

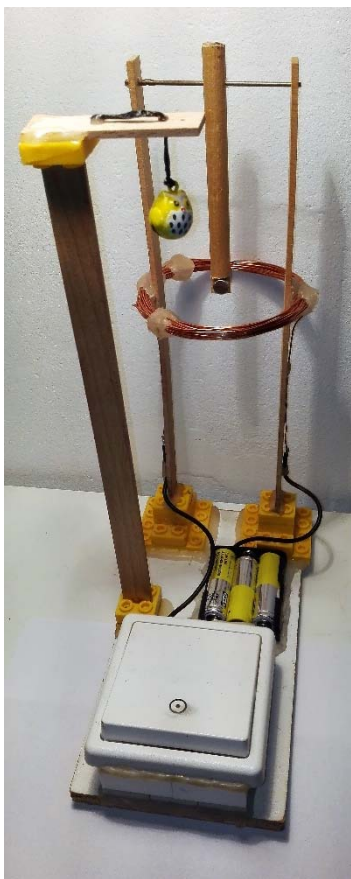
Magnety a cívky s proudem

VÍT BOČEK
KDF MFF UK

Elektromagnetické kyvadlo

Zaměříme na zařízení – elektromagnetické kyvadlo (obrázek 1, obrázek 2), jehož závaží – magnet, je umístěno do magnetického pole cívky. Na magnet tak působí různé síly, které jej vychýlí. Tyto síly podrobně prozkoumáme a pokusíme se jejich prostřednictvím popsat pozorované jevy.

Hlavní smysl experimentu spočívá v zapínání a vypínání proudu do cívky. Při správných intervalech spínání totiž najdeme rezonanční frekvenci kyvadla, čímž bude docházet k jeho maximálním vychýlením a účastníkovi experimentu se podaří „chytnout“ magnetem magnetický předmět zavěšený poblíž místa maximální výchylky magnetu.



Obrázek 1 Elektromagnetické kyvadlo



Obrázek 2 Elektromagnetické kyvadlo (rozebrané)

Cíl experimentu

Experiment má díky své interaktivní povaze značný potenciál zaujmout studenty. Mělo by tak být snazší upevnit v nich poznatek, že elektřina a magnetismus jsou provázané jevy, což je také stěžejní sdělení experimentu. Ve vyšších ročnících lze propojit elektromagnetické

jevy s jevy mechanickými, jako jsou např. rezonanční frekvence kyvadla, působení sil a momentů sil, rozklad sil atp.

Součástky a jejich cenová kalkulace

Součástky	Cena [Kč]
1 AA článek (3 ks)	30
2 Držák na články (1 ks)	15
3 Zvonkový spínač (1 ks)	80
4 Izolovaný vodič (1 m)	5
5 Lakovaný vodič (0,7 mm, 5 m)	50
6 Neodymový magnet (váleček, 2 ks)	20
Celkem	200

Návod na výrobu a popis konstrukce

Prvním krokem při výrobě zařízení je zhotovení cívky o průměru cca 7 cm. Na láhev např. od vína přes sebe namotáme cca 30 závitů lakovaného drátu. Vzniklou cívku z láhve opatrně stáhneme a slepíme ji např. lepicí páskou, či pomocí tavné pistole tak, aby se nerozmotala. Následně ji ve dvou protějších bodech na svém obvodu přilepíme ke dvěma dřevěným laťkám. Každou z nich provrtáme ve stejné vzdálenosti od svého konce a do jednoho z otvorů vsuneme kovovou osičku. V tomto otvoru ji pevně (např. pomocí tavné pistole nebo lepidla) uchytíme. Druhý konec osičky necháme nefixovaný, což umožní snadno na ni nasouvat druhou laťku. Spodní konce laťek pevně uchytíme k podložce. Dále vytvoříme otvor v dřevěné tyčince (místo dřevěné tyčinky lze použít dostupnější a snadno upravovatelné brčko), tak aby měl nepatrně větší průměr, než je průměr osičky. Tím při otáčení tyčinky nedojde k výraznému tření a zároveň se tyčinka nebude v širokém otvoru chaoticky „viklat“. Důležité je, aby byl otvor v takové vzdálenosti od spodního konce tyčinky, že se konec tyčinky po vsunutí osičky do otvoru nachází cca 5 mm nad středem cívky. Vsuneme tedy tyčinku na osičku a přes její dolní konec přichytíme dva malé neodymové magnety (v našem případě válečky). Tím v podstatě vznikne jeden magnet. Je však třeba dbát na to, aby „severojižní“ osa magnetu byla vodorovná a zároveň kolmá k ose otáčení. Konce cívky připojíme přes zvonkový spínač k baterii tří článků typu AA v sérii.

Jako efektní prvek doinstalujeme například kovový přívěsek, který se studenti budou snažit „chytit“.

Technické poznámky

Z obrázku je patrné, že jsou v naší konstrukci použity žluté kousky plastu pod konci dřívek. Jde o čtyři části stavebnice, přičemž jedna „kostička“ je vždy pevně připevněna k podkladovému prkénku a druhá je pevně připevněna k dřívku. Díky tomu lze dřívka odepnout a položit, což je výhoda zejména při přesouvání experimentu na delší vzdálenosti.

Za zmínku stojí také průměr lakovaného vodiče. Otázkou je, zda by mohl být vodič tenčí – dvě tužkové baterie totiž nemohou dodat dostatečně velký proud, aby se drát zahřál na rizikovou teplotu. Důvod, proč byl použit vodič o takovémto průměru (0,7 mm) je čistě praktický. Po odepnutí dřívek by se totiž cívka z tenčího vodiče mohla při transportu zařízení snadno zdeformovat, zatímco drát se zmíněným průměrem činí cívku robustní a odolnou.

Fyzika experimentu a jeho průběh

Naším cílem je popsat proč, jak, a s jakou silou se kyvadlo s magnetem jakožto závažím vychýlí v magnetickém poli cívky. Fyzika experimentu není triviální, a proto ji rozebereme postupně a podrobně prostřednictvím následujících náhledů. Nejprve se zaměříme na základní jevy, které mohou nastat při umístění magnetu do magnetického pole. Poté se zaměříme na zjednodušenou verzi experimentu a následně výsledky úvah aplikujeme na náš experiment.

Popis chování válcového magnetu v magnetickém poli

Jestliže axiálně (směr standardní magnetizace) zmagnetovaný volný magnet umístíme do homogenního magnetického pole, dojde k natáčení magnetu do směru indukčních čar tohoto pole.

Pokud bychom magnet umístili do nehomogenního pole (např. pole dalšího magnetu), kromě zmíněného „natáčení“ magnetu se zde uplatní ještě další účinek – „vtahování“ magnetu do místa s vyšší hustotou indukčních čar (do silnějšího pole), případně (při opačné orientaci jednoho z polí) „vypuzování“ magnetu z místa větší hustoty indukčních čar. Tyto jevy jsou příčinou toho, že se dva magnety odpuzují nebo přitahují.

Nyní se přiblížíme našemu experimentu. Jako zdroj nehomogenního magnetického pole slouží cívka s proudem. Magnet je axiálně zmagnetovaný, ale na rozdíl od předchozí úvahy je fixně připevněný ke konci dřevěné tyčinky volně zavěšené na svém horním konci, která mu nedovolí, aby se zorientoval ve směru indukčních čar, nebo vtáhnul do cívky. Pokusíme se tedy zjistit, proč se magnet s tyčinkou vychýlí. Jinými slovy se ptáme, jaké síly na kyvadlo působí a jaká je jejich výslednice. Spíše, než kvantitativní závěry pro nás budou podstatné ty kvalitativní, tedy kterým směrem, a proč, kyvadlo vykývá.

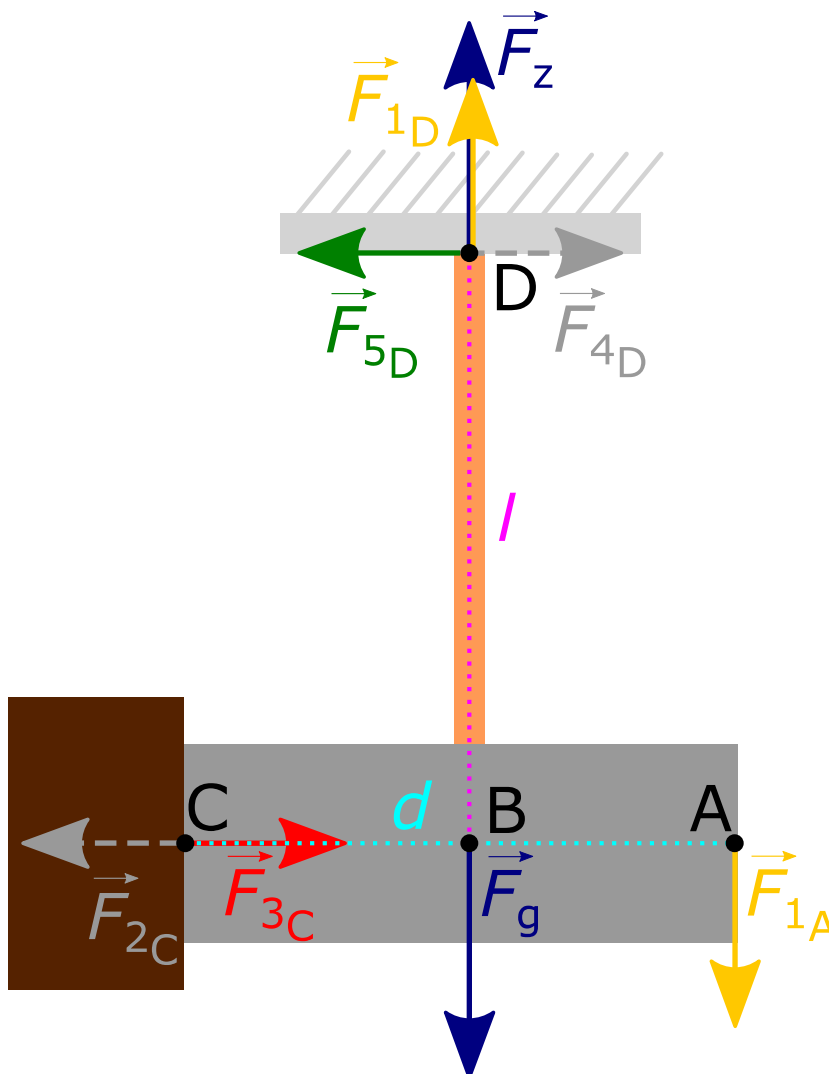
Rozbor sil a momentů sil působících na magnet v magnetickém poli (obrázek 3)

Uvažujme tedy kyvadlo – vodorovně orientovaný magnet (váleček) délky d – který je fixně uchycen v polovině své délky k pevnému závěsu (např. dřevěné tyčince) délky l . K levé straně závaží umístíme „zátaras“ tak, aby kyvadlo nemohlo na tuto stranu vykývnout. V tom případě se kyvadlo nebude pohybovat a při rozboru situace využijeme toho, že výslednice sil tím pádem musí být nulová. Předpokládejme, že se magnet nachází v *homogenním* magnetickém poli směřujícím (bez újmy na obecnosti) svisle zdola nahoru.

Jak bylo řečeno, magnet *se snaží* zorientovat do směru pole – pro jednoduchost si představme, že na jeden pól působí síla směrem dolů a na druhý pól druhá síla směrem nahoru. Uvažujme nyní pouze sílu působící směrem dolů. Místo magnetu a homogenního pole si také představíme válcové závaží a sílu \vec{F}_{1A} s působištěm v bodě A (krajní bod závaží na jeho ose) směřující svisle dolů.

Rozeberme postupně síly, které působí na různé části kyvadla. Na kyvadlo působí tíhová síla \vec{F}_g , kterou kompenzuje síla závěsu \vec{F}_z . Těmito dvěma silami se tedy již nemusíme zabývat. V bodě A působíme svisle dolů silou \vec{F}_{1A} , kterou kompenzuje síla \vec{F}_{1D} . Závaží na zátaras působí silou \vec{F}_{2C} , ale díky 3. Newtonovu pohybovému zákonu (Zákon akce a reakce) působí také zátaras na závaží stejně velkou silou \vec{F}_{3C} , ovšem opačného směru. Kromě těchto sil pů-

sobí na kyvadlo také síla bodu uchycení \vec{F}_{5D} a na bod uchycení (opět podle 3. NPZ) působí opačná síla \vec{F}_{4D} tyčinky. Závaží se tedy nepohybuje – síly jsou v rovnováze, takže výslednice sil je nulová.



Obrázek 3 Síly působící na kyvadlo

Nyní rozebereme momenty sil, které na kyvadlo působí. Moment síly \vec{M} určíme obecně podle vztahu:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F},$$

kde \vec{r} je rameno síly \vec{F} .

Pro velikost momentu \vec{M} pak platí $M = rF \sin \alpha$, kde α je úhel mezi ramenem \vec{r} a silou \vec{F} .

Vzhledem k bodu B (středu závaží) je velikost momentu síly \vec{M}_1 rovna:

$$M_1 = \frac{d}{2} F_{1A} \sin \alpha.$$

Úhel α je roven 90° , neboť síla \vec{F}_{1A} a její rameno o délce $\frac{d}{2}$ jsou kolmé, tedy $\sin \alpha = 1$ a $M_1 = \frac{d}{2} F_{1A}$.

Velikost momentu síly \vec{M}_2 (který působí opačným směrem než \vec{M}_1) spočteme jako

$$M_2 = lF_{3C} \sin \beta.$$

Úhel β je roven 90° , neboť síla \vec{F}_{3C} a její rameno o délce l jsou kolmé, tedy $\sin \beta = 1$ a $M_2 = lF_{3C}$.

velikosti momentů sil musí být v rovnosti, neboť se kyvadlo nepohybuje. Platí tedy

$$\frac{d}{2} F_{1A} = lF_{3C}.$$

Z této rovnosti můžeme vyjádřit velikost síly \vec{F}_{3C} jako

$$F_{3C} = F_{1A} \frac{d}{2l}.$$

Pokud tedy odstraníme zátaras, kyvadlo vykývne díky síle \vec{F}_{3C} .

Nyní se vraťme k situaci, kdy je závažím magnet v homogenním magnetickém poli. Díky tomu na závaží – magnet – působí svisle vzhůru také síla \vec{F}_{1C} s působištěm v bodě C. Její velikost bude shodná se silou \vec{F}_{1A} , ale bude mít opačný směr. Přesto však po jednoduché úvaze dojdeme k závěru, že její účinek na zátaras má stejný směr i velikost jako účinek síly \vec{F}_{1A} . Celková velikost síly \vec{F}'_{3C} působící na kyvadlo tedy bude:

$$F'_{3C} = F_{1A} \frac{d}{l}.$$

Nyní provedeme experiment s cívkou, kterou prochází proud, a malým magnetem na tyčince. Kyvadlo budeme posouvat z výšky h nad středem cívky svisle dolů do výšky $-h$. Pozorujeme, že v polorovině nad cívkou působí na magnet síla směrem k jedné straně cívky. V polorovině pod cívkou však působí síla na opačnou stranu. Tento jev pomocí předchozích úvah neobjasníme. Příčinou je totiž nehomogenita pole cívky, kterou jsme neuvažovali. Na pomoc si tedy vezmeme teorii „magnetických množství“.

Popis pomocí „magnetického množství“ [1] (obrázek 4)

Myšlenka teorie „magnetických množství“ [L. Dvořák, 2016] tkví v představě konců magnetických pólů jako míst s magnetickými množstvími Q_{m_1} a Q_{m_2} , která charakterizují „jak silné jsou magnetické póly“. Pro výpočet magnetické síly F_m mezi póly dlouhých tyčových magnetů platí vztah (analogický Coulombovu zákonu):

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_{m_1} Q_{m_2}}{r^2}.$$

V elektrostatice počítáme sílu působící na náboj pomocí pole elektrické intenzity jako $F = QE$. V magnetickém poli počítáme „sílu na magnetické množství“ jako

$$F = Q_m H,$$

kde H je intenzita magnetického pole. Kombinací vztahů dostaneme pro intenzitu v okolí pólu dlouhého tyčového magnetu vztah

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_m}{r^2},$$

kde Q_m je magnetické množství daného pólu. Mezi magnetickou intenzitou a magnetickou indukcí platí vztah

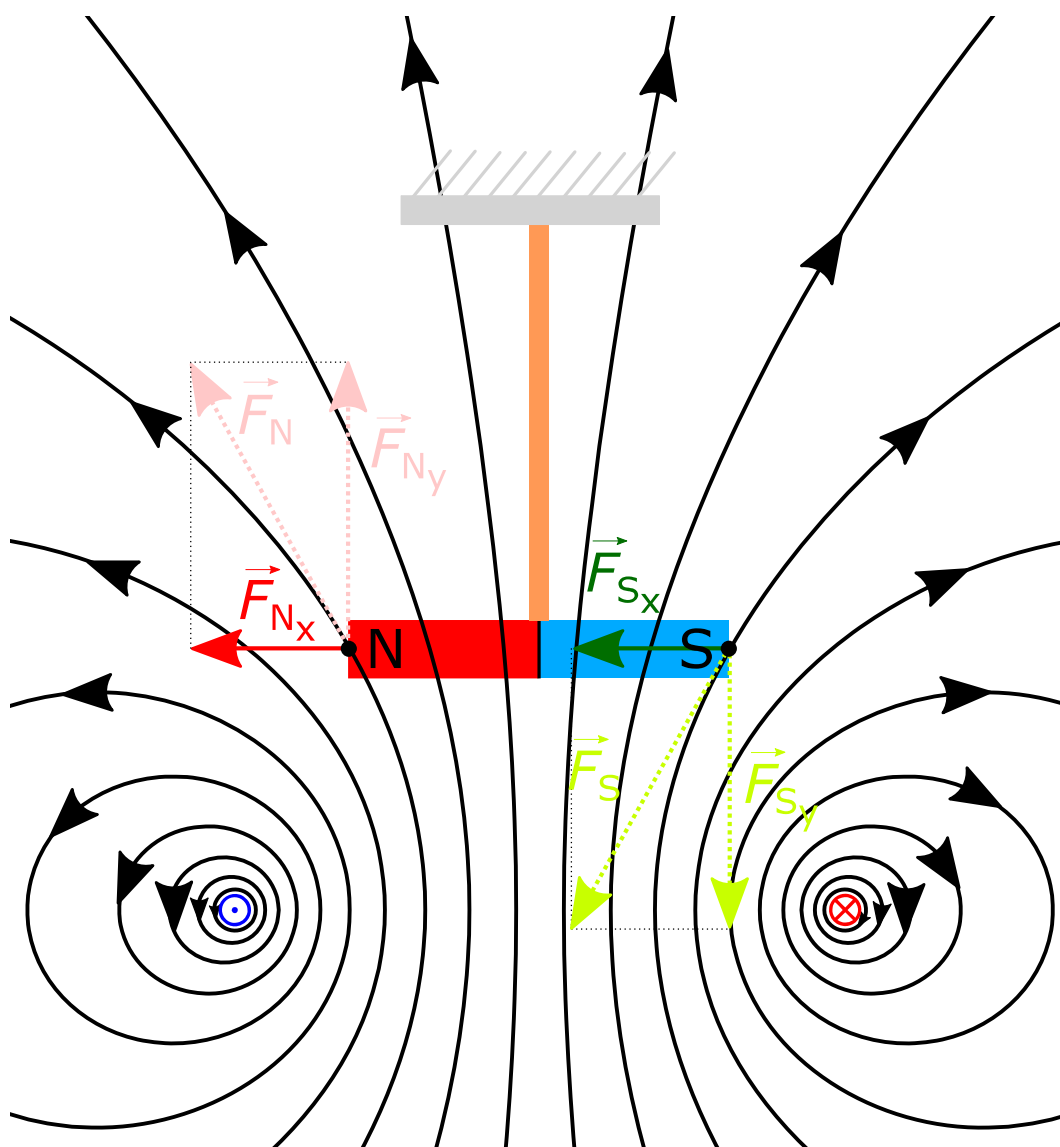
$$B = \mu_0 H.$$

Pro sílu F působící na pól tyčového magnetu tedy platí

$$F = \frac{BQ_m}{\mu_0}.$$

Magnet v našem experimentu není tyčový, proto pro něj tento vztah neplatí. Můžeme jej však prodloužit, a pak jde o rozumnou aproximaci.

V magnetickém poli cívky tedy působí na magnetická množství na koncích magnetu síly \vec{F}_N a \vec{F}_S . Jejich směr je tečný k indukčním čarám magnetického pole cívky. Podstatné jsou pro nás síly \vec{F}_{N_x} a \vec{F}_{S_x} , které jsou průmětem sil \vec{F}_N a \vec{F}_S do x-ové osy. Síly \vec{F}_{N_x} a \vec{F}_{S_x} směřují stejným směrem, a tak je zřejmé, že výsledná síla na magnet působí v našem případě směrem doleva.



Obrázek 4 Síly působící na magnetická množství

Závěr a začlenění do výuky

Pomocí výše uvedených náhledů jsme tedy kvalitativně popsali, z jakého důvodu se kyvadlo vychyluje. Mějme však na paměti, že jsme užívali různá přiblížení a některé efekty jsme zanedbávali. Uvědomme si například, že jakmile se magnet vychýlí z rovnovážné polohy, situace se stane značně nesymetrickou a začnou se uplatňovat síly, které v rovnovážné poloze neexistovaly. Magnet se např. bude chtít vtáhnout do místa s vyšší hustotou indukčních čar, jak jsme komentovali výše.

Je na zvážení, jaký popis experimentu volit pro vysvětlování jevu studentům. Rozbor sil a momentů sil působících na magnet v magnetickém poli je sice obtížný, ale studentům blízký z hodin mechaniky. Popis pomocí magnetických množství pro studenty může být nezvyklý, ale pro základní představu je zřejmě jednodušší. Je však třeba dávat pozor, aby studenti nenabyli dojmu, že na konci magnetů jsou umístěny jakési „magnetické náboje“.

Začlenění experimentu do hodiny může být pro studenty zajímavé také díky tomu, že si sami vyzkouší chytání přívěsku, což bývá velmi oblíbenou aktivitou. V případě, že by si studenti takto hráli, musíme počítat se značnou časovou náročností, neboť většině z nich se ani po minutách úsilí nepodaří úkol splnit. Zajímavé je, že přívěsek bez obtíží chytanou většinou studenti, kteří hrají na hudební nástroj, tancují, případně provozují jinou činnost, která vyžaduje cit pro rytmus. Ten, kdo postrádá tuto schopnost, s chycením přívěsku značně zápasí. Lze to vysvětlit tím, že spínač je nezbytné mačkat ve správných intervalech, a to je výsadou právě lidí vnímajících rytmus.

Literatura

- [1] DVORÁK, Leoš, 2016. *O magnetu, magnetických tělesech a velikém magnetu Zemi* [online]. [cit. 1. 10. 2018]. Dostupné z: http://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Fyzika2elmag/OmagnetuMagnetickychTelesech_DilnyHeureky2016.pdf