

- [3] Brož J.: Elektřina a magnetismus II. Praha, SPN (skriptum), 1976, str. 21
- [4] Brož J. a kol.: Základy magnetických měření. Praha, nakl. ČSAV, 1953, str. 22
- [5] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, Praha, SPN, 1983, str. 431

## 29. ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

### Pracovní úkol

1. Zjistěte závislost intenzity přijímané vlny na úhlu vzájemného natočení přijímací a vysílací antény. Výsledky měření zpracujte graficky a zdůvodněte získaný výsledek.
2. Změřte závislost intenzity vysílané vlny na vzdálenosti od antény. Výsledek měření nakreslete do grafu.
3. Změřte průběh stojatých vln vzniklých interferencí vysílané a odražené vlny. Určete přibližnou hodnotu poměru stojatých vln a činitele odrazu kovové desky a desky z materiálu absorbujícího elektromagnetické vlny. Průběh intenzity v závislosti na vzdálenosti od desky znázorněte do grafu. Z grafu odečtěte délku vlny. Diskutujte naměřený průběh.

### Šíření vln ve vlnovodu

V oboru frekvencí elektromagnetických vln vyšších než 1000 MHz je vlnová délka vln ve vakuu natolik malá, že prakticky nelze zkonstruovat obvody a stavební elementy těchto obvodů, jejichž rozměry by byly zanedbatelně malé vůči vlnové délce. Hodnoty intenzity elektrického či magnetického pole se v daném časovém okamžiku mění podél obvodu. Mluvíme pak o síti s rozloženými parametry, jejíž řešení nelze provádět metodami používanými při kvasistacionárním přiblížení, ale je nutno vycházet z úplné soustavy Maxwellových rovnic.

V technice těchto velmi krátkých vln, decimetrových, centimetrových a milimetrových, nelze použít drátových vedení jako spojovacích vodičů. Tato vedení mají velmi velký útlum a kromě toho úseky drátového vedení, jejichž délka je srovnatelná s vlnovou délkou elektromagnetické vlny, značně vyzařují. Používá se proto jako napájecí a rozvodné vedení vlnovodů. Vlnovod tvoří dutina z nevodivé dielektrika uzavřená dobře vodivým pláštěm ze stříbra nebo mědi. Dutina je obvykle jednoduchého geometrického tvaru (hranol, válec, prostor mezi dvěma koaxiálními válci) a její příčné rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou. Uzavřený vlnovod nevyzařuje energii do

okolí a šíří se jím s malým útlumem elektromagnetické vlny, které mají vyšší kmitočet než určitý mezní kmitočet, daný geometrickými rozměry vlnovodu.

Vysokofrekvenční proud se šíří tenkou vrstvou na vnitřním povrchu pláště. Intenzity proudu exponenciálně ubývá směrem k vnějšímu povrchu pláště. Tloušťka pláště vlnovodu, jíž prakticky prochází proud, se charakterizuje hloubkou vniku, která je definována jako vrstva vodiče, která má při stejnosměrném proudu za předpokladu stejné šířky a délky stejný odpor jako vodič o velmi velké tloušťce, kterým prochází proud vysokofrekvenční. Pokud je vodič neferomagnetický, což je pravidlem, je hloubka vniku vlny o vlnové délce  $\lambda$  v materiálu s měrnou vodivostí  $\rho$  rovna

$$d = 2,906 \sqrt{\rho \lambda} \quad (1)$$

Vrstvou vodiče o tloušťce  $4,6 d$  protéká 99 % proudu. Jako příklad uveďme, že hloubka vniku stříbra, ze kterého se zhotovuje zpravidla vnitřní povrch pláště vlnovodu, je při vlnové délce 1 cm rovna  $0,371 \mu\text{m}$ , u mědi je o  $\sim 3\%$  větší.

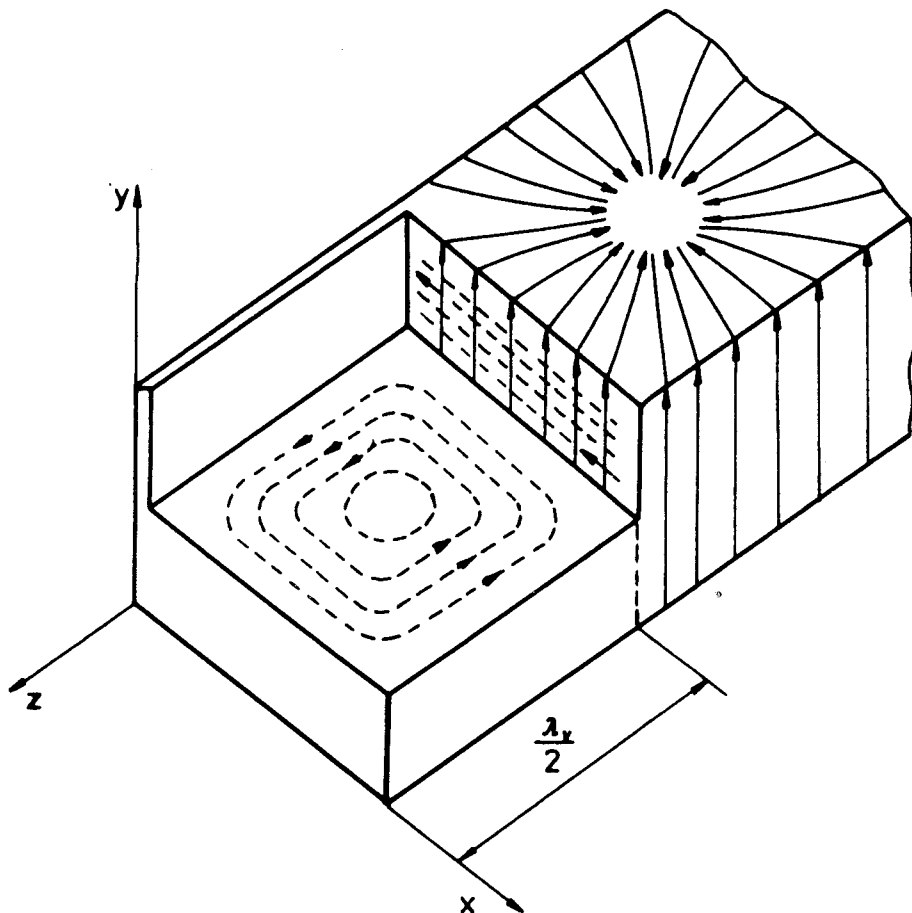
Průběh intenzity elektrického a magnetického pole ve vlnovodu lze určit z úplné soustavy Maxwellových rovnic. Lze ukázat, že intenzity pole lze vyjádřit jako superposici příčných elektrických a příčných magnetických vln. Příčnou elektrickou vlnou, kterou ve zkratce označujeme jako vlnu TE nebo vlnu H nazýváme elektromagnetickou vlnou, jejíž intenzita elektrického pole má složku ve směru šíření vlny identicky rovnou nule. Obdobně je tomu u příčné vlny magnetické TM nebo E, u které je identicky rovna nule složka intenzity magnetického pole ve směru šíření. U vlny TE je tedy intenzita elektrického pole v každém časovém okamžiku kolmá na směr šíření. U vlny TM je ke směru šíření naopak intenzita magnetického pole kolmá. V některých speciálních případech mohou existovat vlny TE a TM nezávisle na sobě. Jedním z těchto případů je právě vlnovod omezený ideálně vodivým pláštěm.

U úlohy používáme obdélníkové vlnovody, které jsou nejpoužívanějšími typy vlnovodu pro centimetrové a milimetrové vlny. U tohoto vlnovodu existuje poměrně široké pásmo vlnových délek elektromagnetického záření, ve kterém se vlnovodem šíří pouze jediný vid vlnění. Vid vlnění s nejdélší vlnovou délkou nazýváme dominantním. Jsou-li vnitřní rozměry vlnovodu  $a, b$  ( $a > 2b$ ), pak dominantním videm bude vid, který se označuje  $TE_{10}$ . Jeho mezní vlnová délka bude

$$\lambda_m = 2a \quad (2)$$

pokud je vlnovod vyplněn vzduchem. U tohoto vidu má intenzita nenulovou pouze složku  $E_y$  (viz obr.1).

$$E_y = (E_1 e^{\gamma z} + E_2 e^{-\gamma z}) e^{-j\omega t} \sin \frac{\pi}{a} x \quad (3)$$



Obr. 1

Zde znamená  $E_1$  amplitudu vlny šířící se kladným směrem osy  $z$ ,  $E_2$  amplitudu vlny opačného směru,  $\gamma$  je tak zvaná konstanta přenosu, která charakterizuje útlum vlny ve vlnovodu. Dále  $j$  znamená imaginární jednotku,  $\omega$  je kruhová frekvence a  $t$  čas. Na obr.1 je zakresleno schématicky rozložení siločar ve vlnovodu, čárkovaně jsou označeny magnetické a plně elektrické siločáry.

### Stojaté vlny

Z rovnice (3) je zřejmé, že pole ve vlnovodu se skládá ze dvou vln, vlny postupné a vlny odražené. Poměr jejich amplitud určuje činitel odrazu  $s_0$ . Pokud je činitel odrazu různý od nuly, vzniká ve vlnovodu superpozicí odražené a postupné vlny stojaté vlnění. Největší amplituda intenzity  $E_{\max}$  této stojaté vlny bude v místě, kde postupná a odražená kmitají se stejnou fází  $\phi = 0$ .

V tomto místě se budou amplitudy obou vln sčítat a bude platit

$$E_{\max} = E_1 + E_2 \quad (4)$$

Minimální intenzita pole ve vlnovodu bude naopak v místě, ve kterém kmitají obě vlny s opačnou fází

$$E_{\min} = E_1 - E_2 \quad (5)$$

Vzdálenost mezi po sobě následujícími maximem a minimem intenzity elektrického pole je rovna čtvrtině vlnové délky  $\lambda/4$ . Polohu minima je možno určit přesněji, neboť změna intenzity je v okolí minima ostřejší než v okolí maxima. Ze vzdálenosti dvou po sobě jdoucích minim, která je rovna  $\lambda/2$  je možno přibližně určit vlnovou délku.

Poměr stojatých vln  $S$  je definován jako

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (6)$$

$S$  činitelem odrazu  $s_0$  je vázán vztahem

$$S = \frac{1 + s_0}{1 - s_0} \quad (7)$$

Při odrazu na ideálně vodivé ploše je činitel odrazu  $s_0 = 1$  a poměr stojatých vln  $S$  je nekonečně velký.

### Šíření vlny volným prostředím

Trychtýřovou anténou, kterou je ukončen vlnovod naší aparatury, vytvoříme přibližně rovinnou vlnu. Směr šíření zůstane zachován ve směru osy  $y$  z vlnovodu. Za ideálních podmínek (pokud by vysílaná vlna byla opravdu rovinná, nedocházelo by k útlumu v prostředí, kterým se vlna šíří, a odrazům na okolních předmětech), bylo by možno vyjádřit intenzitu výrazem

$$E = E_y = E_0 e^{-j\omega t} \quad (8)$$

Záření vysílané by bylo monochromatické, koherentní a lineárně polarizované ve směru kratší strany vlnovodu (směr osy  $y$  na obr.1). Amplituda záření by byla nezávislá na vzdálenosti od antény. Jelikož však vyzařovaná vlna není rovinná, bude se intenzita elektrického pole zmenšovat se vzdáleností od antény. Kdyby vyzařovaná vlna byla kulová, měnila by se intenzita pole nepřímo úměrně druhé mocnině vzdálenosti od antény. Lze očekávat, že závislost intenzity na vzdálenosti  $z$  od antény bude udávat výraz

$$E_0 = K z^{-n} \quad 0 < n < 2 \quad (9)$$

Časovou závislost intenzity ve výrazu (9) neuvažujeme. Budou-li ve směru vysílané vlny předměty, na kterých dojde k odrazu, vytvoří se interferenci stojaté vlny, které vyvolají jisté zvlnění vůči průběhu podle vztahu (9). Zvlnění bude tím výraznější, čím větší bude intenzita odražené vlny.

Stojaté vlny můžeme vytvořit, postavíme-li kolmo ke směru šíření postupné vlny vodivou odrazovou desku. Pokud by docházelo k totálnímu odrazu

(vodivost povrchu desky  $\sigma \rightarrow \infty$ ) a dopadající a odražená vlna byly rovinné, byl by činitel stojatých vln nekonečně velký ( $S \rightarrow \infty$ ). Žádná z těchto podmínek nebude přesně splněna. Největší činitel stojatých vln naměříme v blízkosti odrazné desky a bude se zmenšovat směrem k anténě. Tento výsledek je způsoben zmenšováním intenzity odražené a zvětšováním intenzity postupné vlny v důsledku divergence svazku.

Jestliže nahradíme odraznou, dobře vodivou desku s činitelem odrazu  $s_0 \approx 1$  prostředím s podstatně menší vodivostí, postupná vlna se bude částečně pohlcovat v tomto prostředí a činitel odrazu  $s_0$  bude menší než jedna. Důsledkem jevu bude snížení poměru stojatých vln v prostoru mezi anténou a odraznou plochou.

### Prvky použité ve vlnovodové aparatuře

#### a) Oscilační elektronka - klystron

Běžné elektronky s hustotní modulací elektronového svazku, používané v nízkofrekvenční technice, se nedají použít jako oscilační elektronky pro decimetrové a kratší vlnové délky. Důvodem je dlouhá průletová doba elektronů mezi anodou a katodou, srovnatelná s dobou vysokofrekvenčního kmitu, velké mezielektrodové kapacity, obtížné impedanční přizpůsobení elektronky k obvodům ap.

Tyto obtíže jsou odstraněny u elektronek s rychlostní modulací elektronového svazku. V místě interakce elektromagnetického pole s elektronovým svazkem se mění rychlost elektronů v rytmu časového průběhu pole. Po proběhnutí určité vzdálenosti se vytvoří fázový souběh elektronů. V těchto místech je modulace elektronů a z elektronového svazku je možno odebírat výkon. Místo, ve kterém se vyvolává rychlostní modulace a místo odběru výkonu mohou být totožné, jak je tomu např. u reflexního klystronu. Svazek se moduluje v toroidním rezonátoru a pohybuje se směrem k elektrodě nazývané reflektor, která má vůči rezonátoru i katodě záporný potenciál. Pole reflektoru vrací elektronový svazek zpět do rezonátoru, kde při vhodné volbě potenciálu elektrod dojde právě k fázovému souběhu a tím k hustotní modulaci svazku. Pole hustotně modulovaného svazku budí zpětné kmity v rezonátoru.

Klystrony se používají především v pásmu centimetrových a milimetrových vln jako generátory vlnění o malém výkonu ( $\sim 10^{-2}$  W). Jejich hlavní nevýhodou je obtížné ladění, které je nutno provádět změnou rozměru rezonátoru a napětím reflektoru. Při daném rozměru rezonátoru lze změnou potenciálu elektrod měnit frekvenci pouze v úzkém oboru, řádově několika procent.

#### b) Zeslabovač (atenuátor)

Tyto prvky slouží k regulaci výkonu v obvodu. Absorbuje se jimi částečně nebo i zcela výkon, který na ně dopadá. V principu jsou konstruovány jako odporové nebo odrazové. V prvním typu dochází k absorpci přeměnou elektromagnetické energie v Jouleovo teplo na destičkách u odporového materiálu nebo ztrátového dielektrika vloženého do vlnovodu. Útlum způsobuje skleněná destička, na které je vakuově napařena vrstva nichromu a která se pohybuje

na dvou vodících kolících podél širší stěny vlnovodu. V destičce se absorbuje nejmenší výkon, je-li destička v místě minima intenzity elektrického pole, tj. u stěny vlnovodu. Přemístíme-li destičku do středu vlnovodu, kde je intenzita dominantního vidu  $TE_{10}$  obdélníkového vlnovodu maximální, způsobí destička největší útlum vlny postupující vlnovodem. Útlum zeslabovače, definovaný jako

$$\gamma = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad , \quad (10)$$

( $P_1$  je výkon dopadající na zeslabovač,  $P_2$  je výkon prošlý zeslabovačem) lze měnit v závislosti na poloze destičky v rozmezí asi 0,1 až 50 dB. Zeslabovač lze oceňovat s přesností asi 0,1 - 0,01 dB.

### c) Detekční prvky

K detekci (usměrnění) vysokofrekvenčního proudu se používá speciálních hrotových křemíkových diod. Tyto diody musí mít minimální vlastní kapacitu. Rozměrově jsou přizpůsobeny vlnovodu, mají válcovitý tvar a na podstavcích válečku je vyvedena anoda a katoda. Do elektrického pole se vkládá tak, aby osa válečku byla rovnoběžná s intenzitou elektrického pole. Detekovaný proud se měří citlivým měřicím přístrojem, galvanometrem nebo mikroampérmetrem.

Diody mají většinou přibližně kvadratickou charakteristiku. Proud diodou je úměrný kvadrátu intenzity pole v místě diody

$$i = k E^2 \quad . \quad (11)$$

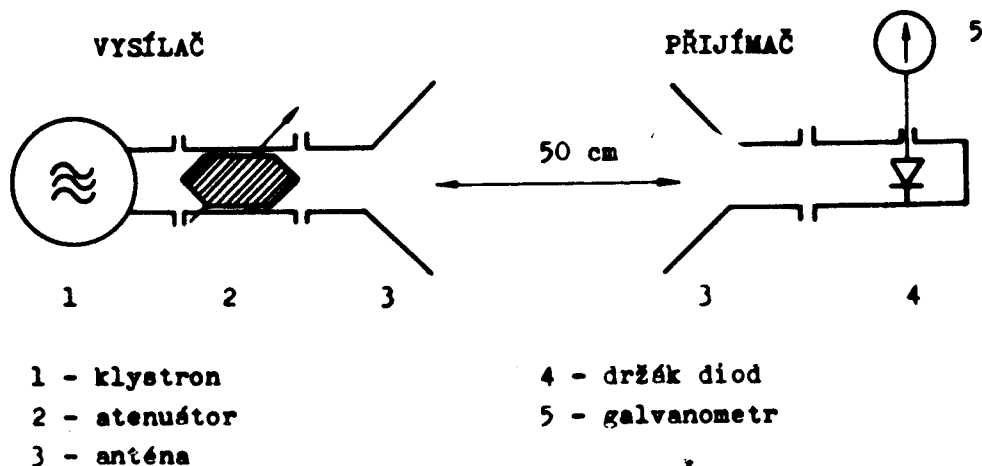
Pro přesná měření je nutno diody cejchovat. Vzhledem ke kvadratické charakteristice určujeme poměr stojatých vln jako odmocninu z podílu výchylek měřicího přístroje v maximu a minimu.

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}} \quad . \quad (12)$$

Diody se umísťují v držácích diod. Je-li držák diody součástí vlnododové aparatury, je tvořen úsekem vlnovodu uzavřeným na jednom konci nakrátko. Dioda je v místě s největší intenzitou elektrického pole, tj. vzdálena o  $\lambda_v / 4$  od konce vlnovodu. Zkrat se realizuje posuvným pístem, jehož posuvem lze dosáhnout optimálního přizpůsobení diody k vedení. Dioda, kterou měříme intenzitu pole ve volném prostředí, je umístěna na nosníku z pěnového polystyrenu. Permittivita tohoto materiálu se liší od permitivity vzduchu pouze o 3 % a jeho vodivost je zanedbatelná. Tímto držákem ovlivníme průběh pole jen nepatrně. Vývody od diody jsou provedeny z tenkého drátu a zakončeny ve zdíčkách na spodku držáku.

## Pokyny pro měření

Aparaturu sestavte podle blokového schématu, obr. 2 .



Obr. 2

Atenuátorem nastavte vhodnou úroveň přijímaného signálu. Aby nedošlo k ovlivňování generátoru odraženou vlnou, musí být útlum nejméně 3 dB . Správnou funkci klystronu lze zjistit tak, že zvyšujeme napětí reflektoru a sledujeme anodový (rezonátorový) proud. Při vybuzení klystronu vykazuje anodový proud malý lokální vzrůst. Napětí reflektoru je nutno nastavit tak, aby odpovídalo některému z těchto extrémálních proudů. Při měření natáčejte přijímací anténu. Osy přijímací a vysílací antény mají být při měření totožné.

Při měření druhého pracovního úkolu odstraňte z optické lavice přijímací anténu s držákem diody a upevněte na ní diodu v polystyrenovém držáku. Výšku vysílací antény upravte tak, aby dioda byla v ose antény. Obejďte, aby ve směru šíření vlny nebyly postaveny překážky, zejména kovové.

Kovovou desku upevněte na konec optické lavice vzdálenější od antény. Diodou umístěnou na polystyrenovém držáku změřte průběh několika půlvln co nejblíže u odrazné desky. Při všech měřeních je výhodné využívat maximální citlivosti galvanometru a nastavit útlum atenuátoru tak, aby výchylka v maximu intenzity byla přes celou stupnici galvanometru.

## Literatura

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření II A,  
SPN, Praha 1967, odd. 4