

OSNOVE MIKROVALOVNE TEHNIKE

NALOGA

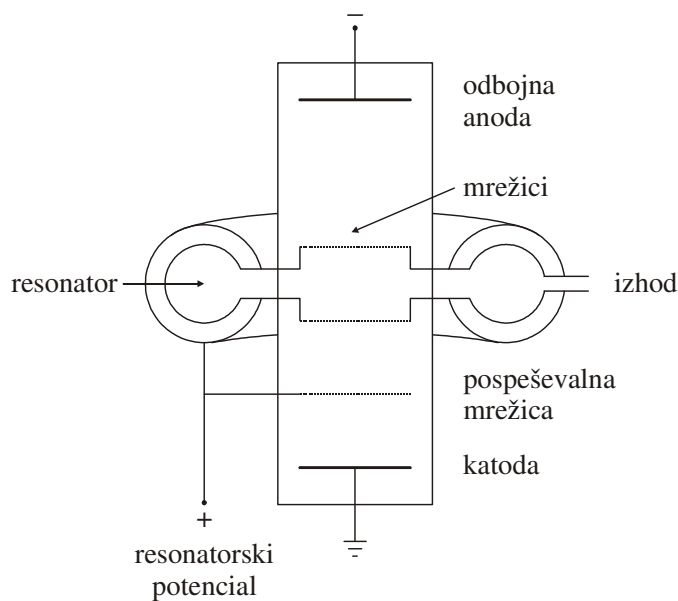
1. Prilagodite valovod na generator mikrovalov
2. Izmerite frekvenco valovanja z merilnikom frekvence
3. Posnemite rodove klitronovega delovanja v odvisnosti od odbojne napetosti s pisalnim instrumentom
4. Izmerite moči, ki jih porablja termistor v vrhovih najmočnejših rodov
5. S pisalnim instrumentom posnemite krivulji ubranosti za valovod, ki je zaključen z bremenom, in za kratko sklenjeni valovod

UVOD

Izvor mikrovalov

Mikrovalovi so elektromagnetno valovanje z valovno dolžino nekaj cm in frekvenco nekaj GHz. Kot izvor mikrovalov služijo klitroni: to so elektronke, ki imajo za pospeševalno mrezico 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 klitronu 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 klitron deluje kot oscilator. Pogoj za pozitivno povratno zvezo, s katero lastno nihanje v resonančni votlini vzdržuje samo sebe, je izpolnjen pri več diskretnih vrednostih napetosti: pravimo, da klitron deluje v različnih rodovih. Mikrovalovno elektromagnetno polje iz resonančne votline speljemo v valovod.

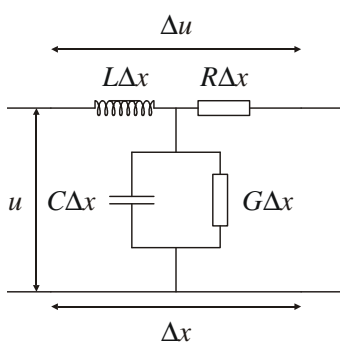


Slika 1: Refleksni klistron

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

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



Slika 2: Shematska ponazoritev majhnega dela mikrovalovnega vodnika

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

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 U in toka I 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

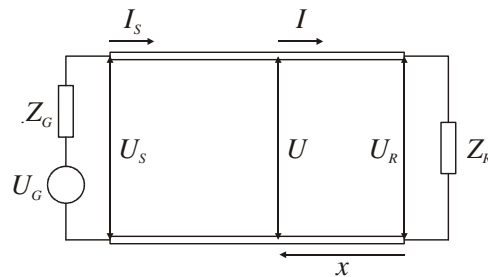
$$u(x, t) = A \exp(\gamma x + j\omega t) + B \exp(-\gamma x + j\omega t) = (U_i + U_r) \exp(j\omega t) \quad (13)$$

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 sta 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).



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 U_R napetost na porabniku

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 večja od $\lambda/4$, izgleda, kot da se je minimum premaknil proti generatorju.

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

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

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

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

enako normirana rezistanca pa je

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

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.

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:

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

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), 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, lahko tako neposredno določimo frekvenco valovanja v valovodu.

MERJENJE MOČI MIKROVALOV

Moč valovanja v valovodu najpogosteje merimo s termoelektričnimi elementi, ki se zaradi obsevanja z mikrovalovi segrejejo valovanja, 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** 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 Ω/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 Ω/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.

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 hrbe 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

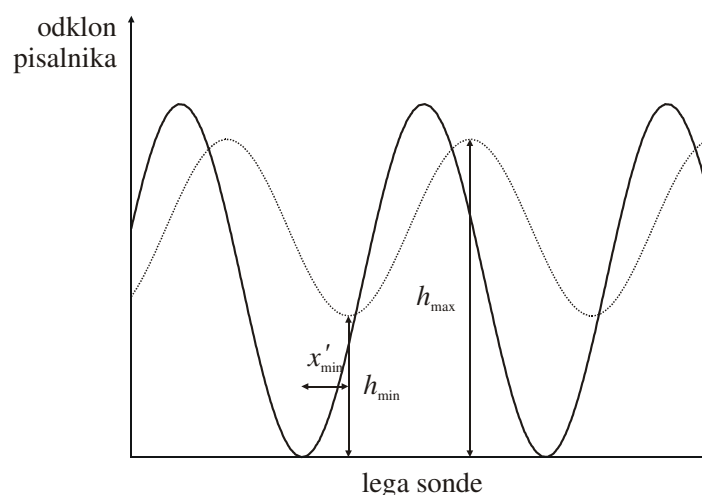
$$s = \frac{|U_{\min}|}{|U_{\max}|} = \sqrt{\frac{h_{\min}}{h_{\max}}}. \quad (39)$$

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

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

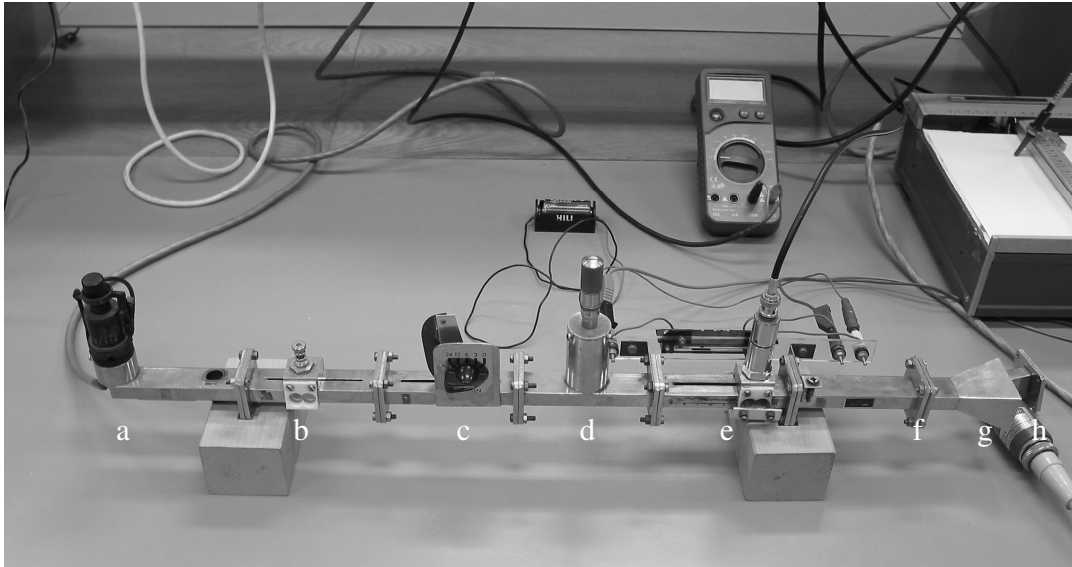
odkoder sledi, da je $\beta x_{\min} = 2\pi \frac{x_{\min}'}{\lambda'}$.



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

POTEK MERITVE

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



Slika 5: Elementi mikrovalovnega sistema: a) izvor, b) ubiralka, c) dusilka, d) resonator, e) merilni vod, f) kratkostična stena, g) antena, h) bolometer. V ozadju je videti voltmeter, s katerim merimo odbojno napetost na klistronu, in pisalnik.

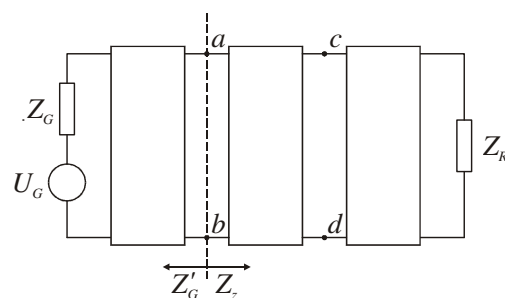
1. Prižgite napajalnik refleksnega klistrona. Ko se ta ogreva, povežite vhod Y pisalnega instrumenta (občutljivost: 20 mV/cm) z izhodom iz merilne sonde. Če sedaj počasi spreminjate odbojno napetost klistrona, se bo pisalo instrumenta odklonilo v smeri osi Y, spet padlo v prvotno lego itd. Prepričajte se, da resonator ni v resonanci z valovanjem v valovodu.
2. Izberite si enega od najmočnejših rodov in naravnajte odbojno napetost tako, da bo odklon pisala za ta rod največji. S premikanjem vozička na ubiralci lahko ta odklon močno spremenite. Pomaknite voziček v lego, kjer je odklon pisala največji. Izmenično vrtite vijak na ubiralci in premikajte voziček, dokler ni odklon pisala kar največji. 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 pisalo pisalnega instrumenta. Ko pride do resonance, se odklon pisala občutno zmanjša.
4. Vrtite gumb za nastavitev odbojne napetosti klistron iz ene skrajne lege v drugo in opazujte jakost mikrovalovnega valovanja v valovodu. Z univerzalnim instrumentom 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 vhom 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 pokrtil ničlo. Vključite še klistron in izmerite moči P_m v vrhovih najmočnejših rodov.
6. Vhod X pisalnega instrumenta priključite sedaj na eno od skrajnih sponk merilne linije in na drsnik, pola baterije pa na obe skrajni sponki. Povečajte občutljivost vhoda X na 5 mV/cm. Počasi premikajte voziček merilne linije od desne proti levi. Pisalni instrument nariše pri tem krivuljo ubranosti. Izklopite merilnik moči in odstranite prehodnik s termistorjem. Valovod zaključite s kratkostično steno in še enkrat posnemite krivuljo ubranosti. Absciso narišete tako, da izključite napajanje klistrona in nato zapeljete voziček vzdolž merilne linije. 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 ter opremite ordinato na sliki iz meritve 3 z merilom v milivatih.

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 prenešena 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.