

# Uporabnost vektorskega analizatorja vezij NanoVNA

Andrej Štern

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

## Usability of NanoVNA vector network analyzer

**Abstract.** Vector network analyzers fulfill the set of instrumentation for every RF engineer by providing system parameters, such as frequency-dependent signal amplitude and phase, filter responses, antenna matching and line length. Advances in electronics, especially frequency synthesizers, analog samplers, and directional couplers, allowed the first simplified VNAs to emerge in 2019, comprising simpler design, lower cost, and surprising accuracy, known as NanoVNA.

In order to popularize the use of NanoVNA, this paper provides a brief overview of its usability, introduction to S parameters, procedures for measurement the antennas, calibration accessories and comparison results with professional VNA.

## 1 Uvod

V elektrotehniko se srečujemo z različnimi merilnimi inštrumenti, katerih naloga je pretvorba iskanih veličin v neposredni prikaz ali številske formate za nadaljnjo obdelavo. Na skoraj vsaki delovni mizi se nahaja vsaj električni multimeter, za opazovanje signalov in prehodnih pojavov na časovni osi osciloskop, za pogled na frekvenčni osi pa bolj kompleksni spektralni analizatorji. Pri delu ali hobijih nas večkrat zanimajo tudi parametri sistema, kot so frekvenčno odvisni poteki impedance, amplitude in faze signala, prepustnosti filtrov ter odbojnosti, slabljenja in dolžine linij, a tu omenjeni pripomočki ne postrežejo s pravo predstavo. Potrebuje se nov merilni inštrument - vektorski analizator vezij VNA (angl. Vector Network Analyzer), ki v cenovno višjem rangi združuje več funkcionalnosti. Zaradi razvoja elektronskih komponent, kot so sintetizatorji frekvenc, analogni vzorčevalniki in smerni sklopniki, so se leta 2019 pojavili poenostavljeni vektorski analizatorji z nižje cenovnimi komponentami, poimenovani NanoVNA. Slikovna primerjava profesionalnega VNA in NanoVNA je podana na sliki 1.



Slika 1: Primerjava profesionalnega VNA ZVA67 (67 GHz) in vsem dostopne različice NanoVNA-F V2 (3 GHz)

Pogosto se porajajo vprašanja o uporabnosti takega merilnika, saj marsikdo z večjimi in dražjimi izvedbami še ni imel opravka. Redke primerjave na spletu med NanoVNA in profesionalnimi različicami kažejo zadovoljive rezultate enostavnejšega za amatersko in pol-profesionalno rabo, kjer niso zahtevani visoko dinamično območje, stabilnost oscilatorjev in linearnost preko celotnega delovnega obsega. Čeprav osnovne različice dosegajo uporabnost do 900 MHz, je danes najboljši kompromis za nakup različica V2 do 3 GHz, v teku pa je tudi nadgradnja do 6 GHz, kar bo za povprečnega uporabnika meritev na področju osebnih in lokalnih brezžičnih ter mobilnih omrežij povsem zadoščalo.

Z namenom popularizacije rabe NanoVNA so v prispevku podani kratek pregled lastnosti takega analizatorja, postopki meritev parametrov S, njegova uporabnost pri merjenju anten in filtrov, priporočljiva dodatna oprema za kalibracijo ter primerjave v delovanju s profesionalno opremo.

## 2 Delovanje NanoVNA

Analizator NanoVNA danes srečamo v več izvedbah v cenovnem razponu od 30 € do prek 300 € s pokrivanjem frekvenčnega obsega do 6 GHz. Leta 2019 se je pod avtorjem »Edy555« začel ponujati v različici do 300 MHz, ki je temeljila na sintetizatorju pravokotnega urinega takta Si5351A.

Kmalu zatem je avtor »Hugen« koristno uporabil harmonske komponente urinega takta in tako s pomočjo dodatne obdelave signalov in prisiljenega delovanja čipa prek normalnih meja uspel doseči 900 MHz z oznako NanoVNA-H. V tem okviru sta avtorja nadaljevala vse do največ 2,7 GHz oz. stabilnih 1,5 GHz. Različica NanoVNA-F vsebuje večji zaslon, boljši procesor in realno-časovni operacijski sistem FreeRTOS+CLI.

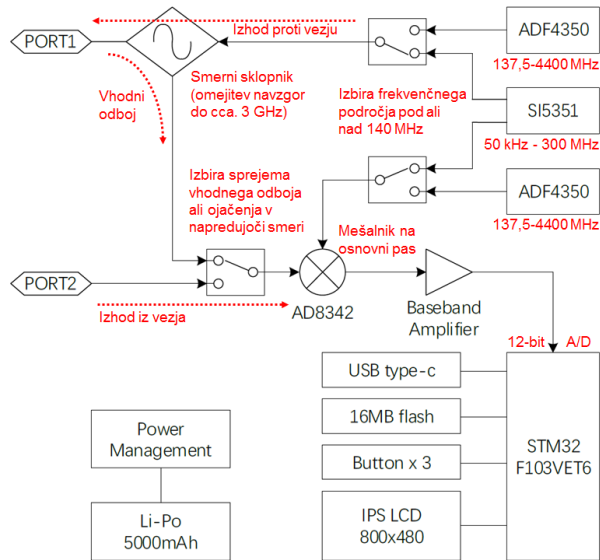
Novejše različice V2, npr. NanoVNA-F V2, predstavljajo krepko posodobitev vezja, kjer se poleg Si5351 s pokrivanjem navzdol do 50 kHz uporablja tudi ADF4350 s sinusnim izhodom za doseganje zgornje stabilne frekvence 3 GHz.

Trenutno se na trgu pojavljajo prve različice V3 z novimi sintetizatorji in dosegom do 6 GHz brez uporabe harmonskih komponent, vendar je pričakovana cena približno 3 do 5-kratna glede na V2.

Zaradi odprtih licenc za strojno in programsko opremo se pojavljajo nekatere izvedbe, ki ne dosegajo pričakovanih zmogljivosti. Zato je še pred nakupom potrebno preveriti, kako je s kvaliteto in stabilnostjo izbranega izdelka, kakšna je zanj programska podpora in tudi, kakšno podporo skupnosti ima za sabo. Vsem pa je skupna uporaba prosto dostopne računalniške aplikacije »NanoVNA Saver«.

## 2.1 Blokovni načrt NanoVNA V2

Vektorski analizator vezij deluje kot oddajnik nizkega nivoja visokofrekvenčnega signala reda -10 dBm v testirano vezje in hkrati kot sprejemnik amplitude in faze odboja na vходу v vezje ter odziva na isti vhodni signal na izhodu vezja. Blokovni načrt za preizkušene NanoVNA-F V2 je prikazan na sliki 2 [1].



Slika 2: Blokovni načrt NanoVNA-F V2

Meritev odzivov vezja se začne z generiranjem frekvence iz izbranega frekvenčnega področja. V različici V2, ki dosega 3 GHz, sta uporabljena dva sintetizatorja: SI5351A za nižje frekvence (od 50 kHz do 135 MHz) in ADF4350 za višje frekvence do 3 GHz. Signal potuje do priključenega vezja prek smernega sklopnika, ki sprejete odboje preusmeri v spodnjo, sprejemno vejo. Tu se zaradi varčevanja s komponentami nahaja stikalo, s katerim mikrokrmilnik STM32 izbira med vhodnim odbojem iz vezja in odzivom vezja na njegovem izhodu. Zaradi tega preklapljanja je čas preleta dejansko daljši od optimalnega, kar se čuti pri samem delu z analizatorjem. Izbran sprejet signal se nato v mešalniku prestavi na osnovni pas in vzorči kar v 12-bitnem ADC STM32, ki opravlja tudi vse preostale funkcije - formatiranje podatkov, izločanje harmonskih komponent, preračunavanje parametrov S v uporabne veličine ter upravljanje z vnosi in prikazom na zaslonu na dotik. Število zajetih točk je v preletu opazovanega frekvenčnega področja omejeno na 101 točko na prelet, z razdelitvijo področja na »n« podsegmentov v aplikaciji NanoVNA Saver pa lahko število zajetih meritev v enem prikazu povečamo za n-krat, npr. 30 podsegmentov na NanoVNA zagotovi 3030 zajetih meritev.

V različici V1 je blokovni načrt podoben, le da je uporabljen zgolj generator pravokotnih urinih impulzov SI5351A, pri katerem se za doseganje frekvenc do 900 MHz uporablja harmonske komponente, vzorčenje signala pa poteka na ločenem avdio vzorčevalniku in ne v A/D vezju mikrokrmilnika.

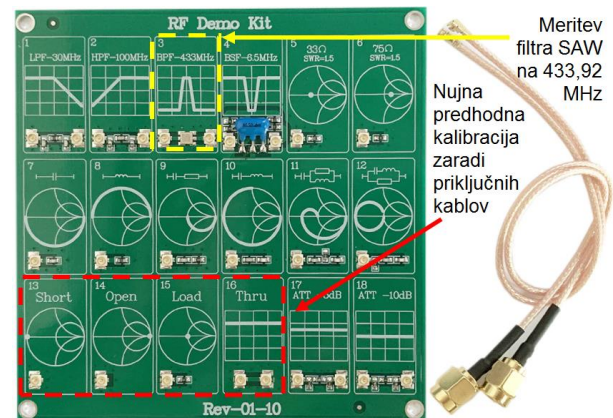
## 2.2 Kalibracija NanoVNA

Merilni inštrument lahko deluje dobro le v okviru svojih pogreškov. Pri pokrivanju širokih področij od kHz do nekaj GHz je lahko vpliv posameznih kapacitivnosti in induktivnosti linij, različnih slabljenj in nivojev šuma zelo izrazit. Zato je potrebno izvesti kalibracijo, kjer se opredelijo odstopanja od znanih pričakovanih izidov meritve (npr. pri odprtih sponkah, znanem bremenu in znanih dolžinah linij).

V primeru NanoVNA V2 se izvede splošna kalibracija za oba generatorja frekvence prek celotnega merilnega območja. Ker v procesu kalibracijskih meritev zbere 101 točko na območju do 3 GHz, so točke med seboj oddaljene cca. 30 MHz. Ker nas v telekomunikacijah tipično zanimajo ozka frekvenčna področja, se za vmesne korake meritev interno uporablja interpolacija kalibracijskih točk, kar vnaša dodatne napake. Tako je za meritve na ožjih področjih, npr. na radioamaterskem 144-146 MHz, priporočljivo zmanjšati kalibracijski obseg na območje 140-150 MHz s korakom 100 kHz. NanoVNA ima na voljo pomnilnik za 5 različnih kalibracij, zato se pred menjavo opazovanega področja le-ta lahko hitro naloži iz shrambe.

Prva kalibracija poteka po znanem postopku [1]: po navodilih iz menija se najprej izbere ustrezen frekvenčni obseg, nato pa na PORT 1 priključi po vrsti priložene adapterje SMA: odprte sponke (zaprt konektor brez stika), kratak stik (zaprt konektor s kratkim stikom) in breme (konektor z vgrajenim 50-ohm uporom). Za kalibracijo meritev  $S_{21}$  se oba priključka povežeta še s priloženimi kabli v znano skozno povezavo. Na koncu se lahko kalibracije zapišejo še v eno od mest v shrambi, a pri ponovnem zagonu naprave se bo avtomatsko naložila le tista, ki se nahaja na 1. mestu (lokacija 0). Kadar delamo z aplikacijo NanoVNA Saver, lahko kalibracijo izvedemo tudi s tam pripravljenim asistentom.

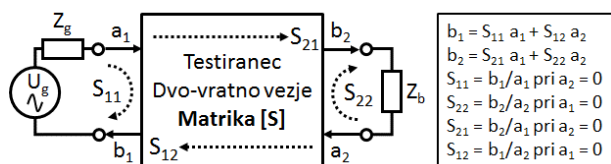
Dober pripomoček za spoznavanje NanoVNA odzivov v Smithovem diagramu so testne RF-plošče s številnimi pripravljenimi konfiguracijami in natisnjenim pričakovanim odzivom na tiskanini. V 5. poglavju je s tako ploščo na sliki 3 izvedena primerjava meritev filtra SAW med NanoVNA in profesionalnim VNA.



Slika 3: Testna plošča za preizkušanje odzivov različnih oblik eno- in dvo-vratnih vezij

### 3 Parametri S

Izmerjene visokofrekvenčne odboje in odzive vezja najpogosteje podajamo s parametri sipanja S (angl. scattering), kjer ob impedančno prilagojenem izhodu ( $Z_b = Z_g$ ) oznaka  $S_{11}$  podaja vhodno odbojnost,  $S_{22}$  izhodno odbojnost,  $S_{21}$  ojačenje v napredujoči smeri in  $S_{12}$  ojačenje v povratni smeri [2].



Slika 4: Definicija parametrov S v dvo-vratnem vezju

Pomen vhodnih in izhodnih parametrov a in b je sledeč:  $a_1$  predstavlja vhodni val v testiranca, npr. vhodno moč signala, ki vstopa v četveropolno (dvo-vratno) vezje na sliki 4. Če vezje ni impedančno prilagojeno, se del vhodne moči vrne nazaj na vhod  $b_1$ . Ker je  $S_{11} = b_1/a_1$  (brez vira moči  $a_2$  na desni), se v primeru odprtih sponk v vezju vsa moč odbije,  $a_1 = b_1$  in  $S_{11} = 0$  dB. Več kot se moči prenese na izhod vezja  $b_2$ , manjši je  $b_1$  in  $S_{11}$  je vedno bolj negativen. Pri popolnoma prilagojenem vezju  $b_1$  znaša 0, logaritemska vrednost  $S_{11}$  pa praktično neskončno negativno vrednost (v teoriji). Parameter  $S_{21}$  podaja prenosno funkcijo vezja oz. ojačenje, pri dvo-vratnem vezju je dobrodošlo za opazovanje odziva npr. pasovnega sita z vstavitvenim slabljenjem. Kadar je  $S_{21} = 0$ , se v teoriji vsa moč iz vhoda brez izgub prenese na izhod, v kolikor v vezju obstaja ojačevalnik, pa so vrednosti  $S_{21} > 0$  dB. Parametra  $S_{22}$  in  $S_{12}$  sta po razlagi enaka  $S_{11}$  in  $S_{21}$ , če levo stran vezja zamenjamo z desno.

Čeprav večkrat srečamo različne sorodne parametre, npr. H, Y in Z, ti niso neposredno primerni za meritve z VNA, saj vključujejo opazovanja pri odprtih sponkah in kratkem stiku, kar lahko škoduje testirancu, sama poteka napetosti in toka na bremenu pa je težko opazovati. Kompleksni parametri S tako uporabljajo meritve potujočih valov, s katerimi se lahko opiše faktorje odbojnosti, ojačenja/slabljenja ali faze signala, možne pa so tudi kaskadne vezave z enostavnim množenjem. Zato so parametri S zelo primerni za uporabo v visokofrekvenčni tehniki in pri meritvi z VNA zasedajo glavno vlogo.

#### 3.1 Meritve eno- in več-vratnih vezij

Topologijo vsakega vezja ali testirane naprave lahko umestimo v razred glede na število vhodnih in izhodnih vrat. V primeru analizatorja NanoVNA sta na voljo le dva visokofrekvenčna priključka, prikazana na sliki 1, označena z vrati PORT 1 in PORT 2. PORT 1 je označen tudi kot oddajnik (TX, angl. transmitter) valovanja  $a_1$  in PORT 2 sprejemnik (RX, angl. receiver) valovanja  $b_2$  po sliki 4. Dejansko NanoVNA na PORTu 1 tudi sprejema odbojni parameter  $b_1$ , zato se na teh vratih odvije celotna meritve  $S_{11}$ . Primer take eno-vratne meritve je priključitev radijske antene na PORT 1, drugi priključek pa pri meritvi ni uporabljen.

Dvo-vratne naprave oz. četveropoli uporabljajo oba priključka. PORT 1 tu služi za generiranje sledilne frekvence in meritev odboja  $b_1$ , PORT 2 pa kot meritev izhoda iz četveropola  $b_2$ . Primer take dvo-vratne naprave je pasovno prepustno sito, ki oddaljene frekvence zaduši.

Več-vratne naprave je možno opazovati v celoti le s profesionalnimi VNA, saj vsaka vrata zahtevajo tudi svoj priključek. Vseeno je z NanoVNA možno izmeriti več-vratne naprave s premišljenim sekvenčnim pristopom in zaključevanjem preostalih vrat z  $Z_b$  (50 ohm). Primer tro-vratne naprave je delilnik moči, ki omogoča priklop ene sprejemne antene GNSS na več sprejemnikov. Povzetek primerov eno-, dvo- ali več-vratnih vezij je strnjen v naslednji tabeli [3].

Tabela 1: Povzetek primerov n-vratnih vezij

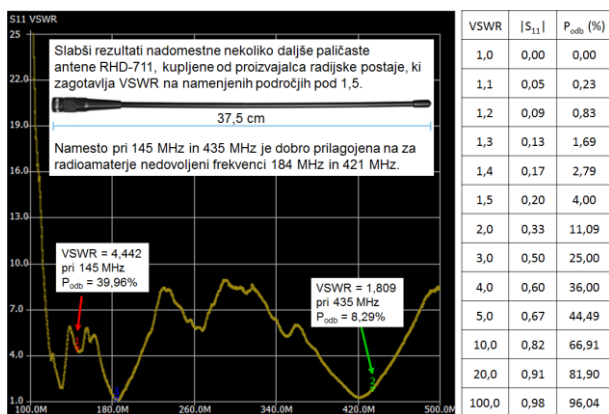
Št. vrat	Vezja in naprave
1	Elementarni elementi (R, L in C, napetostni in tokovni viri), kompleksne impedance (RC, LC, RL in RLC), antene
2	Filtri, prilagodilniki, ojačevalniki, komunikacijska vodila, kabli, transformatorji, modeli tranzistorjev
$\geq 3$	Smerni sklopniki, delilniki moči, duplexerji, cirkulatorji, kombinacije vezij

### 4 Meritev prilagojenosti oddajne linije

Na področju brezžičnih telekomunikacij, npr. pri postavitvah dostopovnih točk WiFi, koncentradorjev LoRa, povezavah na nelicenčnih pasovih ISM (angl. Industrial, Scientific and Medical), v radioamaterstvu in radiodifuziji, nas pri oddaji zanima, kako dobro je oddajna antena frekvenčno in impedančno prilagojena na sam oddajnik. Že sam parameter  $S_{11} = b_1/a_1$  podaja razmerje med vpadnim in odbitim valom, a v praksi se zaradi zgodovinskih načinov meritve uporablja parameter SWR (angl. Standing-Wave Ratio). Definicija SWR velja za razmerje stojnih valov, ki nastanejo kot posledica seštevanja vpadnega in odbitega vala po brezizgubnem mediju [4] in se navaja tudi kot valovitost  $\rho = U_{MAX} / U_{MIN}$  amplitud napetosti. V programski opremi NanoVNA se SWR zato označuje kot VSWR (angl. Voltage SWR). Valovitost  $\rho$  lahko izračunamo neposredno iz velikosti odbojnosti  $|S_{11}|$  oz.  $S_{11}$ , kjer velja

$$VSWR = \rho = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (1)$$

Pri polni prilagojenosti, kjer je  $S_{11}$  enak 0, znaša VSWR idealno enoto 1 in se lahko zapiše z razmerjem 1:1 (VSWR:1). Pri 50% odboju tako znaša 3:1, gre pa vse proti neskončnosti, kjer se na poti do antene odbije vsa moč (npr. prekinjen spoj na liniji). VSWR je pri večjih izhodnih močeh lahko razlog težav z odpovedjo delovanja opreme, saj se del moči vrne neposredno v izhodno stopnjo oddajnika in se tam pretvori v toploto, ki lahko vodi do termičnega uničenja izhodnega tranzistorja. Prikaz frekvenčnega poteka valovitosti VSWR dodatne daljše dvo-področne antene za ročno postajo DMR z NanoVNA V2 se nahaja na sliki 5. Podan je tudi odstotek moči  $P_{odtb}$ , ki se ob določenem VSWR odbije nazaj v izhodno stopnjo oddajnika.



Slika 5: Meritev nadomestne antene s prikazom tabele odvisnosti odbite moči ( $P_{odb}$ ) glede na VSWR

Meritev anten ni enostavno opravilo, saj je rezultat močno odvisen od merilne postavitve in njene neposredne okolice. Pri paličastih antenah ročnih radijskih postaj je vedno sklenjen nek kompromis med praktično uporabnostjo naprave z anteno (krajša dolžina), njeno učinkovitostjo (dolžina  $> \lambda/4$ ), resonančno frekvenco z nizkim VSWR in tudi z všečnim izgledom [5]. O resonančni frekvenci lahko govorimo, kadar induktivna impedanca vijačne vzmeti v anteni in kapacitivna impedanca med anteno in ohišjem postaje ter roko uporabnika natančno sovpadajo v zaporednem nihajnem krogu. Ker je bila pri enostavni meritvi z NanoVNA antena privijačena neposredno na priključek SMA merilnega instrumenta, kapaciteta med anteno in roko tu ni bila upoštevana. Za več informacij je priporočena literatura [5] z električnim načrtom radijske postaje v roki uporabnika ter opisanimi načini za doseganje prilagojenosti krajših, manj učinkovitih anten.

## 5 Primerjava zmogljivosti

Pri rokovanju s cenejšimi napravami se večkrat pojavi vprašanje o kvaliteti izvedenih meritev, zato je v nadaljevanju podana primerjava meritve prepustnosti filtra SAW (angl. Surface Acoustic Wave) [6] z VNA Rohde & Schwarz ZVA67 v Laboratoriju za sevanje in optiko (LSO) na UL FE.

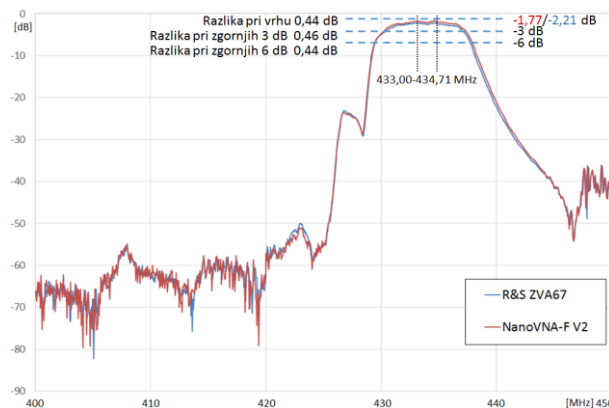
Pred samo meritvijo sta bila oba merilnika ustrezno kalibrirana na frekvenčnem področju 400 - 450 MHz, določen je bil tudi korak zajema vsakih približno 50 kHz. Meritve  $S_{21}$  so bile shranjene v t.i. Touchstone formatu S2P [7] z glavo, ki označuje način zapisa vsebine. Na sliki 6 je prikaz le izsek <frekvenca>  $\text{Re}\{S_{21}\}$   $\text{Im}\{S_{21}\}$ .

```
# HZ S RI R 50
400000000 -0.00047563511995773366 7.798992639000219e-05
400049554 -0.00041802094696995624 3.215617295445731e-05
400099108 -0.0003630658994229455 -6.767852460724223e-05
400148662 -0.0005247974879612754 -0.0001497613307970103
400198216 -0.0006394256919990329 -1.1224009116814145e-05
```

Slika 6: Prikaz zapisa parametra  $S_{21}$  v datoteki S2P

Iz absolutne vrednosti  $S_{21}$  je izračunana prenosna funkcija ojačenja med vhomom in izhodom (2), ki je brez dodatnega vzbujanja filtra seveda negativno.

$$G_{21} = 20 \cdot \log_{10}(|S_{21}|) \quad (2)$$



Slika 7: Primerjava meritve prepustnega filtra SAW na 433,92 MHz z R&S ZVA67 in NanoVNA-F V2

Iz grafične primerjave obeh meritev na sliki 7 lahko vidimo dobro sovpadanje z manjšimi razlikami. Vstavitev napetostno slabljenje se v okolici vrha pri 433,92 MHz razlikuje za 0,44 dB, z višjimi meritvami za NanoVNA. Tudi povprečje meritev v zgornjih 6 dB na pasovni širini okoli 8,5 MHz znaša 0,44 dB oz. 5,2% v linearnem merilu več za NanoVNA, kar pa verjetno večini uporabnikov povsem zadošča.

## 6 Sklep

NanoVNA-F V2 je cenovno dostopna merilna naprava, ki zadošča množici razvijalcev in uporabnikov radijskih naprav za meritev parametrov S in pripadajočih izpeljanih veličin. Primerjava zmogljivosti na primeru filtra pokaže dobro sovpadanje s profesionalnim merilnikom.

## Literatura

- [1] Sysjoint, NanoVNA-F V2 - User guide, <http://www.sysjoint.com>
- [2] M. Vidmar, Vektorski analizator vezij, navodila, [http://antena.fe.uni-lj.si/studij/eld/navodila/vektorski\\_analizator\\_vezji/opis\\_vektorski\\_analizator\\_vezji.pdf](http://antena.fe.uni-lj.si/studij/eld/navodila/vektorski_analizator_vezji/opis_vektorski_analizator_vezji.pdf)
- [3] B. Fontana, The NanoVNA - A brief introduction, <http://robertfontana.com/AK3Y/resources/NanoVNA.pdf>
- [4] M. Vidmar, Elektrodinamika, učbenik, 2020, <http://antena.fe.uni-lj.si/studij/eld/>
- [5] M. Vidmar, Gumirepek in sevalna učinkovitost paličastih anten, PHARE 2000, <http://lea.hamradio.si/~s53m/phare/gumirepek.pdf>
- [6] Podatkovni list SAW Filter B3710, <https://www.farnell.com/datasheets/1899118.pdf>
- [7] Touchstone File Format Specification v2.0, [http://www.ibis.org/touchstone\\_ver2.0/touchstone\\_ver2\\_0.pdf](http://www.ibis.org/touchstone_ver2.0/touchstone_ver2_0.pdf)

## Zahvala

Avtor se zahvaljuje kolegom v Laboratoriju za sevanje in optiko UL FE za pomoč pri izvedenih meritvah na profesionalni opremi ter številne nasvete glede literature.