

Zasnova merilnega upora na tiskanem vezju

Jaša Vid Meh Peer

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, Ljubljana
E-pošta: jm0432@student.uni-lj.si

Design of a measuring resistor on a printed circuit board

Reliable and error-free current measurement is extremely important in modern semiconductor devices, but difficult to implement due to the wide frequency bandwidth and amplitude dictated by the shape of the current. This paper focuses on the analysis, implementation, and evaluation of the measuring resistor with a coaxial design, which is designed for maximum compatibility with converter devices on printed circuit boards (PCB). Eight measuring resistors were designed, which differ in the placement of surface-mounted (SMD) resistors and their connections on a double-sided PCB. Since the impedance of the mentioned connections is comparable to that of the SMD resistors, knowing its resistance and inductance is crucial in the design process. The results of the simulations were obtained with Ansys Electronics desktop software package and compared with the results of the measurements made with the vector network analyzer Bode 100. Based on the results the theoretically based assumptions were confirmed, and it was proven that it is possible to make a prototype of an SMD coaxial measuring resistor, which enables operation in a frequency range up to a minimum of 5.6 MHz.

1 Uvod

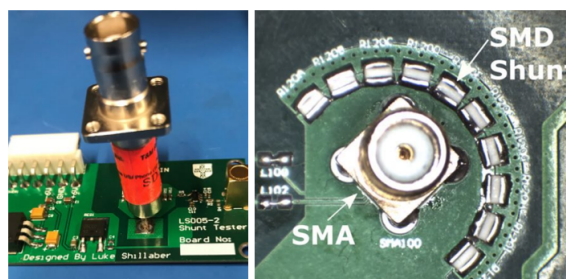
Moderne pretvorniške naprave potrebujejo za zanesljivo delovanje točno poznavanje obratovalnih veličin [1]. Med njimi izstopa tok, ki je v tovrstnih napravah raznih oblik in velikosti. Za njegovo merjenje poznamo raznovrstne merilnike, a po cenovni plati je prevladujoč merilni upor (angl. *shunt resistor*), ki zahteva le enostavno prilagodilno vezje za ojačenje padca napetosti. Zgradba merilnega upora in njegovega pripadajočega vezja narekujejo dosegljivo točnost meritve in posredno tudi ceno.

Bistvena parametra merilnih uporov sta upornost in parazitna induktivnost [2, 3]. Idealni merilni upor bi imel upornost neodvisno od temperature, vendar slednje zaradi temperaturnega koeficienta upornosti in lastnega segrevanja ni mogoče. Drugi parameter, ki nam zmanjša točnost meritve, je parazitna induktivnost. Ta pri višjih frekvencah merjenih signalov povzroči fazno in amplitudno odstopanje.

V delu sem prikazal zasnovano in izvedbo merilnega upora koaksialne izvedbe, s konstrukcijo le-te sem zmanjšal parazitno induktivnost in s tem omogočil delovanje na širšem frekvenčnem intervalu. Namen je bil izdelati merilni upor iz preprostih elementov, ki bodo tudi cenovno bolj dostopni in omogočali, da bo končna cena izdelka nižja.

2 Vrste merilnih uporov

V močnostni elektroniki in merilni tehniki, kjer je potrebna natančnost in delovanje pri tudi višjih frekvencah, se pojavijo omejitve pri najenostavnejših izvedbah. V takšnih aplikacijah se zato uporabljajo posebne izvedbe merilnih uporov, ki so prilagodne za visoke frekvence in večje tokovne gostote. Te s premišljeno geometrijsko zgradbo in izbiro materialov zmanjšajo parazitne vplive induktivnosti in spreminjanje upornosti zaradi lastnega segrevanja. Najbolj pogoste so: nizkoohmski upori z dvema priključkoma, dvo- ali štiri-kontaktni SMD upori, upor s kovinsko folijo, rešetkasta izvedba in koaksialna izvedba. Koaksialna izvedba merilnih uporov se lahko še deli na mehansko in pa SMD zgradbo.



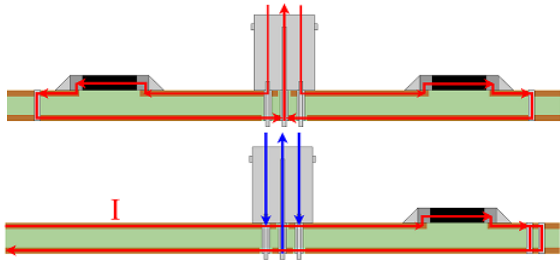
Slika 1: Primer finomehanske koaksialne izvedbe (levo) in primer SMD koaksialne izvedbe (desno) [4]

Ker je večina pretvorniških naprav zasnovanih v obliki tiskanih vezij, sem se pri svojem delu, kot je bilo omejeno v uvodu, omejil na izvedbo SMD koaksialnega merilnega upora, čigar osnova naj bo FR4, ki je najpogostejši material za tiskana vezja. S tem ukrepom sem omogočil novito izvedbo kot tudi možnost enostavnega prilaganja glede izbire in števila vgrajenih SMD komponent in njihove postavitve.

Za SMD koaksialno izvedbo merilnega upora je značilno, da je celotna struktura izvedena na dvostranski PCB plošči (slika 1). Ta izvedba izkorišča podobnost koaksialnega vodnika in dvostranske PCB plošče. Tok teče skozi prvi merilni kontakt v sredino po eni strani PCB plošče čez več (od 4 do 30) vzporedno vezanih uporov, z uporabo paralelne vezave SMD uporov doseže efektivno manjšo parazitno induktivnost [5]. Za upori so vije, ki služijo podobno kot plašč v koaksialni zgradbi. Na drugi strani PCB plošče se tok vrača iz vij do sredine na drugi merilni kontakt. Pri SMD koaksialni izvedbi lahko na parazitno kapacitivnost vplivamo z izbiro različnih snovi PCB plošče, tako da izberemo tisto, ki ima manjšo dielektričnost (PTFE, fiberglass-epoxy). Razvidno je, da sta dve največji omejitvi s stališča merilne točnosti merilnih uporov njihovo segrevanje in mejna frekvenca [6].

3 Koaksialna zasnova merilnega upora

V tem poglavju podrobneje opišem osnovno zgradbo izvedbe koaksialnega merilnega upora na tiskanini in izbrane materiale. Tipično izvedbo prototipnega izdelka in ciljnega izdelka kaže slika 2.

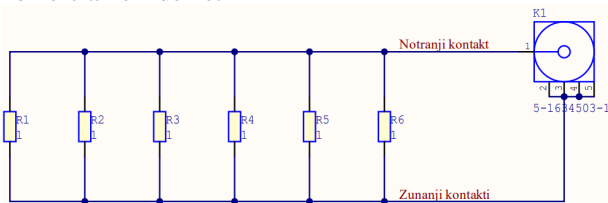


Slika 2: Potek električnega toka skozi prototipno strukturo (zgoraj) in ciljno strukturo (spodaj)

Na sliki prikazani potek električnega toka je značilen za koaksialne merilne upore. Razberemo dvoje:

- povratni tok posameznega SMD upora teče pod njim v nasprotni smeri,
- simetrična zgradba glede na priključno mesto (BNC konektor).

Prototipi merilnih uporov so bili sestavljeni iz večjega števila SMD uporov velikosti 1206 in BNC konektorja, ki so bili nameščeni na dvostranski tiskanini premera 2 cm. Velja poudariti, da se skozi izbrani BNC konektor zaključuje merjeni tok in na istih sponkah meri tudi padec napetosti – kar je seveda velika poenostavitev glede na komercialne izdelke.



Slika 3: Shema vezja

Električna shema vseh osmih merilnih uporov je identična (slika 3). Merilni upor je sestavljen iz do šest vzporedno vezanih SMD uporov enake nazivne upornosti. Poglavitni cilj je ugotoviti, kako njihovo število in razporeditev na tiskanini vplivajo na upornost, parazitno induktivnost in kapacitivnost ter posledično na impedančno karakteristiko merilnega upora. Na omenjeno bo vplivala upornost bakrenih vezic kot tudi izbrani izolacijski material in njegova debelina, ki vplivata na kapacitivnost posameznih tokokrogov [7]. Na celotno kapacitivnost vpliva tudi postavitve uporov in velikost njihovih kontaktov. Velikost parazitne induktivnosti je predvsem odvisna od medsebojnih in lastnih induktivnosti elementov in tiskanine, dolžine povezav, števila vzporedno vezanih uporov, kar zmanjšuje vpliv induktivnosti ter površina tiskanine, v katerih se lahko generirajo vrtnični tokovi [5, 8, 9].

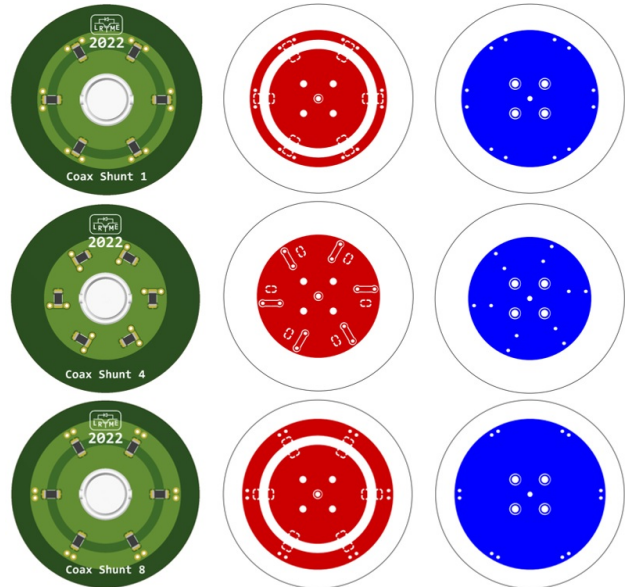
Namen osmih prototipnih vezij je, da s simulacijami in meritvami potrdim pričakovanja posamezne izvedbe, oziroma da s primerjavo dobljenih rezultatov izberem izvedbo z najboljšo frekvenčno karakteristiko.

Za načrtovanje vezij je bilo uporabljeno programsko okolje Altium, ki omogoča zasnovo vezja od sheme do

dokumentacije, možno je tudi izvoziti datoteke za proizvodnjo vezij ter simulacijo.

3.1 Zasnovane izvedbe SMD koaksialnih uporov

V nadaljevanju prikazujem slike izvedb 1, 4 in 8, za katere se je izkazalo, da imajo najboljše parametre in posledično najvišje mejne frekvence.



Slika 4: Merilni upori in njihove plasti tiskanine, izvedb 1 (prva vrstica), 4 (druga vrstica) in 8 (tretja vrstica)

Prvo izvedbo merilnega upora s šestimi diskretnimi SMD upori kaže prva vrstica slike 4. Njeni bakreni (Cu) plasti tiskanine sta oblikovani z najmanj premisleka, prikazani v rdečem in modrem. Sledita oblikovanju, kjer poskušamo med jedkanjem s tiskanine odstraniti čim manj Cu nanosa. Zgornja prevodna plast tiskanine je sestavljena iz polnega in obročastega poligona. Polni poligon povezuje notranje kontakte SMD uporov z zunanjimi kontakti BNC konektorja. Zunanji obroč pa povezuje zunanje kontakte SMD uporov s središčnim kontaktom BNC konektorja. Slednje je storjeno s skožnimi luknjami oziroma z vijami. Vije so povezane na spodnjo stran tiskanine, kjer so preko velikega Cu poligona spojene na središčni kontakt BNC konektorja. Opisana enostranska postavitve komponent in način priklopa BNC konektorja je skupna vsem izvedbam.

Vsak SMD upor ima na zunanji strani dve viji. Zadoščevala bi že samo ena, vendar sem se odločil uporabiti dve viji in s tem razpolovil tokovno gostoto, ki jo mora prenesti posamezna vija. Pri izvedbi 1 sta viji postavljeni čim bližje SMD uporu in čim bolj narazen ena od druge. S tem poskušam skrajšati pot toka ter poskrbeti, da se magnetni sklop teh dveh premih elementov zmanjša in posledično tudi medsebojna induktivnost.

Ideja izvedbe 4 je podobna kot pri izvedbi 1, obe plasti bakra sta popolnoma zapolnjeni, razlikujeta se le po orientaciji uporov. Pri prvi izvedbi so upori postavljeni radialno navzven, v izvedbi 4 pa tangencialno (slika 4, druga vrstica). Zaradi te orientacije je možno upore približati središčnemu kontaktu BNC konektorja in s tem zmanjšati razdaljo, ki jo mora tok opraviti čez merilni

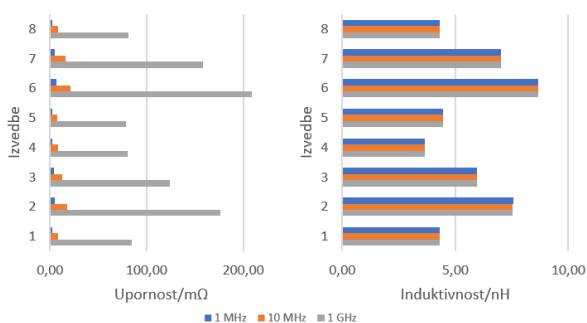
upor in s tem posledično pričakujemo manjše parazitne induktivnosti in kapacitivnosti. Zaradi spremenjene postavitve uporov, so se zmanjšale tudi dolžine premih vodnikov, ki povezujejo vezje in lahko generirajo magnetno polje, posledično lahko sklepam, da bo tudi parazitna induktivnost zaradi tega sorazmerno nižja.

Izvedba 8 je namenjena prikazu razlike pri slabi postavitvi vij, v nasprotju z izvedbo 1, kjer so vije postavljene blizu upora in bolj narazen ena od druge, so tukaj bile postavljene za uporom in ne poleg ter relativno blizu skupaj (slika 4, tretja vrstica). Celotno vezje pa ostaja enako kot v izvedbi 1, kjer sta predstavljena oba sloja tiskanine. Zaradi postavitve vij pričakujem večjo parazitno induktivnost, saj bo magnetni sklop premih elementov, vij večji, zaradi manjše razdalje med njima. Prav tako mora tok opraviti daljšo pot do vij.

4 Rezultati

Vse izvedbe sem najprej ovrednotil s simulacijami v programskem paketu Ansys in nato še z meritvami z vektorskim analizatorjem vezij – Bode 100. Za vsako izvedbo je Ansys Q3D Extractor izračunal impedančno matriko pri treh različnih frekvencah (1 MHz, 10 MHz in 1 GHz). Velikost matrike (12×12) je pogojena s številom na tiskalnini določenih spojnih mest, ki jim v programu dodelimo vlogo ponora ali izvora. Členi izračunanih matrik podajajo impedanco med dvojico omenjenih mest, med katerima ni nujno prisotna galvanska (fizična) povezava. Le-ti členi se nahajajo na diagonali matrike, medtem ko ostali členi podajajo prečne (sklopne) elemente v nadomestnem vezju tiskanine med izbranimi spojnimi mesti.

Za lažjo primerjavo načrtanih tiskanin sem seštel izključno diagonalne člene matrike na zgornji in spodnji strani tiskanine, ki tvorijo, geometrično gledano, najkrajšo zaključitev toka med kontaktoma BNC konektorja. Omenjene vsote, električno gledano, vzporednih tokokrogov sem dodatno povprečil in na sliki 5 podal njihovo grafično primerjavo upornosti in induktivnosti za tri analizirane frekvence.

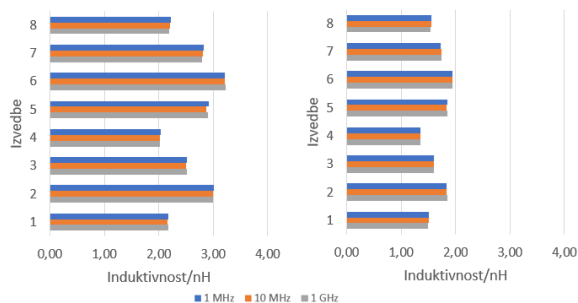


Slika 5: Upornosti (levo) in induktivnosti simulacij tiskanin (desno) različnih izvedb pri različnih frekvencah analize

Višanje upornosti z višanjem frekvence analize lahko razložimo z manjšanjem vdorne globine, do česar pride pri visokih frekvencah. Vidi se tudi, da induktivnost tiskanin ostaja konstantna pri vseh frekvencah analize, kar je pričakovano, saj je induktivnost neodvisna od frekvence.

Iz parametrov predstavljenih na sliki 5 sem lahko dobil grobo osnovo za izračun mejne frekvence. V nadaljevanju sem v program Ansys Simplorer vnesel dobljene

matrike vseh izvedb kot ekvivalentna vezja in nanje povezal idealne upore in jim kasneje dodal njihove lastne induktivnosti. Vse simulacije sem opravil najprej s polovico uporov in potem še z vsemi, saj me je zanimalo, kako njihovo število vpliva na končne parametre merilnih uporov.

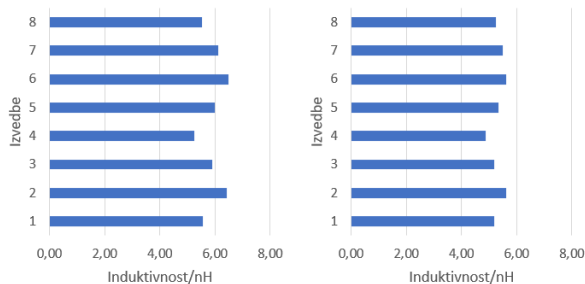


Slika 6: Induktivnosti izvedb v simulacijah s polovico (levo) in z vsemi upori (desno) z zaporedno induktivnostjo 2,625 nH

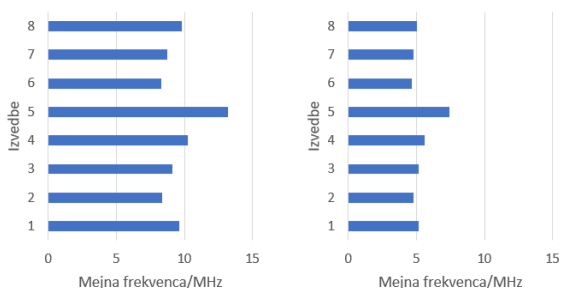
Na sliki 6 so predstavljene induktivnosti simulacij s polovico (levo) in z vsemi upori (desno) z upoštevanjem lastne induktivnosti SMD uporov. Razvidno je, da se induktivnost ob prestopu iz polovice na vse upore zmanjša, ampak ne razpolovi, kot bi pričakoval. Tako sklepam, da imajo na celotno induktivnost velik vpliv tudi medsebojne induktivnosti uporov, ki se povečajo ob uporabi večih uporov. Upornosti merilnih uporov so med seboj imele zanemarljivo majhna odstopanja, saj je upornost tiskanine bila v primerjavi z upornostjo SMD uporov zelo majhna. Skladno s pričakovanji so vezja s polovico uporov imela dvakrat višjo upornost kot izvedba z vsemi upori. Pred izvedbo simulacij sem pričakoval, da bodo mejne frekvence izvedb s polovico uporov enake mejnim frekvencam z vsemi upori, saj bi se upornost znižala za polovico in prav tako induktivnost, kar bi pomenilo, da bi časovna konstanta τ ostala enaka. Ampak vidim, da temu ni tako, zaradi vpliva medsebojnih induktivnosti uporov. Posledica tega je, da so mejne frekvence izvedb z vsemi upori nižje od mejnih frekvenc izvedb s polovico uporov.

Za lažjo primerjavo rezultatov z rezultati simulacij sem iz opravljenih meritev impedančne karakteristike odčital upornosti, induktivnosti in mejne frekvence izvedb s polovico uporov in z vsemi upori. Upornosti so bile kot pričakovano in skladne s simulacijami, večje odstopanje simulacij in meritev je nastopilo pri induktivnostih, ki so relativno večje, in posledično na mejnih frekvencah. Na sliki 7 so predstavljene odčitane induktivnosti izvedb s polovico uporov (levo) in z vsemi upori (desno). Slika 8 prikazuje rezultate meritev mejnih frekvenc s polovico uporov (levo) in z vsemi upori (desno), razvidna je obratna sorazmernost induktivnosti in mejnih frekvenc. S primerjavo posameznih parametrov vseh izvedb opazim, da se rezultati meritev ujemajo z rezultati simulacij, glede na razporeditev izvedb in da se zastavljenim zahtevam najboljše prilaga izvedba 4, ki ima mejno frekvenco 5,6 MHz.

Pridobljeni rezultati simulacij in meritev nazorno prikazujejo, kako se določeni parametri vezja spreminjajo glede na zasnovano njegovo tiskanino. Najboljše parametre izkazuje izvedba 4 in izvedbi 1 in 8, ki temeljita na podobni ideji. Zanimivo je izpostaviti, da sta se izvedbi 1



Slika 7: Meritve induktivnosti izvedb s polovico (levo) in z vsemi upori (desno)



Slika 8: Meritve mejnih frekvenc izvedb s polovico (levo) in z vsemi upori (desno)

in 8 izkazali zelo podobno, čeprav je izvedba 8 slab primer postavitve vij. Glede na simulacije in meritve lahko podam sklep, da na parametre izvedb v večji meri vplivajo razdalje od BNC konektorja kot pa postavitve vij in njune medsebojne induktivnosti. Tako lahko iz tega sklepam, da ima najboljše parametre izvedba 4, ki s svojo tangencialno postavitvijo omogoča, da ima upore bližje BNC konektorju in s tem zmanjša razdaljo, ki jo mora tok opraviti čez vezje.

Iz primerjave rezultatov simulacij in meritev je razvidno, da je med njimi opazno odstopanje predvsem med izračunano induktivnostjo simulacij in izmerjeno induktivnostjo meritev ter posledično med mejnimi frekvencami. Odstopanja med simulacijami in meritvami nastanejo zaradi elementov, ki nastopajo pri opravljanju meritev in jih simulacije ne upoštevajo. Glavni vzroki, da nastanejo odstopanja so:

- spojna mesta z BNC konektorjem,
- kontaktne upornosti uporov in ostalih elementov,
- napake v meritvi – manjša odstopanja zaradi kalibracije,
- odstopanja vrednosti SMD uporov, različne upornosti in parazitne induktivnosti,
- učinek termalnih kontaktov (angl. *thermal pad*), ki jih Ansys Q3D ne upošteva.

Izpostaviti je potrebno, da so uporabljeni SMD upori vrednosti 1Ω , zato so se izvedbe s polovico uporov in izvedbe z vsemi upori razlikovale v končni upornosti. Če bi pri izvedbah z vsemi upori namesto 1Ω uporov uporabil 2Ω upore in bi kot posledica bila končna upornost dve šestini ($2/6$) oziroma ena tretjina ($1/3$), bi bili končni upornosti izvedb s polovico uporov in z vsemi upori enaki. S takšno izvedbo pričakujem višje mejne frekvence.

5 Zaključek

Simulacije in meritve so pokazale, da je mogoče zasnovati cenovno ugoden SMD koaksialni merilni upor, ki omogoča delovanje na širokem frekvenčnem območju. V prihodnje je potrebno izvedbo 4 pretvoriti v končno izvedbo z močnostnim kontaktom. Tega lahko izvedemo na dva načina ali z žično povezavo, ki izstopa iz strukture merilnega upora ali tako da namerno preidemo na nesimetrično izvedbo in porušimo simetrijo strukture, tako da strukturo iz ene strani odpremo in speljemo močnostni kontakt po tiskanini do sredine vezja. Zaradi praktičnega razloga, ki je, da bo merilni upor kar del vezja, v katerem bo v prihodnosti uporabljen, bo močnostni kontakt izveden s povezavo v odprto simetrijo, ki poteka po tiskanini v središče merilnega upora.

Kot je bilo omenjeno, so za prototipne izvedbe merilnih uporov bili uporabljeni SMD upori velikosti 1206 vrednosti 1Ω , ki so omogočali lažje spajkanje ter menjavo. Končni produkt, ki ne bo imel potrebe po menjavi, bo imel SMD upore velikosti 0805, katere bom lahko postavil bližje BNC konektorju, s tem pričakujem, da bom še dodatno zmanjšal induktivnost in zanemarljivo malo povečal kapacitivnost celotnega vezja.

Zahvala

Zahvalil bi se mentorju izr. prof. dr. Petru Zajcu, ki me je pri raziskovanju in pisanju usmerjal. Zahvalil bi se tudi vsem članom Laboratorija za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko (LRTME), ki so mi pomagali pri načrtovanju vezij, postavitvi simulacij in opravljanju meritev.

Literatura

- [1] W. Zhang, Z. Zhang, F. Wang, E. V. Brush in N. Forcier, "High-Bandwidth Low-Inductance Current Shunt for Wide-Bandgap Devices Dynamic Characterization," *IEEE Transactions on Power Electronics*, let. 36, str. 4522–4531, apr. 2021.
- [2] U. Pogliano, G. Bosco in D. Serazio, "Coaxial Shunts as AC–DC Transfer Standards of Current," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, let. 58, str. 872–877, apr. 2009.
- [3] B. Voljc, M. Lindic, B. Pinter, M. Kokalj, Z. Svetik in R. Lapuh, "Evaluation of a 100 A Current Shunt for the Direct Measurement of AC Current," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, let. 62, str. 1675–1680, jun. 2013.
- [4] L. Shillaber, L. Ran, Y. Shen in T. Long, "Gigahertz Current Measurement for Wide Band-gap Devices," v *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (Detroit, MI, USA), str. 2357–2363, IEEE, okt. 2020.
- [5] K. Lind, T. Sørdsdal in H. Slinde, "Design, Modeling, and Verification of High-Performance AC–DC Current Shunts From Inexpensive Components," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, let. 57, str. 176–181, jan. 2008.
- [6] D. C. Pentz in A. L. J. Joannou, "Miniature integrated co-axial current shunt for high frequency switching power electronics," *South African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*, str. 6, 2013.
- [7] I. Humar, E. Bulic, A. R. Sinigoj, T. Slivnik in T. Kotnik, *Osnove elektrotehnike I*. Ljubljana: Zalozba FE, 2017. OCLC: 1016137288.
- [8] I. Humar, E. Bulic, A. R. Sinigoj, T. Slivnik in T. Kotnik, *Osnove elektrotehnike II*. Ljubljana: Zalozba FE, 2017. OCLC: 1016137288.
- [9] Z. B. Popović in B. D. Popović, *Introductory electromagnetics: practice, problems and labs*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.