

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Karlo Kvaternik

**MODELIRANJE, EKSPERIMENTALNA
IDENTIFIKACIJA I DIZAJN ESTIMATORA
NAPREDNIH SEKUNDARNIH BATERIJA
ZASNOVANIH NA LITIJ-TITANAT
TEHNOLOGIJI**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za strojarsku automatiku, Zavod za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pod vodstvom prof. dr. sc. Danijela Pavkovića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

SADRŽAJ

Popis slika	
1. Uvod	1
2. Dinamički model baterije	3
2.1. Postavljanje ekvivalentnog strujnog kruga	3
2.2. Određivanje krivulje napona otvorenog kruga	5
2.2.1. Nelinearna regresija pomoću tangens funkcije	7
2.2.2. Nelinearna regresija pomoću polinomne funkcije	9
2.2.3. Nelinearna regresija pomoću kubičnog spline-a	9
2.3. Model prijenosne funkcije u diskretnom vremenu prikladan za identifikaciju	13
3. Dizajn estimatora stanja napunjenosti baterije	15
3.1. Estimator stanja napunjenosti baterije na temelju produženog kalmanovog filtra	15
4. Rezultati	18
4.1. Krivulje napona otvorenog kruga	18
4.2. Mjerenje kapaciteta napunjenosti baterije u odnosu na karakteristiku struje	18
4.3. Eksperimentalno snimanje mapa parametara modela ekvivalentnog kruga	19
4.4. Rezultati eksperimentalne validacije	24
4.5. Rezultati estimatora stanja napunjenosti baterije	29
5. Zaključak	31
6. Zahvala	32
Bibliografija	33

Popis slika

1.	Ekvivalentni strujni krug baterije	3
2.	RC mreža	4
3.	Postava za testiranje baterije	6
4.	Mjerene točke odvojene po segmentima	10
5.	Napon baterije uzrokovan PRBS-om te aproksimacija napona otvorenog kruga	14
6.	Blok dijagram estimatora stanja	17
7.	Krivulje napona otvorenog kruga U_{oc}	18
8.	Krivulje pražnjenja konstantne struje baterije (a) i ovisnost kapaciteta baterije u odnosu na struju pražnjenja (b)	19
9.	Usporedni eksperimentalni tragovi tijekom punjenja i pražnjenja s prosječnom (DC) strujom od 24 A sa superponiranim perturbacijama PRBS signala od ± 4 A.	20
10.	Unutarnji otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - punjenje . . .	21
11.	Unutarnji otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - pražnjenje . .	21
12.	Polarizacijski otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - punjenje .	22
13.	Polarizacijski otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - pražnjenje	22
14.	Polarizacijska vremenska konstanta baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - punjenje	23
15.	Polarizacijska vremenska konstanta baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - pražnjenje	23
16.	Blok dijagram ekvivalentnog strujnog kruga baterije	24

17.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 6 A	25
18.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 6 A	25
19.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 12 A	26
20.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 12 A	26
21.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 18 A	27
22.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 18 A	27
23.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 24 A	28
24.	Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 24 A	28
25.	Usporedba estimirane i simulacijske vrijednosti stanja napunjenosti tokom punjenja konstantnom strujom	29
26.	Uvećani dio početnog dijela	30

1. Uvod

Litijeve baterije predstavljaju najsuvremeniju tehnologiju elektrokemijskih baterija s povoljnim kalendarskim vijekom trajanja do 15 godina i specifičnim troškovima od oko 145 EUR/kWh pohranjene električne energije za najnapredniju tehnologiju baterija litij-titanat [1]. Zbog kapaciteta baterije, još uvijek je povoljnije od alternativnih izvora energije kao što je vodik, posebno kada se uzme u obzir povratna učinkovitost pretvorbe energije [1]. Anodni materijal litij-titanat oksid predložen je prije desetak godina kao dobra zamjena za uobičajeno korištene anode na bazi ugljika u sekundarnim baterijama na bazi litija zbog praktične odsutnosti naprezanja anodnog materijala tijekom pražnjenja velike brzine [2]. Zapravo, litij-titanat oksid se također može koristiti kao anodni materijal u drugim, alternativnim baterijskim kemijama kao što su one temeljene na natrij-ionskoj tehnologiji, čija bi proizvodnja mogla biti jeftinija zbog prirodnog obilja natrija kao sirovine [3].

Štoviše, napredne baterije na bazi litija, kao što su litij-željezo-fosfat (LiFePO₄) i litij-titanat (LTO) su trenutno među najsigurnijim dostupnim tehnologijama za pohranu energije u baterijama, koje karakterizira iznimna toplinska stabilnost i životni vijek (trajnost) [4]. Prethodno navedene tehnologije baterija također su komplementarne u smislu energije i gustoće snage (pri čemu su LiFePO₄ baterije prikladnije za dugotrajno pražnjenje niske snage, a LTO ima veću brzinu punjenja i pražnjenja). Stoga su ove baterije razmatrane unutar hibridnog baterijskog skladištenja energije, što je rezultiralo 10-20% nižim troškovima u usporedbi s baterijskim paketima koji se temelje isključivo na LTO i LiFePO₄ [4].

U tu svrhu, referenca [5] raspravlja o ključnim prednostima LTO ćelija, s dodatnim prednostima u smislu poboljšanih toplinskih svojstava materijala u usporedbi s drugim litij-ionskim kemijama što dovodi do poboljšanih sigurnosnih značajki, kao što je značajno smanjenje stvaranja dendrita i litija oplata elektroda, čak i pod teškim radnim uvjetima, kao što su visoke struje (oko 25C za kontinuirano pražnjenje i punjenje), zajedno s iznimnom izdržljivošću (20000 ciklusa punjenja/pražnjenja s 1C strujom). Studija u [5] zaključuje da LTO baterijske ćelije nude iznimne mogućnosti brzine punjenja/pražnjenja, iako sa smanjenom gustoćom energije u usporedbi s klasičnim litij-ionskim ćelijama s grafitnim anodama. Zbog svojih iznimnih cikličnih karakteristika i izdržljivosti, čini se da su LTO ćelije prikladne za hibridne primjene energije u pogonskim sklopovima elektrificiranih vozila.

Kako bi se olakšao povećani prodor tehnologija litijevih baterija u heterogone domene, prvo je potrebno provesti njihovo modeliranje i eksperimentalnu identifikaciju, pri čemu se dobiveni model baterije može koristiti u brojne svrhe, kao što su: (i) termički nad-

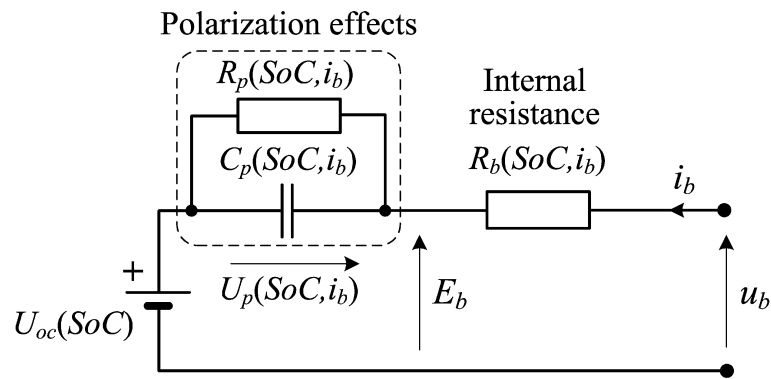
zor temeljen na smanjen skup mjerenja [6], (ii) stanje napunjenosti (SoC) i praćenje stanja energije [7], obično unutar prikladnog okvira procjene [8], (iii) dizajn sustava kontrole punjenja baterije [9] i dizajn sustava upravljanja baterijom [10], i (iv) procjena zdravstvenog stanja baterije (SoH) [4] i preostalog vijeka trajanja (RUL) [11]. Takvi napori na modeliranju baterija obično su usmjereni na razvoj modela ekvivalentnog električnog kruga (tzv. Theveninov model) [12], koji također može uključivati toplinske učinke [6] prvenstveno povezane s temperaturnim varijacijama parametara Theveninovog modela [13]. Alternativno, može se upotrijebiti napredniji model koji uključuje elektrokemijske fenomene uz toplinske učinke [14], koji se zatim mogu upotrijebiti za analizu upravljanja toplinom baterije temeljenu na metodi konačnih elemenata (FEM) [15].

Imajući na umu ove aspekte korištenja baterije, ovaj rad predstavlja rezultate eksperimentalne karakterizacije najsuvremenije LTO baterijske ćelije, koja se koristi za modeliranje i validaciju Theveninova modela sa grupiranim parametrima usmjerenim na kontrolu baterijske ćelije. Model se kasnije koristi za izradu EKF-a temeljenog estimatora stanja napunjenosti baterije, što će se kasnije u radu i objasniti. Rad je organiziran na sljedeći način. Odjeljak 2 predstavlja model ekvivalentnog kruga baterije litij-titanatne LTO ćelije, dok odjeljak 3 predstavlja rezultate eksperimentalne procjene Theveninova modela baterijske ćelije korištenjem odgovarajućeg eksperimentalna postavka. Odjeljak 4 predstavlja procjenu stanja napunjenosti baterije na temelju prošireni Kalmanov filter (EKF) u obliku estimatora stanja, zajedno s rezultatima estimatora SoC simulacije za nominalni slučaj. Zaključna razmatranja i smjernice za budući rad su dano u odjeljku 5.

2. Dinamički model baterije

2.1. Postavljanje ekvivalentnog strujnog kruga

Za dobro postavljen model baterije, moramo ga ispravno i definirati. Baterija se može opisati sa ekvivalentnim strujnim krugom (Theveninov model) pomoću otpornika i kondenzatora, točnije polarizacijske efekte koji nastaju zbog same kemije baterije (U_p) i unutarnji otpor preko kojeg se disipira većinski dio topline. Za navedeni model će se odraditi set punjenja i pražnjenja (kojeg ćemo kasnije opisati) tako da dobimo dovoljno dobro područje djelovanja baterije. Također, uzet ćemo da se sve odvija pri konstantnoj temperaturi od 25 °C.



Slika 1: Ekvivalentni strujni krug baterije

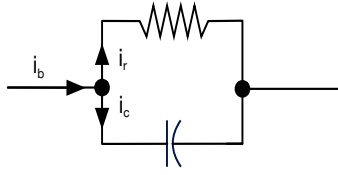
Napon otvorenog kruga (U_{oc}) je napon koji pokazuje vrijednosti napona kada baterija nije spojena na trošilo, te polarizacijski efekti i unutarnji otpor ne igraju veliku ulogu; Taj napon možemo smatrati nominalnim naponom baterije. Napon baterije (U_b) je ukupni napon koji baterija posjeduje prilikom spajanja trošila na nju (Taj napon se promatra pri korištenju same). R_p i C_p utjecaji dolaze do izražaja pri promjeni toka struje ili pri zaustavljanju punjenja/pražnjenja baterije. Također, samo-pražnjenje baterije nismo uzeli u obzir jer ne utječu na samu dinamiku.

S obzirom da je model postavljen kao model punjenja, dobivamo sljedeći izraz:

$$u_b(\xi) = U_{oc}(\xi) + R_b \cdot i_b + U_p \quad (2.1)$$

$$U_p = i_r \cdot R_p \quad (2.2)$$

S obzirom da struja i_r nije ista (ima u sebi kašnjenje zbog postojeće vremenske konstante RC mreže), možemo ga na sljedeći način opisati:



Slika 2: RC mreža

$$i_c = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (2.3)$$

Prebacivanjem u s-domenu dobivamo sljedeći izraz:

$$U = \frac{i_c}{C \cdot s} \quad (2.4)$$

Znamo da je napon Otpora jednak kada je kondenzator pun.

Stoga možemo zapisati:

$$\frac{i_c}{C \cdot s} = i_r \cdot R \quad (2.5)$$

Po 1. Kirchhoffovom zakonu znamo da je:

$$i_b = i_c + i_r \quad (2.6)$$

Uvrštavanjem (2.5) i (2.6) formule dobivamo izraz:

$$\begin{aligned} i_b - i_r &= i_r \cdot s \cdot R \cdot C \\ i_b &= i_r \cdot (1 + R \cdot C \cdot s) \end{aligned} \quad (2.7)$$

prebacivanjem članova i uvrštavanjem u (2.2) dobivamo:

$$U_p = \frac{1}{\tau_p s + 1} \cdot i_b \cdot R_p \quad (2.8)$$

Također, stanje napunjenosti baterije ćemo definirati preko električnog naboja te dobivamo daljnji izraz:

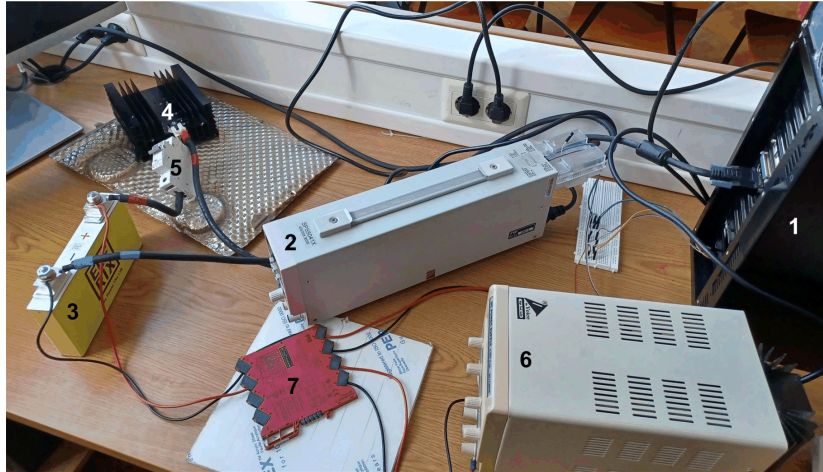
$$\xi = \xi_0 + \frac{1}{Q_{max}(I_b)} \cdot \int_0^t i_b \cdot dt \quad (2.9)$$

gdje je $Q_{max}(I_b)$ kapacitet punjenja baterije ovisan o struji, koji se obično modelira kao ovisan o prosječnoj struji baterije I_b [17].

S postavljenim jednadžbama, potrebne su još parametri baterije, točnije krivulja napona otvorenog kruga, unutarnji otpor, polarizacijski otpor te polarizacijski kapacitet. U sljedećoj točki ćemo se posvetiti na određivanje krivulje napona otvorenog kruga, načinom određivanja točaka kod mjerenja (protokol mjerenja) i pristupima nelinearne regresije.

2.2. Određivanje krivulje napona otvorenog kruga

Postava za testiranje baterije razvijena je u svrhu eksperimentalne karakterizacije, modeliranje i identifikaciju naprednih litijevih baterija, poput onih temeljenih na LiFePO4 i LTO kemije te i za testiranje regulatora i estimatora stanja/parametara. fotografija razvijene eksperimentalne postavke prikazana je na slici 3. Sastoji se od industrijskog računala (oznaka 1 na slici 3) opremljeno karticama za akviziciju i upravljanje. Industrijsko računalo pokreće namjenski upravljački softver u stvarnom vremenu i šalje odgovarajuće naredbe trenutne reference na laboratorijski DC/DC pretvarač struje (oznaka 2 na slici 3) koji sadrži integriranu funkciju kontrole struje i ograničenja napona, koja se koristi za punjenje i pražnjenje komercijalnu baterijsku ćelije 30Ah/2,4V/6C [16](oznaka 3 na slici 3). Iz operativnih sigurnosnih razloga, strujni krug za punjenje/pražnjenje baterije također ima blokirajuću diodu velike snage (oznaka 4 na slici 3) koja sprječava povratni tok struje uzrokovano neispravnim spajanjem električnih stezaljki i namjenskim prekidačem (oznaka 5 u Slika 3) za zaštitu od prekomjerne struje. Kako bi se izolirao kanal za mjerenje napona baterije na kontrolnoj i akvizicijskoj kartici s terminala napajanja DC/DC pretvarača, postava također ima izolacijsko pojačalo za mjerenje napona (oznaka 7 na slici 3) sa zasebnim napajanjem (oznaka 6 na slici 3).



Legenda: 1 - industrijsko računalo opremljeno karticama za akviziciju i upravljanje; 2 - DC/DC pretvarač; 3 - litij - titanat baterijska ćelija (30 Ah / 2.4 V); 4 - blokirajuća dioda; 5 - Osigurač; 6 - pomoćno 24 V_{DC} napajanje; 7 - izolacijsko pojačalo za mjerenje napona

Slika 3: Postava za testiranje baterije

Krivulja napona otvorenog kruga baterije se dobiva korištenjem testa punjenja konstantnom strujom (u ovom slučaju sa 6 A). Eksperiment je karakteriziran sa periodičnim kratkotrajnim intervalom punjenja nakon kojog slijedi razdoblje rekuperacije od najmanje dva sata i razdoblja smirivanja napona baterije. Upravo tom rekuperacijom smanjujemo utjecaj polarizacijske dinamike, koja se javlja zbog same kemije baterije, i dobivamo točniju krivulju napona otvorenog kruga.

Protokol mjerenja je sljedeći:

- Od početka punjenja do 20 % SoC-a - punimo po 1 Ah da dobijemo bolju točnost nelinearne karakteristike
- Od 20 % SoC-a do 75 % SoC-a - punimo po 3 Ah jer je ovo područje linearne karakteristike
- Od 75 % do 100 % SoC-a ponovno punimo po 1 Ah jer je ovo isto područje nelinearne karakteristike

Tablica 1: Mjerene vrijednosti napona otvorenog kruga

n_n	U_{oc} [V]	ξ [%]	ΔQ [Ah]
n_0	1,75322	0*	0*
n_1	2,03987	2,941	1
n_2	2,09326	5,882	2
n_3	2,10675	8,824	3
n_4	2,11610	11,765	4
n_5	2,12451	14,706	5
n_6	2,13360	17,647	6
n_7	2,13860	20,588	7
n_8	2,16270	29,412	10
n_9	2,18163	38,235	13
n_{10}	2,19778	47,059	16
n_{11}	2,22238	55,882	19
n_{12}	2,24607	64,706	22
n_{13}	2,29094	73,529	25
n_{14}	2,30815	76,470	26
n_{15}	2,32132	79,412	27
n_{16}	2,34510	82,353	28
n_{17}	2,36715	85,294	29
n_{18}	2,39125	88,235	30
n_{19}	2,41715	91,177	31
n_{20}	2,44550	94,118	32
n_{21}	2,48900	97,059	33
n_{22}	2,68371	100	34

Možemo primijetiti jednu zanimljivost kod mjerenja, naime od proizvođača znamo da je baterija deklarirana sa 30 Ah, no mi smo ju nabili do 34 Ah. To je očekivana i normalna stvar jer proizvođač u tolerancijama daje nazivne vrijednosti. U sljedećem dijelu ćemo pokazati 3 tipa nelinearne regresije s kojima ćemo opisati mjerene točke, usporediti sve tri te odabrati pravovaljanu za daljnje modeliranje modela baterije.

2.2.1. Nelinearna regresija pomoću tangens funkcije

S obzirom da krivulja napona dosta slični tangens funkciji, probat ćemo aproksimirati funkciju sa tangens funkcijom polinomom prvog reda.

Problem:

$$U_{oc}(\xi) = y(x) = a \cdot \tan(bx + c) + y_0 \quad (2.10)$$

Parametre a , b , c i y_0 treba pronaći, a primjenom metode najmanjih kvadrata ćemo

ih odrediti u rasponu mjerenih točaka n .

$$S = \sum_{k=1}^n (y_k - a \cdot \tan(bx + c) - y_0)^2 \quad (2.11)$$

Da bismo napravili regresiju i linearizirali, koristit ćemo se integralnim rješenjem željene funkcije.

$$y(x) = \frac{b}{a} \int (y(x))^2 dx - 2 \frac{bd}{a} \int y(x) dx + \left(\frac{bd^2}{a} + ab \right) \cdot x + C \quad (2.12)$$

$$y(x) = \frac{b}{a} \sum y^2 \cdot (x_k - x_{k-1}) - 2 \frac{by_0}{a} \sum y \cdot (x_k - x_{k-1})$$

$$S_1 = 0 \rightarrow S_k = S_{k-1} + \frac{1}{2} (y_k + y_{k-1}) (x_k - x_{k-1}), \quad k = 2 \rightarrow n \quad (2.13)$$

$$T_1 = 0 \rightarrow T_k = T_{k-1} + \frac{1}{2} (y_k^2 + y_{k-1}^2) (x_k - x_{k-1}), \quad k = 2 \rightarrow n$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum T_k^2 & \sum T_k S_k & \sum T_k x_k & \sum T_k \\ \sum T_k S_k & \sum S_k^2 & \sum S_k x_k & \sum S_k \\ \sum T_k x_k & \sum S_k x_k & \sum x_k^2 & \sum x_k \\ \sum T_k & \sum S_k & \sum x_k & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum T_k y_k \\ \sum S_k y_k \\ \sum x_k y_k \\ \sum y_k \end{bmatrix}$$

↓

$$b = \frac{1}{2} \sqrt{-B^2 + 4AC} = 2.4364 \quad (2.14)$$

$$X_k = \tan(bx_k), \quad k = 1 \rightarrow n$$

Sa sljedećim pojednostavljenjem ćemo odrediti i parametar c :

$$\begin{bmatrix} E \\ F \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum X_k^2 y_k^2 & \sum X_k^2 y_k & \sum X_k y_k \\ \sum X_k^2 y_k & \sum X_k^2 & \sum X_k \\ \sum X_k y_k & \sum X_k & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum X_k y_k^2 \\ \sum X_k y_k \\ \sum y_k \end{bmatrix}$$

↓

$$c = \arctan(E) = -1.0315 \quad (2.15)$$

Parametri a i y_0 računamo:

$$\begin{bmatrix} a \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum (\tan(bx_k + c))^2 & \sum \tan(bx_k + c) \\ \sum \tan(bx_k + c) & n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum \tan(bx_k + c)y_k \\ \sum y_k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1081 \\ 2.1816 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Te regresija krivulje napona otvorenog glasi:

$$U_{oc}(\xi) = 0,1081 \cdot \tan(2,4364x - 1,0315) + 2,1816 \quad (2.17)$$

2.2.2. Nelinearna regresija pomoću polinomne funkcije

Sljedeći tip nelinearne regresije je dobiven jednostavnije nego prethodna. Pomoću programskog paketa Matlab. Sa dobivenim mjerenim podacima pomoću metode *fit* smo dobili koeficijente polinoma 8. stupnja:

$$U_{oc}(\xi) = \sum_{n=0}^8 p_n \cdot \xi^n \quad (2.18)$$

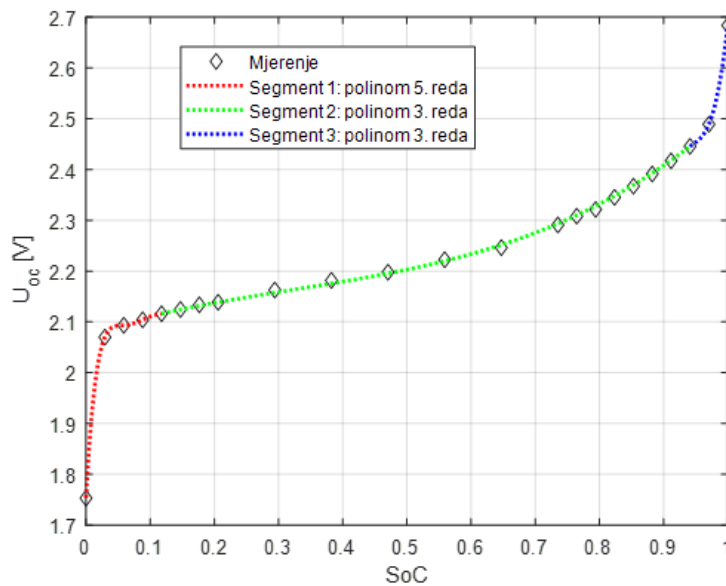
Tablica 2: Vrijednost polinoma

p_n	Koeficijenti polinoma
p_0	$0.0018 \cdot 10^3$
p_1	$0.0090 \cdot 10^3$
p_2	$-0.0861 \cdot 10^3$
p_3	$0.4252 \cdot 10^3$
p_4	$-1.1644 \cdot 10^3$
p_5	$1.8288 \cdot 10^3$
p_6	$-1.6198 \cdot 10^3$
p_7	$0.7409 \cdot 10^3$
p_8	$-0.1325 \cdot 10^3$

2.2.3. Nelinearna regresija pomoću kubičnog spline-a

Dobiveni napon otvorenog kruga u odnosu na točke napunjenosti se aproksimira kroz tri karakteristična radna intervala (nisko stanje napunjenosti, $0 < \xi < 10\%$, srednje stanje napunjenosti $10\% < \xi < 90\%$ i visoko stanje napunjenosti $90 < \xi < 100\%$) kubičnim

spline-ovima uz uvjet da gradijent statičke krivulje na granici susjednih intervala mora biti jednak.



Slika 4: Mjerene točke odvojene po segmentima

Ako pogledamo sliku, možemo postaviti potrebne uvjete koji su potrebni za svaki segment.

Segment 1 - prvih pet točaka OCV(ξ) karakteristike:

$$x_1 = [\xi(1) \quad \xi(2) \quad \xi(3) \quad \xi(4) \quad \xi(5)]$$

$$y_1 = [U_{oc}(1) \quad U_{oc}(2) \quad U_{oc}(3) \quad U_{oc}(4) \quad U_{oc}(5)]$$

Rubni uvjet:

$$\frac{dy_1}{dx_1} = \frac{U_{oc}(6) - U_{oc}(5)}{\xi(6) - \xi(5)}$$

Spline aproksimacija za **segment 1** je uzet polinom petog stupnja:

$$y(x) = p_1(1)x^5 + p_1(2)x^4 + p_1(3)x^3 + p_1(4)x^2 + p_1(5)x + p_1(6) \quad (2.19)$$

S obzirom da znamo vrijednosti x možemo zapisati kao:

$$\begin{bmatrix} x_1(1)^5 & x_1(1)^4 & x_1(1)^3 & x_1(1)^2 & x_1(1) & 1 \\ x_1(2)^5 & x_1(2)^4 & x_1(2)^3 & x_1(2)^2 & x_1(2) & 1 \\ x_1(3)^5 & x_1(3)^4 & x_1(3)^3 & x_1(3)^2 & x_1(3) & 1 \\ x_1(4)^5 & x_1(4)^4 & x_1(4)^3 & x_1(4)^2 & x_1(4) & 1 \\ x_1(5)^5 & x_1(5)^4 & x_1(5)^3 & x_1(5)^2 & x_1(5) & 1 \\ 5x_1(5)^4 & 4x_1(5)^3 & 3x_1(5)^2 & 2x_1(5) & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(1) \\ p_1(2) \\ p_1(3) \\ p_1(4) \\ p_1(5) \\ p_1(6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(1) \\ y_1(2) \\ y_1(3) \\ y_1(4) \\ y_1(5) \\ \frac{dy_1}{dx_1} \end{bmatrix}$$

Segment 2 - od pete do N-2 točke OCV(ξ) karakteristike:

$$\begin{aligned} x_2 &= [\xi(5) \quad \xi(N-2)] \\ y_2 &= [U_{oc}(5) \quad U_{oc}(N-2)] \end{aligned}$$

Spline aproksimacija za **segment 2** je uzet polinom trećeg stupnja:

$$y(x) = p_2(1)x^3 + p_2(2)x^2 + p_2(3)x + p_2(4) \quad (2.20)$$

S obzirom da znamo vrijednosti x možemo zapisati kao:

$$\begin{bmatrix} 3x_2(1)^2 & 2x_2(1) & 1 & 0 \\ x_2(1)^3 & x_2(1)^2 & x_1(1) & 1 \\ x_2(2)^3 & x_2(2)^2 & x_1(2) & 1 \\ 3x_2(2)^2 & 2x_2(2) & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(1) \\ p_1(2) \\ p_1(3) \\ p_1(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy_1}{dx_1} \\ y_1(1) \\ y_1(2) \\ \frac{dy_3}{dx_3} \end{bmatrix}$$

Segment 3 - od N-2 do N-te točke OCV(ξ) karakteristike:

$$\begin{aligned} x_3 &= [\xi(N-2) \quad \xi(N-1) \quad \xi(N)] \\ y_3 &= [U_{oc}(N-2) \quad U_{oc}(N-1) \quad U_{oc}(N)] \end{aligned}$$

Rubni uvjet:

$$\frac{dy_3}{dx_3} = \frac{U_{oc}(N-2) - U_{oc}(N-3)}{\xi(N-2) - \xi(N-3)}$$

Spline aproksimacija za **segment 2** je uzet polinom trećeg stupnja:

$$y(x) = p_2(1)x^3 + p_2(2)x^2 + p_2(3)x + p_2(4) \quad (2.21)$$

S obzirom da znamo vrijednosti x možemo zapisati kao:

$$\begin{bmatrix} 3x_3(1)^2 & 2x_3(1) & 1 & 0 \\ x_3(1)^3 & x_3(1)^2 & x_3(1) & 1 \\ x_3(2)^3 & x_3(2)^2 & x_3(2) & 1 \\ x_3(3)^3 & x_3(3)^2 & x_3(3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(1) \\ p_1(2) \\ p_1(3) \\ p_1(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy_3}{dx_3} \\ y_1(1) \\ y_1(2) \\ y_1(3) \end{bmatrix}$$

Pomoću programskog paketa Matlab ćemo izračunati koeficijente te sa dobivenim vrijednostima možemo opisati krivulju.

2.3. Model prijenosne funkcije u diskretnom vremenu prikladan za identifikaciju

Ako uzmemo jednadžbu (2.1) te uvrstimo i (2.8) dobivamo:

$$u_b(\xi) = U_{oc}(\xi) + R_b \cdot i_b + \frac{1}{\tau_p s + 1} \cdot i_b \cdot R_p \quad (2.22)$$

Pretpostavimo da se napon baterije otvorenog kruga relativno sporo mijenja skupa sa stanjem napunjenosti $\left(\frac{\partial U_{oc}}{\partial \xi} \approx 0, \text{ u području } 20 < \xi < 80\right)$, dinamika struje i baterije se može aproksimirati linearnom prijenosnom funkcijom. Stoga, U_{oc} možemo "maknuti" iz modela tj. oduzeti od U_b jer želimo zadržati perturbaciju linearnog modela uzrokovano PRBS-om (u čemu je sačinjen polarizacijski dio).

$$\Delta u_b(s) = \frac{R_b \tau_p s + (R_p + R_b)}{\tau_p s + 1} \cdot i_b(s) \quad (2.23)$$

Model (2.23) možemo transformirati u diskretno područje pomoću Z-transformacije sa ZOH elementom na ulaz procesa modela (struja baterije i_b) te rezultira sljedeću funkciju u z-domeni:

$$\Delta u_b(z) = \frac{B(z)}{A(z)} i_b(z) = \frac{b_1 z + b_0}{z - a} i_b(z) \quad (2.24)$$

gdje su parametri modela (T je vrijeme uzorkovanja):

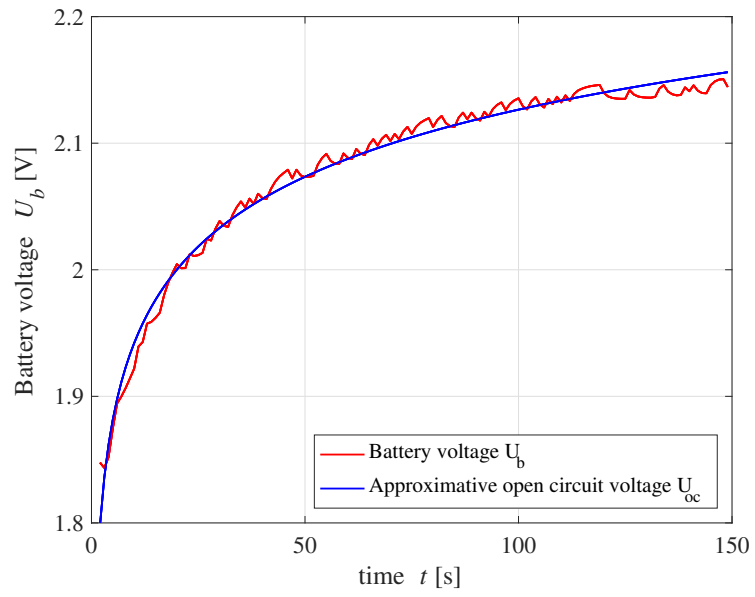
$$a = \exp\left(\frac{-T}{\tau_p}\right), \quad b_1 = R_b, \quad b_0 = R_p - a(R_p + R_b) \quad (2.25)$$

Pod pretpostavkom da se stohastičke perturbacije u mjerenju napona na terminalu baterije mogu modelirati Gausovim šumom u diskretnom vremenu, jednadžba razlike koja opisuje varijaciju napona baterije u odnosu na trenutnu dinamiku može se dati u obliku auto-regresivnog modela s egzogenim ulazima (ARX model) [18]:

$$\Delta u_b(k) = a \Delta u_b(k-1) + b_1 i_b(k) + b_0 i_b(k-1) + \eta(k) \quad (2.26)$$

Gdje je k korak uzorkovanja i $\eta(k)$ perturbacija nalik bijelom šumu.

Za nelinearne dijelove (početak i kraj) ćemo umjesto linearizirane prijenosne funkcije, aproksimirati nelinearne dijelove koji nastaju uzorkovanjem PRBS-om. Time dobivamo aproksimativnu funkciju U_{oc} (vidi sliku 5) koju možemo uvrstiti u (2.26).



Slika 5: Napon baterije uzrokovan PRBS-om te aproksimacija napona otvorenog kruga

3. Dizajn estimatora stanja napunjenosti baterije

Kalmanov filtar je optimalno rekurzivno rješenje linearnog filtriranja diskretnih podataka koji se najčešće koristi u vojnoj tehnologiji, točnije za autonomno upravljanje i u sustavima za navigaciju. Na samu efikasnost kalmanovog filtara možemo utjecati preko komponenata stohastičkih perturbacija u varijablama stanja $\nu(k)$ i šuma mjerenja $r(k)$ te pretpostavljamo da su oni međusobno neovisni. Također, navedeni vektori predstavljaju matrice kovarijanci (\mathbf{Q} i \mathbf{R}). Njihove vrijednosti ne možemo dobiti mjerenjem te ih sami postavljamo kao konstantnu vrijednost ili promjenjivu (Adaptivni Kalmanov filtar).

Primjerice, Ako nismo dovoljno sigurni u naš model, povećat ćemo vrijednosti kovarijance matrice \mathbf{R} jer one djeluju kao mjerene vrijednosti dinamičkog sustava. U slučaju da nismo sigurni da nam mjerene vrijednosti nisu sasvim točne, a sigurni smo da nam je model točan, povećat ćemo vrijednosti matrice kovarijance \mathbf{Q} . Vidjet ćemo u našem primjeru za razne vrijednosti kako nam se model ponaša te donesti zaključak na temelju toga. Upravo takvim aktivnim mijenjanjem vrijednosti \mathbf{Q} i \mathbf{R} postizemo adaptivni Kalmanov filtar koji pokušava optimizirati proces uz smanjenje kvadratne greške. Važno je napomenuti da je estimatoru potrebno postaviti točne početne uvjete da može brzo i efikasno funkcionirati.

Također, vrijeme uzorkovanja (T) bi trebalo bit daleko manje (brži estimator) u odnosu na vrijeme uzorkovanja stvarnog modela, tako da estimirane vrijednosti budu precizne stvarnim. S obzirom da je naš model nelinearan, ne možemo primijeniti standardan Kalmanov filtar, stoga koristimo prošireni Kalmanov filtar. U kratko, to je nelinearni model standardnog Kalmanovog filtra koji koristi linearizaciju oko estimacije stanja i kovarijance. Tehničke upute u nastavku opisuju način tehničkog oblikovanja rada i navođenja literature.

3.1. Estimator stanja napunjenosti baterije na temelju produženog kalmanovog filtra

Rezultati identifikacije modela ekvivalentnog kruga baterije koriste se kao osnova za estimaciju varijable stanja baterije, što se, prema jednadžbama (2.1) i (2.9), prevodi u on-line procjenu napona polarizacije baterije i stanja napunjenosti. Zbog nelinearne prirode modela baterije (tj. karakteriziran je nelinearnim mapama parametara), prikladan je nelinearni estimator stanja, kao što je prošireni Kalmanov filtar (EKF) [19].

U tu svrhu, nelinearni dinamički model baterije prepisuje se u sljedećem obliku prostora stanja:

$$\begin{aligned} \dot{u}_p &= \frac{1}{\tau_p(\xi, i_b)} (R_p(\xi, i_b)i_b - u_p) \\ \dot{\xi} &= \frac{i_b}{Q_b(i_b)} \\ u_b &= u_p + i_b R_b(\xi, i_b) + U_{oc}(\xi) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Gornji model se zatim diskretizira u vremenu (uzorkuje) korištenjem Eulerove aproksimacijske vremenske razlike vremenskih derivacija i proširuje se sa Gausovim izvorima šuma (stohastičke perturbacije), što rezultira sljedećim diferencijskim jednadžbama:

$$\begin{aligned} u_p(k) &= \left(1 - \frac{T}{\tau_p(\xi(k-1), i_b(k-1))}\right) u_p(k-1) + \frac{TR_p(\xi(k-1), i_b(k-1))}{\tau_p(\xi(k-1), i_b(k-1))} i_b(k-1) \\ &\quad + T\nu_p(k-1) \\ \xi(k) &= \xi(k-1) + \frac{T}{Q_b(i_b(k-1))} + T\nu_\xi(k-1) \\ u_b(k) &= u_p(k) + i_b(k)R_b(\xi(k), i_b(k)) + U_{oc}(\xi(k)) + e(k) \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdje je k korak uzorkovanja, T je vrijeme uzorkovanja, ν_p i ν_ξ su stohastičke perturbacije u varijablama stanja sustava, a e je stohastički mjerni šum u mjerenju napona baterije u_b .

Gornje jednadžbe prikladne su za implementaciju procesa u diskretnom prostoru stanja u okviru EKF estimatora stanja [19]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(k-1), i_b(k-1)) + \mathbf{\Omega}\nu(k) \\ u_b(k) &= \mathbf{h}(x(k), i_b(k)) + e(k) \end{aligned} \quad (3.3)$$

s vektorom stanja $\mathbf{x}(k)$ i matricom skaliranja stohastičke perturbacije $\mathbf{\Omega}$ definirano na sljedeći način:

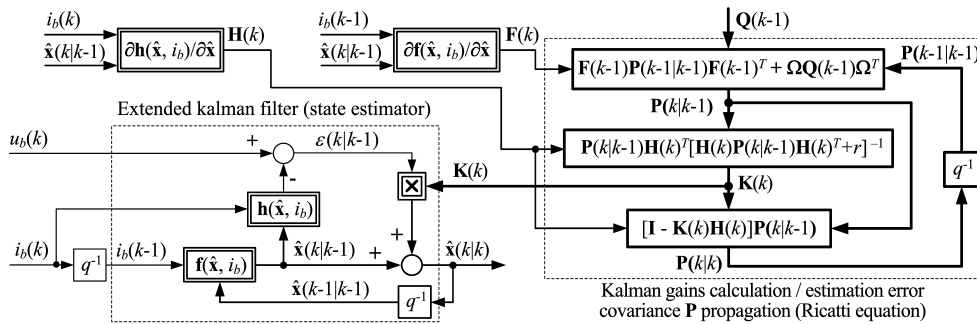
$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} u_p(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

Prikaz blok dijagrama estimatora temeljenog na EKF-u prikazan je na slici 6, s nelinearnim modelom prostora stanja koji se koristi unutar njega za izračunavanje takozvane apriorne procjene stanja $\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)$, koja se naknadno ispravlja putem mjerenja napona baterije što rezultira konačna (a-posteriori) procjena stanja $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$. U tu svrhu algoritam estimacije treba izračunati korekcije estimatora na temelju takozvane Ricatti-jeve jednadžbe [19]. Ovaj proces zahtijeva izračun sljedećih Jacobianovih matrica, koje se odnose na parcijalne derivacije svih parametara modela baterije s obzirom na stanje napunjenosti baterije i napon polarizacije (stanja sustava baterije):

$$\mathbf{F} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, i_b)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) i_b(k-1)}$$

$$\mathbf{H} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, i_b)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) i_b(k)}$$

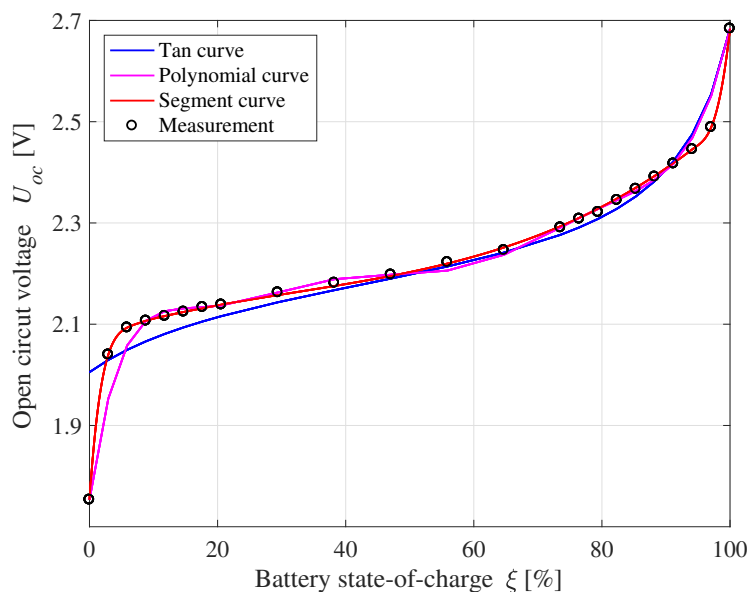
koji su potrebni za procjenu matrice kovarijance pogreške \mathbf{P} unutar estimatora korištenjem pretpostavljenih varijanci poremećaja stanja ν (karakteriziran matricom kovarijance poremećaja čiji su elementi odabrani kao kompromis između osjetljivosti estimatora na šum i sposobnosti praćenja) i šuma e varijanca r u naponu terminala baterije (mjerenje) u_b .



Slika 6: Blok dijagram estimatora stanja

4. Rezultati

4.1. Krivulje napona otvorenog kruga



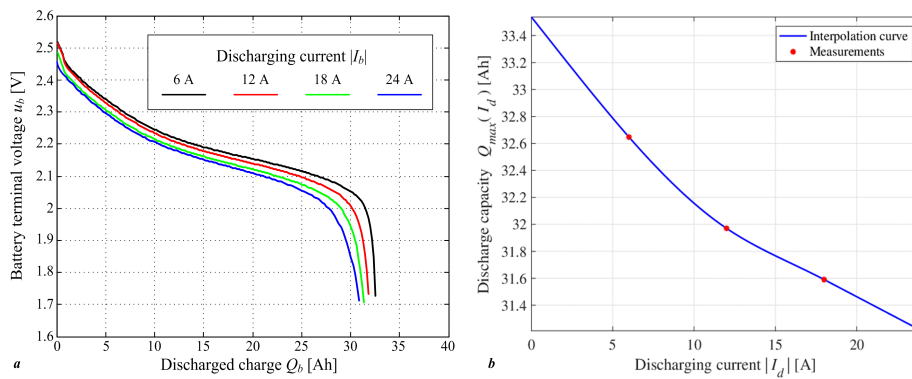
Slika 7: Krivulje napona otvorenog kruga U_{oc}

Ako pogledamo sliku iznad, vidimo regresijske funkcije koje smo računali. Naime, na prvu vidimo na tangens funkcija ne odgovara našoj krivulji U_{oc} -a jer ne prolazi početni nelinearni dio. Polinomna i segmentna funkcija dosta bolje opisuju mjerene točke, no i dalje se vidi da je segmentna konzistentnija od polinomne jer prati vjernije točke. Stoga, za daljnju izradu modela, je uzeta segmentna krivulja.

4.2. Mjerenje kapaciteta napunjenosti baterije u odnosu na karakteristiku struje

Krivulja kapaciteta baterije u odnosu na struju pražnjenja rekonstruirana je za komercijalnu baterijsku ćeliju od 30 Ah/2,4 V/6C [16]. Rekonstruirana je na temelju testova pražnjenja pri konstantnoj struji, a tako snimljeni naponi terminala baterije u odnosu na krivulje ispražnjenog kapaciteta za konstantne struje pražnjenja prikazane su na slici 7a, pri čemu se eksperiment pražnjenja prekida kada napon ćelije baterije padne ispod 1,7 V. Kapacitet baterije u odnosu na točke struje pražnjenja $Q_b(I_b)$, prikazane su na slici 8b te se interpoliraju preko raspona struje pražnjenja baterije kako bi se naglasio trend kapaciteta punjenja baterije. Rezultati na slici 8b pokazuju da je LTO baterijska ćelija karakterizirana relativno malim smanjenjem kapaciteta punjenja (iznosi manje od 5 %) Q_b u odnosu

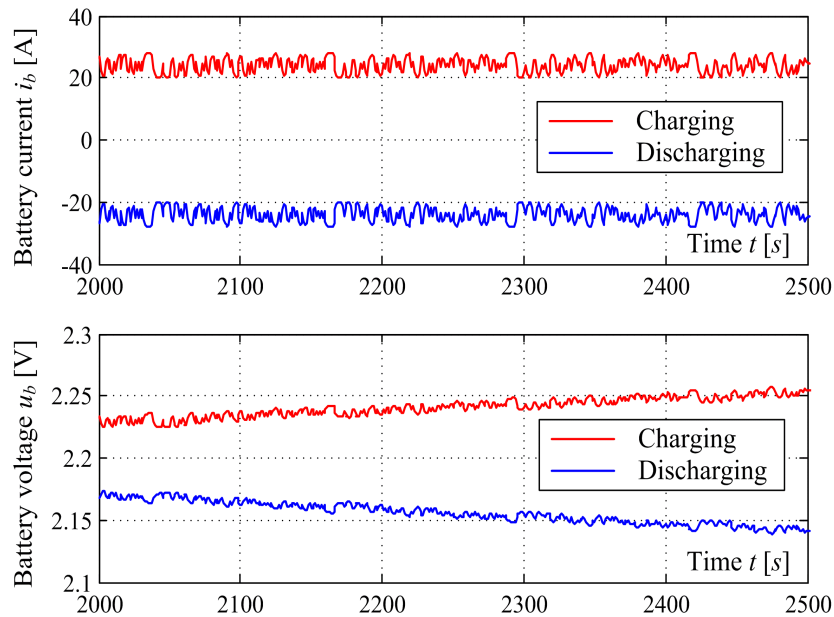
sa strujom pražnjenja I_b za razmatrani raspon vrijednosti struje pražnjenja (tj. od 6 A do 24 A). Štoviše, procijenjeni kapacitet punjenja neznatno se razlikuje od nominalne vrijednosti od 30 Ah (zapravo je malo veći od nominalne vrijednosti). Gore navedeni rezultati pokazuju da bi se identifikacija kapaciteta punjenja trebala izvršiti za svaku ćeliju prije njezine upotrebe, jer netočna vrijednost kapaciteta punjenja može nepovoljno utjecati na točnost estimacije stanja napunjenosti.



Slika 8: Krivulje pražnjenja konstantne struje baterije (a) i ovisnost kapaciteta baterije u odnosu na struju pražnjenja (b)

4.3. Eksperimentalno snimanje mapa parametara modela ekvivalentnog kruga

Snimanje mapa parametara modela ekvivalentnog kruga baterije s obzirom na stanje napunjenosti baterije i struje baterije provedeno je pomoću testova punjenja i pražnjenja baterije, pri čemu je referentna konstantna struja iz DC/DC pretvača uvećana signalom pseudoslučajnog binarnog niza (PRBS) [18] s amplitudom od vrha do vrha od 8 A (tj. ± 4 A). Kako bi se eliminirali učinci *aliasinga* zbog uzorkovanja s relativno velikim vremenom uzorkovanja (ovdje $T = 1$ s), mjerenje napona na terminalu baterije i struja baterije DC/DC pretvarača su preduzorkovani s periodom uzorkovanja od 2 ms i filtrirani sa anti-aliasing niskopropusnim filtrom s propusnošću $\Omega_{bw} = 2\pi$ rad/s (vidi npr. [20]). Primjer tako dobivenih signala za naknadnu obradu prikazan je na slici 8 za slučaj istosmjernje struje punjenja i pražnjenja od 24 A s prethodno spomenutim PRBS signalom superponiranim na njega (gornji dijagram na slici 9) kako bi se pobudile male smetnje u naponu baterije (donji crtež na slici 9). Razlog primjene PRBS-a je time da tokom cijelog ciklusa punjenja/pražnjenja pobuđujemo polarizacijsku dinamiku.



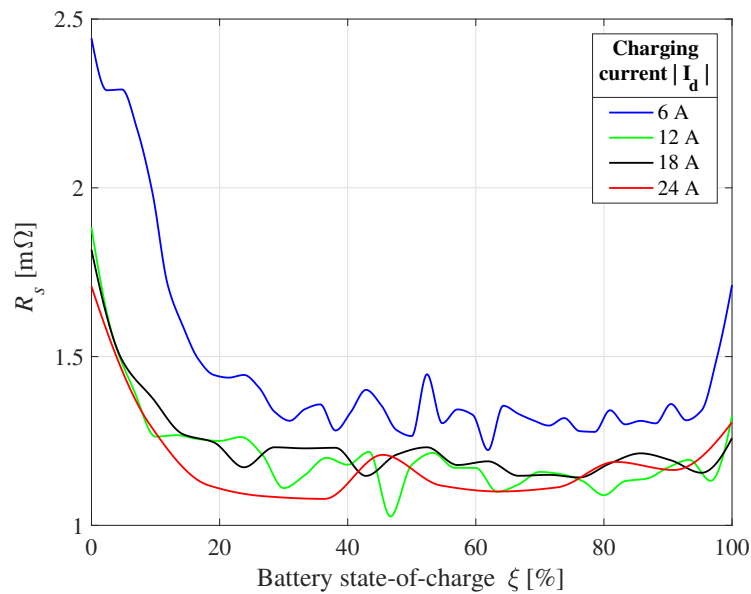
Slika 9: Usporedni eksperimentalni tragovi tijekom punjenja i pražnjenja s prosječnom (DC) strujom od 24 A sa superponiranim perturbacijama PRBS signala od ± 4 A.

Estimacija parametara prijenosne funkcije baterije izvođena je na sljedeći način:

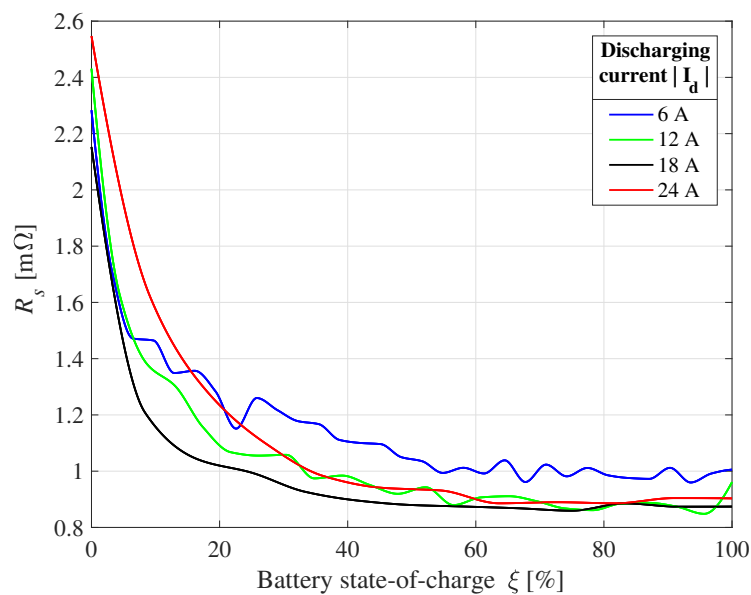
- Podjelom snimljenih signala struje i napona baterije u skupove jednakih duljina, pri čemu je duljina podataka odabrana tako da bude najmanje dva reda veličine duža od broja parametara koji se procjenjuju (tri parametra u ovom slučaju, R_b , R_p i τ_p).
- Uklanjanje linearnog trenda iz napona terminala baterije koji odgovara postupnom povećanju ili smanjenju napona otvorenog kruga baterije sa stanjem napunjenosti tijekom punjenja ili pražnjenja (vidi sliku 8).
- Procjena linearnog ARX modela u blizini radne točke stanja napunjenosti i prosječne struje baterije korištenjem algoritma procjene najmanjih kvadrata [18].
- Raspored estimiranih parametara baterije u dvodimenzionalne (2D) mape $R_b(\xi, i_b)$, $R_p(\xi, i_b)$ i $\tau_p(\xi, i_b)$ za kasniju upotrebu unutar modela simulacije baterije i estimatora stanja napunjenosti temeljen na metodologiji proširenog Kalmanovog filtra [19].
- Mjerenja odraditi za 6A, 12A, 18A i 24A

Slike 10 – 15 prikazuju dvodimenzionalne mape parametara ekvivalentnog kruga baterije (Theveninov model) snimljene za razmatranu LTO baterijsku ćeliju od 30 Ah/ 2,4 V [16]. Slika 10 i 11 pokazuje da procijenjeni serijski otpor baterije R_b pokazuje prilično niske vrijednosti u sredini raspona stanja napunjenosti ($R_b < 1,5$ m Ω) za režime punjenja i

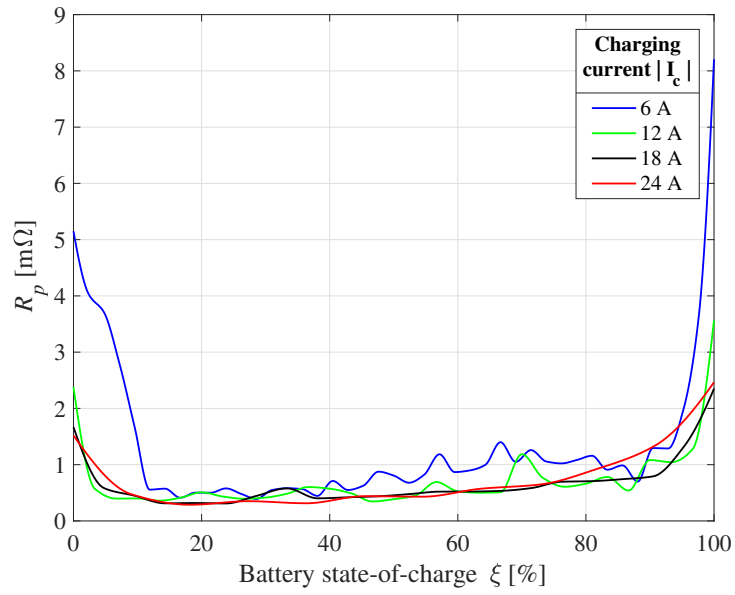
pražnjenja, ali ima tendenciju porasta do 2,5 mΩ kada je baterijska ćelija potpuno ispražnjena ($\xi \rightarrow 0$). Sličan trend je također uočen u slučaju polarizacijskog otpora R_p (slika 12 i 13) čija je vrijednost između 1 mΩ i 2 mΩ u sredini raspona stanja napunjenosti, dok brzo raste s pražnjenjem baterije. prema nultom stanju naboja (gdje poprima vrijednosti između 4 mΩ i 7 mΩ). Sličan se učinak također opaža u slučaju punjenja prema potpuno napunjenoj bateriji ($\xi \rightarrow 100\%$). Vremenska konstanta polarizacije τ_p poprima raspon vrijednosti, tj. obično je između 2 s i 20 s, koje uvelike ovise o struji punjenja-pražnjenja i stanju napunjenosti baterije (slika 14 i 15).



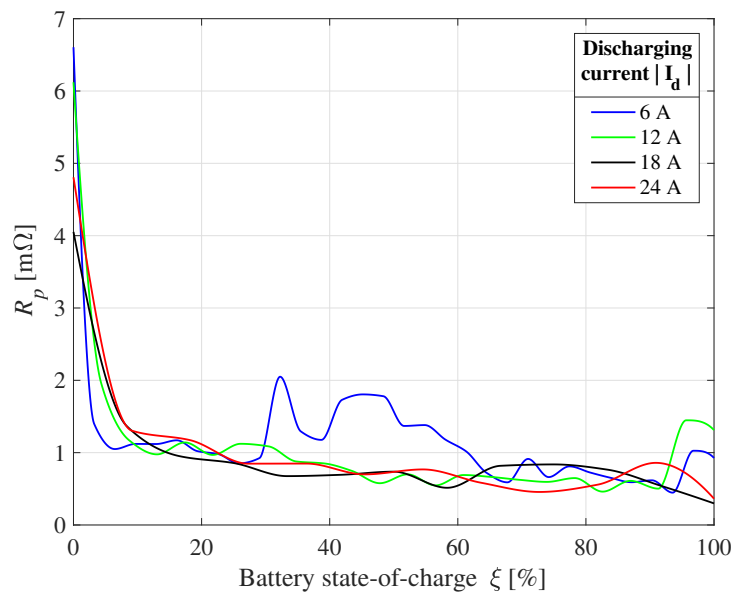
Slika 10: Unutarnji otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - punjenje



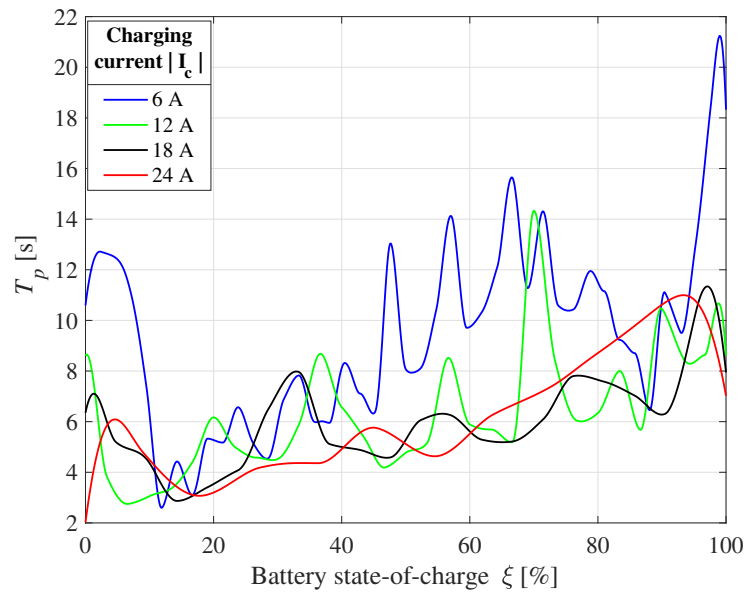
Slika 11: Unutarnji otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - pražnjenje



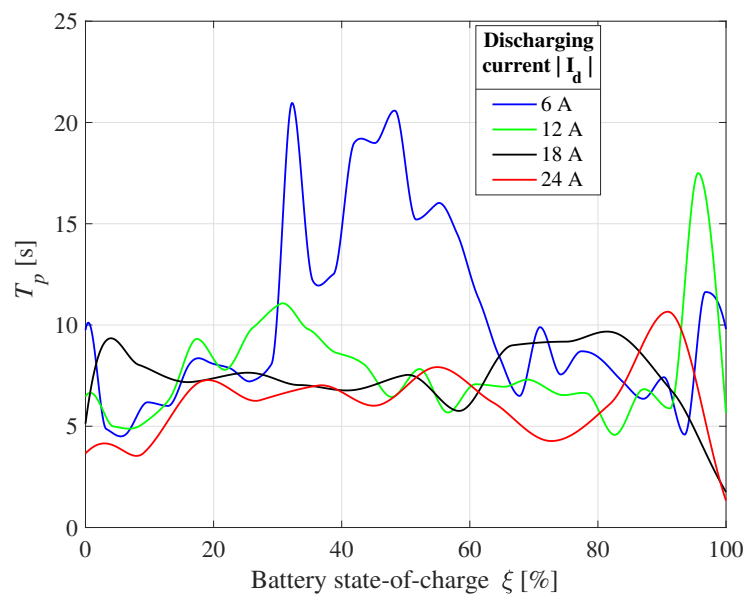
Slika 12: Polarizacijski otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - punjenje



Slika 13: Polarizacijski otpor baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - pražnjenje



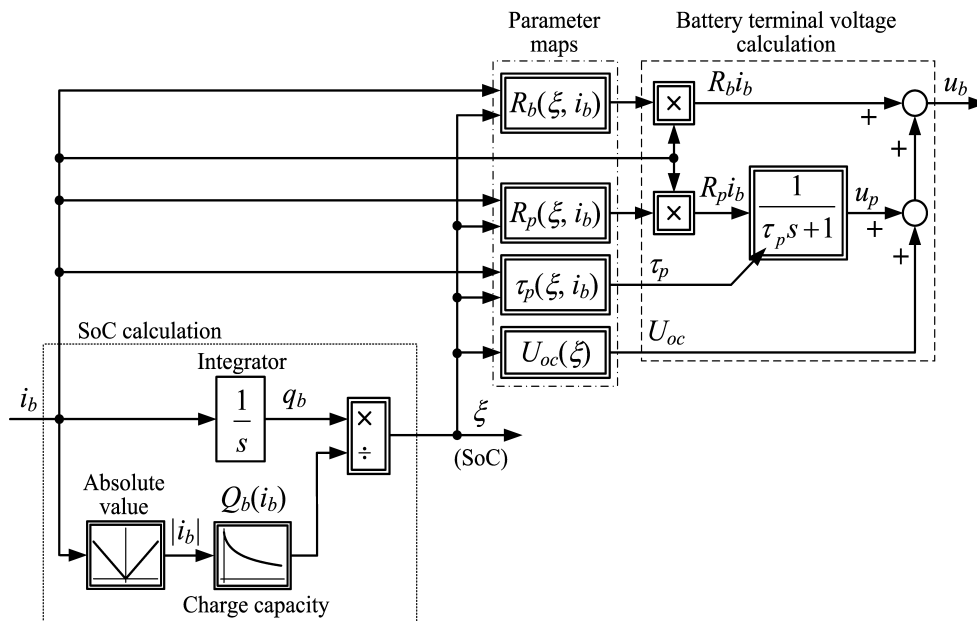
Slika 14: Polarizacijska vremenska konstanta baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - punjenje



Slika 15: Polarizacijska vremenska konstanta baterije u odnosu sa stanjem napunjenosti - pražnjenje

4.4. Rezultati eksperimentalne validacije

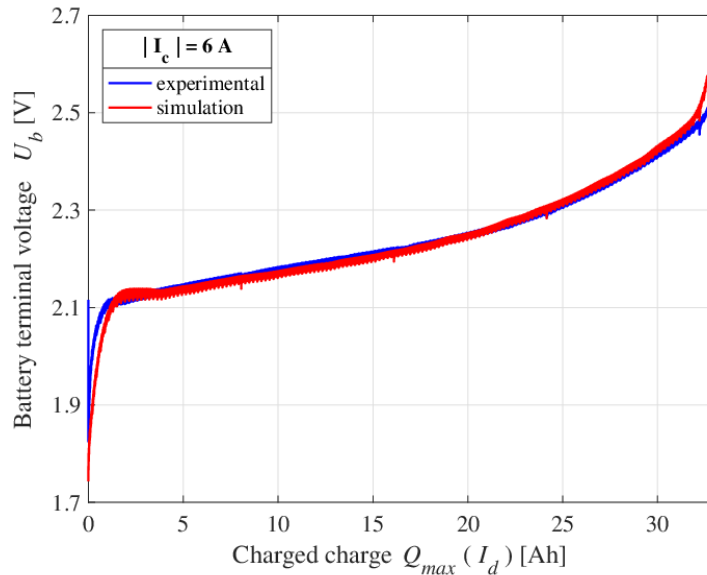
Estimirani parametri ekvivalentnog strujnog kruga baterije koriste se za izradu simulacijskog modela baterije, pri čemu se struja baterije koristi kao ulazna vrijednost modela. Slika 16 prikazuje model kvazistatičke baterije, gdje se akumulirani naboj q_b i polarizacijski napon u_p prema gore tretiraju kao varijable stanja modela. q_b se koristi za izračunavanje stanja napunjenosti baterije ξ prema jednadžbi (2.9), koristeći formulaciju kapaciteta napunjenosti baterije ovisno o struji (Sl. 8b). Budući da će reverzibilni elektrokemijski učinci unutar baterije vjerojatno imati sličnu učinkovitost s obzirom na struju baterije i_b za punjenje i pražnjenje, pretpostavlja se da je kapacitet punjenja baterije Q_b isti za pozitivni i negativni predznak struje. Jednadžba napona terminala baterije $u_b = R_b i_b + U_{oc} + u_p$ implementirana je pomoću identificiranih statičkih mapa parametara baterije $R_b(\xi, i_b)$, $R_p(\xi, i_b)$, $\tau_p(\xi, i_b)$ i $U_{oc}(\xi)$ kao što je prikazano na slici 16. Cjelokupni simulacijski model i gore spomenute statičke mape parametara implementirane su unutar programskog okruženja Matlab/Simulink.



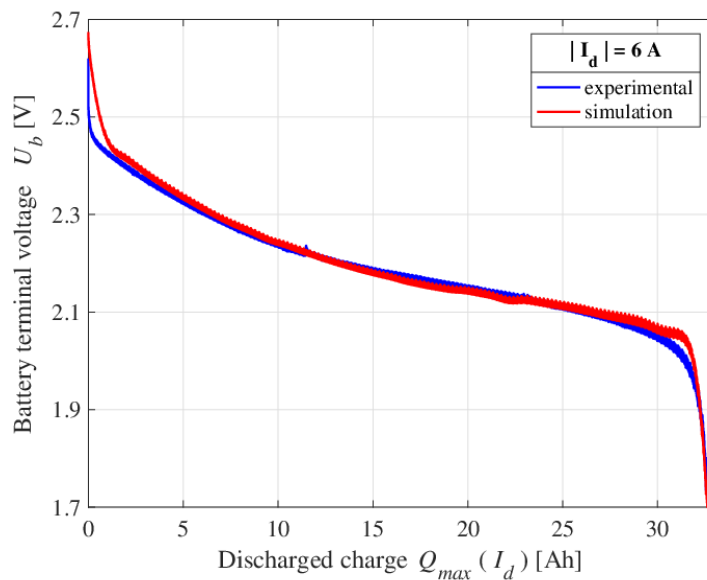
Slika 16: Blok dijagram ekvivalentnog strujnog kruga baterije

Slike 17 – 24 sažimaju usporedne rezultate analize simulacije i odgovarajuće eksperimentalne rezultate dobivene tijekom snimanja podataka korištenih za identifikaciju modela baterije. Rezultati pokazuju da simulacijski model baterije može točno uhvatiti trendove i vrijednosti terminala baterije u širokom rasponu vrijednosti stanja napunjenosti baterije, s prilično malim odstupanjima uočnim samo za duboko ispražnjenu bateriju ($\xi \rightarrow 0$) i potpuno napunjenu bateriju ($\xi \rightarrow 100\%$). Ova odstupanja mogu se pripisati parametrima baterije koji pokazuju značajne varijacije sa stanjem napunjenosti (osobito unutarnji otpor baterije, polarizacijskog otpora (vidi slike 10-13) i napona otvorenog kruga).

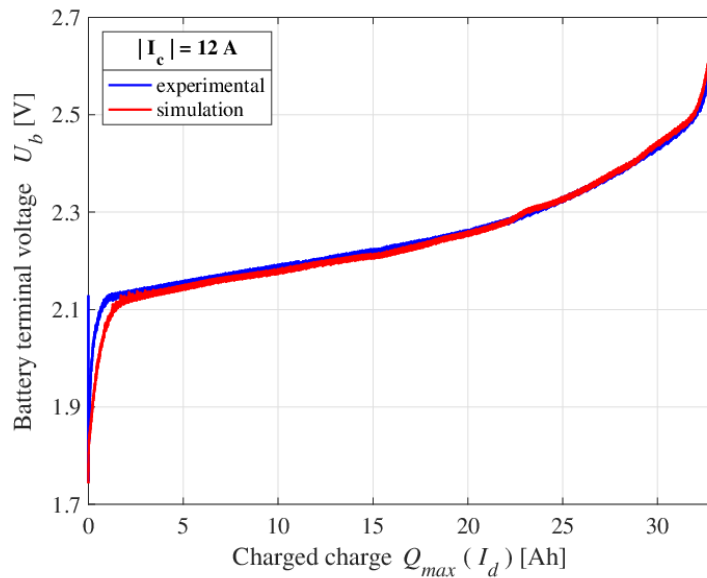
Naime, te bi varijacije bilo teže uhvatiti pomoću eksperimentalne identifikacije linearnog ARX modela, koji pretpostavlja konstantne vrijednosti parametara u blizini radne točke baterije (vidi jednadžbu (2.24)). Usprkos tome, ukupna sposobnost praćenja simulacijskog modela baterije je zadovoljavajuća, stoga se može koristiti za dizajn odgovarajućeg estimatora stanja napunjenosti baterije.



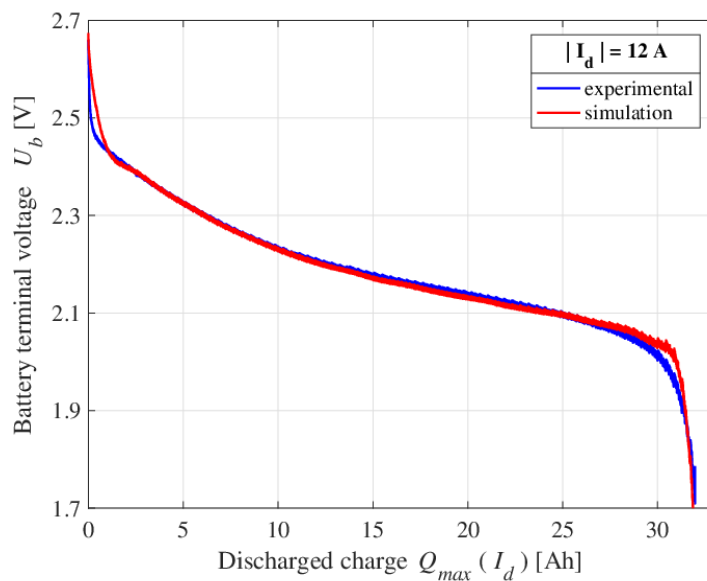
Slika 17: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 6 A



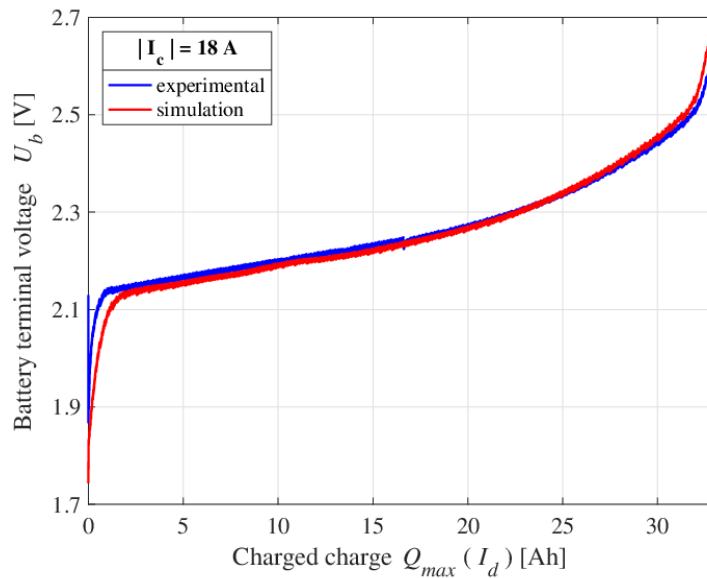
Slika 18: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 6 A



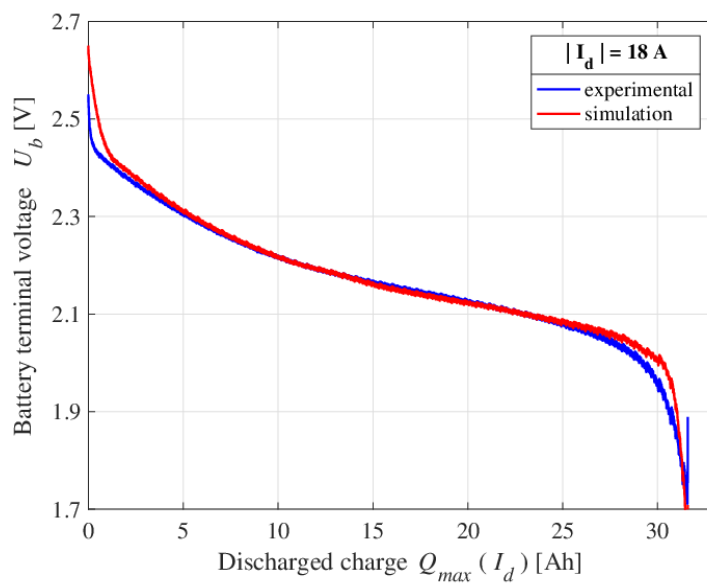
Slika 19: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 12 A



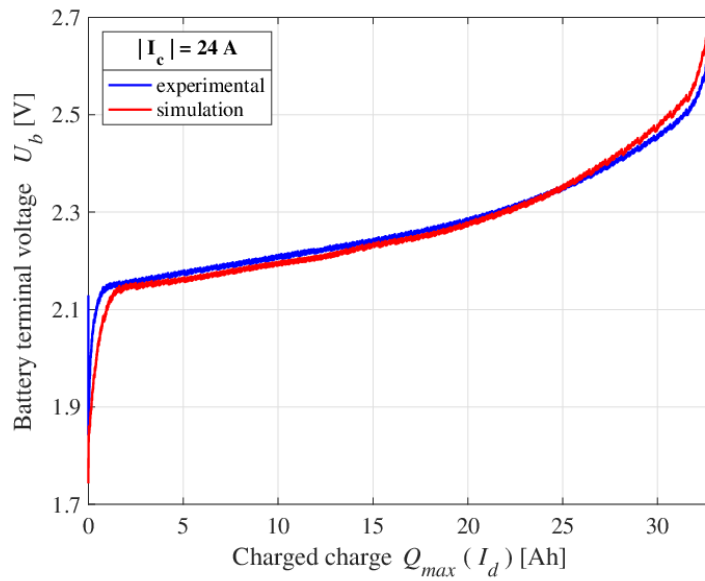
Slika 20: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 12 A



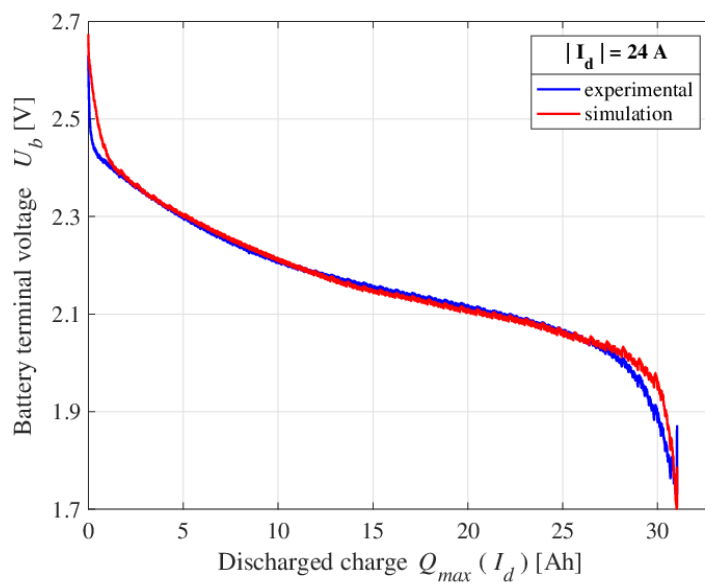
Slika 21: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 18 A



Slika 22: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 18 A



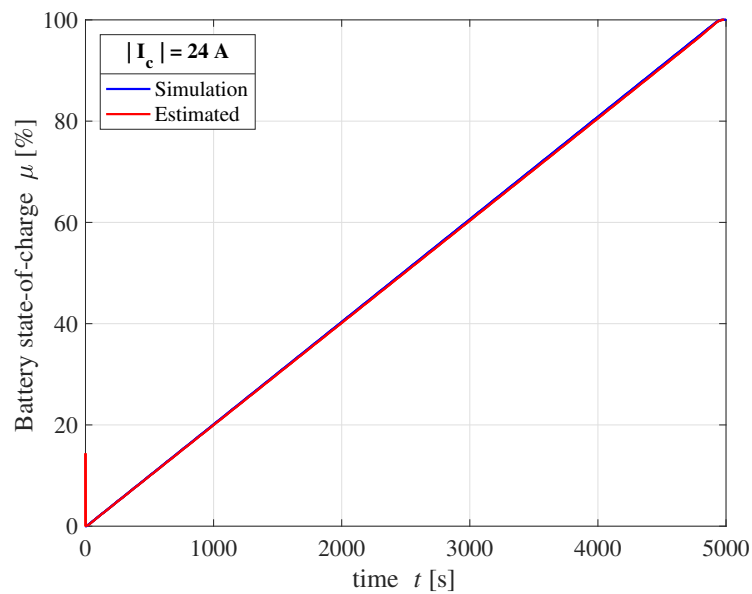
Slika 23: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom punjenja sa strujom baterije od 24 A



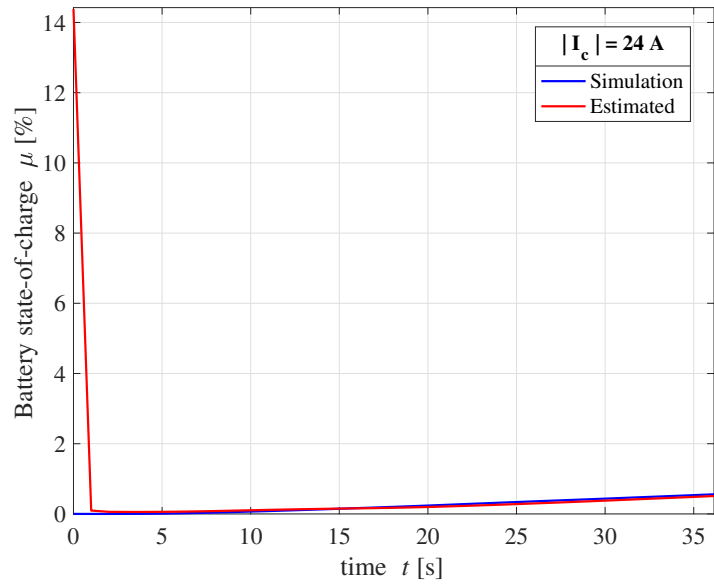
Slika 24: Usporedba simulacije i eksperimentalnog rezultata za napon baterije tijekom pražnjenja sa strujom baterije od 24 A

4.5. Rezultati estimatora stanja napunjenosti baterije

Slika 25 i slika 26 prikazuje rezultate SoC estimatora temeljenog na EKF-u (vidi npr. reference [8] i [9]) podvrgnutog scenariju simulacije punjenja baterije konstantnom strujom sa strujom baterije jednakom 24 A. Rezultati pokazuju prilično dobro poklapanje između stanje napunjenosti dobiveno iz simulacijskog modela i estimatora u stabilnom stanju estimatora (Slika 25), što ukazuje na povoljnu sposobnost praćenja estimatora. Slika 26 pokazuje da je estimator karakteriziran brзом konvergencijom prema stvarnom stanju napunjenosti baterije iz neusklađenog stanja, tj. može se podesiti za prilično brz i dobro prigušen odziv.



Slika 25: Usporedba estimirane i simulacijske vrijednosti stanja napunjenosti tokom punjenja konstantnom strujom



Slika 26: Uvećani dio početnog dijela

5. Zaključak

U radu su prikazani rezultati eksperimentalne karakterizacije najsuvremenije litij-titanante (LTO) elektrokemijske baterije (30Ah/2,4V/6C) u svrhu modeliranja upravljački-orijentirane baterije prikladnu za dizajn estimatora stanja napunjenosti (*SoC*). Identifikacija modela baterijskih ćelija provedena je u tri različite faze. Karakteristika kapaciteta punjenja i krivulja napona otvorenog kruga u odnosu na *SoC* prvo su zabilježene korištenjem pražnjenja i punjenja konstantnom strujom, pri čemu se u prvom slučaju baterija praznila dok napon na terminalu nije dosegao graničnu vrijednost od 1,7 V. Nadalje, intervali punjenja isprepleteni su s intervalima rekuperacije napona baterije u cijelom rasponu napona baterije, a rezultirajuća krivulja napona otvorenog kruga u odnosu na *SoC* je aproksimirana kubičnim *spline*-ovima. Konačno, identifikacija serijskog otpora baterijske ćelije, polarizacijskog otpora i vremenske konstante kašnjenja polarizacije provedena je za različite vrijednosti struje punjenja korištenjem procjene parametara najmanjih kvadrata na temelju testnog signala pseudoslučajnog binarnog niza.

Tako dobiveni model ekvivalentnog strujnog kruga baterije karakteriziraju promjenjivi parametri (ovisni o *SoC*-u i struji), raspoređeni su u jednodimenzionalne (1D) ili dvodimenzionalne (2D) statičke mape, što je pogodno sa stajališta dizajna simulacijskog modela usmjerenog na upravljanje baterije. Dobiveni simulacijski model verificiran je u usporedbi s eksperimentalno snimljenim podacima o bateriji, a rezultati simulacijskog modela pokazali su visoko slaganje s eksperimentima, ukazujući tako na dobru točnost modela baterije, posebno u srednjem *SoC* području ($10\% \leq \text{SoC} \leq 90\%$). Odstupanja modela u graničnim *SoC* regijama ($0\% \leq \text{SoC} \leq 10\%$ i $90\% \leq \text{SoC} \leq 100\%$) nisu naglašena, što ukazuje na dobru ukupnu točnost eksperimentalno identificiranog modela baterije.

Na temelju modela ekvivalentnog strujnog kruga baterije, prošireni Kalmanov filter (EKF) dizajniran je da služi kao estimator stanja napunjenosti, a njegova učinkovitost je potvrđena pomoću simulacija. Rezultati su pokazali da predloženi estimator stanja temeljen na EKF-u može pratiti stanje napunjenosti baterije s visokom točnošću, a karakterizira ga i brza konvergencija (brzi odgovor) estimiranog *SoC*-a iz neusklađenog početnog stanja.

6. Zahvala

Zahvaljujem se svojem mentoru Prof. dr.sc. Danijelu Pavkoviću na iznimno uloženom trudu, vještima savjetima koji su poslužili kao "crna magija" te kao i prijatelju mu zahvaljujem na životnim savjetima, kolačima i razumnim rokovima. Također, htio bih zahvaliti laborantu Robertu Kamenečkom pri pomoći kod izrade makete i na korisnim savjetima.

Bibliografija

- [1] Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., and Greiner, M., The role of storage technologies throughout the decarbonisation of the sector-coupled European energy system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 201, Paper no. 111977, 17 pages, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111977>.
- [2] Sandhya, C. P., John, B., and Gouri, C., Lithium titanate as anode material for lithium-ion cells: a review, *Ionics*, Vol. 20, pp. 601–620, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11581-014-1113-4>.
- [3] Liang, Z., Hui-Lin, P., Yong-Sheng, H., Hong, L., and Li-Quan, C., Spinel lithium titanate ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) as novel anode material for room-temperature sodium-ion battery, *Chinese Physics B*, Vol. 21, No. 2, Paper No. 028201, 5 pages, 2012. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/2/028201>.
- [4] Zhang, X., Peng, H., Wang, H., and Ouyang, M., Hybrid Lithium Iron Phosphate Battery and Lithium Titanate Battery Systems for Electric Buses, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 67, No. 2, pp. 956–965, 2018. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2749882>.
- [5] Nemeth, T., Schröer, P., Kuipers, M., and Sauer, D. U., Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations, *Journal of Energy Storage*, Vol. 31, paper No. 101656, 14 pages, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101656>.
- [6] C. Zhu, X. Li, L. Song, L. Xiang, "Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack", *Journal of Power Sources*, 2012.
- [7] Zhai, G., Liu, S., Wang, Z., Zhang, W., and Ma, Z., State of energy estimation of lithium titanate battery for rail transit application, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 3146–3151, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.681>.
- [8] Kvaternik, K., Pavković, D., Kozhushko, Y., and Cipek, M., Extended Kalman Filter Design for State-of-Charge Estimation of a Lithium-Titanate Battery Cell, *Proceedings of the 2022 International Conference on Smart Sys-*

tems and Technologies (SST), Osijek, Croatia, 2022, pp. 249–254. <https://doi.org/10.1109/SST55530.2022.9954682>.

- [9] Pavković, D., Premec, A., Krznar, M., and Cipek, M., Current and voltage control system designs with EKF-based state-of-charge estimator for the purpose of LiFePO₄ battery cell charging, *Optimization and Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 2235–2263, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11081-022-09728-1>.
- [10] Schröer, P., Khoshbakht, E., Nemeth, T., Kuipers, M., Zappen, M., and Sauer, D. U., Adaptive modeling in the frequency and time domain of high-power lithium titanate oxide cells in battery management systems, *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, paper No. 101966, 19 pages, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101966>.
- [11] Namor, E., Torregrossa, D., Sossan, F., Cherkaoui, R., and Paolone, M., Assessment of battery ageing and implementation of an ageing aware control strategy for a load leveling application of a lithium titanate battery energy storage system, *Proceedings of 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Trondheim, Norway, 2016, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2016.7556779>.
- [12] Roscher, M. A. and Sauer, D. U., Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium-ion secondary batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 1, pp. 331–336, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.098>.
- [13] Shi, S., Xie, Y., Li, M., Yuan, Y., Yu, J., Wu, H., Liu, B., and Liu, N., Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials, *Energy Conversion and Management*, Vol. 138, pp. 84–96, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.069>.
- [14] Chen, A., Zhang, W., Zhang, C., Huang, W., and Liu, S., A Temperature and Current Rate Adaptive Model for High-Power Lithium-Titanate Batteries Used in Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 11, pp. 9492–9502, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2955413>.
- [15] Sun, S., Wang, Q., Zhao, X., Sun, J., and Lin, Z., Numerical study on lithium titanate battery thermal response under adiabatic condition, *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 184–193, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.019>.
- [16] ELERIX EX-30TK Extreme Power LTO Cell, VDA size 173/100, Technical Specification (<https://shop.gwl.eu/LTO-technology/Cylindrical-Lithium-Titanate-Oxid-Battery-Cell-LTO-2-3V-30AH.html>) [Accessed on April 3rd, 2023]

- [17] Ceraolo,M.,New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1184-1190, 2000. <https://doi.org/10.1109/59.898088>.
- [18] Ljung,L.,System identification–theory for the user,Prentice Hall,Englewood Cliffs,New Jersey, USA, 1987.
- [19] Grewal,M.S.,and Andrews,A.P.,Kalman filtering–theory and practice,John Wileyand Sons Ltd., 2001.
- [20] Isermann,R.,Digital control systems,Vol.1,Springer-Verlag,Berlin,Germany,1989

Modeliranje, eksperimentalna identifikacija i dizajn estimatora naprednih sekundarnih baterija zasnovanih na litij-titanat tehnologiji

Sazetak

Među mnogim punjivim litijevim baterijama, litij-titanate ćelije karakteriziraju najviša razina toplinske stabilnosti i radne sigurnosti, što ih čini posebno prikladnima za visoko zahtjevne primjene. U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalne karakterizacije litij-titanat baterijske ćelije u svrhu izgradnje upravljačkog modela ekvivalentnog električnog kruga baterije prikladnog za dizajn estimatora stanja napunjenosti. Identifikacija modela baterijskih ćelija provedena je u tri faze: (i) bilježenje napona otvorenog kruga u odnosu na karakteristike stanja napunjenosti pomoću punjenja slabom strujom isprekidanog s intervalima rekuperacije napona baterije u cijelom rasponu baterije napona, (ii) određivanje efektivnog kapaciteta punjenja baterije i (iii) identifikaciju serijskog otpora baterije, polarizacijskog otpora i vremenske konstante kašnjenja za različite vrijednosti struje punjenja. Na temelju eksperimentalno identificiranog modela ekvivalentnog strujnog kruga baterije (tzv. Theveninov model) dizajniran je prošireni Kalmanov filter koji služi kao estimator stanja napunjenosti. Učinkovitost predloženog estimatora provjerena je pomoću simulacija.

Ključne riječi: Litij-titanatna baterijska ćelija; Model ekvivalentnog kruga; Eksperimentalna identifikacija; Procjena stanja; Prošireni Kalmanov filter.

Modeling, experimental identification and estimator design of advanced secondary batteries based on lithium-titanate technology

Abstract

Among the many rechargeable lithium batteries, lithium-titanate cells are characterized by highest thermal stability and operational safety levels, which makes them particularly well suited for highly-demanding applications. This paper presents the results of experimental characterization of a lithium-titanate battery cell for the purpose of building of a control-oriented battery equivalent electrical circuit model suitable for designing a state-of-charge estimator. Battery cell model identification has been carried out in three stages: (i) recording of the open-circuit voltage vs. state-of-charge characteristic by means of low-current charging interspersed with battery voltage recuperation intervals over the full-range of battery voltages, (ii) determination of the effective battery charge capacity, and (iii) identification of battery cell series resistance and polarization resistance and lag time constant for different charging current values using recursive parameter estimation based on pseudo-random binary sequence test signal. Based on the experimentally-identified battery cell equivalent circuit model (the so-called Thevenin model) an extended Kalman filter has been designed to serve as the state-of-charge estimator. The effectiveness of the proposed estimator is verified by means of simulations.

Keywords: Lithium-Titanate Battery Cell; Equivalent Circuit Model; Experimental Identification; State- of-Charge Estimation; Extended Kalman Filter.