

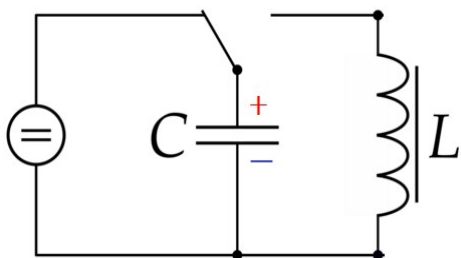
24. Elektromagnetické kmitání a vlnění

1. Elektromagnetické kmity (elektromagnetický oscilátor, rozbor elektromagnetických kmitů, elektromagnetický oscilátor v praxi)
2. Elektromagnetické vlny (jejich vznik ve vedení, podstata, rovnice postupné elektromagnetické vlny, šíření elektromagnetické vlnění prostorem, odraz, lom, ohyb, interference)
3. Spektrum elektromagnetického vlnění (podstata elektromagnetického vlnění, rozdělení podle vlnových délek, jejich charakterizace a vznik)
Elektromagnetické záření tepelných zdrojů (tepelné záření a teplota, zákony tepelného záření)
4. Záření černého tělesa
5. Základy radiometrie a fotometrie (světelný tok, svítivost, osvětlení, jejich vztahy a jednotky)

1. Elektromagnetické kmity

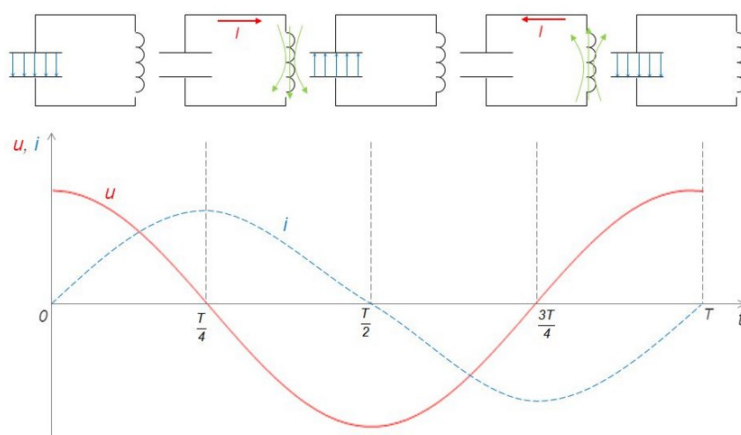
Vznik elektromagnetických kmitů:

Oscilační obvod vznikne zapojením kondenzátoru a cívky do schématu na obrázku:



Stejným zdrojem nabijeme kondenzátor. Dejme tomu, že horní deska z obrázku se nabije kladně a spodní záporně. V nabitém kondenzátoru se nyní soustředila veškerá energie obvodu. Po přepnutí přepínače teče proud z kladně nabitě desky kondenzátoru na zápornou. Protéká-li proud obvodem, vytváří cívka kolem sebe magnetické pole. V tomto

okamžiku je zase energie obvodu soustředěna v magnetickém poli cívky. Po protečení proudem obvodem se kladně nabije spodní deska kondenzátoru. Nabitý kondenzátor opět soustřeďuje veškerou energii obvodu. Proces se opakuje. Obvod vykoná jeden kmit, očitne-li se kondenzátor poprvé nabitý na stejnou polaritu jako při přepnutí přepínače:



Perioda vlastního kmitání elektromagnetického oscilátoru tvořeného cívkou o indukcí **L** a kondenzátorem o kapacitě **C** je dána Thomsonovým vztahem:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

Frekvence vlastních kmitů je dána vztahem:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

Poznámka: Vztahy pro periodu a frekvenci vycházejí z podmínky rovnosti napětí na cívce a na kondenzátoru:

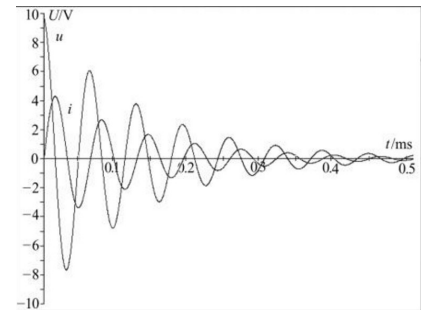
$$U_C = U_L$$

$$X_C = X_L$$

$$X_C \cdot I = X_L \cdot I$$

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L$$

Vlastní kmitání takového oscilátoru je vždy tlumené. Jeho průběh bychom mohli znázornit v grafu zobrazujícím napětí na kondenzátoru v závislosti na čase třeba tak jako na obrázku.



Z výše popsaného vyplývá, že chceme-li, aby oscilátor kmital harmonicky bez tlumení, bude potřeba doplňovat energii, kterou během kmitání „ztrácí“ například přeměnou na teplo v propojovacích vodičích nebo vyzářením magnetickým polem.

Nucené kmitání pak bude probíhat s frekvencí nutícího obvodu.

Pokud se frekvence nuceného kmitání bude shodovat s frekvencí vlastních kmitů, dojde v obvodu k rezonanci. V obvodu pak elektromagnetické kmity dosahují maximálních možných hodnot (amplituda proudu, popř. napětí dosahuje maximální hodnoty).

V okamžiku, kdy je veškerá energie soustředěná v kondenzátoru (je plně nabit), je možné její velikost určit ze vztahu:

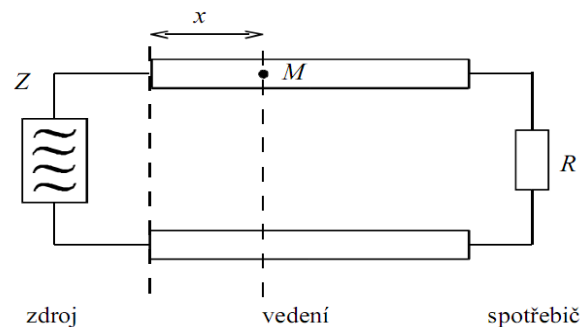
$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

V okamžiku, kdy je veškerá energie soustředěná v magnetickém poli cívky, je možné její velikost určit ze vztahu:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

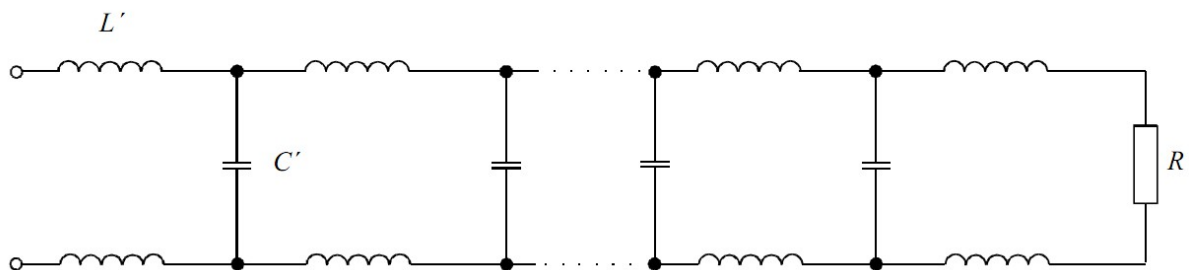
2. Elektromagnetické vlny

Připojíme-li spotřebič vedením ke zdroji napětí vysoké frekvence, napětí zdroje se velmi rychle mění a napětí v jednotlivých bodech vedení je funkcí času a vzdálenosti x uvažovaného bodu M vedení od zdroje napětí.



Vedení můžeme přirovnat k pružnému vlákně, tj. k řadě oscilátorů spojených vazbou, díky které se šíří mechanické vlnění. Vedení tvořené

dvěma vodiči si pak můžeme představit jako řadu elementárních oscilačních obvodů spojených vazbou. Jako u pružného vlákna je hmotnost a pružnost rovnoměrně rozestřena podél vlákna, tak i u vedení je rozestřena rovnoměrně jeho indukčnost a kapacita:



Rozkmitáme-li první elementární oscilační obvod, postupně se rozkmitají další elementární oscilační obvody a vedením se šíří elektromagnetická vlna. V libovolném bodě M vedení ve vzdálenosti x od zdroje a v čase t je mezi vodiči napětí:

$$u = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

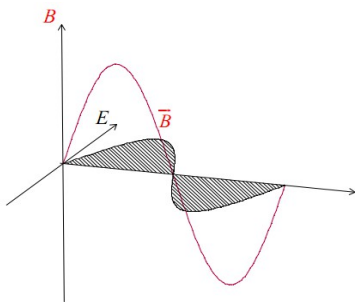
Výše uvedená rovnice se nazývá **rovnici postupné elektromagnetické vlny**.
 uokamžitá hodnota napětí mezi vodiči v místě vzdáleném x od zdroje a v čase t
 U_m ...amplituda napětí zdroje
 Tperioda kmitů zdroje
 λvlnová délka

Rychlost elektromagnetického vlnění je $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Hodnota vyplývá mimo jiné z Maxwellových rovnic:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Je-li na konci vedení spotřebič - rezistor, spotřebuje veškerou energii => napětí a proud budou ve fázi.

\vec{B} největší tam, kde je v daném okamžiku největší i
 \vec{E} největší tam, kde je v daném okamžiku největší u



\vec{B} a \vec{E} jsou navzájem kolmé a jsou kolmé i na směr šíření vlny

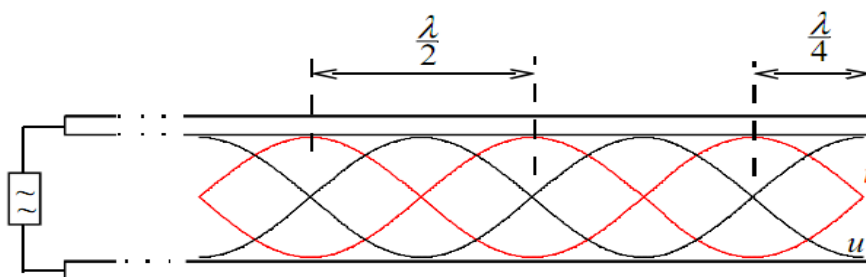
Při přenosu elektromagnetické energie vzniká mezi vodiči vedení časově proměnné silové pole, které má složku elektrickou a složku magnetickou a nazývá se elektromagnetické pole. Energie není přenášena vodiči, ale polem mezi vodiči. Tento děj má charakter vlnění. Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné.

Odrážení - stojaté elektromagnetické vlnění

Není-li na konci vedení žádný spotřebič, mluvíme o vedení naprázdno. V takovém případě dojde k odražení elektromagnetického vlnění a odražená a primární vlna interferují (skládají se). Vzniká stojaté elektromagnetická vlna:

Na konci:

$R \rightarrow \infty$ u – stále maximální \Rightarrow **kmitna**
 i – stále nulové \Rightarrow **uzel**

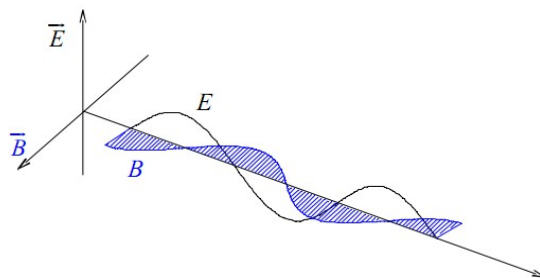


Místo s minimálním napětím se nazývá uzel napětí, místo s maximálním napětím se nazývá kmitna napětí. Vzájemná vzdálenost dvou nejbližších uzlů napětí je rovno **polovině vlnové délky**. Vzdálenost nejbližšího uzlu a nejbližší kmitny napětí je **čtvrt vlnové délky**. Napětí a proud jsou u

stojatého vlnění vzájemně posunuty o $\frac{\pi}{2} \left(\frac{\lambda}{4} \right)$.

V okamžiku, kdy napětí má v kmitnách největší hodnotu, je proud v celém vedení roven nule. Veškerá energie elektromagnetické vlny se přeměnila v energii elektrického pole. Naopak, když je proud v kmitnách největší, je podél celého vedení nulové napětí a energie elektromagnetické vlny je soustředěna v magnetickém poli. Stojatým elektromagnetickým vlněním se energie nepřenáší, ale jen se mění z energie elektrického pole v energii magnetického pole a naopak. Vektory \vec{B} a \vec{E} jsou

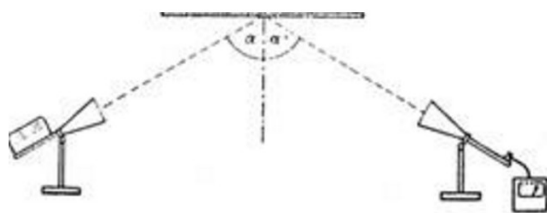
časově proměnné a posunuté o $\frac{\pi}{2}$ (viz obrázek).



Odraz, lom elektromagnetického vlnění

Elektromagnetické vlnění se odráží od vodivé překážky (nevodivými prochází, odráží se jen část). Při odrazu od vodivé překážky zpět v původním směru dochází k interferenci původní a odražené vlny za vzniku stojatého vlnění – viz výše.

Při odrazu v jiném směru platí zákon odrazu – vlna se odráží pod stejným úhlem, pod kterým dopadla. Úhel dopadu měříme od kolmice:

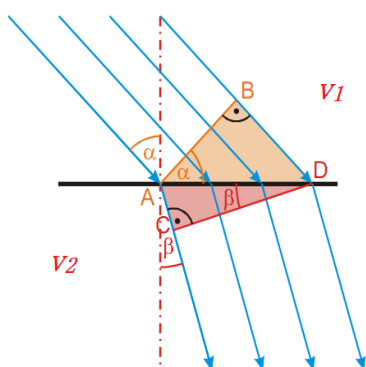


Setkají-li se dvě vlnění se stálým (konstantním) fázovým rozdílem, mohou interferovat. Mezními situacemi jsou ty, u nichž je splněna podmínka tzv. interferenčního maxima:

$$\Delta l = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta l = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

resp. podmínka interferenčního minima:



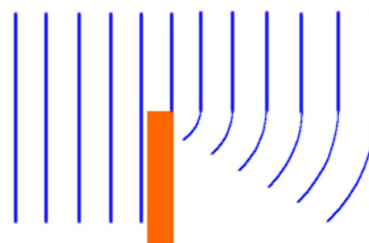
Při dopadu elektromagnetického vlnění na rozhraní dvou prostředí, v nichž se toto vlnění šíří různými rychlostmi, dochází nejen k odrazu vlnění, ale i k jeho lomu. Příkladem může být dopad elektromagnetického na hranol ze síry. V takovém případě platí pro lom vlnění **zákon lomu** odvozený už pro mechanické vlnění pomocí Huygensova principu:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Význam úhlů α a β je zřejmý z obrázku, v_1 a v_2 jsou rychlosti šíření elektromagnetického vlnění v prvním a ve druhém prostředí (opět i v obrázku).

Ohyb elektromagnetických vln

Dospěje-li elektromagnetická vlna k překážce, dochází k ohybu – vlnění se dostává do místa tzv. geometrického stínu: Skutečnost vychází z Huygensova principu: ...každý bod vlnoplochy se stává zdrojem sekundárního vlnění Proto se vlnění dostane právě až do míst geometrického stínu. Blíže o této problematice v kapitole o ohybu světla.

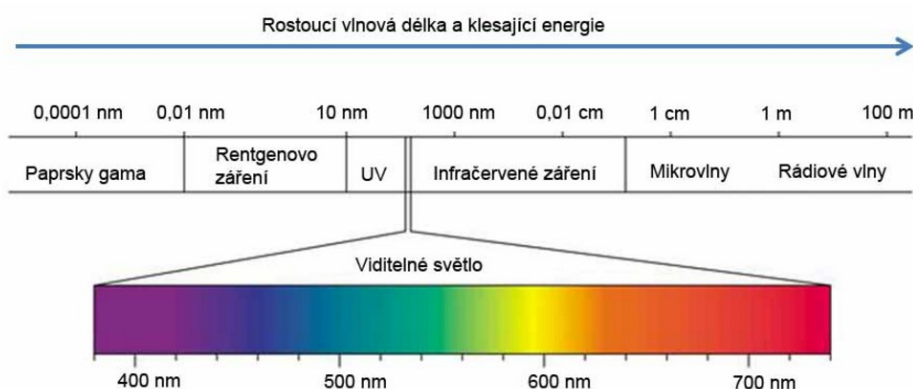


3. Spektrum elektromagnetického vlnění

Elektromagnetické záření	Vlnová délka ve vzduchu	Frekvence [Hz]
Rádiové záření	30 km – 1 m	$10^4 - 3 \cdot 10^8$
Mikrovlny	1 m – 0,3 mm	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$
Infračervené záření	0,3 mm – 790 nm	$10^{13} - 3,8 \cdot 10^{14}$
Světlo	790 nm – 390 nm	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
Ultrafialové záření	400 nm – 10 nm	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
Rentgenové záření	10 nm – 1 pm	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$
Záření gama	< 300 pm	$> 10^{18}$

U dlouhých a středních vln - ohyb podél zemského povrchu, u VKV – pro příjem je požadavek přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem.

Elektromagnetické záření tepelných zdrojů



Mikrovlny

Mikrovlnné signály využívají radary, mobilní telefony, přístroje GPS. Tepelnými účinky mikrovln se zahřívají potraviny v mikrovlnné troubě. Vlnová délka: 0,1 m - 0,1 mm

Infračervené záření

Je vyzařováno rozžhavenými tělesy. Záření je pro nás neviditelné a vnímáme ho jako tepelné záření (sálání) tepelných zdrojů. Infračervené záření je součástí slunečního záření. Vlnová délka: 0,1 mm - 790 nm.

Viditelné světlo

Jediný druh elektromagnetického záření, který přímo vnímáme zrakem. Bílé světlo je možno skleněným hranolem nebo optickou mřížkou rozložit podle vlnových délek na jednotlivé spektrální barvy. Viditelné světlo je významnou složkou slunečního záření, dopadajícího na zemský povrch. Vlnová délka: 790 nm - 390 nm

Ultrafialové záření

Slunce je přírodním zdrojem ultrafialového záření, většina je ho však zadržena zemskou atmosférou. Zdrojem jsou i výbojové trubice, ve kterých vzniká záření průchodem elektrického proudu rtuťovými parami. Vlnová délka: 390 nm - 10 nm

Rentgenové záření

Fotony rentgenového záření mají velkou energii a proto má toto záření značnou pronikavost. Zemská atmosféra sluneční rentgenové záření nepropouští. Vlnová délka: 10 nm - 1 pm

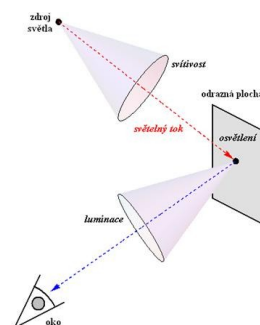
Záření gama

Radioaktivní záření, které vzniká při jaderných reakcích v jádrech izotopů některých prvků. Vyznačuje se velkou pronikavostí a ionizačními účinky. Vlnová délka: menší než 1 pm

4. Základy radiometrie a fotometrie

Fotometrické a radiometrické veličiny slouží k popisu energie přenášené elektromagnetickým zářením. Radiometrické veličiny charakterizují energii přenášenou zářením, fotometrické veličiny charakterizují účinky zářivé energie na náš zrak. Fotometrické veličiny nepostihují celou energii, ale jen tu část, která je vysílána ve vlnových délkách viditelného světla. Dá se to říci i takto: radiometrické veličiny – založené na tom, kolik energie se přenese zářením (fyzikálně objektivní, ale neříkají moc o tom, jestli bude dost světla na přečtení knížky), fotometrické veličiny – založené na tom, jak záření působí na lidský zrak (poznáme z toho, jestli je místnost dost osvětlená, ale nejsou spravedlivé k energii, kterou záření přenáší).

	Fotometrická veličina
$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t}$	Světelný tok Φ vyjadřuje schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem (jednotkou – lumen) ΔE ... světelná energie, která projde danou plochou v okolí přibližně bodového zdroje za dobu Δt , jde tedy o formu výkonu Např.: 100 W wolframová žárovka dá světelný tok 1300 lm
$I = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \Omega}$	Svítivost (v kandelách) $\Delta \Omega$... prostorový úhel, do něhož je vyzařován světelný tok $\Delta \Phi$ 1 cd odpovídá svítivosti jedné svíčky Wolframová žárovka o příkonu 100 W má svítivost přibližně 200 cd
$E = \frac{\Delta \Phi}{S} = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}$	Osvětlenost (v luxech) $\Delta \Phi$... světelný tok (v lumenech) S...plocha, na kterou světelný tok dopadá Plocha o obsahu 1 m ² má osvětlenost jednoho luxu, dopadá-li na ni rovnoměrně světelný tok jednoho lumenu.



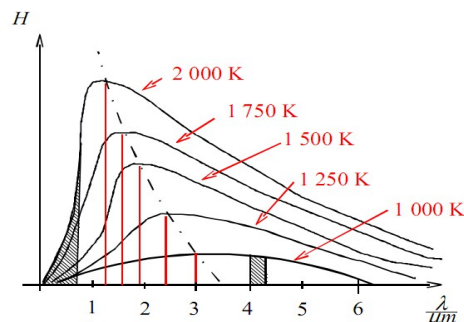
Poznámka

Záření černého tělesa

černé těleso – těleso, které pohlcuje veškerou energii dopadající energii bez ohledu na její vlnovou délku a pak ji vysílá ve formě tepelného záření. (Bývá realizováno dutinou s černými stěny a malým otvorem, kterým tepelné záření vychází.)

Wienův posunovací zákon:

- Spektrální hustota intenzity záření v závislosti na vln. délce při různých teplotách:



- rostoucí teplotou se maximum vyzářené energie v závislosti na vlnové délce posouvá ke kratším vln. délkám. Rovnice čárkované křivky z obrázku, která spojuje všechna maxima má rovnici: $\lambda \cdot T = b$

- λ ...vlnová délka
- T ...termodynamická teplota
- b ...Wienova konstanta $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$
- vyšrafovaná plocha odpovídá energii vyzářené v intervalu $\Delta \lambda$ za plochou 1 m² při dané teplotě
- plocha pod celou křivkou odpovídá celkové energii vyzářené jednotkovou plochou za 1 s při dané teplotě

- Při porovnání plošných obsahů obrazců pod křivkami různé teploty dostaneme tzv.

Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$M_e = \sigma \cdot T^4$$

- M_e ... intenzita vyzařování (celková energie vyzářená povrchem černého tělesa o plošném obsahu 1 m² za 1s při teplotě T)