

2. OSNOVE MIKROVALOVNE TEHNIKE

2.1 Naloga

1. Prilagodite valovod na generator mikrovalov.
2. Izmerite frekvenco valovanja s pomočjo v valovod vgrajenega resonatorja.
3. Posnemite rodove klistronovega delovanja v odvisnosti od odbojne napetosti.
4. Izmerite moči, ki jih porablja termistor v vrhovih najmočnejših rodov.
5. Z osciloskopom posnemite krivulji ubranosti za valovod, ki je zaključen z bremenom, in za kratko sklenjeni valovod.

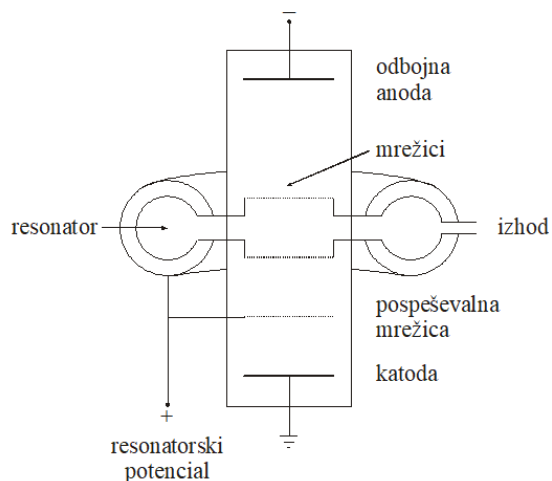
2.2 Uvod

Mikrovalovi so elektromagnetno valovanje z valovno dolžino nekaj cm in frekvenco nekaj GHz. Kot izvor mikrovalov služijo klistroni: to so elektronke, ki imajo za pospeševalno mrežico še dve mrežici, povezani s poloma resonančne votline. Lastno nihanje elektromagnetnega polja v resonančni votlini (ki je tudi priključena na pospeševalno napetost; slednja ob vklopu zaradi naključnih oscilacij napetosti vzbudi začetno nihanje v votlini) ustvarja med mrežicama izmenično napetost, ki enakomerni curek elektronov hitrostno modulira. Hitrost elektronov med mrežicama se namreč bodisi poveča, če kaže električno polje med mrežicama v nasprotni smeri curka, bodisi zmanjša, če kaže polje v smeri curka. Zaradi hitrostne modulacije nastanejo po preletu mrežic v elektronskem curku zgoščine in razredčine.

V refleksnem klistronu je za mrežicama resonančne votline odbojna elektroda, ki neenakomerni elektronski curek usmeri nazaj proti mrežicama in katodi. Če je odbojna napetost izbrana pravilno, se hitrostno modulirani curek vrne med mrežici s tako fazo, da električno polje gruč elektronov ojači lastno nihanje elektromagnetnega polja v resonančni votlini in klistron deluje kot oscilator. Pogoji za pozitivno povratno zvezo, s katero lastno nihanje v resonančni votlini vzdržuje samo sebe, je izpolnjen pri več diskretnih vrednostih napetosti: pravimo, da klistron deluje v različnih rodovih. Mikrovalovno elektromagnetno polje iz resonančne votline speljemo v valovod.

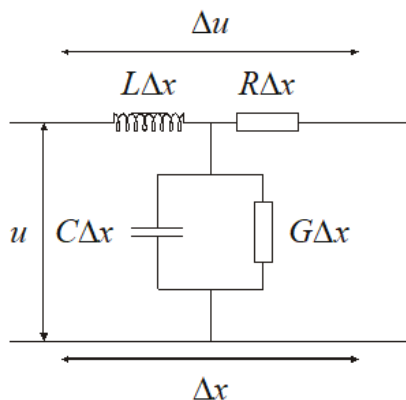
2.2.1 Širjenje mikrovalov

Mikrovalove lahko v splošnem le delno usmerjamo po prostoru. Za strogo usmerjeno prenašanje pa uporabljamo mikrovalovne vodnike v obliki dveh vzporednih žic, kable ali cevi – valovode. Pri frekvencah nihanj mikrovalov (GHz) so v takih vodnikih upornost,



Slika 1: Refleksni klistron

prevodnost, kapacitivnost in induktivnost zvezno porazdeljene (slika 2). Vrednosti teh količin, preračunane na enoto dolžine, označimo z R , G , L in C .



Slika 2: Shematska ponazoritev majhnega dela mikrovalovnega vodnika

Padec napetosti na dolžinskem elementu δx takega vodnika je vsota padca napetosti na ohmskem uporniku in padca napetosti na induktivnem uporniku (slika 2):

$$\Delta u = Ri\Delta x + L\Delta x \frac{di}{dt} \quad (1)$$

oziroma

$$\frac{du}{dx} = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

Podobno lahko napišemo za tok, ki teče po prevodniku $G\Delta x$ in kondenzatorju $C\Delta x$:

$$\Delta i = Gu\Delta x + C\Delta x \frac{du}{dt} \quad (3)$$

oziroma

$$\frac{di}{dx} = Gu + C \frac{du}{dt}. \quad (4)$$

Če sta R in G zanemarljiva (vod brez izgub), dobimo odtod diferencialni enačbi

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

in

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}. \quad (6)$$

Če vodnik napajamo z izmenično sinusno napetostjo $u = U \exp(j\omega t)$ oziroma s sinusnim tokom $i = I \exp(j\omega t)$, dobimo, da za amplitudo napetosti U in amplitudo toka I velja

$$\frac{\partial U}{\partial x} = (R + j\omega L)I = ZI \quad (7)$$

in

$$\frac{\partial I}{\partial x} = (G + j\omega C)U = YU, \quad (8)$$

kjer sta Z in Y impedanca in admitanca dolžinske enote mikrovalovnega voda. Upornost mikrovalovnega voda na dolžinsko enoto R imenujemo rezistanca, prevodnost G konduktanca, susceptibilnost ωC susceptanca in reaktivnost ωL reaktanca.

Z odvajanjem zadnjih dveh zvez dobimo valovni enačbi za U in I

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = ZYU = \gamma^2 U \quad (9)$$

in

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = ZYI = \gamma^2 I, \quad (10)$$

kjer je $\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta$ konstanta širjenja z realnim delom $\alpha = R/2\omega L + G/2\omega C$ (atenuacijska konstanta) in imaginarnim delom $\beta = \omega\sqrt{LC}$ (fazna konstanta).

Rešitvi diferencialnih enačb za amplitudo napetosti in toka sta

$$U(x) = A \exp(\gamma x) + B \exp(-\gamma x) \quad (11)$$

in

$$I(x) = \frac{1}{Z} \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{A}{Z_0} \exp(\gamma x) - \frac{B}{Z_0} \exp(-\gamma x), \quad (12)$$

kjer je $Z_0 = \sqrt{Z/Y}$ karakteristična impedanca voda. Trenutna napetost u in tok i sta

$$u(x, t) = A \exp(\gamma x + j\omega t) + B \exp(-\gamma x + j\omega t) = (U_i + U_r) \exp(j\omega t) \quad (13)$$

in

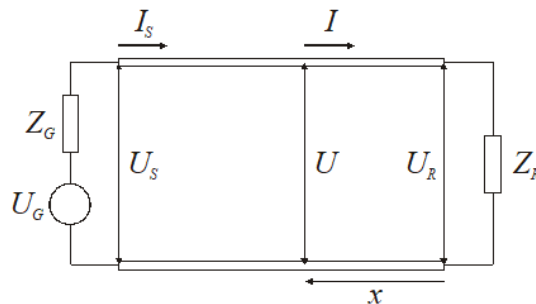
$$i(x, t) = \frac{A}{Z_0} \exp(\gamma x + j\omega t) - \frac{B}{Z_0} \exp(-\gamma x + j\omega t) = (I_i + I_r) \exp(j\omega t), \quad (14)$$

kjer so U_i in U_r ter I_i in I_r amplitude vpadnega oziroma odbitega valovanja. V splošnem imamo v vodniku torej stojno valovanje. Zanimivo je, da je razmerje U/I za prihajajoče valovanje ali odbito valovanje enako karakteristični impedanci Z_0 in je isto na vseh mestih voda. Pri vodih brez izgub ($R = G = 0$) je karakteristična impedanca realna.

Konstanti A in B določimo iz napetosti in toka na porabniku, ki ga napaja mikrovalovni vod (slika 3).

Koordinatno izhodišče $x = 0$ postavimo ob porabniku, kjer velja $U = U_R$, $I = I_R$ in $Z_R = U_R/I_R$, iz česar sledi

$$U_R = A + B \quad (15)$$



Slika 3: Napetosti in tokovi v vodniku: U_G je amplituda notranje napetosti generatorja napetosti, Z_G je impedanca generatorja napetosti, I_S je amplituda tok iz generatorja napetosti, U_S je amplituda zunanje napetosti generatorja napetosti, I in U sta tok in napetost na mestu x , Z_R je impedanca porabnika in napetost na porabniku

$$I_R = \frac{A - B}{Z_0} \quad (16)$$

$$A = \frac{U_R}{2} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_R} \right) \quad (17)$$

$$B = \frac{U_R}{2} \left(1 - \frac{Z_0}{Z_R} \right) \quad (18)$$

oziroma

$$U(x) = \frac{U_R}{2} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_R} \right) \exp(\gamma x) + \frac{U_R}{2} \left(1 - \frac{Z_0}{Z_R} \right) \exp(-\gamma x) \quad (19)$$

in

$$I(x) = \frac{I_R}{2} \left(1 + \frac{Z_R}{Z_0} \right) \exp(\gamma x) + \frac{I_R}{2} \left(1 - \frac{Z_R}{Z_0} \right) \exp(-\gamma x) \quad (20)$$

ter impedanca Z na mestu x , kar nas pravzaprav zanima:

$$Z = \frac{U}{I} = Z_0 \left(\frac{Z_R + Z_0 \tanh \gamma x}{Z_0 + Z_R \tanh \gamma x} \right). \quad (21)$$

Če vodnik nima izgub ($R = G = 0$) in je kratko sklenjen ($Z_R = 0$) velja $U = jI_R Z_0 \sin \beta x$ in $I = I_R \cos \beta x$. Če tak vodnik ni zaključen, se vlogi napetosti in toka zamenjata. Razdalja med maksimi amplitud je $\lambda = 2\pi/\beta$. Iz zadnje enačbe vidimo, da je impedanca mikrovalovnega voda na različnih mestih različna. Za izračun moramo poznati karakteristično impedanco Z_0 , impedanco bremena Z_R ter konstanto širjenja γ .

Enačbo (21) lahko uporabimo tudi za določanje impedance bremena Z_R iz poznane vrednosti Z . Kot pogosto uporabljano metodo si oglejmo določanje Z_R iz izmerjene vrednosti minimalne impedance vodnika $Z_{\min} = |U_{\min}/I_{\min}|$, ki nastopi v oddaljenosti x_{\min} od porabnika. Poglejmo si, kako z meritvijo določimo Z_{\min} in x_{\min} . Najpreprosteje pridemo do rezultata, če vpeljemo refleksijski koeficient r_R , ki je definiran kot razmerje amplitud odbitega in vpadnega vala pri x_0 , torej na bremenu:

$$r_R = \frac{U}{I} \Big|_{x_0} = \frac{B}{A} = \frac{Z_R - Z_0}{Z_0 + Z_R}. \quad (22)$$

V splošnem je refleksijski koeficient kompleksno število. Če je vod na koncu zaključen tako, da je $Z_R = Z_0$, odboja ni in je $r_R = 0$. Če pa je vod kratko sklenjen, se vse valovanje odbije in je $r_R = 1$.

Ob okrajšavi $U'_R = \frac{U_R}{2} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_R}\right)$ velja

$$U(x) = U'_R \exp(\gamma x) [1 + r_R \exp(-2\gamma x)], \quad (23)$$

$$I(x) = \frac{U'_R}{Z_0} \exp(\gamma x) [1 - r_R \exp(-2\gamma x)], \quad (24)$$

$$Z(x) = \frac{U}{I} = Z_0 \frac{1 + r_R \exp(-2\gamma x)}{1 - r_R \exp(-2\gamma x)}. \quad (25)$$

Nas bo odslej zanimal približek, ko smemo izgubo v vodu zanemariti, torej $R = G = \alpha = 0$, kar pomeni, da ima konstanta širjenja γ od 0 različno samo imaginarno komponento: $\gamma = j\beta$.

Značilna in lahko merljiva količina za stojno valovanje v vodniku je razmerje med minimalno in maksimalno amplitudo napetosti ali toka, ki ga imenujemo ubranost:

$$s = \frac{|U_{\min}|}{|U_{\max}|}. \quad (26)$$

Če refleksijski koeficient, ki je kompleksno število, zapišemo v obliki $r_R = \exp(2t_0 + 2ju_0) = |r_R| \exp(2ju_0)$, sledi iz enačb (23) in (24) za ubranost

$$s = \frac{1 - |r_R|}{1 + |r_R|} = \frac{|I_{\min}|}{|I_{\max}|}. \quad (27)$$

Posebni primeri: če je vod zaključen z naravnim bremenom in je $Z_R = Z_0$ ni refleksije ($r_R = 0$) in je ubranost $s = 1$. Če pa je vod kratko sklenjen in je refleksija popolna ($r_R = 1$) je ubranost $s = 0$.

Iz enačbe (25) sledi, da je

$$Z_{\max} = \frac{U_{\max}}{I_{\min}} = Z_0 \frac{1 + |r_R|}{1 - |r_R|} = \frac{Z_0}{s} \quad (28)$$

in

$$Z_{\min} = \frac{U_{\min}}{I_{\max}} = Z_0 \frac{1 - |r_R|}{1 + |r_R|} = Z_0 s. \quad (29)$$

Po drugi strani lahko Z_{\min} izrazimo z zvezo (21) in je

$$Z_{\min} = Z_0 \frac{Z_R + jZ_0 \tan \beta x_{\min}}{Z_0 + jZ_R \tan \beta x_{\min}} = Z_0 s. \quad (30)$$

x_{\min} določimo z dvojno meritvijo: najprej izmerimo krivuljo ubranosti za vodnik, ki je zaključen z bremenom, nato pa še za vodnik, ki je kratko sklenjen. Ker je v slednjem primeru $U_{\min} = 0$ pri $x = 0$, pri vodniku, ki je zaključen z bremenom pa je $x_{\min} \neq 0$, se opazovani minimum ubranosti premakne proti bremenu ravno za vrednost x_{\min} . Če je premik večji od $\lambda/4$ izgleda, kot da se je minimum premaknil proti generatorju.

Če Z_R izpišemo po komponentah, $Z_R = \xi_R + j\eta_R$, iz enačbe (30) sledi, da je

$$\xi_R + j(\eta_R + Z_0 \tan \beta x_{\min}) = (Z_0 - \eta_R \tan \beta x_{\min} + j\xi_R \tan \beta x_{\min}) s \quad (31)$$

Po izenačenju realne in imaginarne komponente dobimo reaktanco bremena, normirano na karakteristično upornost:

$$\frac{\eta_R}{Z_0} = \frac{(s^2 - 1) \tan \beta x_{\min}}{1 + s^2 \tan^2 \beta x_{\min}}, \quad (32)$$

enako normirana rezistanca pa je

$$\frac{\xi_R}{Z_0} = \left(1 - \frac{\eta_R}{Z_0} \tan \beta x_{\min}\right) s. \quad (33)$$

Iz teh zvez izračunamo rezistanco ξ in reaktanco η neznanega bremena. Za grafično reševanje enačbe (30) uporabljajo tudi Smithov diagram, ki je opisan v dodatku A.

2.2.2 Frekvenca mikrovalov

Eden od načinov za določitev frekvence mikrovalov je, da izmerimo valovno dolžino valovanja, nato pa odtod določimo frekvenco. Pri širjenju valovanja v vakuumu (in približno tudi v zraku) je hitrost valovanja enaka hitrosti svetlobe:

$$\nu \lambda = c, \quad (34)$$

kjer je λ valovna dolžina valovanja s frekvenco ν . Pri vstopu v valovod se valovna dolžina valovanja spremeni in je enaka

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}, \quad (35)$$

kjer je a daljša stranica preseka valovoda. Valovno dolžino valovanja v valovodu lahko izmerimo (več pri opisu merjenja slike valovanja v valovodu, slika 4), iskano frekvenco pa dobimo iz izraza:

$$\nu = \frac{c\sqrt{\lambda^2 + 4a^2}}{2a\lambda'}. \quad (36)$$

Frekvenco mikrovalov lahko merimo tudi z resonatorjem, ki ga vgradimo v valovod. Resonator uglasimo na merjeno frekvenco npr. s premikanjem dna. Ko je resonator uglašen, se tudi v njem pojavi valovanje, toda za to se porabi del moči valovanja v valovodu. Na merilniku moči se odklon instrumenta zmanjša za kakih 60 %. Če je vijak za premikanje dna resonatorja umerjen v frekvenčni skali (poglej umeritveno tabelo!), lahko tako neposredno določimo frekvenco valovanja v valovodu.

2.2.3 Merjenje moči mikrovalov

Moč valovanja v valovodu najpogosteje merimo s termoelektričnimi elementi, ki se zaradi obsevanja z mikrovalovi segrejejo, zato se jim spremeni upornost; takim elementom pravimo bolometri. Z bolometrom izmerimo moč P_m , ki jo ta absorbira na račun vpadne moči P . P_m in P povezuje enačba

$$P = \frac{P_m}{1 - |r_R|^2}, \quad (37)$$

kjer je r_R refleksijski koeficient

$$|r_R|^2 = \left(\frac{1 - s}{1 + s}\right)^2. \quad (38)$$

Bolometri so navadno dveh vrst:

1. **Bareterji** (angl. barretter) so sestavljeni iz tanke platinaste žičke. Zveza med sprejeto močjo in spremembo upornosti je linearna. Slabost bareterjev je, da so zelo občutljivi na preobremenitve. Občutljivost: $3 - 12\Omega/\text{mW}$
2. **Termistorji** so izdelani iz polprevodnikov (nikljevi ali magnezijevi oksidi), ki so zaradi boljše prevodnosti pomešani z bakrenim prahom. Zveza med absorbirano mikrovalovno močjo in spremembo upornosti ni popolnoma linearna, temperaturni koeficient je negativen. Niso občutljivi na preobremenitve, zato jih pogosto uporabljajo. Občutljivost: $50 - 100\Omega/\text{mW}$

Spremembo upornosti merimo z bolj ali manj izpopolnjenim Wheatstonovim mostičkom bodisi tako, da merimo spremembo toka skozi detektor, ki je potrebna, da se porušeno ravnotežje spet vzpostavi, bodisi tako, da pri porušenem ravnotežju merimo tok skozi galvanometer ali kak podoben merilnik, ki jo vgrajen v mostiček.

2.2.4 Določanje impedance bremena iz meritve ubranosti

Sliko valovanja v valovodu merimo s posebnim vodom. To je valovod, ki ima po sredini ene izmed širših ploskev zarezo, skozi katero sega merilna sonda v notranjost. Na sondo je priključena mikrovalovna dioda, ki sprejete signale usmeri. Usmerjeni signal vodimo preko ojačevalnika na merilni instrument. Kadar je valovanje v valovodu stojno, se ob premikanju sonde vzdolž valovoda odklon instrumenta spreminja: merimo namreč hrbte in vozle stojnega valovanja.

Da je meritev kvantitativna, ima merilni vod skalo za določitev lege sonde. Merilna linija pa je opremljena tudi z enostavno električno napravo, s katero lahko posnamemo sliko valovanja s pisalnim instrumentom.

Z merilnim vodom bi želeli dobiti resnično sliko porazdelitve amplitude napetosti v valovodu. V resnici je slika popačena zaradi kvadratične karakteristike diode. Da določimo ubranost, moramo razmerje minimalnega in maksimalnega odčitka, h_{\min} in h_{\max} , koreniti

$$s = \frac{|U_{\min}|}{|U_{\max}|} = \sqrt{\frac{h_{\min}}{h_{\max}}}. \quad (39)$$

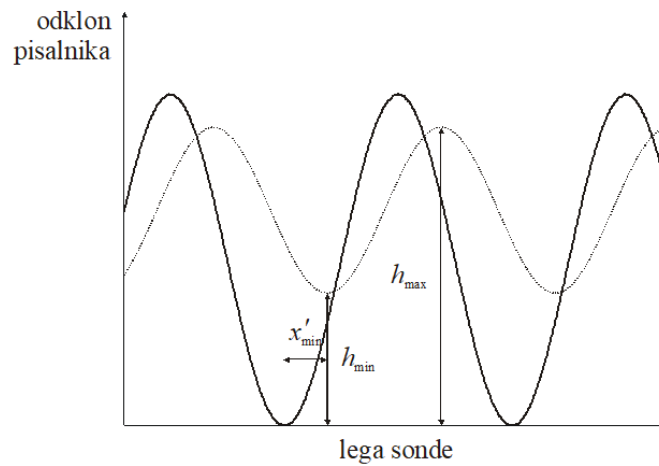
Za določitev x_{\min} in s , ki po enačbah (32) in (33) služita za izračun impedance bremena Z_R , z merilnim vodom najprej posnamemo sliko valovanja pri bremenu z neznano impedanco (slika 4). Nato breme odstranimo, valovod zaključimo s kratkostično steno ter ponovno posnamemo sliko valovanja. Iz obeh krivulj določimo ubranost s . Da je meritev čim natančnejša, odčitamo razdaljo med dvema minimoma na krivulji, ki opisuje kratko sklenjen valovod. Ta razdalja je enaka polovici valovne dolžine valovanja v valovodu. Razlika med lego izbranega minima krivulje, ki opisuje valovod z bremenom, in ustreznega minima krivulje, ki opisuje kratko sklenjen valovod, je iskani x_{\min} . Ker sta λ' in x'_{\min} merjena v istih enotah, velja

$$\frac{x'_{\min}}{\lambda'} = \frac{x_{\min}}{\lambda} = \frac{\beta x_{\min}}{2\pi}, \quad (40)$$

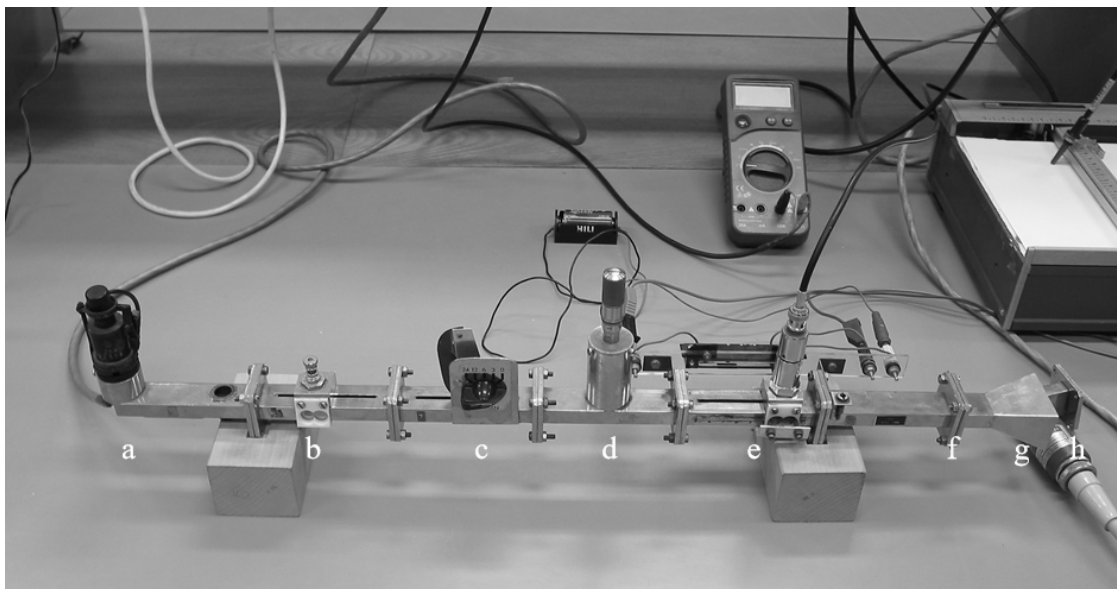
odkoder sledi, da je $\beta x_{\min} = 2\pi \frac{x'_{\min}}{\lambda'}$.

2.3 Potek meritve

V začetku vaje sestavljajo mikrovalovni elementi zaporedje, ki je shematsko prikazano na sliki 5.



Slika 4: Krivulji ubranosti za valovod, zaključen z bremenom, in za kratko sklenjen valovod.



Slika 5: Elementi mikrovalovnega sistema: a) izvor, b) ubiralka, c) dušilka, d) resonator, e) merilni vod, f) kratkostična stena, g) antena, h) bolometer. V ozadju je viden voltmeter, s katerim merimo odbojno napetost na klistronu, in pisalnik, ki se je nekoč uporabljal namesto osciloskopa.

lega vijaka	frekvenca [Ghz]
100	10.0
300	9.0
500	8.0

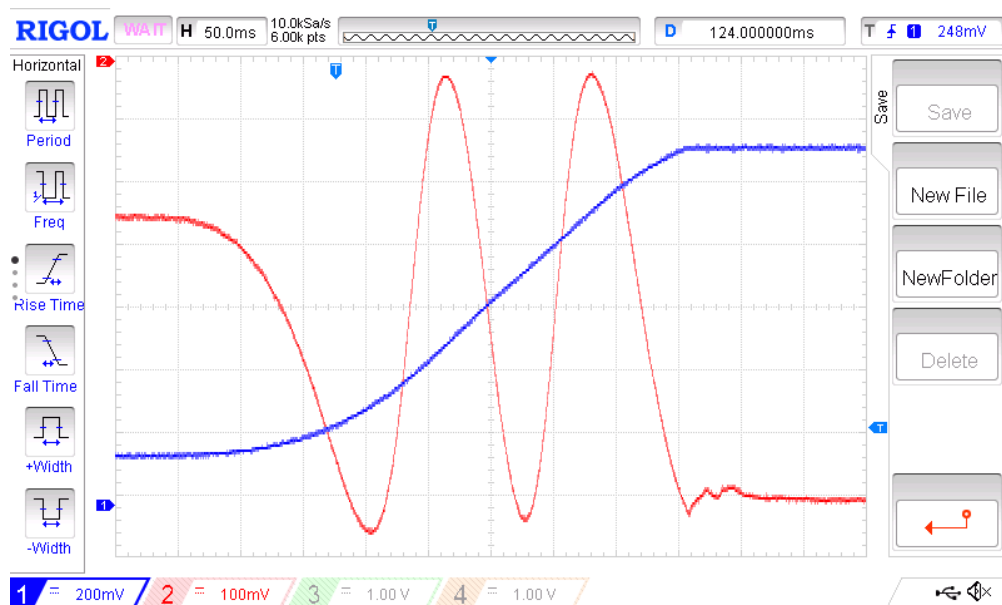
Tabela 2.1: Umeritev mikrometrskega vijaka resonatorja.

1. Prižgite napajalnik refleksnega klistrona. Ko se ta ogreva, izhod iz merilne sonde povežite z vhodom CH2 osciloskopa. Če sedaj počasi spreminjate odbojno napetost klistrona (kar spremljate na voltmetru), signal sonde na osciloskopu naraste, pade itd. Prepričajte se, da resonator slučajno ni v resonanci z valovanjem v valovodu.

2. Izberite si enega od najmočnejših rodov in naravnajte odbojno napetost tako, da bo signal sonde za ta rod največji. S premikanjem vozička na ubiralke lahko signal močno spremenite. Pomaknite voziček v lego, kjer je signal največji. Izmenično vrtite vijak na ubiralke in premikajte voziček, dokler signal ne doseže maksimuma. Sedaj lahko učvrstite vijak ubiralke z matico, še nekoliko popravite lego vozička in bolj natančno naravnate odbojno napetost; voziček naj ostane v tem položaju do konca vaje. S tem ste prilagodili valovod na klistron. (O vlogi ubiralke govori Dodatek.)
3. Vrtite mikrometrski vijak na resonatorju in obenem opazujte signal merilne sonde. Ko pride do resonance, se signal občutno zmanjša. S pomočjo lege mikrometrskega vijaka in umeritvene tabele 2.1 določite frekvenco mikrovalov.
4. Vrtite gumb za nastavitev odbojne napetosti klistron iz ene skrajne lege v drugo in opazujte jakost mikrovalovnega valovanja v valovodu. Izmerite odbojne napetosti, kjer se pojavijo maksimumi jakosti valovanja (rodovi delovanja klistrona).
5. Izključite napajanje klistrona, odstranite naravno breme in pritrdite na valovod prehodnik. Na prehodnik privijte termistor in ga povežite z vhodom merilnika mikrovalovne moči. Merilnik moči naravnajte na območje 10 mW in ga vključite. Ko se ogreje, ga naravnajte z gumboma za grobo in fino regulacijo, da bo kazalec instrumenta pokril ničlo. Vključite še klistron in izmerite moči P_m v vrhovih najmočnejših rodov.
6. Nastavite odbojno napetost tako, da bo klistron pri najmočnejšem rodu. Vhod CH1 osciloskopa (primerna začetna občutljivost: 2 V/div) priključite na drsnik merilne linije (oglejte si vezavo drsnika z 9V baterijo). Vhod CH2 osciloskopa (primerna začetna občutljivost: 100 mV/div) povežite z izhodom iz merilne sonde. Nastavite časovno skalo osciloskopa na, recimo, 50 ms/div. Premikajte voziček merilne linije od leve proti levi in opazujte oba signala. Napetost na CH1 je sorazmerna z lego sode, napetost na CH2 pa niha. Po potrebi spremenite nastavitve občutljivosti obeh kanalov tako, da bo pokrito celotno območje vrednosti. Z ravnilom izmerite razdaljo med skrajnima legama vozička, da boste lahko x-os na grafih kasneje narisali v dolžinskih enotah.

Proženje osciloskopa nastavite na CH1, izberite način normalnega proženja (trigger mode: Normal) in nivo proženja nastavite malo nad signalom pri skrajno levi legi vozička. Ko voziček potegnete od skrajno leve do skrajno desne lege, bi se morala na zaslonu izrisati signala, podobna sliki 6.

Zajeta signala shranite na USB ključek (Tipka Storage, Type CSV, izberite kanala CH1 in CH2, Save. Če se osciloskop "pritožuje", enkrat pritisnite tipko RUN/STOP in ponovno poskusite shraniti signala. Vzrok za morebitno prepočasno snemanje na USB ključ je prevelika količina zajetih podatkov. V meniju Acquisition v tem primeru nastavite MemDepth na najmanjšo vrednost in zajemite signal še enkrat.) Izklopite merilnik moči in odstranite predhodnik s termistorjem. Valovod zaključite s **kratkostično steno in še enkrat posnemite oba signala**. Valovod zaključite z **anteno in še enkrat posnemite oba signala**. Na svojem računalniku na isti graf narišite vse tri krivulje ubranosti (signal sonde v odvisnosti od lege sonde - CH2 v odvisnosti od CH1). Iz prve krivulje določite ubranost. Iz ubranosti in razdalje x_0 izračunajte impedanco bremena, ki ga predstavlja prehodnik s termistorjem. Iz merjenih moči P_m in iz ubranosti s določite še prave moči P v vrhovih posameznih rodov.

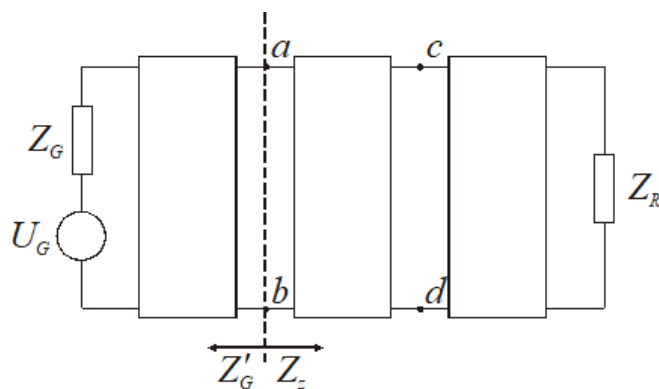


Slika 6: Zaslom osciloskopa pri zajemanju krivulje ubranosti.

2.4 Dodatek: impedančno prilagajanje valovoda na generator z ubiralko

Maksimalni prenos moči od generatorja do bremena dobimo, če je impedanca bremena enaka konjugirano kompleksni vrednosti impedance generatorja. Takrat pravimo, da sta impedanci generatorja in bremena prilagojeni.

Theveninov teorem: če je generator povezan z bremenom preko enega ali več reaktančnih vezij (vod brez izgub) in je na enem paru priključkov izpolnjen pogoj o konjugirano impedančni prilagoditvi, je pogoj o taki prilagoditvi izpolnjen na vseh parih vezij in maksimalna moč bo prenešana od generatorja do bremena.



Slika 7: K izpeljavi Theveninovega teorema

Levo stran preseka a-b lahko nadomestimo z impedanco generatorja Z'_g , desno stran pa z vezju ekvivalentno impedanco Z_z . Napetost nadomestnega generatorja U'_g je napetost kroga, ki je odprt v preseku a-b.

Naj bo v preseku a-b izpolnjen pogoj o kompleksni impedančni prilagoditvi. Prenos moči skozi presek a-b je tedaj maksimalen tako v ekvivalentnem kot v originalnem krogu. Ker med potjo ni izgube moči ($R = 0$), se maksimalna moč prenese prav do bremena. To

pomeni, da so kompleksno prilagojena vsa stičišča. Če ne bi bilo tako, ne bi dobili maksimalnega prenosa moči. Impedanco torej lahko prilagodimo v kateri koli točki voda med generatorjem in bremenom.

Če vod ni zaključen s karakteristično impedanco, lahko na njem najdemo mesto, kjer je realni del impedance voda enak karakteristični impedanci voda. Pri ubiralki najdemo to mesto s pomikanjem sonde vzdolž vodnika, vse dokler ne dosežemo največjega prenosa moči. Popolno kompenzacijo dosežemo tako, da sondo bolj ali manj potopimo v valovod. Tako namreč spreminjamo kapacitivnost voda. S tem prilagajamo susceptanco na vrednost reaktance in dosežemo zahtevano kompleksno impedančno prilagoditev generatorja na breme.