

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky

ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE V UČIVU STŘEDOŠKOLSKÉ FYZIKY

MAGISTERSKÁ PRÁCE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem magisterskou práci vypracovala samostatně pod vedením Doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc. za použití materiálů uvedených v seznamu použité literatury.

Alena Večeřová

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu magisterské práce Doc. RNDr. Romanu Kubínkovi, CSc. za vedení a cenné rady a připomínky, které mi při zpracovávání této bakalářské práce vždy ochotně poskytl. Dále bych ráda poděkovala Zdeňkovi Weinlichovi, za konzultaci ohledně čtvrtého pokusu a výrobu pomůcek. Děkuji rovněž Pavlovi Kohoutovi za natočení záběrů všech videopokusů.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Autor: Alena Večeřová

Název práce: Elektromagnetická indukce v učivu středoškolské fyziky

Typ práce: Magisterská práce

Pracoviště: Katedra experimentální fyziky

Vedoucí práce: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

Rok obhajoby práce: 2014

Abstrakt:

Elektromagnetická indukce je problémové učivo pro žáky středních škol. Tato práce uvádí teoretický základ jevu elektromagnetické indukce a především jej rozvíjí v sadu čtyř pokusů použitelných při výuce na středních školách i v praktiku školních pokusů k přípravě budoucích učitelů fyziky. Součástí práce jsou i videa zachycující tři z experimentů.

Klíčová slova: elektromagnetická indukce, Foucaultovy vířivé proudy

Počet stran: 78

Počet příloh: 8

Jazyk: Český

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Autor: Alena Večeřová

Title of thesis: Master thesis

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

The year of presentation: 2014

Abstract:

Electromagnetic induction is not easy topic for secondary school students. This thesis provides theoretical basics of topic and serie of four experiments. Experiments are usable at secondary school education and Practicals of school experiments preparing future teachers of Physics. Thesis also contains video of three of experiments.

Keywords: electromagnetic induction, eddy current

Number of pages: 78

Number of appendices: 8

Language: Czech

OBSAH

Úvod.....	7
1. TEORETICKÁ ČÁST	8
1.2 Nestacionární magnetické pole	12
1.2.1 Magnetický indukční tok.....	12
1.2.3 Odvození Faradayova zákona elektromagnetické indukce	13
1.3 Indukované proudy	17
1.3.1 Indukovaný proud v uzavřeném obvodu.....	17
1.3.2 Indukované proudy v masivních vodičích	22
2. PRAKTICKÁ ČÁST.....	24
2.1 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE.....	25
2.1.1 Měření hmotnosti magnetů	25
2.1.2 Měření magnetické indukce neodymových a feritových magnetů.....	26
2.2 DOBA PÁDU NEODYMOVÝCH MAGNETŮ MĚDĚNOU A HLINÍKOVOU TRUBKOU..	31
2.2.1 Příprava a provedení pokusu	31
2.2.2 Výsledky pokusu	32
2.3 TLUMENÍ KYVADLA POMOCÍ FUCAULTOVÝCH VÍŘIVÝCH PROUDŮ	41
2.3.1 Příprava a provedení pokusu	41
2.3.2 Vyhodnocení závislosti počtu kyvů na počtu a druhu magnetu a tloušťce dna	44
2.3.4 Výsledky měření počtu kyvů do zastavení kyvadla pro vzdálenosti 12 mm, 16 mm a 20 mm	47
2.4 ELEKTROMAGNETICKÁ LEVITACE	51
2.4.1 Příprava a provedení pokusu	51
2.4.2 Vyhodnocení výsledků pokusu	53
3. ZÁVĚR	56
4. SEZNAM LITERATURY	57
Příloha č. 1	59
Příloha č. 2	62
Příloha č. 3	65
Příloha č. 4	69
Příloha č. 5	75
Příloha č. 6	78

Úvod

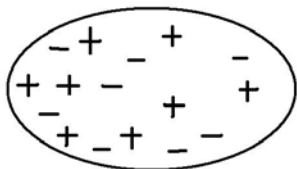
K tématu diplomové práce mě dovedla určitá návaznost na bakalářskou práci spolu se zkušeností ze souvislé pedagogické praxe, na které jsem se věnovala učivu elektromagnetické indukce. Během pedagogické praxe na gymnáziu jsem se žáky probírala učivo elektromagnetické indukce a všimla jsem si některých problémů s pochopením této látky. Výklad začal vysvětlením pojmu nestacionárního elektromagnetického pole a způsobů jeho vzniku. Následoval pokus s magnetem a cívkou připojenou k voltmetru, kdy žáci mohli pozorovat výchylku ručky voltmetru při zasunutí nebo vysunutí magnetu do nehybné cívky nebo naopak na nehybný magnet byla nasouvána nebo vysouvána cívka. Tedy buď se pohyboval magnet, nebo obvod s cívkou. Experiment žáky sice zaujal a motivoval k hledání podstaty pokusu, ale příští hodinu se ukázalo, že jim unikla základní znalost přeměny nestacionárního magnetického pole v pole nestacionární elektrické. Během dalších hodin jsem zařadila též experiment se závěsným hliníkovým kroužkem a magnetem k demonstraci Lenzova zákona. Experiment žáky opět zaujal, ale pletli si směr pohybu kroužku následující po pohybu magnetu. Bylo pro ně těžké uvědomit si, jakým směrem se kroužek musí pohybovat, aby se pohyboval proti směru změny magnetického indukčního toku, které ho vyvolalo. Navíc žákům činí problémy samotný název elektromagnetické indukce. Zaměňují mezi sebou pojmy elektrostatická indukce, elektromagnetická indukce, vlastní indukce, vzájemná indukce, indukčnost a induktance. V následujícím přehledu v teoretické části třídím s použitím středoškolských učebnic zaměňované pojmy na jevy a veličiny a velmi stručně vysvětluji jejich význam. V praktické části se zabývám čtyřmi pokusy demonstrujícími především Foucaultovy vířivé proudy. Praktickým výstupem pokusů jsou pracovní listy a videa uvedená v přílohách. První tři pokusy jsou využitelné jak ve výuce fyziky na střední škole, tak v praktiku školních pokusů. Čtvrtý pokus je kvůli bezpečnostním rizikům i sofistikovanějším pomůckám určen pouze do praktika školních pokusů pro přípravu budoucích učitelů fyziky.

1. TEORETICKÁ ČÁST

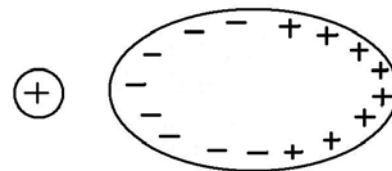
V následujícím přehledu s použitím středoškolských učebnic třídím žáky zaměňované pojmy na jevy a veličiny a velmi stručně vysvětlují jejich význam.

Elektrostatická indukce

je jev, při kterém dochází k zelectrování vodiče po jeho vložení do elektrického pole. Před vložením kovového vodiče do elektrického pole jsou v něm náboje rozloženy rovnoměrně (viz obr.1a). Kovový vodič je vložen do elektrického pole, následkem čehož v něm vzniká dočasné elektrické pole. Vzniklé dočasné elektrické pole působí na nosiče náboje v kovu (elektrony), které se začnou shromažďovat na povrchu kovového tělesa v místě, kde do tělesa vstupují siločáry. Zde se vytvoří záporný náboj. Na opačném konci povrchu vodiče, tedy v místě, odkud siločáry vystupují, vzniká kvůli nedostatku elektronů kladný náboj (viz obr.1b). Upraveno podle [2].



Obr.1a) Upraveno podle [2].



Obr. 1 b) Upraveno podle [2].

Magnetická indukce

Je vektorová veličina charakterizující magnetické pole vyvolané pohybem náboje dQ (tj. elektrickým proudem). Vystupuje v Biotově-Savartově zákonu vyjadřujícím, jak velký příspěvek magnetické indukci magnetickému poli budí element vodiče proudu délky $d\vec{l}$ v bodě určeném polohovým vektorem \vec{r} . Biotův-Savartův zákon zní:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}^0}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}, \quad (1)$$

kde μ_0 znamená permeabilitu vakua, r velikost polohového vektoru, I velikost proudu.

Z Biotova-Savartova zákona lze poznat, že vektor $d\vec{B}$ je kolmý na vektory $d\vec{l}$, \vec{r} (Ampérovo pravidlo pravé ruky). Jednotkou magnetické indukce je tesla, zn. T, pojmenovaná podle slavného fyzika a vynálezce Nikoly Tesly. Platí: $1 \text{ T} = \text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$.

Úpravou vztahu (integrací po křivce) dostáváme obecný vztah pro magnetickou indukci, která popisuje magnetické pole vodičů s proudem různého tvaru, např. přímého vodiče, cívky, solenoidu a polí dalších různě pokroucených vodičů.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}. \quad (2)$$

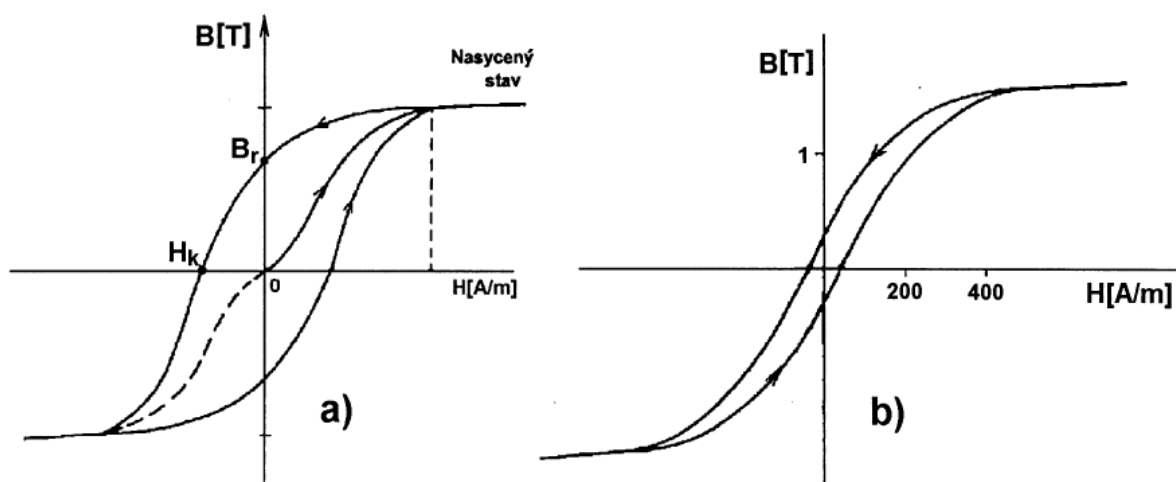
Upraveno podle [3].

Podle toho, zda je velikost magnetické indukce ve všech místech prostředí stejná, dělíme prostředí na homogenní a nehomogenní. V homogenním prostředí se vektor magnetické indukce nemění, tj. $\mathbf{B} = \text{konst}$, zatímco v nehomogenním prostředí se vektor magnetické indukce \mathbf{B} mění. Směr vektoru magnetické indukce určíme pomocí Flemingova pravidla levé ruky (viz další text). Upraveno podle [1].

Remanentní magnetická indukce

Při vložení odmagnetovaného feromagnetika do vnějšího magnetického pole, jehož intenzitu H postupně zvyšujeme z hodnoty $H = 0$, můžeme vyšetřovat závislosti magnetizace na intenzitě magnetického pole (tj. $M = f(H)$), případně závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole (tj. $B = f(H)$), viz obr. 2. „Pokud látka byla odmagnetována, velikost magnetizace (případně velikost magnetické indukce B), se s rostoucí intenzitou magnetického pole zvyšuje podle tzv. **křivky prvotní magnetizace**. Při jisté hodnotě intenzity magnetického pole H se dosáhne nasyceného stavu, kdy jsou již magnetické momenty všech domén orientovány do směru vnějšího magnetického pole, takže magnetizace M zůstává konstantní při dalším zvyšování intenzity H a magnetická indukce B jen nepatrně roste vlivem zvyšujícího se vnějšího magnetického pole.“ [3, str. 161,162]

Budeme-li nyní intenzitu magnetického pole snižovat, nebude se B (případně M) snižovat po křivce prvotní magnetizace, ale po tzv. **hysterezní křivce**. Při $H = 0$ (tj. při vypnutí vnějšího magnetického pole) zůstane látka částečně zmagnetována a magnetická indukce bude mít hodnotu $B = B_r$, která se nazývá **remanentní magnetická indukce** (zbytková magnetická indukce popisující magnetické pole, které zůstalo feromagnetiku po zániku vnějšího magnetického pole). Provedeme-li celý magnetizační cyklus, dostaneme uzavřenou hysterezní křivku, nazývanou obvykle **hysterezní smyčka feromagnetika**.



Obr. 2 Hysterezní smyčka. Převzato z [3, str. 162].

Popsaný jev se nazývá **magnetická hystereze**. Obsah hysterezní smyčky feromagnetika vyjadřuje práci nutnou k přemagnetování jednotkového objemu feromagnetika za jeden magnetizační cyklus. Upraveno podle [3, str. 162].

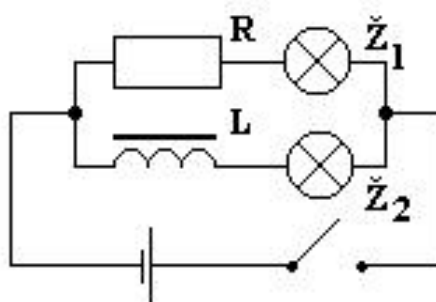
Pokud je hodnota remanentní magnetické indukce velká, dostáváme širokou hysterezní smyčku (viz obr. 2. a). V tomto případě se materiál i po přerušení proudu chová jako permanentní magnet a hovoříme o **magneticky tvrdém materiálu**. **Magneticky měkký materiál** je naopak materiál, který vykazuje nízkou nebo zanedbatelnou hodnotu remanentní magnetické indukce a má úzkou hysterezní smyčku (viz obr. 2. b). Upraveno podle [3].

Na remanentní magnetické indukci je v podstatě založeno magnetování látek a to lze provést ve školních podmínkách např. zmagnetováním ocelové jehly magnetem.

Indukčnost

je veličina, o které hovoříme zejména v souvislosti s cívkami. Jedná se o základní parametr cívky, která je součástí elektrického obvodu. Obecně lze říct, že indukčnost mají všechny prvky obvodu, avšak ne pro všechny je to stejně významný parametr. **Je důsledkem jevu zvaného vlastní indukce**. Pro spojovací vodiče je hodnota indukčnosti velmi malá, zanedbatelná, zatímco pro cívky dosahuje nejvyšších hodnot. Vlastní indukce vysvětluje následující jev v obvodu s dvěma paralelními větvemi, viz obr. 3. V první z větví je sériově zapojen rezistor a za ním žárovka a ve druhé větvi je zapojena cívka a za ní sériově žárovka. Když začne procházet elektrický proud obvodem, rozsvítí se žárovka ve větvi s rezistorem, zatímco žárovka ve větvi s cívkou se rozsvítí později. Zdá se, že cívka se brání průchodu proudu. Důvodem je vznik nestacionárního magnetického pole v cívce následkem proudu. Hodnota magnetické indukce uvnitř cívky postupně roste s rostoucí hodnotou časově

proměnného proudu, a podle Lenzova pravidla působí magnetické pole proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala. „Na koncích cívky vzniká napětí opačné polarity, než má připojený zdroj.“ [1, str. 169] Následkem toho proud nedosahuje okamžitě po připojení své konečné hodnoty, ale zvyšuje se postupně až na hodnotu povolenou odporem cívky. Dále se proud už nemění, dosáhl ustáleného stavu a dochází k zániku indukovaného elektrického pole. Upraveno podle [1].



Obr. 3 Vlastní indukce. Převzato z [4].

Induktance

je veličina, která se projevuje jako zdánlivý odpor cívky. „Cívka se ve střídavém obvodu chová jako prvek s odporem. Nedochozí však k přeměně energie střídavého proudu v teplo, jako je tomu u rezistoru. V cívce jen vzniká a zaniká magnetické pole. Avšak jednotkou induktance je obdobně jako u odporu **ohm**.“ [1, str. 182] Zdá se tedy, že cívka má schopnost „brzdit“ šíření proudu obvodem, klade mu odpor. Příčinou je magnetické pole vytvářející se kolem cívky během průchodu střídavého elektrického proudu. Toto magnetické pole způsobuje zpoždování proudu I za napětím U , tedy fázový posun proudu za napětím o $\frac{\pi}{2}$ (tedy 90°).

Níže je uveden vztah pro výpočet induktance:

$$X_L = \frac{U}{I} \text{ nebo též } X_L = \omega \cdot L, \quad (3)$$

Kde ω je frekvence střídavého proudu a L indukčnost cívky. Vidíme, že induktance je přímo úměrná frekvenci střídavého proudu v obvodu a indukčnosti cívky. Upraveno podle [1].

Elektromagnetická indukce

označuje jev, při kterém vlivem nestacionárního (časově proměnného) magnetického pole vzniká indukované elektrické pole ve vodiči vloženém do tohoto pole. Dále se v práci zabývám elektromagnetickou indukcí.

1.2 Nestacionární magnetické pole

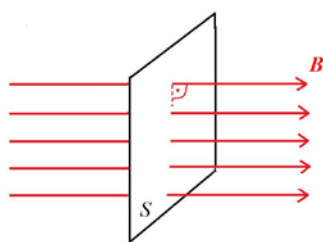
K vysvětlení pojmu elektromagnetické indukce potřebujeme nejdříve porozumět, co znamená nestacionární magnetické pole. Ze slova "nestacionární" lze vytušit, že to znamená měnící se, nezůstávající stále stejný apod. A skutečně, nestacionární magnetické pole je magnetické pole měnící se v čase (jehož magnetická indukce se mění v čase). Následuje otázka, jak může nestacionární magnetické pole vzniknout. Odpověď v sobě zahrnuje několik případů:

- 1) časově proměnný proud v nehybném vodiči (event. pohybující se nabitá částice),
- 2) pohybující se vodič se stálým nebo časově proměnným proudem,
- 3) pohybující se magnet (permanentní magnet nebo elektromagnet),
- 4) časově proměnné elektrické pole. Upraveno podle [1].

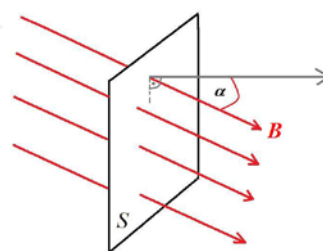
1.2.1 Magnetický indukční tok

Všechny děje v nestacionárním magnetickém poli jsou zapříčiněny změnami magnetického indukčního toku. Nabízí se otázka, co je to magnetický indukční tok a jak si jej představit. Jedná se o skalární veličinu, je tedy určena jen svou velikostí, směr nás nezajímá. V homogenním magnetickém poli (vektor magnetické indukce má ve všech bodech pole stejný směr a velikost) si představíme umístěnou rovinnou plochu o obsahu S . Plochu kolmo protínají magnetické indukční čáry (viz obr. 4). Čím větší je plocha S a velikost magnetické indukce B , tím větší je magnetický indukční tok:

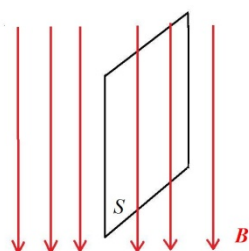
$\Phi = BS$. Tento vztah platí pouze pro situaci znázorněnou na obr. 4.



Obr. 4 Upraveno podle [1], str.



Obr. 5 Upraveno podle [1], str. 160.



Obr. 6 Indukční čáry rovnoběžné s plochou S .

Tuto situaci si můžeme představit též jako terč o ploše S , který je v pravidelných rozestupech proťat šípy. Čím větší je plocha terče a čím hustěji je proťat šípy, tím větší je „proděrovanou“ terče.

Jednotka magnetického indukčního toku se přímo nabízí ke zjištění ze vzorce pro výpočet jeho velikosti:

$$[\Phi] = [B] \cdot [S] = T \cdot m^2 = Wb \text{ čili weber.} \quad (4)$$

Ovšem jak si magnetický indukční tok představit v případě, že magnetické indukční čáry nebudou kolmé k ploše S ? Zde se objevují dvě možnosti. Podle první z nich bude vektor magnetické indukce procházet plochou S pod jiným úhlem, než je pravý (viz obr. 5). Tedy vektor magnetické indukce svírá s normálou k ploše S úhel α . (Normála k ploše je přímka kolmá k ploše). Tento obecný případ je popsán vztahem

$$\Phi = BS \cos \alpha = B_n S, \quad (5)$$

kde plocha S násobená kosinem α je velikost kolmého průmětu plochy S . Nyní si můžeme vyzkoušet dosazování různých hodnot úhlu α . Co bude platit pro velikost magnetického indukčního toku, dosadíme-li $\alpha = 40^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 0^\circ$?

Ale co když jsou magnetické indukční čáry rovnoběžné s plochou S ? (viz obr. 6) Dá se pak ještě vůbec hovořit o magnetickém indukčním toku? Dosazením $\alpha = 90^\circ$ do obecného vztahu dostáváme $\Phi = 0$. Opravdu, pokud si představíme terč, pak pokud jsou šípy rovnoběžné s plochou terče, vůbec jej neprotnou, tedy vůbec terč neproděravějí.

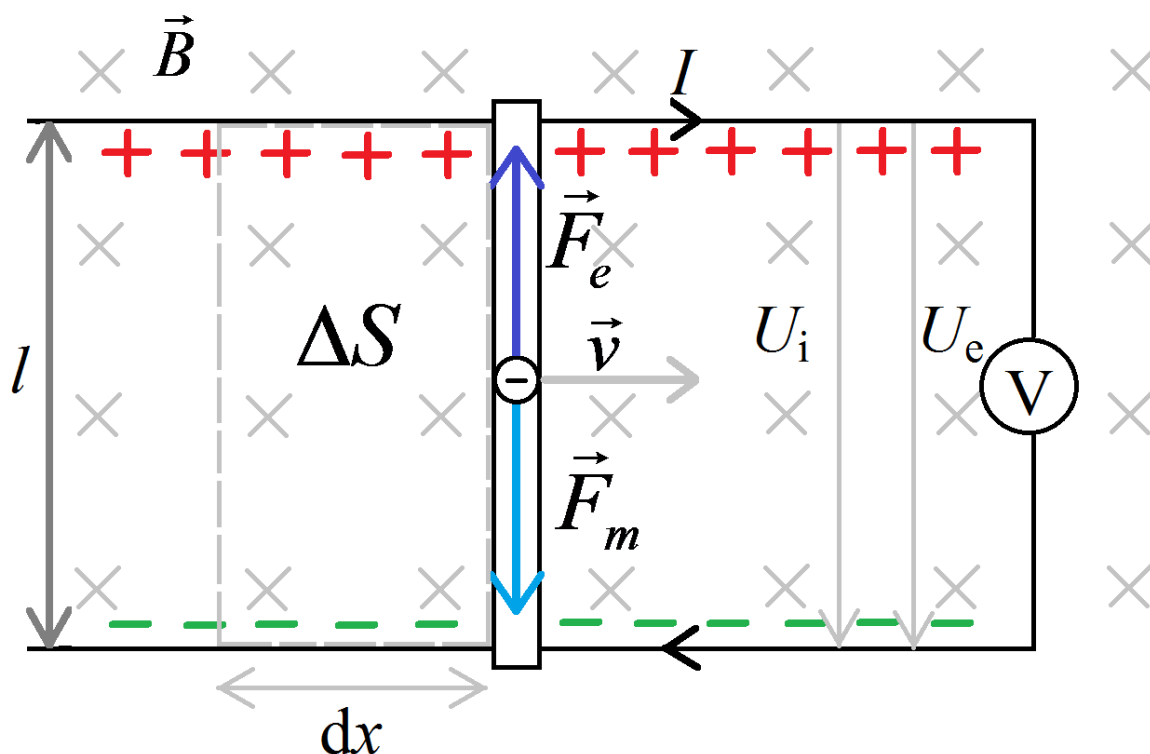
Shrneme nyní, co platí pro velikost magnetického indukčního toku: největší je, když jsou indukční čáry kolmé na plochu S ($\alpha = 0^\circ$) a nejmenší (nulový) je při rovnoběžnosti magnetických indukčních čar s plochou S .

1.2.3 Odvození Faradayova zákona elektromagnetické indukce

Elektromagnetická indukce je jev propojující v sobě elektrické pole s magnetickým. Je možné, aby magnetické pole způsobovalo vznik pole elektrického? A pokud ano, pak za jakých podmínek? Předně musí být splněno, že magnetické pole je nestacionární (časově proměnné). Elektromagnetická indukce je popsána Faradayovým zákonem elektromagnetické indukce. Nyní si ho můžeme společně odvodit za pomoci schématu na obr. 7.

Představme si přímý vodič délky l umístěný do homogenního magnetického pole, ve kterém vektor magnetické indukce \mathbf{B} směřuje kolmo k nákresně (této stránce). Vektor \mathbf{B} je též kolmý k přímému vodiči. Přímý vodič se bude pohybovat a při svém pohybu se bude celou dobu dotýkat

dvou rovnoběžných vodičů spojených s velmi citlivým voltmetrem. Při realizaci této situace uvidíme, že při pohybu vodiče nalevo se ručička voltmetru vychýlí, zatímco při pohybu vodiče napravo se ručička voltmetru vychýlí na opačnou stranu. Znamená to tedy, že v přímém vodiči vzniká proud, který se následně šíří i rovnoběžnými vodiči spojenými voltmetrem měřícím procházející proud. Jenže čím je to způsobeno? Pojďme se na to podívat podrobněji a využijme přitom i pár předchozích znalostí z elektrostatiky.



Obr. 7 Přímý vodič s proudem pohybující se směrem doprava. Upraveno podle [6, str. 131], [1, str. 163].

Víme, že přímý vodič délky l je umístěn v homogenním magnetickém poli, jehož magnetické indukční čáry jsou kolmé k přímému vodiči a vstupují do nákresny (této stránky), což je značeno křížkem, podle mnemotechnické pomůcky, že šíp vstupující do nákresny bychom také viděli jako jeho letky ve tvaru křížku. Přitom se přímý vodič dotýká dvou rovnoběžných vodičů spojených citlivým voltmetrem. Při pohybu přímého vodiče magnetickým polem směrem doprava (viz obr. 7) začne na volné elektrony (nosiče náboje) v přímém vodiči působit magnetická síla F_m , jejíž velikost vypočteme podle vztahu

$$F_m = q(v \times B), \quad (6)$$

známém ze střední školy bez uvedeného vektorového součinu jako:

$$F_m = Bqv, \quad (7)$$

kde q je velikost náboje (náboje elektronu) a v je rychlost pohybu přímého vodiče magnetickým polem. Vlivem magnetické síly se elektrony seskupí v dolní části vodiče, která se tímto nabíjí záporně. Oproti tomu v horní části přímého vodiče je volných elektronů nedostatek, čímž horní část získává kladný náboj. Směr magnetické síly působící na volné elektrony lze určit pomocí **Flemingova pravidla levé ruky**. Směr proudu lze podle používané dohody zvolit od kladného náboje k zápornému (zakresleno v obrázku), směr magnetických indukčních čar je dán jako vstupující kolmo do náčrtu. Zbývá jen určit směr magnetické síly působící na vodič v magnetickém poli dle slovního znění Flemingova pravidla: *Otevřenou levou ruku přiložíme k přímému vodiči tak, že magnetické indukční čáry vstupují do dlaně, natažené prsty ukazují směr proudu a odtažený palec ukazuje směr magnetické síly*. Na obrázku je tedy směr magnetické síly vyznačen směrem nahoru ke kladnému náboji. Nesouhlasný náboj konců vodiče v něm vyvolá vznik **indukovaného elektrického pole** o intenzitě:

$$E_i = \frac{F_m}{q} = \frac{Bqv}{q} = Bv. \quad (8)$$

Magnetická síla F_m je stejné velikosti jako elektrická síla F_e , jen opačného směru, tj.

$$F_m = -F_e. \quad (9)$$

Mezi konci přímého vodiče tedy vzniká **indukované napětí** U_i o velikosti:

$$-U_i = E_i \cdot l = Bvl \text{ neboli } -U_i = B \frac{\Delta x l}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t}, \quad (10)$$

kde Δx znamená dráhu vykonanou vodičem za dobu Δt jeho pohybu, $\Delta S = \Delta x l$ vyjadřuje změnu plochy opané vodičem za dobu Δt , $B\Delta S$ je rovno změně magnetického indukčního toku Φ , tedy vztah pro indukované napětí se dá zapsat jako

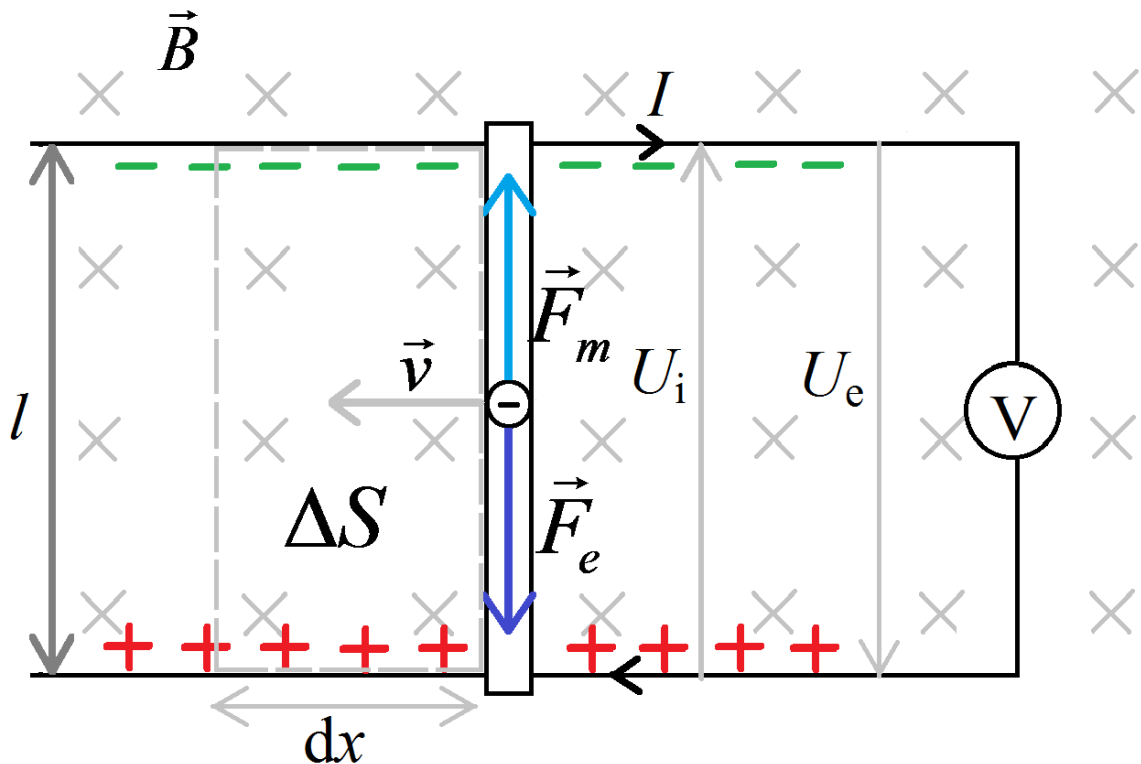
$$-U_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (11)$$

Vidíme tedy, že pohybující se přímý vodič se chová jako zdroj napětí. Nabízí se otázka, jaký je vztah mezi indukovaným napětím mezi konci přímého vodiče a napětím měřeným voltmetrem připojeným ke dvěma rovnoběžným vodičům. Je to to samé napětí? Pokud by to bylo to samé napětí, mohli bychom jednoduše pomocí voltmetru změřit indukované napětí v přímém vodiči. Odpověď je kladná v případě zanedbání proudu procházejícího voltmetrem. V praxi můžeme tento proud zanedbat, protože je velmi malý. Dostáváme se tedy k možnosti zjistit hodnotu indukovaného napětí v přímém vodiči jednoduše pomocí voltmetru připojeného k rovnoběžným vodičům, které se přímého vodiče dotýkají. Indukované napětí ve vodiči znamená elektromotorické napětí, napětí měřitelné voltmetrem svorkové napětí. Ale přeci jenom nejsou indukované napětí ve v přímém vodiči a napětí měřitelné

voltmetrem shodná. Mají totiž opačnou polaritu (stejnou velikost, ale opačný směr), což je vystiženo v následujícím vztahu znaménkem minus:

$$U_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (12)$$

Tento námi odvozený vztah se nazývá **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**. Znamená průlom, protože dokazuje těsnou provázanost magnetického pole s elektrickým. Vzájemně obě pole vznikají i zanikají a při jejich studiu je musíme vnímat jako neoddělitelné celky, proto v jejich souvislosti mluvíme o elektromagnetismu. Upraveno podle [5]. Ve znaménku minus je navíc zahrnut **Lenzův zákon**, který zní: „Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.“ [1, str. 166] Lze také uvažovat o možnosti pohybu přímým vodičem na levou stranu, situace je znázorněna na obr. 8. Všechny vztahy uvedené pro pohyb přímého vodiče by platily analogicky, rozdíl by byl pouze v polaritě indukovaného napětí, která by byla shodná s polaritou napětí měřitelného voltmetrem.



Obr. 8 Přímý vodič pohybující se směrem doleva. Upraveno podle [6, str. 131], [1, str. 163]

1.3 Indukované proudy

1.3.1 Indukovaný proud v uzavřeném obvodu

Pokus s hliníkovým kroužkem a magnetem

Nyní se pustíme do výkladu tohoto notoricky známého pokusu ze střední školy, k jehož realizaci je zapotřebí pouze stojan, vlákno (nit nebo rybářské vlákno), magnet a hliníkový kroužek (případně i kroužek z nevodivého materiálu a hliníkový přerušovaný kroužek). Účelem pokusu je žákům názorně předvést, jak funguje Lenzovo pravidlo a jak vzniká indukovaný proud v kroužku vlivem nestacionárního magnetického pole vytvořeného pohybem magnetu.

V dalším textu si rozebereme tři případy podle vlastností použitého kroužku

A) vodivý kroužek (z hliníku)

B) nevodivý kroužek (z plastu)

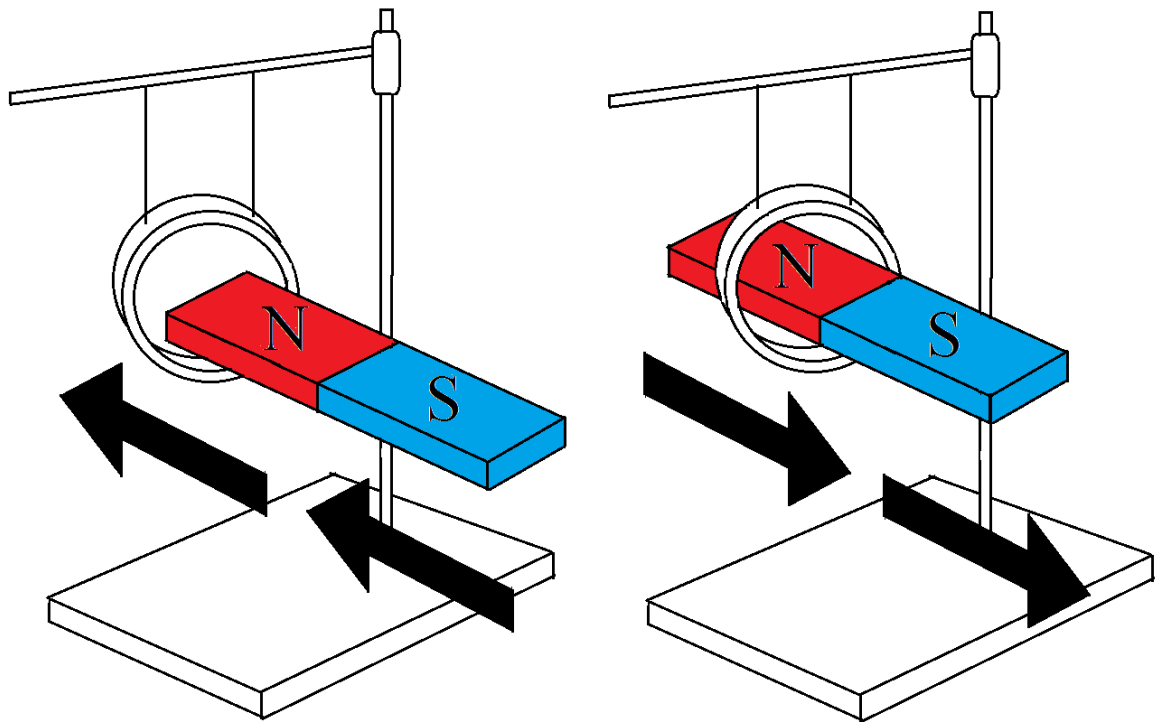
C) vodivý kroužek (z hliníku) přerušovaný v jednom místě

A) Vodivý kroužek (z hliníku)

Magnetem rázně pohybujeme směrem dovnitř zavěšeného hliníkovému kroužku, viz obr. 10. Pozorujeme, že kroužek se začne pohybovat stejným směrem jako magnet („couvá před magnetem“). Když magnetem rázně pohybujeme opačným směrem (ven z kroužku), kroužek se opět pohybuje ve stejném směru jako magnet (tentokrát „kroužek následuje magnet“). Zdá se tedy, že v prvním případě je kroužek odpuzován magnetem, zatímco ve druhém případě je kroužek magnetem přitahován.

Toto zdánlivě nelogické pozorování si vysvětlíme s použitím obr. 11, 12. Ve zkratce se dá říci, že pohybem magnetu dovnitř kroužku dochází ke vzniku nestacionárního magnetického pole (pro kroužek představuje vnější nestacionární magnetické pole). Vzrůstá magnetický indukční tok plochou S , proloženou kroužkem. Podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce ve vodivém kroužku vlivem vnějšího nestacionárního magnetického pole vzniká indukované napětí U_i a indukovaný proud I_i (kroužek je uzavřeným obvodem). Podle Lenzova zákona má indukovaný proud I_i v uzavřeném obvodu takový směr, že magnetické pole působí proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala. Magnetické pole kroužku má magnetické indukční čáry opačného směru než magnetické pole magnetu. Proto se kroužek a magnet odpuzují. Pro magnet pohybující se opačným směrem (ven z kroužku) nastává podobná situace, jen místo nárůstu magnetického indukčního toku dochází k poklesu magnetického indukčního toku. Indukovaný proud v kroužku má opět takový směr, aby jím vyvolané magnetické pole působilo svými účinky proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala. Magnetické indukční čáry pole vyvolaného v kroužku jsou stejného směru jako

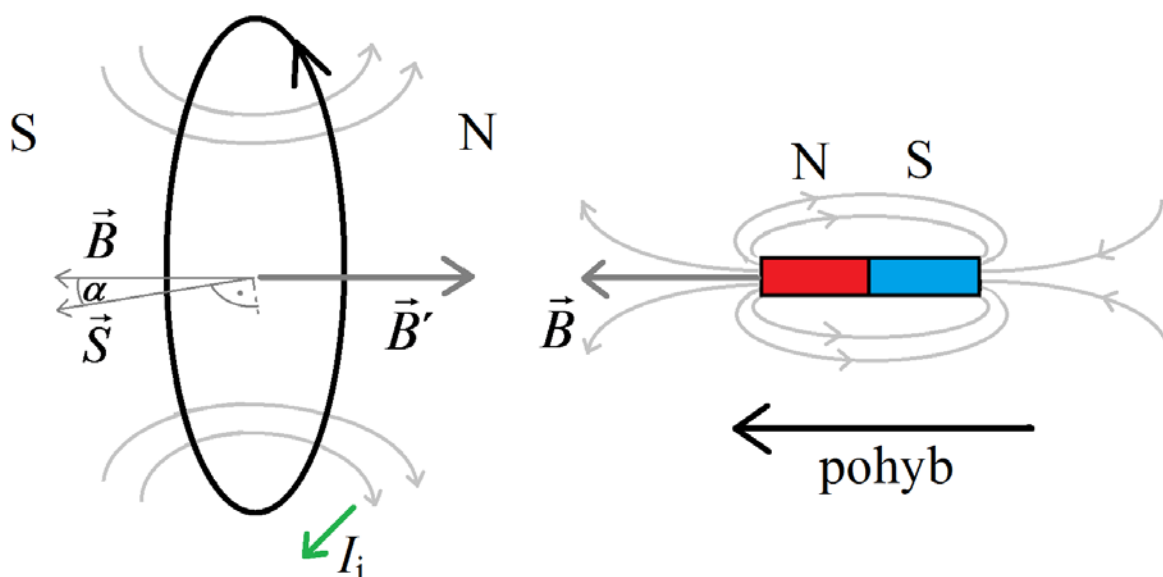
magnetické indukční čáry magnetu. Kroužek a magnet se přitahují. V následujícím textu krok za krokem zdůvodníme chování kroužku při pohybu magnetu směrem dovnitř a ven.



Obr. 10 Pohyb magnetu dovnitř a ven hliníkového kroužku. Převzato z [5, str. 299].

- **Magnet se pohybuje směrem dovnitř kroužku**

Na obr. 11 je znázorněn kroužek s magnetem. Již z úvodu učiva o magnetismu víme, jak znázornit magnetické pole kolem magnetu pomocí siločar směřujících od severního pólu (N) k jižnímu pólu (S). Dovedeme určit i směr vektoru magnetické indukce \vec{B} , protože se jedná o tečnu k magnetickým siločarám jdoucím od severu k jihu. Kroužek pro nás představuje uzavřenou smyčku. Vektor \vec{S} je normálovým vektorem plochy S proložené smyčkou, tedy vektor \vec{S} je kolmý k rovinné ploše S vyřáté smyčkou a má velikost rovnu obsahu plochy ohraničené smyčkou. Vektor \vec{S} s vektorem magnetické indukce \vec{B} vnějšího magnetického pole svírají úhel α o velikosti do 90° . Z textu o magnetickém indukčním toku víme, že jeho velikost se dá určit podle vztahu (5), tedy $\Phi = BS \cos \alpha = B_n S$.



Obr. 11 Pohyb magnetu směrem dovnitř hliníkového kroužku. Upraveno podle [6, str. 129].

Orientaci smyčky určíme pomocí **Ampérova pravidla pravé ruky**, podle kterého vztyčený palec má směr vektoru \vec{S} a pokrčené prsty ukazují směr indukovaného proudu. Pohybem magnetu dochází ke vzniku nestacionárního magnetického pole. Přibližování magnetu ke kroužku způsobuje nárůst magnetického indukčního toku, změna indukčního toku je tedy kladná (lze si to představit tak, že přibližováním magnetu ke kroužku vzrůstá počet magnetických indukčních čar, které protnou plochu proloženou kroužkem). Tedy vzniká elektromotorické indukované napětí U_i ve smyčce. Díky napětí U_i vzniká indukovaný elektrický proud I_i o střední hodnotě velikosti:

$$I_i = \frac{U_i}{R}, \quad (13)$$

kde R znamená odpor obvodu. Má vůbec smysl uvažovat o indukovaném proudu, když hodnota indukovaného napětí je nízká? Ano, protože hliníkový kroužek má velmi nízký odpor, proto je indukovaný proud dostatečně velký na to, aby vytvořil magnetické pole s výraznými účinky.

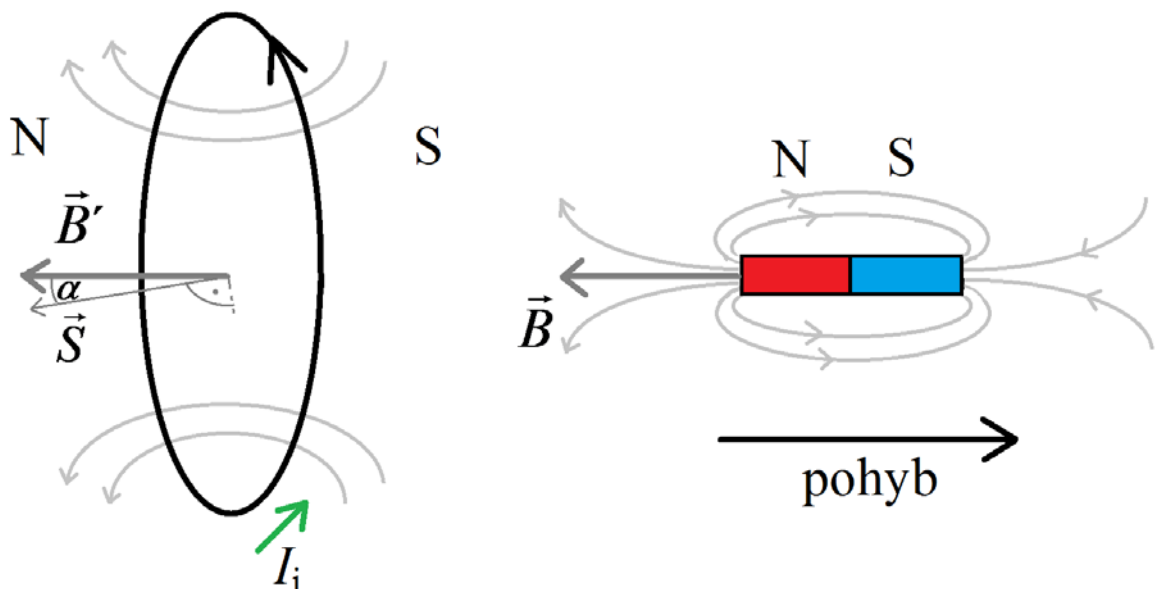
Směr indukovaného proudu se dá určit pomocí **Flemingova pravidla pravé ruky**: „Položíme-li pravou ruku k vodiči tak, aby odtažený palec ukazoval směr pohybu vodiče a vektor magnetické indukce vstupoval do dlaně, pak prsty ukazují směr indukovaného proudu ve vodiči.“ [5, str. 299] Dalším způsobem určení směru indukovaného proudu je pomocí polaritý indukovaného napětí U_i . Pro kladnou hodnotu změny magnetického indukčního toku má indukovaný proud stejný směr jako je orientace smyčky. Průchodem indukovaného proudu kroužkem vzniká magnetické pole kroužku, tedy kroužek se stává elektromagnetem. Ale jak si představit, kde má kroužek severní pól (N) a jižní pól (S)? Z předchozí podkapitoly využijeme Lenzův zákon, podle kterého víme, že indukovaný proud v uzavřeném obvodu způsobuje magnetické pole, které svými účinky působí proti změně

magnetického indukčního toku, která ho způsobila. Tedy vektor magnetické indukce \vec{B}' magnetického pole kroužku má směr opačný ke směru magnetické indukce \vec{B} vnějšího magnetického pole (magnetu). Indukční čáry magnetického pole kolem kroužku jsou opačného směru než magnetické indukční čáry vnějšího magnetického pole (magnetu). Severní pól kroužku tedy směřuje blíže k severnímu pólu magnetu a tím se kroužek a magnet odpuzují. Upraveno podle [1, 5, 6].

Na závěr ještě zdůvodněme, proč je výhodné k demonstraci pokusu použít hliníkový kroužek. Je to především kvůli nízké hodnotě odporu hliníku a malé hmotnosti hliníku, díky které se kroužek může snadněji pohybovat. Pokusy se pak vyznačují dostatečně pozorovatelnými projevy.

- **Magnet se pohybuje směrem ven z kroužku**

Při pohybu magnetu směrem od kroužku (viz obr. 12) pozorujeme, že kroužek se pohybuje stejným směrem jako magnet.



Obr. 12 Pohyb magnetu směrem ven z hliníkového kroužku. Upraveno podle [6 str. 129, 130].

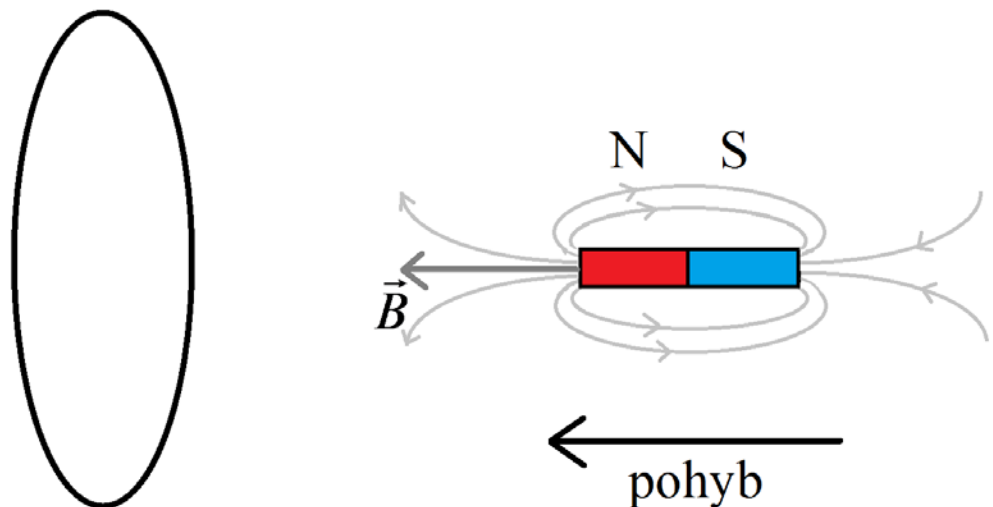
Tentokrát tedy následuje magnet a dokonce se na něj může i nasunout. Proč tomu tak je, si vysvětlíme obdobným způsobem jako v předchozím případě. Orientaci smyčky jsme určili v předešlém případě.

Pohybem magnetu opět vzniká nestacionární magnetické pole, jehož magnetická indukce má stejný směr jako v předešlém případě. Avšak situace s kroužkem se mění. Dochází ke snižování magnetického indukčního toku (lze si to představit tak, že čím dál méně magnetických siločar protne plochu proloženou kroužkem), změna magnetického indukčního toku je tedy záporná. Tím pádem dochází ke vzniku indukovaného napětí U_i s opačnou polaritou než v předchozím případě. Protože je

kroužek uzavřeným obvodem, dochází ke vzniku indukovaného proudu I_i . Pro jeho velikost platí vztah (13) jako v předchozím případě. Jeho směr se dá určit pomocí Flemingova pravidla pravé ruky jako v předchozím případě anebo druhým způsobem podle polarity napětí U_i . Napětí je v našem případě opačné polarity, tedy indukovaný proud je opačného směru než orientace smyčky. Podle Lenzova zákona indukovaný proud v uzavřeném obvodu je takového směru, že jeho magnetické pole působí proti změně indukčního toku, která ho způsobila. Kroužek se stává elektromagnetem. Magnetické indukční čáry pole kolem kroužku jsou opačného směru než magnetické indukční čáry magnetu. Jižní pól kroužku (S) je tedy blíže severnímu pólu magnetu. Výsledkem je přitahování kroužku k magnetu.

B) Nevodivý kroužek

Nevodivý kroužek (viz obr. 13) není uzavřeným obvodem a současně nemůže vést proud. Přestože dochází pohybem magnetu ke vzniku nestacionárního magnetického pole a ke změně magnetického indukčního toku, v nevodivém kroužku nemůže dojít ke vzniku indukovaného proudu I_i . Při experimentu tedy nedochází k pohybu kroužku.

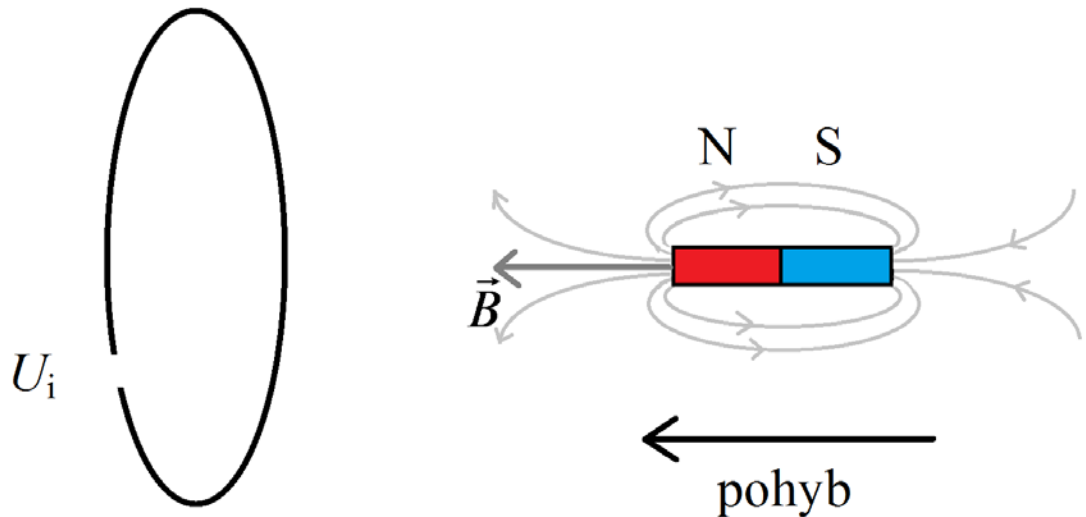


Obr. 13 Pohyb magnetu k nevodivému kroužku. Upraveno podle [6, str. 128,129].

C) Hliníkový přerušovaný kroužek

Stejně jako nevodivý kroužek není uzavřeným obvodem. Od nevodivého kroužku se ovšem liší svým vodivým materiálem. Díky tomu při vystavení „kroužku“ vnějšímu nestacionárnímu poli dochází ke vzniku indukovaného elektrického pole a koncentraci elektronů v jednom z konců „kroužku“ a tím ke vzniku elektromotorického indukovaného napětí U_i , viz obr. 14. Ovšem ke vzniku

indukovaného elektrického proudu I_i dojít nemůže, protože se nejedná o uzavřený obvod. Při demonstraci pokusu se kroužek nepohybuje.



Obr. 14 Pohyb magnetu k přerušnému hliníkovému kroužku. *Upraveno podle [6, str. 128,129].*

1.3.2 Indukované proudy v masivních vodičích

V následujícím úseku se zaměříme na možnost vzniku indukovaných proudů v masivních vodičích (např. desky, plechy, hranoly). Dále si uvedeme několik příkladů z praxe. V některých případech jsou indukční proudy prospěšné při provozu zařízení, zatímco jinde je třeba je minimalizovat.

Ke vzniku indukovaného proudu v masivním vodiči je nutné nestacionární magnetické pole, stejně jako u vodičů tvaru smyčky nebo tenkého drátu. Tedy buď se musí pohybovat masivní vodič v magnetickém poli (nezáleží, zda ve stacionárním nebo nestacionárním) nebo je nepohybující se masivní vodič vystaven vnějšímu nestacionárnímu magnetickému poli. Opět je vznik indukovaných proudů způsoben změnou magnetického indukčního toku.

Vznikající proudy v masivním vodiči mají v případě vodičů tvaru desky podobu velmi drobných vírů, proto jsou nazývány vířivými proudy. Používá se i označení **Foucaultovy proudy** (čteme Fukótovy), podle jejich objevitele, francouzského fyzika L. J. Foucaulta. Směr vířivých proudů nelze přesně určit.

Účinky vířivých proudů se člení do následujících dvou skupin:

- A) **Tlumení pohybu**
- B) **Zahřívání**

A) Tlumení pohybu

U pohybujících masivních vodičů vířivé proudy brzdí jejich pohyb. Typickým pokusem je kyvadlo s feritovým magnetem na konci, které se po rozkývání kýve ještě nějaký čas (tlumení je malé). Jakmile je pod kyvadlem umístěna vodivá deska (hliníková), kyvadlo se po rozkývání velmi rychle přestává kývat. Příčinou je vznik vířivých proudů uvnitř desky, protože pohybová energie kyvadla se přeměnila v energii vířivých proudů. Dalším působivým experimentem je Waltenhofenovo kyvadlo. Brzdění v pohybu nachází využití např. u indukčních brzd nebo dříve v elektroměru. U staršího elektroměru se při odběru elektrického proudu otáčel hliníkový kotouček v mezeře permanentního magnetu. Při přerušení odběru se kotouček přestal točit. [1] Ovšem v dnešní době se používají digitální elektroměry, protože mnozí nepoctivci zjistili, že stačí u staršího elektroměru přidržit silný magnet a docílí tím nižší hodnoty spotřeby na elektroměru. Dalším příkladem využití je tlumení systémů měřidel, aby se zabránilo kmitání ručky kolem rovnovážné polohy. Naopak nevýhodou se tlumení pohybu stává u rotorů elektromotorů, kde je třeba ho minimalizovat.

B) Zahřívání

Průchodem indukovaného proudu vodičem dochází ke zvýšení teploty vodiče. Důvodem je přeměna elektrické energie ve vnitřní energii vodiče, čímž dochází ke vzniku tzv. Jouleova tepla. Praktické využití je např. u indukčního ohřevu, kde vířivé proudy vznikají v silném dně varné nádoby položené na sklokeramické desce, pod kterou je uložena cívka. Dalším využitím jsou např. indukční pece v průmyslu. Naopak nežádoucí zahřívání nastává u transformátorů, u kterých znamená energetické ztráty.

V případech, kdy jsou Foucaultovy vířivé proudy nežádoucí, se používají tenké navzájem izolované plechy navrstvené na sobě. V tenkých vodičích vznikají Foucaultovy vířivé proudy výrazně méně než v masivních vodičích. Upraveno podle [1, 6].

2. PRAKTICKÁ ČÁST

V následující části práce jsou uvedeny čtyři pokusy k demonstraci jevů popsaných v teoretické části, jde především o magnetickou indukci, nestacionární magnetické pole, indukovaný proud a Foucaultovy vířivé proudy.

Prakticky použitelným výstupem experimentů jsou pracovní listy. Pracovní listy k prvním třem pokusům, jsou využitelné při výuce na střední škole. Nevyžadují žádné specializovanější moderní pomůcky, které by nemusely být ve vybavení fyzikálních kabinetů. Čtvrtý pokus je sofistikovanější a s bezpečnostními riziky, proto je pracovní list k němu přiložený, určen pro studenty učitelství v praktiku školních pokusů. V pracovním listě je zvýrazněna nutnost přítomnosti vedoucího praktika při provádění pokusu. Odkazy na pracovní listy jsou uvedeny v závorce v seznamu experimentů. Stejně tak jsou k pokusům natočeny videa. Odkazy na videa jsou opět v závorce v seznamu experimentů.

Seznam experimentů:

1. **Měření magnetické indukce** (pracovní list viz příloha č. 1, video viz video č. 1).
2. **Měření doby pádu neodymových a feritových magnetů trubkami z mědi, hliníku a plastu** (pracovní listy viz příloha č. 2 a 3, video viz video č. 2).
3. **Tlumení pohybu kyvadla pomocí Foucaultových vířivých proudů** (pracovní list viz příloha č. 4).
4. **Elektromagnetická levitace** (pracovní list viz příloha č. 5, video viz video č. 3 a 4).

2.1 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE

2.1.1 Měření hmotnosti magnetů

Jelikož se ukázalo, že nelze použít digitálních vah k určení hmotnosti magnetů, bylo nutné použít rovnoramenných vah. U digitálních vah 1 neodymový magnet měl hmotnost 3,4 g, zatímco 10 shodných neodymových magnetů mělo hmotnost 39 g. Z toho jsem usoudila, že magnety ovlivňují mechanismus digitálních vah. Při vážení na rovnoramenných vahách jsem dodržela **postup vážení**:

1 - Před každým měřením se stavěcími šrouby postaví váhy do vodorovné polohy tak, aby olovnice zavěšená na sloupku vah směřovala přesně do červeného bodu vyznačeného na desce vah a udávajícím správnou pozici olovnice.

2 - Váhy kontrolně odaretujeme (aretace je zařízení vah sloužící k šetrnému uložení břitů vahadla váhy, ovládá se páčkou zabudovanou v desce vah).

3 - Po kontrolním odaretování vah s prázdnými miskami má jazýček vah kmitat kolem střední čárky stupnice, vždy se stejnými výchylkami na obě strany-pokud jsou výchylky na jednu stranu větší, je nutné misky vah vyvážit malými kousky papíru přidávanými na misku vah, která je výše než ta druhá.

4 - Váhy aretujeme.

5 - Na jednu misku aretovaných vah položíme vážených 10 kusů magnetu, na druhou z misek vah naskládáme závaží o odhadované hmotnosti vážených magnetů.

6 - Odaretujeme váhy. Pokud jazýček vah kývá kolem střední čárky stupnice se stejnými výchylkami na obě strany, jsou magnety stejné hmotnosti jako závaží. Pokud ne, váhy zaaretujeme a přidáváme nebo odebíráme závaží až do doby, kdy se jazýček po odaretování kývá kolem střední čárky stupnice se stejnými výchylkami na obě strany.

7 - Hmotnost 10kusů magnetu určíme sečtením hmotnosti všech závaží. Hodnotu pro 1 kus magnetu získáme vydělením hmotnosti 10 magnetů číslem 10.

8 - Po dokončeném měření váhy aretujeme, odebereme z misek vážený předmět i všechna závaží. Upraveno podle [7, str. 72-73].

hmotnost neodymového magnetu: 3,36 g

hmotnost feritového magnetu: 2,185 g

2.1.2 Měření magnetické indukce neodymových a feritových magnetů

Praktickým výstupem pokusu je pracovní list č. 1, viz příloha č. 1. K pokusu je zhotoveno video č. 1.

Pomůcky: Hallova sonda, lineární měřič magnetické indukce LMMI-1, demonstrační stejnosměrný voltmetr s rozsahem 10 V, spojovací vodiče, neodymové magnety v počtu 10 kusů, feritové magnety v počtu 10 kusů, papírová stupnice.

Příprava: demonstrační stejnosměrný voltmetr postavíme na lineární měřič magnetické indukce LMMI-1 a propojíme je spojovacími vodiči. Podle obr. 15 červeným vodičem propojíme kladný vstup lineárního měřiče s kladným vstupem demonstračního voltmetru. Černý vodič vede ze záporného vstupu lineárního měřiče do vstupu ve voltmetru označeném 1 V (velikost 1 dílku voltmetru je 1 V). Dále zapojíme Hallovu sondu na výstup nalevo od kladného a záporného výstupu. Stanovíme měřicí rozsah 1 mT na otočném tlačítku na pozici druhé zleva. Takto sestavený teslametr zapojíme do zásuvky s napětím 230 V. Pomocí páčky v dolním levém rohu přístroj zapneme, což je signalizováno rozsvícením zeleného kontrolního světla nad páčkou. Upraveno podle [8].

Postup:

1 - Upevníme papírovou stupnici s vyznačenou polohou Hallové sondy a magnetu na krabici vhodné výšky. K pomocné papírové stupnici přikládáme Hallovu sondu vždy ve stejné pozici zobrazené na obr. 16.

2 - Magnety umísťujeme vždy do vzdálenosti 2 cm od Hallové sondy. Jelikož jsou póly magnetu umístěny rovnoběžně s podstavou, umísťujeme magnety vždy tak, aby jejich podstava byla rovnoběžná s Hallovým prvkem v sondě a nacházela se přímo nad Hallovým prvkem. Tímto indukční čáry magnetů procházejí kolmo Hallovým prvkem v sondě, indukční tok plochou Hallova prvku je maximální. Dojde k vychýlení ručky voltmetru, 1 dílek stupnice pro nás znamená magnetickou indukci o velikosti 1 mT.

3 - Měření podle obr. 17 opakujeme desetkrát a postupně provedeme pro 1 až 10 kusů neodymového magnetu. Totéž zopakujeme pro 1 až 10 kusů feritového magnetu. Zjištěné hodnoty zapisujeme do tabulky. Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

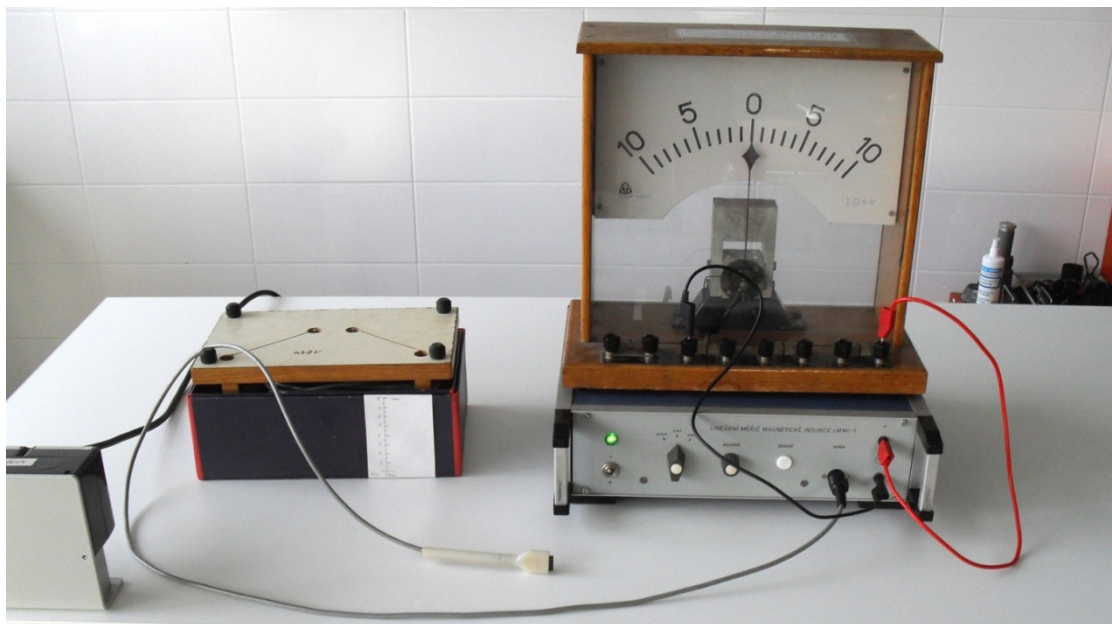
Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

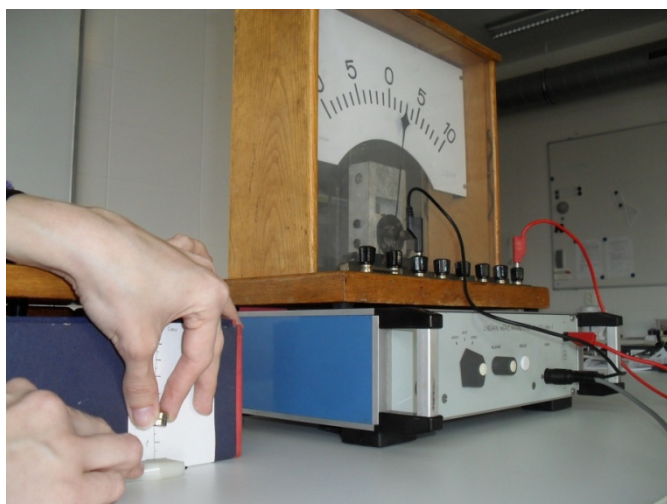
Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

$$X = (\bar{x} \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{jednotka},$$

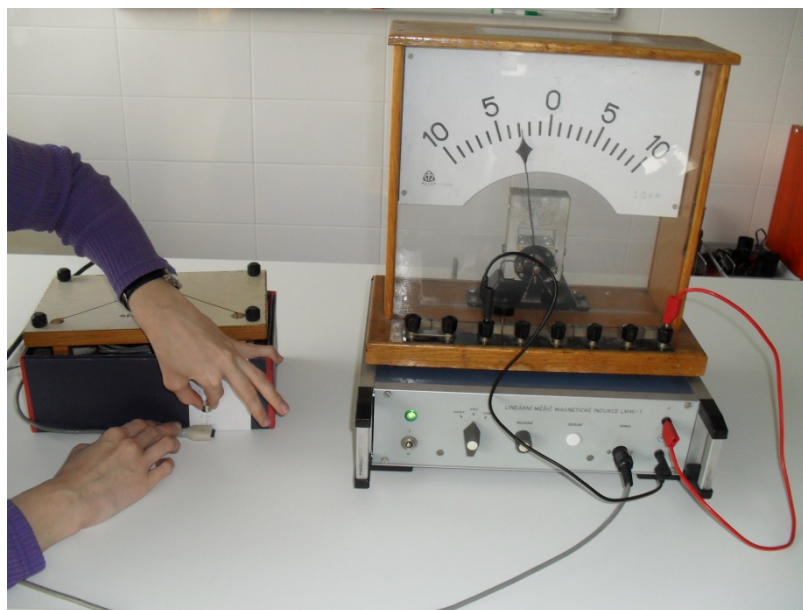
Kde X znamená měřenou veličinu, \bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].



Obr. 15 *Teslametr. Upraveno podle [8, str. 174].*



Obr. 16 *Určování vzájemné polohy magnetu a Hallovy sondy.*



Obr. 17 Měření magnetické indukce.

Magnetická indukce neodymového a feritového magnetu

Počet magnetů: 1 až 10 ks

Vzdálenost Hallové sondy od magnetu činí 2 cm, pozice magnetu vůči Hallově sondě je kolmo k Hallově sondě tak, aby Hallovou sondou procházely indukční čáry kolmo a indukční tok byl maximální.

Poznámka: Hallova sonda je tvořena čidlem MAF 100. Jádrem čidla je polovodičová destička zakončená čtyřmi kontakty. Dva z kontaktů slouží k přivedení stálého proudu do destičky, zbylé dva k odvedení Hallova napětí na vstup zesilovače. Destička i s kontakty je zapouzdřena v plastovém obalu vzhledově připomínajícím propisovací tužku. Upraveno podle [8, str. 174, 175].

Použité zkratky v tabulce 1:

ks ... počet použitých magnetů

neodym ... neodymový magnet

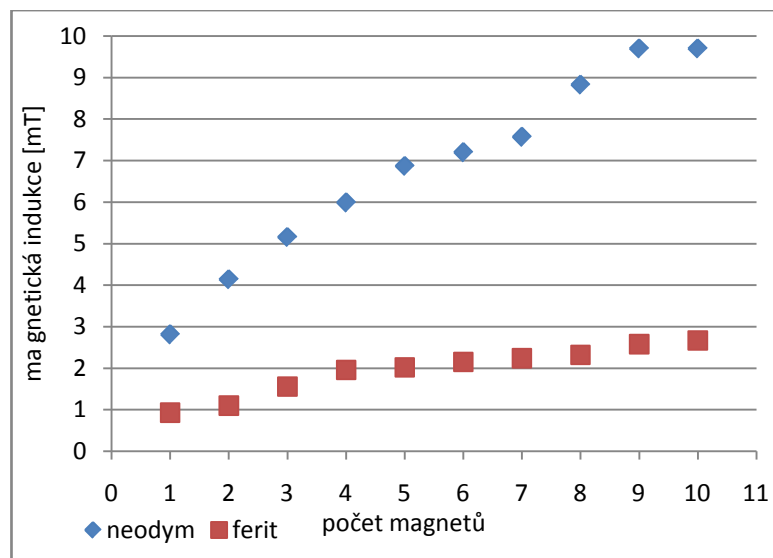
ferit ... feritový magnet

B_1 ... magnetická indukce pole neodymového magnetu

B_2 ... magnetická indukce pole feritového magnetu

Tab. 1 Magnetická indukce neodymového a feritového magnetu v počtu 1 až 10 kusů.

Ks	Neodym	Ferit
1	$B_1 = (2,81 \pm 0,08) \cdot mT$	$B_2 = (0,93 \pm 0,02) \cdot mT$
2	$B_1 = (4,14 \pm 0,08) \cdot mT$	$B_2 = (1,10 \pm 0,03) \cdot mT$
3	$B_1 = (5,16 \pm 0,08) \cdot mT$	$B_2 = (1,56 \pm 0,05) \cdot mT$
4	$B_1 = (5,99 \pm 0,08) \cdot mT$	$B_2 = (1,96 \pm 0,02) \cdot mT$
5	$B_1 = (6,87 \pm 0,04) \cdot mT$	$B_2 = (2,02 \pm 0,01) \cdot mT$
6	$B_1 = (7,2 \pm 0,1) \cdot mT$	$B_2 = (2,15 \pm 0,03) \cdot mT$
7	$B_1 = (7,57 \pm 0,1) \cdot mT$	$B_2 = (2,24 \pm 0,04) \cdot mT$
8	$B_1 = (8,83 \pm 0,2) \cdot mT$	$B_2 = (2,32 \pm 0,05) \cdot mT$
9	$B_1 = (9,7 \pm 0,1) \cdot mT$	$B_2 = (2,58 \pm 0,07) \cdot mT$
10	$B_1 = (9,7 \pm 0,1) \cdot mT$	$B_2 = (2,67 \pm 0,07) \cdot mT$



Obr. 18 Závislost velikosti magnetické indukce na použitém druhu a počtu magnetů.

Komentář: Z grafu na obr. 18 vidíme, že magnetická indukce neodymového magnetu je přibližně třikrát vyšší než magnetická indukce feritového magnetu. Toto zjištění koresponduje s pozorováním, že neodymové magnety jsou mnohem silnější než feritové. Oproti intuitivnímu očekávání magnetická indukce ani u jednoho z typů magnetů neroste lineárně s počtem použitých magnetů. Důvodem je měnící se poloha těžiště magnetů od Hallova prvku. V případě neodymových magnetů v počtu 6 a více kusů se projevuje poměrně velká střední kvadratická chyba průměru, což je způsobeno **systematickou chybou měření**. Jednotlivé naměřené hodnoty se od sebe relativně hodně lišily. Nepřesnosti jsou pravděpodobně způsobeny nedokonalostí lidských smyslů, kdy je poměrně obtížné odečítat hodnoty vyjádřené desetinným číslem na stupnici o rozsahu 10 V, kde nejmenší dílek má hodnotu 1 V. Nicméně dílky jsou poměrně velké, proto si myslím, že lze odhadnout např. hodnotu 1,5 namísto 1 nebo 2. Rovněž přiložit magnet ve vzdálenosti přesně 2 cm od Hallovy sondy nemuselo být vždy úplně přesně dodrženo, i přes použití papírové stupnice s vyznačenou výškou, ke které se Hallova sonda i magnet přikládali vždy ve stejné pozici. Hodnota pro magnetickou indukci 9 a 10 neodymových magnetů vychází shodně. Nejčastější naměřenou hodnotou v obou případech byla 10 mT. Ručka při měření přesahovala dílek s číslem 10, tedy poslední dílek stupnice. Po změně rozsahu lineárního měřiče magnetické indukce z rozsahu 1 mT na rozsah 10 mT při měření ručka ukazovala přesně na 1 dílek stupnice, tedy jsem usoudila, že naměřených 10 mT bylo správně i s použitím rozsahu 1 mT.

Poznámka: Výroba feritových a neodymových magnetů

Feritové i neodymové magnety se vyrábějí metodou práškové metalurgie, kdy se suroviny v práškové podobě za velkých tlaků a teplot lisují do pevné formy, vypálí a upraví do finálních tvarů. Rozdíl je především v použitých surovinách.

Neodymové magnety se vyrábějí z neodymu, železa a boru. Neodymový prach tvořen částicemi velikosti v řádech jednotek mikronů vznikají v atmosféře inertního plynu. Další fází je lisování a spečení, formuje se konečný tvar. Posledním krokem je povrchová úprava nutná k zamezení jinak velmi snadné oxidace. Povrchová úprava se provádí buď galvanicky poniklováním nebo vrstvou plastu z parylu nebo epoxidové pryskyřice.

Surovinami pro feritové magnety jsou tvrdé keramické oxidy-ferity. Přibližný poměr oxidu železitého (Fe_2O_3) a uhličitanů baria (BaCO_3), event. uhličitanů stroncia (SrCO_3) je 4:1. Tato směs prodělá za vysokých teplot kalcinaci. Produkt kalcinace, hexaferit, se namele a lisuje do zadaných tvarů za působení vnějšího magnetického pole. Pro výrobu izotropních magnetů se používá hexaferit v práškové formě, lisuje se za sucha. K výrobě anizotropních magnetů je třeba vodné suspenze hexaferitu. Další fází je výpal při teplotách nad 1200 °C (tzv. sintrování), magnety získávají konečný vzhled. Poslední fází je magnetizace magnetů. Upraveno podle [10], [11].

2.2 DOBA PÁDU NEODYMOVÝCH MAGNETŮ MĚDĚNOU A HLINÍKOVOU TRUBKOU

Praktickým výstupem pokusu jsou pracovní listy č. 2 a 3. Pokus je zdokumentován ještě ve videu č. 2.

2.2.1 Příprava a provedení pokusu

Pomůcky: měděná a hliníková tyč délky 1 m a většího průměru 18 mm, 2 laboratorní stojany, 6 laboratorních držáků, 6 laboratorních držáků na uchycení zkumavky, stopky, délkové měřidlo

Příprava: Trubky uchytíme do stojanů pomocí držáků, trubky jsou kolmé k zemi, viz obr. 19. V další fázi měření trubky upevníme do polohy, ve které svírají úhel o velikosti 45° se zemí podle obr. 20. Správnou velikost úhlu nastavíme pomocí velkého trojúhelníkového pravítka jako na obr. 21.

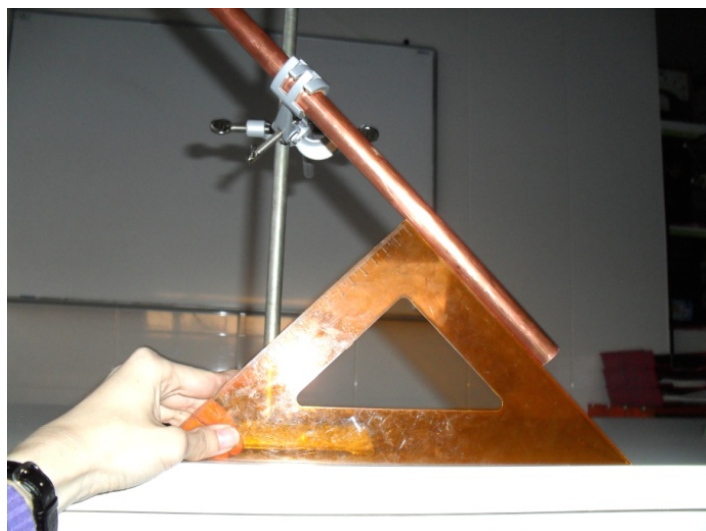
Postup: Pouštíme nad vrchním koncem trubky magnet vždy ve stejné poloze. Současně podržíme ruku pod dolním koncem trubky a spustíme stopky. Při dopadu magnetu na ruku pod dolním koncem trubky zastavíme stopky. Nejprve provedeme měření pro 1 až 10 kusů neodymového magnetu a pro trubky kolmé se zemí a trubky svírající 45° se zemí.



Obr. 19 Měření doby pádu magnetů měděnou a hliníkovou trubkou kolmou k zemi.



Obr. 20 Měření doby pádu magnetů měděnou a hliníkovou trubkou svírající úhel o velikosti 45° se zemí.



Obr. 21 Určování úhlu 45° , který trubky svírají se zemí.

2.2.2 Výsledky pokusu

DOBA PÁDU NEODYMOVÝCH A FERITOVÝCH MAGNETŮ MĚDĚNOU A HLINÍKOVOU TRUBKOU

Tabulka 2 Doba pádu neodymového magnetu v počtu 1 až 10 kusů měděnou a hliníkovou trubkou kolmou k zemi a svírající úhel o velikosti 45° se zemí.

ks	Neodym, kolmá Cu	Neodym, kolmá Al	Neodym, 45° Cu	Neodym, 45° Al
1	$t_1 = (4,60 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (2,43 \pm 0,04) \cdot s$	$t_1 = (11,74 \pm 0,09) \cdot s$	$t_2 = (5,05 \pm 0,06) \cdot s$
2	$t_1 = (8,16 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (3,90 \pm 0,05) \cdot s$	$t_1 = (17,8 \pm 0,1) \cdot s$	$t_2 = (8,5 \pm 0,1) \cdot s$
3	$t_1 = (9,4 \pm 0,3) \cdot s$	$t_2 = (4,27 \pm 0,06) \cdot s$	$t_1 = (16,85 \pm 0,06) \cdot s$	$t_2 = (10,1 \pm 0,2) \cdot s$
4	$t_1 = (8,3 \pm 0,1) \cdot s$	$t_2 = (4,03 \pm 0,08) \cdot s$	$t_1 = (14,7 \pm 0,1) \cdot s$	$t_2 = (9,21 \pm 0,03) \cdot s$
5	$t_1 = (7,60 \pm 0,08) \cdot s$	$t_2 = (3,64 \pm 0,08) \cdot s$	$t_1 = (12,81 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (7,5 \pm 0,2) \cdot s$
6	$t_1 = (6,87 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (3,18 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (11,26 \pm 0,07) \cdot s$	$t_2 = (6,2 \pm 0,1) \cdot s$
7	$t_1 = (5,98 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (2,85 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (10,17 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (5,6 \pm 0,1) \cdot s$
8	$t_1 = (5,43 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (2,86 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (9,14 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (5,30 \pm 0,1) \cdot s$
9	$t_1 = (4,95 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (2,40 \pm 0,04) \cdot s$	$t_1 = (8,17 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (4,6 \pm 0,1) \cdot s$
10	$t_1 = (4,52 \pm 0,02) \cdot s$	$t_2 = (2,13 \pm 0,04) \cdot s$	$t_1 = (7,40 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (4,3 \pm 0,1) \cdot s$

použité zkratky:

ks...použitý počet magnetů

neodym ... neodymový magnet

ferit ... feritový magnet

kolmá Cu ... měděná trubka kolmá k podlaze

kolmá Al ... hliníková trubka kolmá k podlaze

45° Cu ... měděná trubka svírající úhel 45° s podlahou

45° Al ... hliníková trubka svírající úhel 45° s podlahou

t₁ ... doba pádu magnetu měděnou trubkout₂ ... doba pádu magnetu hliníkovou trubkou**DOBA PÁDU FERITOVÝCH MAGNETŮ MĚDĚNOU A HLINÍKOVOU TRUBKOU**

Pomůcky, příprava i postup viz předchozí případ, pouze místo neodymových magnetů použijeme feritové.

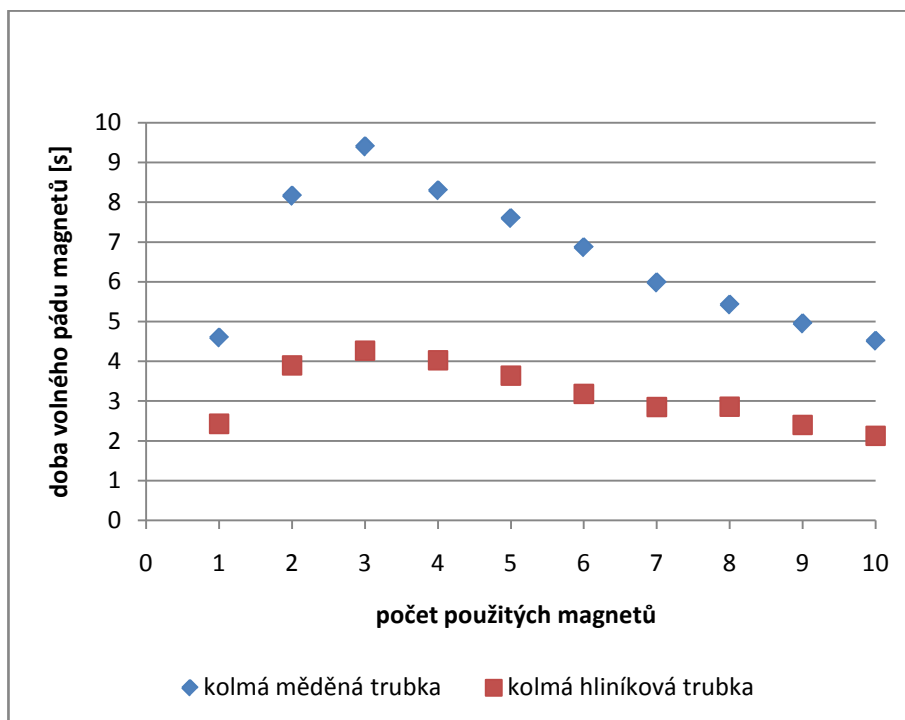
použité zkratky: ferit ... feritový magnet

ostatní viz předešlá tabulka

Tabulka 3 Doba pádu feritového magnetu v počtu 1 až 10 kusů měděnou a hliníkovou trubkou kolmou k zemi a svírající úhel o velikosti 45° se zemí.

ks	Ferit, kolmá Cu	Ferit, kolmá Al	Ferit, 45° Cu	Ferit, 45° Al
1	$t_1 = (1,25 \pm 0,08) \cdot s$	$t_2 = (1,01 \pm 0,05) \cdot s$	$t_1 = (1,32 \pm 0,04) \cdot s$	$t_2 = (1,00 \pm 0,03) \cdot s$
2	$t_1 = (1,50 \pm 0,04) \cdot s$	$t_2 = (0,96 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (2,3 \pm 0,1) \cdot s$	$t_2 = (1,30 \pm 0,03) \cdot s$
3	$t_1 = (1,85 \pm 0,04) \cdot s$	$t_2 = (1,32 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (4,16 \pm 0,06) \cdot s$	$t_2 = (4,29 \pm 0,03) \cdot s$
4	$t_1 = (2,9 \pm 0,2) \cdot s$	$t_2 = (4,5 \pm 0,4) \cdot s$	$t_1 = (3,72 \pm 0,04) \cdot s$	$t_2 = (2,59 \pm 0,09) \cdot s$
5	$t_1 = (1,62 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (1,10 \pm 0,04) \cdot s$	$t_1 = (3,19 \pm 0,04) \cdot s$	$t_2 = (2,64 \pm 0,03) \cdot s$
6	$t_1 = (1,50 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (1,01 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (2,71 \pm 0,05) \cdot s$	$t_2 = (2,34 \pm 0,03) \cdot s$
7	$t_1 = (1,38 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (1,04 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (2,40 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (2,18 \pm 0,04) \cdot s$
8	$t_1 = (1,28 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (0,93 \pm 0,02) \cdot s$	$t_1 = (2,10 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (1,87 \pm 0,01) \cdot s$
9	$t_1 = (1,18 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (0,86 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (2,02 \pm 0,04) \cdot s$	$t_2 = (1,76 \pm 0,02) \cdot s$
10	$t_1 = (1,17 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (0,92 \pm 0,03) \cdot s$	$t_1 = (1,91 \pm 0,03) \cdot s$	$t_2 = (1,73 \pm 0,02) \cdot s$

Závislost doby pádu neodymového magnetu na použitém materiálu trubky - obě trubky jsou kolmé k podlaze:

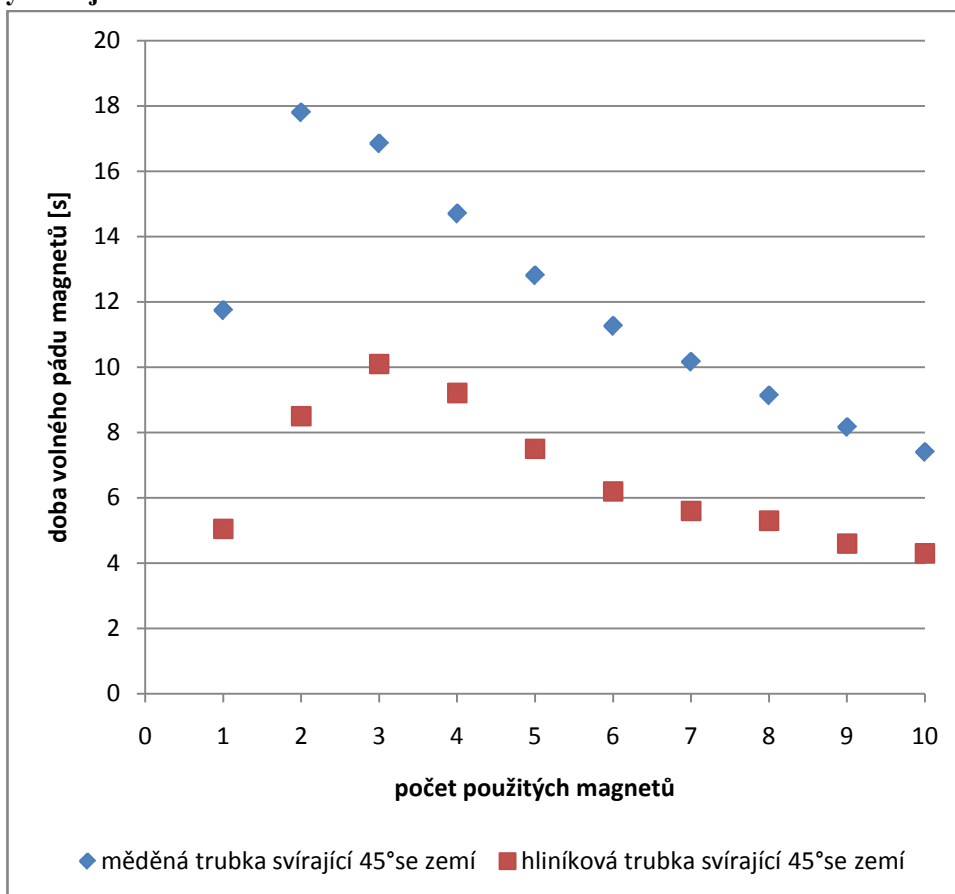


Obr. 22 Závislost doby pádu neodymového magnetu v počtu 1 až 10 kusů na materiálu trubky. Trubky jsou kolmé k zemi.

Komentář: Z grafu na obr. 22 je zřejmé, že doba pádu měděnou trubkou je vyšší než u hliníkové trubky, a to přibližně dvakrát. Nejdelší doba pádu nastává pro obě trubky pro 3 kusy neodymového magnetu. Od 4 kusů neodymového magnetu se doba pádu zkracuje. Důvodem je zvyšující se hmotnost použitého počtu magnetů. Proto se nedostavuje intuitivně očekávaný růst velikosti doby pádu magnetů s růstem jejich počtu.

Měření je zatíženo **systematickou chybou** a též neodstranitelnou chybou způsobenou délkou měřené reakční doby v délce od 0,20 s do 0,40 s.

obě trubky svírají úhel o velikosti 45° se zemí



Obr. 23 Závislost doby pádu neodymového magnetu v počtu 1 až 10 kusů na materiálu trubky. Trubky svírají se zemí úhel o velikosti 45°.

Komentář: Z grafu na obr. 23 vidíme, že nejvyšší hodnoty doby pádu dosahuje neodymový magnet v počtu 2 kusů pro měděnou trubku a v počtu 3 kusů pro hliníkovou trubku. Od následující hodnoty počtu magnetů doba pádu klesá. Důvodem je opět zvyšující se hmotnost použitého množství magnetů. Nicméně i pro dobu pádu 10 kusů oběma trubkami pozorujeme, že doba pádu je vyšší než u pádu plastovou trubkou za stejných podmínek.

Pro srovnání jsem ani v jednom z předchozích případů nepoužila plastovou trubku, protože doba

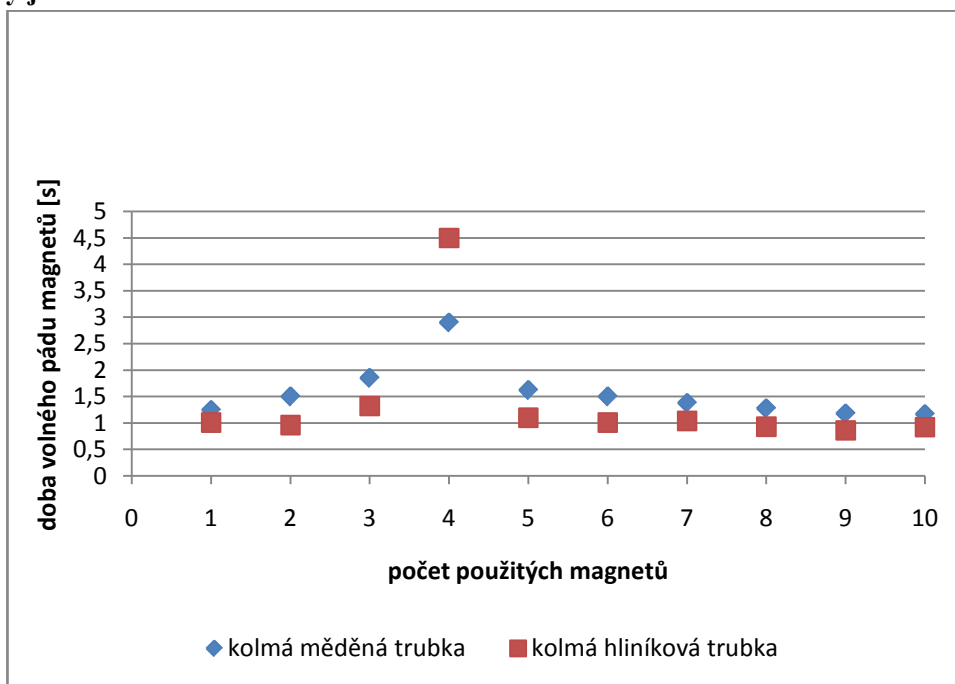
volného pádu trubkou dle vztahu $t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2}{9,81}} s \approx 0,45 s$ je srovnatelná s mou reakční dobou.

Plastová trubka se hodí spíše pro demonstraci.

Pro žádný z případů vč. měření pro feritové magnety, nebyla použita železná trubka, protože silně přitahuje magnety. Bylo by značně obtížné odstranit magnety z trubek, ve kterých ani nevykonají klasický volný pád.

Závislost doby pádu feritového magnetu na použitém materiálu trubky:

obě trubky jsou kolmé k zemi

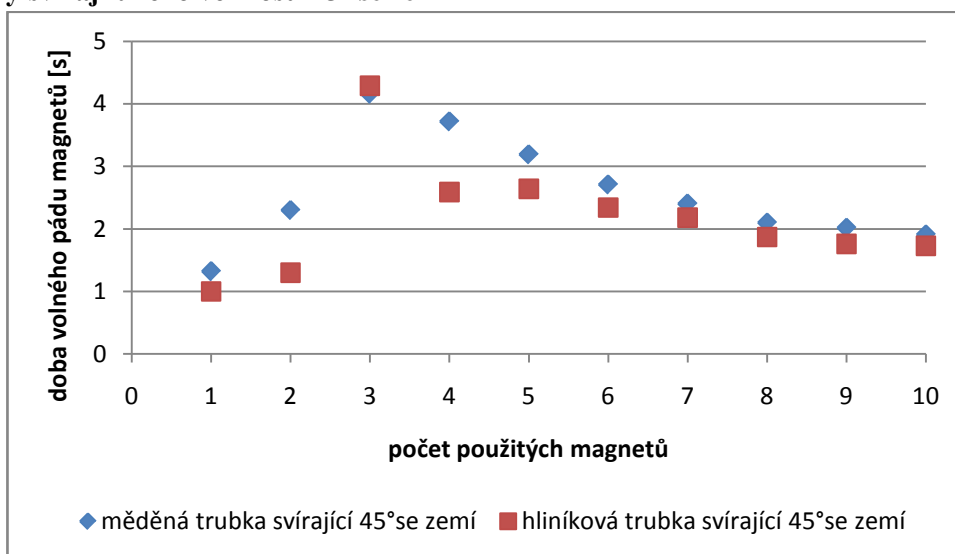


Obr. 24 Závislost doby pádu feritového magnetu v počtu 1 až 10 kusů na materiálu trubky. Trubky jsou kolmé k zemi.

Komentář: Podle grafu na obr. 24 vidíme, že dochází k nárůstu doby pádu pro feritové magnety v počtu 1 až 4 kusy, nejdelší doba pádu nastává pro 4 kusy feritového magnetu. Od 5 kusů magnetu doba pádu klesá kvůli zvyšující se hmotnosti použitého počtu magnetů. Nicméně i pro hodnotu doby pádu 10 kusů vidíme, že je znatelně vyšší než by byla při volném pádu bez trubky, případně trubkou nevodivou (např. plastovou). Je znatelné, že měděnou trubkou padají feritové magnety delší dobu než trubkou hliníkovou.

Měření je zatíženo **systematickou chybou** a též chybou způsobenou nedokonalostí lidských smyslů, protože má reakční doba dosahuje hodnoty 0,20 s až 0,40 s. Přestože byly magnety pouštěny vždy ze stejné výšky a ve stejné poloze vzhledem k trubce, docházelo v některých případech k výrazné rotaci magnetu uvnitř trubky a doba pádu tím byla znatelně delší. V některých případech to způsobuje velmi výrazné rozdíly v naměřených hodnotách, zejména u 3 a 4 kusů použitých s hliníkovou trubkou. Tento vliv se při měření nepodařilo odstranit a získat tak deset měření jen s výraznou rotací nebo jen bez ní. Jako zajímavý se jeví fakt, že 4 kusy feritového magnetu při pádu kolmou hliníkovou trubkou vydávaly nepříjemný vrčivý zvuk připomínající rezonanci. Asi ve třetině trubky začaly velmi silně rotovat a vydávat při tom zmíněný zvuk doprovázený viditelným chvěním trubky. Jako nevýhoda se jevílo použití 3 kusů feritového magnetu, protože až v polovině případů docházelo díky rozměrům magnetů k uvíznutí v trubce, následně bylo potřeba dostat ven magnety klepnutím trubkou. Měření se tím stávalo zdlouhavějším.

obě trubky svírají úhel o velikosti 45° se zemí



Obr. 25 Závislost doby pádu feritových magnetů v počtu 1 až 10 kusů na materiálu trubky. Trubky svírají se zemí úhel o velikosti 45°.

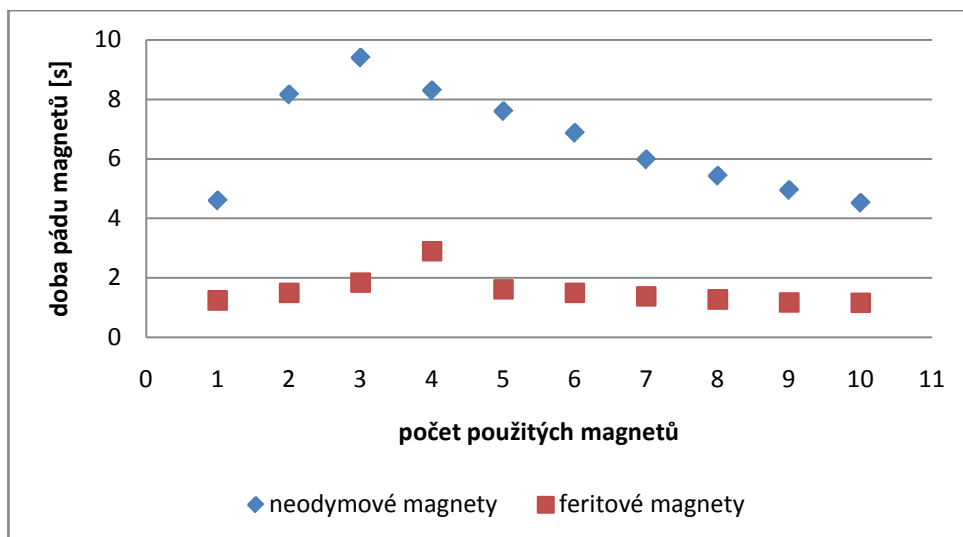
Komentář: Z grafu na obr. 25 je zřejmé, že doba pádu se prodlužuje pro počet magnetů 1 až 3 kusy, nejdelší doba pádu nastává pro 3 kusy feritového magnetu. Od 5 kusů magnetu doba pádu klesá kvůli zvyšující se hmotnosti použitého počtu magnetů. I přes tuto skutečnost pro hodnotu doby pádu 10 kusů vidíme, že je zřejmě vyšší než by byla při volném pádu bez trubky, případně trubkou nevodivou (např. plastovou). Stejně jako v předchozím případě je doba pádu měděnou trubkou delší.

Měření je zatíženo **systematickou chybou** a též chybou způsobenou nedokonalostí lidských smyslů, protože má reakční doba dosahuje hodnoty 0,20 s až 0,40 s. Stejně jako v předchozím případě docházelo k uvíznutí 3 kusů magnetu v trubkách, měření tedy bylo zdlouhavější.

Pro srovnání jsem ani v jednom z předchozích případů nepoužila plastovou trubku, protože doba volného pádu trubkou je srovnatelná s mou reakční dobou. Plastová trubka se hodí spíše pro demonstraci.

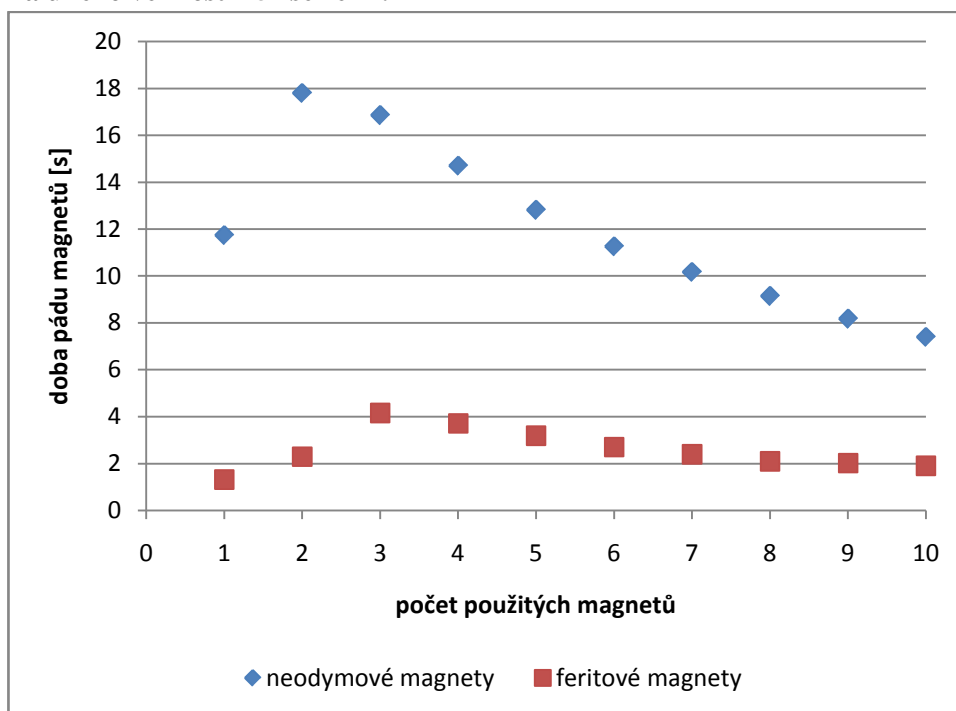
Porovnání doby pádu neodymových a feritových magnetů měděnou trubkou: trubka je kolmá k zemi:

Komentář: Z grafu na obr. 26 je patrné, že neodymové magnety mají přibližně třikrát vyšší dobu pádu než magnety feritové. Odpovídá to dříve zjištěné větší hodnotě magnetické indukce pro neodymové magnety. Nejvyšší doba pádu je pro 3 kusy neodymového magnetu a pro 4 kusy feritového magnetu. Od dalších hodnot počtu magnetů doba pádu klesá vlivem zvětšující se hmotnosti magnetů. Měření je zatíženo jak systematickou chybou, tak chybou zapříčiněnou nedokonalostí lidských smyslů.



Obr. 26 Závislost doby pádu měděnou trubkou kolmo k zemi na použitém druhu magnetů.

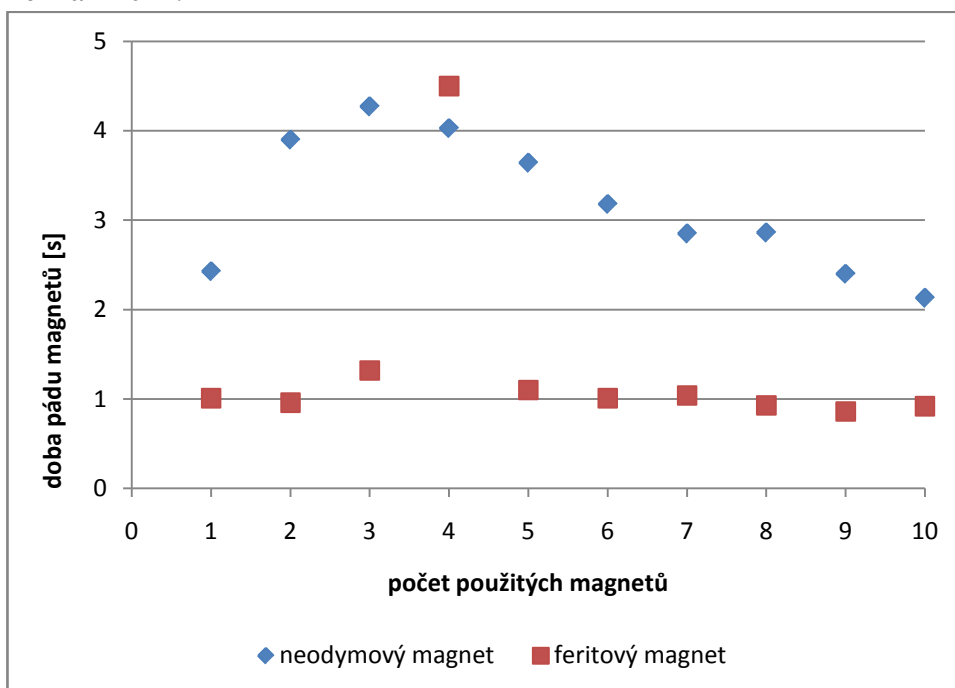
trubka svírá úhel o velikosti 45° se zemí:



Obr. 27 Závislost doby pádu magnetů měděnou trubkou svírající se zemí úhel o velikosti 45° na druhu použitých magnetů.

Komentář: Z grafu na obr. 27 je zřejmé, že neodymové magnety mají přibližně třikrát vyšší dobu pádu než magnety feritové. Odpovídá to větší hodnotě magnetické indukce pro neodymové magnety, kterou jsme zjistili hned v úvodním měření magnetické indukce. Nejdelší doba pádu nastává pro 2 kusy neodymového magnetu a pro 3 kusy feritového magnetu. Od dalších hodnot počtu magnetů doba pádu klesá následkem zvyšující se hmotnosti magnetů. Měření je zatíženo systematickou chybou i chybou způsobenou nedokonalostí lidských smyslů.

**Porovnání doby pádu neodymových a feritových magnetů hliníkovou trubicou:
trubka je kolmá k zemi:**



Obr. 28 Závislost doby pádu magnetů kolmou hliníkovou trubicou v závislosti na druhu použitých magnetů.

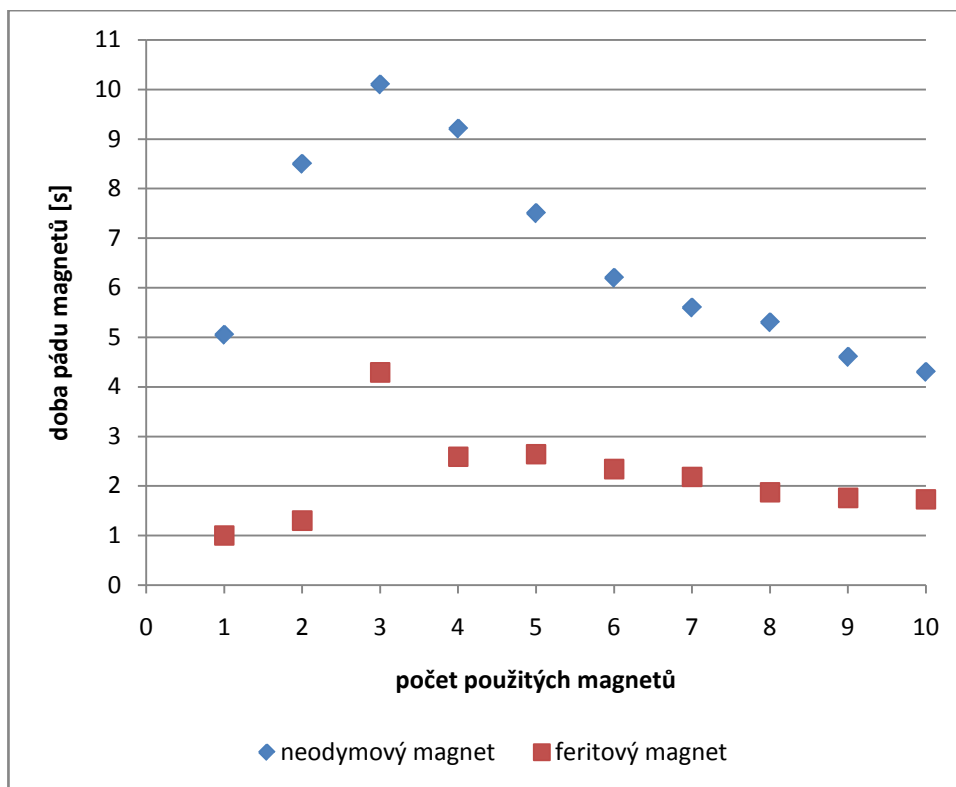
Komentář: Z grafu na obr. 28 vidíme, že nejvyšší doba pádu nastává pro 3 kusy neodymového a feritového magnetu a s rostoucím počtem použitých magnetů klesá. Příčinou je zvyšující se hmotnost použitého počtu magnetů. Dále je patrné, že doby pádu neodymových magnetů je přibližně třikrát vyšší než doby pádu feritových magnetů, což odpovídá zjištěným hodnotám magnetické indukce polí magnetů.

Měření je zatíženo **systematickou chybou** a též chybou způsobenou nedokonalostí smyslů, protože doby pádu feritových magnetů jsou již poměrně krátké a tato chyba se do nich promítá určitě výrazněji než do dlouhých dob pádu v jiných případech. Navíc pro 4 kusy feritového magnetu je značný rozdíl v naměřených hodnotách vlivem silné rotace magnetů v trubce. Tento vliv se nepodařilo odstranit nebo ho docílit pokaždé, nebylo tedy možné provést 10 měření jen se silnou rotací nebo jen bez ní.

trubka svírá úhel o velikosti 45° se zemí:

Komentář: Z grafu na obr. 29 je zřejmé, že nejvyšší dobu padají 3 kusy neodymového a feritového magnetu a s rostoucím počtem použitých magnetů klesá. Pokles doby pádu je způsoben zvyšující se hmotností použitého počtu magnetů. Dále je patrné, že velikost doby pádu neodymových magnetů je přibližně třikrát vyšší než u feritových magnetů. Tento fakt odpovídá dřívějšímu zjištění, že pole neodymových magnetů je zhruba třikrát silnější než pole feritových magnetů.

Měření je zatíženo **systematickou chybou** a též chybou způsobenou nedokonalostí smyslů, protože doby pádu feritových magnetů jsou již poměrně krátké a tato chyba se do nich promítá určitě výrazněji než do dlouhých dob pádu v jiných případech.



Obr. 29 Závislost doby pádu magnetů hliníkovou trubicou svírající úhel o velikosti 45° se zemí na materiálu použitých magnetů.

ZÁVĚR:

Doba pádu neodymových magnetů je přibližně třikrát vyšší než doba pádu feritových magnetů, což souvisí s třikrát silnějším polem neodymových magnetů. Měděnou trubicou padají magnety delší dobu než hliníkovou. Trubicami svírajícími úhel o velikosti 45° se zemí také padají magnety delší dobu než trubicami kolmými.

Pro prokazatelné experimenty doporučuji použít neodymové magnety v počtu tří kusů a měděnou trubku svírající se zemí úhel o velikosti 45°.

2.3 TLUMENÍ KYVADLA POMOCÍ FUCAULTOVÝCH VÍŘIVÝCH PROUDŮ

Praktickým výstupem pokusu je pracovní list č. 4 v příloze č. 4.

2.3.1 Příprava a provedení pokusu

POMŮCKY: kastrol se silným hliníkovým dnem, hliníkový kalorimetr s tenkým dnem s podobným průměrem dna jako dno kastrolu, 2 laboratorní stojany, 2 laboratorní držáky, 2 laboratorní držáky k uchycení zkumavky, plastová trubka délky 1m, kousek drátu, 2 kusy neodymového magnetu (o průměru 12 mm, výšce 4 mm a hmotnosti 3,36 g), rybářský vlasec, sponka na papír nebo malá matice k vytvoření úchyty magnetu k jeho závěsu, úhломěr, tvrdý papír, nůžky, plastové posuvné měřítko.



Obr. 30 Aparatura pro měření počtu kyvů do zastavení.

PŘÍPRAVA:

1 - Z tvrdého papíru formátu zhruba A5 vyrobíme stupnici s vyznačením rozkyvu. V papíru vystříháme otvor odpovídající průměru plastové trubky a u otvoru vyznačíme pomocí úhломěru úhly rozkyvu 5° , lze vyznačit i více velikostí rozkyvu. Papírová stupnice je zachycena na obr. 31.

2 - Plastovou trubku upevníme pomocí laboratorních držáků do laboratorních stojanů podle obr. 32.

3 - Na plastovou trubku navineme drát s očkem pro závěs rybářského vlákna s magnetem. Na rybářské vlákno uvážeme kousek vytvarované kancelářské sponky nebo malou matici podobně jako na obr. 33. Ke konci závěsu přiložíme neodymový magnet.

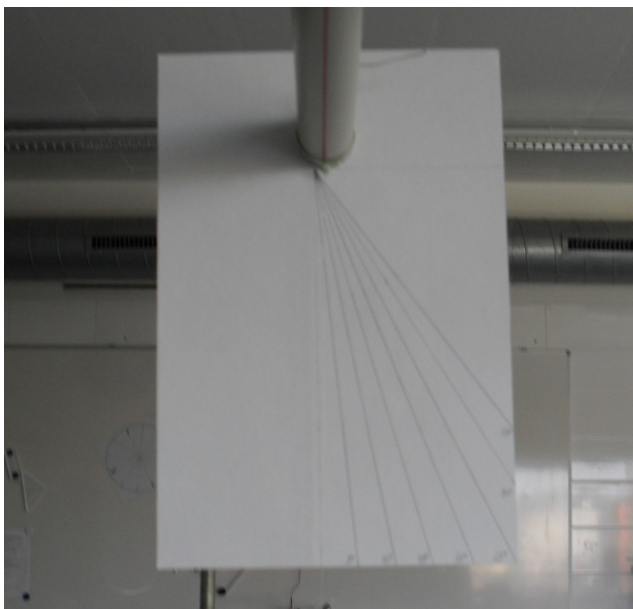
4 - Rybářské vlákno provlékneme očkem drátu upevněným na plastové trubce, pak papírovou stupnicí navléknutou na trubce a dbáme, aby se vlákno nedotýkalo těsně stupnice (aby nedocházelo ke tření). Zbytek rybářského vlákna upevníme ke stojanu a zajistíme lepicí páskou.

5 - Pod středem trubky umístíme kastrol dnem vzhůru. Volně zavěšený magnet má v klidu směřovat do středu dna kastrolu (při kývání se tedy magnet bude pohybovat stále nad plochou dna nádoby), viz obr. 34.

6 - Zvolíme vzdálenost zavěšeného magnetu ode dna kastrolu pomocí pomocných měřitek jako např. pravítka nebo tenké knihy. Odměříme si plastovým měřítkem výšku různé kombinace pravítek a učebnic tak, abychom dosáhli požadované výšky, položíme je na kastrol a nastavíme tak délku závěsu magnetu. Plastové měřítko je používáno kvůli značné síle neodýmových magnetů, stejně jako na pohled zbytečný závěs na plastovou trubku. Cílem je zamezit výskytu magnetických materiálů blízko neodýmových magnetů.

7 - Před každým měřením si ověříme pozici závěsu magnetu na papírové stupnici (má být na nule). Vychýlíme kyvadlo o 5° podle papírové stupnice, viz obr. 35. Počítáme počet kyvů do zastavení kyvadla. Je značně subjektivní záležitostí, jaký pohyb ještě považovat za kyv. Za kyv považují, když se magnet pohybuje po trajektorii tvaru přímky nebo značně protáhlé elipsy. Za kyv naopak nepovažují rotaci magnetu na místě s velikostí výchylky v řádu rozměru magnetu.

8 - Poznámka: Kvůli rozdílné výšce kastrolu a kalorimetru je nutné podložit knihami kastrol tak, aby obě nádoby byly stejně vysoké, viz obr. 36. Díky této úpravě není třeba měnit délku závěsu zvlášť pro každou z nádob. Dále zamezujeme blízkému kontaktu neodýmových magnetů s magnetickými předměty vč. hodinek, kovových pásků i samotných magnetů ležících několik centimetrů od sebe. Hrozí srážky doprovázené poškozením předmětů nebo povrchové úpravy magnetů.



Obr. 31 Papírová stupnice k určování rozkvyvu.



Obr. 32 *Způsob upevnění plastové trubky k laboratornímu stojanu pomocí laboratorních držáků.*



Obr. 33 *Detail uchycení magnetu k závěsu.*



Obr. 34 *Magnet je v klidové poloze přesně nad středem dna nádoby.*



Obr. 35 Rozkývání kyvadla s rozkyvem 5° .



Obr. 36 Podložení nižší z nádob knihami, aby obě nádoby byly stejné výšky.

2.3.2 Vyhodnocení závislosti počtu kyvů na počtu a druhu magnetu a tloušťce dna

Hmotnost magnetu: 3,36 g

Hmotnost úchytu k závěsu: 0,80 g

Orientační měření počtu kyvů kyvadla do úplného zastavení v závislosti na vzdálenosti magnetu od dna nádoby

Komentář: Pro každou vzdálenost dna nádoby od zavěšeného magnetu se provedlo vždy jedno měření počtu kyvů kyvadla do zastavení potřebné k získání orientačního přehledu. Z výsledků orientačního měření pro neodymový magnet v počtu 1 a 2 kusy lze vybrat vzdálenosti, ve kterých lze počet kyvů do zastavení proměřit důkladněji (tj. vybrat 3 vzdálenosti a pro každou z nich měření desetkrát opakovat pro 1 i 2 kusy neodymového magnetu). Při měření počtu kyvů 2 kusů

neodymových magnetů po předcházejícím měření pro 1 kus magnetu je vždy třeba znovu nastavit délku závěsu, aby byla dodržena vzdálenost od dna nádoby. Vzdálenost magnetu ode dna se určovala pomocí pomocných měřítok, např. pravítek a knih.

Zjištěné hodnoty zapisujeme do tabulky. Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

$$X = (\bar{x} \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{jednotka},$$

Kde X znamená měřenou veličinu, \bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].

Ve všech tabulkách používám shodně uvedené **značení** doplněné o následující zkratky:

č.m. ... číslo měření

Součet AH ... součet absolutních hodnot

Ar. průměr ... aritmetický průměr

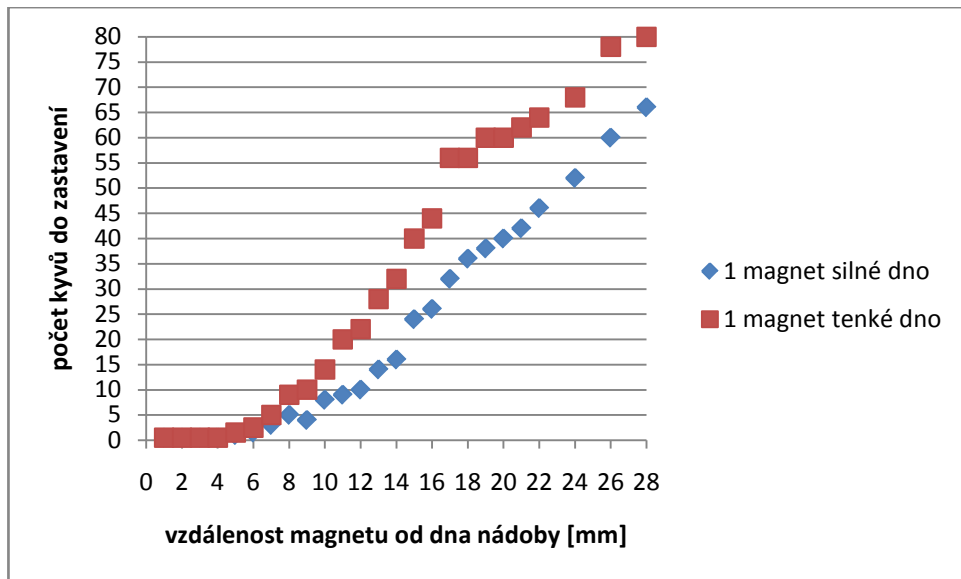
1 neodymový magnet

Podle grafu na obr. 37 je **nejsilnější vliv** vířivých proudů ve vzdálenosti **do 5 mm** magnetu ode dna nádoby. Obecně jsou projevy vířivých proudů mnohem silnější nad silným dnem kastrolů, což odpovídá teoretickým poznatkům o výrazném působení vířivých proudů v silnějších vrstvách vodičů. V praxi se zamezuje vířivým proudům poskládáním materiálu z tenkých navzájem izolovaných plechů. Jeden neodymový magnet vykoná polovinu kyvu nad kastrolem se silným hliníkovým dnem i nad kalorimetrem s tenkým dnem ve vzdálenosti do 4 mm. Polovinou kyvu mám na mysli pohyb z krajní polohy do rovnovážné (trajektorie má tvar půloblouku). Ve vzdálenosti od 5 mm do 12 mm je počet kyvů nad kastrolem se silným dnem od 1 do 10, tedy vliv vířivých proudů je ještě velmi silný. Od 12 mm do 22 mm vliv vířivých proudů slábne. Ve vzdálenosti 12 mm od kastrolu se silným dnem magnet vykoná 10 kyvů, nad kalorimetrem s tenkým dnem vykoná 22 kyvů. Počty kyvů dál rostou ve vzdálenosti 16 mm, kdy magnet koná 26 kyvů nad silným dnem a 44 kyvů nad tenkým dnem. Ve vzdálenosti 20 mm magnet koná 40 kyvů nad silným dnem a 60 kyvů nad dnem tenkým.

Slabší vliv vířivých proudů nastává přibližně **od** vzdálenosti **28 mm**, kdy nad silným dnem vykoná magnet 66 kyvů a nad tenkým 80 kyvů.

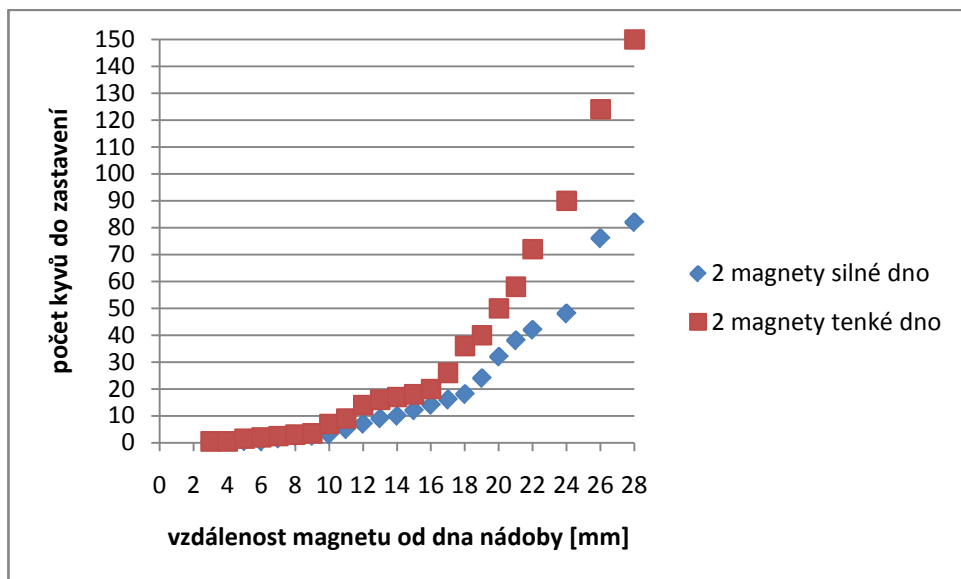
Velmi slabý vliv vířivých proudů nastává pro vzdálenost přibližně **40 mm**, protože pro vzdálenost 42 mm magnet nad silným dnem vykoná 56 kyvů, zatímco nad tenkým 160 kyvů.

Zanedbatelný vliv vířivých proudů je od vzdálenosti **přibližně 50 mm**.



Obr. 37 Závislost počtu kyvů 1 neodymového magnetu do zastavení na síle dna a vzdálenosti magnetu od dna nádoby.

2 neodymové magnety



vykonají půl kyvu. Již z této skutečnosti jde dobře vidět, že vířivé proudy jsou silnější, když je silnější magnet (a tím silnější vnější nestacionární magnetické pole). Nad kalorimetrem s tenkým dnem magnety vykonají ve vzdálenosti do 4 mm půl kyvu. Ve vzdálenostech nad 4 mm roste počet vykonaných kyvů do zastavení. Ve vzdálenosti 12 mm je to již 7 kyvů nad silným dnem a 14 kyvů nad tenkým dnem. Pro vzdálenost 16 mm je to 14 kyvů nad silným dnem a 20 nad tenkým a ve vzdálenosti 20 mm je to 32 kyvů nad silným dnem a 50 kyvů nad dnem tenkým.

Slabší vliv vířivých proudů je pozorovatelný ve vzdálenosti **22 mm**, nad silným dnem magnety vykonají 42 kyvů, nad dnem tenkým 72 kyvů.

Velmi slabý vliv vířivých proudů je u vzdálenosti **26 mm**, kdy se vykoná 76 kyvů nad silným dnem a 124 kyvů nad tenkým dnem.

Zanedbatelný vliv vířivých proudů je znatelný ve vzdálenostech od cca **30 mm**, protože ve vzdálenosti 28 mm magnety vykonají 82 kyvů nad silným dnem a 150 kyvů nad dnem tenkým.

SHRNUTÍ:

Ve vzdálenostech menších jak 5 mm lze zaznamenat nejsilnější projevy vířivých proudů. Ve vzdálenostech přibližně 10 mm až 20 mm jsou dobře pozorovatelné projevy vířivých proudů, dají se poměrně dobře měřit počty kyvů magnetu do zastavení. Proto jsou k pečlivějšímu měření dále vybrány vzdálenosti 12 mm, 16 mm a 20 mm. Efekt brzdění pohybu kyvadla je silnější u silného dna kastrolu, což odpovídá faktu, že vířivé proudy v největší míře vznikají v masivních vodičích. Současně lze pozorovat výraznější působení vířivých proudů u dvou kusů neodymového magnetu, což odpovídá očekávání, že pohyb silnějšího magnetu způsobí silnější nestacionární magnetické pole a tím i výraznější vířivé proudy v masivním vodiči.

Pro všechna měření je použit **rozkyv** kyvadla 5°. Zkoušela jsem pracovat i s rozkyvy většími, a to 10°, 15°, 20°, 25°, 30° a 35°. Ukázalo se, že nejlepší je použít rozkyv 5° nebo 10°, protože při těchto velikostech rozkyvu kyvadlo kýve přesně nad plochou dna nádoby. Při větších rozkyvech se kyvadlo při kývání dostává i mimo plochu dna nádoby, což se jevílo nevhodné pro měření. Navíc se počet kyvů do zastavení pro jednotlivé rozkyvy zdatelně nelišil.

Při měření jsem se snažila zamezit **kontaktu** neodymových magnetů s **magnetickými předměty**, proto jsem závěs provedla na plastové trubce na železných stojanech co nejdále kývajícím se magnetům.

2.3.4 Výsledky měření počtu kyvů do zastavení kyvadla pro vzdálenosti 12 mm, 16 mm a 20 mm

V této části pokusu byly s přihlédnutím k orientačním výsledkům předchozího měření vybrány tři vzdálenosti magnetu od dna, ve kterých určuji počet kyvů magnetu do zastavení. Kritériem výběru byl dostatečně výrazný projev vířivých proudů a současně podstatné rozdíly v počtu kyvů do zastavení ve zmíněných třech vzdálenostech. Podmínky měření a použitá aparatura jsou stejné jako v předchozím, čistě orientačním měření. Každé měření se provedlo desetkrát, určily se odchylky měření. Zjištěné hodnoty zapisujeme do tabulky. Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

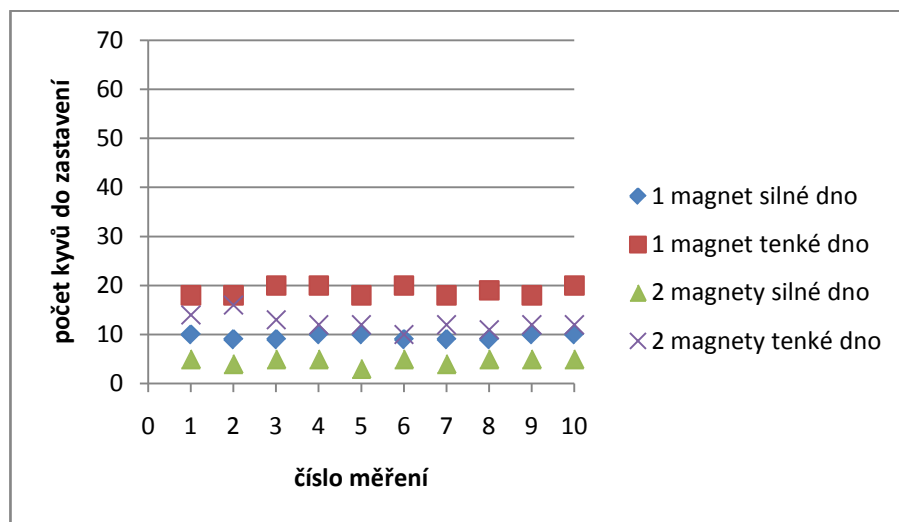
$$X = (\bar{x} \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{jednotka},$$

Kde X znamená měřenou veličinu, \bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].

Poté byly výsledky zaneseny do grafu, pod kterým následuje diskuse.

Výsledky měření většinou přibližně odpovídají prvotnímu orientačnímu měření, přestože jsou i výraznější odlišnosti, zejména u 2 magnetů nad tenkým dnem ve vzdálenosti 16 mm a 2 magnetů nad silným dnem ve vzdálenosti 20 mm nad dnem. Odlišnosti jsou způsobené systematickou chybou a také subjektivitou měření, při kterém je poměrně individuální stanovit, jaký pohyb je ještě kyvem a jaký už ne.

KÝVÁNÍ KYVADLA 12 MM OD DNA NÁDOBY



Obr. 39 Závislost počtu kyvů do zastavení na počtu neodymových magnetů a na síle dna pro vzdálenost 12 mm magnetů od dna nádoby.

počet kyvů vykonaných do zastavení:

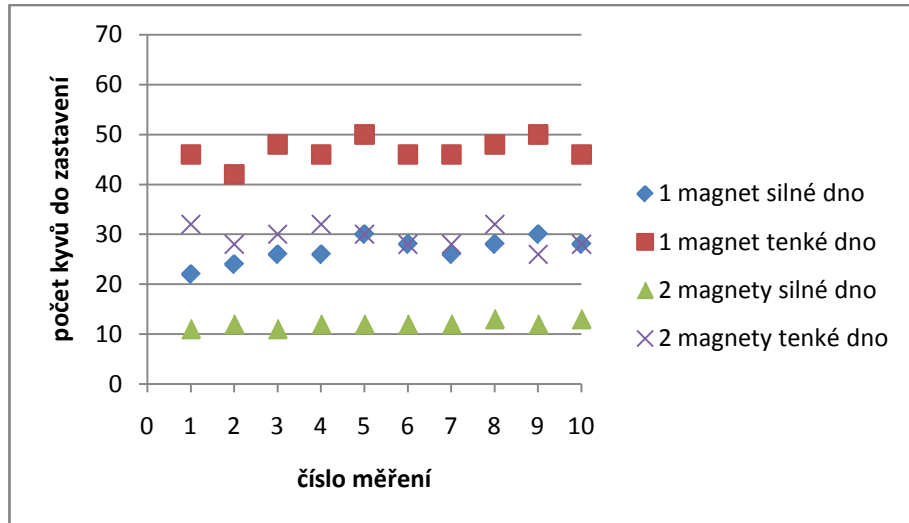
1 magnet nad silným dnem: $n_1 = (9,5 \pm 0,2)$ kyvů

1 magnet nad tenkým dnem: $n_2 = (18,9 \pm 0,3)$ kyvů

2 magnety nad silným dnem: $n_3 = (4,6 \pm 0,2)$ kyvů

2 magnety nad tenkým dnem: $n_4 = (12,2 \pm 0,4)$ kyvů

KÝVÁNÍ KYVADLA 16 MM OD DNA NÁDOBY



Obr. 40 Závislost počtu kyvů do zastavení na počtu neodymových magnetů a na síle dna pro vzdálenost 16 mm magnetů od dna nádoby.

počet kyvů vykonaných do zastavení:

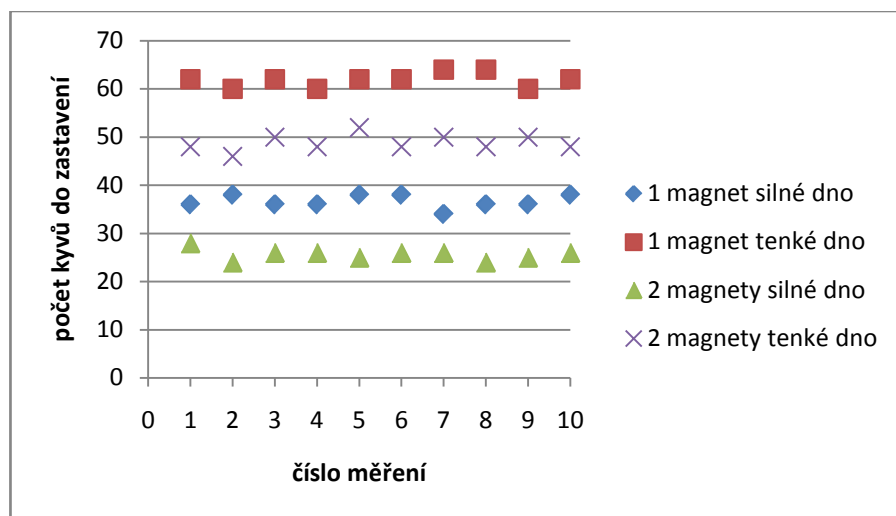
1 magnet nad silným dnem: $n_1 = (27,2 \pm 0,6)$ kyvů

1 magnet nad tenkým dnem: $n_2 = (46,8 \pm 0,7)$ kyvů

2 magnety nad silným dnem: $n_3 = (12,0 \pm 0,2)$ kyvů

2 magnety nad tenkým dnem: $n_4 = (29,4 \pm 0,7)$ kyvů

KÝVÁNÍ KYVADLA 20 MM OD DNA NÁDOBY



Obr. 41 Závislost počtu kyvů do zastavení na počtu neodymových magnetů a na síle dna pro vzdálenost 20 mm magnetů od dna nádoby.

1 magnet nad silným dnem: $n_1 = (36,6 \pm 0,4)$ kyvů

1 magnet nad tenkým dnem: $n_2 = (61,8 \pm 0,5)$ kyvů

2 magnety nad silným dnem: $n_3 = (25,6 \pm 0,4)$ kyvů

2 magnety nad tenkým dnem: $n_4 = (48,8 \pm 0,5)$ kyvů

Komentář: Ze všech tří grafů na obr. 39 až 41 lze pozorovat, že nejnižší počet kyvů do zastavení lze pozorovat pro dva magnety kývající se nad silným dnem kastrolu. Následuje jeden magnet kývající se nad silným dnem. Tento poznatek odpovídá intuitivní představě, že pohyb silnějšího magnetu způsobuje silnější nestacionární magnetické pole a tím i silnější vířivé proudy. Největší počet kyvů do zastavení a tedy i nejmenší účinky vířivých proudů vykazuje vždy 1 magnet kývající nad tenkým dnem kalorimetru. Druhý největší počet kyvů do zastavení je u dvou magnetů kývajících nad tenkým dnem. Zde se ověřuje teoretický poznatek o nejsilnějším vzniku vířivých proudů v masivních vodičích.

Závěr: Pro měření lze doporučit použití 1 i 2 kusů magnetu, aby byla vidět závislost počtu kyvů na síle magnetu. Magnety mají být neodymové, protože feritové jsou příliš slabé. Také je nutné použít dvě nádoby s rozdílnou tloušťkou dna. Jako vhodné vzdálenosti pro měření počtu kyvů do zastavení jsou mezi 10 mm a 20 mm.

2.4 ELEKTROMAGNETICKÁ LEVITACE

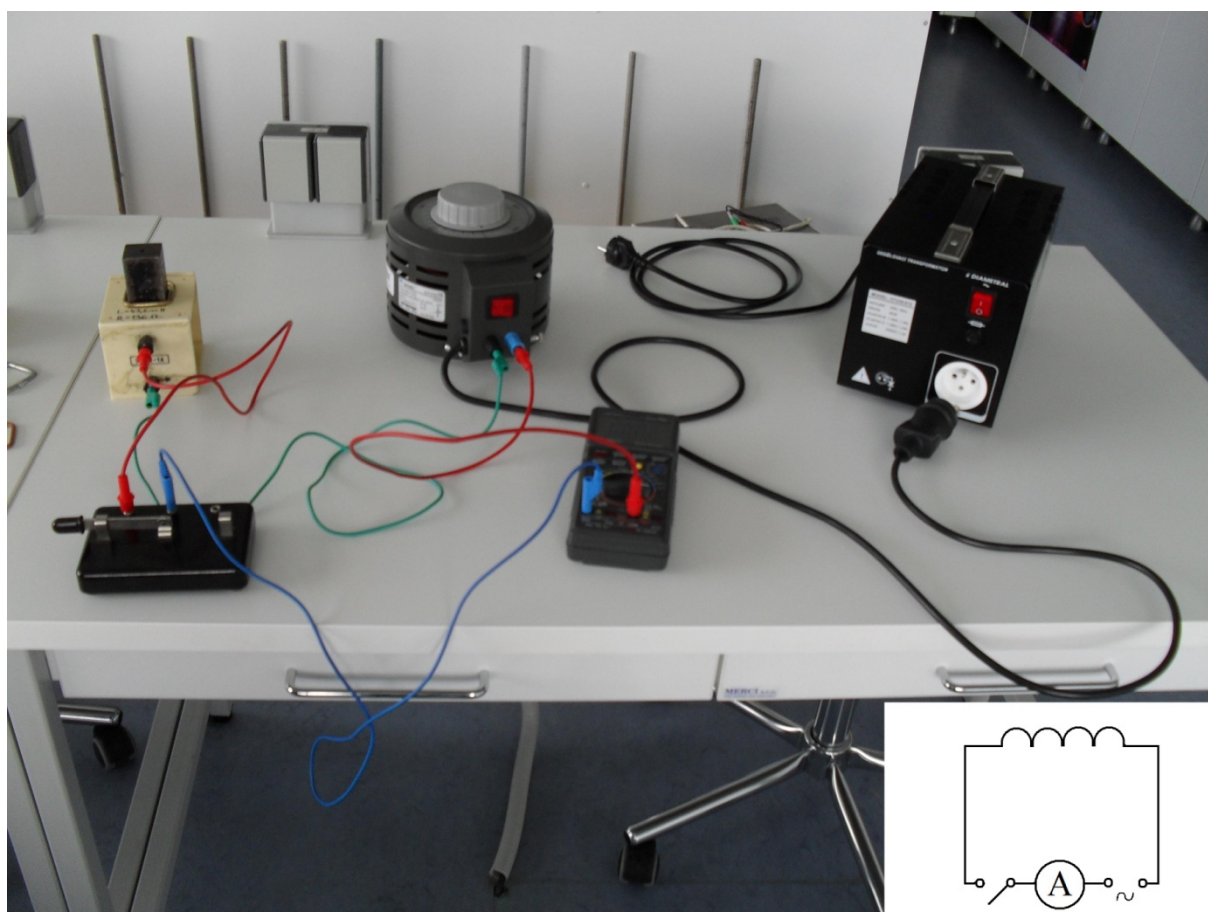
Praktickým výstupem pokusu je pracovní list č. 5 v příloze č. 5 použitelný ve výuce studentů učitelství v praktiku školních pokusů. K pokusu je rovněž natočeno video č. 4 a 5.

2.4.1 Příprava a provedení pokusu

POMŮCKY: oddělovací transformátor s pojistkou 1,25 V, autotrafo s pojistkou 5 V, multimetr, cívka o indukčnosti $L = 43,6$ mH a odporu $R = 13,7 \Omega$, jádro cívky, spínač, spojovací vodiče, silné dráty vytvarované do tvaru uzavřeného čtverce a kruhu (dráty jsou z mědi, hliníku a mosazi, pro každý materiál je použit drát podobného průměru a rozměry tvarů jsou stejné pro všechny použité materiály), tekutý dusík v Dewarově nádobě.

PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Sestavíme aparaturu podle obr. 42.



Obr. 42 Aparatura pro pokus elektromagnetická levitace.

Nejprve sestavíme aparaturu **bez zapojení oddělovacího transformátoru do zásuvky**. Autotrafo zapojíme do oddělovacího transformátoru. Zkontrolujeme, že poloha otočného tlačítka na

autotrafu je v pozici 0 V. Tímto je vytvořen **zdroj střídavého napětí**. Do série se zdrojem střídavého napětí zapojíme multimetr. Zapneme multimetr stiskem tlačítka ON v levém horním rohu. Multimetr přepneme na měření střídavého proudu, tedy stiskneme tlačítko AC v pravém horním rohu. Na displeji se objeví AC. Nastavíme rozsah 20 A střídavého proudu pomocí velkého otočného tlačítka. Dále vstup druhý zprava (označen značkou uzemnění) propojíme spojovacím vodičem se vstupem na autografu, který je označen modře (na obr. 42 je použit červený spojovací vodič). Vstup na multimetru zcela vlevo označený jako 20 A spojíme spojovacím vodičem se vstupem uprostřed na spínači (na obr. 42 je použit modrý vodič). Vstup vlevo na spínači spojíme s horním vstupem na cívce (na obr. 42 červený vodič). Sepneme spínač pomocí páčky. Dolní vstup cívky propojíme se vstupem vlevo na autotrafu (na obr. 42 použit zelený vodič). Vložíme do cívky jádro. Zkontrolujeme, zda jsou velká červená tlačítka na oddělovacím transformátoru i autotrafu sepnutá na poloze značené čárkou (tedy na poloze „vypnuto“).

Nyní lze zapojit oddělovací transformátor do zásuvky. Nejprve sepneme velké červené tlačítko na oddělovacím transformátoru na polohu „zapnuto“ značenou kolečkem. Tlačítko se červeně podsvítí. Dále sepneme stejným způsobem velké červené tlačítko na autotrafu, které se následně také podsvítí červeně.

Samotný experiment probíhá tak, že umístíme kovový čtverec, resp. kroužek na jádro cívky. Zapneme správně nastavený multimetr, na kterém v průběhu experimentu sledujeme hodnoty střídavého proudu v obvodu. Poté zvyšujeme napětí na autotrafu z nulové hodnoty na téměř 80 V. Napětí zvyšujeme svižně. Při dosažení napětí o velikosti téměř 80 V rychle snížíme napětí na nulové. Pokud požadovaný efekt u čtverce proběhne při napětí menším než téměř 80 V, snížíme napětí na nulové okamžitě. Z bezpečnostního hlediska je důležité nenechat v obvodu napětí vysokých hodnot dlouho.

Efektem u čtverce (kroužku) rozumíme jeho pohyb vzhůru nebo alespoň posunování na místě při napětích téměř 80 V. Pokud kroužek vyskočí z jádra při napětí menším než 80 V, snižujeme okamžitě napětí na nulové.

Velikost pojistky 5 A u autotrafu znamená, že přístroj snese bez poškození střídavý proud do velikosti 5 A. Avšak u oddělovacího transformátoru je pojistka pouze 1,25 A, tedy snese bez poškození pouze proud do 1,25 A. Celkově tedy dbáme, aby obvodem neprotékal proud větší jak 1,25 A. V případě protékání větších proudů obvodem hrozí spálení pojistky v oddělovacím transformátoru. Spálení pojistky lze poznat podle toho, že velká červená tlačítka oddělovacím transformátoru a tím pádem i na autotrafu nejsou podsvícená. Možnost nefunkčnosti zásuvky ověříme zapojením jiného přístroje do zásuvky (např. adaptéru mobilního telefonu nebo digitálního fotoaparátu). V případě, že zásuvka funguje, vyměníme pojistku v oddělovacím transformátoru. Spálenou pojistku poznáme podle její černé barvy. Jedna pojistka se nachází přímo na hlavním panelu

nad místem, kde se připojuje autotrafo. K jejímu demontování stačí šroubovák. Pokud tato pojistka není spálená, zkontrolujeme pojistku v zadní části oddělovacího transformátoru. Po odpojení kabelu lze vidět malou nenápadnou přihrádku, která po vytažení šroubovákem vydá pojistku.

ČÁST A) Pokus provedeme postupně pro uzavřené vodiče tvaru čtverce. Poté pro uzavřené vodiče tvaru kroužku. Postupujeme vždy tak, že nejdřív provedeme pokus s materiálem měď, hliník a pak mosaz. Pozorujeme, jak se mění intenzita efektů pro materiály měď, hliník a mosaz. Současně pozorujeme, jestli záleží na tvaru vodiče. Případně zvážíme, jak konkrétně záleží na tvaru vodiče.

ČÁST B) Pokus provedeme jako v části A) pouze s tím rozdílem, že všechny uzavřené vodiče zchladíme v tekutém dusíku. Tekutý dusík opatrně převážíme v Dewarově nádobě. V laboratoři ho naléváme do polystyrenové nádoby kvůli izolaci, protože teplota dusíku je $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy 77 K . Do nádoby z jiného materiálu se nenalévá, protože by nádoba mohla prasknout. V tekutém dusíku se nemá čepovat ruce. S chlazenými předměty manipulujeme jen a pouze pinzetou. Dotyk zchlazeného předmětu je bolestivý. Po vložení předmětu do tekutého dusíku lze pozorovat var dusíku. Dusík bublá. V okamžiku, kdy dusík přestane bublat, je předmět zchlazen na teplotu dusíku a lze jej použít k experimentu.

2.4.2 Vyhodnocení výsledků pokusu

ČÁST A) Je zjištěna závislost intenzity efektů na druhu materiálu uzavřeného vodiče. Nejvýraznější efekty lze pozorovat pro měděný vodič. Pro hliník jsou efekty méně výrazné než pro měď. Nejslabší efekty nastávají u mosazi. Současně lze pozorovat výraznou závislost intenzity efektů na tvaru uzavřeného vodiče, protože vodiče tvaru čtverce vykazují mnohem výraznější efekty než vodiče tvaru kruhu.

Měděný vodič tvaru čtverce se zvyšujícím se napětím prochází těmito projevy: velmi jemné nadskakování, oscilace, levitace, levitace až 1 cm nad cívkou.

Hliníkový vodič tvaru čtverce vykazuje pouze velmi jemné nadskakování a oscilaci.

Mosazný vodič tvaru čtverce pouze velmi jemně nadskakuje.

Měděný vodič tvaru kruhu se zvyšujícím napětím pouze velmi jemně nadskakuje a osciluje.

Hliníkový vodič tvaru kruhu má o něco slabší projevy než měděný.

Mosazný vodič tvaru kruhu se pouze posunuje na místě. Ve výraznějším pohybu mu brání jeho vlastní váha.

K objasnění těchto pozorování, je nutné vysvětlit **podstatu dějů** během experimentu.

Při zvyšování střídavého napětí v obvodu prochází cívkou a následně celým obvodem střídavý proud proměnný v čase (tedy nestacionární). Následkem toho se kolem horní a spodní strany cívky indukuje nestacionární magnetické pole. Toto magnetické pole je ještě zesíleno přítomností jádra v cívce. V uzavřeném vodiči navlečeném na jádře cívky se vlivem vnějšího nestacionárního pole vytváří indukovaný proud, který svými účinky působí proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala. Proto se uzavřený vodič pohybuje směrem vzhůru. Jelikož je uzavřený vodič vyroben z drátu poměrně velkého průměru, splňuje podmínky (masivnost vodiče) pro vznik Foucaultových vířivých proudů. Působením Foucaultových vířivých proudů se vodič zahřívá. Čím silnější jsou Foucaultovy vířivé proudy, tím výraznější je zahřátí uzavřeného vodiče. Proto měděné vodiče odebíráme z cívky pomocí pinzety. Současně se vysvětluje, proč jsou všechny efekty výraznější pro uzavřené vodiče tvaru čtverce. Uzavřené vodiče tvaru čtverce velmi těsně přiléhají k jádru cívky, proto je pro změna magnetického indukčního toku mnohem výraznější než pro tvar kruhu, které nepřiléhají k jádru těsně.

ČÁST B)

Výsledky pro tuto část jsou obdobné jako v části B), co se týče nejsilnějších projevů Foucaultových vířivých proudů pro uzavřené vodiče tvaru čtverce. Rozdíl oproti části B) je v intenzitě projevů u materiálů. Pro měď zchlazenou na $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ pozorujeme mnohem silnější efekty než pro zbývající materiály, u kterých se efekty zřetelně nezvýraznily. Pouze pro měď obou tvarů došlo k výrazným pohybovým účinkům. U tvaru čtverce dokonce uzavřený vodič vyskočil z jádra cívky již při napětí téměř 70 V. Nicméně tvar kruhu při napětí téměř 80 V se vznesl do výšky konce cívky (tj. asi 5 cm), přestože oproti tvaru čtverce neleží těsně u jádra cívky.

Ale proč jsou u mědi zchlazené na teplotu tekutého dusíku tak výrazné projevy a u zbývajících dvou materiálů ne? Měď je velmi dobrý vodič, u kterého dochází při zchlazení na $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ke snížení elektrického odporu a následně ke zvýšení vodivosti. Nabízí se otázka, zda se jedná o supravodivost. Připomeňme si ve zkratce, co znamená pojem supravodivosti. Je to jev nastávající u některých kovů a slitin. Při podchlazení látky pod tzv. kritickou teplotu se sníží elektrický odpor až na téměř nulový. Následně se zvýší vodivost. Látka v supravodivém stavu velmi silně vypuzuje z celého svého objemu siločáry magnetického pole. Uvnitř látky je magnetická indukce nulová. Supravodič je tedy perfektní diamagnetikum. Supravodivost závisí na dvou faktorech, kritické teplotě a kritické magnetické indukci. Zchlazení pod kritickou teplotu vyvolává supravodivý stav, zatímco kritická magnetická indukce supravodivý stav narušuje. Elektrony s opačnými spiny se pohybují krystalovou mřížkou kovu téměř bez odporu, protože si s ní nevyměňují žádné elektrony. Ač je to velmi lákavá domněnka, nejde o supravodivost. U čisté mědi totiž nebyla zjištěna supravodivost. Pouze slitiny mědi vykazují supravodivost. Oproti mědi hliník supravodivý být může. Ale kritická teplota, pod kterou by

se musel zchladit, činí 1,14 K, což není dosažitelné ani tekutým dusíkem ani kapalným heliem o teplotě 4,2 K. Upraveno podle [12, 13].

3. ZÁVĚR

Téma jsem zpracovala podle zadání. Po teoretické části následuje praktická část zahrnující čtyři pokusy, přičemž poslední z nich je sofistikovanější z hlediska provedení, pomůcek i jistých bezpečnostních rizik.

Předpokládám, že by tato práce mohla nalézt uplatnění v praktiku školních pokusů k přípravě budoucích učitelů fyziky. První tři z pokusů jsou využitelné i na střední škole v hodinách laboratorních cvičení, event. pro zájemce i samostatně doma. Čtvrtý z pokusů bych doporučovala provádět jen v praktiku na vysoké škole pod dozorem vedoucího praktika.

Zpracovaná videa mohou nalézt uplatnění při výuce na střední škole. Stejně tak mohou pomoci při přípravě budoucích učitelů fyziky v předmětu Praktikum školních pokusů.

4. SEZNAM LITERATURY

- [1] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia: Elektřina a magnetismus*. dotisk 5.vydání. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 8071962023.
- [2] Elektrostatická indukce. In: [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatick%C3%A1_indukce
- [3] ZÁHEJSKÝ, Jiří. *Elektřina a magnetismus*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2002. ISBN 8024404826.
- [4] Vlastní indukce. In: [online]. [cit. 2013-02-03]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/307-vlastni-indukce>
- [5] SVOBODA, Emanuel, Karel BARTUŠKA, Milan BEDNAŘÍK, Oldřich LEPIL a Miroslava ŠIROKÁ. *Přehled středoškolské fyziky*. dotisk 3.vydání. Praha: Prometheus, 2001. ISBN 8071961167.
- [6] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj z fyziky*. 2. vyd. Brno: DIDAKTIS spol. s. r. o., 2006. ISBN 8073580586.
- [7] JANOVIČ, Jozef, Růžena Kolářová, Část textu ze slov. přel. Petr SCHNABL a Ilustr. Petr MÍŠEK. *Fyzika: Pro 6. roč. zákl. šk.* 4. vyd, 1. vyd. v Prometheus. Praha, 1994. ISBN 80-858-4935-6.
- [8] SVOBODA, Emanuel. *Pokusy z fyziky na střední škole*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1999. ISBN 80-719-6009-8.
- [9] HOLUBOVÁ, Renata, *Fyzikální praktikum I: mechanika, kmity a vlny, akustika*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, 1994. ISBN 80-244-0244-0.
- [10] Neodymový magnet. [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Neodymov%C3%BD_magnet
- [11] Feritový magnet. [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Feritov%C3%BD_magnet
- [12] KNÍŽEK, K. Supravodivost a levitace. [online]. [cit. 2014-07-21]. Dostupné z:
<http://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-a-levitace>
- [13] Supravodivost. [online]. [cit. 2014-07-28]. Dostupné z:
http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b747269636bfd2070726f7564h&key=426

PŘÍLOHY

Příloha č. 1

PRACOVNÍ LIST Č. 1

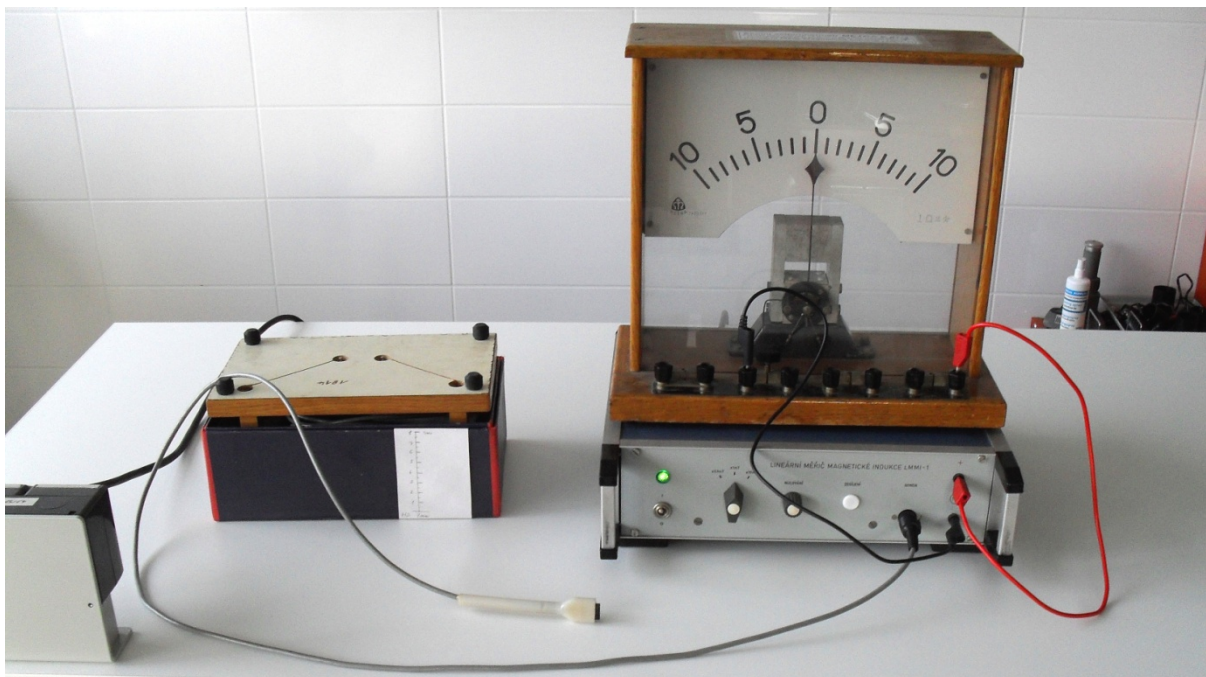
TÉMA: MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE POLE NEODYMOVÝCH A FERITOVÝCH MAGNETŮ

ÚKOL: Změřte magnetickou indukci pole 3 kusů neodymového a 3 kusů feritového magnetu. Každé měření opakujte desetkrát, výsledky запиšte do předložených tabulek a pomocí výpočtu aritmetického průměru a střední kvadratické odchylky запиšte průměrnou magnetickou indukci pro 3 kusy neodymového magnetu i 3 kusy feritového magnetu v tomto požadovaném tvaru:

V závěru vyhodnoťte naměřené výsledky. Ke zpracování tabulek použijte program Excel.

POMŮCKY: teslametr složený z následujících 4 pomůcek: Hallova sonda, lineární měřič magnetické indukce LMMI-1, demonstrační stejnosměrný voltmetr, vyrobená papírová stupnice; 3 kusy neodymového magnetu, 3 kusy feritového magnetu (všechny neodymové i feritové magnety jsou stejných rozměrů, tedy průměru 12 mm a výšky 4 mm).

PŘÍPRAVA MĚŘENÍ:



Sestavte měřicí aparaturu podle fotografie a zatím nezapojujte lineární měřič magnetické indukce LMMI-1 do zásuvky.

Postavte demonstrační stejnosměrný voltmetr na lineární měřič magnetické indukce.

Pomocí červeného a černého spojovacího vodiče spojte oba přístroje následujícím způsobem: červeným vodičem spojte kladný vstup lineárního měřiče a kladný vstup demonstračního voltmetru (oba kladné vstupy jsou značeny znaménkem plus), černým vodičem propojte záporný vstup lineárního měřiče se vstupem voltmetru označeným 1 V. Tím stanovíte rozsah voltmetru 10 V, protože 1 dílek má tímto velikost 1 V a dílků má voltmetr 10.

Připojte Hallovu sondu k lineárnímu měřiči magnetické indukce na výstup vlevo od kladného a záporného výstupu.

Teslametr je sestaven, nastavíte jeho rozsah. Tlačítkem druhým zleva na lineárním měřiči otočíte na pozici 1 mT. 1 dílek na stupnici voltmetru tedy znamená magnetickou indukci o velikosti 1 mT.

Na kousek papíru velikosti maximálně A5 si narýsujte čáru kolmou k zemi. Papír si připevněte na malou krabičku nebo jiný vhodný předmět. Zkuste přiložit Hallovu sondu ke stupnici a zaznamenat na ní její výšku. Tím bude začínat stupnice. Od vyznačené výšky Hallovy sondy si vyznačte vzdálenost 2 cm. V této vzdálenosti budete při všech měřeních přikládat magnety k Hallově sondě.

Zapojte lineární měřič magnetické indukce do zásuvky. Zapněte jej pomocí páčky úplně vlevo. U zapnutého přístroje svítí zelená kontrolka pod páčkou.

MĚŘENÍ

Zjistěte hodnoty magnetické indukce pro pole 3 kusů neodymového magnetu. Magnetickou indukci vždy změřte desetkrát. Naměřené hodnoty запиšte do připravené tabulky vlevo. Vypočtete aritmetický průměr i střední kvadratickou odchylku a výsledek запиšte v požadovaném tvaru.

Dále změřte velikost magnetické indukce pro 3 kusy feritového magnetu, výsledky zapisujte do tabulky vpravo. Vypočtete aritmetický průměr i střední kvadratickou odchylku a výsledek запиšte v požadovaném tvaru.

3 kusy neodymového magnetu

č. m.	$B_i [mT]$	$\Delta_i [mT]$	$\Delta_i^2 [mT]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$B_N = (\bar{B}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot mT$$

3 kusy feritového magnetu

č. m.	$B_i [mT]$	$\Delta_i [mT]$	$\Delta_i^2 [mT]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$B_F = (\bar{B}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot mT$$

Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

$$B_N = (\bar{B}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot mT,$$

Kde B znamená měřenou veličinu, \bar{B}_i aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].

ZÁVĚR

Uveďte výsledky v požadovaném tvaru. Porovnejte naměřené hodnoty a zdůvodněte vztah mezi neodmými a feritovými magnety.

Příloha č. 2

PRACOVNÍ LIST Č. 2

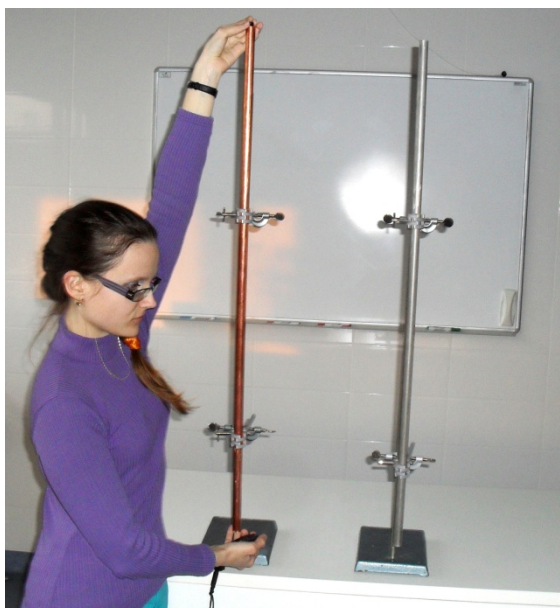
TÉMA: MĚŘENÍ DOBY PÁDU NEODYMOVÝCH A FERITOVÝCH MAGNETŮ TRUBKAMI Z MĚDI, HLINÍKU A PLASTU

ÚKOL: Změřte dobu pádu tří kusů neodymového magnetu trubkami ze tří materiálů: měď, hliník a plast. Každé měření pro měděnou a hliníkovou trubku opakujte desetkrát, výsledky zapište do předložených tabulek a pomocí výpočtu aritmetického průměru a střední kvadratické odchylky zapište průměrnou dobu pádu pro 3 kusy neodymového magnetu měděnou a hliníkovou trubkou. Pro zpracování tabulek použijte program Excel. V závěru vyhodnoťte naměřené výsledky.

POMŮCKY: měděná trubka o délce 1 m a vnějším průměru 18 mm, hliníková trubka o délce 1 m a vnějším průměru 18 mm, plastová trubka o délce 1 metru a vnějším průměru 25 mm, 3 laboratorní stojany, 6 laboratorních držáků, 6 laboratorních držáků na zkumavku, 3 kusy neodymového magnetu, 3 kusy feritového magnetu (všechny neodymové i feritové magnety jsou stejných rozměrů, tedy průměru 12 mm a výšky 4 mm), stopky.

PŘÍPRAVA MĚŘENÍ:

Sestavte aparaturu podle fotografie. Na laboratorní stojan upevněte v dolní i horní části laboratorní držák. Do každého laboratorního držáku upevněte držák na zkumavku a do něj trubku v poloze kolmo k zemi.



MĚŘENÍ:

ČÁST A) Přiložte k hornímu konci trubky 3 kusy neodymového magnetu a současně dejte ruku se stopkami těsně pod dolní část trubky. V okamžik, kdy pouštíte magnety, stiskněte stopky. Při dopadu magnetu na ruku stiskněte stopky. Dbejte, abyste magnety pouštěli vždy ve stejné vzdálenosti od horní části trubky.

Měření proveďte pro měděnou a hliníkovou trubku vždy desetkrát, naměřené hodnoty запиšte do tabulky vlevo a vpravo. Vypočítejte aritmetický průměr i střední kvadratickou odchylku a výsledek запиšte v požadovaném tvaru. (Ke zpracování tabulek použijte program Excel.)

Pro plastovou trubku proveďte jedno měření. Porovnejte ho s délkou své reakční doby i s výsledky měření pro měděnou a hliníkovou trubku.

Měděná trubka

č. m.	$t_i [s]$	$\Delta_i [s]$	$\Delta_i^2 [s]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Cu} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot s$$

Hliníková trubka

č. m.	$t_i [s]$	$\Delta_i [s]$	$\Delta_i^2 [s]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Al} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot s$$

Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

$$t_{Cu} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot s,$$

Kde t_{Cu} znamená měřenou veličinu, \bar{t}_i aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].

Plastová trubka:

ČÁST B) Měření probíhá stejným způsobem jako v části A), pouze použijeme 3 kusy feritového magnetu.

Měděná trubka

č. m.	t_i [s]	Δ_i [s]	Δ_i^2 [s]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Cu} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot s$$

Hliníková trubka

č. m.	t_i [s]	Δ_i [s]	Δ_i^2 [s]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Al} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot s$$

ZÁVĚR

Uveďte výsledky v požadovaných tvarech. Porovnejte naměřené hodnoty a najděte vztah mezi měděnou, hliníkovou a plastovou trubkou. Zdůvodněte. Vyhodnoťte i výsledky pro neodymové a feritové magnety. Zdůvodněte.

Příloha č. 3
PRACOVNÍ LIST Č. 3

TÉMA: MĚŘENÍ DOBY PÁDU NEODYMOVÝCH A FERITOVÝCH MAGNETŮ TRUBKAMI Z MĚDI, HLINÍKU A PLASTU SE SKLONEM 45°

ÚKOL: Změřte dobu pádu 3 kusů neodymového magnetu trubkami ze tří materiálů: měď, hliník a plast. Každé měření pro měděnou a hliníkovou trubku opakujte desetkrát, výsledky zapište do předložených tabulek a pomocí výpočtu aritmetického průměru a střední kvadratické odchylky zapište průměrnou dobu pádu pro 3 kusy neodymového magnetu měděnou a hliníkovou trubkou. Pro zpracování tabulek použijte program Excel. V závěru vyhodnoťte naměřené výsledky.

POMŮCKY: měděná trubka o délce 1 m a vnějším průměru 18 mm, hliníková trubka délky 1 m a vnějším průměru 18 mm, plastová trubka o délce 1 metru a vnějším průměru 25 mm, 4 laboratorní stojany, 6 laboratorních držáků, 6 laboratorních držáků na zkumavku, 3 kusy neodymového magnetu, 3 kusy feritového magnetu (všechny neodymové i feritové magnety jsou stejných rozměrů, tedy průměru 12 mm a výšky 4 mm), stopky, velké trojúhelníkové pravítko k určení sklonu trubek.

PŘÍPRAVA MĚŘENÍ:

Sestavte aparaturu podle fotografie. Na laboratorní stojan upevněte v dolní i horní části laboratorní držák. Do každého laboratorního držáku upevněte držák na zkumavku a do něj trubku tak, aby svírala se zemí úhel o velikosti 45°. Úhel určete pomocí velkého trojúhelníkového pravítka.



MĚŘENÍ:

ČÁST A) Přiložte k hornímu konci trubky 3 kusy **neodymového** magnetu a současně dejte ruku se stopkami těsně pod dolní část trubky. V okamžik, kdy pouštíte magnety, stiskněte stopky. Při dopadu magnetu na ruku stiskněte stopky. Dbejte, abyste magnety pouštěli vždy ve stejné vzdálenosti od horní části trubky.

Měření proveďte pro měděnou a hliníkovou trubku vždy desetkrát, naměřené hodnoty zapište do tabulky vlevo a vpravo. Vypočítejte aritmetický průměr i střední kvadratickou odchylku a výsledek zapište v požadovaném tvaru. Ke zpracování tabulek použijte program Excel.

Pro plastovou trubku proveďte jedno měření. Porovnejte ho s délkou své reakční doby i s výsledky měření pro měděnou a hliníkovou trubku.

Měděná trubka

č. m.	$t_i [s]$	$\Delta_i [s]$	$\Delta_i^2 [s]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Cu} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) s$$

Hliníková trubka

č. m.	$t_i [s]$	$\Delta_i [s]$	$\Delta_i^2 [s]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Al} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) s$$

Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

$$t_{Cu} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) s,$$

Kde t_{Cu} znamená měřenou veličinu, \bar{t}_i aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].

Plastová trubka:

ČÁST B) Měření probíhá stejným způsobem jako v části A), pouze použijeme 3 kusy **feritového** magnetu.

Měděná trubka

č. m.	$t_i [s]$	$\Delta_i [s]$	$\Delta_i^2 [s]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet			
AH			
ar.průměr			

Hliníková trubka

č. m.	$t_i [s]$	$\Delta_i [s]$	$\Delta_i^2 [s]$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet			
AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$t_{Cu} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) s$$

$$t_{Al} = (\bar{t}_i \pm \bar{\sigma}) s$$

Plastová trubka:

ZÁVĚR

Uved'te výsledky v požadovaných tvarech. Porovnejte naměřené hodnoty s hodnotami pro trubky kolmé k zemi z pracovního listu č. 2. Jak sklon trubky ovlivňuje dobu pádu magnetů? Zdůvodněte. Vyhodnoťte i výsledky pro neodymové a feritové magnety. Zdůvodněte.

Příloha č. 4

PRACOVNÍ LIST Č. 4

TÉMA: Tlumení kyvadla pomocí Foucaultových vířivých proudů

ÚKOL: Zjistěte počet kyvů 1 a 2 kusů neodymového magnetu nad dnem hliníkového kalorimetru a nad dnem kastrolu se silným dnem. Každé měření opakujte desetkrát, výsledky zapište do předložených tabulek a pomocí výpočtu aritmetického průměru a střední kvadratické odchylky zapište průměrný počet kyvů. Pro zpracování tabulek můžete použít program Excel. V závěru vyhodnoťte naměřené výsledky.

POMŮCKY: hliníkový kalorimetr, kastrol se silným dnem z nemagnetické oceli (průměry dna obou nádob jsou velmi podobné), 2 laboratorní stojany, plastová trubka o délce 1m, 2 laboratorní držáky, 2 laboratorní držáky k uchycení zkumavky, rybářské vlákno délky 2 metry, plastová trubka o délce 1m, 2 kusy neodymového magnetu, výkres rozměru cca A5, pravítko, úhломěr, nůžky, posuvné měřítko (nejlépe plastové), knihy, pravítka, kousek drátu (asi 15 cm), kancelářská sponka nebo malá matice, lepicí páska.

PŘÍPRAVA MĚŘENÍ:

Sestavte aparaturu podle obr. 1. Na oba laboratorní stojany upevněte v horní části laboratorní držák. Podle obr. 2 do každého laboratorního držáku upevněte držák k uchycení zkumavky, dbejte, aby laboratorní držáky na stojanech byly ve stejné výšce. Podle následujícího postupu upevněte trubku do držáků:

1) Pokud není k dispozici již hotová papírová stupnice, vyrobte ji z tvrdého papíru formátu cca A5 tak, že v ní vystříhnete otvor průměru trubky. Po nasazení papíru na trubku má pevně přiléhat. Pod otvorem v papíru vyznačíme stupnici. Nulová pozice je značena čarou kolmou k zemi. Odpovídá volně zavěšenému magnetu v klidu. Od této čáry vyznačíme úhel o velikosti 5° .

2) Není-li k dispozici silonové vlákno s již hotovým závěsem, vyrobíme závěs buď z kancelářské sponky anebo prostým přivázáním malé matice na konec vlákna.

3) Kousek drátu navijte na trubku tak, aby v dolní části bylo očko na rybářské vlákno. Očkem provlékněte vlákno. Na trubku poté navlékneme papírovou stupnici tak, aby otvorem ve stupnici procházela nejen trubka, ale i vlákno. Dbejte, aby se vlákno nedotýkalo těsně stupnice (aby nedocházelo ke tření). Zbytek rybářského vlákna upevněte ke stojanu a zajistěte lepicí páskou.

4) Upevněte trubku na laboratorní stojany za pomocí držáků.

5) Na závěs na vláknu opatrně přiložte 1, případně 2 kusy neodymového magnetu.

6) Položte kastrol dnem vzhůru pod závěs s magnetem tak, aby se magnet nacházel nad středem dna nádoby.

7) Protože kalorimetr a kastrol nejsou stejné výšky, podložte před měřením kastrol pomocí knih a listů papíru do výšky kalorimetru.

8) **Jak zvolit vzdálenost zavěšeného magnetu ode dna nádoby?** Zvolte vzdálenost zavěšeného magnetu ode dna kastrolu pomocí pomocných měřítok jako např. pravítka nebo tenké knihy. Plastovým měřítkem si odměřte výšku různé kombinace pravítek a učebnic tak, abyste dosáhli požadované výšky, položte je na dno nádoby a nastavte tak délku závěsu magnetu. (Plastové měřítko používejte kvůli značné síle neodmývaných magnetů).

9) Před každým měřením si ověřte pozici závěsu magnetu na papírové stupnici (má být na nule). Vychylte kyvadlo o 5° podle papírové stupnice. Počítejte počet kyvů do zastavení kyvadla. Za kyv považujte, když se magnet pohybuje po trajektorii tvaru přímky nebo značně protáhlé elipsy. Za kyv naopak nepovažujte rotaci magnetu na místě s velikostí výchylky v řádu rozměru magnetu.

Pozor! Nezaměňujte kyv s kmitem. Kmit jsou dva kyvy.

10) **Poznámka:** Zamezte blízkému kontaktu neodmývaných magnetů s magnetickými předměty vč. hodiněk, kovových spon pásků i samotných magnetů ležících několik centimetrů od sebe. Hrozí srážky doprovázené poškozením povrchové úpravy magnetů. V případě hodiněk hrozí i poškození mechanismu hodiněk.



Obr. 1 Aparatura k pokusu.



Obr. 2 Detail uchycení trubky do držáku.

MĚŘENÍ:

ČÁST A) Vychylte magnet vždy s rozkyvem 5° . Počítejte kyvy pro 1 kus neodymového magnetu ve výšce 5 mm nad dnem kalorimetru a nad dnem kastrolu podloženém knihami do výšky kalorimetru. Měření stačí provést jednou.

Poté nastavte výšku závěsu magnetu na 15 mm a počítejte počet kyvů do zastavení nad kalorimetrem a poté nad kastrolem.

Měření proved'te pro obě nádoby vždy desetkrát, naměřené hodnoty zapište do tabulky vlevo a vpravo. Vypočítejte aritmetický průměr i střední kvadratickou odchylku a výsledek zapište v požadovaném tvaru. Ke zpracování tabulek můžete použít program Excel.

Počet kyvů 1 kusu neodymového magnetu ve vzdálenosti 5 mm nad:

dnem kalorimetru:

dnem kastrolu:

Počet kyvů 1 kusu neodymového magnetu ve vzdálenosti 15 mm nad dnem nádoby:

Kalorimetr

č.m.	n_i [kyvů]	Δ_i [kyvů]	Δ_i^2 [kyvů]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet			
AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$n_1 = (\bar{n}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{kyvů}$$

Kastrol

č.m.	t_i [kyvů]	Δ_i [kyvů]	Δ_i^2 [kyvů]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet			
AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$n_2 = (\bar{n}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{kyvů}$$

Pro každé měření vypočítáme **střední kvadratickou chybu jednoho měření** dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}},$$

kde Δ_i představují zdánlivé chyby (tj. odchylky od aritmetického průměru).

Dále vypočteme **střední kvadratickou chybu aritmetického průměru** podle vzorce:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Vypočítáme rovněž **pravděpodobnou chybu aritmetického průměru**:

$$\bar{g} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}. \text{ Převzato z [9].}$$

Výsledek každého měření zapíšeme v následujícím tvaru:

$$n_1 = (\bar{n}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{kyvů}, \quad n_2 = (\bar{n}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{kyvů}$$

Kde n_1 znamená měřenou veličinu, \bar{n}_i aritmetický průměr naměřených hodnot a $\bar{\sigma}$ střední kvadratickou chybu aritmetického průměru. Převzato z [9].

ČÁST B) Měření probíhá stejným způsobem jako v části A), pouze použijeme 2 kusy feritového magnetu. Je třeba znovu nastavit délku závěsu, protože 2 kusy magnetu mají jiné rozměry než 1 kus.

Počet kyvů 2 kusů neodymového magnetu ve vzdálenosti 5 mm nad:

dnem kalorimetru:

dnem kastrolu:

Počet kyvů 2 kusů neodymového magnetu ve vzdálenosti 15 mm nad dnem nádoby:

Kalorimetr

č.m.	n_i [kyvů]	Δ_i [kyvů]	Δ_i^2 [kyvů]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet			
AH			
ar.průměr			

Kastrol

č.m.	t_i [kyvů]	Δ_i [kyvů]	Δ_i^2 [kyvů]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
součet			
AH			
ar.průměr			

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$n_1 = (\bar{n}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{kyvů}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n-1}}$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$n_2 = (\bar{n}_i \pm \bar{\sigma}) \cdot \text{kyvů}$$

ZÁVĚR

Uveďte výsledky v požadovaných tvarech. Uveďte, jak závisí vzdálenost magnetu ode dna nádoby na počtu kyvů do zastavení. Porovnejte výsledky pro obě nádoby a dejte je do souvislosti s tloušťkou dna. Porovnejte výsledky z části A) a B) a najděte závislost počtu kyv do zastavení na počtu použitých magnetů.

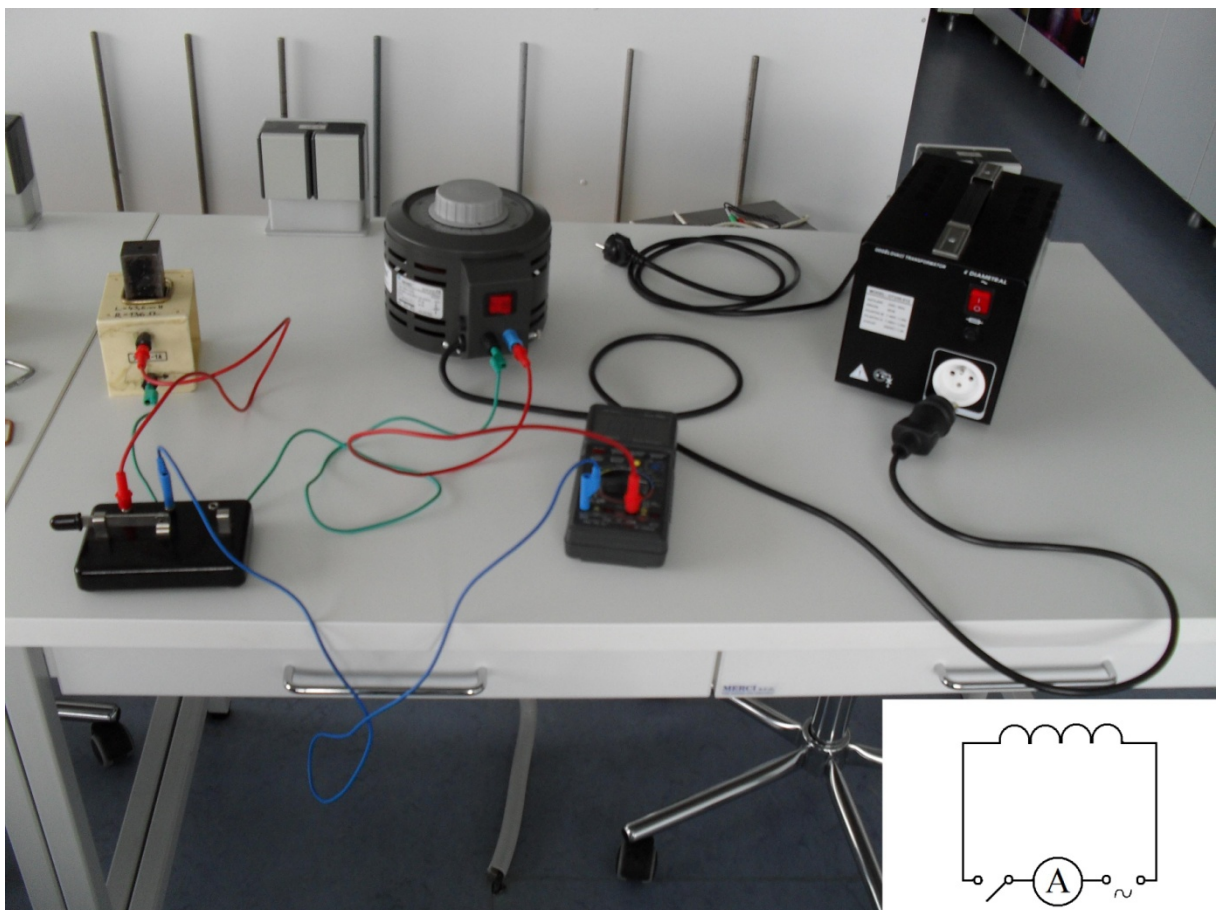
Příloha č. 5
PRACOVNÍ LIST Č. 5

TÉMA: ELEKTROMAGNETICKÁ LEVITACE

ÚKOL: Proved'te pokus s popsanou aparaturou. Zjistěte, jak výsledek pokusu závisí na materiálu uzavřeného vodiče a na jeho tvaru. V další části uveďte závislost výsledku pokusu na teplotě použitých uzavřených vodičů.

POMŮCKY: oddělovací transformátor s pojistkou 1,25 A, autotrafo s pojistkou 5 A, cívka s indukčností $L = 43,6$ mH a odporem $R = 13,7 \Omega$, jádro cívky, spínač, spojovací vodiče, silné dráty vytvarované do tvaru uzavřeného čtverce a kruhu (dráty jsou z mědi, hliníku a mosazi, pro každý materiál je použit drát podobného průměru a rozměry tvarů jsou stejné pro všechny použité materiály), tekutý dusík v Dewarově nádobě.

PŘÍPRAVA MĚŘENÍ:



Obr. 1 Aparatura k experimentu se schématem v pravém dolním rohu.

MĚŘENÍ:

ČÁST I)

Nejprve sestavte aparaturu **bez zapojení** oddělovacího transformátoru **do zásuvky**.

- 1) Autotrafo zapojte do oddělovacího transformátoru. Zkontrolujte, že poloha otočného tlačítka na autotrafu je v pozici 0 V. Tímto je vytvořen zdroj střídavého napětí.
- 2) Do série se zdrojem střídavého napětí zapojte multimetr. Zapněte multimetr stiskem tlačítka ON v levém horním rohu. Multimetr přepněte na měření střídavého proudu, tedy stiskněte tlačítko AC v pravém horním rohu. Na displeji se objeví AC. Nastavte rozsah 20 A střídavého proudu pomocí velkého otočného tlačítka.
- 3) Dále u multimetru vstup druhý zprava (označen značkou uzemnění) propojte spojovacím vodičem se vstupem na autografu, který je označen modře (na fotografii je použit červený spojovací vodič). Vstup na multimetru zcela vlevo označený jako 20 A spojte spojovacím vodičem se vstupem uprostřed na spínači (na fotografii je použit modrý vodič).
- 4) Vstup vlevo na spínači spojte s horním vstupem na cívce (na fotografii červený vodič). Sepněte spínač pomocí páčky.
- 5) Dolní vstup cívky propojte se vstupem vlevo na autotrafu (na fotografii použit zelený vodič). Vložte do cívky jádro.
- 6) Zkontrolujte, zda jsou velká červená tlačítka na oddělovacím transformátoru i autotrafu sepnutá na poloze značené čárkou (tedy na poloze „vypnuto“).

ČÁST II)

Nyní lze zapojit oddělovací transformátor **do zásuvky**. Nejprve sepněte velké červené tlačítko na oddělovacím transformátoru na polohu „zapnuto“ značenou kolečkem. Tlačítko se červeně podsvítí. Dále sepněte stejným způsobem velké červené tlačítko na autotrafu, které se následně také podsvítí červeně.

POZOR: Pokus neprovádíme bez přítomnosti vedoucího praktika v učebně!

ČÁST A) Pokus provedeme postupně pro uzavřené vodiče tvaru čtverce. Poté pro uzavřené vodiče tvaru kroužku. Postupujeme vždy tak, že nejdřív provedeme pokus s materiálem měď, hliník a pak mosaz. Pozorujeme, jak se mění intenzita efektů pro materiály měď, hliník a mosaz. Současně pozorujeme, jestli záleží na tvaru vodiče. Případně zvážíme, jak konkrétně záleží na tvaru vodiče.

POZOR: Po pokusu odstraňujeme uzavřené vodiče z jádra cívky pomocí pinzety.

ČÁST B) Pokus provedeme jako v části A) pouze s tím rozdílem, že všechny uzavřené vodiče zchladíme v tekutém dusíku. Tekutý dusík opatrně převážíme v Dewarově nádobě. V laboratoři ho naléváme do polystyrenové nádoby kvůli izolaci, protože teplota dusíku je -196°C , tedy 77 K . Do nádoby z jiného materiálu se nenalévá, protože by nádoba praskla. V tekutém dusíku se nemá čejí ruce. S chlazenými předměty manipulujeme jen a pouze pinzetou. Dotyk zchlazeného předmětu je bolestivý. Po vložení předmětu do tekutého dusíku lze pozorovat var dusíku. Dusík bublá. V okamžiku, kdy dusík přestane bublat, je předmět zchlazen na teplotu dusíku a lze jej použít k experimentu.

POZOR: Dewarovu nádobu je třeba zavírat. Tekutý dusík se přelévá jen do nádob z polystyrenu kvůli izolaci. Nádoby z jiných materiálů by praskly. Do tekutého dusíku se nemá čejí ruce. Zchlazené předměty přemisťujeme pinzetou, nikdy ne rukama! V blízkosti přelévání tekutého dusíku z Dewarovy nádoby je nutné mít na sobě plexi štít!

VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Odpovězte na otázky:

- 1) Který materiál vykazuje nejvýraznější efekty? Zdůvodněte, proč.
- 2) Má nějaký vliv na intenzitu efektů tvar uzavřeného vodiče? Pokud ano, jaký? Čím je to způsobeno?
- 3) Jaké změny v efektech pozorujete při podchazení uzavřených vodičů? U kterého materiálu (materiálů) je to nejvýraznější? Zdůvodněte.
- 4) Lze pro experimenty použít přerušené vodiče? Zdůvodněte.

Příloha č. 6

POJMY, KTERÉ JSOU DISKUTOVÁNY V MAGISTERSKÉ PRÁCI A VZTAHÚJÍ SE KE STŘEDOŠKOLSKÉMU UČIVU

- Elektrostatická indukce
- Magnetická indukce
- Remanentní magnetická indukce
- Vlastní indukce
- Induktance
- Elektromagnetická indukce
- Nestacionární magnetické pole
- Magnetický indukční tok
- Indukovaný proud
- Ampérovo pravidlo pravé ruky
- Flemingovo pravidlo levé ruky
- Flemingovo pravidlo pravé ruky
- Faradayův zákon elektromagnetické indukce
- Lenzův zákon
- Indukované proudy v uzavřeném obvodu
- Foucaultovy vířivé proudy