

Požadavky ke zkoušce z předmětu ELEKTRONIKA – téma vznik a šíření elektromagnetických vln

1. **Vznik elektromagnetických vln**, uzavřený a otevřený oscilační obvod. Vysvětlit pojem indukční elektromagnetické pole mezi deskami kondenzátoru a zářivé elektromagnetické pole u otevřeného oscilačního obvodu.
2. **Jak se šíří elektromagnetické pole radiových vln**, pojem kulová a rovinná vlnoplocha).
Vektor intenzity **E** je vždy kolmý na vektor intenzity **H**. Rovina určená těmito vektory se nazývá rovina vlnění.
3. **Rychlost šíření elektromagnetické vlny c**- pole se šíří rychlostí **c** ve směru kolmém na rovinu vlnění, rovinu vlnění nazýváme čelo vlny. Radiové vlnění je vlnění příčné, neobsahující složky pole ve směru vlnění. Pro rychlost šíření platí v obecném prostředí:

$$c = c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}}$$

pro konstanty platí- $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ permitivita vakua
 $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ permeabilita vakua

ϵ_r – relativní permitivita- bezrozměrné číslo, které udává kolikrát je permitivita daného dielektrika větší než permitivita vakua
 μ_r – relativní permeabilita- bezrozměrné číslo, které udává kolikrát je permeabilita daného dielektrika větší než permeabilita vakua

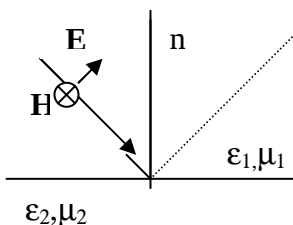
ve volném prostředí platí $\epsilon_r = \mu_r = 1$ takže platí:

$$c = c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

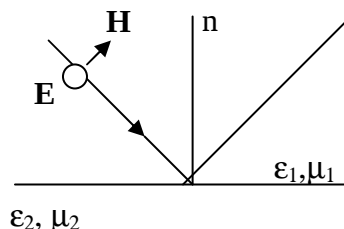
Pokud se radiová vlna šíří v nehomogenním prostředí vzniká na rozhraní dvou prostředí s různými materiálovými konstantami částečný odraz a průnik od daného prostředí. Působí zde zákony optiky, Snellův zákon a Fresnelovy vorce o odrazu a průniku. O tom jaká bude amplituda a směr šíření vlny odražené a vlny která proniká do druhého prostředí, rozhodují ne jen materiálové konstanta prostředí ϵ, μ , ale i vlnová délka λ přicházející radiové vlny a její polarizace.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{m, ms}^{-1}, \text{s})$$

4. **Polarizace radiové vlny**- pro určení polarizace radiové vlny musíme nejdříve určit rovinu dopadu. Rovina dopadu je rovina určená směrem šíření a kolmicí na rozhraní prostředí, od kterého se radiová vlna odráží.



obr.1 vertikálně polarizovaná vlna



obr.2 horizontálně polarizovaná vlna

Leží-li vektor E v rovině dopadu, je vlna vertikálně polarizovaná, je-li vektor E kolmý na rovinu dopadu je vlna horizontálně polarizovaná.

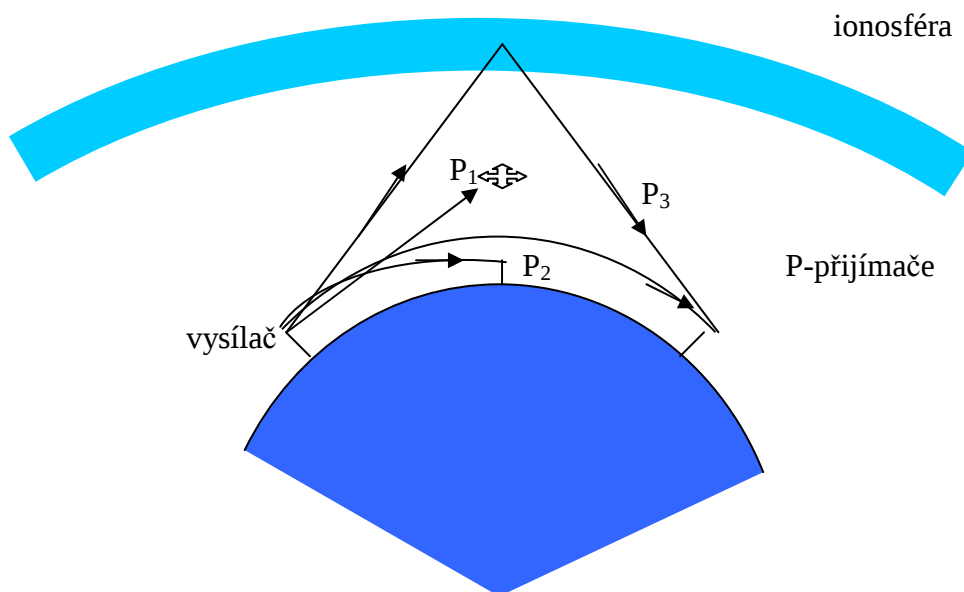
5. **Vlnový odpor prostředí**- poměr mezi amplitudami složek pole E a H je stálý a určuje jej tzv. vlnová impedance prostředí Z. Pro vlnovou impedanci platí:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}; [V/m, A/m, \Omega]$$

Ve volném prostoru, kde $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m) a $\epsilon = \epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^{-9})$ (F/m) je vlnová impedance

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^{-9})}} = 120\pi = 376\Omega$$

6. **Přenosové cesty rádiových vln**- a) elektromagnetické pole se může šířit k přijímací anténě přímo volným prostorem- vznikne tzv. **prostorová vlna P₁**. Na její šíření nemá vliv ani ionosféra, ani povrch země.
 b) šíří-li se elektromagnetická vlna podél zemského povrchu, mluvíme o **povrchové vlně P₂**. Útlum povrchové vlny závisí na její vlnové délce a na vlastnostech povrchu země.
 c) pokud se radiová vlna dostává do místa příjmu po odrazu, např. od horních vrstev ionizované atmosféry, nazývá se **ionosférická prostorová vlna P₃**.



obr.3 Způsoby šíření rádiových vln

7. Definujte pojem ionosféra, její vlastnosti a rozdělení na jednotlivé vrstvy, vliv ionosférických vrstev na šíření elektromagnetických vln.

Zemský vzdušný obal (atmosféra) je nad zemským povrchem značně různorodý. Vrstva do cca 10 km se nazývá troposféra. V této vrstvě se uplatňují meteorologické změny.

Vrstvy ovzduší od 10 do 60 m se nazývají stratosféra. S rostoucí vzdáleností od země se stále více uplatňuje vliv slunečního záření na částice prostředí, vzniká ionizace vzduchu a proto těmito vrstvám – od 60 km výše – říkáme ionosféra. Jde o nehomogenní částečně vodivý plyn, ve kterém se radiové vlny nešíří přímočaře nýbrž po křivé dráze. Elektrony s ionty plynů se po dopadu radiových vln rozkmitají, a podle Huygensova principu způsobí další, sekundární vlnění, jehož směr se od původního liší. Vzniká tím ohyb, který se projeví jako odraz rádiových vln. Ve vyšších vrstvách atmosféry nastává rozvrstvení plynů podle jejich molekulárních vah. Ionizující záření není monochromatické a může vykazovat značné výkyvy ve své intenzitě. Ionizace vzduchu není plynulá, má několik maxim. Byla zjištěna čtyři výrazná maxima ionizace a jednotlivé vrstvy tak byly označeny písmeny v pořadí D; E; F₁; F₂.

Vrstva D je ve výšce 60 až 80 km, její vliv na šíření rádiových vln se projevuje pouze v denních hodinách. Po západu slunce, kdy nízké vrstvy ji nejsou ionizovány, dojde ke spojení elektronů s ionty (rekombinace) a vrstva zaniká. Nejvyšší koncentrace je max. $5 \cdot 10^3$ elektronů na cm^3 .

Vrstva E je ve výšce 110 až 120 km. tato vrstva se vyznačuje stálostí svých parametrů. V denní době je koncentrace asi $2 \cdot 10^5$ na cm^3 , v noci klesá koncentrace vlivem rekombinace na cca $1 \cdot 10^4$ na cm^3 . Tuto koncentraci zachovává vrstva po celou noc.

Vrstva F je značně ionizována. Její výška i elektronová koncentrace se značně mění. Vrstva se ve dne v letním období štěpí na dvě vrstvy F_1 a F_2 , které po setmění opět splynou v jednu vrstvu F. Vrstva má velkou koncentraci elektronů, v maximu dosahuje až hodnot $5 \cdot 10^6$ elektronů na cm^3 . Všechny rádiové vlny však ani tato vrstva neodráží, některé kmitočty mohou za určitých podmínek vrstvou proniknout. Vrstva F odráží všechny rádiové vlny pro které je splněna nerovnost;

$$f < \sqrt{\frac{80,8 \cdot N \left(1 + \frac{2h}{r_z}\right)}{\sin^2 \beta + \frac{2h}{r_z}}}$$

N - koncentrace elektronů, h výška vrstvy nad povrchem země, f kmitočet rádiové vlny, β elevační úhel pod kterým je paprsek vyslán, r_z poloměr zeměkoule $6,36 \cdot 10^6$ m.

Jednotlivé vrstvy ionosféry se vyznačují tzv. kritickým kmitočtem, je to nejvyšší kmitočet rádiové vlny vysílané kolmo k ionosféře, který vrstva ionosféry ještě odráží..

$$f_{kr} = \sqrt{80,8 \cdot N} \quad [\text{Hz}; \text{elektronů}/\text{m}^3]$$

př. 1 Při měření na ionosférické stanici byl naměřen kritický kmitočet vrstvy E $f_{kr} = 4$ MHz . Určete příslušnou elektronovou koncentraci.

$$N = \frac{f_{kr}^2}{80,8} = \frac{(4 \cdot 10^6)^2}{80,8} = 1,98 \cdot 10^{11} \text{ elektronů} / \text{m}^3$$

8. Rovnice rádiového přenosu

Mezi základní úlohy přenosu rádiových vln patří výpočet intenzity elektromagnetického pole, které vytvoří vysílač v jisté vzdálenosti při daném výkonu. Z Maxwellových rovnic vyplývá, že množství energie elektromagnetického pole prošlé za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr šíření, je dáno vektorovým součinem obou složek pole

$$\mathbf{p} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

p- vektor (Poyntingův vektor) vyjadřuje intenzitu toku energie elektromagnetického pole..Pro velikost Poyntingova vektoru platí

$$p = EH \sin \alpha$$

Pro volný prostor, kde platí $Z = Z_0 = 120\pi$ můžeme určit intenzitu elektrické složky pole ze vztahu;

$$E_{ef} = \sqrt{120\pi \cdot p_{ef}} \quad [\text{V/m}; \text{W}/\text{m}^2] \quad 1.1$$

9. Základní přímé rovnice pro šíření prostorové vlny v dielektrickém prostředí

Budeme-li uvažovat všesměrový, (izotropický) zářič s vyzařovaným výkonem P , pak tento zářič vytvoří na kulové vlnoploše s poloměrem r plošnou hustotu výkonu

$p_{ef} = \frac{P}{4\pi r^2}$ téměř každá antenna má určitý směrový účinek, směřuje vyzařovaný výkon do některého směru na úkor vyzařování do ostatních směrů. Bezeztrátová směrová anténa s vyzařovaným výkonem P, která ve srovnání s izotropickým zářičem vykazuje směrovost D (skutečná směrová anténa s účinností η má zisk $G = \eta D$) vytvoří v daném místě příjmu stejnou intenzitu pole jako izotropní zářič s vyzařovaným výkonem PD, tedy platí

$p_{ef} = \frac{PD}{4\pi r^2}$ po dosazení tohoto výrazu do rovnice 1.1 dostaneme základní rovnici rádiového přenosu pro přímou prostorovou vlnu v dielektrickém prostředí.

$$E_{ef} = \sqrt{120\pi \cdot \frac{PD}{4\pi r^2}} = \frac{\sqrt{30PD}}{r} \quad (\text{Vm}^{-1}; \text{W}, -, \text{m}) \quad 1.2$$

Po zavedení praktických jednotek upravíme rovnici na tvar

$$E_{ef} = \frac{173 \cdot \sqrt{PD}}{r} \quad (\text{mVm}^{-1}; \text{kW}, -, \text{km}) \quad 1.3$$

Přenos přímou prostorovou vlnou se uplatní jen při použití výrazně směrových antén, je-li současně přijímací anténa dostatečně vysoko nad povrchem země. Bude-li anténa umístěna blízko země, pak bude přijímat vlnu přímou i odraženou a při dokonale vodivé odrazné rovině a soufázovém působení obou vln je plošná hustota výkonu v místě příjmu dvojnásobná. Potom bude platit:

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{60PD}}{r} \quad (\text{Vm}^{-1}; \text{W}, -, \text{m}) \quad \text{nebo} \quad 1.4$$

$$E_{ef} = \frac{245 \cdot \sqrt{PD}}{r} \quad (\text{mVm}^{-1}; \text{kW}, -, \text{km}) \quad 1.5$$

10. Šíření elektromagnetických vln různých kmitočtů

10.1 Šíření velmi dlouhých vln a dlouhých vln

Velmi dlouhé vlny VDV (myriametrové) o vlnové délce 100 až 10 km; 3 až 30 kHz a *dlouhé vlny DV (kilometrové)* o vlnové délce 10 až 1 km; 30 až 300 kHz, se používají pro spojení na velké vzdálenosti. Přízemní (povrchová) vlna se šíří ohybem kolem zemského povrchu a podle vysílaného výkonu má dosah 1 000 až 2 000 km. Tyto vlny se však šíří velmi dobře prostorovou vlnou, která využívá vlnovod mezi zemským povrchem a vrstvou D (ve dne) a vrstvou E (v noci) až na vzdálenost mnoha tisíc kilometrů. Toto spojení umožní při využití vysílačů s výkonem několik MW, velmi dobré spojení s loděmi na všech oceánech, při využití vlnovodu na rozhraní prostředí mezi dnem moří a vodou i spojení s ponorkami pod hladinou moře.

Text slouží pouze pro vnitřní potřeby SOŠ a SOU Hradební 1029, Hradec Králové
vytvořil: ing. Jáchym Vacek

10.2 Šíření středních vln

Střední (hektometrové) vlny SV 1000 až 100 m ; 300 až 3000 kHz se šíří vlnou povrchovou i prostorovou- odrazem od vrstvy E. Dosah šíření je menší než u VDV a DV. V denní době je vrstva E vlivem působení slunce nízká. Prostorová vlna prochází vrstvou D a po odrazu od vrstvy E je silně tlumena. Proto se v denní době šíří SV převážně povrchovou vlnou. Po západu slunce zanikne vrstva D a část vrstvy E , a začíná se uplatňovat odraz od vrstvy E. Zvýšení intenzity pole prostorových vln po setmění má za následek kolísání intenzity příjmu, vzniká únik (fading)

10.3 Šíření krátkých vln

Krátké (dekametrové) vlny (KV , 100 až 10 m, 3 až 30 MHz) mají při obvyklých výkonech dosah přízemní vlny pouze několik desítek kilometrů- vzniká velký útlum nad polovodičným povrchem země. Na velké vzdálenosti se KV šíří prostorovými vlnami mnohonásobnými odrazy od vrstvy F ionosféry. Při vytváření krátkovlnného rádiového spojení na danou vzdálenost s použitím prostorové vlny vysílané pod potřebným elevačním úhlem β musí být splněny určité podmínky.

- nejvyšší použitelná frekvence (MUF – Maximum Usable Frequency) se musí od ionosféry odrazit směrem k zemi
- nejnižší použitelná frekvence (LUF - Lowest Usable Frequency) je dána potřebnou velikostí intenzity pole v místě příjmu. Signál KV je tlumen dvojnásobným průchodem vrstvou D a spodní částí E. Přitom vrstva E má pro KV konstantu útlumu $\delta = f^2$, tedy tlumí signál tím méně, čím je kmitočet vyšší.

10.4 Šíření velmi krátkých vln a UKV

Velmi krátké vlny(metrové) VKV, 10 až 1 m, 30 až 300 MHz) se zpravidla šíří pouze pomocí přímých prostorových vln, popřípadě odrazem od země, nebo jiných překážek. Za normálních podmínek pronikají tyto vlny všemi vrstvami ionosféry a neodrážejí se. Mluvíme zde o šíření na tzv. přímou viditelnost. Intenzitu elektrického pole v určité vzdálenosti , můžeme určit pomocí *Vvedenského vztahu*

$$E_{ef} = \frac{2,18 h_1 h_2 \sqrt{PD}}{\lambda r^2} \quad (\text{ mV/m ; m , m , kW, - , m , km })$$

dosah na optickém horizontu r_o vypočítáme ze vztahu

$$r_o = 3,57 \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \quad (\text{ km ; m , m })$$

dosah na rádiovém horizontu r_r vypočítáme ze vztahu

$$r_r = 4,12 \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right) \quad (\text{ km ; m , m })$$

př.1

Pro televizní vysílač s vyzařovaným výkonem $PD = 100 \text{ kW}$, vlnovou délkou $\lambda = 5 \text{ m}$, horizontální polarizací a výškou vysílací antény $h_1 = 200 \text{ m}$, určete při výšce přijímací antény $h_2 = 10 \text{ m}$

- intenzitu elektrického pole ve vzdálenosti $r = 30 \text{ km}$
- dosah na optickém horizontu r_o
- dosah na rádiovém horizontu r_r

a) Intenzitu elektrického pole vypočítáme:

$$E_{ef} = \frac{2,18 \cdot 200 \cdot 10 \cdot \sqrt{100}}{5 \cdot 30^2} = 9,69 \text{ mV / m}$$

b) Dosah na optickém horizontu r_o

$$r_o = 3,57(\sqrt{200} + \sqrt{10}) = 61,78 \text{ km}$$

c) Dosah na rádiovém horizontu r_r

$$r_r = 4,12(\sqrt{200} + \sqrt{10}) = 71,29 \text{ km}$$

Na vkv a ukv lze za určitých podmínek uskutečnit dálkové spojení atmosférickým vlnovodem a s využitím rozptylu elektromagnetického pole na nehomogenitách troposféry. Stav atmosférického vlnovodu se objevuje při teplotní inverzi a při ubývání vlhkosti s výškou.