

Uporaba slovnične evolucije za avtomatsko generiranje ekvivalentnih električnih vezij

Matevž Kunaver¹

¹Laboratorij za računalniške metode v elektroniki, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

† E-pošta: matevz.kunaver@fe.uni-lj.si

Povzetek. Electrochemical impedance spectroscopy is an important, fast, and inexpensive tool that allows users to measure the performance of fuel cells, the condition of battery electrodes, and other chemical processes in electrochemical systems. A crucial part of the measurement involves selecting an equivalent circuit whose parameters indicate the state of the measured process. Currently, this is done solely through expert knowledge and mathematical parameter fitting. This paper presents a new approach—the use of the SPICE simulation environment. We have added special spectroscopy-related elements to SPICE and have begun developing a routine that will automatically generate an appropriate (equivalent) electrical circuit.

Ključne besede: SPICE, circuit simulation, fuel cells, electrochemical impedance spectroscopy, grammatical evolution

Grammatical Evolution in Electrochemical Impedance Spectroscopy

The paper describes binary sequences of aperiodic autocorrelation functions. Two measures to evaluate the autocorrelation properties are known in the literature, i.e., the merit factor and the peak sidelobe level. In practice, binary sequences of the best possible value with respect to one or the other measure should be used as communication systems need to transmit the signal of optimal quality while minimizing power consumption. As known, when one measure is improved, the other deteriorates. The paper investigates how far the two binary sequences are apart when they are optimized according to both measures. The issue of whether using both measures together is beneficial for problem optimization is also discussed.

Keywords: binary sequences, low autocorrelation functions, peak sidelobe level, merit factor

1 UVOD

Elektrokemična impedančna spektroskopija (EIS, angl. electrochemical impedance spectroscopy) je pomembno orodje, s katerim analiziramo in spremljamo procese, ki tečejo tako v baterijah kot v gorivnih celicah. Temelji na merjenju impedance s frekvenčnim preletom ter iskanju ekvivalentnega električnega vezja (EEV, angl. equivalent electric circuit) z enako impedančno karakteristiko. Oblika in parametri vezja pa uporabniku nato podajo podatke o dejanskem stanju merjenega procesa. Tehnika se tako lahko uporabi za zaznavanje pojava oksidacije

na elektrodah, merjenje zdravja gorivne celice, merjenje prenosa naboja na kovinsko anodo ter drugo. Pristop je hiter in poceni, saj ne zahteva posebne opreme za izvajanje meritev.

Slabosti pristopa se pojavijo po meritvah, ko je treba odkriti vezje, ki ustreza izmerjeni impedanci. Vsak "kos" merjene celice/baterije namreč predstavlja določeno število električnih elementov in izbrati je treba EEV, ki upošteva vse. Tudi če določene "kose" vnaprej nastavimo in s tem umaknemo iz meritve, je izbira vezja še vedno zapletena. Povrhu pa moramo po izbiri EEV pravilno določiti še njegove parametre, kajti le tako lahko na koncu pravilno določimo stanje merjenega procesa.

Poleg tega nekateri električni elementi v EEV niso značilni električni elementi, temveč gre za teoretične elemente, ki so bili razviti samo v matematični obliki, v fizični pa ne obstajajo. Posledično parametre izbranega EEV iščemo s pomočjo matematične aproksimacije in tehnikami, kot je Levenberg-Marquardtov algoritem (LMA) [1]. Uporabnik mora torej imeti dovolj izkušenj in znanja, da se na podlagi videne impedančne krivulje odloči, kateri EEV uporabiti (tu je v pomoč sicer dejstvo, da že vnaprej vemo, kateri kemijski proces merimo in kateri EEV tipično spada k njemu) ter s pomočjo katerega algoritma pridobiti parametre izbranega vezja.

V sklopu elektrotehnike pa pogosto uporabljamo simulatorje vezij ter tehnike ki lahko na podlagi podanih karakteristik avtomatsko izdelajo ustrezno vezje. Primer take tehnike je slovnična evolucija (SE, angl. grammatical evolution) [2], s pomočjo katere smo že uspešno izdelali filte [3] in celo približke nekaterih EEV [4]. Zato

Prejet 31. marec, 2025
Odobren 5. avgust, 2025



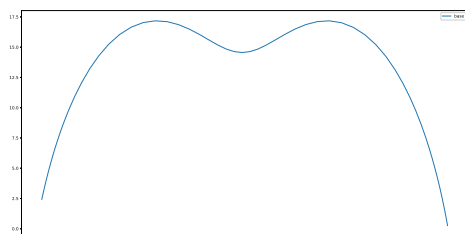
Avtorske pravice: © 2025
Creative Commons Attribution 4.0
International License

smo v sklopu tega prispevka raziskali možnost, da bi obstoječi pristop razširili in v simulacijsko okolje SPICE dodali nekatere od kemijskih teoretičnih elementov ter jih uporabili za avtomatsko sintezo novih EEV.

2 ELEKTROKEMIČNA IMPEDANČNA SPEKTROSKOPIJA

Elektrokemična impedančna spektroskopija je tehnika za hitro in enostavno izvajanje meritev na elektrokemičnih elementih, kot so gorivne celice, akumulatorji ter posamezni deli napajalnih elementov in baterij. Poleg merjenja karakteristik posameznih elementov nam EIS omogoča tudi detekcijo anomalij ter potencialnih težav, kot so prekomerna oksidacija elektrod, prekomerno zmanjšanje kapacitete gorivne celice in težave pri prehajanju litijevih ionov v litij-ionski bateriji.

Tehnika je postala zelo razširjena predvsem zaradi svoje natančnosti, preprostosti in nizke cene. V osnovi namreč samo merimo impedanco med frekvenčnim preletom, za kar ne potrebujemo visokospecializirane opreme in je tehnika na voljo vsem uporabnikom s tega področja. Ima pa tudi svoje slabosti – medtem ko je izvajanje meritev precej preprosto, tem sledi kompleksen proces iskanja ekvivalentnega električnega vezja, ki vsebuje nemalo ugibanja.



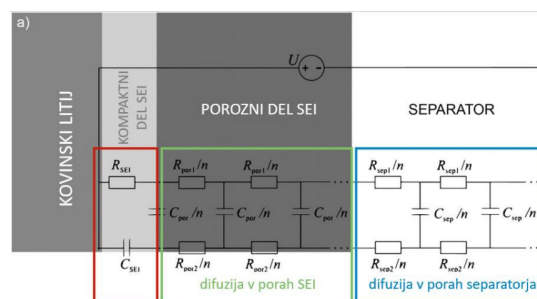
Slika 1 Primer izmerjene EIS krivulje

Najprej izmerimo impedančno krivuljo ter ocenimo njeno obliko. Primer take krivulje je prikazan na sliki 1. Na podlagi oblike potem izberemo EEV s podobno karakteristično impedančno krivuljo. Pogosto EEV vsebuje tudi posebne elemente, ki jih v elektrotehniki ne uporabljamo (dva najpogostejše uporabljana smo predstavili v podpoglavju 3.1). Izbiri EEV sledi še določanje začetnih parametrov vezja. Na podlagi teh nato prek iterativnih metod dobimo končne "prave" vrednosti. Pogosto se za ta namen uporabljajo matematične metode, ki temeljijo na metodi najmanjših kvadratov (angl. least squares method) in ekspertnem znanju. Primera takega pristopa sta Newtonova metoda [5] in algoritem LMA, ki smo ga uporabili že v preteklih raziskavah [1]. Pri tem je izbira začetnih parametrov EEV ključnega pomena, saj lahko ob napačni izbiri algoritem hitro obvisi v lokalnem minimumu in ne najde pravih parametrov.

Šele ko dobimo končne parametre EEV, lahko ugotovimo, kaj se v opazovanem procesu/komponenti dejansko dogaja.

2.1 Ekvivalentna električna vezja

Ekvivalentna električna vezja so stanja oziroma procesi, ki tečejo v merjenih elementih. Vsak EEV tako ustreza enemu procesu, in če lahko impedančno krivuljo EEV popolnoma prilagodimo izmerjenim vrednostim, s tem potrdimo, da je proces prisoten. Težave pa nastanejo, ker tako rekoč vsak sestavni del elementa (elektroda, elektrolit, priklonni kontakti itd.) zahteva svoj EEV. Primer omenjene kompleksnosti je prikazan na sliki 2, ki prikazuje EEV litija v stiku z elektrolitom v li-ion bateriji.



Slika 2 EEV litija v stiku z elektrolitom

Na srečo lahko ob poznavanju merjenega elementa del EEV določimo vnaprej ter tako odstranimo iz problema, ki se tako poenostavi na vezje, sestavljeno iz dveh ali treh elementov, katerih proces nas zanima.

3 SIMULACIJSKO OKOLJE SPICE

SPICE (simulation program with integrated circuit emphasis) je simulacijsko okolje, razvito leta 1970 [6], ki omogoča simulacijo električnih vezij. V njem lahko sestavimo vezje, določimo začetne pogoje ter simuliramo obnašanje vezja v odvisnosti od časa [7]. SPICE je zelo priljubljeno orodje, ki se uporablja v elektrotehniki, elektroenergetiki, telekomunikacijah, računalništvu in na številnih drugih področjih.

Vezje simulira s pomočjo reševanja nelinearnih diferencialnih enačb, ki predstavljajo posamezne elemente vezja in interakcije med njimi. Za vsak element vezja ima tako na voljo knjižnico matematičnih modelov. V sklopu raziskav smo to knjižnico dopolnili z nekaterimi elektrokemijskimi elementi, ki se uporabljajo v EIS.

3.1 Implementacija novih elementov

Ker EIS uporablja tudi elektrokemijske elemente, ki jih v elektrotehniki ne srečamo, smo v SPICE dodali dva nova elementa. To sta najpogostejše uporabljana elementa pri analizi gorivnih celic in baterij – ZARC in konstantni fazni element (CPE, angl. constant phase element).

Modela smo dodali z uporabo XSPICE, kjer smo definirali njuni prevajalni funkciji. Tako opisana modela sta potem postala del knjižnice elementov, ki se naloži ob zagonu simulatorja. Pri tem je treba poudariti, da je to prva implementacija teh elementov v okolju SPICE, saj so se do zdaj namesto tega vedno uporabljali približki v obliki (neskončno) dolge verige RC-elementov [8].

3.1.1 CPE: S pomočjo elementa CPE modeliramo enostavne kemijske procese v gorivnih celicah. Primera takih procesov sta oksidacija na elektrodah in prenos naboja v elektrolitu. Element torej uporabimo za modeliranje kapacitivnosti, ki se ne obnaša idealno oziroma vsebuje deviacije. Matematični model impedance elementa je podan z enačbo:

$$Z_{CPE}(\omega) = \frac{1}{Q(j\omega)^n} \quad (1)$$

, kjer nam Q predstavlja konstanto CPE elementa, n pa njegov eksponent. Konstanta CPE elementa je približek kapacitivnosti elementa, eksponent pa pove, kako blizu je element idealnemu kondenzatorju. Razpon vrednosti eksponenta je med -1 in 1, pri čemer 1 predstavlja idealni kondenzator, 0,5 pa idealni Warburgov element. V EIS je vrednost eksponenta po navadi omejena med 0,5 in 1. V ekvivalentnih vezjih je CPE pogosto označen z Q .

Prevajalna funkcija elementa, implementirana v XSPICE, je podana z enačbo:

$$H_{CPE} = Q(2\pi f)^n \cos(n\pi/2) + jQ(2\pi f)^n \sin(n\pi/2) \quad (2)$$

3.1.2 ZARC: Element ZARC je predstavljen kot vzporedna vezava navadnega upora in elementa CPE. Uporablja se za izdelavo kompleksnih impedančnih spektrov in je pogosto prisoten pri meritvah gorivnih celic. Matematični model elementa je podan z enačbo:

$$Z_{ZARC}(\omega) = \frac{R}{1 + RQ(j\omega)^n} \quad (3)$$

, kjer R predstavlja upornost, Q konstanto elementa CPE, n pa je stopnja približka. Ponovno je na področju EIS vrednost n omejena na interval med 0,5 in 1. V ekvivalentnih vezjih je ZARC pogosto označen z (RQ) . Prevajalna funkcija elementa, implementirana v XSPICE, je podana z enačbo:

$$H_{ZARC}(\omega) = R^{-1}\Omega \cos(n\pi/2) + jR^{-1}\Omega \sin(n\pi/2) \quad (4)$$

, kjer je $\Omega = (2\pi f\tau)^n$.

4 SLOVNIČNA EVOLUCIJA

Slovnična evolucija je orodje s področja genetskih algoritmov [9], [10], ki omogoča tako optimizacijo parametrov kot sintezo novih elektronskih vezij. Orodje temelji na principu slovničnih pravil, kjer s pomočjo

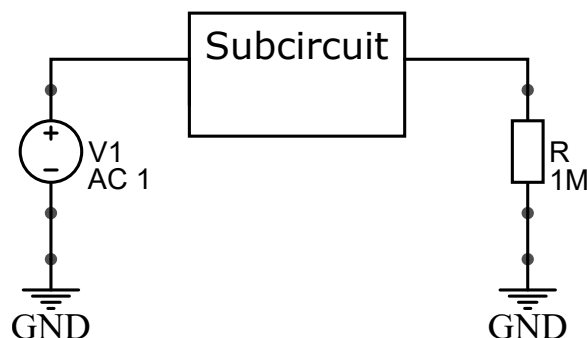
izbire genomov sestavimo želeni rezultat. Končni rezultat postopka je po navadi znakovni niz, ki ga potem prevedemo v obliko, zahtevano v našem eksperimentu ("kos" programske kode, številski parametri vezja ali celotna shema vezja). Orodje smo podrobno predstavili v prejšnjem članku [2][3].

Za potrebe eksperimenta je bilo treba pravilno definirati slovnicu ter določiti kriterijsko funkcijo, ki smo jo uporabili za vrednotenje osebkov.

4.1 Potek eksperimenta

Za vsak zagon eksperimenta smo najprej pripravili impedančno krivuljo matematičnega modela, za katero bi naš algoritem poiskal EEV. Matematični model je bil lahko enostaven (en sam element CPE/ZARC) ali pa poljubno kompleksen (več elementov, dodan šum itd.). Nato smo inicializirali naš genetski algoritem in začeli generirati osebkke.

Vsak osebek je predstavljal potencialni EEV, ki ga je bilo treba analizirati v okolju SPICE. Ker je rezultat slovnične evolucije znakovni niz, pa smo morali ta niz najprej prevesti v primerno obliko za SPICE (netlist podvezja). Tako dobljeno podvezje smo nato uporabili v merilnem vezju (prikazano na sliki 3) in izvedli frekvenčno analizo.



Slika 3 Merilno vezje

Dobljeno impedančno krivuljo smo potem ovrednotili s pomočjo kriterijske funkcije ter glede na rezultat osebka zavrgli ali pripravili za naslednjo generacijo. Tipični eksperiment je bil tako sestavljen iz 100 generacij po 300 osebkov oziroma 30.000 ovrednotenih podvezij.

4.2 Slovnična pravila

Za slovnicu smo uporabili podobna pravila kot v prvi simulaciji vezij, kjer še nismo imeli implementiranih novih elementov, temveč smo se jim poskušali samo približati [4]. Ker smo želeli preprečiti pretirano rast vezja (angl. circuit bloat), smo velikost vezja omejili na največ 12 elementov. Za osnovo smo imeli matematični model, ki je vseboval največ 3 elemente, s čimer smo pustili zadostno stopnjo redundance pri začetnih osebkih, hkrati pa smo upali, da bo algoritem sam konvergirал v rešitev z manj elementi. Če bi se to izkazalo za težavo, lahko pozneje implementiramo večkriterijsko funkcijo.

Nonterminal	Expands to
<start>	dvanajst ločenih <part>
<part>	<res> <cap> <zarc> <cpe> None
<res>	(<gpair>) <num><num>e<exp>
<cap>	(<gpair>) <num><num>e<exp>
<zarc>	(<gpair>) r=<num>e<exp> tau=<num>e<zexp> n=0.<znum><num>)
<cpe>	(<gpair>) r=<num>e<exp> n=0.<znum><num>)
<num>	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
<exp>	0 3 6 9 12
<zexp>	1 2 3 4 5
<znum>	5 6 7 8 9
<gpair>	input 1 input 2 input 3 input 4 input output 1 2 1 3 1 4 1 output 2 3 2 4 2 output 3 4 3 output 4 output

Tabela 1 Slovnicična pravila

Pri tem je vredno omeniti nekaj posebnosti pri pravih v tabeli 1. Tako CPE kot ZARC imata skladno s standardom EIS koeficient n omejen na razpon med 0,50 in 0,99. Na dva načina smo omejili tudi število vozlišč v podvezju. Kot prvo smo definirali samo vhod, izhod ter štiri številka vozlišča. Kot drugo pa smo s pomočjo elementa <gpair> vnaprej pripravili vse možne pare vozlišč in tako preprečili, da bi algoritem generiral elemente, ki bi bili vezani v eno samo vozlišče.

4.3 Kriterijska funkcija

Glede na to, da smo v eksperimentu na koncu primerjali dve krivulji, smo imeli na izbiro širok razpon kriterijskih funkcij. Pogosto se za ta problem uporabljajo funkcije, kot so koren povprečne kvadratne napake (RMSE), primerjava površin pod krivuljami ROC (ROC AUC) in koeficient determinacije (R-squared).

Na koncu smo se odločili za uporabo Sheppardove kriterijske funkcije [11][5], ki tako kot RMSE spada v kategorijo kriterijskih funkcij, ki temeljijo na kvadratu napak. Kriterijsko funkcijo smo izbrali, ker je na področju EIS že od leta 1986 v uporabi kot zlati standard. Uporabljena je tudi v večini publikacij [4][12][13], torej nam njena raba omogoči primerjavo rezultatov z drugimi raziskovalci. Od RMSE se razlikuje po tem, da vsebuje dodatne uteži, ki stremijo k temu, da uravnotežijo razliko v skali med imaginarno in realno osjo impedance. Izračunamo jo po sledečih enačbah:

$$\text{Shp} = \sum (w_i (Re(Z_i^{\text{model}}) - Re(Z_i^{\text{sim}}))^2 + w_i (Im(Z_i^{\text{model}}) - Im(Z_i^{\text{sim}}))^2) \quad (5)$$

$$w_i = \frac{1}{Re(Z_i^{\text{model}})^2 + Im(Z_i^{\text{model}})^2} \quad (6)$$

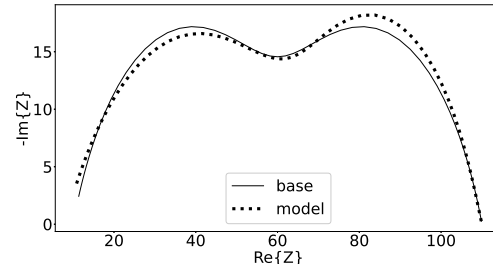
, kjer je Z_i^{model} impedanca matematičnega modela pri frekvenčni točki i , Z_i^{sim} impedanca simuliranega vezja pri isti frekvenci ter w_i izračunana utež na osnovi matematičnega modela pri tej impedanci. Kot pri večini kriterijskih funkcij je nižja vrednost boljša in 0 predstavlja popolno ujemanje krivulj.

5 REZULTATI

Naš cilj je bil torej izdelati vezje, ki ima podobno impedančno krivuljo kot matematični model. Ob tem se je treba zavedati, da je možnost, da slovnična evolucija najde popolno rešitev, zelo majhna, vendar lahko pozneje vezje dodatno prilagodimo/optimiziramo s pomočjo optimizacijskih tehnik (npr. PSADE).

5.1 Matematični model z dvema elementoma ZARC

Za začetek smo uporabili "tipski" matematični model, ki vsebuje dva zaporedno vezana elementa ZARC ter dodaten (zaporedni) upor. To je model, na katerem se izvaja večina raziskav in optimizacij na področju EIS. Zanj je značilno, da imata elementa ZARC različno konstanto CPE (razlikujeta se za faktor 100), zaradi česar ima impedančna krivulja dva ločena vrhova.



Slika 4 Matematični model z dvema elementoma ZARC

Eden od rezultatov je prikazan na sliki 4. Črtkana krivulja predstavlja impedančni potek zgeneriranega vezja, polna pa matematični model, na katerega smo merili. Vidimo, da je naše vezje zadelo obliko, kot pričakovano, pa bo treba pozneje optimizirati še parametre vezja. Podrobnejša analiza vezja pokaže tudi, da so v njem dodatni elementi. To ni nujno slabo, saj obstaja tako povezava med CPE in ZARC kot tudi možnost, da se na ta način razvije boljši model EEV. Prav tako je pomemben detajl tudi to, da kljub dodatnim elementom vezje vsebuje samo dva elementa EIS (torej en ZARC in en CPE), kar pomeni, da je algoritem pravilno prilagodil vezje obliki impedančne krivulje.

5.2 Matematični model z dodanim šumom

V naslednji fazi eksperimentov smo matematičnemu modelu dodali Gaussov šum, da bi se tako približali realnim razmeram. Rezultat je prikazan na sliki 5. Tudi

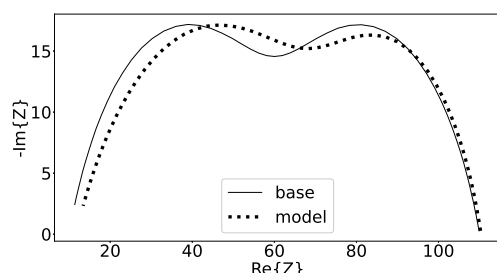
```

rXX 2 output 70e0
rXX 4 output 04e0
capXX input 2 84e-6
zarcXX input 2 04e1 48e-4 0.63
cpeXX 3 4 6e-5 0.60
rXX 2 3 36e0
capXX 4 output 74e-6
capXX input 2 84e-6
rXX 2 3 36e0
rXX 2 3 36e0
rXX 2 3 36e0

```

Tabela 2 Netlista genetsko generiranega vezja

v tem primeru je algoritmu uspelo najti približek vezja, ki ima podobno obliko impedančne krivulje. Prav tako je v tem primeru vezje vsebovalo samo dva elementa EIS, kar je zelo obetavno.



Slika 5 Matematični model z dodanim šumom

```

rXX 1 2 14e0
rXX input 4 2e2
zarcXX 2 output 98e2 6e-1 0.61
cpeXX 3 4 03e-4 0.89
cpeXX 3 output 35e-5 0.69
rXX 4 output 0e6
capXX input 2 9e-12
rXX 1 output 12e1
rXX 1 2 9e2
zarcXX input 1 03e0 9e-5 0.61

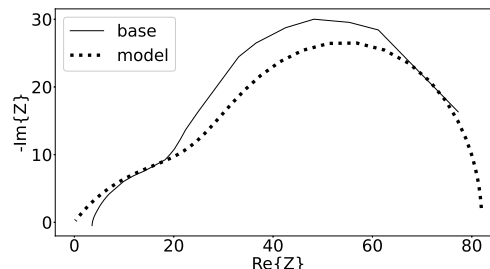
```

Tabela 3 Netlista genetsko generiranega vezja z dodanim šumom

5.3 Realni podatki

Ker smo videli, da je sistem sposoben najti vsaj delno rešitev EEV za matematični model, smo želeli preveriti, kako se bo obnesel ob realnih podatkih. Za ta namen smo uporabili podatke, izmerjene na gorivni celici, s katerimi smo se srečali že v prejšnjih raziskavah [1]. Eden od boljših rezultatov je prikazan na sliki 6. Podobno kot v primeru matematičnega modela je naš algoritem zadel obliko krivulje, točnih parametrov vezja pa ne. Omenimo lahko še, da se je že v prejšnji raziskavi pojavila velika težava z določanjem parametrov, tako da smo lahko zelo zadovoljni že s tem, da imamo na voljo

pravilno obliko krivulje za nadaljnje delo. V tabeli 4 je prikazano vezje, ki je generiralo našo impedančno krivuljo.



Slika 6 Realni podatki in EEV

Vidimo, da se naš algoritem torej v vsakem primeru (matematični model ali realni podatki) obnaša skladno s pričakovanji – dobimo približek vezja, ki ga bo treba izpiliti z drugimi tehnikami. Prav tako vidimo, da bi bilo koristno, če bi dodali še postprocesiranje netliste, v kateri bi združili pasivne elemente, kjer je to mogoče (na primer 3 vzporedni kondenzatorji v tabeli 4).

```

zarcXX 4 output 90e0 90e-3 0.59
rXX input 4 6e0
capXX 2 3 17e-3
capXX 2 3 4e-3
capXX 2 3 4e-3
rXX 1 4 90e5
cpeXX 3 output 90e-5 0.96
cpeXX 3 output 90e-5 0.96
capXX 2 3 4e-3
rXX 3 4 5e1
rXX input 4 6e0
zarcXX 4 output 1e3 3e-1 0.76
rXX 1 4 16e5

```

Tabela 4 Netlista genetsko generiranega vezja za realne podatke

6 ZAKLJUČEK

Slovnična evolucija se je že prej izkazala za obetavno orodje [3] [4] [14], zdaj pa smo jo uspešno aplicirali še na področje elektrokemične impedančne spektroskopije. S pomočjo implementacije novih elementov v simulacijsko okolje SPICE smo omogočili nove možnosti sinteze ekvivalentnih električnih vezij, ki ne temelji na matematičnih približkih, temveč na dejanskih elementih.

V nadaljnjih raziskavah bomo pristop tako razširili z več izboljšavami – vpeljali bomo večkriterijsko funkcijo, ki bo sicer temeljila na Sheppardovi kriterijski funkciji, vendar bo hkrati upoštevala število elementov v vezju ter stremela k vezju, ki ima čim manjše število teh elementov.

Prav tako se je izkazalo, da bi bilo koristno, če razvijemo modul za postprocesiranje netliste, ki bi združil pasivne elemente, kjer je to mogoče. To bi nam omogočilo, da bi vezje še dodatno poenostavili in naredili bolj preglednega.

Na koncu bomo poskusili končno, "najboljše" vezje dodatno optimizirati z naprednimi tehnikami, ki so nam na voljo v okolju SPICE. Menimo, da bomo tako lahko dosegli še boljše rezultate in morda celo našli vezje, ki bo popolnoma ustrezalo našim potrebam.

7 ZAHVALA

Raziskavo je omogočila agencija ARRS v okviru programa P2-0246 – Informacijsko komunikacijske tehnologije za kakovostno življenje.

LITERATURA

- [1] M. Žic, I. Fajfar, V. Subotič, S. Pereverzyev, and M. Kunaver, "Investigation of electrochemical processes in solid oxide fuel cells by modified levenberg-marquardt algorithm: A new automatic update limit strategy," *Processes*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [2] M. Kunaver, "Slovnična evolucija v elektrotehniki - posebnosti in uporabe," *Elektrotehniški vestnik*, vol. 87, no. 4, p. 202–208, 2020. Bibliografija: str. 208.
- [3] M. Kunaver, "Grammatical evolution-based analog circuit synthesis," *Informacije MIDEEM*, vol. 49, pp. 229–239, 2019.
- [4] M. Kunaver, M. Žic, I. Fajfar, T. Tuma, A. Burmen, V. Subotič, and v. Rojec, "Synthesizing electrically equivalent circuits for use in electrochemical impedance spectroscopy through grammatical evolution," *Processes*, vol. 11, no. 1859, p. 1–17, 2021. Nasl. z nasl. zaslona.
- [5] R. J. Sheppard, B. P. Jordan, and E. H. Grant, "Least squares analysis of complex data with applications to permittivity measurements," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 3, p. 1759, nov 1970.
- [6] L. W. Nagel and D. Pederson, "Spice (simulation program with integrated circuit emphasis)," Tech. Rep. UCB/ERL M382, Apr 1973.
- [7] T. Tuma and A. Burmen, *Circuit simulation with SPICE OPUS: theory and practice*. Modeling and simulation in science, engineering and technology, Boston: Birkhauser, 2009. OCLC: ocn310401021.
- [8] J. A. López-Villanueva, P. Rodríguez-Iturriaga, L. Parrilla, and S. Rodríguez-Bolívar, "A compact model of the ZARC for circuit simulators in the frequency and time domains," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 153, p. 154293, Aug. 2022.
- [9] Ž. Rojec, "Towards smaller single-point failure-resilient analog circuits by use of a genetic algorithm = manjšanje analognih vezij odpornih na odpoved poljubne komponente z uporabo genetskega algoritma," *Informacije MIDEEM : časopis za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale*, vol. vol. 53, no. no. 2, pp. str. 103–117, 2023.
- [10] Ž. Rojec, I. Fajfar, and A. Burmen, "Evolutionary synthesis of failure-resilient analog circuits," *Mathematics*, vol. iss. 1, no. 156, pp. str. 1–20, 2022.
- [11] B. A. Boukamp, "A nonlinear least squares fit procedure for analysis of immittance data of electrochemical systems," *Solid State Ionics*, vol. 20, no. 1, pp. 31–44, 1986.
- [12] M. Žic and S. Pereverzyev, "Optimizing noisy cnls problems by using nelder-mead algorithm: A new method to compute simplex step efficiency," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 851, 2019.
- [13] M. Žic and S. Pereverzyev, "Application of self-adapting regularization, machine learning tools and limits in levenberg-marquardt algorithm to solve cnls problem," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 939, 2023.

- [14] M. Kunaver, A. Burmen, and I. Fajfar, "Automatic grammatical evolution-based optimization of matrix factorization algorithm," *Mathematics*, vol. 10, no. 7, 1139, 2022.

Matevž Kunaver received his B.Sc. and Ph.D. degree from Faculty of Electrical Engineering of University of Ljubljana in 2004 and 2009. He is currently working as an Assistant at the same university. His research interests are data mining, evolutionary computation and optimization.