

OHYB DRÁHY ELEKTRONU V MAGNETICKÉM A ELEKTRICKÉM POLI

Měřicí potřeby:

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1) Demonstrační osciloskop ELWE | 4) Multimetr |
| 2) Napájecí zdroj U33000 | 5) Nízkofrekvenční generátor FG100 |
| 3) Helmholtzovy cívky | 6) zdroj stejnosměrného napětí 100 V |

Obecná část

Pohybuje-li se elektron v magnetickém a elektrickém poli, působí na něj tzv. Lorentzova síla:

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

kde e je velikost náboje elektronu, $\mathbf{E}$ intenzita elektrického pole, $\mathbf{v}$ rychlost elektronu a $\mathbf{B}$ magnetická indukce. Měrný náboj elektronu je poměr velikosti náboje e elektronu k jeho hmotnosti m . K jeho určení můžeme použít Thomsonovy metody, která je založena na působení elektrického a magnetického pole na pohybující se elektron v osciloskopické obrazovce. Zde elektrony vystupují ze žhavené katody a jsou urychlovány a fokusovány do svazku systémem clonek a válců, na něž jsou přivedena vhodná stejnosměrná napětí (tzv. elektrooptický systém). V našem zařízení je tento systém pro účely výuky maximálně zjednodušen, takže zaostření paprsku do bodu není ideální. Žhavená katoda (viz obr. 1) je vložena do válcové elektrody **W** (*Wehneltův válec*) s nastavitelným napětím 0 až -50 V. Ta zajišťuje základní zaostření paprsku. Na anodu **A** je přiveden kladný pól urychlovacího napětí. To vytváří mezi katodou a anodou elektrické pole rovnoběžné s osou obrazovky, urychluje elektrony a ty prochází otvorem v anodě do dalšího prostoru obrazovky. Zde se již pohybují vlastní setrvačností. Podmínkou volného pohybu elektronů je samozřejmě vysoké vakuum. Je-li U_a velikost urychlovacího napětí a předpokládáme-li zanedbatelnou počáteční rychlost elektronů vystupujících z katody, platí pro rychlost elektronů v (pro malá napětí neuvažujeme relativistické efekty) vztah:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_a. \quad (2)$$

Na obr. 1 je znázorněn princip zmíněné Thomsonovy metody. Urychlený elektronový svazek se pohybuje v elektrickém poli kondenzátoru (vychylovací destičky s napětím U) zkříženém s magnetickým polem o magnetické indukci $\mathbf{B}$. Obě pole jsou kolmá na počáteční směr svazku. Odchýlené dráhy elektronů leží tedy v jedné rovině. Intenzita elektrického pole je dána vztahem:

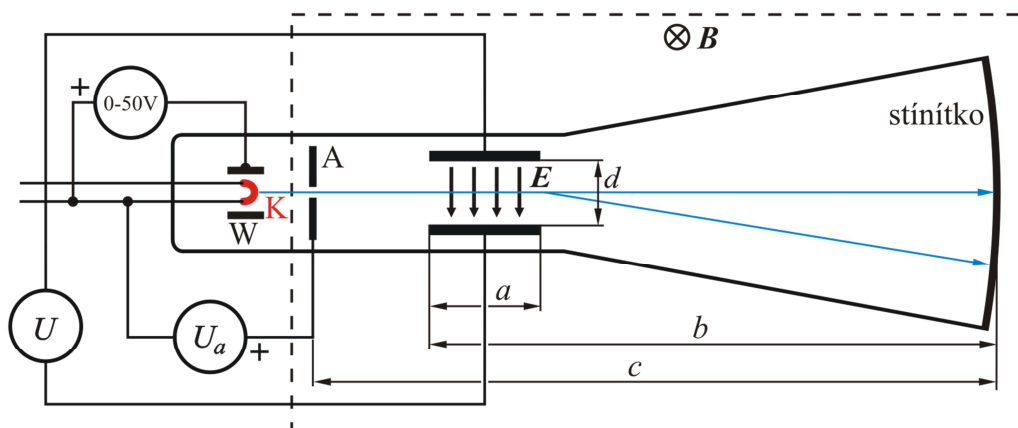
$$E = \frac{U}{d}, \quad (3)$$

kde d je vzdálenost destiček. Výchylka y_1 na stínítku obrazovky od elektrického pole je dána vztahem:

$$y_1 = C \frac{e}{m} \frac{1}{v^2}, \quad (4)$$

kde C je konstanta závislá na rozměrech obrazovky a intenzitě elektrického pole E podle vztahu:

$$C = a \left(b - \frac{a}{2} \right) E , \quad (5)$$



Obr. 1 Princip měření měrného náboje Thomsonovou metodou

kde a je délka kondenzátoru (vychylovacích destiček) a b jeho vzdálenost od stínítka obrazovky.

Homogenní magnetické pole vytvářejí Helmholtzovy cívky umístěné vně obrazovky tak, aby jejich osa byla kolmá na osu obrazovky. Na rozdíl od elektrického pole, které ovlivňuje svazek elektronů pouze mezi deskami kondenzátoru, působí magnetické pole na svazek elektronů po celé jeho dráze od anody až ke stínítku. Výchylku y_2 na stínítku obrazovky způsobenou magnetickým polem lze vyjádřit rovnicí:

$$y_2 = G \frac{e}{m} \frac{1}{v} , \quad (6)$$

kde v je opět rychlost elektronů a G je konstanta daná vztahem:

$$G = \frac{c^2}{2} B . \quad (7)$$

Zde c je vzdálenost anody (délka oblasti působení magnetického pole) od stínítka a B je magnetická indukce.

Ke stanovení měrného náboje je tedy třeba určit výchylky y_1 a y_2 v elektrickém a magnetickém poli, intenzitu elektrického pole E a magnetickou indukci B . Vyřešením rovnic (4) a (6) pak získáme hodnotu měrného náboje.

Prakticky vhodnější je však výchylku od elektrického pole kompenzovat polem magnetickým. Pak je $y_1 = y_2 = y$ a rovnice (4) a (6) lze napsat ve tvaru:

$$y = C \frac{e}{m} \frac{1}{v^2} = G \frac{e}{m} \frac{1}{v} , \quad (8)$$

Z těchto rovnic můžeme vyloučit v a tak dostaneme pro e/m :

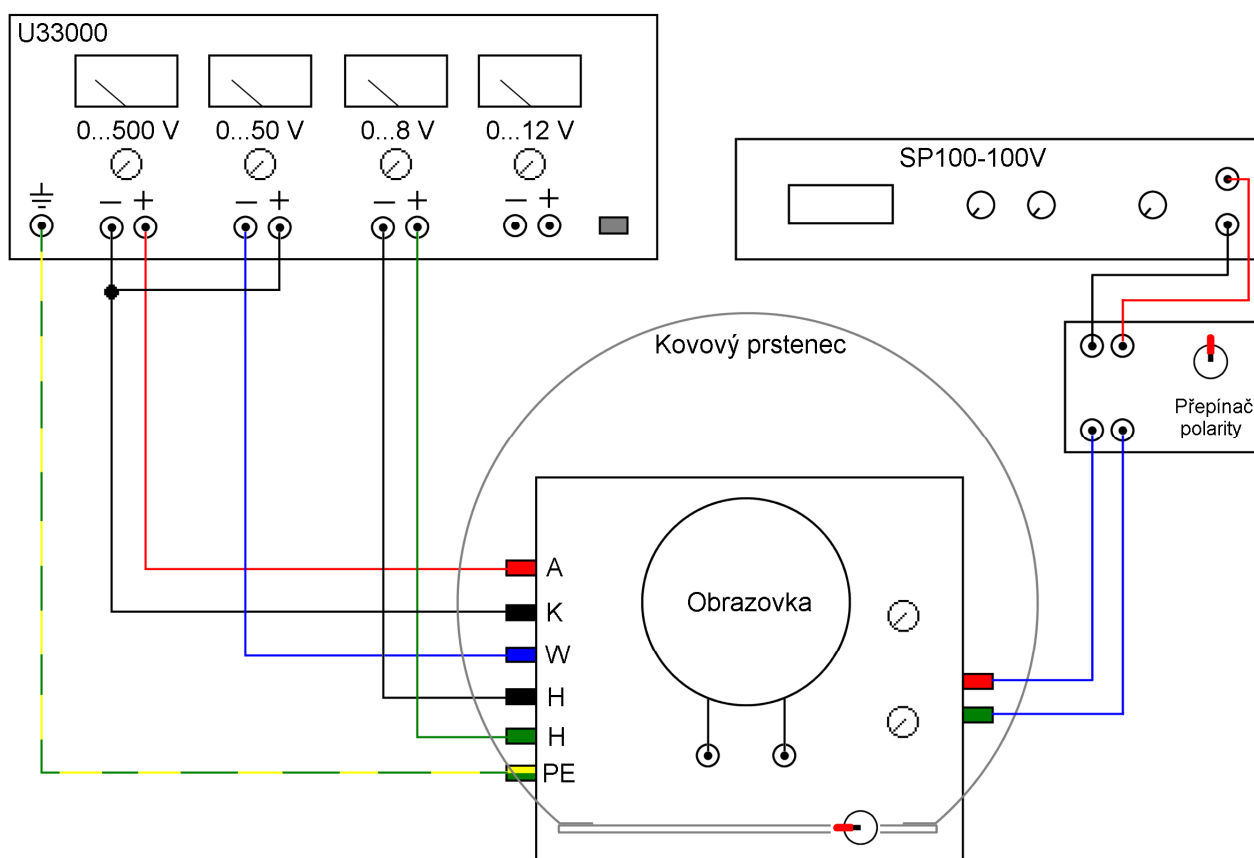
$$\frac{e}{m} = y \frac{C}{G^2} . \quad (9)$$

Měření

UPOZORNĚNÍ:

- V úloze se vyskytují napětí vyšší než je napětí bezpečné (60 V_~). Při zapojování vodičů vždy vypněte zdroje. Při práci se nedržte uzemněných kovových částí.
- Skleněná obrazovka je vyčerpána – hrozí nebezpečí imploze. Vyhněte se jakýmkoliv nárazům. Při práci v těsné blízkosti obrazovky (např. nasazování vychylovacích cívek) použijte ochranné brýle!
- Maximální hodnota anodového napětí je 350 V! Při překročení hrozí poškození obrazovky.

Měření se provádí na demonstračním osciloskopu ELWE. Obrazovka je připevněna do skříňky s elektronikou a celá sestava je umístěna do Helmholtzových cívek. Potřebná napětí (žhavení, napětí pro Wehneltův válec, anodové napětí, napětí pro Helmholtzovy cívky) jsou dodávána zdrojem U33000, napětí pro vychylovací destičky dodává zdroj SP100-100V. Přístroje jsou již propojeny, v případě problémů překontrolujte zapojení podle obr. 2. Přepínač v dolním pravém rohu skříňky s elektronikou musí být v levé poloze. Zdroj U33000 zapněte síťovým vypínačem a



Obr. 2 Propojení přístrojů při měření Thomsonovou metodou

nastavte v první sekci zleva anodové napětí na hodnotu 300 V, žhavicí napětí ve třetí sekci na 8 V (naplno). Napětí pro Helmholtzovy cívky (čtvrtá sekce U33000) snižte na nulu. Napětí na vychylovacích destičkách (zdroj SP100-100V) snižte na nulu. Po 15 sekundách by se měla objevit na stínítku zelená stopa. Napětím Wehneltova válce (druhá sekce U33000) se ji pokuste zaostřit na minimální rozměr. Optimální hodnota je asi 20 V. Nyní je možno začít vlastní měření.

A) Thomsonova metoda

Vzdálenost vychylovacích destiček od stínítka obrazovky je $b = 182$ mm, délka vychylovacích destiček je $a = 18$ mm, vzdálenost destiček je $d = 10$ mm, vzdálenost anody od stínítka je $c = 205$ mm. Zdířky vychylovacích destiček jsou umístěny na pravé straně elektroniky a jsou připojeny přes přepínač polaroty do zdroje SP100-100V. Napětí se měří na displeji zdroje.

K vytvoření magnetického pole se používají Helmholtzovy cívky, které jsou podrobně popsány v úloze „Ohyb dráhy elektronu v magnetickém poli (na zařízení Leybold)“ v kapitole *Měření*. Cívky jsou spojeny do série s odporem $50\ \Omega$ a přes digitální multimetr s nastaveným rozsahem 200 mA jsou připojeny na čtvrtou sekci 0 až 12 V_{DC} zdroje U33000.

Při měření nejprve zajistěte nulový proud Helmholtzovými cívkami, pak zvyšujte napětí na destičkách a posuňte stopu na obrazovce o určitou výchylku y směrem dolů nebo nahoru (polarita se mění pomocí přepínače). Pak zapojte proud do Helmholtzových cívek a jeho zvětšováním vraťte stopu na původní místo. Orientaci magnetického pole změníte prohozením přírodních vodičů (lze i pod napětím). Zaznamenejte velikost napětí U na vychylovacích destičkách a proud I tekoucí Helmholtzovými cívkami, který je nutný k vrácení stopy. Zaostření paprsku je značně nedokonalé a mění se s výchylkou y , takže jako střed stopy berte nejsvětlejší místo.

Pracovní úkol

- 1) Proveďte měření měrného náboje elektronu Thomsonovou metodou pro hodnoty výchylky $y = 1, 2$ a 3 cm nahoru i dolů. Hodnoty zapisujte do tab. 1.

Tabulka 1

směr:	<i>nahoru</i>			<i>dolů</i>		
y [cm]	1	2	3	1	2	3
U [V]						
I [mA]						
B [T]						
e/m [C/kg]						

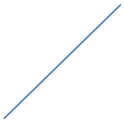
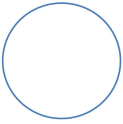
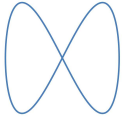
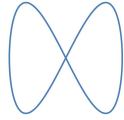
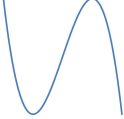
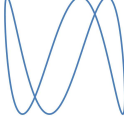
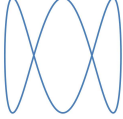
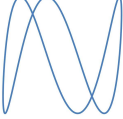
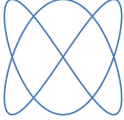
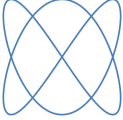
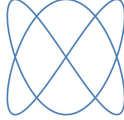
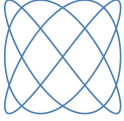
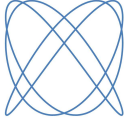
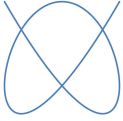
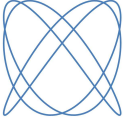
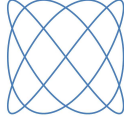
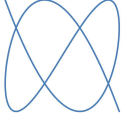
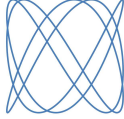
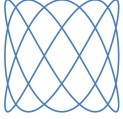
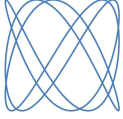
- 2) Určete magnetickou indukci Helmholtzových cívek pro všechny proudy.
- 3) Vypočítejte pro každé měření měrný náboj elektronu ze vzorce (9).

- 4) Z vypočítaných hodnot měrného náboje elektronu určete aritmetický průměr, jeho směrodatnou chybu a výsledek porovnejte s tabulkovou hodnotou.
- 5) Na základě kapitoly „Chyba nepřímého měření veličiny“ (skripta str. 17) rozhodněte, která vstupní veličina ($U, I, \mu_0, N, r, a, b, c, d$) má největší vliv na chybu výsledku a je proto nutné ji znát co nejpřesněji. (Nutno zdůvodnit!)

B) Pozorování Lissajousových obrazců

Lissajousovy obrazce jsou zajímavé křivky, které vznikají složením pohybu dvou navzájem kolmo harmonicky kmitajících oscilátorů v rovině. Jsou pojmenovány podle Julese Antoine Lissajouse (1833-1880), ačkoliv je předtím již popisovali jiní badatelé. Lissajous je v r. 1857 využil pro studium kmitů a zvuku, když nechal

Tabulka 2 Základní případy Lissajousových křivek

Poměr frekvencí	Fázový posuv φ				
	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
1:1					
1:2					
1:3					
2:3					
3:4					
3:5					

paprsek světla postupně odrazit od dvou zrcadel a posléze dopadnout na stínítko. Zrcadla byla v dotyku se dvěma kmitajícími systémy (např. ladičky). Jeho aparaturu je tak možno považovat za první praktickou realizaci osciloskopu. Obrazce můžeme dnes snadno graficky zobrazit na počítači, když budeme do grafu vynášet na osy X a Y okamžitou hodnotu dvou harmonických funkcí, kde parametrem bude čas:

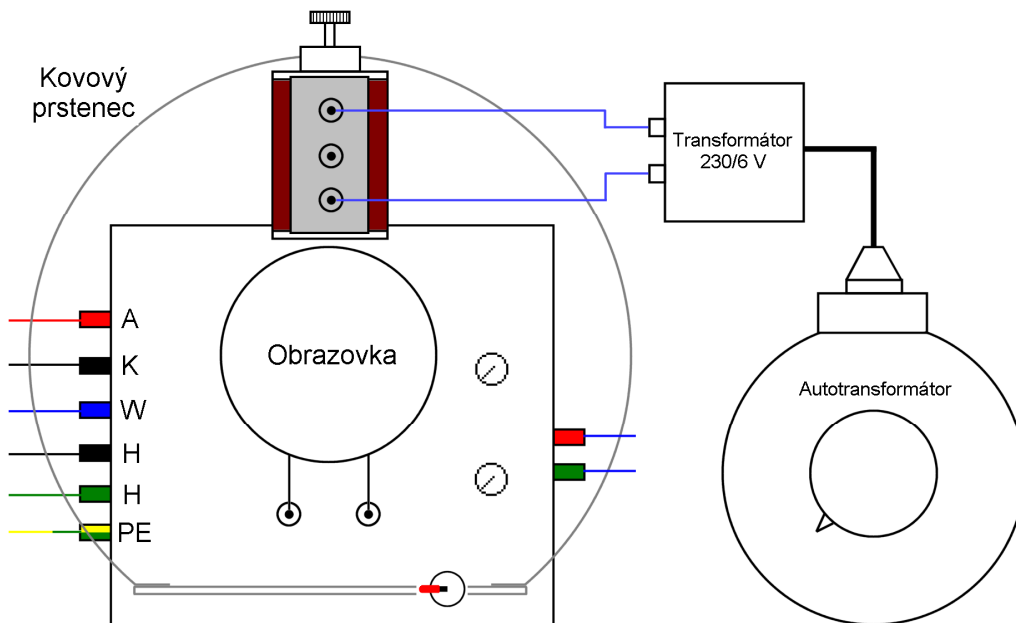
$$x = A_1 \sin(\omega_1 t), \quad (10)$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi). \quad (11)$$

Pro každý čas dostaneme bod, zakreslením bodů pro všechny časy obdržíme křivku. Tvar křivek závisí na poměru úhlových frekvencí a také na fázovém posuvu φ mezi kmity. Uzavřené křivky vznikají, je-li poměr frekvencí dán poměrem celých čísel. Některé základní případy jsou uvedeny v tabulce 2.

S nástupem klasických osciloskopů byla Lissajousova metoda hojně využívána pro měření či nastavení frekvence a fázového posuvu nějaké harmonické veličiny vzhledem k přesnému, stabilnímu zdroji. V tomto případě se jedná o tzv. XY režim činnosti osciloskopu. Na vodorovné vychylovací destičky je přiváděno referenční napětí z generátoru, na svislé pak sledovaný signál.

Při tomto měření budete elektronový paprsek ohýbat ve vodorovném směru magnetickým polem cívky, kterou upevníte nad obrazovku na kovový prstenec pomocí šroubu (viz obr. 3). Cívku zapojte do 6V výstupu malého transformátorku,



Obr. 3 Zapojení a umístění cívky pro vodorovné vychylování paprsku

jehož vstup je zapojen do regulačního autotransformátoru, jenž je připojen do sítě 230 V. Ve vodorovném směru bude tedy paprsek kmitat s frekvencí 50 Hz. Vhodnou velikost výchylky nastavíte autotransformátorem. Pro ohýbání paprsku ve svislém směru využijete opět Helmholtzovy cívky, které připojíte na výstup funkčního generátoru FG100. Proud cívkami a tedy i velikost svislé výchylky nastavte knoflíkem „Amplitude“. Frekvence se nastavuje knoflíkem „Frequency“ takto: podržíte-li knoflík stisknutý, pak jeho otáčením lze přesouvat kurzor (blikající podtržítka) na požadovaný řád hodnoty frekvence. Tento řád pak můžete měnit otáčením knoflíku v nestisknutém stavu.

Pracovní úkol

1) Pozorujte Lissajousovy obrazce podle tabulky 2.