

# Lecher-jev vod

Matjaž Vidmar, S53MV

## 1. Uvod

Izdelava radijskih postaj in ostale radioamaterske opreme zahteva tudi uglaševanje in umerjanje ter pogosto tudi iskanje napak, za kar potrebujemo določeno merilno opremo. Pri merilni opremi je treba seveda paziti na razmerje med uporabnostjo na eni strani in ceno ter kompliciranostjo na drugi strani: marsikateri merilni inštrument, še posebno za visoke frekvence, je za nas radioamaterje nedostopen zaradi visoke cene ali kompliciranega načina uporabe, do istih merilnih rezultatov pa lahko pridemo tudi po enostavnejši poti.

Ena najpomembnejših visokofrekvenčnih meritev je merjenje frekvence. Frekvenco lahko merimo na aktivnem merjencu, ki sam oddaja visokofrekvenčne signale, na primer na oddajniku, oziroma iščemo rezonanco pasivnega vezja: nihajnega kroga, rezonatorja ali kremenčevega kristala.

Radioamaterji običajno merimo frekvenco aktivnega vezja s tremi različnimi merilnimi inštrumenti: z grid-dip metrom, z digitalnim frekvencometrom ali pa s spektralnim analizatorjem. Grid-dip meter je najstarejši merilnik in ni kdovekako točen (okoli 2%), zato pa lahko z enim samim enostavnim merilnikom opravimo več različnih meritev in celo poiščemo harmonike in druge nezaželjene frekvence. Zato je grid-dip meter osnovni radioamaterski merilni inštrument.

Digitalni frekvencometer je dosti bolj točen od grid-dip metra, žal pa ne zna razlikovati med harmoniki in drugimi nezaželenimi signali in je zato pri uporabi potrebna določena previdnost oziroma si je treba pomagati z grid-dip metrom! Spektralni analizator je najbolj popoln in tudi najdražji merilnik, ki zmore poiskati tudi zelo šibke nezaželjene signale, žal pa njegova točnost zaostaja za digitalnim frekvencometrom in za dokončno iskanje in odpravljanje napake še vedno ne moremo brez enostavnega grid-dip metra...

Žal se grid-dip meter ne da izdelati za zelo visoke frekvence. Omejitev za običajne konstrukcije grid-dip metrov je nekje okoli 300MHz, večina teh merilnikov pa komaj doseže 200MHz. Z moderno polprevodniško tehnologijo bi se sicer dalo pomakniti to mejo na vsaj 1GHz in mogoče še kaj več, če bi za vsako področje izdelali svojo merilno glavo s svojim oscilatorjem. V radioamaterski literaturi je sicer bilo opisanih več različnih merilnikov, podobnih grid-dip metru, za frekvence nad 300MHz, vendar se nobena od teh naprav ni obnesla zaradi komplicirane izdelave, ozkega frekvenčnega področja ali premajhne točnosti meritve.

Pravo nadomestilo za grid-dip meter za frekvence nad 300MHz je nekoliko drugačen merilnik, ki ga imenujemo Lecher-jev vod. Lecher-jev vod pokriva zelo široko frekvenčno področje in je celo enostavnejši za izdelavo od grid-dip metra, hkrati pa ta naprava ne potrebuje umerjanja!

Žal je ta preprost, a točen merilnik po krivici utonil v pozabo, iz ne ravno

prepričljivih razlogov. Pri profesionalcih se je izgleda ukoreninilo načelo, da veljaš toliko, kolikor stane tvoja merilna oprema. Od "radioamaterjev", ki so si vse svoje tehnično znanje, za vse večne čase, pridobili v enem samem tednu pred radio-operaterskim izpitom, pa si tudi ne moremo kaj dosti pričakovati.

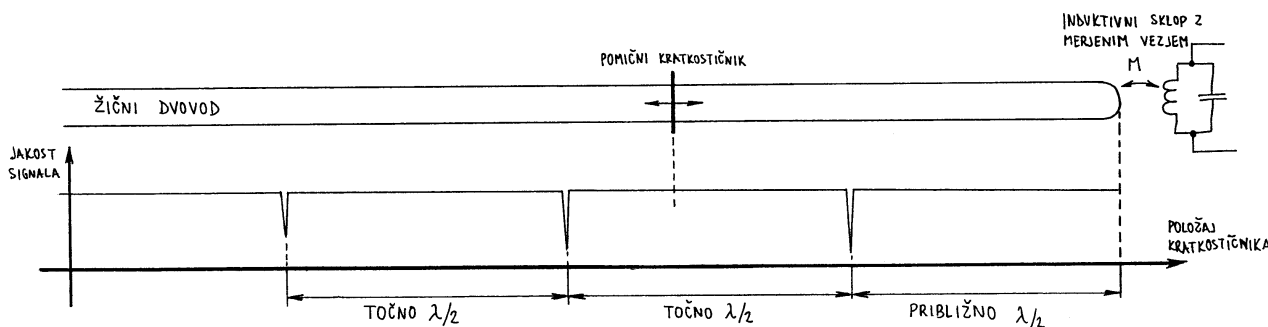
V tem članku bom zato skušal popraviti to nezaslišano krivico in opisati, kako deluje Lecher-jev vod, kako si ga lahko sami doma izdelamo in kaj vse lahko z njim merimo.

## 2. Osnove delovanja Lecher-jevega voda

Pod imenom "Lecher-jev vod" sicer poznajo radioamaterji več različnih naprav. Običajno se to ime uporablja za simetričen dvovod, sestavljen iz dveh vzporednih vodnikov okroglega prereza ter zrakom oziroma praznim prostorom med vodnikoma kot dielektrikom. Takšen dvovod lahko uporabljamo kot prenosni vod med radijsko postajo in anteno, oziroma kot rezonator tako, da izkoriščamo različne pojave stojnega valovanja na dvovodu.

Lecherjev vod uporabljamo kot merilnik frekvence tako, da na njemu izkoriščamo rezonančne pojave zaradi stojnega valovanja. Pri tem je meritev frekvence tem bolj točna, čim višji je Q-faktor (kvaliteta) rezonatorja. Visok Q dobimo tako, da rezonančni vod ni obremenjen, pač pa je na obeh koncih zaključen s čistim kratkim stikom. Mehanski ekvivalent za kratko sklenjen vod je togo vpeta struna: če zanemarimo trenje z zrakom, bo struna nihala tem dlje, čim bolj togo je vpeta.

Osnovna meritev z Lecherjevim vodom je prikazana na sliki 1. Dvovod je na enem koncu nepremično kratko sklenjen. V rezonanci bo na kratko sklenjenem koncu dvovoda ničla (vozel) napetosti in maksimum (hrbet) toka. Ker bo v tej točki dvovoda močno magnetno polje, je takšno napravo smiselno induktivno sklopiti na tuljavo v merjencu, naprimer na tuljavo merjenega nihajnega kroga.



Slika 1 - Delovanje Lecherjevega voda

Na drugem koncu kratko sklenemo merilni dvovod s pomočjo premičnega kratkostičnika. Takšen dvovod bo v rezonanci takrat, ko razdalja med obema kratkostičnikoma znaša celoštevilski mnogokratnik POLOVICE valovne dolžine merjenega signala. Ko s premičnim kratkostičnikom najdemo rezonanco, se naprava obnaša podobno

kot grid-dip meter: v rezonanci je prenos moči iz merjenca v merilni dvovod največji, merilni dvovod takrat najbolj "odžira" signal iz merjenca, zato je takrat signal v merjencu najbolj dušen.

Opisana izvedba Lecher-jevega voda ne vsebuje niti izvora signala niti detektorja, saj privzamemo, da merjenec sam proizvaja visokofrekvenčni signal in da jakost signala merimo na nek drug način. S takšnim Lecher-jevim vodom torej ne moremo meriti povsem pasivnih vezij, na primer osamljenega nihajnega kroga. V praksi pa so nihajni krogi, rezonatorji ipd vedno vgrajeni v vezje, ki proizvaja signale in ponavadi ima tudi prikaz izhodnega signala, na primer indikator moči oddajnika ali pa S-meter sprejemnika.

Lecher-jevemu vodu bi sicer lahko vgradili lasten indikator rezonance, vendar bi takšen detektor odžiral moč merjenega signala. S tem bi znižali Q-faktor Lecher-jevega voda ter tako pokvarili točnost meritve, zato se takšna rešitev v praksi ni obnesla. Še težje bi bilo izdelati detektor, ki bi pokrival zelo široko frekvenčno področje in zelo velik razpon jakosti signalov, ki jih običajno merimo z Lecher-jevim vodom.

Kolikšna pa je točnost Lecher-jevega voda kot merilnika frekvence? Če spet pomislimo na primerjavo s podobno mehansko napravo, s struno, se v resnici strune ne da nikoli povsem togo vpeti, zato je dolžina strune samo približno enaka celoštevilskemu mnogokratniku polovice valovne dolžine. Pri električnem Lecher-jevem vodu imamo podoben pojav: zaradi parazitne induktivnosti obeh kratkostičnikov, pomičnega in nepremičnega, bo izmerjena rezonančna dolžina nekoliko krajša od resničnega mnogokratnika polovice valovne dolžine.

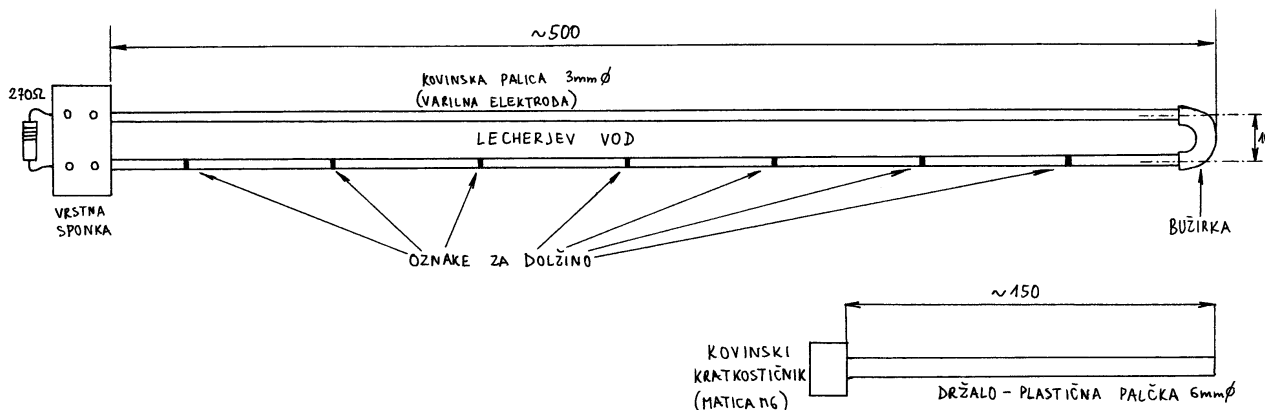
Kljub temu lahko z opisanim Lecher-jevim vodom povsem TOČNO izmerimo valovno dolžino! Kako? Napaka zaradi parazitne induktivnosti kratkostičnikov je konstantna, v dolžinskih enotah, ne glede to, katero rezonanco ali mnogokratnik opazujemo. To pomeni, da bo razdalja od začetka voda do prvega minimuma samo PRIBLIŽNO enaka polovici valovne dolžine, razdalja od prvega minimuma do drugega pa je VEDNO NATANČNO enaka polovici valovne dolžine. Enako velja za vse sledeče rezonance.

Z opisanim Lecher-jevim torej najprej grobo izmerimo valovno dolžino iz razdalje med začetkom voda in prvim minimumom. Točen rezultat dobimo iz razdalje med prvim in drugim minimumom. Še bolj točen rezultat pa dobimo tako, da izmerimo razdaljo med več zaporednimi minimumi ter izmerjeno razdaljo ustrezno delimo. Žal postajajo zaradi izgub v dvovodu in sevanja minimumi vse bolj plitvi, pa tudi dolžina našega merilnika je v praksi omejena.

Iz izmerjene valovne dolžine je treba končno še izračunati frekvenco. Po simetričnem dvovodu se širi TEM vrsta valovanja, zato je hitrost takšnega valovanja kar enaka svetlobni hitrosti in je račun enostaven. Za zračni vod hitrost valovanja sicer malenkostno odstopa od tiste v praznem prostoru (je za okoli 0.03% manjša) zaradi dielektrične konstante zraka. Točnost meritve z Lecher-jevim vodom je zato omejena s točnostjo, s katero lahko odčitamo razdaljo med dvema zaporednima minimumoma, to je okoli 0.5%. Lecher-jev vod je zato tudi nekoliko točnejši od grid-dip metra.

### 3. Praktična izvedba in izdelava Lecher-jevega voda

Praktična izvedba Lecherjevega voda je prikazana na sliki 2. Frekvenčno področje Lecher-jevega voda je navzdol omejeno z njegovo dolžino. Ker moramo imeti za nižje frekvence v vsakem slučaju grid-dip meter, je praktična izbira dolžine Lecher-jevega voda okoli pol metra. S takšnim merilnim vodom lahko grobo merimo frekvence nad 300MHz (takrat je celotna dolžina voda enaka polovici valovne dolžine) in povsem točno frekvence nad 600MHz, ko lahko izmerimo razdaljo med dvema minimumoma.



Slika 2 - Praktična izvedba Lecherjevega voda

Lecher-jev vod izdelamo iz kakršnekoli kovinske žice, ki pa mora biti zadosti toga. Še najprimernejša je varilna elektroda dolžine 1m in premera 3mm, ki jo na sredini zvijemo v obliki črke U. Ker bomo na merilnem vodu merili dolžine, je smiselno opremiti vsaj en krak voda z dolžinskimi oznakami. Odprti konec voda utrdimo z elektrikersko vrstno sponko tako, da sta oba kraka voda vzporedna. Razdalja med žicami dvovoda sicer ni pomembna za delovanje Lecherjevega voda, vendar je smiselna izbira okoli 10mm (med središči žic). Upor 270ohm na odprtem koncu dvovoda naj bi dušil nezaželjene rezonance neuporabljenega dela dvovoda.

Na zaokroženi, kratkostaknjeni konec Lecherjevega voda je smiselno navleči primerno bužirko, saj se s tem koncem pri meritvi približujemo delujočemu merjencu, kjer lahko z golo žico povzročimo kratek stik in s tem uničenje dragih sestavnih delov. Med meritvijo držimo Lecher-jev vod z roko na drugem koncu, za vrstno sponko, ki tako hkrati služi tudi kot izolirano držalo. Da se z roko preveč ne približamo merilnemu vodu, je smiselno uporabiti daljšo vrstno sponko z več kontakti. Pri tem seveda odstranimo kovinske dele neuporabljenih kontaktov in pustimo samo plastično ohišje kot držalo.

Tudi pomični kratkostičnik mora biti na izoliranem držalu dolžine okoli 15cm, da se tudi z drugo roko med meritvijo preveč ne približamo merilnemu vodu. Kot držalo kratkostičnika uporabimo trdno plastično palčko ali še boljše cevko premera okoli 6mm. Na konec palčke nabijemo kovinsko matico M6, primerno podložko ali pa košček kovinske cevi, ki bo služil kot premični kratkostičnik. Premer tega kovinskega koščka naj bo nekaj mm večji od razdalje med vodnikoma Lecher-jevega voda, tako da ob pritisku primerno naleže na eno stran voda. Za točnost meritve je seveda pomembno, da pri obeh merjenih minimumih držimo kratkostičnik v enakem položaju in pod enakim kotom glede na merilni

vod!

Frekvenčno področje uporabe Lecher-jevega voda je navzgor omejeno edino z razširjanjem višjih valovodnih rodov, ki niso več TEM in se ne razširjajo s svetlobno hitrostjo. Takšni valovodni rodovi se začnejo razširjati po dvovodu takrat, ko postane razdalja med žicama dvovoda primerljiva s polovico valovne dolžine. Dodatni valovi, ki se širijo z drugačno hitrostjo, bi seveda povzročili dodatne rezonance in s tem dodatne minimume pri premikanju kratkostičnika.

Na srečo sta sevanje in dušenje višjih valovodnih rodov dosti večja, zato imajo te rezonance Lecher-jevega voda nizek Q-faktor in bi jih na ta način lahko ločili od TEM rezonanc. Za opisano konstrukcijo Lecher-jevega voda ustreza razdalja 10mm med vodnikoma polovici valovne dolžine pri frekvenci 15GHz, zato sem nam pri nižjih frekvencah ni treba bati čudnih pojavov. Opisano konstrukcijo sem sicer praktično preizkusil vse do 12GHz (pri uglaševanju sprejemnika za satelitsko TV) in tudi na 12GHz se je Lecher-jev vod še vedno izkazal zelo točen. Z meritvijo razdalje med več zaporednimi minimumi sem tudi na 12GHz še vedno izmeril frekvenco točneje od 1%.

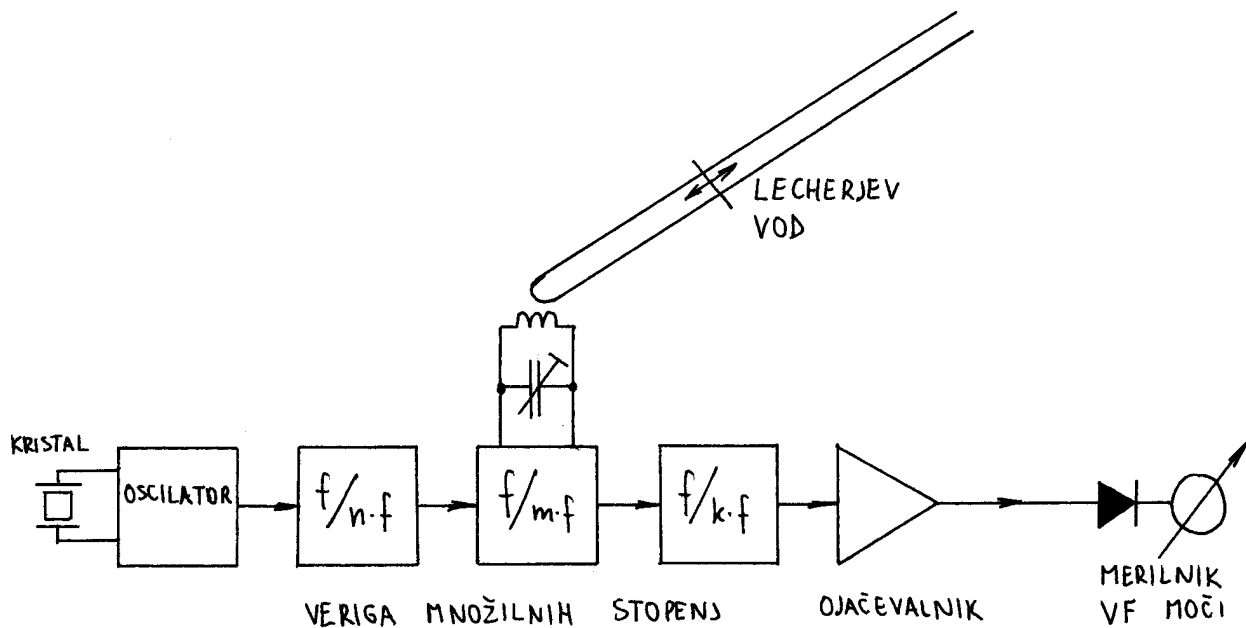
#### 4. Meritve z Lecher-jevim vodom

Z Lecher-jevim vodom lahko naredimo več različnih meritev, v vsakem slučaju pa je potrebno Lecher-jev vod sklopiti na merjenec. Običajno uporabljamo magnetni sklop na tuljave ali rezonančne vode v merjenem vezju. S predelavo Lecher-jevega voda bi se sicer dalo doseči tudi električni sklop, vendar se ta rešitev v praksi ni obnesla.

Pri frekvencah nad 1GHz imamo sicer bolj poredko opraviti s pravimi tuljavami, saj ne moremo zanemariti kapacitivnosti vodnikov. Z Lecher-jevim vodom zato najpogosteje merimo rezonančne vode različnih izvedb: zračne rezonančne vode, mikrotrakaste vode na tiskanih vezjih in drugo. Pri merjenju rezonančnih vodov moramo sicer paziti na porazdelitev toka in napetosti na vodu. Če želimo magnetni sklop z merilnim vodom, potem je treba Lecher-jev vod približati merjencu tam, kjer ima ta maksimum (hrbet) toka in minimum (vozel) napetosti. Pri četrt-valovnih rezonatorjih je treba Lecher-jev vod približati ozemljenemu koncu rezonatorja in ga zasukati tako, da zajame čim več magnetnega polja rezonatorja.

Lecher-jev vod lahko sicer sklopimo tudi na mikrotrakasti prenosni vod, ki ni rezonančen, le da je tu dosti težje opazovati rezonančne minimume, saj so dosti bolj plitvi. Nenazadnje lahko Lecher-jev vod sklopimo tudi na mikrovalovni valovod ali lijakasto anteno tako, da s koncem Lecher-jevega voda zajamemo čim več magnetnega polja v valovodu ali anteni.

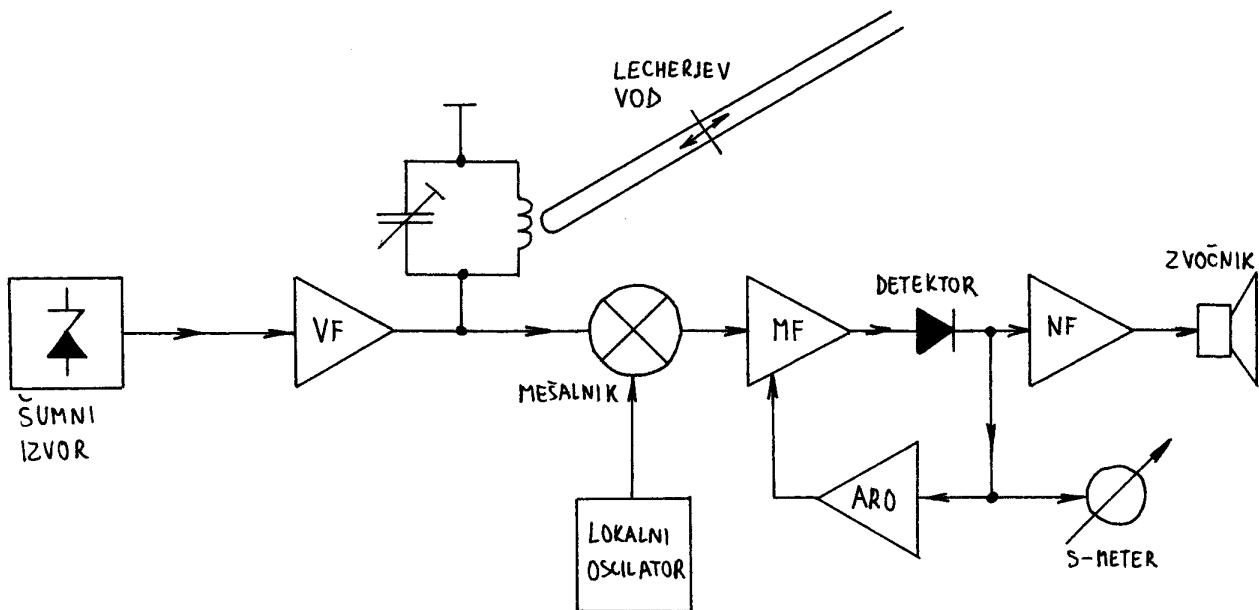
Lecher-jev vod najpogosteje uporabljamo zato, da preverimo frekvenco delovanja oscilatorja, verige množilnih stopenj ali celega oddajnika, kot je to prikazano na sliki 3. Pri verigah množilnih stopenj moramo biti posebno previdni, saj so tu nezaželjene frekvence v harmonskem razmerju z željeno frekvenco in lahko isti minimum ustreza več različnim frekvencam. Z Lecher-jevim vodom to preverimo tako, da poiščemo še lego in globino ostalih minimumov in primerjamo rezultate s pričakovanji. Kaj takšnega seveda ne moremo narediti z digitalnim frekvencometrom!



Slika 3 - Merjenje frekvence v verigi množilnih stopenj

Pri uglaševanju verige množilnih stopenj seveda ni nujno, da priključimo detektor ali merilnik VF moči na izhod vezja za opazovanje signala. Pri uglaševanju posameznih stopenj bi bilo zaželeno, če bi imeli detektor kar na izhodu merjene stopnje oziroma na vходу naslednje. Takšen detektor je običajno že vgrajen v merjeno vezje, saj vsebuje naslednja stopnja nelinearen sestavni del, tranzistor ali kaj drugega, za množenje, mešanje ali ojačanje signalov. Najpogostejše so množilne stopnje z bipolarnimi tranzistorji in tu lahko naravnost merimo usmerjeno VF napetost na BE spoju tranzistorja, s čisto navadnim voltmetrom, seveda preko VF dušilke, da ne motimo vezja.

Z Lecher-jevimi vodmi pa lahko merimo tudi frekvenco zelo šibkih signalov, kot je to prikazano na sliki 4. V VF delu sprejemnika merimo frekvenco nihajnih krogov (ali rezonatorjev) tako, da na vhod sprejemnika priključimo širokopasovni generator, to je šumni izvor s plazovno diodo. Pri tem S-meter sprejemnika sicer pokaže nek odklon in z uglaševanjem nihajnih krogov lahko tudi poiščemo maksimum, le da ne vemo, na katero frekvenco uglašujemo sprejemnik: pravo, zrcalno ali celo kakšen nezaželen produkt mešanja? Uganko reši Lecher-jev vod, ki ga sklopimo na merjeni nihajni krog (ali rezonator). Ko privedemo Lecher-jev vod v rezonanco s frekvenco nihajnega kroga, bo Lecher-jev vod dušil tudi zelo šibek signal iz šumnega generatorja in na S-metru bomo odčitali minimum.



Slika 4 - Merjenje frekvence v VF delu sprejemnika

## 5. Zaključek

Lecher-jev vod je eden osnovnih merilnih inštrumentov, ki bi jih moral imeti mikrovalovni radioamater. Skupaj s šumnim generatorjem in detektorjem/merilnikom VF moči zadošča za katerokoli uglaševanje radioamaterskih mikrovalovnih sprejemnikov, oddajnikov ali transverterjev.

Lecher-jev vod tudi ne potrebuje nobenega umerjanja, saj je merjena veličina enostavno razdalja med minimumi na vodu in je neodvisna od ostalih dimenzij in izvedbe merilnika. Meritev frekvence ali valovne dolžine tako prevedemo na meritev razdalje, ki se da izmeriti z ravnilom, ki ga dobimo v vsaki knjigarni. (Pozor! Nekatera lesena ravnila iz naših knjigarn se ob vlažnem vremenu raztegnejo tudi za več kot 1%!)

Meritev z Lecher-jevim vodom lahko dopolnijo bolj komplicirani merilniki, kot so digitalni frekvencometer ali spektralni analizator, toda ta dva merilnika ne moreta v nobenem slučaju popolnoma nadomestiti Lecher-jevega voda. Digitalni frekvencometer je v prisotnosti več signalov z različnimi frekvencami neuporaben. Spektralni analizator pa ima razen željenega odziva še kopico neželenih produktov mešanja, še posebno v mikrovalovnem področju na frekvencah nad 2GHz. Čeprav imam tudi sam doma mikrovalovni digitalni frekvencometer in spektralni analizator, je končna kontrola z Lecher-jevim vodom nenadomestljiva.

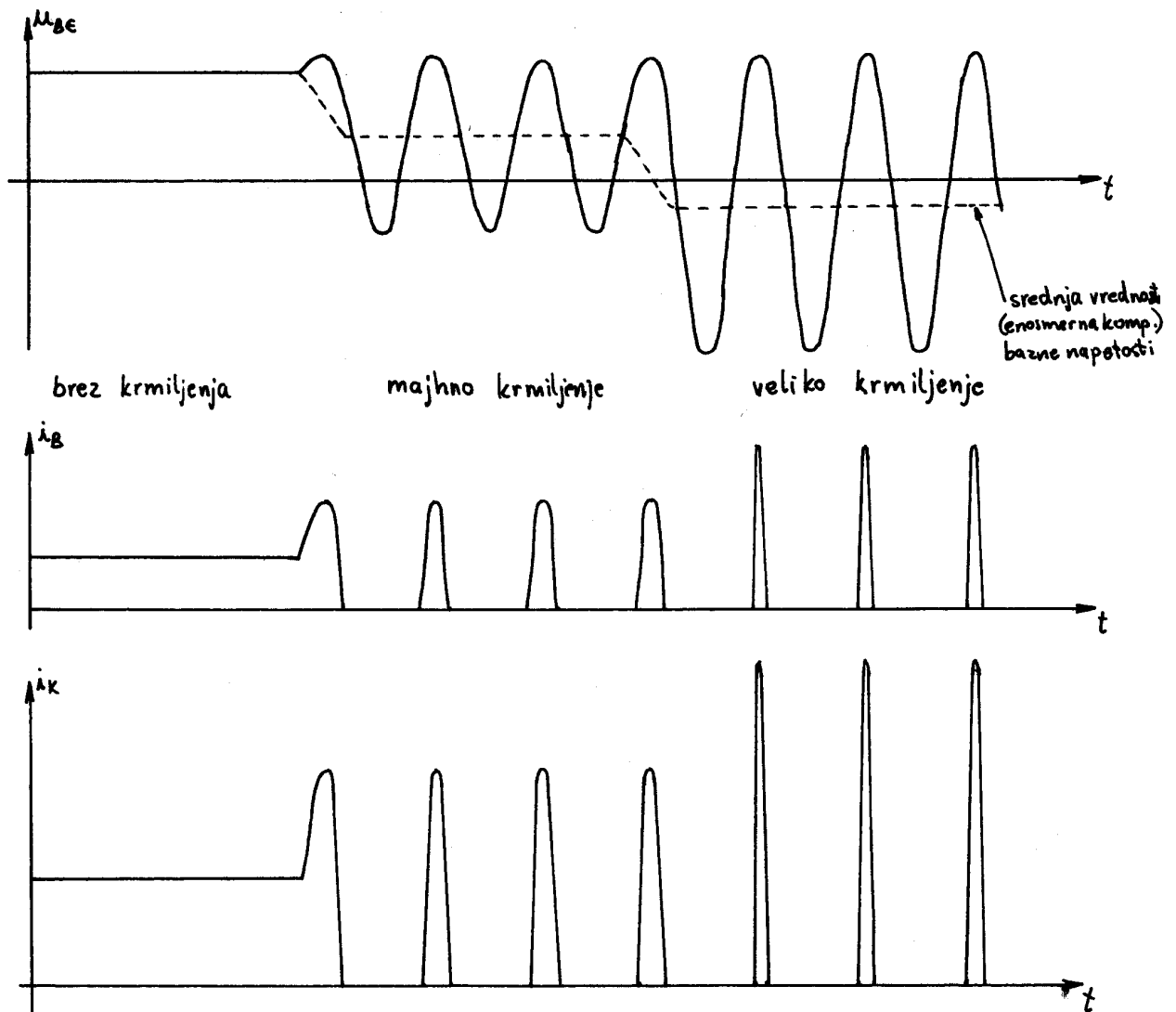
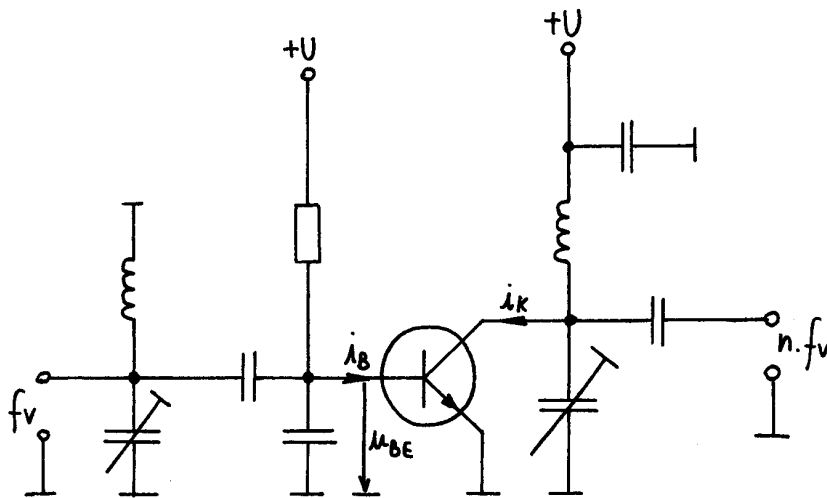
Za konec pa še to: "profesionalci", ki se vedno bahajo s tem, koliko deset-tisoč dolarjev ali mark stane njihova merilna oprema iz tovarn z visokotečimi imeni, s tem ponavadi samo dokazujejo svoje tehnično neznanje. Sam se že večkrat dobil v popravilo ali uglaševanje mikrovalovne amaterske transverterje, ki se jih na super-profesionalni opremi

nikakor ni dalo umeriti ali popraviti, pri meni doma pa je vse uganke razrešil zanikrni dobri stari Lecher-jev vod!

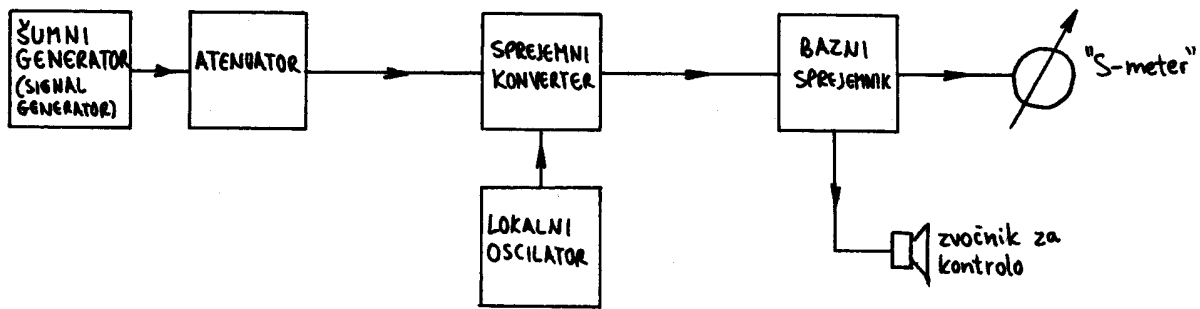
\* \* \* \* \*



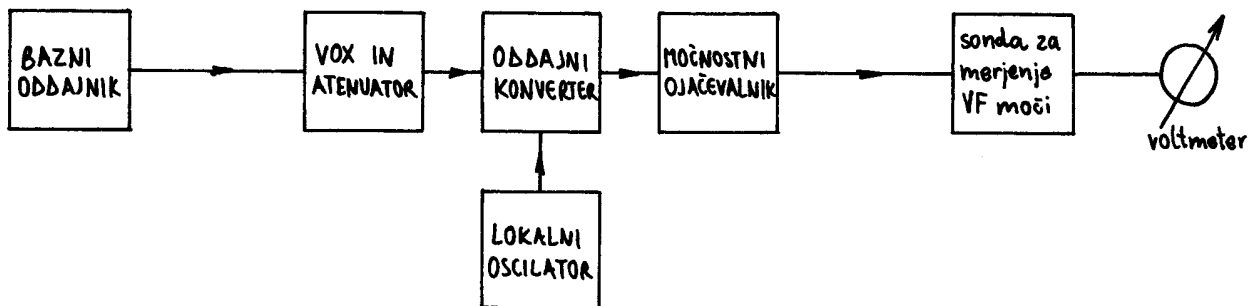
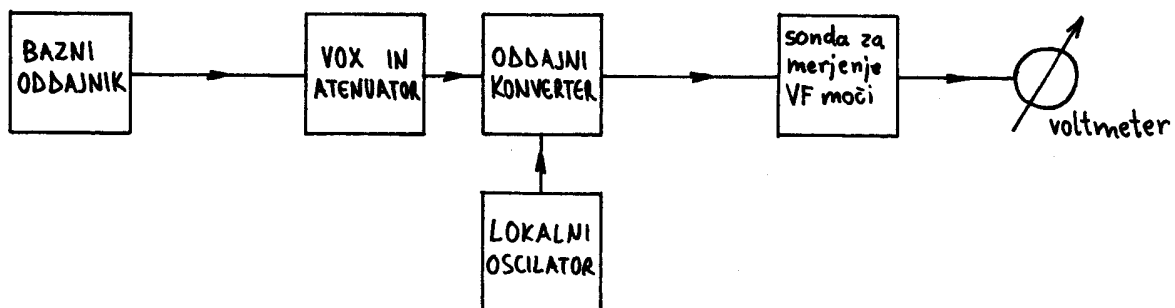
"SEMINAR ZA AMATERSKO PODROCJE 1296MHz," marec 1986, ZRS, Ljubljana.



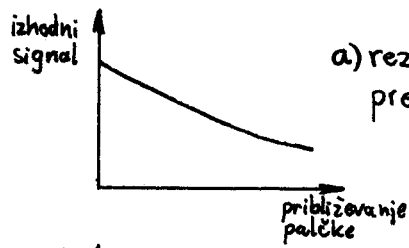
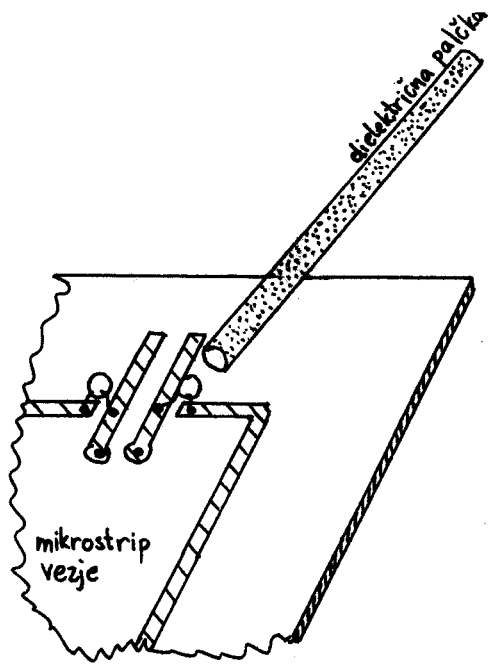
Delovanje tranzistorske množilne stopnje



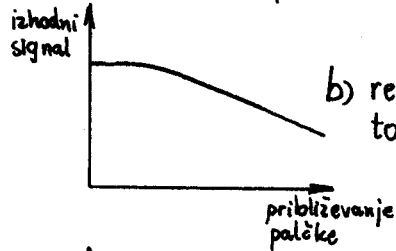
## Ugláševanje sprejemnega konverterja



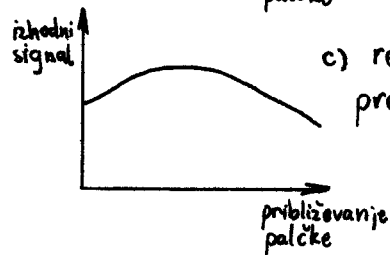
## Ugláševanje oddajnega konverterja



a) rezonator uglasen prenizko!

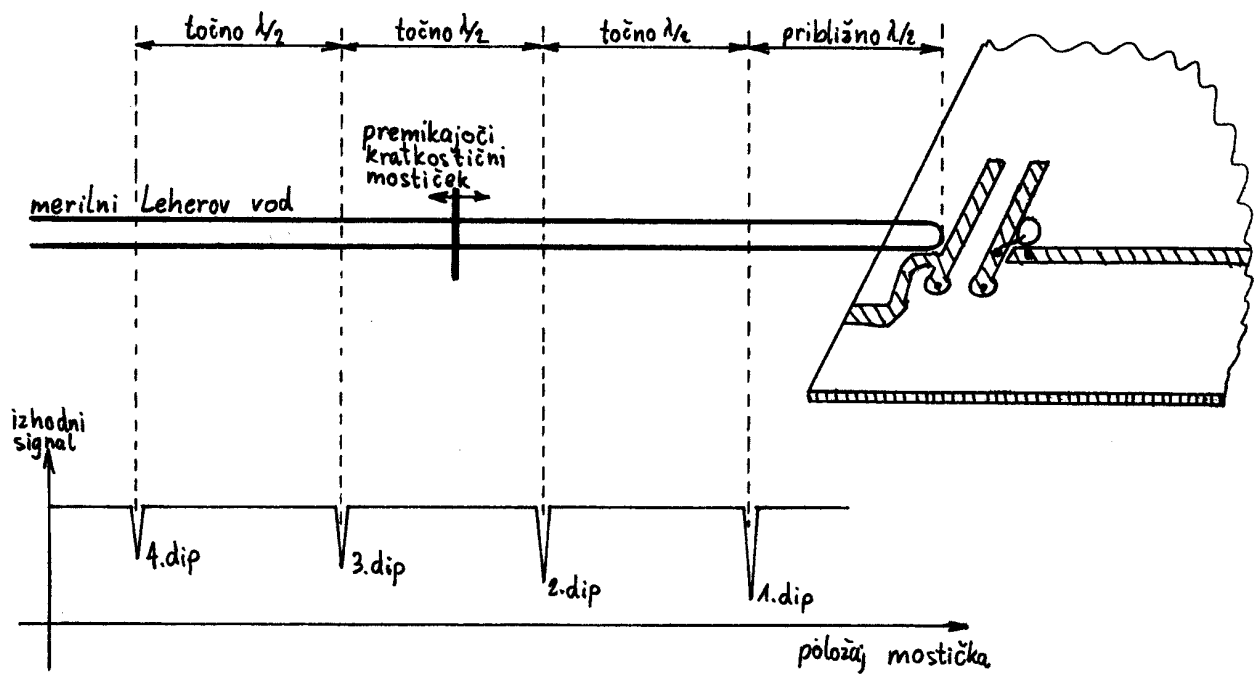


b) rezonator uglasen točno na frekvenco!



c) rezonator uglasen previsoko!

Ugotavljanje rezonančne frekvence filtra s pomočjo dielektrične palčke



Ugotavljanje frekvence signala s pomočjo merilnega Leherovega voda

\*\*\*\*\*