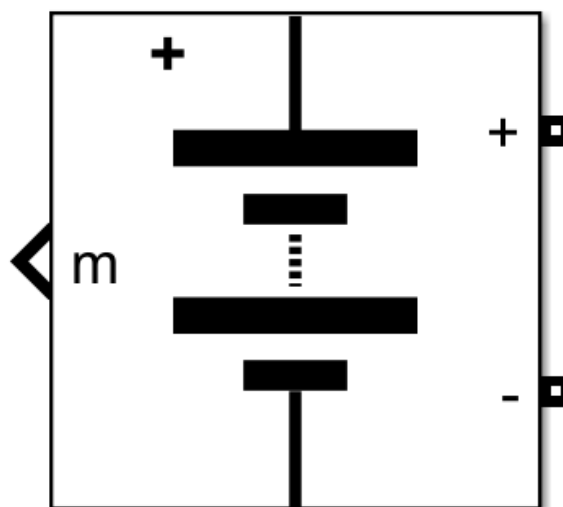
Matematički model je pojednostavljen elektrokemijski model u kojem se napon baterijskog terminala predstavlja u odnosu na SoC (stanje napunjenosti baterije) i baterijsku struju. Postoji

nekoliko matematičkih modela poput Shepherdove jednačbe, Unnewehr univerzalnog modela, Nernstovog modela i kombiniranog modela [14].

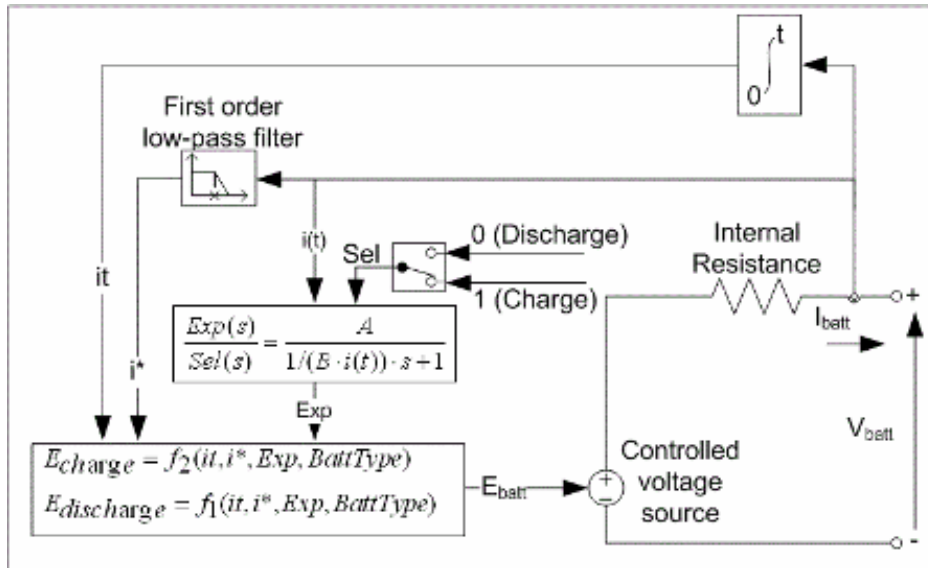
Ekvivalentni električni model kruga je sažeti prikaz ponašanja baterije koji koristi otpornike, kondenzatore i induktore kako bi simulirao elektrokemijske procese koji se odvijaju unutar baterije. Ovaj model olakšava analizu i dizajn baterijskih sustava smanjujući složene elektrokemijske reakcije na ekvivalentni krug. Komponente ekvivalentnog modela kruga predstavljaju unutarnji otpor, kapacitet i napon baterije, među ostalim aspektima njenog ponašanja. Modeli su korisni jer omogućuju inženjerima i znanstvenicima da bolje razumiju kako se baterija ponaša pod različitim opterećenjima i uvjetima, te da predviđaju njezine performanse. U ovom diplomskom radu za potrebe modeliranja baterijskih paketa i baterijska ćelija, već spomenute Li-ionska baterije INR18650-35E, koristi se Matlab i SolidWorks softveri.

4.1 Modeliranje u Matlabu

U Matlab grafičkom uređivaču Simulink stvoren je i validiran model litij-ionske baterije temeljen na Shepherdovom modelu (Slika 4.6) [16]. Slika 4.7 predstavlja blok dijagram podsustava unutar generičkog modela litij-ionske baterije. Model predstavlja izvor napona koji je kontroliran trenutnim stanjem napunjenosti (SOC) baterije. Glavna ideja ovog pristupa je pojednostaviti proces dobivanja ulaznih parametara za model baterije iz proizvođačkih specifikacija. Različite funkcije unutar modela koriste se kako bi se uzela u obzir ovisnost napona o različitim režimima rada.

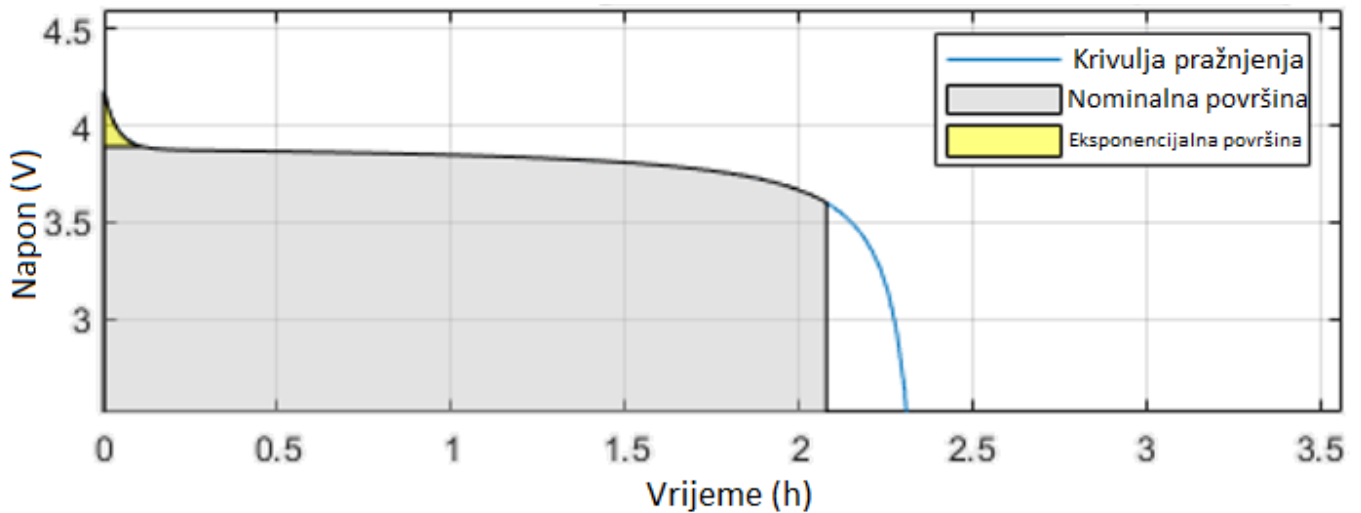


Slika 4.6. Blok modela litij-ionske baterije [16].



Slika 4.7. Ekvivalentni krug koji modelira blok [16][17]

Karakteristike pražnjenja litij-ionske baterije (Slika 4.8.) mogu se podijeliti u različite regije, često poznate kao eksponencijalna zona i nominalna zona. Tijekom početne faze pražnjenja, napon baterije postupno i relativno sporo opada, što se naziva eksponencijalna zona. U ovoj zoni, napon ostaje relativno stabilan dok se kapacitet postupno smanjuje. Kako pražnjenje napreduje, pad napona postaje linearniji, što ukazuje na prijelaz baterije u nominalnu zonu. U ovoj fazi, napon opada brže kako se dostupni kapacitet smanjuje. Nominalna zona obično obuhvaća značajan dio ciklusa pražnjenja baterije sve do dosezanja njezinog konačnog napona pražnjenja. Razumijevanje ovih zona je ključno za praćenje ponašanja baterije tijekom upotrebe, omogućavajući korisnicima i uređajima preciznije procjene preostalog vijeka trajanja baterije i sprječavanje prekomjernog pražnjenja, što može imati štetne učinke na performanse i životni vijek baterije.



Slika 4.8. Tipična krivulja pražnjenja litij-ionske baterije

Na slici 4.8, prikazana je tipična krivulja pražnjenja baterije. Linija označena plavom bojom posjeduje nelinearne karakteristike i opisana je jednačbom (6-1) [17] u Shepherdovom modelu, kada je struja punjenja pozitivna tj. $i^* > 0$.

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (6-1)$$

Pri čemu je:

E_0 – Konstantni napon (V),

K – Polarizacijski otpor (Ω),

i^* – Dinamika struje niskih frekvencija (A),

i – Struja baterije (A),

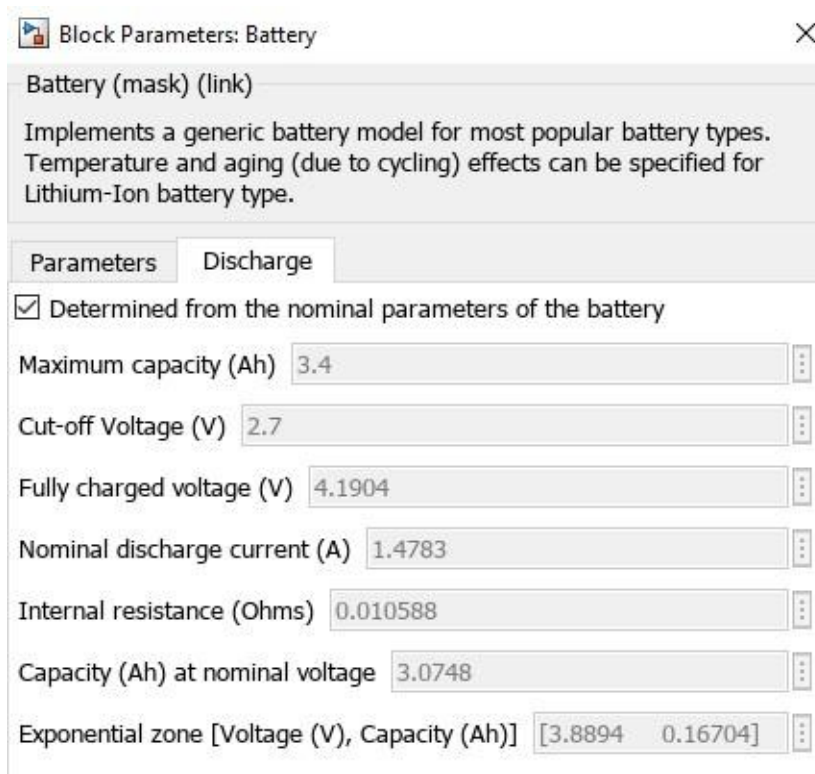
it – Izvučeni kapacitet (Ah),

Q – Maksimalni kapacitet baterije (Ah),

A – Eksponecijalni napon (V),

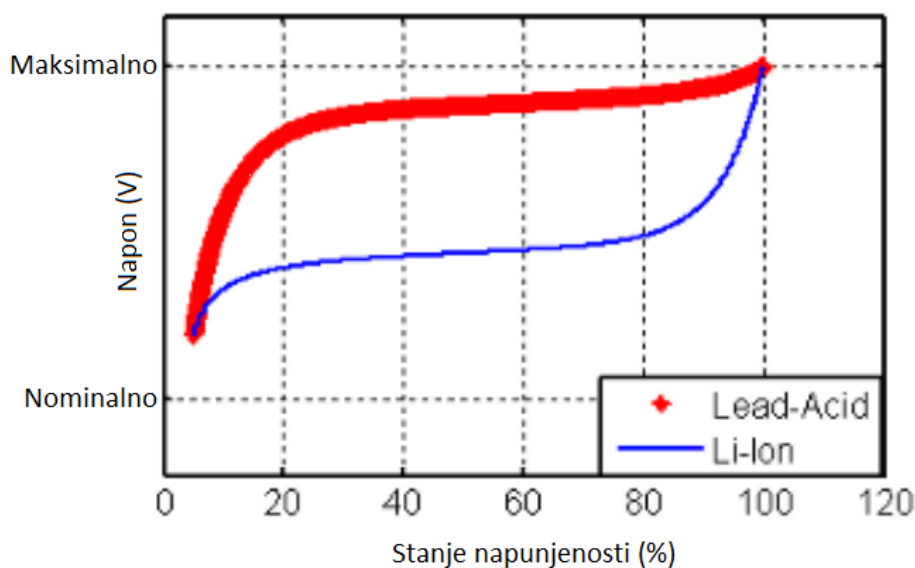
B – Eksponecijalni kapacitet (Ah^{-1}).

Proces izračuna svih parametara jednačbe je prekomplikiran za ovaj diplomski rad, stoga su izračunati korištenjem generičkog bloka litij-ionske baterije u Matlabu kao što se vidi na Slici 4.9.



Slika 4.9. Parametri jednadžbe.

Dok je na slici 4.10. prikazana je krivulja punjenja baterije, opisana jednadžbom (6-2)[17]. Nominativno ima inverzni oblik oblika krivulje pražnjenja (počevši od prazne baterije, kroz razdoblje brzog postavljanja nominalnog napona, zatim razdoblje punjenja pri nominalnom naponu, i naposljetku eksponencijalno područje kada se napon bez opterećenja obnavlja). Budući da struja punjenja ima suprotan znak ($i^* < 0$), otpor polarizacije se mijenja, pa je funkcija napona punjenja malo drugačija [18].



Slika 4.10. Tipična krivulja punjenja litij-ionske baterije [16].

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (6-2)$$

Pretpostavke modela [19]

- Unutarnji otpor pretpostavlja se konstantnim tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja i ne mijenja se s amplitudom struje.
- Parametri modela deduciraju se iz karakteristike pražnjenja i pretpostavlja se da su isti za punjenje.
- Kapacitet baterije ne mijenja se s amplitudom struje.
- Temperatura ne utječe na ponašanje modela.
- Baterija nema efekt pamćenja.

Ograničenja modela [19]

- Minimalni napon baterije bez opterećenja je 0 V, a maksimalni napon baterije je $2 \cdot E_0$.
- Minimalni kapacitet baterije je 0 Ah, a maksimalni kapacitet je Q. Stoga, maksimalno stanje napunjenosti (SOC) ne može biti veće od 100% ako je baterija prepunjena.

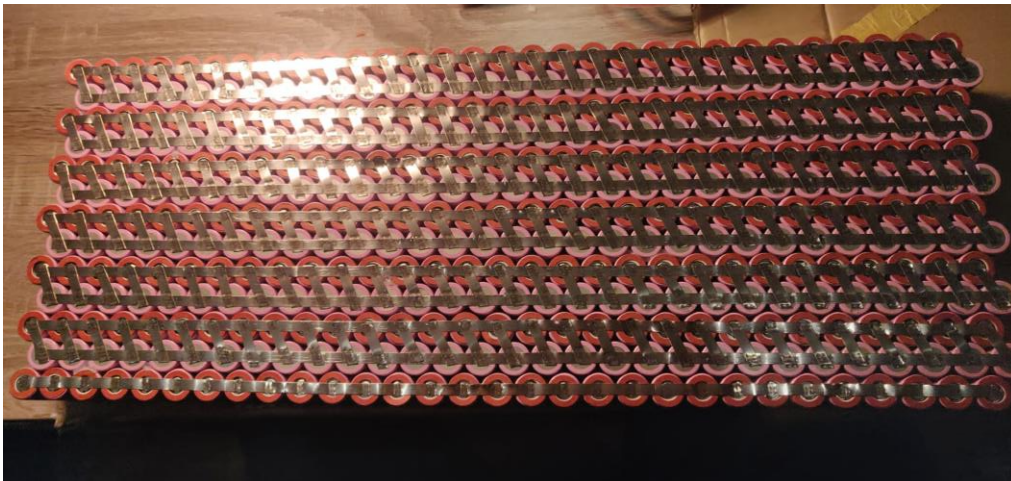
4.2 Modeliranje u SolidWorksu

SolidWorks je softverski paket koji se koristi za 3D modeliranje računalno potpomognutog dizajna (CAD) i računalno potpomognute inženjerske analize (CAE). Razvijen od strane tvrtke Dassault Systèmes, SolidWorks pruža alate za stvaranje, simuliranje i dokumentiranje 3D modele.

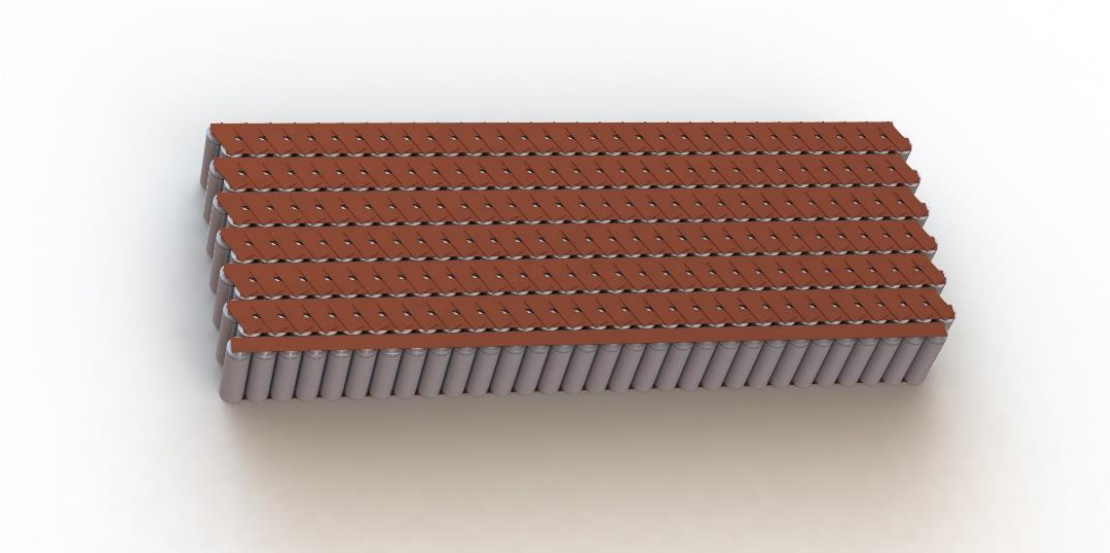
SolidWorks omogućuje stvaranje 3D modela dijelova i sklopova pomoću različitih tehnika poput ekstruzije, rezanja, obrade, zakretanja itd. Softver pruža inženjerima izvođenje različitih simulacija kako bi procijenili kako će se dizajn ponašati pod različitim uvjetima, uključujući termalne, dinamičke i strukturalne analize. Kao i mogućnost generiranje 2D tehničkih crteža iz njihovih 3D modela. Ovi crteži mogu se koristiti za proizvodnju i komunikaciju s drugim dijelovima tima. Nadalje, mogu se stvarati kompleksni sklopovi s mehanizmima, dijelovima i komponentama koji međusobno djeluju. Ovo je korisno za vizualizaciju i analizu kretanja dijelova. Konačno, SolidWorks se često koristi u sklopu šireg procesa razvoja proizvoda. Može se integrirati s drugim softverima, kao što su softveri za upravljanje dokumentacijom,

simulaciju fluida, i drugi. SolidWorks je široko korišten u mnogim industrijama, uključujući strojarstvo, elektroinženjering, medicinsku industriju, arhitekturu itd. Koristi se za dizajn proizvoda, prototipiranje, simulacije i proizvodnju.

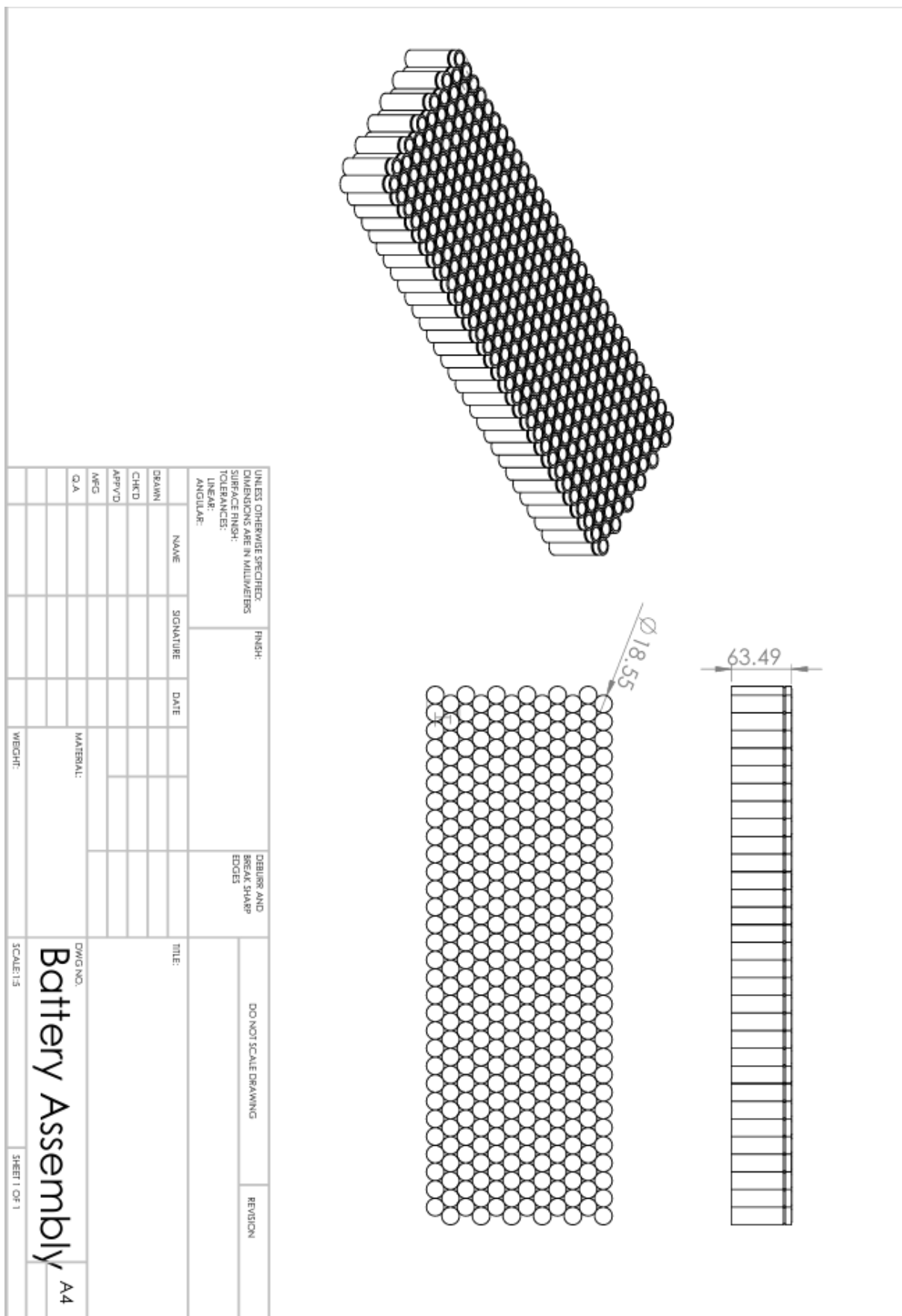
U ovom radu koristimo SolidWorks kako bih izradili 3D model baziran na izgledu već postojećeg baterijskog paketa slika 4.11 dok se na slici 4.12 vidi sam 3D model. Zatim generiramo 2D tehnički crtež slika 4.13 iz 3D modela.



Slika 4.11. Baterijski paket



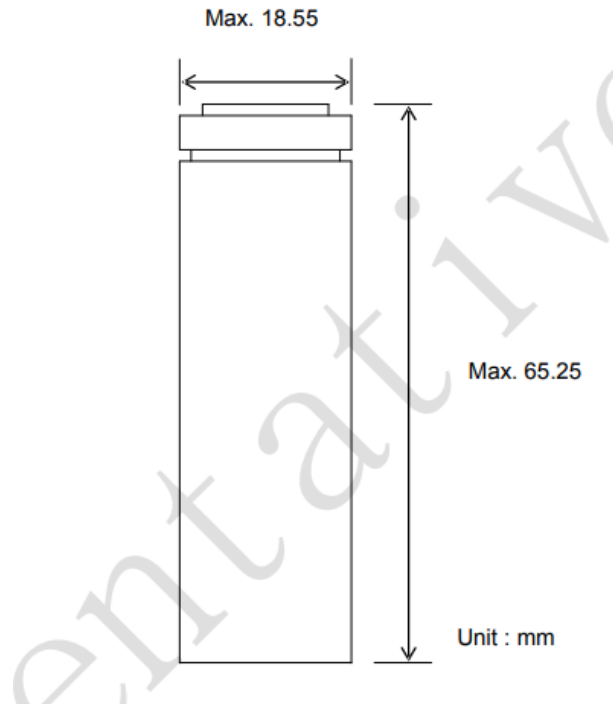
Slika 4.12. 3D model baterijskog paketa



Slika 4.13. 2D tehnički crtež

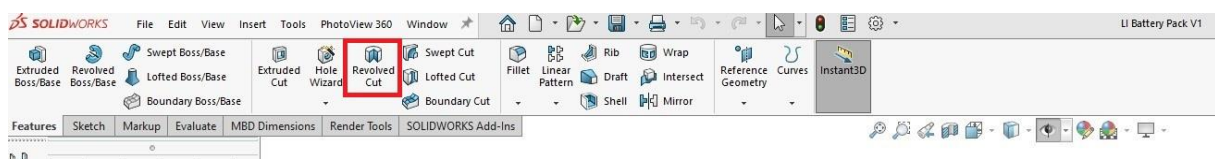
4.2.1 Postupak izrade:

Počinje se s crtanjem skice za pojedinačnu ćeliju baterije prema dimenzijama iz specifikacija baterije [11] kao što se vidi na slici 4.14.



Slika 4.14. Dimenzije INR18650-35E [11]

Nakon što je skica napravljena, koristi se "Revolve Command" kako bi se stvorio čvrsti cilindrični objekt.



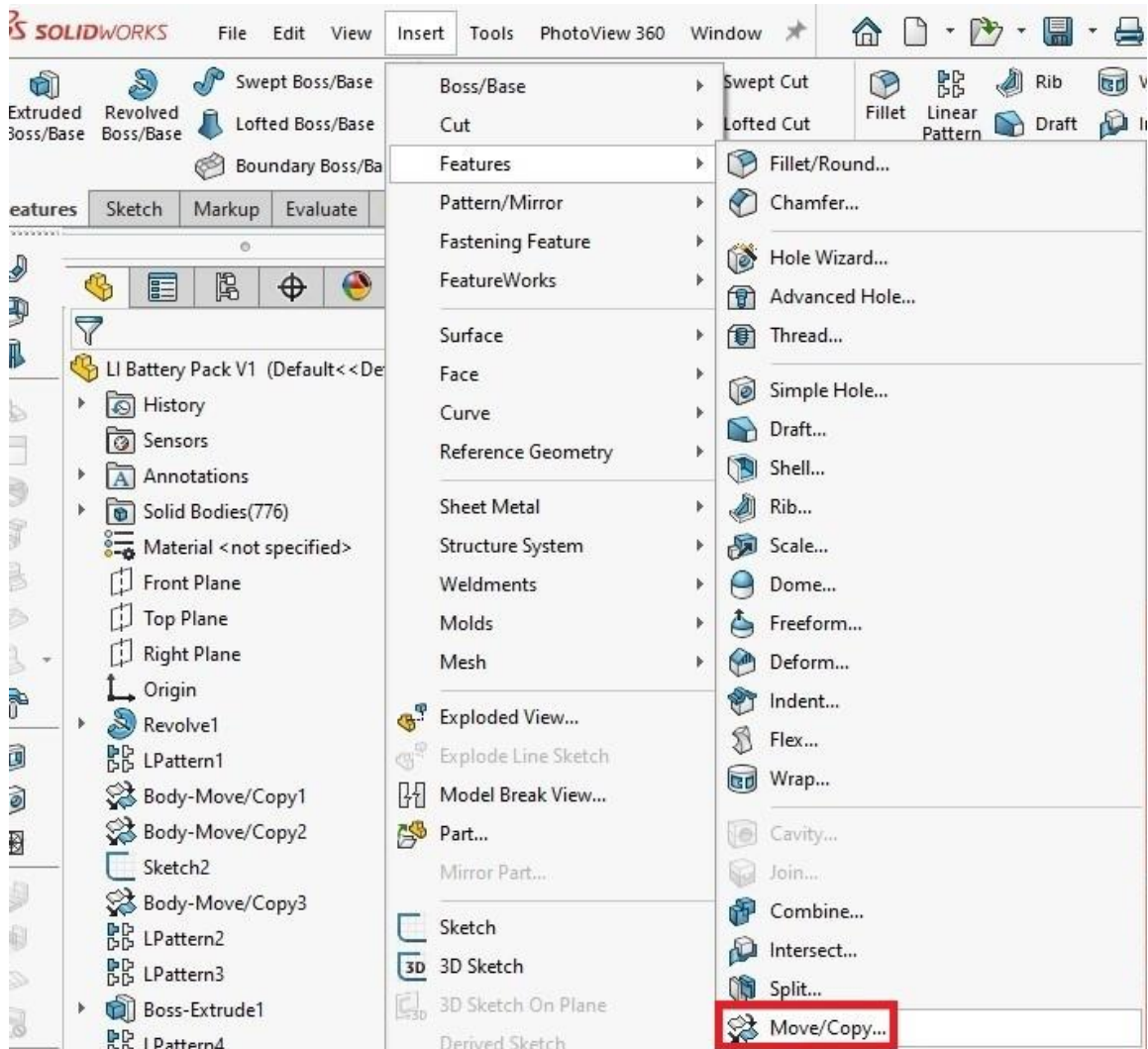
Slika 4.15. Naredba Revolve

Zatim je potrebno napraviti kopije stvorene ćelije u redovima i stupcima. Traži se 30 redova i 13 stupaca. Koristi se "Linear Pattern Command" za stvaranje redova i stupaca. Srednji stupci moraju biti invertirani.



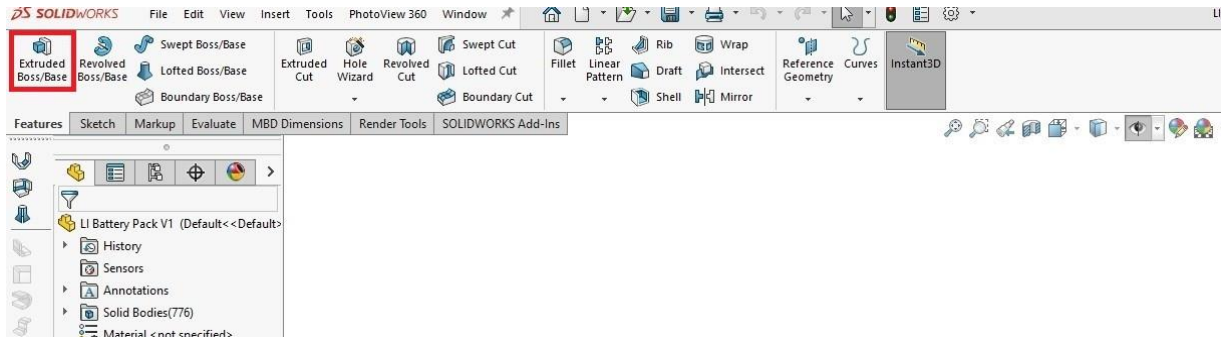
Slika 4.16. Naredba Linear Pattern

Iza toga koristi se "Move Bodies Command" kako bi se prva ćelija u prvom redu i drugom stupcu invertirala. Zatim se rotira oko z-osi za 180 stupnjeva.



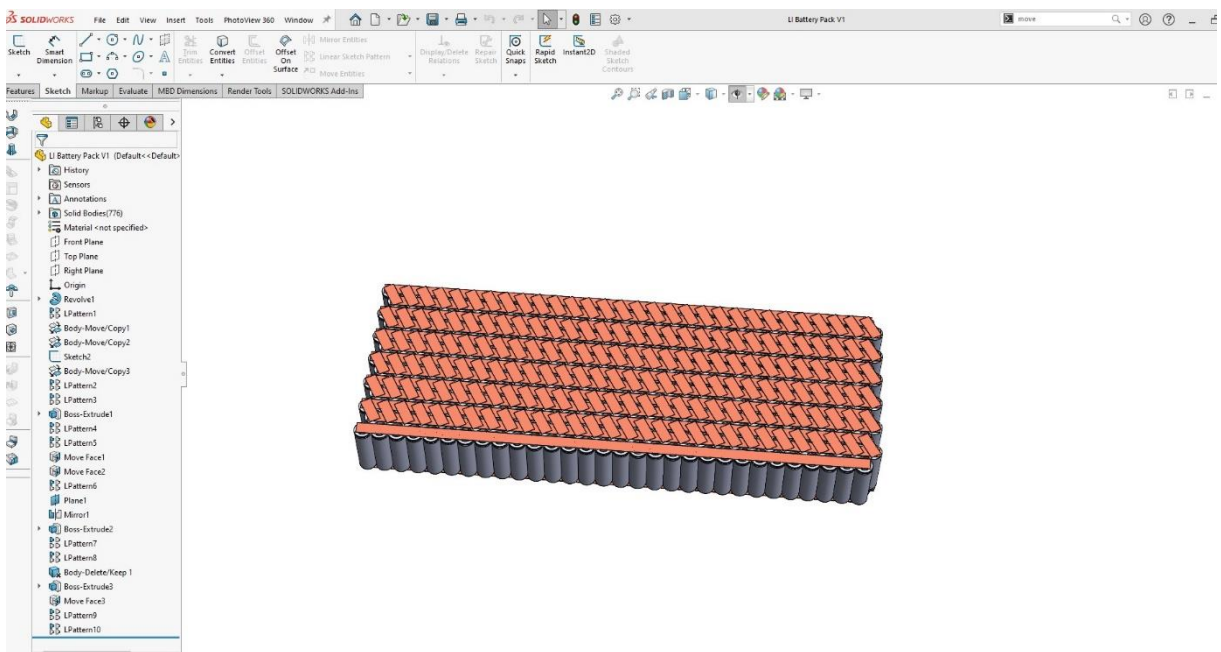
Slika 4.17. Naredba Move Bodies

Na kraju, primjenjuje se "Linear Pattern" na invertirane ćelije. Nakon formiranja uzorka, vrši se povezivanje svake ćelije s metalnim konektorom. Crtanje skice na vrhu svake ćelije, a zatim ekstrudiranje koristeći "Extrude Boss Command".



Slika 4.18. Naredba Extrude Boss

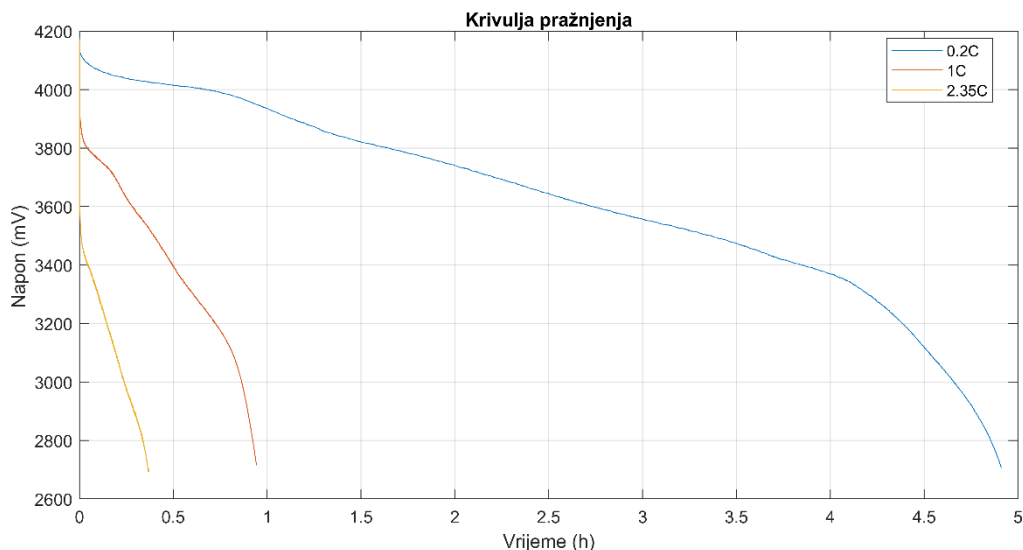
Konačni model baterijskog paketa može se viditi na slici 4.19.



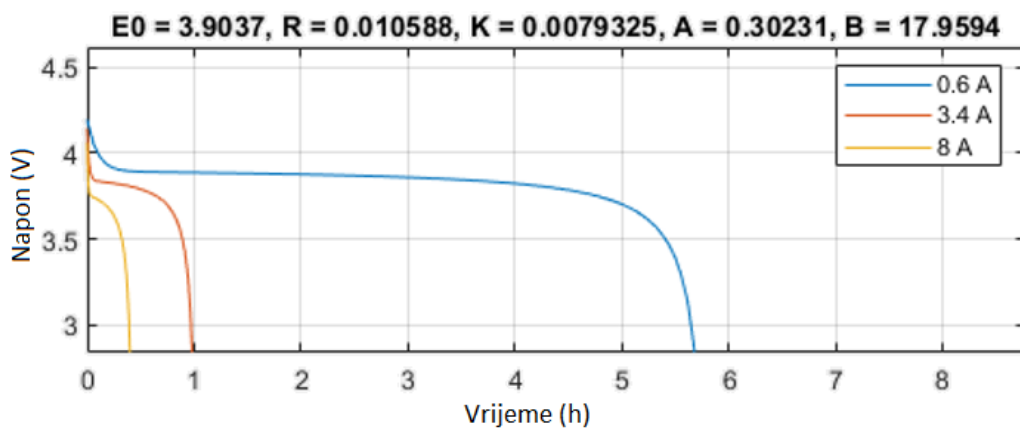
Slika 4.19. 3D model u SolidWorksu

4.3. Rezultati

Korištenjem kodom spomenutim u poglavlju 3.2 ovog diplomskog rada, uz male izmjene koda na slici 3.9 možemo dobiti graf krivulje pražnjenja litij-ionske ćelije, koji prikazuje vrijeme pražnjenja baterije u satima (h) u ovisnosti o naponu u voltima (V) prikazano slikom 4.20. Na slici 4.21. je prikazana krivulja pražnjenja modela koji je baziran na parametrima generičkog bloka litij-ionske baterije.



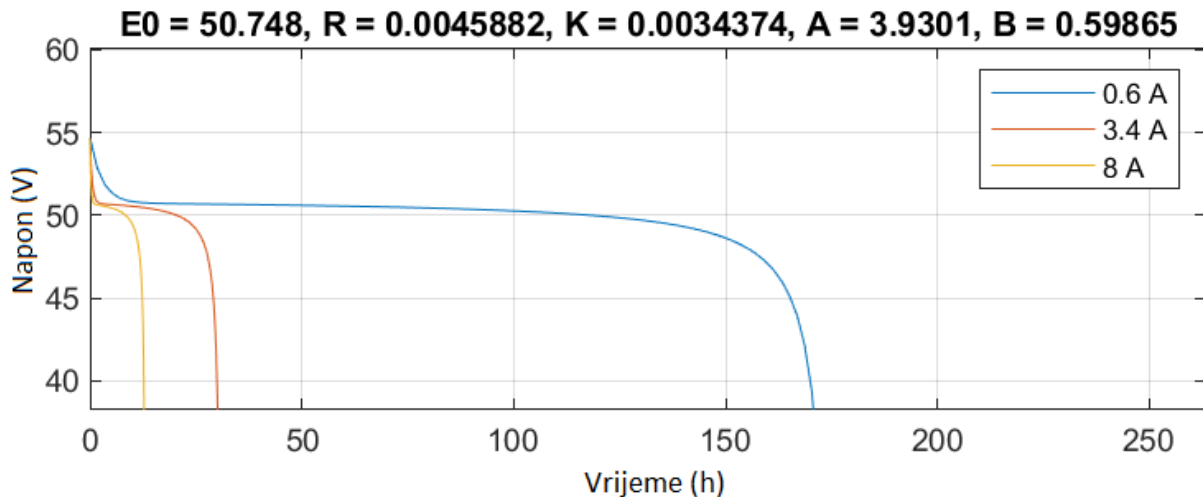
Slika 4.20. Krivulja pražnjenja litij-ionske ćelije INR18650-35E



Slika 4.21. Krivulja pražnjenja Shepardovog modela litij-ionske ćelije

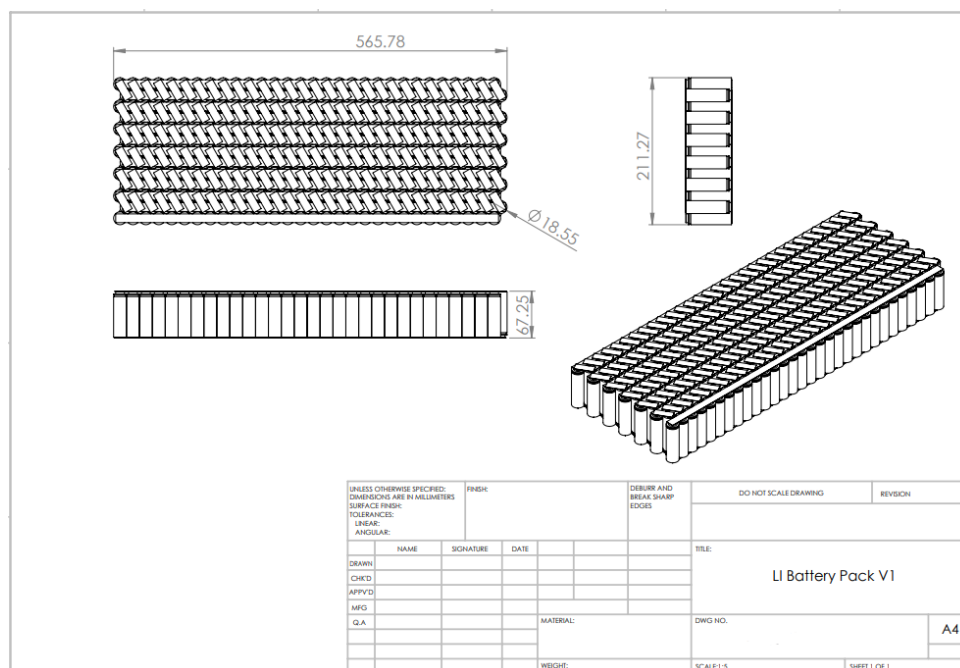
Uzeći u obzir dobivene rezultate možemo pretpostaviti napon i kapacitet baterijskog paketa koji se sastoji od 30 ćelija spojene paralelno u jedan blok i 13 takvih blokova je povezano u seriju. Predviđanje napona baterijskog paketa bit će 13 puta veći od napona pojedine ćelije u bilo kojem trenutku tijekom pražnjenja. Stoga, izravni umnožak vrijednosti osi napona na grafu karakteristike pražnjenja s 13 kako bi dobili odgovarajuće vrijednosti napona za baterijski

paket. Za predviđanje kapaciteta baterijskog paketa, možemo reći da je 30 puta veći od kapaciteta pojedine ćelije. Međutim, oblik krivulje pražnjenja neće izravno skalirati s brojem ćelija zbog faktora kao što su unutarnji otpor, raspodjela opterećenja. Stoga jednostavno množenje neće točno predvidjeti kapacitet. Stvarni uvjeti, kao što su temperaturne varijacije, učinci starenja i fluktuacije opterećenja, mogu različito utjecati na karakteristiku pražnjenja baterijskog paketa u usporedbi s pojedinačnom ćelijom. Aproximacija baterijskog paketa se može vidjeti na slici 4.22.



Slika 4.22. Krivulja pražnjenja Shepardovog modela litij-ionskog paketa

Na tehničkom crtežu slika 4.23. izrađeno u SolidWorksu vidimo dimenzije baterijskog paketa kao i poredak samih ćelija



Slika 4.23. Tehnički crtež baterijskog paketa

5. ZAKLJUČAK

Usporedba stvarnih mjerenja baterijske ćelije i simulacija korištenjem Shepardovog modela nudi vrijedne uvide u učinkovitost i ograničenja modela. Usporedba rezultata stvaranih mjerenja sa rezultatima modela otkrila je razlike između stvarnih i simuliranih podataka, iako Shepardov model pruža temeljno razumijevanje ponašanja baterije, možda ne obuhvaća u potpunosti složenost dinamike stvarnog svijeta. Daljnja analiza temeljnih pretpostavki Shepardovog modela, posebno u odnosu na radne uvjete baterijske ćelije, opravdana je kako bi se bolje razumjele uočene razlike. Pretpostavke i ograničenja modela kao i mogućnosti slučajne (stohastičke) ili sistematske pogreške za vrijeme mjerenja, trebaju biti uračunate kao faktor razlike. Unatoč činjenici da je utjecaj temperature na baterijsku ćeliju za vrijeme mjerenja bio zanemaren, a model i simulacija uzele su pretpostavku da temperatura ne utječe na samu ćeliju baterije. U stvarnosti neravnomjerno zagrijavanje dijelova baterijskog paketa dodatno komplicira situaciju jer uzrokuje neravnomjernu raspodjelu opterećenja, bržu degradaciju toplijih ćelija i potencijalne sigurnosne rizike. Ovdje dolazi do izražaja važnost sustava upravljanja baterijama (BMS), koji kontinuirano nadzire temperaturu, balansira napone i kapacitete te štiti od preopterećenja i pregrijavanja. BMS optimizira performanse baterijskog paketa, produžujući njegov vijek trajanja i povećavajući sigurnost, što je ključno za pouzdan rad u aplikacijama kao što su električna vozila, skladištenje energije i prijenosni uređaji. Nalazi ovog istraživanja ističu važnost kontinuiranog istraživanja za usavršavanje tehnika modeliranja baterija i poboljšanje točnosti njihovog predviđanja. Buduća istraživanja mogla bi istražiti alternativne pristupe modeliranju ili uključiti dodatne čimbenike u svrhu poboljšanja preciznosti simulacija. Nadalje, provođenje analiza osjetljivosti i validacijskih studija u različitim uvjetima pružilo bi sveobuhvatniju procjenu performansi modela i informiralo razvoj pouzdanijih modela baterija za praktične primjene. Zaključno, iako Shepardov model nudi vrijedne uvide u ponašanje baterija, njegova ograničenja naglašavaju stalnu potrebu za usavršavanjem i validacijom. Ovim se radom doprinosi širem razumijevanju modeliranja baterija i služi kao katalizator za daljnja istraživanja usmjerena na napredovanje stanja tehnike u inženjeringu baterija.

LITERATURA

- [1] Marques, J. M. B. (2014). Battery Management Systems (BMS) for Li-Ion Batteries
- [2] B. Tomašević. Aktivni BMS za balansiranje 5 ćelija spojenih u seriju.
- [3] Massachusetts Institute of Technology (MIT). MIT Electric Vehicle Team (2008). A guide to understanding battery specifications.
- [4] Giuseppe Graber. Electric Mobility: Smart Transportation in Smart Cities.
- [5] Baazouzi, Sabri & Feistel, Niklas & Wanner, Johannes & Landwehr, Inga & Fill, Alexander & Birke, Kai. (2023). Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells—A Generic Overview. Batteries. 9. 309. 10.3390/batteries9060309.
- [6] A. Technologies, “A comparison of lead acid to lithium-ion in stationary storage applications,” 2012, [Battery Power Online, <http://www.batterypoweronline.com/main/wp-content/uploads/2012/07/Lead-acid-white-paper.pdf>, accessed August 12, 2016].
- [7] Janek J and Zeier WG. Nat Energy 2023; 8: 230–40
- [8] Energy, E. (2012). Cost and performance of ev batteries. Final report for The Committee on ClimateChange.
- [9] Sepasi, S. (2014). Adaptive state of charge estimation for battery packs (Doctoral dissertation)
- [10] BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM (Formula Student) - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/life-cycle-over-battery-temperature-According-to-the-research-the-most-ideal-temperature_fig2_322077409
- [11] Specification of product for Lithium-ion rechargeable cell Model name: INR18650-35E Dostupno na: <https://www.orbtronic.com/content/samsung-35e-datasheet-inr18650-35e.pdf>
- [12] Korisnički priručnik iCharger 4010 DUO Dostupno na: https://www.icharger.pl/manuals/4010DUO_en.pdf
- [13] Što je MATLAB. Dostupno na: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [14] Shubha Rao K and Karanam Vasudha 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1042 012011

[15] Jinhao Meng, Guangzhao Luo Mattia Ricco, Maciej Swierczynski, Daniel-Ioan Stroe and Remus Teodorescu, 2018 Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles Journal of Applied Sciences 8 Issue 5

[16] <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>

[17] Tremblay, O.; Dessaint, L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. // World Electric Vehicle Journal, 3, (2009), pp. 289-298.

[18] Baboselac, I., Hederić, Ž. i Benšić, T. (2017). MatLab simulation model for dynamic mode of the Lithium-Ion batteries to power the EV. Tehnički glasnik, 11 (1-2), 7-13. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/183739>

[19] Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche A. I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, (2007)

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Specifična energija i specifična snaga baterija [4]

Slika 2.2. . Standardni formati ćelija: (a) cilindrične ćelije; (b) prizmičke ćelije; (c) vrećaste ćelije[5]

Slika 2.3. Komponente punjive Li-ion baterije. Dostupna na:

<https://www.nature.com/articles/s41928-018-0048-6>

Slika 2.4. Struktura Li-ionske ćelije i solid state ćelije Dostupno na:

<https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/56462.html?listType=gallery>

Slika 2.5. Paralelni spoj (lijevo) i serijski spoj (desno) Dostupno na:

<https://www.recurrentauto.com/research/connecting-the-dots-series-vs-parallel-circuits>

Slika 2.6. Pasivno i aktivno balansiranje ćelija Dostupno na:

<https://www.cselectricalandelectronics.com/what-is-active-and-passive-cell-balancing-why-cell-balancing-is-required/>

Slika 2.7. Ovisnost životnog ciklusa litij-ionske ćelije i temperaturi [10]

Slika 3.1. Baterija INR18650-35E Dostupna na: <https://www.imrbatteries.com/samsung-35e-18650-3500mah-8a-battery/>

Slika 3.2. iCharger 4010 DUO Dostupna na:

<https://www.progressiverc.com/products/icharger-4010duo>

Slika 3.3. Postupak punjenja i pražnjenja

Slika 3.4. Prvi dio Matlab koda

Slika 3.5. Drugi dio Matlab koda

Slika 3.6. Treći dio Matlab koda

Slika 3.7. Četvrti dio Matlab koda

Slika 3.8. Peti dio Matlab koda

Slika 3.9. Krivulje punjenja

Slika 3.10. Krivulje pražnjenja

Slika 4.1. Baterijski paket

Slika 4.2. Parametri paketa

Slika 4.3. Kapton traka

Slika 4.4. EVA folija

Slika 4.5. Daly 13s 48V 100A Bluetooth Dostupno na: <https://m.media-amazon.com/images/I/61jTGI+GHLS.AC.SL1500.jpg>

Slika 4.6. Blok modela litij-ionske baterije

Slika 4.7. Ekvivalentni krug koji modelira blok

Slika 4.8. Tipična krivulja pražnjenja litij-ionske baterije

Slika 4.9. Parametri jednadžbe

Slika 4.10. Tipična krivulja punjenja litij-ionske baterije

Slika 4.11 Baterijski paket

Slika 4.12 3D model baterijskog paketa

Slika 4.13 2D tehnički crtež

Slika 4.14 Dimenzije INRI18650-35E Dostupno na: <https://www.orbtronic.com/content/samsung-35e-datasheet-inr18650-35e.pdf>

Slika 4.15 Naredba Revolve

Slika 4.16. Naredba Linear Pattern

Slika 4.17. Naredba Move Bodies

Slika 4.18. Naredba Extrude Boss

Slika 4.19. 3D model u SolidWorksu

Slika 4.20. Krivulja pražnjenja litij-ionske ćelije INR18650-35E

Slika 4.21. Krivulja pražnjenja Shepardovog modela litij-ionske ćelije

Slika 4.22. Krivulja pražnjenja Shepardovog modela litij-ionskog paketa

Slika 4.23. Tehnički crtež baterijskog paketa

SAŽETAK

Naslov: Eksperimentalna karakterizacija i dizajn modela ćelije baterijskog spremnika energije

U ovom diplomskom radu opisan je proces mjerenja baterijske ćelije INR18650-35E i usporedba dobivenih rezultata sa rezultatima dobivenim simulacijom baterijske ćelije u Matlabu. Nadalje, izrađen je 3D model i 2D tehnički crtež samog baterijskog paketa koji se sastoji od navedene ćelije.

Ključne riječi: mjerenje baterijske ćelije, simulacija baterijske ćelije, Matlab, SolidWorks

ABSTRACT

Title: Experimental Characterization and Design of a Battery Energy Storage Cell Model

This thesis describes the process of measuring the INR18650-35E battery cell and comparing the results with the results obtained by simulating the battery cell in Matlab. Furthermore, a 3D model and 2D technical drawing of the battery pack itself, which consists of the mentioned cell, was created.

Keywords: battery cell measurement, battery cell simulation, Matlab, SolidWorks

ŽIVOTOPIS

Marko Špoljarić rođen 03.10.1995. u Zagrebu. Do početka studija živi u Zagrebu, gdje stječe Osnovnoškolsko obrazovanje pohađajući Osnovnu školu Većeslava Holjevca.

Nakon osnovne škole upisuje matematički smjer u 13. gimnaziji grada Zagreba.

Preddiplomski studij Elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku započinje 2014. godine. 2019. godine upisuje diplomski studij Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer Automobilsko računarstvo i komunikacije.