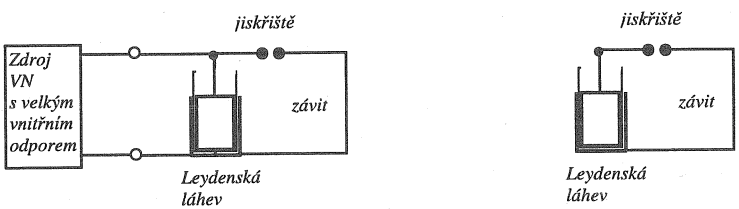
# Historické pokusy s elektromagnetickou vlnou a dnešní technické možnosti

*JOSEF HUBEŇÁK, JIŘÍ HUBEŇÁK*
*Univerzita Hradec Králové*

Poznatky z oblasti elektromagnetických jevů byly vzájemně propojeny v ucelenou teorii v 50. a 60. letech 19. století. Zásluhu na tom má především James Clerk Maxwell, skotský fyzik (nar. 13.11.1831, zemřel 5.11.1879). Byl profesorem na univerzitě v Aberdeenu, na King's College v Londýně a v Cambridgi a také členem Královské společnosti v Londýně. Jeho předpověď existence elektromagnetické vlny byla výsledkem ryze teoretickým s použitím obtížného matematického formalismu: Maxwell ve své původní práci, která vyšla v r. 1873, použil čtyřsložková čísla – kvaterniony. Jedním z podstatných výsledků jeho výpočtů byla číselná hodnota rychlosti šíření elektromagnetických vln ve vakuu, přičemž v jeho době nikdo experimentálně elektromagnetickou vlnu neobjevil. Hodnota souhlasila se známou rychlostí šíření světla a Maxwell byl tak prvním fyzikem, který si uvědomoval, že světlo je také elektromagnetické vlnění. Laboratorně prokázal existenci elektromagnetického vlnění až Heinrich Hertz v r. 1887. Prvními zdroji elektromagnetických vln byly obvody s jiskřištěm, leydenskou lahví a jedním závitem:

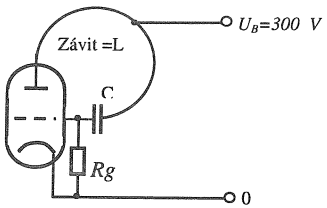
*Obr.1*




Po nabití kondenzátoru – leydenské láhve – dojde k přeskoku jiskry a v obvodu *LC*, který je tvořen leydenskou lahví a závitem, vzniknou na okamžik tlumené kmity. Odsud se do okolí šíří elektromagnetické vlnění a obdobný obvod s jiskřištěm, stejným závitem a kondenzátorem se rozkmitá rezonančně tak, že lze pozorovat jiskru. Tyto experimenty pocházejí od anglického fyzika Lodge a podobné soupravy se ještě najdou v kabinetech fyziky. Ještě před objevem elektronky (přesněji triody) vyvinul Ernst Lecher metodu měření vlnové délky elektromagnetické vlny. Profesor Lecher ( 1856 – 1926 ) působil na německé technice v Praze a později ve Vídni a jeho měření vlnové délky je známé od r. 1889.

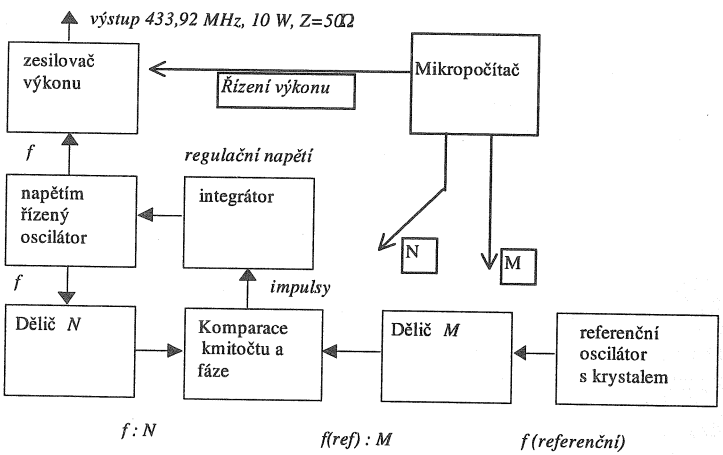
S elektronkami vznikly oscilátory netlumených elektromagnetických kmitů a ve sbírkách najdeme oscilátory z dvacátých a třicátých let minulého století. Zapojení s jednou triodou je velmi jednoduché:

*Obr.2*




Připojením zdroje napětí vzniknou v obvodu *LC* vysokofrekvenční kmity a trioda připojená k obvodu *LC* část energie kmitů odebere, zesílí a vrátí do obvodu. Demonstrační oscilátory s elektronkami pracují na frekvencích od 80 do 450 MHz a ještě se s nimi ojediněle můžeme setkat na školách. Mají v sobě kouzlo technické historie, ale jsou napájeny napětím, které již není bezpečné a jsou kmitočtově nestabilní. Bezpečný vysokofrekvenční generátor na frekvenci 433,920 MHz s výstupním výkonem 10 W osazený moderními polovodiči má napájecí napětí pouze 13,8 V a kmitočtovou stabilitu zaručuje obvod fázového závěsu, řízený mikropočítačem. Výkon lze přepnout na 50% a 100%, což je výhodné u některých experimentů. Blokové schéma generátoru:

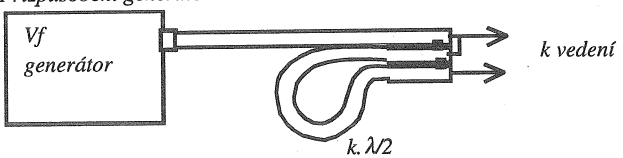
Obr. 3




Funkce systému spočívá na porovnávání kmitočtů, získaných na výstupech dvou děličů frekvencí. Pokud se nerovnají, tj. $\frac{f}{N} \neq \frac{f(ref)}{M}$ , jsou na výstupu komparátoru přítomny impulsy, ty se v integrátoru přemění na stejnosměrné napětí, které mění kmitočet oscilátoru, až dosáhne požadované hodnoty.

Lecherovo vedení tvoří dvě měděné trubičky o průměru 6 mm a jejich osy jsou vzdáleny 35 mm. Impedance vedení $Z = \frac{U_m}{I_m} = 372 \cdot \frac{\ln \frac{d-r}{r}}{\pi} = 280\,\Omega$ je vyšší než impedance na výstupu zdroje a navíc je třeba z nesymetrického signálu vytvořit signál symetrický. K tomu se dobře hodí půlvlnná smyčka z koaxiálního kabelu s impedancí 50 Ω.

*Obr.4 Přizpůsobení generátoru a Lecherova vedení*



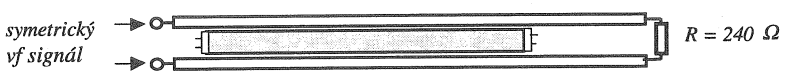

Koaxiální kabel RG 58 má impedanci 50 Ω a činitel zkrácení $k$ = 0,66, takže geometrická délka smyčky pro daný kmitočet je 22,8 cm. Funkce přizpůsobení je zřejmá: vlna od vstupu do smyčky se zpozdí na výstupu ze smyčky o $T/2$ a než se objeví na výstupu smyčky kladná výchylka napětí, přichází po koaxiálu od zdroje již výchylka záporná. Napětí mezi výstupními vodiči je nyní dvojnásobné a stejný výkon bude přenášen při polovičním proudu; impedance na výstupu je čtyřnásobkem impedance koaxiálního kabelu. Přizpůsobení není zcela dokonalé, ale pro následující experimenty vyhovuje.

**Popis experimentů**

**1. Postupná vlna na vedení**

Na výstup generátoru připojíme koaxiální kabel se symetrizační smyčkou a připojíme Lecherovo vedení. Na konec vedení zapojíme zatěžovací odpor a do stojánků položíme zářivku bez rezonátoru. Zářivku umístíme blíže k symetrizační smyčce.

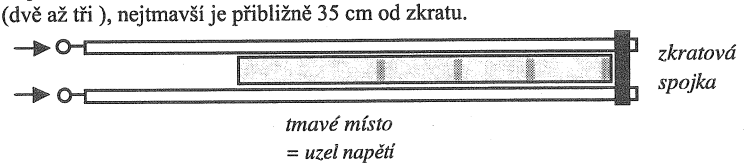
Výkon generátoru nastavíme na 100 % a po zapnutí stejnosměrného zdroje zapálíme výboj v zářivce piezoelektrickým zapalovačem. Zářivka svítí takřka rovnoměrně po celé délce.




Připojený rezistor se zahřívá, což mohou studenti ověřit dotykem.

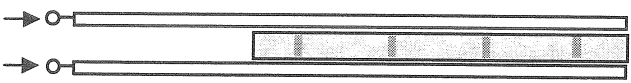
**2. Stojatá vlna na vedení, zakončeném zkratem**

Do stojánků položíme zářivku bez rezonátoru a bez kovových konců. Odpojíme zatěžovací odpor a asi 10 cm od konce nasuneme zkratovací terč. Výkon generátoru nastavte na 50 %. Zářivku přesuneme blíže ke zkratu a zapalovačem rozsvítíme. Ve výboji jsou patrná tmavá místa (dvě až tři ), nejtmavší je přibližně 35 cm od zkratu.



Ve zkratové spojce vzniká přesouváním nábojů elektrické pole s opačně orientovanou intenzitou a zkratová spojka se stává zdrojem vysokofrekvenčního signálu s fází opačnou, než má vlna přicházející od generátoru. Vpravo od zkratu se obě vlny ruší, vlevo vzniká stojaté vlnění. Zářivka má nyní výrazná slabě svítící místa – zde jsou napěťové uzly. Posunutí zkratové spojky vede i k posuvu tmavých míst na zářivce. Vzdálenost zkratu a napěťového uzlu je právě polovina vlnové délky. Dekorační zářivkou ukážeme, že před zkratem je intenzívní elektromagnetická vlna, za zkratem se nepodaří zářivku rozsvítit – zde se vlna od generátoru a vlna s opačnou fází od zkratové spojky vzájemně ruší.

**3. Stojatá vlna na otevřeném vedení**

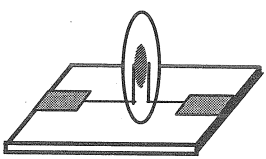


*tmavé místo*
*= uzel napětí*

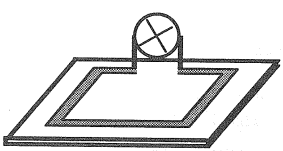
Na konci otevřeného vedení vznikne napěťová kmitna a tmavá místa značí polohu uzlů.

**4. Napěťové a proudové kmitny na zkratovaném vedení**

Pro sledování kmiten napětí použijeme kapacitní sondu s doutnavkou: Je vyrobena z jednostranného tištěného spoje a přiložením na vedení se ponechané pásky mědi stanou jednou deskou kondenzátoru; druhou je samotný vodič Lecherova vedení. Posouváním po vedení najdeme místa maximálního svitu.



Pro určení kmiten proudu je použita indukční sonda: Čtvercový závit z tištěného spoje je v místě přerušení připojen na žárovku 24 V , 50 mA. Strana závitu má délku 25 mm. Sondu položíme na vedení a hledáme místo maximálního svitu žárovky.



Doporučený postup:

4.1. Vyladění vedení do rezonance

Výkon generátoru na 50 %, indukční sondu umístíme těsně na začátek vedení a na druhém konci přesouváme zkrat. Nastavíme polohu pro maximální svit žárovky. Vedení má nyní aktivní délku rovnu násobku $\frac{\lambda}{2}$.

4.2. Proudové kmitny

Výkon generátoru na 100 %. Indukční sondy umístíme do vzdáleností 1krát, 2krát a 3 krát $\frac{\lambda}{2}$ od zkratu. *Najdeme polohy, kdy svit všech sond je přibližně stejný.* Ověříme vzdálenosti.

4.3 Napěťové kmitny

Výkon generátoru na 100 %. Kapacitní sondy umístíme mezi zkrat a první žárovku a další mezi žárovky. Zapálíme výboj (pokud se doutnavky nerozsvítí samovolně parazitními

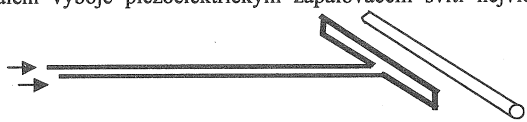
elektrostatickými výboji) a přesouváním najdeme polohy maxim. Pozor, maxima neleží uprostřed mezi proudovými kmitnami.Vedení je zatíženo odběrem činného výkonu a fázový posuv mezi napětím a proudem není 90°.

**5. Měření vlnové délky**

Pro měření vlnové délky použijeme jednu indukční sondu a výkon generátoru nastavíme na 50 %. Připravíme si papírové značky pro označení bodů na vedení. Na vedení posouváme sondu od zkratu až ke vstupu a značkami zachytíme polohy, kdy žárovka zcela pohasne. Ze změřených vzdáleností mezi značkami vypočteme $\frac{\lambda}{2}$ a poté frekvenci. Porovnáme se skutečnou hodnotou $f = 433{,}92$ MHz.

**6. Vedení zakončené skládaným dipólem**

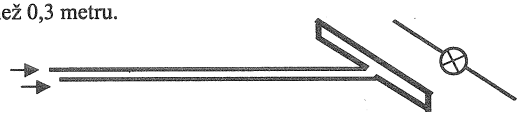
Vstupní impedance půlvlnného dipólu je asi 75 Ω a jeho připojením na konec vedení dojde k částečnému odrazu elektromagnetické vlny. Lépe je k vedení přizpůsoben skládaný dipól se vstupní impedancí asi 300 Ω, který větší část energie vyzáří do okolí. Indukční sonda na vedení ukáže jen nevýrazná maxima a minima proudu, takže na vedení je takřka postupná vlna. Elektromagnetické vlny v blízkosti dipólu prokážeme nejprve zářivkou, umístěnou rovnoběžně se zářičem. Po zapálení výboje piezoelektrickým zapalovačem svítí nejvíce u konce dipólu. V poloze kolmé k rovině zářiče svítí jen menší část uprostřed, což ukazuje na průběh siločar elektrického pole u dipólu.



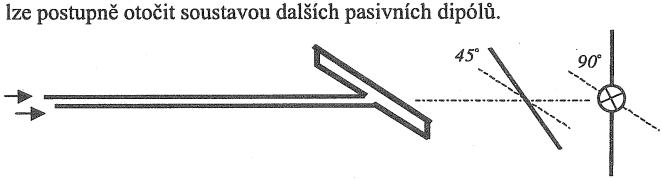
Použijte plný výkon generátoru. Dekorační zářivku protáhněte mezi vodiči vedení – svítí všude prakticky stejně.

**7. Polarizační rovina elektromagnetické vlny**

Přijímací dipól má uprostřed maximální amplitudu proudu a žárovka 2V, 180 mA se rozsvítí zřetelně ještě ve vzdálenosti více než 0,3 metru.
Přijímací dipól otáčíme a prokážeme polarizaci elektromagnetického vlnění.
V daném uspořádání je rovina polarizace vodorovná a přijímací dipól postavený svisle žárovku nerozsvítí.
(Použijte výkon 100 %.)



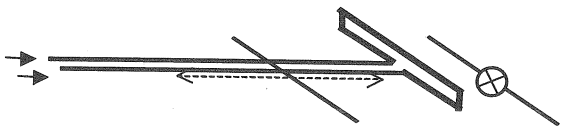
Pro další experiment upevněte přijímací dipól se žárovkou do stojanu asi 25 cm od skládaného dipólu. Stojan by měl být nejlépe nevodivý.
Polarizační rovinu lze postupně otočit soustavou dalších pasivních dipólů.
Průmět elektrické intenzity pole zářiče do směru dipólu otočeného o 45° stačí na rozkmitání náboje v něm. Tento dipól pak vysílá dále a složka elektrické intenzity jeho pole rozkmitá dipól se žárovkou.



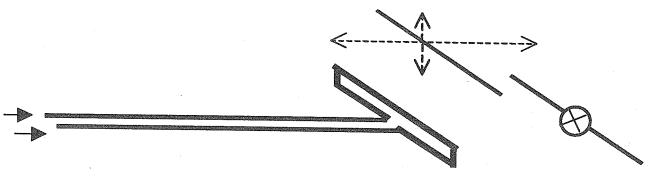
## 8. Odraz a interference elektromagnetické vlny

Použijte výkon 100 %. Přijímací dipól se žárovkou nechte ve stojanu asi 25 cm od skládaného dipólu. Odraz a interferenci ukážeme pomocí pasivního dipólu:

Pasivní dipól přesouváme nad vedením za zářičem dopředu a dozadu. Žárovka svítí maximálně, je-li pasivní dipól vzdálen o čtrtinu vlnové délky.



Maxima a minima svitu žárovky se objeví také, jestliže pasivní dipól přenášíme nad rovinou zářiče a dipólu se žárovkou.



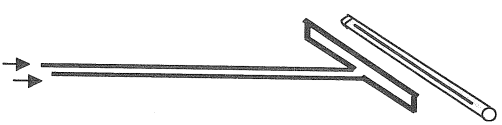
Pasivní dipól umístíme kamkoliv mezi skládaný dipól a dipól se žárovkou. Žárovka zhasne. Tento efekt již studenti mohou objasnit sami na základě předchozích poznatků.

Pasivní dipól umístíme až za dipól se žárovkou. Opět najdeme polohy, kdy žárovka svítí maximálně. Takto pracují např. televizní přijímací antény s reflektorem.

## 9. Vliv rezonance

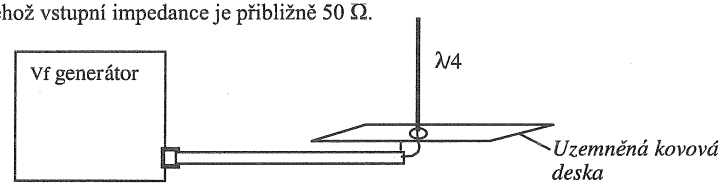
Pole rezonujícího pasivního dipólu je dost intenzivní na to, aby udrželo výboj v zářivce. Na zářivku je připevněn rezonátor - půlvlnný dipól:

Po ionizaci piezoelektrickým zapalovačem se zářivka rozsvítí jen u konců dipólu, zato svítí i několik decimetrů od zářiče.



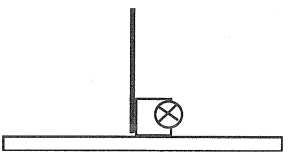
**10. Pole čtvrtvlnného dipólu**

Z nesymetrického výstupu vysokofrekvenčního generátoru lze velmi dobře napájet čtvrtvlnný dipól, jehož vstupní impedance je přibližně 50 Ω.




Teleskopickou anténu lze nastavit do rezonance pomocí indukční sondy se žárovkou: Sondu položíme k patě dipólu a délku dipólu nastavujeme na maximální svit.

Pro toto ladění použijte do sondy žárovku 6 V/ 50 mA. Sondu postavte mezi upevňovací šroubek a svorku.



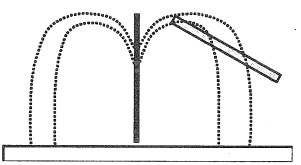
**11. Proudové a napěťové obložení dipólu**

Proud má maximální amplitudu u paty čtvrtvlnného dipólu. Indukční sondu *se žárovkou 24 V / 50 mA* posouváme podél dipólu – u paty svítí maximálně a směrem k vrcholu zhasíná.

Napětí je maximální při vrcholu – přiložíme sondu s doutnavkou izolantem k dipólu, ionizujeme a při vrcholu se doutnavka bezpečně rozsvítí. Pak posouváme k patě a její jas se zmenšuje, až zcela zhasne.

**12. Elektrické siločáry v okolí čvrtvlnného dipólu**

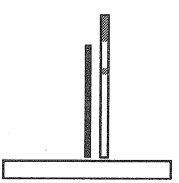
Zářivku bez rezonátoru rozsvítíme zapalovačem a sondujeme pole v okolí. Vytvoříme představu siločar, které vycházejí z vrcholu dipólu a končí na kovové desce. Zářivkou držíme vodorovně a přejíždíme dipól shora dolů a poté svisle a obkroužíme dipól kolem dokola. Upozorníme na rozsah svítící části zářivky.



Dekorační zářivku zapálíme dotekem jejích kovových kontaktů s vrcholem dipólu a pokus můžeme opakovat.

**13. Vyšší harmonické kmity dipólu**

Teleskopickou anténku natáhneme na maximální délku, což odpovídá přibližně $\frac{3}{4}\lambda$.



Svisle postavenou zářivku bez rezonátoru rozsvítíme zapalovačem. V jedné třetině od vrcholu antény je zřetelný napěťový uzel. Geometrická délka je nyní asi 51 cm a jako

čtvrtvlnný dipól by tato anténa rezonovala na kmitočtu $f_0 = \frac{433}{3}$ MHz. Signálem generátoru ji donutíme kmitat na trojnásobku základní frekvence. Akustickou analogií je uzavřená píšťala, kterou „přefoukneme“ na vyšší harmonický tón.

**14. Absorpce vf výkonu v živé tkáni**

Výkon generátoru nastavte na 100 % a bříško prstu lehce přiložte na okraj vrcholu čtvrtvlnného dipólu. Za okamžik prst „pálí“. Kov antény je přitom chladný a teplo se vytváří uvnitř tkáně. Na stejném principu funguje mikrovlnná trouba, kde se používá výkon 800 a více wattů a frekvence 2450 MHz. V tkáni se teplo uvolňuje tak, že elektromagnetická vlna vytváří v částečně vodivém prostředí vysokofrekvenční proudy a také rozkmitá molekuly vody, které mají vlastnosti elektrických dipólů.

*Poznámka: v poli čtrtvlnného dipólu lze předvést většinu experimentů, které byly popsány se skládaným dipólem.*

---

Uvedené experimenty jsou dostatečně efektní, aby vzbudily zájem studentů, a jsou zcela bezpečné, takže i studenti si mohou se soupravou "pohrát". Fyzikální obsah je dobře sdělitelný na úrovni středoškolské fyziky a je tedy žádoucí znovu tyto klasické experimenty, jejichž historie sahá k přelomu 19. a 20 století, zařadit do výuky.