

Modeliranje baterije korištenjem metode ekvivalentnog kruga

Martinko, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:738741>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 68

**MODELIRANJE BATERIJE KORIŠTENJEM METODE
EKVIVALENTNOG KRUGA**

Jurica Martinko

Zagreb, veljača 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 68

**MODELIRANJE BATERIJE KORIŠTENJEM METODE
EKVIVALENTNOG KRUGA**

Jurica Martinko

Zagreb, veljača 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 68

Pristupnik: **Jurica Martinko (0036507927)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektrostrojarstvo i automatizacija
Mentor: prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić

Zadatak: **Modeliranje baterije korištenjem metode ekvivalentnog kruga**

Opis zadatka:

Potrebno je razviti model ekvivalentnog kruga (engl. Equivalent Circuit Model, ECM) koji se koristi za određivanje napona, te stanja napunjenosti baterije (engl. State of Charge, SOC). Model se određuje na temelju eksperimentalno određenih parametara i krivulja baterija. Razvijeni model treba opisivati kretanje napona baterije u dinamičkim uvjetima promjenjive struje punjenja/pražnjenja, te ambijentalne temperature. Verifikacija modela provodi se eksperimentalno na stvarnim baterijama.

Rok za predaju rada: 9. veljače 2024.

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Određivanje OCV-SOC karakteristike	3
2. Ekvivalentni model baterije	6
3. Identifikacija parametara ekvivalentnog modela	8
3.1. Određivanje parametra R_0	8
3.2. Određivanje parametara R_1, R_2, C_1, C_2	11
4. Verifikacija modela i rezultati	17
Zaključak	26
Literatura	27
Sažetak	28
Summary	29

Uvod

Posljednjih nekoliko godina zbog sve veće zabrinutosti zemalja širom svijeta, razvijaju se alternativni energetske i skladišni sustavi koji bi što efikasnije mogli zamijeniti fosilna goriva. Jedan od takvih sustava su baterije, konkretno punjive litij-ionske baterije koje su se pokazale kao jedne od boljih baterija na tržištu. Litij-ionske baterije karakterizira velika gustoća energije, dugačak životni vijek te nisko samopražnjenje kako je to objašnjeno u radu [1]. Zbog sve šireg korištenja takvih baterija, od velikog je značaja konstruirati odgovarajući dinamički model baterije koji će moći predvidjeti njezine performanse te tako optimizirati potrošnju energije i produžiti životni vijek pojedine baterije, što je opisano u radu [2]. U ovom radu tema proučavanja je model baterije konstruiran primjenom metode ekvivalentnog kruga, koja je detaljnije objašnjena u radu [3]. Model je dinamički jer su njegovi parametri promjenjivi, tj. mijenjaju se kako se mijenja stanje napunjenosti i temperatura baterije. Cilj modeliranja baterije je da se pokaže simulacijski kako se otprilike baterija ponaša u raznim situacijama, poput dinamičkih promjena struje punjenja/praznjenja i ambijentalne temperature na kojoj se baterija nalazi. Ekvivalentni model drugog reda je konstruiran prema radovima [4] i [5] te se koristi za simulaciju stvarnog ponašanja punjivih baterija. Model je drugog reda jer se sastoji od dvije paralelne RC grane i jednog serijskog otpora R . Kako su njegovi parametri ovisni o dvije veličine, o stanju napunjenosti i temperaturi, potrebno je provesti određene postupke analize i sinteze kako bi se kvalitativno odredila ovisnost pojedinog parametra o tim veličinama. U ovom radu, osim modeliranja baterije, provest će se i eksperimentalni postupak u laboratoriju na stvarnoj bateriji. Eksperimentalni postupak se provodi na tri različite temperature te se na svakoj temperaturi snimaju odzivi napona i struje. Provedbom eksperimentalnog postupka snimit će se potrebne krivulje napona i struje baterije koje su neophodne za identifikaciju parametara modela. Na temelju snimljenih krivulja napona, prvo je potrebno odrediti napon otvorenog kruga, odnosno OCV-SOC karakteristiku baterije prema uputama u radovima [6] i [7]. Ostali parametri modela određuju se aproksimacijama snimljenih krivulja napona prema radu [8] i [9]. Kako bi se model odredio što preciznije i bio funkcionalan u svim uvjetima, baterija je testirana na različitim temperaturama i pri različitim strujama punjenja/praznjenja. Testiranje se provodi u ovim uvjetima kako bi se moglo vidjeti ponašanje baterije u različitim situacijama te kako bi se mogla odrediti ovisnost pojedinih parametara modela o promjeni temperature i stanja

napunjenosti. Tako se očekuje da će model opisati bateriju onako kako bi se ona ponašala u danim uvjetima. Eksperimentalni postupak koristit će se kasnije i za verifikaciju modela te potvrdu da model dobro opisuje stvarnu bateriju. Pritom će se snimiti punjenje i pražnjenje baterije na nekoliko različitih temperatura s promjenjivim strujama punjenja/pražnjenja. U Poglavlju 1 opisane su specifikacije testirane baterije te je određena OCV-SOC karakteristika baterije na temelju eksperimentalnih rezultata. Dalje, u poglavlju 2 definiran je model drugog reda u Matlab/Simulink okruženju, dok je u poglavlju 3 detaljno razrađen postupak identifikacije parametara ekvivalentnog modela. Zadnje poglavlje sadrži verifikaciju i rezultate modela, odnosno usporedbu ponašanja modela s ponašanjem ispitivane baterije u laboratoriju.

1. Određivanje OCV-SOC karakteristike

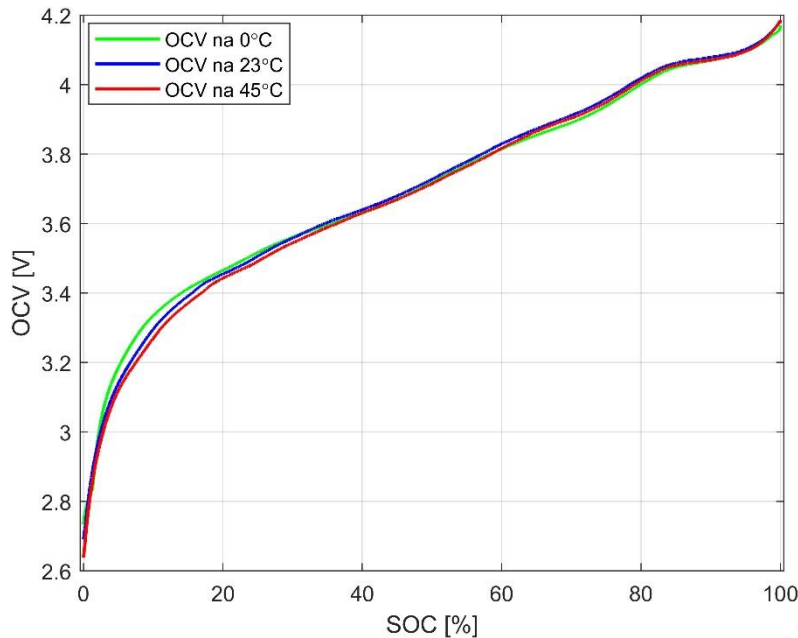
Kao što je već u uvodu spomenuto, eksperimentalni rezultati na stvarnoj bateriji koriste se za određivanje parametara modela pa tako i za određivanje OCV-SOC karakteristike promatrane baterije. Testirana baterija u laboratoriju ima specifikacije prikazane u tablici (Tablica 1.1).

Tablica 1.1 Specifikacije testirane baterije

Proizvođač	Samsung
Model baterije	INR21700-48G
Tehnologija	NMC
Dimenzije	21.10 x 70.15 mm
Nominalni kapacitet	4.8 Ah
Nominalni energetska kapacitet	17.28 Wh
Nominalni napon	3.6 V
Napon punjenja (gornji granični napon)	4.2 V
Napon pražnjenja (donji granični napon)	2.5 V
Maksimalna struja punjenja	4.8 A (1C)
Maksimalna struja pražnjenja	9.6 A (2C)
Struja kraja punjenja (cutoff)	0.096 A (0.05C)
Radna temperatura za punjenje	0 do 50°C
Radna temperatura za pražnjenje	-20 do 60°C

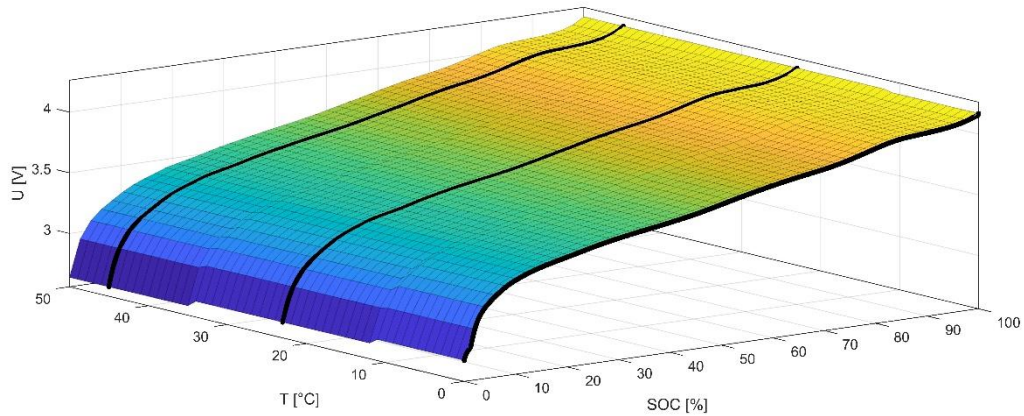
OCV-SOC karakteristika koristi se za određivanje napona otvorenog kruga baterije (eng. *Open Circuit Voltage, OCV*) te za utvrđivanje veze između napona otvorenog kruga i stanja napunjenosti (eng. *State of Charge, SOC*). OCV-SOC karakteristika je posebna za svaku bateriju i to je jedno od bitnijih svojstava pojedine baterije. OCV-SOC karakteristika određuje se prema smjernicama iz [6] i [7] te je shodno tome napravljena Matlab skripta koja definira i grafički prikazuje tu karakteristiku za potrebe ovog rada. Bateriju je potrebno napuniti od potpuno praznog stanja do potpuno napunjenog stanja i isprazniti bateriju do kraja malim strujama te pritom snimati kretanje napona. Kao što se iz samog naziva karakteristike može vidjeti, napon otvorenog kruga je direktno ovisan o stanju napunjenosti baterije u pojedinom vremenskom trenutku. Osim te povezanosti, OCV-SOC karakteristika se mijenja i promjenom ambijentalne temperature na kojoj se baterija nalazi. Konkretno u ovom radu baterija je testirana na temperaturama od 0 °C, 23 °C i 45 °C. Iz specifikacija se može vidjeti da temperature iznad 50 °C i ispod 0 °C nisu pogodne za punjenje baterije. Zbog toga je eksperiment proveden samo na ovim trima temperaturama kako bi se moglo

provesti i punjenje i pražnjenje na istoj temperaturi. Na slici (Sl. 1.1) je prikazano kako se OCV-SOC karakteristika razlikuje za istu bateriju ovisno o ambijentalnoj temperaturi na kojoj se baterija nalazila.



Sl. 1.1 OCV baterije pri različitom SOC-u i temperaturi

Može se vidjeti kako se OCV-SOC karakteristika za istu bateriju razlikuje ovisno o temperaturi. Najveća razlika je pri manjem stanju napunjenosti, dok je pri većem stanju napunjenosti ta razlika manja, ali nije zanemariva. Kada je baterija skoro potpuno prazna, pri nižim temperaturama je napon otvorenog kruga veći u odnosu na napon otvorenog kruga pri višim temperaturama. U slučaju kada je baterija pri vrhu stanja napunjenosti, napon otvorenog kruga je gotovo jednak za svaku od tri temperature. Kako bi se prikazala ovisnost napona otvorenog kruga o stanju napunjenosti i temperaturi u troosnom koordinatnom sustavu, primjenjuje se linearna interpolacija (eng. *linear interpolation*) koristeći Matlab alat. Grafički prikaz ovisnosti napona otvorenog kruga o stanju napunjenosti i temperaturi, u koordinatnom sustavu s tri osi, prikazan je na slici (Sl. 1.2). Takva karakteristika se onda naziva OCV-SOC-T karakteristika.

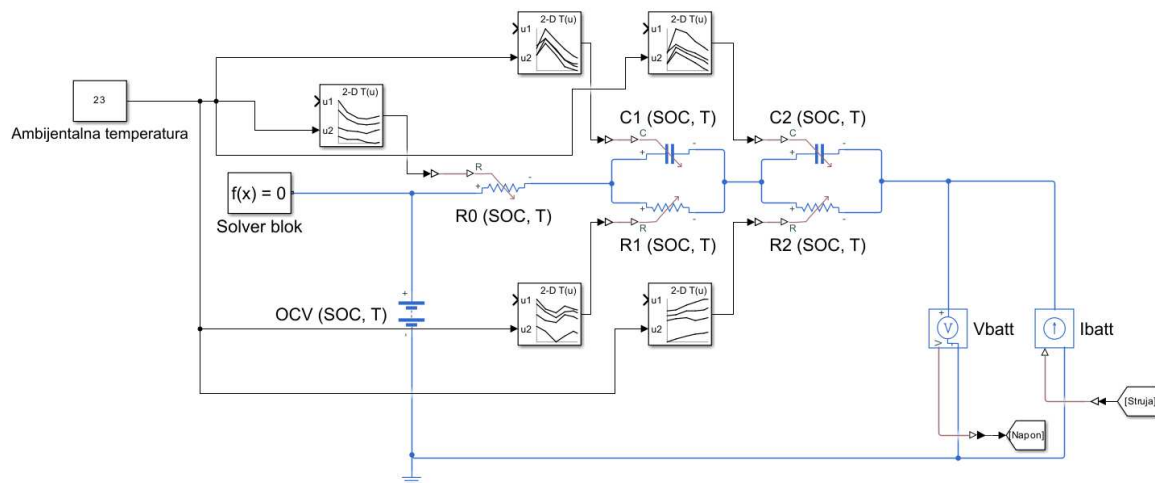


Sl. 1.2 OCV karakteristika u troosnom koordinatnom sustavu

Interpoliranjem OCV-SOC karakteristike dobivena je OCV-SOC-T karakteristika s grafičkim prikazom u ovisnosti o SOC-u i temperaturi. OCV-SOC-T karakteristika u troosnom prikazu kao funkcija stanja napunjenosti i temperature pogodna je za korištenje u ekvivalentnom modelu baterije u Simulinku. Sada je moguće odrediti vrijednost napona otvorenog kruga za bilo koju vrijednost SOC-a za baterije koje su punjene i pražnjene na istoj temperaturi u rasponu od 0 °C do 50 °C. Raspon temperature se mogao staviti i veći, ali ranije je rečeno da će se baterija ispitivati na temperaturama koje su pogodne i za punjenje i za pražnjenje. Interpolacijom je dobivena karakteristika koja obuhvaća širi raspon temperatura, a ne samo tri temperature na kojima je testirana baterija u laboratoriju i koje su iskorištene za određivanje općenite OCV-SOC-T karakteristike za tu bateriju.

2. Ekvivalentni model baterije

U ovom radu proučit će se i konstruirati ekvivalentni model baterije drugog reda prema opisu iz radova [4] i [5] za potrebe analiziranja karakteristika baterije. Ekvivalentni model drugog reda podrazumijeva dvije paralelne RC grane te jedan serijski otpor R_0 . Te dvije RC grane predstavljaju vremenske konstante modela. Jedna je spora vremenska konstanta, a druga je brza vremenska konstanta. Prednost modela drugog reda je upravo u postojanju tih dviju vremenskih konstanti zbog kojih će odziv napona biti kvalitetniji u prijelaznom periodu, između punjenja/praznjenja i mirovanja, u odnosu na model prvog reda koji ovdje nije razmatran i sadrži samo jednu vremensku konstantu. Na slici (Sl. 2.1) prikazan je ekvivalentni model drugog reda koji je konstruiran s pomoću Simscape blokova.



Sl. 2.1 Ekvivalentni model drugog reda

Model se sastoji od nekoliko blokova od kojih svaki ima određenu ulogu u tom modelu. Blok $OCV(SOC, T)$ modelira napon otvorenog kruga u ovisnosti o SOC-u i temperaturi. Dakle, taj blok kao ulazne parametre prima SOC i temperaturu, a kao izlaz daje napon otvorenog kruga kao napon koji se pojavljuje na izlazu iz modela dok je struja jednaka nuli. Nadalje, blokovi $R_1(SOC, T)$ i $R_2(SOC, T)$ predstavljaju otpornike koji zajedno s blokovima $C_1(SOC, T)$ i $C_2(SOC, T)$ čine dvije paralelne RC grane prema kojima model i je drugog reda. Kao i napon otvorenog kruga, otpori i kapaciteti su također ovisni o SOC-u i temperaturi te shodno tome primaju iste ulazne parametre. Blok $R_0(SOC, T)$ je jedan serijski otpor koji predstavlja zapravo unutarnji otpor kojeg neka baterija ima pa je zbog toga uvršten u model kako bi model bio što precizniji i točniji. Kao i otpori u RC grani, unutarnji otpor je također ovisan o SOC-u i temperaturi. Zbog ovisnosti o dva parametra, SOC-u i temperaturi,

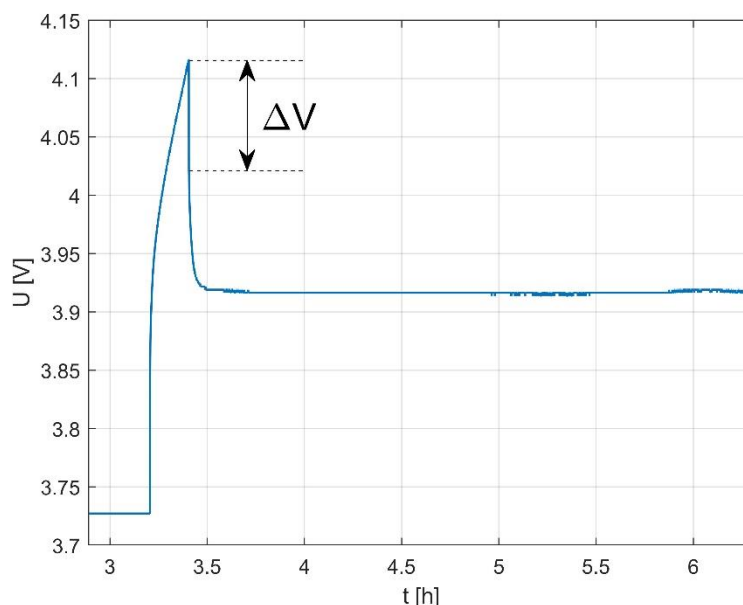
vrijednosti tih veličina neće uvijek biti iste, nego će se mijenjati kako se i ulazni parametri tijekom simulacije budu mijenjali. Zbog toga se koriste tzv. Lookup Table blokovi unutar kojih se definiraju radne točke za SOC i temperaturu te na temelju toga su određeni parametri tijekom simulacije. Izvan tih Lookup Table blokova može se postaviti koja je trenutna temperatura za koju se simulacija vrti, a to je upravo u modelu i napravljeno te je temperatura dovedena na te blokove kao ulazni parametar. OCV je već definiran u prethodnom poglavlju, a u sljedećem poglavlju odredit će se i ostali parametri nužni za ispravno funkcioniranje modela. Blok *Vbatt* predstavlja napon baterije, odnosno napon na izlazu modela kada postoji neka struja različita od nule. Ako je struja nula, taj napon će biti jednak naponu otvorenog kruga. Upravo taj napon će se pratiti tijekom simulacije i usporediti s eksperimentalno dobivenim odzivom napona na bateriji. Sljedeći blok u modelu je *Ibatt* koji predstavlja struju punjenja/praznjenja. Ako je struja različita od nule, tada stezaljke baterije (modela) nisu slobodne, tj. neko trošilo je spojeno na bateriju. Ako je struja jednaka nuli, stezaljke su slobodne i baterija miruje, niti se puni niti prazni. S obzirom na polaritet u modelu, u slučaju struje veće od nule, stanje napunjenosti modela baterije će rasti, a u slučaju struje manje od nule, stanje napunjenosti će se smanjivati. Posljednji blok u modelu je *Solver* kojeg svaki Simulink model koji koristi Simscape biblioteku mora sadržavati. Osim što je to obavezan blok, u njemu je moguće postaviti vrijeme uzorkovanja modela i razne druge opcije koje, za potrebe ovog modela, nisu toliko bitne. Za model je postavljeno isto vrijeme uzorkovanja od 200 ms kao i u laboratoriju za snimanje eksperimentalnih podataka na stvarnoj bateriji.

3. Identifikacija parametara ekvivalentnog modela

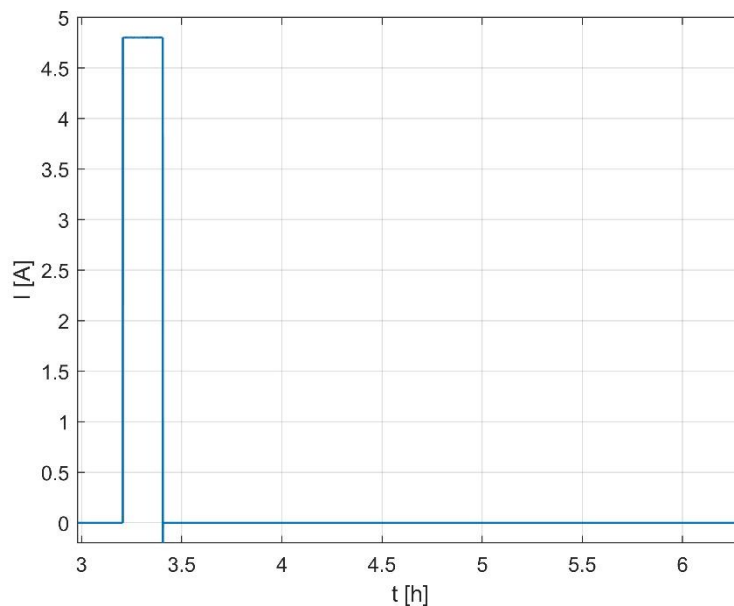
Nakon što je definirana OCV-SOC karakteristika baterije, potrebno je još odrediti parametre ekvivalentnog modela kako bi on bio funkcionalan. Kao što je u prethodnom poglavlju objašnjeno, model ima 2 paralelne RC grane i jedan serijski otpor, dakle ukupno 5 parametara. Eksperimentalni rezultati i krivulje snimljene na stvarnoj bateriji koriste se za određivanje i verificiranje parametara ekvivalentnog modela. Parametri su određeni za tri temperature i na temelju 5 radnih točaka, odnosno za 5 različitih vrijednosti stanja napunjenosti baterije.

3.1. Određivanje parametra R_0

Prvo se određuje serijski otpor R_0 koji predstavlja unutarnji otpor baterije. On ovisi o SOC-u i temperaturi, ali ovisi i o tome radi li se o punjenju ili pražnjenju baterije. Na slici (Sl. 3.1) je prikazan dio krivulje punjenja od 30% do 50% SOC-a na temperaturi od 23 °C iz kojeg se može odrediti R_0 za tu radnu točku prema radu [8]. Struja punjenja je iznosila 1C, tj. 4.8 A te je ona prikazana na slici (Sl. 3.2).



Sl. 3.1 Impuls napona punjenja s 30% na 50% SOC-a

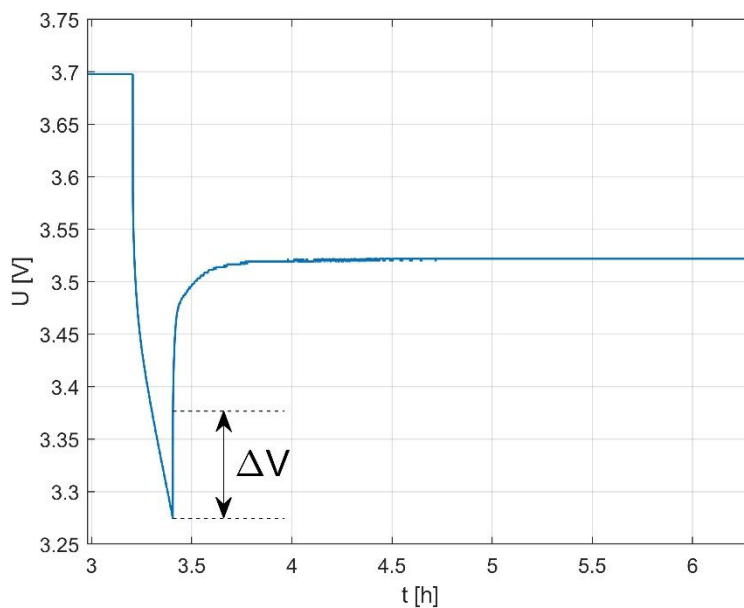


Sl. 3.2 Struja punjenja s 30% na 50% SOC-a

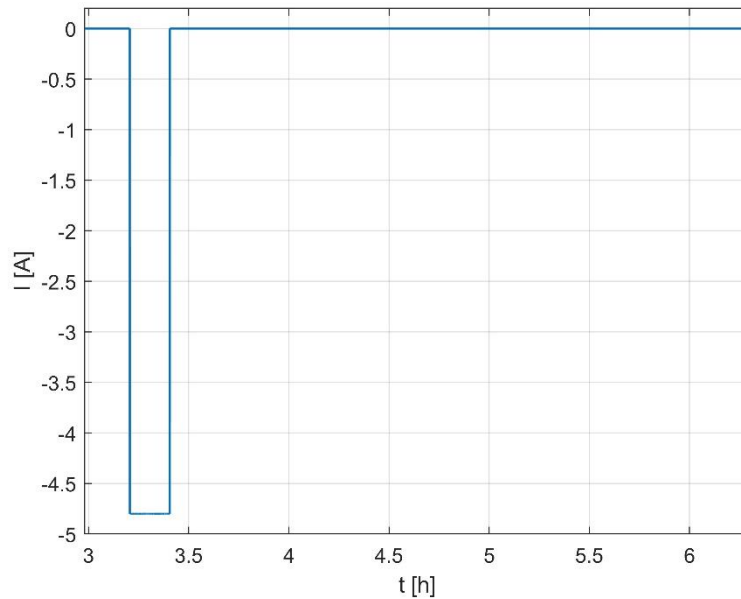
Serijski otpor R_0 se tada može izračunati prema izrazu (1):

$$\Delta V = R_0 \Delta i \quad (1)$$

Pri tome je Δi struja punjenja ili pražnjenja baterije, u ovom slučaju je 4.8 A. Kod pražnjenja je postupak vrlo sličan, ali će se prikazati zasebno. Na slici (Sl. 3.3) je prikazan dio krivulje pražnjenja od 50 % do 30 % SOC-a na temperaturi od 23 °C iz kojeg se može odrediti R_0 za tu radnu točku. Struja pražnjenja je bila -1C, tj. -4.8 A te je prikazana na slici (Sl. 3.4).



Sl. 3.3 Impuls napona pražnjenja s 50% na 30% SOC-a



Sl. 3.4 Struja pražnjenja s 50% na 30% SOC-a

Vrijednost parametra R_0 u slučaju pražnjenja može se također odrediti prema izrazu (1). Analogno ovome se određuju vrijednosti za R_0 u svakoj radnoj točki (za svaki SOC) te isto to vrijedi i za druge temperature. Kako bi se dobile jedinstvene vrijednosti parametra, vrijednosti za punjenje i pražnjenje se usrednjuju te se tako dobivena srednja vrijednost koristi u modelu i za punjenje i za pražnjenje. Usrednjene vrijednosti parametra R_0 prikazane su u tablici (Tablica 3.1).

Tablica 3.1 Usrednjene vrijednosti parametra R_0 za temperaturu od 23 °C

SOC, %	10	30	50	70	90
R_0, Ω	0,0244	0,0214	0,0211	0,0203	0,0224

Isto tako su određene usrednjene vrijednosti za temperature od 0 °C i 45 °C. U tablici (Tablica 3.2) su prikazane usrednjene vrijednosti parametra R_0 za temperaturu od 0 °C, a u tablici (Tablica 3.3) za temperaturu od 45 °C.

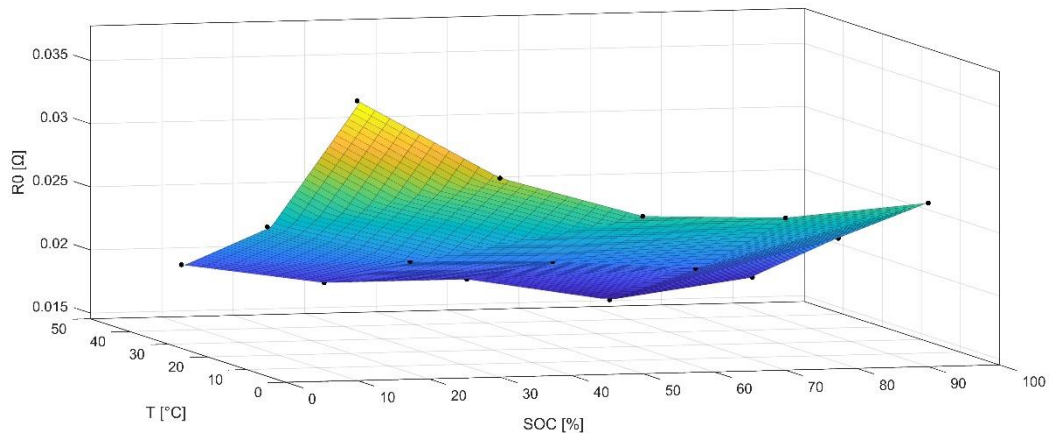
Tablica 3.2 Usrednjene vrijednosti parametra R_0 za temperaturu od 0 °C

SOC, %	10	30	50	70	90
R_0, Ω	0,0367	0,0303	0,027	0,0266	0,0275

Tablica 3.3 Usrednjene vrijednosti parametra R_0 za temperaturu od 45 °C

SOC, %	10	30	50	70	90
R_0, Ω	0,0192	0,0175	0,0175	0,0156	0,0171

Iz izračunatih vrijednosti parametra, može se vidjeti kako porastom temperature se serijski otpor R_0 smanjuje. Kako bi se grafički prikazala ovisnost parametra R_0 o SOC-u i temperaturi primjenjuje se linearna interpolacija koristeći Matlab alat. Grafički prikaz u troosnom koordinatnom sustavu dan je na slici (Sl. 3.5).

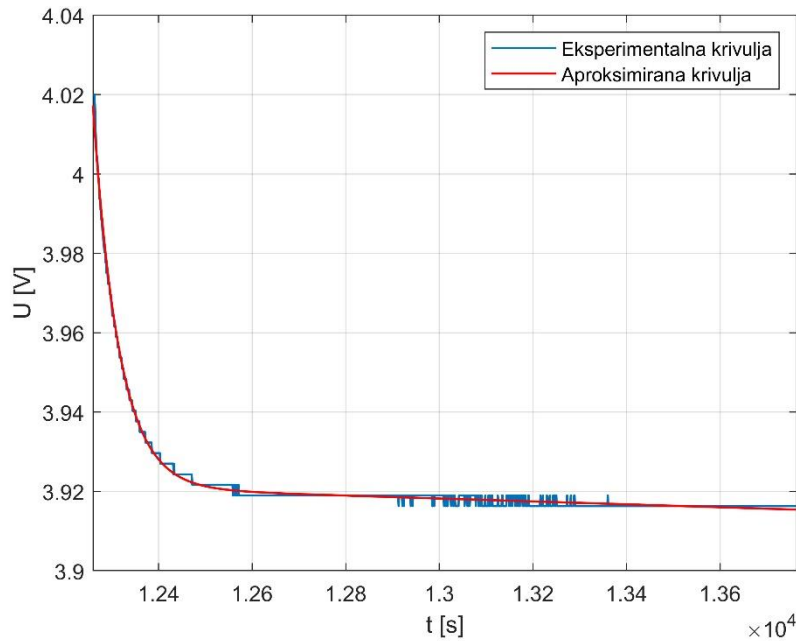


Sl. 3.5 Ovisnost parametra R_0 o SOC-u i temperaturi u troosnom prikazu

Iz ovog grafičkog prikaza u troosnom koordinatnom sustavu jasno se vidi ovisnost parametra R_0 o SOC-u i temperaturi. Pri nižim temperaturama je vrijednost tog parametra veća, dok s porastom temperature ona opada. Isto tako je, generalno, pri nižim stanjima napunjenosti taj parametar veći, nego kod viših stanja napunjenosti. Provedbom linearne interpolacije u Matlabu omogućuje se određivanje vrijednosti parametra R_0 pri bilo kojoj vrijednosti SOC-a i pri bilo kojoj temperaturi u rasponu od 0 °C do 50 °C.

3.2. Određivanje parametara R_1 , R_2 , C_1 , C_2

Nakon određivanja parametra R_0 , potrebno je još odrediti parametre u paralelnim RC granama kako bi se model mogao verificirati. Kao i parametar R_0 , ovi se parametri također određuju iz eksperimentalnih krivulja snimljenih na stvarnoj bateriji. Parametri R_1 , R_2 , C_1 , C_2 dobivaju se aproksimacijom dijela krivulje kada impuls struje pada na nulu i napon baterije ulazi u mirovanje. Ti parametri su također drukčiji za punjenje i pražnjenje, uz već poznatu ovisnost o SOC-u i temperaturi. Eksperimentalna krivulja i aproksimirana krivulja tijekom perioda relaksacije napona nakon punjenja, pri temperaturi od 23 °C, prikazane su na slici (Sl. 3.6).



Sl. 3.6 Aproksimacija krivulje tijekom relaksacije napona nakon punjenja

Može se vidjeti kako aproksimirana krivulja dobro opisuje eksperimentalnu, ali vidljive su razlike, koje najviše dolaze do izražaja zbog rezolucije pretvarača s pomoću kojeg su snimane krivulje na bateriji. Ova krivulja može se aproksimirati eksponencijalnom funkcijom drugog reda prema radu [9] te se ona može zapisati u obliku izraza (2).

$$V = a * \exp(-t/\tau_1) + b * \exp(-t/\tau_2) \quad (2)$$

Aproksimacijom provedenom u Matlabu koristeći funkciju *fit* dobiveni su koeficijenti a, b, τ_1 i τ_2 . Tada se parametri modela mogu odrediti koristeći izraze (3)-(6).

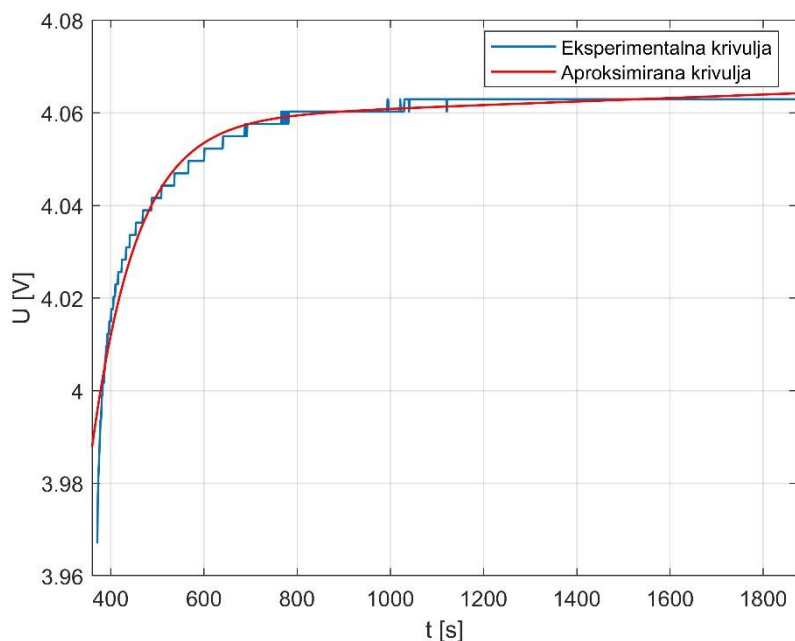
$$R_1 = a/I \quad (3)$$

$$R_2 = b/I \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} \quad (6)$$

Isto vrijedi i za pražnjenje, samo što je sada krivulja suprotnog nagiba. Eksperimentalna krivulja i aproksimirana krivulja tijekom perioda relaksacije napona nakon pražnjenja, pri temperaturi od 23 °C, prikazane su na slici (Sl. 3.7).



Sl. 3.7 Aproksimacija krivulje tijekom relaksacije napona nakon pražnjenja

Postupak određivanja parametara za pražnjenje jednak je onom za punjenje. Krivulja se aproksimira identičnom eksponencijalnom funkcijom drugog reda te se na temelju dobivenih koeficijenata određuju parametri RC grana. Analogno ovome je i postupak za druge radne točke i na drugim temperaturama. Na temelju određenih vrijednosti parametara za punjenje i pražnjenje, uzima se njihova srednja vrijednost za svaku radnu točku. U tablici (Tablica 3.4) su prikazane usrednjene vrijednosti svih parametara RC grana za svih 5 radnih točaka za temperaturu od 23 °C.

Tablica 3.4 Usrednjene vrijednosti parametara RC grana za temperaturu od 23 °C

SOC, %	10	30	50	70	90
R_1, Ω	0,0056	0,00516	0,0049	0,00546	0,0051
R_2, Ω	0,01	0,0104	0,0107	0,0101	0,0107
C_1, F	1023,85	1456,2	1187,3	911,81	871,22
C_2, F	5114,6	6332,9	5953,2	5650,3	5218,7

Za temperature od 0 °C i 45 °C proveden je isti postupak te su u tablici (Tablica 3.5) prikazane usrednjene vrijednosti parametara RC grana za temperaturu od 0 °C, a u tablici (Tablica 3.6) za temperaturu od 45 °C.

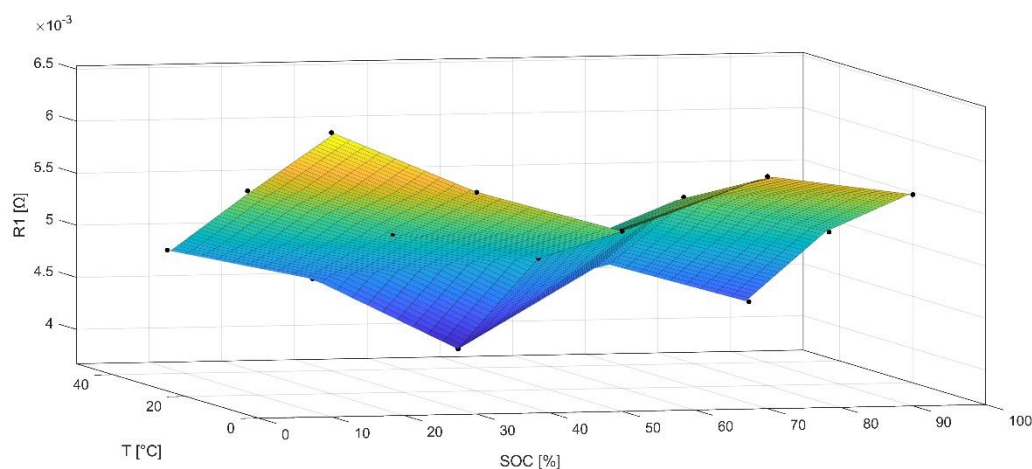
Tablica 3.5 Usrednjene vrijednosti parametara RC grana za temperaturu od 0 °C

SOC, %	10	30	50	70	90
R_1, Ω	0,0064	0,0058	0,0054	0,0059	0,0057
R_2, Ω	0,0115	0,0114	0,0122	0,0125	0,0129
C_1, F	944,28	1339,37	1100,37	838,05	772,36
C_2, F	4777,2	5871,4	5461,1	5204,8	4825,5

Tablica 3.6 Usrednjene vrijednosti parametara RC grana za temperaturu od 45 °C

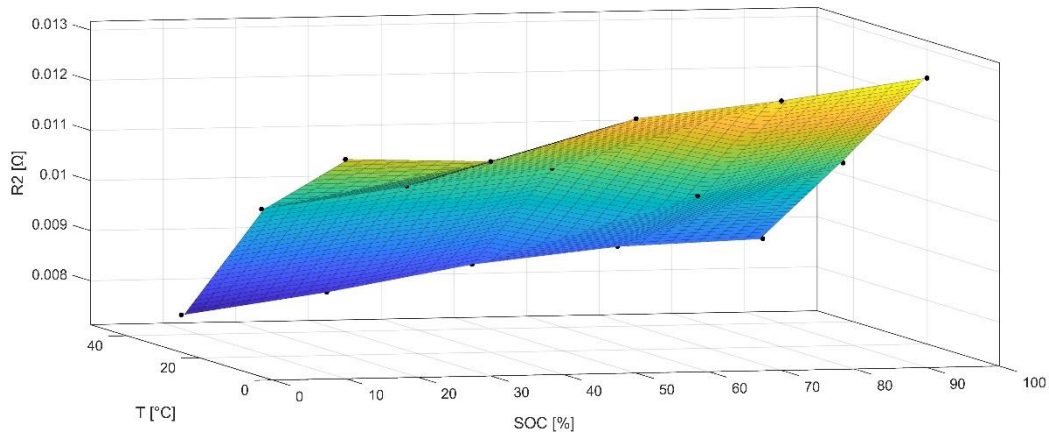
SOC, %	10	30	50	70	90
R_1, Ω	0,0048	0,0045	0,0038	0,0046	0,0042
R_2, Ω	0,0074	0,0078	0,0083	0,0086	0,0087
C_1, F	1146,77	1619,8	1302,67	1050,73	938,18
C_2, F	5603,24	7342,93	6916	6150,1	5677,54

Nakon što su određene vrijednosti parametara R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , njihova ovisnost o SOC-u i temperaturi može se prikazati u troosnom koordinatnom sustavu, kao i za parametar R_0 . Na slici (Sl. 3.8) je troosni prikaz za ovisnost parametra R_1 o SOC-u i temperaturi.



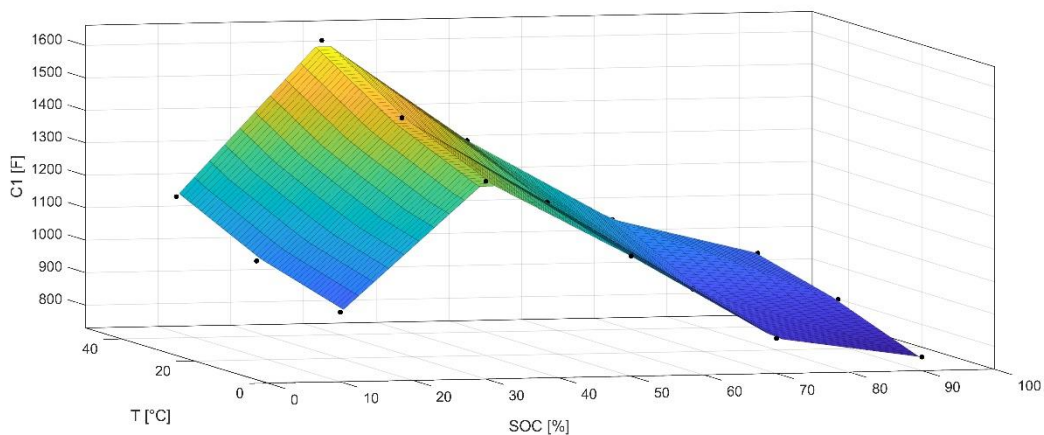
Sl. 3.8 Ovisnost parametra R_1 o SOC-u i temperaturi u troosnom prikazu

Može se primijetiti da se ovisnost parametra R_1 o SOC-u i temperaturi ponešto razlikuje u odnosu na parametar R_0 , ali i u ovom slučaju te razlike nisu prevelike. Vidi se da pri nižim temperaturama i stanjima napunjenosti je vrijednost parametra veća u odnosu na više temperature. Dakle, parametar R_1 ima najveću vrijednost pri nižim temperaturama te u slučajevima kada je baterija skoro prazna, odnosno skoro puna. Na slici (Sl. 3.9) je prikazana ovisnost parametra R_2 o SOC-u i temperaturi.



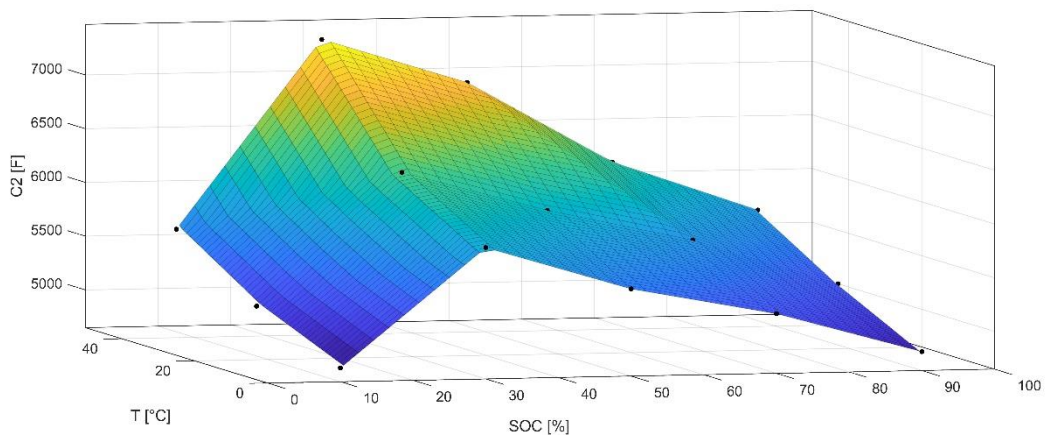
Sl. 3.9 Ovisnost parametra R_2 o SOC-u i temperaturi u troosnom prikazu

Kod parametra R_2 je malo drugačija ta ovisnost. Naime, najveće vrijednosti su pri nižim temperaturama, kao i kod prethodna dva parametra, ali su ovdje najveće i pri nižim i pri višim stanjima napunjenosti. Na slici (Sl. 3.10) je prikazana ovisnost parametra C_1 o SOC-u i temperaturi.



Sl. 3.10 Ovisnost parametra C_1 o SOC-u i temperaturi u troosnom prikazu

Za razliku od R parametara, parametar C_1 se povećava s porastom temperature. Najveće vrijednosti parametra C_1 su pri višim temperaturama i nižim stanjima napunjenosti. Pri nižim temperaturama i pri višim stanjima napunjenosti, može se vidjeti kolika je razlika u vrijednosti parametra u odnosu na više temperature i niža stanja napunjenosti. Na slici (Sl. 3.11) je prikazana ovisnost parametra C_2 o SOC-u i temperaturi.

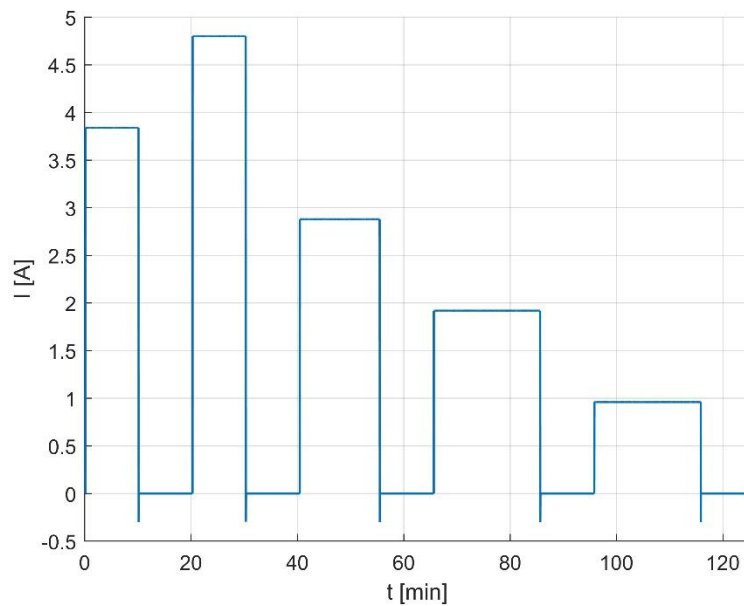


Sl. 3.11 Ovisnost parametra C_2 o SOC-u i temperaturi u troosnom prikazu

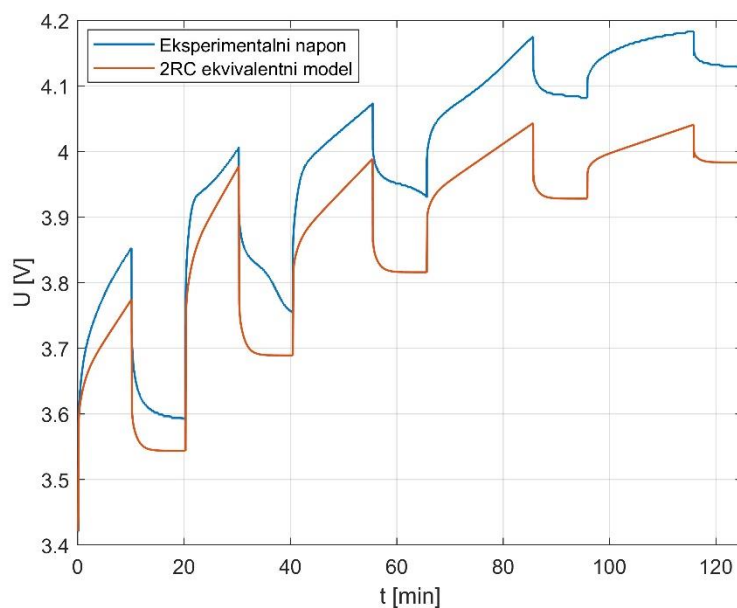
Kao i kod parametra C_1 , i za parametar C_2 vrijednost raste s porastom temperature. Također, vrijednost parametra C_2 je veća kada je baterija na nižim stanjima napunjenosti, nego kada je pri vrhu svog kapaciteta.

4. Verifikacija modela i rezultati

Simulacije su provedene za četiri temperature, na 0 °C, 10 °C, 23 °C i 45 °C. Na svakoj temperaturi provedeno je simuliranje punjenja i pražnjenja različitim strujama u određenim vremenskim intervalima. Na slici (Sl. 4.1) i slici (Sl. 4.2) prikazani su struja punjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom punjenja na temperaturi od 0 °C.

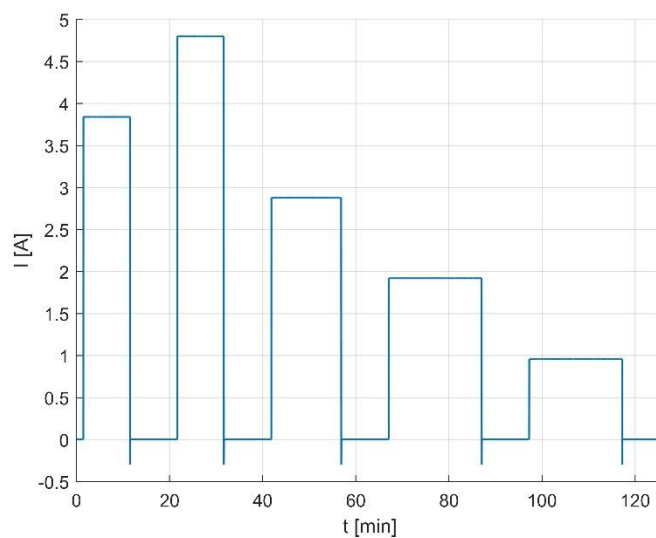


Sl. 4.1 Struja punjenja na temperaturi 0 °C

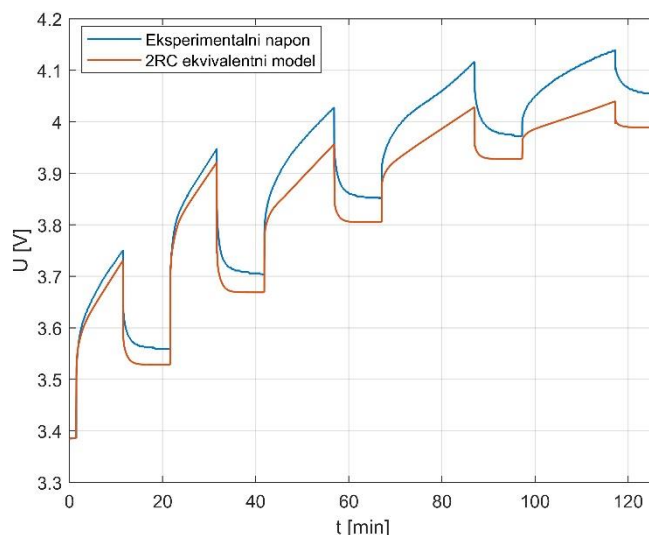


Sl. 4.2 Usporedba napona tijekom punjenja na 0 °C

Mogu se zamijetiti dosta velika odstupanja modela od eksperimentalnog napona na stvarnoj bateriji. To se djelomično može pripisati tome što je vrijeme uzorkovanja pa tako i rezolucija mjernog uređaja ograničena i zbog toga aproksimacija parametara nije bila idealna. U eksperimentalnom naponu, s pomoću kojeg se radila aproksimacija parametara, bilo je dosta istih uzoraka i prisutna je bila pojava „stepenica“ u naponu. Zbog toga je aproksimacija bila manje precizna. Uz navedeno, problem je i sama preciznost mjerne opreme te potencijalna pojava šuma na žicama koje spajaju mjerni uređaj s baterijom, a koji značajno može utjecati na kvalitetu snimljenog napona. Model nije savršen i ima svoje nedostatke pa je za pretpostaviti da djelomično i zbog njega te samog Simscape-a dolazi do odstupanja od eksperimentalnih rezultata. Isto tako, razlog zašto na temperaturi od 0 °C su tako velika odstupanja je to što je ova temperatura granična za punjenje baterije pa se pretpostavlja da je i to utjecalo na kvalitetu odziva, kako eksperimentalnog, tako i simulacijskog. Na slici (Sl. 4.3) i slici (Sl. 4.4) prikazani su struja punjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom punjenja na temperaturi od 10 °C.

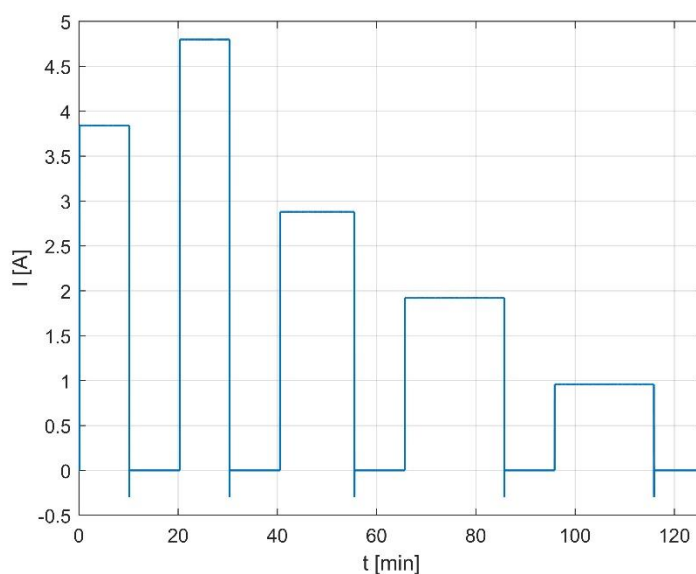


Sl. 4.3 Struja punjenja na temperaturi 10 °C

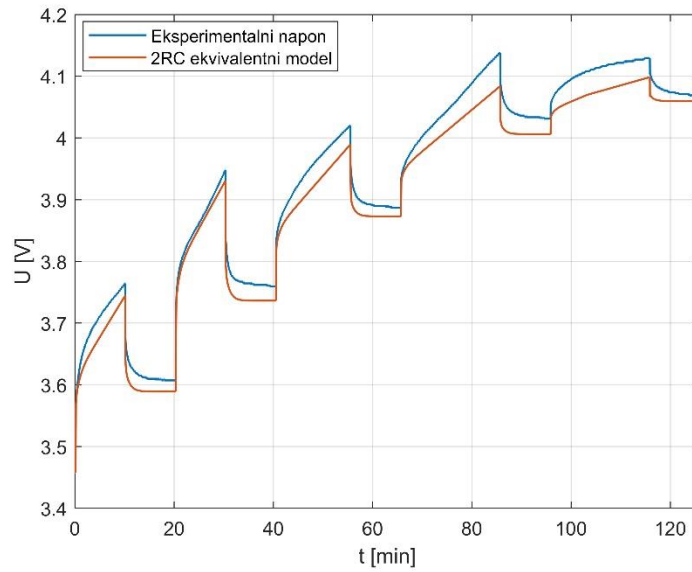


Sl. 4.4 Usporedba napona tijekom punjenja na 10 °C

Ovdje se može primijetiti kako su odstupanja na 10 °C puno manja i prihvatljivija. U ovom slučaju do izražaja dolaze samo utjecaji slabije preciznosti mjerne opreme na aproksimaciju parametara, kao i nesavršenost modela na konačni rezultat simulacije. Ova temperatura nije granična, nego je u intervalu radne temperature baterije. Pritom se može vidjeti kako je podudaranje bolje pri nižim stanjima napunjenosti, što znači da je pri nižim stanjima napunjenosti bila bolja aproksimacija parametara, tj. pretpostavlja se da je manji utjecaj mjerne opreme bio pri tim stanjima napunjenosti. Nadalje na slici (Sl. 4.5) i slici (Sl. 4.6) su prikazani struja punjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom punjenja za sobnu temperaturu od 23 °C.

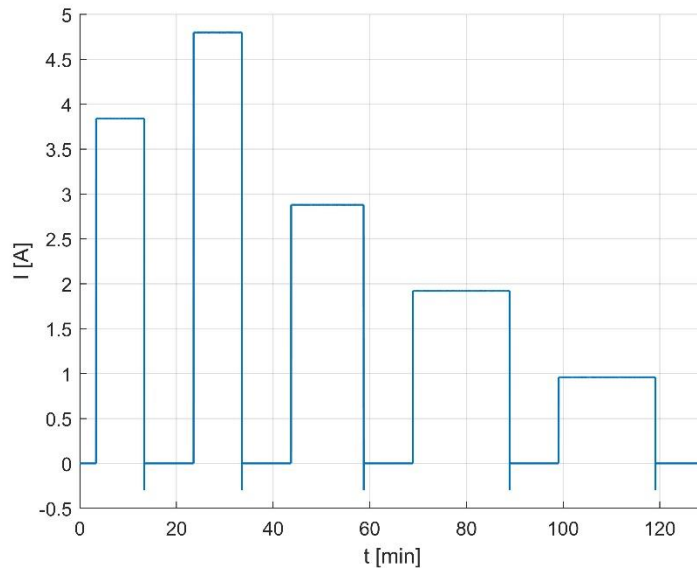


Sl. 4.5 Struja punjenja na temperaturi 23 °C

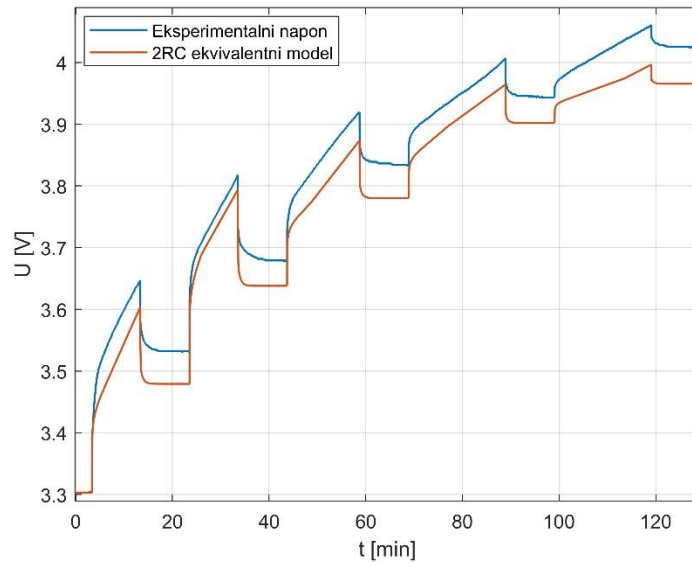


Sl. 4.6 Usporedba napona tijekom punjenja na 23 °C

Pri 23 °C podudaranje je najbolje i ovdje su razlike vrlo prihvatljive i relativno male. Ovdje je podudaranje zadovoljavajuće i pri nižim i pri višim stanjima napunjenosti. Na 23 °C je utjecaj limitirajuće rezolucije došao najmanje do izražaja te je zbog toga i podudaranje eksperimentalnog i simulacijskog napona najbolje. Zadnja simulacija je bila pri 45 °C te su na slici (Sl. 4.7) i slici (Sl. 4.8) prikazani struja punjenja i usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom punjenja na toj temperaturi.

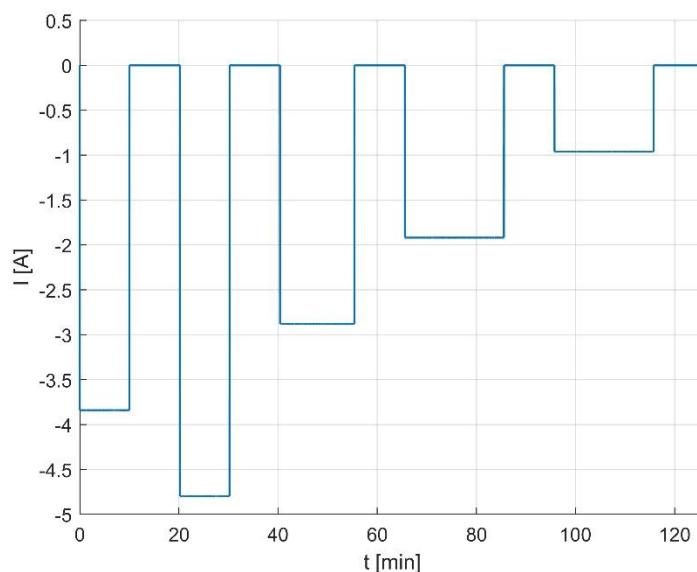


Sl. 4.7 Struja punjenja na temperaturi 45 °C

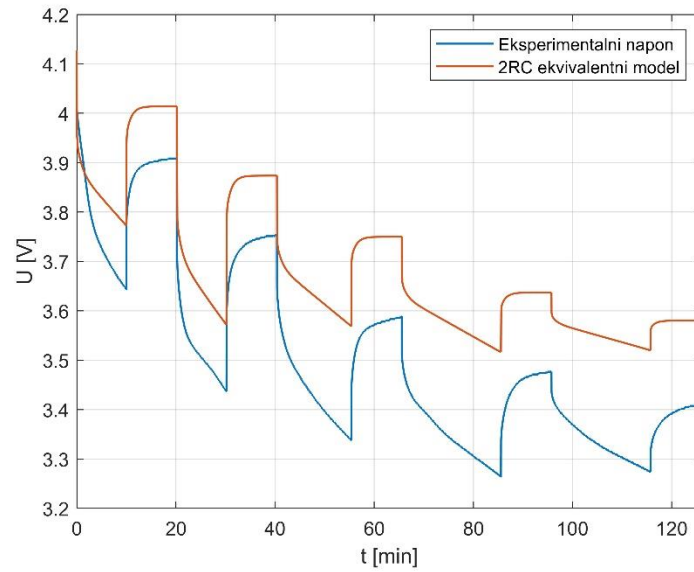


Sl. 4.8 Usporedba napona tijekom punjenja na 45 °C

Na 45 °C je podudaranje opet nešto lošije u odnosu na temperaturu od 23 °C, ali puno bolje nego na temperaturi od 0 °C. Iako je temperatura od 45 °C blizu one gornje granične temperature za punjenje, podudaranje je bolje nego na 0 °C. Na ovoj temperaturi je podudaranje između eksperimentalnog i simulacijskog napona otprilike jednako kao i na 10 °C, možda za nijansu bolje. Aproksimacija parametara je dakle najbolja bila pri 23 °C, odnosno i karakteristike baterije se najbolje mogu opisati pri toj nekoj sobnoj temperaturi. Dalje se provelo pražnjenje na ovim temperaturama pa su na slici (Sl. 4.9) i slici (Sl. 4.10) prikazani struja pražnjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom pražnjenja na temperaturi od 0 °C.

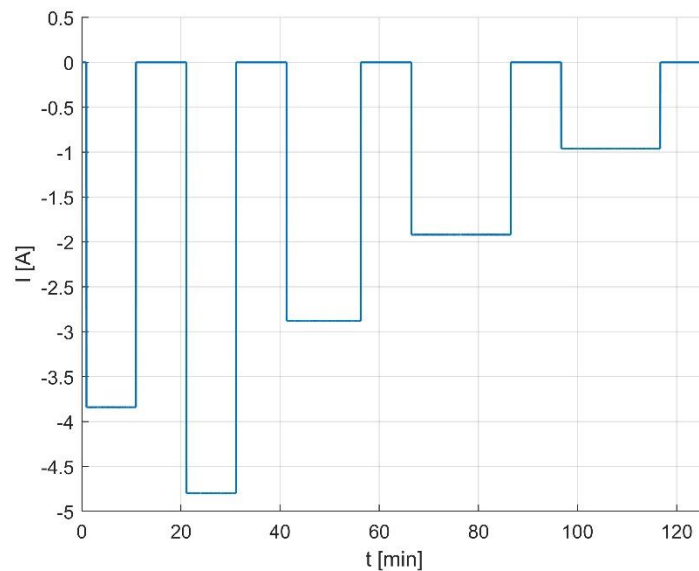


Sl. 4.9 Struja pražnjenja na temperaturi 0 °C

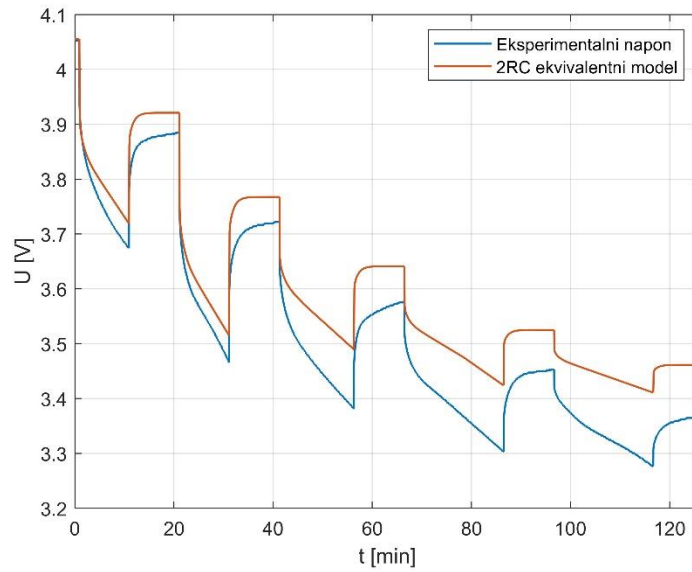


Sl. 4.10 Usporedba napona tijekom pražnjenja na 0 °C

Kao i kod punjenja na temperaturi od 0 °C, i za pražnjenje su dosta velike razlike i odstupanje simulacijskog napona od eksperimentalnog. Kao i kod punjenja, rezolucija je limitirajuća pa se nije uspjelo dobiti bolje podudaranje zbog pogreške u aproksimaciji. Na slici (Sl. 4.11) i slici (Sl. 4.12) su prikazani struja pražnjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom pražnjenja na temperaturi od 10 °C.

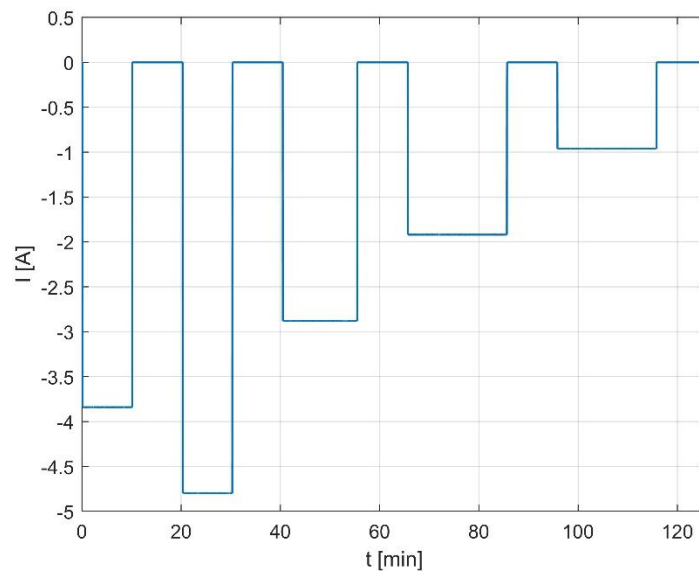


Sl. 4.11 Struja pražnjenja na temperaturi 10 °C

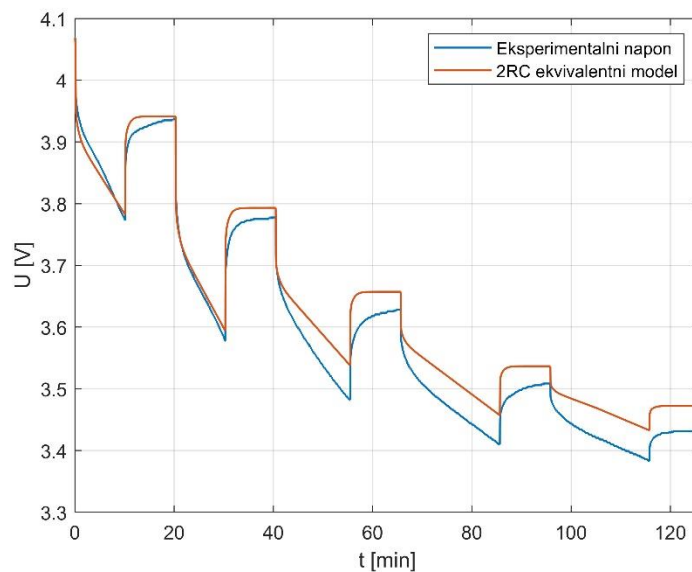


Sl. 4.12 Usporedba napona tijekom pražnjenja na 10 °C

Pri ovoj temperaturi podudaranje između eksperimentalnog i simulacijskog napona je bolje nego na temperaturi od 0 °C. Kao i u slučaju punjenja, manje su razlike pri nižim stanjima napunjenosti, tj. tamo je pogreška u aproksimaciji bila manja pa su parametri preciznije određeni. Na slici (Sl. 4.13) i slici (Sl. 4.14) su prikazani struja pražnjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom pražnjenja na sobnoj temperaturi od 23 °C.

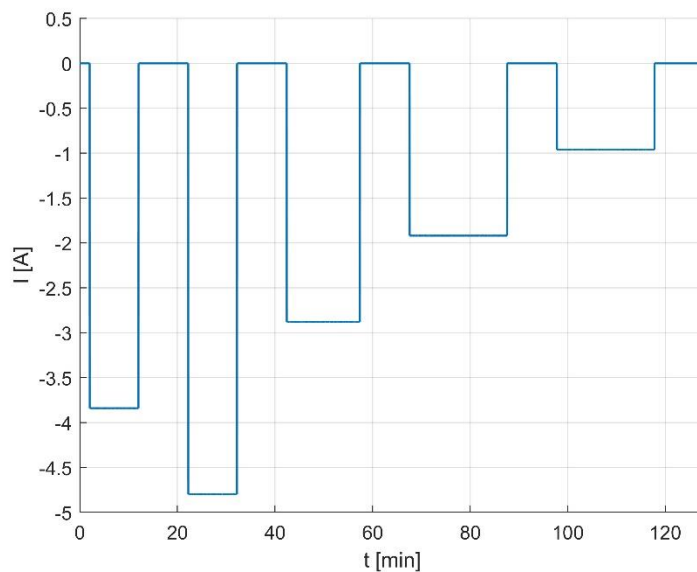


Sl. 4.13 Struja pražnjenja na temperaturi 23 °C

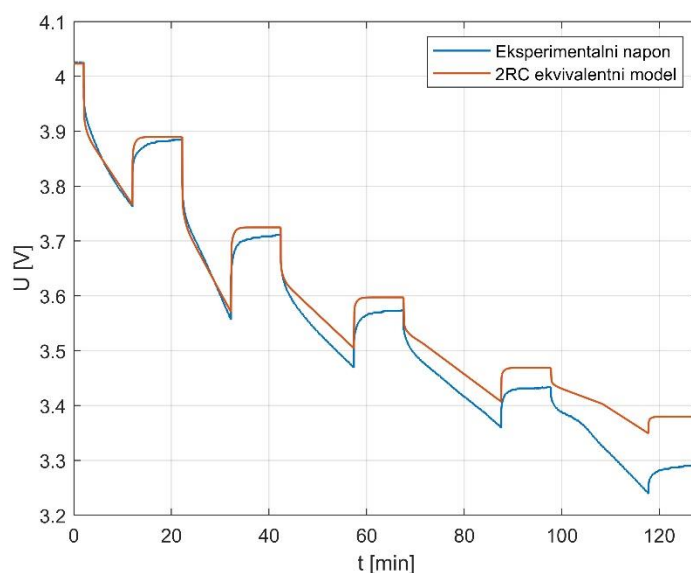


Sl. 4.14 Usporedba napona tijekom pražnjenja na 23 °C

Podudaranje je ovdje jako dobro, pogotovo pri nižim stanjima napunjenosti gdje se gotovo i poklapa, ali je i pri višim stanjima napunjenosti zadovoljavajuće poklapanje. Na temperaturi od 23 °C su čak i manje razlike između eksperimentalnog i simulacijskog napona nego u slučaju punjenja pri istoj temperaturi. Na temperaturi od 23 °C je najbolje podudaranje i za punjenje i za pražnjenje jer je to neka standardna temperatura na sredini temperaturnog radnog područja baterije pri kojoj ima najmanje oscilacije zbog mjerne opreme pa je posljedično tome eksperimentalni napon najkvalitetniji. Zbog toga je i aproksimacija parametara preciznija pa je simulacijski napon vrlo sličan eksperimentalnom naponu. Zadnja simulacija provedena je na temperaturi od 45 °C za pražnjenje. Na slici (Sl. 4.15) i slici (Sl. 4.16) su prikazani struja pražnjenja te usporedba eksperimentalnog i simulacijskog napona tijekom pražnjenja na temperaturi od 45 °C.



Sl. 4.15 Struja pražnjenja na temperaturi 45 °C



Sl. 4.16 Usporedba napona tijekom pražnjenja na 45 °C

Na temperaturi od 45 °C tijekom pražnjenja je također bolje podudaranje simulacijskog i eksperimentalnog napona, nego u slučaju punjenja na toj temperaturi. Manje su razlike pri nižim stanjima napunjenosti, ali to se pokazalo na svakoj temperaturi. Ovdje, kao i za temperaturu od 23 °C, razlike nisu toliko izražene ni pri višim stanjima napunjenosti te se mogu smatrati kao dovoljno zadovoljavajuće.

Zaključak

Nakon provedenih svih simulacija i analiza, nekoliko stvari se može zaključiti. Prije svega, vidljivo je da podudaranja između eksperimentalnog napona na stvarnoj bateriji i simulacijskog napona ekvivalentnog modela nisu ista pri svakoj temperaturi. Pritom su najveća odstupanja i razlike na temperaturi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i to posebno pri višim stanjima napunjenosti. Najmanja odstupanja i razlike su na temperaturama $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ i to tijekom procesa pražnjenja, dok su kod punjenja nešto veća, ali i dalje prihvatljiva. Mjerni uređaj koji je bio dostupan u laboratoriju za snimanje napona na stvarnoj bateriji ima limitirajuću rezoluciju, a samim time onda i vrijeme uzorkovanja. Zbog tog ograničenja, nije bilo moguće podesiti bolje vrijeme uzorkovanja i rezoluciju. U eksperimentalnom naponu su se stoga pojavili isti uzorci uz pojavu „stepenica“ u dijelu krivulje kada napon ulazi u fazu relaksacije. Kako je taj dio krivulje najbitniji za aproksimaciju parametara R_1 , R_2 , C_1 i C_2 , zbog tih pojava je aproksimacija ispala dosta neprecizna, a posljedično tome i odstupanja su povećana. Pretpostavlja se da na temperaturama $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ je taj utjecaj lošije preciznosti mjerne opreme bio manji pa je onda i podudaranje simulacijskog i eksperimentalnog napona na tim temperaturama bilo jako dobro. Najbitnije je da oblik simulacijskog napona je vrlo sličan obliku eksperimentalnog napona, što znači da model može simulirati ponašanje napona na stvarnoj bateriji, bez obzira na to što vrijednosti napona nisu jednake. Da se dobio simulacijski napon kompletno drugačijeg oblika od eksperimentalnog, onda bi se model mogao proglasiti nevaljalim te bi se aproksimacija parametara morala ponovno raditi ispočetka kako bi se dobilo što sličnije stvarnoj bateriji. Model je dobro napravljen te je za temperature od $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ podudaranje eksperimentalnog i simulacijskog napona jako dobro, što je u konačnici i bio cilj ovoga rada. Pokazalo se da u većini situacija model dobro opisuje karakteristike i ponašanje stvarne baterije pa se može smatrati da je rad uspješno napravljen i konstruiran. Potencijalna nadogradnja modela u budućnosti podrazumijevala bi dodavanje još paralelnih RC grana kako bi se dobio model višeg stupnja. Ovakav način aproksimacije parametara bi vjerojatno dao puno bolje rezultate da je bio dostupan mjerni uređaj s boljom rezolucijom, odnosno s boljim podešavanjem vremena uzorkovanja. Zaključak je da zbog ograničenja vremena uzorkovanja i rezolucije mjernog uređaja, kao i zbog nepreciznosti ostatka mjerne opreme, nije najuspješnije dobivena prijelazna pojava napona prilikom prijelaza u fazu relaksacije. Cjelokupni rad i model su dobro konstruirani i opisuju ponašanje stvarne baterije u različitim situacijama.

Literatura

- [1] S. Thanagasundram, R. Arunachala, K. Makinejad, T. Teutsch, A. Jossen. *A Cell Level Model for Battery Simulation*. European Electric Vehicle Congress, Bruxelles, Belgija, (2012).
- [2] F. Feng, R. Lu, G. Wei, C. Zhu. *Identification and analysis of model parameters used for LiFePO₄ cells series battery pack at various ambient temperature*. The Institution of Engineering and Technology, (2015).
- [3] S.S.Madani, E. Schaltz, S.K. Kaer. *An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery*. Department of Energy Technology, Aalborg, Danska, (2019).
- [4] E. Choi, S. Chang. *A Temperature-Dependent State of Charge Estimation Method Including Hysteresis for Lithium-Ion Batteries in Hybrid Electric Vehicles*. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul, Seoul, Južna Koreja, (2020).
- [5] Y. Huangfu, J. Xu, D. Zhao, Y. Liu, F. Gao. *A Novel Battery State of Charge Estimation Method Based on a Super-Twisting Sliding Mode Observer*. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Kina, (2018).
- [6] H. Lei, Y.Y. Han. *The measurement and analysis for Open Circuit Voltage of Lithium-ion Battery*. Journal of Physics: Conference Series, Wuhan University of Technology, Wuhan, Kina, (2019).
- [7] Q. Wang, T. Gao, X. Li. *SOC Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Equivalent Circuit Model with Variable Parameters*. School of Electronic and Information, Kina, (2022).
- [8] Y. Xu, M. Hu, C. Fu, K. Cao, Z. Su, Z. Yang. *State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on Temperature-Dependent Second Order RC Model*. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, School of Automotive Engineering, Kina, (2019).
- [9] R.O.Nemes, S.M. Ciornei, M. Ruba, C. Martis. *Parameters identification using experimental measurements for equivalent circuit Lithium-Ion cell models*. Department of Electrical Machines and Drives, Technical University of Cluj-Napoca, Rumunjska, (2019).

Sažetak

Naslov: Modeliranje baterije korištenjem metode ekvivalentnog kruga

Ključne riječi: model, baterija, ekvivalentni krug, stanje napunjenosti, napon otvorenog kruga, ambijentalna temperatura, identifikacija modela

Sažetak: U radu je razvijen model ekvivalentnog kruga drugog reda koji se koristi za određivanje napona i stanja napunjenosti baterije. Model je izrađen na temelju krivulja napona i struje dobivenih eksperimentalno u laboratoriju na stvarnoj bateriji. Parametri modela dobiveni su aproksimacijom dijela krivulje napona, a napon otvorenog kruga određen je također iz eksperimentalnog napona. Identifikacija modela, odnosno njegovih parametara je kvalitetno napravljena jer su se dobili rezultati koji se u većini situacija dobro poklapaju s eksperimentalnim rezultatima. Model je verificiran na temelju krivulja napona te usporedbom s eksperimentalnim krivuljama na stvarnoj bateriji.

Summary

Title: Battery Modeling using the Equivalent Circuit Method

Keywords: model, battery, equivalent circuit, state of charge, open circuit voltage, ambient temperature, model identification

Summary: This paper developed an equivalent circuit model of second order that is used to determine the voltage and state of charge of the battery. The model was created based on voltage and current curves obtained experimentally in the laboratory on a real battery. The model parameters were obtained by approximating parts of voltage curve and the open circuit voltage was also determined from the experimental voltage. The identification of the model i.e. its parameters was done well because the simulation results are good in most cases and match well with experimental results. The model has been verified by comparison with experimental curves on a real battery.