

Dve metodi za kalibracijo tridetektorskih analizatorjev vezij brez merjenja sklenjenih vrat

Drago Kostevc, Jože Mlakar

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: drago.kostevc@fe.uni-lj.si

Povzetek. Prikazala sva novi metodi za kalibriranje vektorskih analizatorjev vezij s tremi detektorji. Pri obeh namesto meritve sklenjenih vrat izvedemo meritve linije, za katero ni treba natančno poznati dolžine. Obe metodi temeljita na podobnih metodah za kalibracijo merilnikov s štirimi detektorji, vendar je pri tridetektorskih merilnikih treba s kalibracijo določiti dva parametra več, zato je kalibracijskih meritev več, sistem enačb pa je nelinearen. Obe metodi sta opisani s sistemom enačb in s postopkom rešitve.

Ključne besede: avtomatski analizator vezij, tridetektorski analizator vezij, kalibracijske metode, samokalibracijske metode

Two methods for calibration without a through connection on a three-sampler vector analyzer

Abstract. For purely physical reasons it is often difficult or even impossible to directly interconnect ports of some vector analyzers. In such cases, methods not involving a through connection are convenient.

Two new methods for calibration without a through connection on a three-sampler vector analyzer are presented. The methods, which are based on calibration methods for four-sampler vector analyzers, take into account the fact that the standard twelve-parameter error model, when applied to three-sampler vector analyzers, comprises only eleven independent parameters.

In the first method, an analyzer is calibrated as a reflectometer at both ports and then a line with unknown transmission parameters, but with at least approximately known length, is measured during the calibration process. In the second method, two known reflection standards and two lines are measured during the calibration process.

Each method is described by a system of non-linear equations and a solution procedure for the equation systems is given.

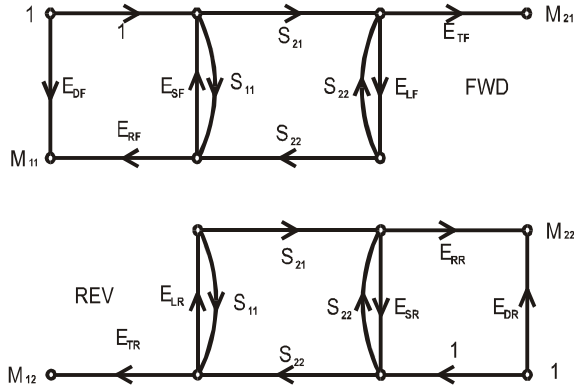
Keywords: automatic vector network analyzers, three-sampler, calibration methods, self-calibrating procedures

1 Uvod

Najpomembnejši del merjenja parametrov S z vektorskim analizatorjem vezij je kalibracija. Pri kalibraciji iz meritev kalibracijskih normal določimo parametre pogreškovnega modela, s katerim modeliramo sistematske pogreške mikrovalovnega dela analizatorja. Pri merjenju nato pogreškovni model uporabimo za izločanje sistematskih pogreškov, ali, kot tudi včasih rečemo, za korekcijo surovih meritev.

Analizatorji vezij so imeli sprva po dva detektorja, nato so nastali šestvhodni, pa štiridetektorski in nazadnje še tridetektorski vektorski analizatorji vezij. Danes izdelujejo le še (zelo drage) štiridetektorske in (malo cenejše) tridetektorske. Model dvodetektorskega analizatorja je 12-parameterski model (slika 1) [1]. Zaradi preglednosti je na sliki samo okrnjen model z 10 parametri, izpuščena sta parametra, katerih določitev je trivialna. FWD in REV označujeta položaj stikal med meritvijo. Ostalina preteklosti je, da je ta model standarden in ga za vsakdanjo rabo še vedno uporabljajo tako pri štiri- kot tudi pri tridetektorskih analizatorjih.

Za dvodetektorske analizatorje velja, da je vseh 10 parametrov tega modela med seboj neodvisnih. Standardna kalibracijska metoda za določanje parametrov tega pogreškovnega modela je metoda SOLT (short-open-load-thru) [1], pri kateri med kalibracijskim postopkom izmerimo kratek stik, odprte sponke, prilagojeno breme in sklenjeni vrati analizatorja, skupaj 10 meritev za 10 parametrov pogreškovnega modela.

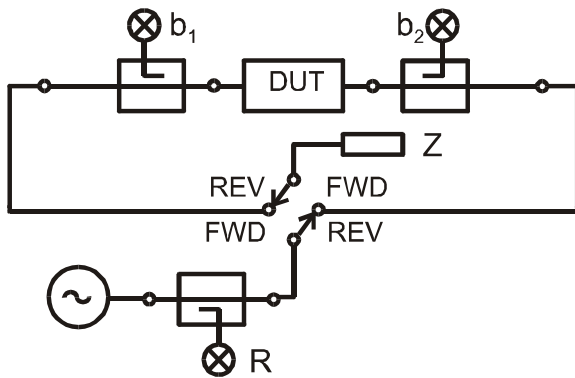


Slika 1: Smerni graf standardnega pogreškovnega modela z merjencem

Figure 1: Signal flow graph for the standard error model with a DUT.

Štiri detektorje namesto dveh so v naslednjo generacijo analizatorjev vgradili zato, da bi bilo v mikrovalovnem delu čim manj stikal, ki povečujejo naključne pogreške. Tako pri merjenju posameznih parametrov S nekateri detektorji sodelujejo, drugi pa nekoristno 'počivajo', čeprav so vseskozi priključeni. Potem pa se je izkazalo, da lahko počivajoče koristno uporabimo za določitev dela standardnega pogreškovnega modela. Zato je te analizatorje mogoče modelirati z 8-parametrskim modelom, v katerem je za povrh le sedem parametrov neodvisnih [2].

To je seveda ponudilo možnost kalibracije z manjšim številom kalibracijskih normal. Poznanih je veliko kalibracijskih metod za štiridetektorske vektorske merilnike, morda je najbolj znana skupina samokalibracijskih metod (self-calibration techniques). Ne preveč posrečeno ime so dobile po (napačnem) sklepu, da pri kalibraciji ni uporabljena nobena absolutna normala. Zaradi majhnega števila uporabljenih normal so te metode zelo pripravne, še posebej za kalibriranje analizatorjev z nestandardnimi priključki.



Slika 2: Blokovna shema tridetektorskega vektorskega analizatorja vezij

Figure 2: Block diagram of a three-sampler vector analyzer

Tridetektorski merilniki (slika 2) so se uveljavili kot cenejša različica štiridetektorskih. Imajo zelo podobno zgradbo, vendar več mikrovalovnih stikal kot štiridetektorski merilniki. Po zgradbi so tako nekakšen vmesni člen med dvo- in štiridetektorskimi merilniki. Izkaže se, da so vmesni člen tudi po številu neodvisnih parametrov pogreškovnega modela, velja namreč, da je le devet od desetih parametrov pogreškovnega vezja tridetektorskega merilnika med seboj neodvisnih [3]. To dejstvo ponuja možnosti za uporabo kalibracijskih metod, ki so po številu uporabljenih normal med SOLT in samokalibracijskimi metodami. [4, 5].

V resničnem svetu merjenja in kalibriranja vektorskih analizatorjev vezij se pogosto zgodi, da nekatere teoretično neoporečne kalibracijske metode iz različnih vzrokov niso primerne za praktično uporabo. Eden izmed vzrokov je tudi, da je meritev neposredno sklenjenih vrat, na kateri temelji večina kalibracijskih metod, za nekatere priključke neizvedljiva. Zato so zelo dobrodošle metode, ki med kalibracijo ne potrebujejo meritve sklenjenih vrat. Znanih je nekaj takih metod, ki vse temeljijo na uporabi linije kot nadomestka za sklenjena vrata in na samokalibracijskih metodah in so zato uporabne le za štiridetektorske merilnike [6].

2 Kalibracija tridetektorskih merilnikov

Pri kalibriranju merilnika izmerimo zadostno število kalibracijskih normal in iz rezultatov meritev izračunamo parametre pogreškovnega modela. Kalibracijske normale so ali eno- ali dvovhodne. Smerni graf kalibracijske meritve enovhodne normale je na sliki 3, smerni graf kalibracijske meritve dvovhodne kalibracijske normale pa na sliki 4. Iz enovhodne meritve dobimo eno, iz dvovhodne meritve pa štiri kompleksne enačbe.

Dodatno velja za tridetektorske merilnike še enačba (1) [3]

$$E_{RF}E_{RR} = E_{TF}E_{TR} - E_{RF}E_{DR}(E_{LF} - E_{SR}) - E_{RR}E_{DF}(E_{LR} - E_{SF}) - E_{DR}E_{DF}(E_{LF} - E_{SR})(E_{LR} - E_{SF}) \quad (1)$$

Tako je le devet izmed desetih parametrov med seboj neodvisnih in za določitev pogreškovnega modela potrebujemo še devet med seboj neodvisnih kompleksnih enačb. Iz meritev enovhodnih normal na vratih 1 in 2 dobimo naslednji enačbi:

$$E_{RF}\Gamma + E_{SF}\Gamma(M_{1X} - E_{DF}) = M_1 - E_{DF} \quad (2)$$

$$E_{RR}\Gamma + E_{SR}\Gamma(M_{2X} - E_{DR}) = M_2 - E_{DR} \quad (3)$$

Pri kalibriranju se iz več razlogov ponavadi omejimo na dvovhodne recipročne brezodbojne normale (sklenjeni vrati merilnika, brezodbojna linija ali brezodbojni atenuator). Za te normale velja:

$$S_{12} = S_{21}$$

$$S_{11} = S_{22} = 0$$

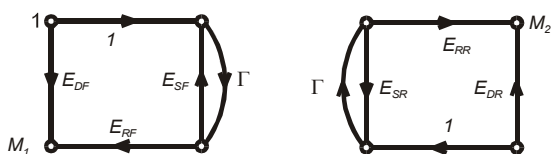
Iz meritev dvovhodne recipročne brezodbojne normale dobimo naslednjo skupino enačb:

$$E_{DF} + E_{RF}E_{LF}S_{21}^2 = M_{11} + (E_{DF} - M_{11})E_{SF}E_{LF}S_{21}^2 \quad (4)$$

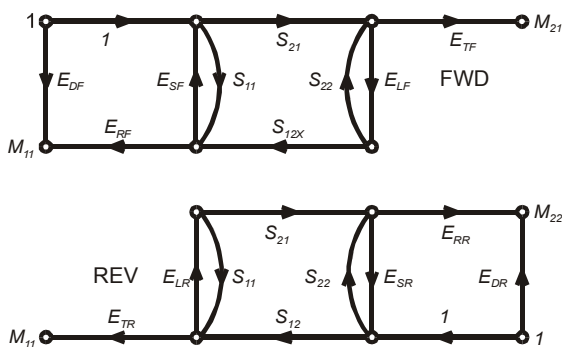
$$E_{DR} + E_{RR}E_{LR}S_{21}^2 = M_{22} + (E_{DR} - M_{22})E_{SR}E_{LR}S_{21}^2 \quad (5)$$

$$E_{TF}S_{21} = M_{21}(1 - E_{SF}E_{LF}S_{21}^2) \quad (6)$$

$$E_{TR}S_{21} = M_{12}(1 - E_{SR}E_{LR}S_{21}^2) \quad (7)$$



Slika 3: Meritev enovhodne kalibracijske normale
Figure 3: Signal flowgraph of the measurement of the reflection standards on both ports of the analyser



Slika 4: Meritev dvovhodne kalibracijske normale
Figure 4: Signal flow graph of the measurement of two-port standard.

3 Nove kalibracijske metode

3.1 Vrata 1 – vrata 2 – linija

Pri tej metodi najprej kalibriramo oboja vrata merilnika enako kot pri metodi SOLT [1], torej izmerimo tri znane odbojnosti na obeh vratih merilnika. To so ponavadi kratek stik, odprte sponke in prilagojeno breme. Iz teh meritev dobimo na podlagi enačb 2 in 3 dva sistema linearnih enačb s po tremi neznankami, iz katerih določimo prvih šest parametrov pogreškovnega modela E_{DF} , E_{SF} , E_{RF} , E_{DR} , E_{SR} in E_{RR} . Nato izmerimo prilagojeno linijo, katere dolžino moramo poznati le približno. Ker za linijo velja

$$S_{21L} = e^{-\gamma l},$$

lahko enačbe (4 – 7) napišemo takole:

$$E_{DF} + E_{RF}E_{LF}e^{-2\gamma l} = M_{11L} + (E_{DF} - M_{11L})E_{SF}E_{LF}e^{-2\gamma l}$$

$$E_{DR} + E_{RR}E_{LR}e^{-2\gamma l} = M_{22L} + (E_{DR} - M_{22L})E_{SR}E_{LR}e^{-2\gamma l}$$

$$E_{TF}e^{-\gamma l} = M_{21L}(1 - E_{SF}E_{LF}e^{-2\gamma l})$$

$$E_{TR}e^{-\gamma l} = M_{12L}(1 - E_{SR}E_{LR}e^{-2\gamma l}).$$

Iz teh enačb dobimo skupaj z enačbo (1) naslednjo eksplicitno rešitev za štiri še manjkajoče parametre pogreškovnega modela in za prevajalni parameter linije

$$E_{LF} = ae^{2\gamma l}$$

$$E_{LR} = be^{2\gamma l}$$

$$E_{TF} = ce^{\gamma l}$$

$$E_{TR} = de^{\gamma l}$$

$$e^{2\gamma l} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, A \neq 0$$

$$e^{2\gamma l} = -\frac{C}{B}, A = 0$$

$$A = abE_{DR}E_{DF}$$

$$B = aE_{DR}(E_{RF} - E_{DF}E_{SF}) + bE_{DF}(E_{RR} - E_{DR}E_{SR}) - cd$$

$$C = (E_{RF} - E_{DF}E_{SF})(E_{RR} - E_{DR}E_{SR})$$

$$a = \frac{M_{11L} - E_{DF}}{E_{RF} + E_{SF}(M_{11L} - E_{DF})}$$

$$b = \frac{M_{22L} - E_{DR}}{E_{RR} + E_{SR}(M_{22L} - E_{DR})}$$

$$c = M_{21L}(1 - aE_{SF})$$

$$d = M_{12L}(1 - bE_{SR})$$

Ker je absolutna vrednost koeficienta A veliko manjša od absolutne vrednosti koeficientov B in C, je pravilna rešitev za $e^{2\gamma l}$ tista z manjšo absolutno vrednostjo (druga rešitev je po absolutni vrednosti mnogo večja od 1, kar je za realne linije nemogoče). Pravilen koren za $e^{\gamma l}$ določimo s primerjanjem s fazo, izračunano iz približnega poznavanja dolžine linije. Namesto linije lahko uporabimo tudi dobro prilagojen četveropol (pri katerem moramo približno poznati prevajalni parameter), v enačbah tedaj namesto parametra $e^{-\gamma l}$ nastopa parameter S_{21} četveropola.

3.2 Dve liniji – dve odbojnosti

Metoda je podobna metodam LRL/LRM [6], ki so poznane za kalibracijo štiridetektorskih merilnikov z nestandardnimi priključki. Vse temeljijo na metodi TRL [7], prvi in najbolj znani samokalibracijski metodi.

Za brezodbojni standard vzamemo linijo, ki jo bomo imenovali preprosto ‘linija’ in jo označili z indeksom L, namesto sklenjenih vrat pa se uporablja linija, ki jo bomo kot ‘nadomestek sklenjenim vratom’ označili z indeksom NS.

Med kalibracijo je treba na obeh vratih izmeriti po dve natančno znani odbojnosti, označimo ju s K in O (ponavadi uporabimo kratek stik in odprte sponke), in dve liniji, označimo ju z L in NS. Obe liniji morata imeti enake propagacijske lastnosti in različni dolžini. Enačbe, ki popisujejo kalibracijo, bomo napisali tako, kot da je referenčna ravnina merilnika na sredini linije NS. Meritev linije NS je torej ekvivalentna meritvi sklenjenih vrat in postopek reševanja je zato preprostejši. Vsi parametri pogreškovnega modela v naslednjih enačbah se nanašajo na referenčno ravnino

vrat na sredini nadomestne linije. Tako napisane enačbe so:

$$E_{RF}\Gamma_K + E_{SF}\Gamma_K(M_{1K} - E_{DF}) = (M_{1K} - E_{DF})e^{-\gamma_{NS}} \quad (8)$$

$$E_{RF}\Gamma_O + E_{SF}\Gamma_O(M_{1O} - E_{DF}) = (M_{1O} - E_{DF})e^{-\gamma_{NS}} \quad (9)$$

$$E_{RR}\Gamma_K + E_{SR}\Gamma_K(M_{2K} - E_{DR}) = (M_{2K} - E_{DR})e^{-\gamma_{NS}} \quad (10)$$

$$E_{RR}\Gamma_O + E_{SR}\Gamma_O(M_{2O} - E_{DR}) = (M_{2O} - E_{DR})e^{-\gamma_{NS}} \quad (11)$$

$$E_{DF} + E_{RF}E_{LF} = M_{11L} + (E_{DF} - M_{11L})E_{SF}E_{LF} \quad (12)$$

$$E_{DR} + E_{RR}E_{LR} = M_{22L} + (E_{DR} - M_{22L})E_{SR}E_{LR} \quad (13)$$

$$E_{TF} = M_{21L}(1 - E_{SF}E_{LF}) \quad (14)$$

$$E_{TR} = M_{12L}(1 - E_{SR}E_{LR}) \quad (15)$$

$$E_{DF} + E_{RF}E_{LF}e^{-2\gamma_{\Delta l}} = M_{11L} + (E_{DF} - M_{11L})E_{SF}E_{LF}e^{-2\gamma_{\Delta l}} \quad (16)$$

$$E_{DR} + E_{RR}E_{LR}e^{-2\gamma_{\Delta l}} = M_{22L} + (E_{DR} - M_{22L})E_{SR}E_{LR}e^{-2\gamma_{\Delta l}} \quad (17)$$

$$E_{TF}e^{-\gamma_{\Delta l}} = M_{21L}(1 - E_{SF}E_{LF}e^{-2\gamma_{\Delta l}}) \quad (18)$$

$$E_{TR}e^{-\gamma_{\Delta l}} = M_{12L}(1 - E_{SR}E_{LR}e^{-2\gamma_{\Delta l}}) \quad (19)$$

Dolžina l_{NS} je dolžina linije NS, dolžina Δl pa razlika med dolžinama linije L in linije NS.

Sistem enačb rešimo iterativno, postopek je podoben postopku pri metodi TOSL in TKRL [4].

V prvem koraku izenačimo koeficiente E_{SF} , E_{LF} , E_{SR} in E_{LR} na desni strani enačb (12 - 19) in (1) z 0. Za resnične analizatorje je to zelo dobra aproksimacija, ker so absolutne vrednosti teh parametrov majhne, v enačbah pa nastopajo le v produktih. Prve približke za koeficienta E_{TF} and E_{TR} določimo iz enačb (14 in 15), $e^{-\gamma_{\Delta l}}$ s povprečenjem iz enačb (18 in 19), E_{DF} in produkt $E_{RF}E_{LF}$ iz enačb (12 in 16), E_{DR} in produkt $E_{RR}E_{LR}$ iz enačb (13 in 17).

Nato iz preostalih petih enačb (1) in (8 - 11) izračunamo preostale neznanke E_{RF} , E_{RR} , E_{SF} , E_{SR} in $e^{-\gamma_{NS}}$. Eksplicitna rešitev tega sistema petih enačb je

$$E_{RF} = \pm \sqrt{R_1 \frac{(M_{1K} - E_{DF})(M_{1O} - E_{DF})(M_{2O} - M_{2K})}{(M_{2K} - E_{DR})(M_{2O} - E_{DR})(M_{1O} - M_{1K})}}$$

$$E_{RR} = \frac{R_1}{E_{RF}}$$

$$E_{SF} = \left(\frac{\Gamma_K}{(M_{1K} - E_{DF})} - \frac{\Gamma_O}{(M_{1O} - E_{DF})} \right) E_{RF}$$

$$E_{SR} = \left(\frac{\Gamma_K}{(M_{2K} - E_{DR})} - \frac{\Gamma_O}{(M_{2O} - E_{DR})} \right) E_{RR}$$

$$e^{-\gamma_{NS}} = \frac{\Gamma_K \Gamma_O (M_{1K} - M_{1O})}{(M_{1K} - E_{DF})(M_{1O} - E_{DF})(\Gamma_K - \Gamma_O)} E_{RF}$$

R_j je desna stran enačbe (1). Predznak koeficienta E_{RF} določimo na podlagi približno znane dolžine linije NS.

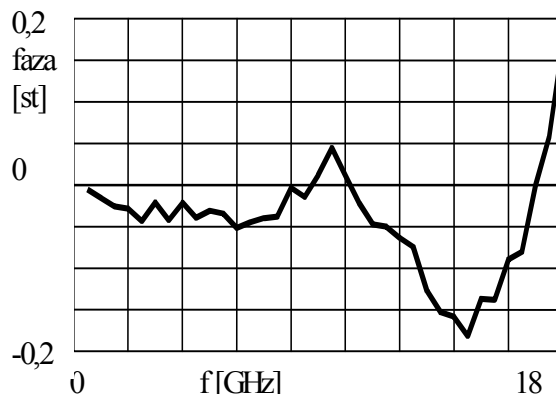
Vrednosti tako dobljenih koeficientov uporabimo v naslednji iteraciji. Rešitev zelo hitro konvergira in ponavadi je potrebnih le nekaj iteracij. Razlika dolžin Δl

pri tej metodi ne sme biti blizu mnogokratniku polovične valovne dolžine, kar je splošno znano za metodo TRL.

Na koncu še s pomočjo izračunanega prevajalnega parametra linije NS transformiramo referenčno ravnino merilnika iz sredine linije NS v ravnino priključkov.

4 Verifikacija

Verifikacijske meritve so bile opravljene na tridetektorskem analizatorju HP 8720C s priključki APC7. Pri merjenju so bile uporabljene kalibracijske normale Maury 2650F in precizne zračne linije brez priključkov Maury MMC 2653. Za verifikacijo kalibracijskih metod se ponavadi uporabijo precizni priključki APC7 in izvajajo navidezno nesmiselne meritve, ki so izbrane tako, da najbolje razgalijo morebitno šibkost metode. Za zgled smo po metodi *Vrata 1 - vrata 2 - linija* kalibrirali merilnik z linijo, dolgo 30 mm, in s tako kalibriranim merilnikom izmerili sklenjena vrata. Faza prevajalnega parametra je na sliki 5 in dokazuje, da je merilnik zelo dobro kalibriran



Slika 5: Faza prevajalnega parametra sklenjenih vrat
Figure 5: Phase of the S_{21} parameter of the through connection.

5 Sklep

Tridetektorski merilniki so zaradi cene dobrodošla alternativa štiridetektorskim. Pri praktičnem merjenju se pogosto zgodi, da iz različnih vzrokov ni mogoča meritev sklenjenih vrat. V sestavku sva prikazala dve preprosti metodi za kalibracijo tridetektorskih analizatorjev vezij brez merjenja sklenjenih vrat. Takšne metode so seveda veljavne za merilnike s kakršnimikoli priključki, predvsem pa so uporabne pri kalibriranju merilnika z nestandardnimi priključki. Zgled je denimo merjenje visokofrekvenčnih parametrov vezij neposredno na rezini. Pri teh meritvah so prav posebej dobrodošle metode s čim manj uporabljenimi (absolutnimi) normalami. Za nestandardne priključke je posebej problematična realizacija brezodbojnega bremena, medtem ko je preprosto izdelati linijo kot kalibracijsko normalo.

6 Zahvala

Avtorja se zahvaljujeta Dielektričnemu laboratoriju Inštituta Jožef Stefan za uporabo merilne opreme.

7 Literatura

- [1] J. Fitzpatrick, Error Models for System Measurement, *Microwave Journal*, May 1978, pp. 63–66
- [2] H. J. Eul, B. Schiek, Thru-Match-Reflect: One Result of a Rigorous Theory for De-embedding and Network Analyzer Calibration, *18th European Microwave Conference Proceedings*, Sept. 1988, pp. 909–914
- [3] J. A. Jargon, R. B. Marks, D. K. Rytting, Robust SOLT and Alternative Calibrations For Four-Sampler Vector Network Analyzers, *IEEE Trans. MTT*, Vol. MTT-47, No. 10, Oct. 1999, pp. 2008–2013
- [4] D. Kostevc, J. Mlakar, 'Three-sampler Network Analyzer Calibrations', *Microwave Journal*, vol 43, No. 7, pp. 88–94
- [5] D. Kostevc, J. Mlakar, Samokalibracijske metode za tridetektorske analizatorje vezij, ERK 2002, sept. 2002, pp. 155–158
- [6] Lautzenhiser, A. Davidson, K. Jones, *Improve Accuracy of On-wafer Tests via LRM calibration*, *Microwaves & RF*, vol. 29, Jan. 1990, pp. 105–109
- [7] G. F. Engen, C. A. Hoer, "Thru-Reflect-Line": An Improved Technique for Calibrating the Dual Six-Port Automatic Network Analyzer, *IEEE Trans. MTT*, Vol. MTT-27, No. 12, Dec. 1979, pp. 987–993

Drago Kostevc je diplomiral leta 1974, magistriral leta 1981 in leta 1985 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je bil leta 2001 tudi izvoljen za izrednega profesorja. Zaposlen je na Fakulteti za elektrotehniko, težišče njegovega raziskovalnega dela je na mikrovalovnem področju. Ukvarja se z računalniškim načrtovanjem, optimiranjem in modeliranjem pasivnih in aktivnih mikrovalovnih elementov in z metodami za izboljšanje natančnosti mikrovalovnih meritev.

Jože Mlakar je diplomiral leta 1965 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova prva zaposlitev je bila na Inštitutu za elektroniko in vakuumsko tehniko, leta 1970 pa se je kot asistent zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko, kjer je doktoriral leta 1975. Leta 1987 je bil izvoljen za rednega profesorja. Njegovo pedagoško in raziskovalno delo pokriva področja analize in sinteze električnih vezij in valovodnih struktur in mikrovalove.