

Lock-in sprejemnik z virom do 12GHz

Matjaž Vidmar, S53MV

1. Visokofrekvenčni merilni sprejemniki

Za meritve anten potrebujemo visokofrekvenčni detektor, ki je zadosti občutljiv in predvsem natančen. Visokofrekvenčni merilni izvori običajno zmorejo izhodno moč do $P_{TX} \leq 10\text{mW} = +10\text{dBm}$. Slabljenje merilne zveze med oddajno in sprejemno anteno znaša običajno okoli $a \approx 20\text{dB} \dots 30\text{dB}$. Pri nižjem slabljenju kmalu kršimo Fraunhofer-jev pogoj za daljne polje $r > 2d^2/\lambda$. Pri višjem slabljenju je zelo težko izločiti vpliv odbitih valov. Pri razponu meritve 40dB mora merilni sprejemnik delovati vsaj v območju $P_{RX} = -60\text{dBm} \dots -20\text{dBm}$.

Pri integraciji smernega diagrama za računanje smernosti absolutna natančnost merilnega sprejemnika ni pomembna, pač pa moramo natančno meriti relativna razmerja moči s točnostjo $\Delta P_{RX} \approx \pm 0.1\text{dB}$. Radioamaterski komunikacijski sprejemniki so sicer izredno občutljivi in zmorejo širok razpon jakosti vhodnih signalov, ampak njihov S-meter je umerjen kvečjemu do ene S stopnje natančno, torej $\Delta P_{RX} \approx \pm 6\text{dB}$. Vrhunski profesionalni spektralni analizator ob širokem razponu frekvenc in jakosti vhodnih signalov zmore relativno natančnost jakosti kvečjemu $\Delta P_{RX} \approx \pm 0.5\text{dB}$. Zahtevano točnost omogoča kvečjemu skalarni ali vektorski analizator vezij, ki zaradi svoje cene ni kdovekako razširjen merilnik.

Meritve anten torej potrebujejo nekoliko drugačen sprejemnik, ki ga lahko izdelamo sami za amatersko antensko merilnico. Na prvi pogled izgledajo obetavni čipi za logaritemske detektorje. Danes jih lahko kupimo za frekvence preko $f > 10\text{GHz}$ z razponom merjenja moči preko 60dB in primerno občutljivostjo. Natančnost merjenja moči žal dosega kvečjemu $\Delta P_{RX} \approx \pm 1\text{dB}$. Povrhu je odziv takšnih čipov močno odvisen od frekvence: skalo moči merilnega sprejemnika bi morali umeriti za vsako frekvenco posebej. Čipi za logaritemski detektor torej niso primerni niti za šolski zgled za študente, kaj šele za resno meritev anten.

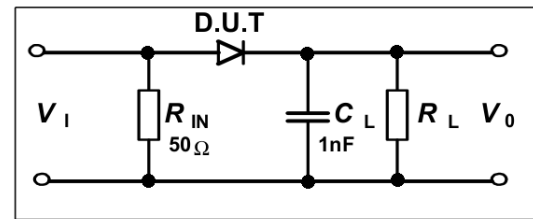
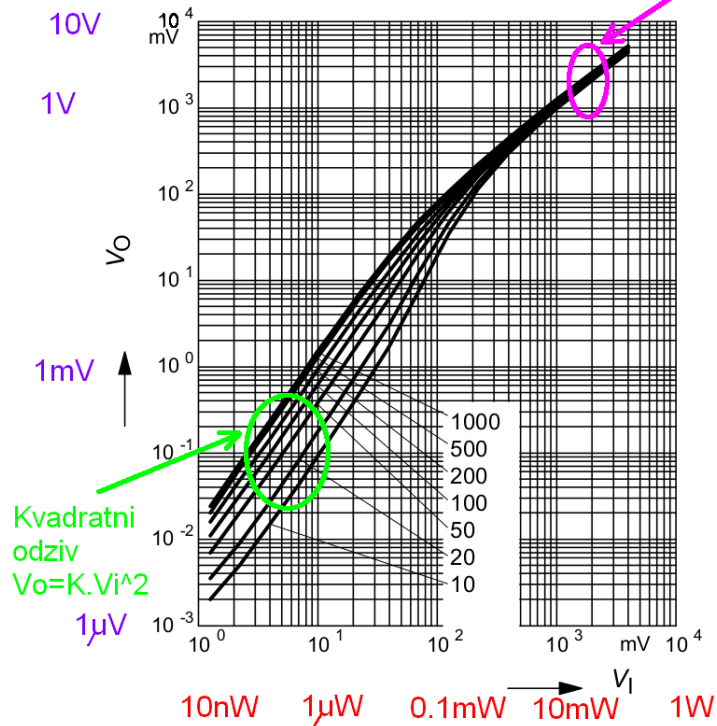
Visokofrekvenčni oziroma mikrovalovni detektor potrebuje hitro diodo. Polprevodniške diode s PN spojem upočasnjuje rekombinacija manjšinskih nosilcev. Visokofrekvenčne detektorje zato gradimo z diodami, katerih delovanje ne upočasnjujejo manjšinski nosilci: "back" dioda (posebna zvrst tunelske diode) oziroma Schottky dioda. Primer sodobne cenene merilne diode je BAT62. Visoko občutljivost detektorja zagotavlja nizek prag (low-barrier) Schottky spoja, visoko prebojno napetost pa dodatna difuzija PN spoja (guard ring) okoli Schottky spoja.

Lastnosti detektorja z diodo BAT62 lepo opisuje proizvajalec Infineon (Siemens) z diagramom v podatkovnem listu:

Testcircuit

 $f = 900\text{MHz}$ $R_L = \text{Parameter in k}\Omega$

Linearni odziv $V_o = A \cdot V_i$



Odziv detektorja z diodo BAT62 Schottky low-barrier & guard ring

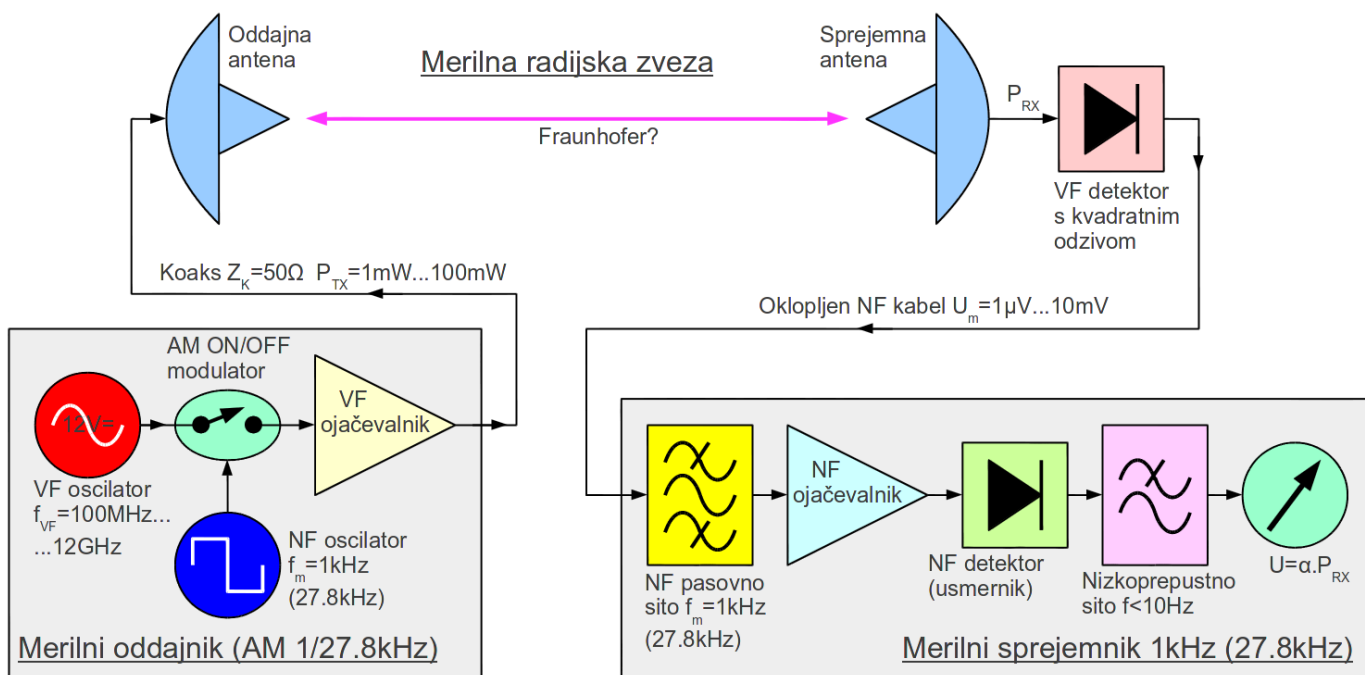
Odziv diode BAT62 je kvadraten pri majhnih močeh vhodnih signalov pod $P_{RX} < 10 \mu W = -20 \text{ dBm}$ in linearen pri visokih močeh vhodnih signalov $P_{RX} > 1 \text{ mW} = 0 \text{ dBm}$. Back oziroma tunnelske diode dopuščajo zelo nizko zaporno napetost in jih lahko uporabljamo samo v področju kvadratnega odziva. Preprosti detektorji s Schottky diodami pogosto uporabljajo samo linearni odziv.

Praktično uporabnost detektorja omejuje tudi elektronika, ki obdela usmerjeno izhodno napetost V_O . V praksi je silno težko meriti enosmerne napetosti pod $V_O < 1\text{mV}$ zaradi termoelektričnega pojava, odstopanj detektorja in ojačevalnika ter drugih motenj. Integrirano vezje ADL6010 (proizvajalec Analog Devices) vsebuje sicer odličen Schottky detektor vse do $f \leq 43\text{GHz}$, ampak meritev enosmerne izhodne napetosti omejuje njegovo občutljivost na $P_{RX} > 1\text{ }\mu\text{W} = -30\text{dBm}$.

Nizke izmenične napetosti je dosti lažje meriti od nizkih enosmernih napetosti. Pri uporabi diod in drugih detektorjev s kvadratnim odzivom amplitudno moduliramo oddajnik s signalom nizke frekvence $f_m \approx 1\text{kHz}$. Modulacija je lahko preprosta ON/OFF (vklop/izklop oddajnika). Toplotni detektorji (bolometer, NTK upor) imajo vedno natančen kvadratni odziv, a njihova toplotna vztrajnost omejuje frekvenco modulacije pod $f_m \leq 1\text{kHz}$. Diodni detektorji so bolj občutljivi, a manj natančni. Pri modulacijski frekvenci $f_m \approx 27.8\text{kHz}$ skalarni analizator vezij z diodnimi detektorji omogoča celo živo sliko odziva.

Prednost nizkofrekvenčne modulacije je tudi v temu, da na merjeno anteno namestimo razmeroma majhen visokofrekvenčni diodni detektor. Nizkofrekvenčni signal detektorja peljemo po tankem in dolgem nizkofrekvenčnem kablu do

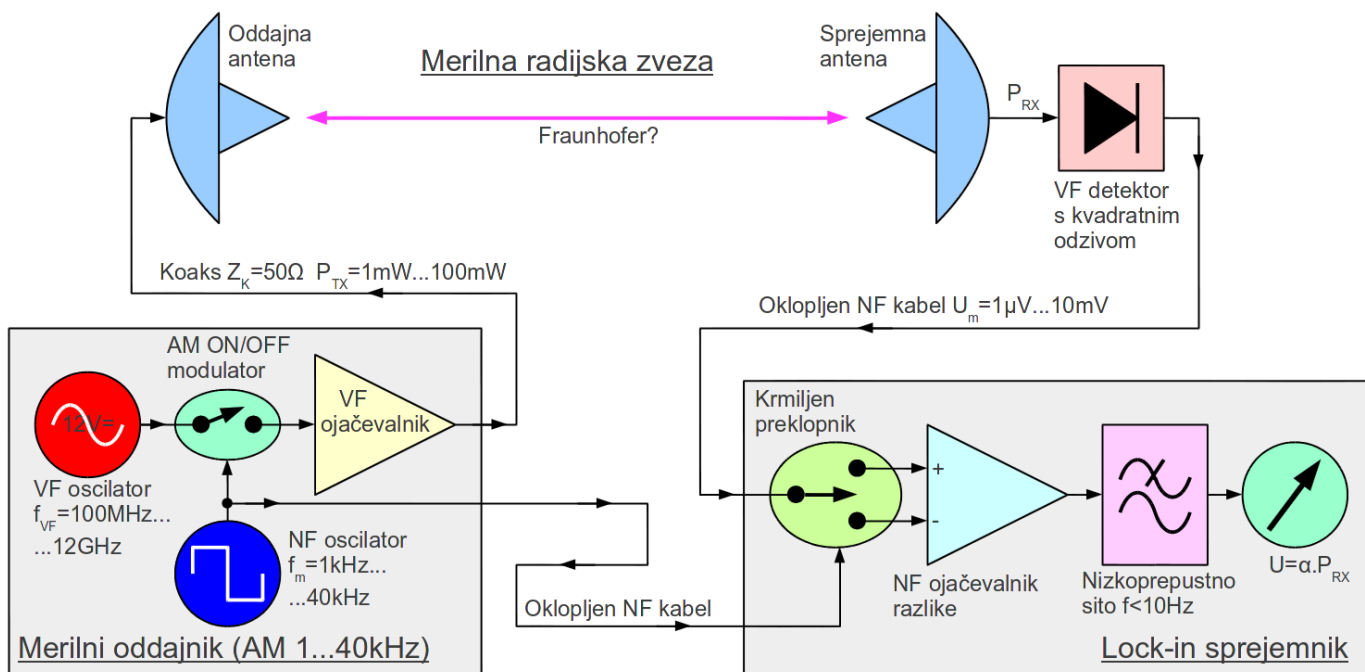
merilnega sprejemnika. Merilni sprejemnik vsebuje pasovno sito za modulacijsko frekvenco, nizkofrekvenčni ojačevalnik in nizkofrekvenčni usmernik:



Dodatna prednost nizkofrekvenčne modulacije je izogibanje radijskim motnjam. Visokofrekvenčni diodni detektor je sicer občutljiv na vse radijske signale, a z nizkofrekvenčnim pasovnim sitom izluščimo le modulacijo našega merilnega oddajnika. Z uporabo detektorja s kvadratnim odzivom in skrbno izbiro modulacijske frekvence se lahko popolnoma izognemo motilcem.

Izboljšana različica nizkofrekvenčnega merilnega sprejemnika je lock-in sprejemnik, pogosto imenovan tudi lock-in ojačevalnik oziroma sprejemnik s sinhronim demodulatorjem. Namesto nizkofrekvenčnega pasovnega sita vsebuje lock-in sprejemnik vezje, ki meri razliko jakosti sprejetega signala pri vključenem oziroma izključenem oddajniku. Čeprav ima glavno zaslugo za razvoj lock-in sprejemnikov elektrotehnik Robert H. Dicke po koncu druge svetovne vojne, danes lock-in ojačevalnike uporabljajo predvsem fiziki za merjenje najrazličnejših veličin pri zelo zahtevnih fizikalnih poskusih. Med elektrotehniki so danes lock-in sprejemniki manj znani.

Nerodnost lock-in sprejemnika je zahteva po dodatnem nizkofrekvenčnem kablu, ki pripelje modulacijski signal neposredno iz oddajnika v sprejemnik. Dobra lastnost lock-in sprejemnika je v temu, da je popolnoma gluh za katerikoli signal oziroma šum, ki ni natančno sinhroniziran z modulacijo oddajnika. Selektivnost lock-in sprejemnika določa preprosto nizkoprepustno sito za ojačevalnikom razlike: Slednje je načeloma lahko poljubno ozko, ampak z ožanjem nizkoprepustnega sita se sorazmerno podaljšuje čas meritve.



Dodatno se motnjam izognemo tako, da skrbno izberemo frekvenco modulacije oddajnika. Pri spremembi modulacije oddajnika ni treba v lock-in sprejemniku nastavljati ničesar, saj je zakasnitev radijske poti preko merjenih anten zanemarljivo majhna v primerjavi s periodo modulacijske frekvence. V drugačnih fizikalnih poskusih z velikimi zakasnitvami moramo kvečjemu nastaviti fazo referenčnega signala modulacije.

V tem članku sta opisana visokofrekvenčni detektor za merjenje anten v frekvenčnem pasu $f \approx 100\text{MHz} \dots 12\text{GHz}$ in pripadajoči nizkofrekvenčni lock-in sprejemnik. Za meritev anten potrebujemo še primeren vrtljak, opisan v članku o amaterski antenski merilnici ter primeren moduliran visokofrekvenčni izvor. Primeren visokofrekvenčni vir je opisan v članku o ulomkovni zanki za frekvence do $f < 4.4\text{GHz}$ (čip ADF4351) oziroma $f < 6\text{GHz}$ (čip MAX2871). Dodatno je v tem članku opisana še različica vira za frekvenčni pas $f = 8\text{GHz} \dots 12\text{GHz}$, ki izkorišča podvojevanje frekvence v čipu MAX2871.

Prednost novega lock-in sprejemnika pred širokopasovnim sprejemnikom iz članka o amaterski antenski merilnici je v širšem frekvenčnem pasu, izboljšani občutljivosti, večjem razponu jakosti vhodnih signalov in bistveno boljši odpornosti na motnje. Povrhu lock-in sprejemnik omogoča vgradnjo sprejemne diode neposredno na merjeno anteno na vrtljaku ter njeno povezavo preko tankega in gibkega nizkofrekvenčnega kabla do nizkofrekvenčnega lock-in sprejemnika. Končno, s smotno izbiro različnih modulacijskih frekvenc lahko v isti učilnici postavim več neodvisnih poskusov za študente, ki lahko istočasno delujejo v istem visokofrekvenčnem pasu brez medsebojnih motenj.

2. Visokofrekvenčni detektor in lock-in ojačevalnik

Kaj izbrati kot visokofrekvenčni detektor? Glede na pričakovani razpon moči sprejetega signala $P_{RX} = -60\text{dBm} \dots -20\text{dBm}$ je smiselna uporaba kvadratnega

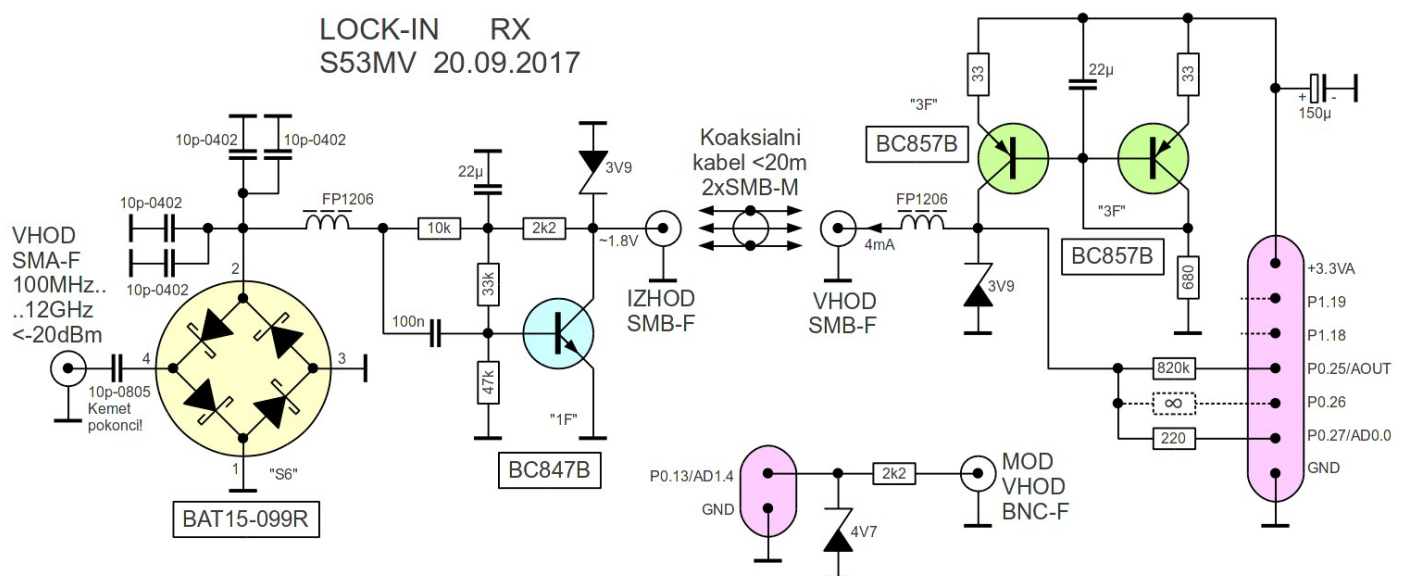
odziva Schottky diode. V tem primeru dodatni visokofrekvenčni ojačevalniki niso potrebni. V samo ohišje detektorja je poleg diode seveda smiselno vgraditi nizkofrekvenčni ojačevalnik za izhodni signal modulacije.

Gornjo frekvenčno mejo detektorja določa kapacitivnost spoja uporabljene diode. Guard-ring diode dosegajo višjo prebojno napetost na račun višje kapacitivnosti spoja. Višja prebojna napetost $U_Z \approx 40V$ pri uporabi kvadratnega odziva ni potrebna, torej povsem zadoščajo običajne Schottky diode za mešalnike s prebojno napetostjo samo $U_Z \approx 3V$ ampak nižjo kapacitivnostjo.

Schottky diode za mešalnike v plastičnih SMD ohišjih dosegajo kapacitivnost spoja $C_0 \approx 0.3pF$, kar omogoča dokaj raven frekvenčni odziv detektorja do $f < 15GHz$. Beam-lead diode (goli čipi z zlatimi trakci) dosegajo desetkrat nižjo kapacitivnost spoja $C_0 \approx 0.03pF$ za ceno res zahtevnega spajkanja pod mikroskopom.

Pri uporabi kvadratnega odziva in nizkofrekvenčne modulacije je smiselno krmiliti detektorsko diodo s skrbno izbranim enosmernim predtokom (detector bias). V takšnem vezju višina pragu diode ni več pomembna. Low-barrier, medium-barrier oziroma high-barrier Schottky diode se obnašajo podobno. Z enosmernim predtokom lahko natančno nastavimo visokofrekvenčno impedanco diode, da bo občutljivost detektorja najvišja.

Po nekaj poskusih sem se odločil za detektor z dvema Schottky diodama v podvojevalni vezavi. Slednja omogoča višjo občutljivost, predvsem pa tvori manj harmonikov sodih redov, ki bi kazili točnost odziva detektorja. Slaba stran podvojevalne vezave je nekoliko nižja gornja frekvenčna meja okoli $f < 12GHz$. V detektorju sem uporabil SMD četrček BAT15-099R, kjer je tretja Schottky dioda uporabljena za zaščito dveh detektorskih diod in le četrta dioda ni uporabljena:



ahteve za visokofrekvenčne vire so lahko zelo različne. Za meritev občutljivih sprejemnikov potrebujemo vir, ki je zelo dobro oklopljen, da natančno poznamo

2. Visokofrekvenčni vir

Zahteve za visokofrekvenčne vire so lahko zelo različne. Za meritev občutljivih sprejemnikov potrebujemo vir, ki je zelo dobro oklopljen, da natančno poznamo

3. Mikrokrmilnik

Vsi uporabljeni čipi, ADF4351, MAX2871 in HMC273 so namenjeni upravljanju z mikrokrmilnikom. Za pravilno delovanje ADF4351 oziroma MAX2871 je treba

4. Gradnja vira

Gradniki visokofrekvenčnega vira so vgrajeni na dvostransko tiskano vezje iz vitroplasta debeline 0.6mm. Tiskano vezje ima izmere 100mm X 26mm. Spodnja

5. Lastnosti vira

Ulomkovna zanka je še vedno novost, torej uganka, kako se bo takšen vir

obnašal v praksi. Koliko bo širokopasovnega faznega šuma in koliko bo neželenih

6. Uporaba vira

Vgrajena programska oprema (firmware) mikrokrmilnika poleg krmiljenja PLL čipa in slabilca izpisuje pripadajoče nastavitve in stanje visokofrekvenčnega vira na

Vse nastavitve visokofrekvenčnega vira lahko opravimo tudi preko virtualnega USB/COM vmesnika z nastavitvami 9600bps, no parity, 1 stop bit. Vsak daljinski ukaz vsebuje črko in eno ali več števil. Jakost uporablja tudi predznak.

A xxx <enter>	... nastavi jakost signala [+/-dBm]
F xxxxxxxx <enter>	... nastavi frekvenco [kHz]
M xxxxxx <enter>	... nastavi frekvenco modulacije [Hz]
P 123456789 <enter>	... vpiši vse nastavitve v FLASH
R <enter>	... resetiraj izvor
S x <enter>	... izberi spomin [0..9]

Vsak ukaz se zaključi s pritiskom tipke <enter>, kar je lahko <CR>, <LF> ali drug kontrolni znak. Programska oprema razume tudi popraviljanje vnosa z znaki <BS> ali .

```
VF izvor MAX2871
S53MV 08.05.2017
0 * 2360.000MHz -10dBm 8000Hz
0 2360.000MHz -10dBm 8000Hz
0 2360.000MHz -10dBm 8000Hz
```

Izvirnik  [fpII.odt](#)

Tiskanje  [fpII.pdf](#)

Tiskana vezja, podatkovni listi in programska oprema  [fpII.zip](#)

* * * * *