



# Elektromagnetická indukce

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B1701 – Fyzika  
*Studijní obory:* 7504R006 – Fyzika se zaměřením na vzdělávání  
7504R009 – Chemie se zaměřením na vzdělávání

*Autor práce:* **Mgr. Alena Šáfrová**  
*Vedoucí práce:* prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Mgr. Alena Šáfrová**  
Osobní číslo: **P12000825**  
Studijní program: **B1701 Fyzika**  
Studijní obory: **Fyzika se zaměřením na vzdělávání**  
**Chemie se zaměřením na vzdělávání**  
Název tématu: **Elektromagnetická indukce**  
Zadávající katedra: **Katedra fyziky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zákony elektromagnetické indukce
2. Demonstrace elektromagnetické indukce ve škole
3. Návrh a praktická realizace demonstračních experimentů k elektromagnetické indukci ve škole

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

O.Lepil, P.Šedivý: Fyzika pro gymnázia - Elektřina a magnetismus, SPN Praha 1992, ISBN 80-85849-47-X

D.Halliday, R.Resnick, J.Walker: Fyzika, Díl 3. Elektřina a magnetismus, Prometheus VUTIUM 2001, ISBN 81-7196-213-9

Vedoucí bakalářské práce:

**prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.**

Katedra fyziky

Datum zadání bakalářské práce: **14. dubna 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. dubna 2016**



doc. RNDr. Miroslav Brzezina, CSc.  
děkan

L.S.



prof. Ing. Karel Vokurka, DrSc.  
vedoucí katedry

dne 21/6/15

## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 10. 12. 2015

Podpis: A. Šafářová

## **Poděkování**

Děkuji prof. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D. za vedení, podnětné rady a připomínky při zpracování bakalářské práce. Také děkuji panu M. Lustikovi za výrobu pomůcky ke sjíždění magnetek po tyčích.

## **Anotace**

Práce se zabývá tématem elektromagnetické indukce v učivu fyziky na základní a střední škole. Teoreticky popisuje jevy spojené s elektromagnetickou indukcí, u kterých formou historických poznámek uvádí také základní údaje o významných fyzicích. V praktické části práce jsou metodicky popsány netradiční demonstrační pokusy a je popsán postup na výrobu nové didaktické pomůcky. Demonstrační pokusy pokrývají jev elektromagnetické indukce na indukčním vařiči, levitaci vodivého kroužku a vířivé proudy, indukční vláček a experiment s pohybem magnetky po kovové tyči brzděné vířivými proudy. Didaktická pomůcka demonstruje vznik elektromagnetické indukce v cívce v poli padajícího magnetu. Součástí práce jsou v příloze přehledně zpracované metodické listy k jednotlivým pokusům.

**Klíčová slova:** elektromagnetická indukce, vířivé proudy

## **Annotation**

Thesis deals with electromagnetic induction in teaching physics at the elementary and middle school. In theoretical part we describe the phenomena associated with electromagnetic induction. Historical notes also provide basic information on prominent physicists working in this field. In practical part we methodically describe unusual demonstration experiments and process for the production of new teaching aid. Demonstration experiments cover the phenomenon of electromagnetic induction used in induction cooker, levitation of conductive ring and eddy currents, induction-based train and experiment with sliding ring magnets on the metallic rod damped by eddy currents. Didactic tool demonstrates the origin of electromagnetic induction in the coil within the magnetic field of falling magnet. As a part of this work, methodical instruction sheets for individual experiments are summarized in Appendix.

**Key words:** electromagnetic induction, eddy currents

# Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>11</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>1 Teoretická část .....</b>	<b>13</b>
1.1 Magnetický indukční tok.....	13
1.2 Magnetické pole.....	15
1.2.1 Stacionární magnetické pole .....	15
1.2.2 Nestacionární magnetické pole .....	15
1.2.3 Vlastnosti magnetického pole .....	15
1.3 Elektromagnetická indukce.....	17
1.3.1 Odvození zákona elektromagnetické indukce.....	19
1.3.2 Vířivé proudy .....	24
1.3.3 Indukce a přenos energie.....	26
1.3.4 Indukčnost.....	29
1.3.5 Vzájemná indukce.....	29
1.3.6 Indukční ohřev .....	31
1.3.7 Indukční vařič.....	32
<b>2 Praktická část.....</b>	<b>33</b>
2.1 Obecné poznámky z teorie elektromagnetická indukce.....	34
2.2 Zásady práce s indukčním vařičem.....	36
2.3 Popis pokusů .....	38
2.3.1 Vaření ve skleněné nádobě.....	38
2.3.2 Vaření v kovové nádobě.....	39

2.3.3	Vaření přes polystyren .....	41
2.3.4	Alabal na indukčním vařiči .....	44
2.3.5	Levitace kovového kroužku .....	47
2.3.6	Indukční vařič jako transformátor .....	50
2.3.8	Indukční vláček .....	74
2.3.9	Demonstrační pomůcka elektromagnetické indukce.....	77
<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>		<b>86</b>
<b>Přílohy .....</b>		<b>90</b>



# Seznam obrázků

Obrázek 1: Indukční tok plochou .....	13
Obrázek 2: Vznik indukovaného napětí .....	18
Obrázek 3: Odvození zákona elektromagnetické indukce .....	19
Obrázek 4: Flemingovo pravidlo levé ruky .....	20
Obrázek 5a, b: Směr indukčních čar v indukovaném magnetickém poli .....	23
Obrázek 6: Vznik vířivého proudu .....	25
Obrázek 7: Vodivá smyčka při vytahování z magnetického pole .....	27
Obrázek 8a, b: Směr indukovaného proudu a polarita napětí při vlastní indukci .....	31
Obrázek 9: Princip indukčního vařiče .....	32
Obrázek 10: Vznik indukovaného proudu: a) vodič je v klidu, b) vodič je v pohybu .....	34
Obrázek 11: Vznik indukovaného proudu v kovovém vodiči .....	35
Obrázek 12: Vznik indukovaného proudu v uzavřené smyčce .....	35
Obrázek 13: Piktogramy .....	37
Obrázek 14: Pomůcky - vaření ve skleněné nádobě .....	38
Obrázek 15: Pomůcky - vaření v kovové nádobě .....	39
Obrázek 16: Vaření přes polystyren .....	42
Obrázek 17: Pomůcky - alobal na indukčním vařiči .....	44
Obrázek 18: Alobal na indukčním vařiči .....	45
Obrázek 19: Propalování alobalu .....	46
Obrázek 20: Levitace kovového kroužku .....	48
Obrázek 21: Levitace prstence z alobalu .....	49
Obrázek 22: Pomůcky – indukční vařič jako transformátor .....	51
Obrázek 23a, b: Rozsvícení žárovky na indukčním vařiči .....	52

Obrázek 24: Rozsvícení žárovky na indukčním vařiči.....	53
Obrázek 25: Pomůcky – vířivé proudy ... ..	54
Obrázek 26: Vířivé proudy .....	54
Obrázek 27: Demonstrační pomůcka – sjíždění magnetek po tyči .....	58
Obrázek 28: Schéma experimentu- sjíždění magnetky po tyči .....	59
Obrázek 29: Sjíždění magnetek po tyčích.....	61
Obrázek 30: Graf dráhy magnetky po měděné tyči.....	63
Obrázek 31: Graf dráhy magnetky po hliníkové tyči.....	63
Obrázek 32: Graf dráhy magnetky po mosazné tyči.....	64
Obrázek 33: Graf dráhy magnetek .....	70
Obrázek 34: Graf rychlosti magnetek .....	70
Obrázek 35: Videosekvence pohybu magnetek v časových intervalech.....	72
Obrázek 36: Pomůcky – indukční vláček.....	74
Obrázek 37: Indukční vláček .....	75
Obrázek 38a, b: Schéma indukčního vláčku .....	76
Obrázek 39: Pomůcka k demonstraci indukovaného napětí .....	77
Obrázek 41: Schéma obvodu s LED diodami [35] .....	79
Obrázek 40a - c: Demonstrační pomůcka .....	79
Obrázek 42: Vhazování magnetu do cívky .....	80
Obrázek 43: Graf indukovaného napětí na cívce při volném pádu magnetu .....	82
Obrázek 44: Graf indukovaného napětí na cívce při volném pádu magnetu s opačnou polaritou .....	82

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučené počty závitů cívky .....	53
Tabulka 2: Měď I .....	62
Tabulka 3: Hliník I .....	62
Tabulka 4: Mosaz I .....	62
Tabulka 5: Mezní rychlosti klouzání magnetky po tyči I.....	64
Tabulka 6: Mezní rychlosti klouzání magnetky po tyči I.....	65
Tabulka 7: Přepočet hodnot px na cm.....	66
Tabulka 8: Měď II.....	67
Tabulka 9: Hliník II.....	68
Tabulka 10: Mosaz II .....	69
Tabulka 11: Rezistivita materiálu II.....	71
Tabulka 12: Mezní rychlosti klouzání magnetky po tyči II .....	71

# Seznam použitých zkratek a symbolů

$a$	zrychlení	$q$	elektrický náboj
$B$	magnetická indukce	$R$	elektrický odpor
$B_r$	remanentní magnetizace	$R^2$	korelační koeficient
$e$	elektron	$S$	plocha
$F$	Lorentzova síla	$t$	čas
$F_e$	elektrická síla	$T_c$	Curieova teplota
$F_m$	magnetická síla	$U_e$	elektromotorické napětí
$F_o$	odporová síla	$U_i$	indukované napětí
$G$	tíhová síla	$V$	rychlost
$g$	tíhové zrychlení	$v_m$	ustálená rychlost
$H_c$	koercitivní pole	$x$	dráha
$I$	elektrický proud	$\alpha$	úhel
$K$	konstanta	$\gamma$	konduktivita
$l$	délka	$\mathcal{G}_r$	relativní chyba měření
$L$	vlastní indukčnost	$\mu_r$	relativní permeabilita
LED	světelná dioda	$\rho$	rezistivita
$m$	hmotnost	$\rho_{\text{tab}}$	rezistivita tabulková
$N$	závity cívky	$\phi$	magnetický indukční tok
$P$	výkon		

# Úvod

Vzhledem k současnému malému zájmu o studium fyziky na vysokých školách, je nutné v pedagogické praxi žáky a studenty zaujmout. Nenechat je pouze pasivně přijímat informace, ale vést je k pochopení fyzikálních jevů a dějů také formou zážitku z efektního fyzikálního pokusu.

Nedílnou součástí učiva fyziky na základní a střední škole je kapitola o elektromagnetických jevech. Základní znalosti o podstatě magnetických a elektrických jevů získávají žáci již na základní škole. Pojem elektromagnetická indukce je pro ně mnohdy složitý k pochopení. Teprve středoškolská fyzika tento pojem hlouběji vysvětluje. Pro správné pochopení učiva a souvislostí má pro žáky i studenty nezastupitelné místo pokus. Správně provedený a zařazený pokus je vždy didakticky účinný.

Práce se nejprve zabývá obecnými teoretickými pojmy elektromagnetické indukce. Věnuje se definicím, vztahům a dějům v nestacionárním magnetickém poli. Text je doplněn historickými poznámkami, ve kterých jsou uvedeny základní údaje o význačných fyzicích v souvislosti s elektromagnetickou indukcí.

Zaujmutí žáků a studentů lze dobře docílit experimentováním prostřednictvím fyzikálního pokusu. V praktické části práce jsou metodicky popsány netradiční demonstrační pokusy do hodin fyziky. Pokusy jsou doplněny položením otázek týkajících se demonstrovaného jevu a jeho vysvětlením. Součástí práce je také popis postupu na výrobu nové didaktické pomůcky. Zjednodušené popisy pokusů jsou uvedeny v příloze formou didaktických listů. Listy mohou sloužit jak pedagogům do výuky, tak žákům a studentům k provádění pokusů.

# 1 Teoretická část

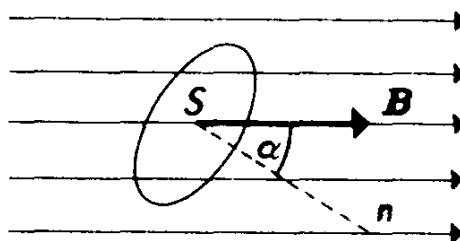
Vymezení samotného termínu elektromagnetická indukce je poměrně složité. V teoretické části jsme se snažili uvést souhrn základních zákonů, vzorců a vztahů k tematickému okruhu. Při psaní textu jsme vycházeli především ze středoškolského pojetí, fyzikálně-matematický popis jsme pro ilustraci doplnili popisem jednoduchých pokusů a schematickými obrázky. Pro vysvětlení jevu elektromagnetické indukce jsme nejprve zavedli fyzikální veličinu magnetický indukční tok a popsali jsme magnetické pole. Fyzikální vektorové veličiny jsou v celé práci uváděny tučně. Rozsah základních teoretických poznatků v této části práce jsme volili vzhledem k využití v navazující praktické části.

## 1.1 Magnetický indukční tok

Magnetické indukční čáry zobrazují prostorové rozložení magnetického pole. Jsou to orientované čáry, jejichž směr je směrem vektoru magnetické indukce v daném místě pole.

Indukční čáry magnetického pole jsou obecně uzavřené křivky. Mírou magnetického pole procházející určitou plochou ohraničenou křivkou je magnetický indukční tok, který je úměrný celkovému počtu indukčních čar. Obecně je tok vektoru magnetické indukce přes uzavřenou plochu v nehomogenním poli určen integrací všech elementárních toků v určitém čase:

$$\Phi = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1.1)$$



Obrázek 1: Indukční tok plochou. [1]

Je-li závit o ploše  $S$  kolmý na indukční čáry a normála této plochy je rovnoběžná s vektorem magnetické indukce  $\mathbf{B}$ , je skalární součin vektorů magnetické indukce a plochy roven  $B \, dS \cos 0^\circ = B \, dS$ . V homogenním poli je pak magnetická indukce ve všech místech plochy stejná. V tomto případě prochází plochou závitu magnetický indukční tok  $\Phi$ , který je definován vztahem:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}. \quad (1.1.2)$$

Jednotkou magnetického indukčního toku je weber (Wb),  $[\Phi] = [\mathbf{B}] [\mathbf{S}] = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{m}^2 = \text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{-1} = \text{V} \cdot \text{s} = \text{Wb}$ . Z rozměru jednotky je zřejmé, že magnetický indukční tok souvisí s indukovaným napětím. [2 s. 800]

*Historická poznámka:* -----

**Wilhelm Eduard Weber** (\*24. října 1804, Wittenberg - †24. října 1891, Göttingen) byl významný německý fyzik. Pocházel z rodiny profesora teologie. Po studijích na univerzitách v Halle a Göttingenu se v roce 1831 stal profesorem fyziky. Na univerzitě v Göttingenu šest let spolupracoval s Karlem Friedrichem Gaussem (1777 – 1855). Společně zkonstruovali první elektromagnetický telegraf, který spojil fyzikální ústav s univerzitní observatoří. Z politických důvodů musel Weber cestovat. V roce 1843 se stal profesorem na Univerzitě v Lipsku. Od roku 1855 byl členem Švédské královské akademie věd. Do oblasti fyziky přispěl logickým systémem jednotek pro elektřinu. Weberovy výsledky v oblasti magnetismu, elektrostatiky a elektrodynamiky aplikoval James Clerk Maxwell (1831- 1879) v teorii elektromagnetického pole. [3, 4 s. 30]. V soustavě SI je jeho jménem označena jednotka indukčního magnetického toku: weber  $[\text{Wb}] = \text{Vs} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$ .



Svírá-li normála plochy s indukčními čarami homogenního magnetického pole úhel  $\alpha$  (viz obr. 1), platí pro magnetický indukční tok plochou vztah:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (1.1.3)$$

Pro cívku s  $N$  závity platí vztah:

$$\Phi = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (1.1.4)$$

## **1.2 Magnetické pole**

Zdrojem magnetického pole jsou permanentní magnety nebo vodiče s elektrickým proudem. V závislosti na čase rozlišujeme dva typy magnetického pole – stacionární a nestacionární magnetické pole.

### **1.2.1 Stacionární magnetické pole**

Časově neproměnné magnetické pole, které je v okolí nepohybujících se permanentních magnetů nebo vzniká v prostoru při rovnoměrném pohybu nosičů náboje ve vodiči s elektrickým proudem. Magnetický tok se s časem nemění.

### **1.2.2 Nestacionární magnetické pole**

Časově proměnné magnetické pole. Je příčinou vzniku indukovaného elektrického pole. Pokud má magnetické pole vytvořit elektrický proud, musí být magnetické pole nebo elektrické pole časově proměnné.

*Zdrojem nestacionárního magnetického pole může být [2]:*

- 1) nepohybující se vodič s časově proměnným proudem;
- 2) pohybující se vodič s konstantním proudem;
- 3) pohybující se vodič s proměnným proudem;
- 4) pohybující se permanentní magnet.

### **1.2.3 Vlastnosti magnetického pole**

Pro popis magnetického pole zavádíme magnetický dipól, jako dvojici opačných „magnetických nábojů“. „Samotné magnetické náboje“ tzv. magnetické monopóly nebyly dosud experimentálně prokázány. Magnetické vlastnosti materiálu vyplývají z vnitřní struktury látek, především pak z uspořádání elektronů v elektronovém obalu



atomů. Každý elektron v atomu má orbitální dipólový magnetický moment a spinový magnetický moment. Výslednice polí magnetických momentů všech elektronů v látce vytváří magnetické pole, které určuje magnetické vlastnosti látek. Objemová hustota magnetických dipólových momentů kvantitativně popisuje magnetickou polarizaci látky.

Rozlišujeme tři druhy magnetických vlastností látek. Jejich magnetickou charakteristiku popisuje veličina relativní magnetická permeabilita  $\mu_r$ , která je rovna relativnímu podílu magnetické polarizace a intenzity magnetického pole. [5]

- 1) *diamagnetismus* ( $\mu_r < 1$ , látky mírně zeslabují magnetické pole),
- 2) *paramagnetismus* ( $\mu_r > 1$ , látky mírně zesilují magnetické pole),
- 3) *feromagnetismus* ( $\mu_r \gg 1$ , látky výrazně zesilují magnetické pole).

**Diamagnetické látky** mají výsledný orbitální a spinový moment nulový, magnetické pole na ně nepůsobí. **Látky paramagnetické** mají nenulový výsledný orbitální a spinový moment, proto na ně magnetické pole působí. **Látky feromagnetické** mají „domény“, které tvoří shluky souhlasně orientovaných spinových magnetických momentů. Domény jsou orientovány náhodně a jejich pole se vzájemně ruší. V přítomnosti vnějšího magnetického pole se domény uspořádají souhlasně a látka vykazuje silné magnetické vlastnosti.

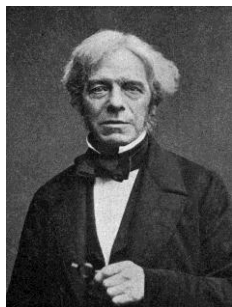
**Feromagnetismus** vykazují železo, nikl, kobalt a jejich slitiny. Tato schopnost, vlastní pouze pevným látkám, je závislá na teplotě. Při překročení mezní teploty (Curieova teplota) se zruší souhlasné uspořádání domén. Energie kmitů atomů v krystalové mřížce je příliš velká a látka přestává být feromagnetická. [2]. Silné magnetické účinky feromagnetických látek se uplatňují při elektromagnetické indukci.

### 1.3 Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je jev, který spojuje elektrické a magnetické síly. Před vlastním objevem elektromagnetické indukce Michaelem Faradayem (\*1791 – †1867) byla známa souvislost elektrického proudu s magnetickým polem, tj. že elektrický proud procházející vodičem vytváří ve svém okolí magnetické pole (Ørstedův pokus). Nebyl však prokázán opačný jev, tj. že by magnetické pole vytvářelo elektrický proud. Teprve v roce 1831 dokázal Michael Faraday popsat vzájemné souvislosti mezi magnetickými a elektrickými silami a dokázal tedy, že elektřina a magnetismus jsou pouze dva různé projevy téhož jevu, tzv. elektromagnetismu. [6]

*Historická poznámka: -----*

**Michael Faraday** (\*22. září 1791, Newington, Londýn - †25. srpna 1867) byl významný anglický chemik a fyzik. Pocházel z chudé rodiny, vyučil se knihvazačem. Byl samoukem, bez oficiálního vzdělání a hlubší znalosti matematiky, zapáleným pro přírodovědné bádání. Jako žák a asistent chemika sira Humphry Davyho (1778 – 1829) dosáhl významných úspěchů v chemii zejména v elektrolýze. Od roku 1824 byl členem Královského ústavu v Londýně. V roce 1833 se stal profesorem chemie.



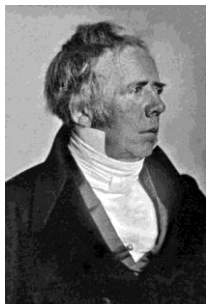
Do oblasti fyziky přispěl svými pokusy v oboru elektřiny. V roce 1821 zjistil, že elektrický proud procházející vodičem může vyvolat magnetickou sílu. Objevil otáčení vodiče protékáného proudem v poli permanentního magnetu. O deset let později dokázal opačně. V roce 1831 objevil elektromagnetickou indukci při sestrojení prvního jednoduchého transformátoru. V téže roce rovněž experimentálně prokázal, že magnet v pohybu může vytvořit elektřinu a sestrojil první dynamo. Pozorovaný jev při zasouvání tyčového magnetu do cívky z měděného drátu nazval magnetoelektrická indukce. Svými pokusy dokázal, že elektřina a magnetismus jsou dva různé projevy jediného jevu elektromagnetismu. Faraday vytvořil teorii elektromagnetických polí založenou na zcela novém pojmu elektrických a magnetických siločar. Na jeho teorii navázali Angličané William Thomson (1824 – 1907) a James Clerk Maxwell (1831 - 1879), který o dvacet let později popsal elektromagnetické pole matematickými rovnicemi. Upraveno podle [4 s. 30, 7].

V soustavě SI je jeho jménem označena jednotka kapacity: farad  $[F] = m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$ .

-----

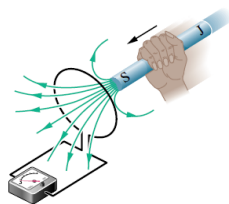
Historická poznámka: -----

**Hans Christian Ørsted** (\*14. srpna 1777, Rundjöbing, Dánsko - †9. března 1851, Kodaň) byl dánský fyzik, který se zabýval elektromagnetismem. V roce 1806 se stal profesorem chemie a fyziky na kodaňské univerzitě, zabýval se elektrickými jevy. Pro své zapálení pro přírodní vědy a po studiích v řadě evropských států založil v Dánsku Přírodovědeckou společnost. V roce 1820 náhodou objevil magnetické účinky elektrického proudu a položil základy elektromagnetismu. [4 s. 232, 8]. V soustavě jednotek je jeho jménem označena starší jednotka intenzity magnetického pole: 1 oersted [Oe] = 79,577 A.m<sup>-1</sup>.



Fyzikální jev elektromagnetické indukce vzniká v důsledku proměnlivého magnetického pole, které dokáže v uzavřeném elektrickém obvodu vytvářet – indukovat – elektrický proud, tím vzniká elektromagnetické pole. Faraday založil svou teorii na novém pohledu na elektrické a magnetické siločáry. Elektromagnetické pole a jeho siločáry později matematickými rovnicemi popsal James C. Maxwell.

Pro ilustraci elektromagnetické indukce sestavíme jednoduchý obvod z cívky a voltmetru nebo ampérmetru s nulou uprostřed (viz obr. 2). Při přibližování tyčového magnetu k cívce, ukáže ručka voltmetru výchylku. Při oddalování magnetu, ukáže ručka voltmetru výchylku na opačnou stranu. Pokud budou pohyby magnetu rychlejší, voltmetr bude ukazovat větší výchylky. Pokud magnet u cívky zastavíme, bude výchylka nulová. Nyní necháme magnet v klidu a budeme pohybovat cívkou. Zjistíme, že při každé změně polohy magnetu a cívky se v cívce indukuje elektromotorické napětí a obvodem prochází indukovaný proud. Tento jev se nazývá elektromagnetická indukce. Z uvedeného pokusu vyplývá, že obě indukované veličiny jsou závislé pouze na rychlosti relativního pohybu magnetu a cívky. [5]



Obrázek 2: Vznik indukovaného napětí. [2]

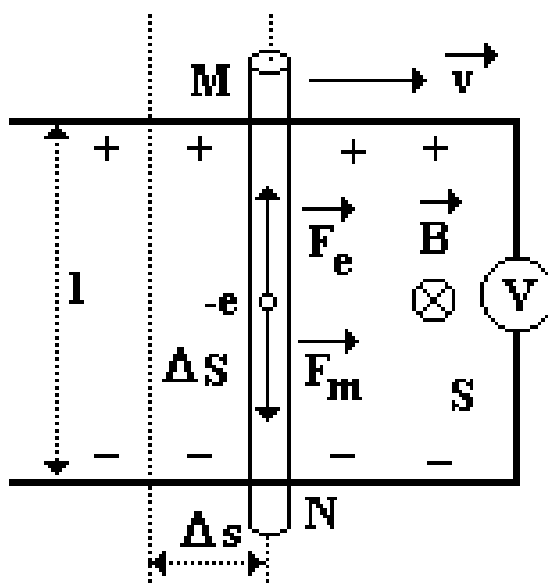
**Indukované napětí může vzniknout:** [5]

- 1) ve vodiči, který se pohybuje v neproměnném magnetickém poli;
- 2) v nepohybujícím se vodiči, který je v časově proměnném magnetickém poli;
- 3) ve vodiči, který se pohybuje v časově proměnném magnetickém poli.

### 1.3.1 Odvození zákona elektromagnetické indukce

K odvození zákona vyjdeme z jednoduchého případu. Zvolíme si referenční systém, do kterého umístíme homogenní magnetické pole o magnetické indukci  $B$ . Indukční čáry vektoru  $B$  jsou kolmé k nákrešně a orientované za nákrešnu (značeno křížkem). V rovině nákrešny jsou ve vzdálenosti  $l$  znázorněny dva přímé rovnoběžné a nepohyblivé vodiče připojené k voltmetru. Po obou vodičích se příčně pohybuje další přímý vodič rychlostí  $v$  ve směru osy  $x$  (viz obr. 3). [9]

Voltmetr ukazuje nenulovou výchylku. Mezi body M a N pohybujícího se vodiče je nenulové napětí, které se v něm indukuje při jeho pohybu v magnetickém poli.



Obrázek 3: Odvození zákona elektromagnetické indukce. [1]

Nyní popíšeme elektromagnetickou interakci mezi elektrickými náboji, ke které dochází při příčném pohybu vodiče.

Na bodový náboj  $q$  v daném místě a čase působí elektrická síla

$$\mathbf{F}_e = q \cdot \mathbf{E} . \quad (1.3.1)$$

Na bodový náboj  $q$  v pohybu v daném místě a čase působí magnetická síla

$$\mathbf{F}_m = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1.3.2)$$

kde  $\mathbf{v}$  je rychlost pohybu bodového náboje.

Na bodový náboj  $q$  tedy působí elektromagnetické pole Lorentzovou silou

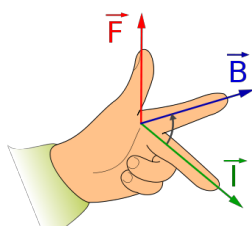
$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.3.3)$$

V našem pokusu působí na každý volný elektron v pohybujícím se vodiči elektromagnetické pole Lorentzovou silou (1.3.3):

$$\mathbf{F} = (-e) \cdot \mathbf{E} + (-e) \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1.3.4)$$

kde  $\mathbf{v}$  je rychlost pohybu volného elektronu.

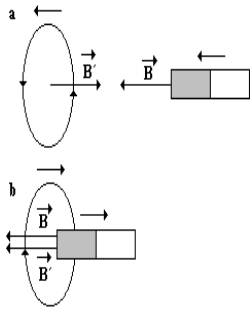
Na každý volný elektron v tomto pohybujícím se vodiči působí magnetická síla  $\mathbf{F}_m$ , která je kolmá současně na  $\mathbf{v}$  a  $\mathbf{B}$  a má směr od bodu M k bodu N. K určení směru magnetické síly, která působí na vodič, jsme použili **Flemingovo pravidlo levé ruky**: *Položíme-li otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly směr pohybu kladných nábojů a indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtážený palec směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem* (viz obr. 4). [5]



Obrázek 4: Flemingovo pravidlo levé ruky. [10]

Historická poznámka: -----

**John Ambrose Fleming** (\*29. listopadu 1849, Lancaster, Anglie - †18. dubna 1945, Sidmouth, Anglie) byl britský fyzik a inženýr, který se zabýval elektrickým měřením a elektrickým osvětlením, bezdrátovou telegrafií. Objevil první elektronku a v roce 1904 si nechal patentovat konstrukci diody. Jeho motorové pravidlo je dnes známo jako mnemotechnická pomůcka pravidla levé ruky k určení směru magnetické síly působící v magnetickém poli na vodič s elektrickým proudem. V roce 1929 byl povýšen do šlechtického stavu. [4, 11, 12]



Při pohybu vodiče rychlostí v vzhledem k magnetickému poli, začne působit na volné elektrony, záporné nositele náboje  $q$ , magnetická složka Lorentzovy síly (1.3.2), která má v našem případě velikost

$$F_m = |-e| \cdot v \cdot B \cdot \sin 90^\circ = e \cdot v \cdot B. \quad (1.3.5)$$

Z elektrostatiky víme, že na volné elektrony má silové účinky také homogenní elektrické pole o intenzitě:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{(-e)}. \quad (1.3.6)$$

Pro velikost intenzity našeho indukovaného elektrického pole by tedy platilo

$$\mathbf{E}_i = \frac{\mathbf{F}_m}{(-e)} \quad (1.3.7)$$

Upraveno podle [13].

Ze vztahů (1.3.6) a (1.3.7) vidíme, že magnetická a elektrická síla spolu úzce souvisí. K jakým elektromagnetickým dějům tedy dochází?

Působením magnetické síly  $F_m$  se začnou volné elektrony přemísťovat k dolní části vodiče. Jejich pohyb je však omezen na úsečku přímého vodiče. Tím se začne dolní část lineárního vodiče nabíjet záporně a horní část lineárního vodiče nabíjet kladně. Ve vodiči tak vznikne elektrostatické pole o intenzitě  $E$ , které působí na elektrony

elektrickou silou  $F_e$  opačným směrem než síla magnetická  $F_m$ . Silový účinek magnetické síly se se zvyšujícím se počtem elektronů na dolní části vodiče zeslabuje. Intenzita elektrostatického pole  $E$  působí proti intenzitě indukovaného elektrického pole  $E_i$ . [13].

V našem elektrickém poli má napětí mezi body M a N ve vzdálenosti  $l$ , velikost:

$$U = E_i \cdot l. \quad (1.3.8)$$

Velikost tohoto napětí je rovna velikosti elektromotorického napětí  $|U_i|$  indukovaného na uvažovaném úseku přímého vodiče délky  $l$ . Po dosazení (1.3.6) platí pro velikost indukovaného napětí:

$$|U_i| = E_i \cdot l = v \cdot B \cdot l. \quad (1.3.9)$$

Za dobu  $\Delta t$  urazí vodič dráhu  $\Delta x = v \cdot \Delta t$ .

Za dobu  $\Delta t$  opíše vodič plochu  $\Delta S = l \cdot \Delta x$ . (1.3.10)

V našem případě je plocha vymezena plochou opsanou pohybem vodiče.

Velikost indukovaného napětí lze po dosazení (1.3.9) a (1.3.10) vyjádřit ve tvaru:

$$|U_i| = E_i \cdot l = v \cdot B \cdot l = B \cdot l \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{B \cdot \Delta S}{\Delta t}. \quad (1.3.11)$$

Podle vztahu (1.1.2) je součin magnetické indukce a plochy roven magnetickému indukčnímu toku, takže platí:

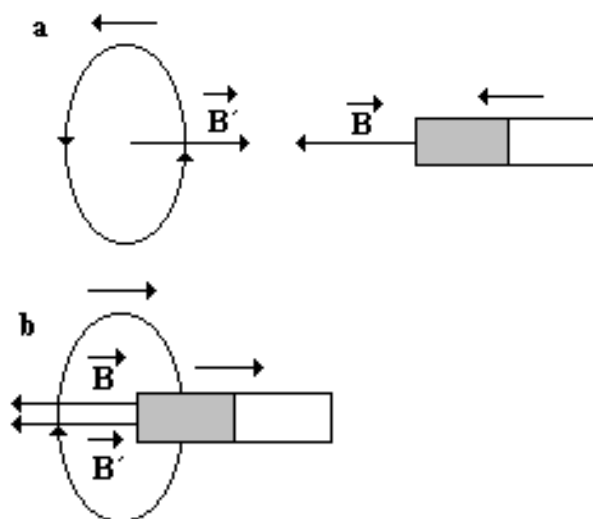
$$|U_i| = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (1.3.12)$$

Je-li  $\Delta \Phi < 0$ , je  $U_i > 0$  a je-li  $\Delta \Phi > 0$ , je  $U_i < 0$ , pak pro indukované napětí platí vztah:

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (1.3.13)$$

Je-li  $\Delta\Phi > 0$  má indukované napětí takovou polaritu, že indukovaný proud vytváří magnetické pole s opačným směrem indukčních čar (viz obr. 5a).

Je-li  $\Delta\Phi < 0$  je směr indukčních čar indukovaného magnetického pole souhlasný se směrem magnetického pole, které indukci vyvolalo (viz obr. 5b). [13]



Obrázek 5a, b: Směr indukčních čar v indukovaném magnetickém poli. [14]

Tento vztah se nazývá **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**: *Indukované elektromotorické napětí je číselně rovno záporně vzaté změně magnetického indukčního toku za časovou jednotku.* [2]

Pokud vodič tvoří uzavřený obvod, pak se při každé časové změně magnetického indukčního toku plochou vymezenou tímto uzavřeným vodičem, indukuje ve vodiči také proud. Směr indukovaného proudu určuje **Lenzův zákon**: *Indukovaný proud má takový směr, že magnetické pole tímto proudem vzbuzené, působí proti změně magnetického pole, která proud indukovala.* [2]



Historická poznámka: -----

**Heinrich Friedrich Emil Lenz** (\*12. února 1804, Derpt, Estonsko - †29. ledna 1865, Řím, Itálie) byl



významný ruský fyzik, baltský Němec. Po studiích teologie, chemie a fyziky se jako fyzik účastnil tříleté expedice plavby Tichým oceánem zaměřené na výzkum klimatických podmínek a měření různých atmosférických jevů. Výsledky jeho měření jsou velkým přínosem v meteorologii. V roce 1831 začal studovat elektromagnetismus. Po Faradayově objevu elektromagnetické indukce objevil řadu dalších zákonitostí. Kvantitativně popsal elektrodynamické jevy, na čem závisí velikost indukovaného napětí a

elektromotorické síly, jaký je směr indukovaného proudu. Jeho závěry jsou známé jako Lenzovo pravidlo. Také popsal magnetickou indukci a navrhl galvanometr. Lenz také nezávisle na Jamesi Prescottu Jouleovi (1818 – 1889) objevil vztah mezi teplem a elektrickým proudem. Zákon o tepelném působení elektrického proudu se nazývá Jouleův-Lenzův. V letech 1836 – 1865 působil na katedře matematiky a fyziky na univerzitě v Sankt Petěrburgu. Upraveno podle [4 s. 124, 15].

-----

### 1.3.2 Vířivé proudy

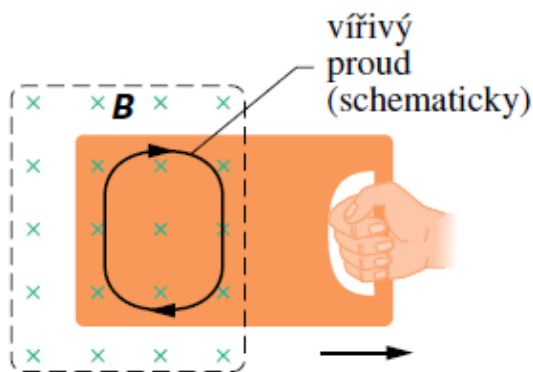
Z výše uvedeného vyplývá, že pro indukované proudy v tenkých lineárních vodičích platí Lenzův zákon. Platí tento zákon i pro indukované proudy v rozměrných a nelineárních vodičích? Touto otázkou se zabýval Jean Bernard León Foucault, který zkoumal vlastnosti indukovaných proudů v rozměrných vodičích tvaru plechů, desek, hranolů a jader transformátorů. Zjistil, že při pohybu takovýchto elektricky vodivých těles v magnetickém poli se v tělesech vytvoří indukované napětí, které indukuje proudy. Směr indukovaných proudů však nelze přesně určit. Vlivem časové změny magnetického indukčního toku se v tělesech indukují vířivé proudy, které v roce 1851 Foucault objevil, a mají na pohybující se vodivé těleso brzdňný účinek. [16 a 17]

Historická poznámka: -----

**Jean Bernard Léon Foucault** (\*18. září 1819, Paříž, Francie - †11. února 1868, Paříž) byl francouzský fyzik, který se zabýval optikou, studiem rotace, sestrojil gyroskop, změřil rychlost světla a popsal vířivé proudy v kovech při elektromagnetické indukci. [18]



Vířivé proudy se nazývají Foucaultovy proudy, působí svými silovými účinky proti pohybu vodiče v magnetickém poli. Na obrázku 6 je znázorněn vířivý proud jako uzavřená křivka, po které se proud pohybuje v záporném smyslu otáčení. [2 s. 806]. Velikost vířivých proudů je závislá na elektrické vodivosti materiálu. V magnetickém poli se nejvíce tlumí pohyb materiálu s nejlepší elektrickou vodivostí. Díky tlumení pohybu mají v praxi vířivé proudy velké uplatnění jako magnetické brzdy.



Obrázek 6: Vznik vířivého proudu. [2 s. 806]

Elektrická vodivost  $\gamma$  materiálu se často vyjadřuje pomocí své převrácené hodnoty – **rezistivity**  $\rho$  (neboli měrný elektrický odpor), která vyjadřuje elektrický odpor vodiče. Rezistivita je závislá na chemickém složení, technologické úpravě materiálu a na teplotě. S rostoucí rezistivitou klesá vodivost látky a roste elektrický odpor vodiče. Hodnoty rezistivity najdeme v matematicko-fyzikálních tabulkách pro různé prvky a slitiny.

Závislost elektrického odporu vodiče na délce  $l$  a průřezu  $S$  vyjadřuje vztah

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (1.3.14)$$

*Historická poznámka:* -----

**Georg Simon Ohm** (\*16. března 1787, Erlang - †7. července 1854, Mnichov) byl významný německý



fyzik. První vzdělání v matematice a fyzice získal od otce, později studoval na univerzitě a v roce 1833 se stal profesorem a později rektorem na norimberské polytechnice. Ohm byl ovlivněn pracemi Alessandra Volty (1777 – 1851), Andrého Maria Ampera (1775 – 1836), Humphryho Davyho (1778 – 1829) a Hansem Christianem Oerstedem (1777 – 1851). Zkoumal souvislosti mezi elektrickým napětím, proudem a odporem. Svě závěry uveřejnil v roce 1826, přijaty vědeckou společností jako Ohmův zákon byly však až kolem

roku 1880. Na Ohmovy výsledky v oboru akustiky navázal Hermann von Helmholtz (1821 – 1894). Od roku 1841 byl členem Královské společnosti v Londýně. Upraveno podle [4 s. 121, 19]. V soustavě SI je jeho jménem označena jednotka elektrického odporu: ohm  $[\Omega] = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$ .

-----

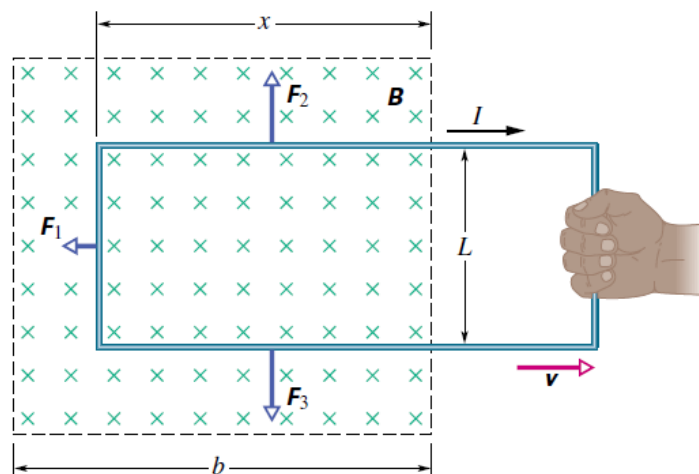
### 1.3.3 Indukce a přenos energie

Při přibližování nebo oddalování tyčového magnetu k cívce se v cívce indukuje napětí. V souladu s Lenzovým zákonem musíme síly indukovaného magnetického pole překonat vykonáním práce. V cívce protéká indukovaný proud.

Vzhledem k tomu, že materiál cívky má určitý elektrický odpor, vzniká v cívce Joulovo teplo. Vnější práci, kterou konáme, se zvyšuje energie magnetického pole uvnitř cívky. Čím rychlejší budou změny magnetického pole v okolí cívky, tím větší je vnější práce vykonaná za jednotku času, tím větší je výkon vnější síly a v cívce se rychleji vytváří Joulovo teplo. [2]

Vznik Joulova tepla nezáleží na způsobu, jakým je proud v cívce indukován. Uvažujme uzavřenou vodivou smyčku, kterou vytahujeme konstantní rychlostí  $v$  z magnetického pole o indukci  $B$ . Při tomto pohybu se ve smyčce indukuje proud  $I$  v záporném smyslu. Na části smyčky, které jsou vloženy v magnetickém

poli, působí magnetické síly  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  (viz obr. 7). [2 s. 804]. Jaká je vynaložená práce při vytahování smyčky a jak se změní vnitřní energie smyčky?



Obrázek 7: Vodivá smyčka při vytahování z magnetického pole. [2 s. 804]

Velikost práce je úměrná výkonu při vytahování smyčky s indukovaným proudem z magnetického pole. Jak jsme již uvedli výše, má vnější síla stejnou velikost ale opačný směr než síla indukovaného pole. Pomocí této síly můžeme vyjádřit výkon jako skalární součin síly a rychlosti podle vztahu

$$P = F \cdot v. \quad (1.3.15)$$

Tento výkon je funkcí velikosti magnetické indukce  $B$ , elektrického odporu  $R$  smyčky a šířky  $l$  smyčky. Při pohybu smyčky doprava se zmenšuje velikost plochy  $S$  smyčky v magnetickém poli, a tím se zároveň zmenšuje magnetický tok  $\Phi$  smyčkou. V souladu s Faradayovým zákonem se ve smyčce indukuje proud. Tento proud vyvolá elektrickou sílu (1.3.1), kterou při vytahování smyčky z magnetického pole překonáváme. Velikost proudu určíme z Faradayova indukčního zákona (1.3.9), kdy velikost magnetického indukčního toku  $\Phi$  je rovna skalárnímu součinu magnetické indukce a plochy (1.1.2).

Dosažením hodnoty napětí z Ohmova zákona do Faradayova zákona dostaneme vztah pro velikost proudu  $I$  [2] :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{B \cdot l \cdot v}{R} \quad (1.3.16)$$

Vyšetříme velikost sil  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ . Jak je patrné z obrázku 7, síly  $F_2$  a  $F_3$  jsou stejně veliké a tedy se vzájemně vyruší. Síla  $F_1$  působí proti vnější síle, kterou táhneme smyčku z magnetického pole. Pokud vytahujeme smyčku rovnoměrně přímočaře, obě síly mají stejnou velikost a jsou opačného směru. Velikost síly určíme z Ampérova zákona [2 s. 757]:

$$\mathbf{F} = I \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{B}). \quad (1.3.17)$$

Vezmeme-li v úvahu, že vektor délky  $\mathbf{l}$  a vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  svírají úhel  $90^\circ$ , lze psát

$$F = F_1 = I \cdot l \cdot B \cdot \sin 90^\circ = I \cdot l \cdot B \quad (1.3.18)$$

Dosazením rovnice (1.3.16) do (1.3.18) dostaneme

$$F = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v}{R}. \quad (1.3.19)$$

Jestliže táhneme smyčku konstantní rychlostí  $v$ , jsou i hodnoty  $B$ ,  $l$  a  $R$  také konstantní.

Dosadíme-li rovnici (1.3.19) do (1.3.15) dostaneme vztah pro velikost výkonu při vytahování smyčky z magnetického pole [2 s. 805]:

$$P = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v^2}{R}. \quad (1.3.20)$$

Nyní si již můžeme odpovědět na otázku, jaká je vynaložená práce při vytahování smyčky a jak se změní vnitřní energie smyčky?

Joulovo teplo je přímo úměrné výkonu při konstantní rychlosti vytahování smyčky z magnetického pole. Ze vztahů pro výkon a Ohmova zákona dostaneme pro výkon rovnici [2 s. 805]

$$P = I^2 \cdot R. \quad (1.3.21)$$

Pro velikost proudu platí rovnice (1.3.16), takže pro tepelný výkon dostaneme vztah:

$$P = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v^2}{R}. \quad (1.3.22)$$

Porovnáním obou rovnic (1.3.20) a (1.3.22) vidíme, že výkon vnější síly při vytahování smyčky z magnetického pole je roven tepelnému výkonu.

Práce vynaložená při vytahování smyčky se projeví nárůstem vnitřní energie smyčky a zvýšením její teploty. V materiálu, který má nenulový elektrický odpor, pohybující se v magnetickém poli, se vyvíjí Joulovo teplo. Tohoto jevu se v praxi využívá při indukčním ohřevu.

### 1.3.4 Indukčnost

Magnetická indukce je vlastnost, ke které dochází v cívce, při zapnutí nebo vypnutí proudu, při zesílení nebo zeslabení proudu a při průchodu časově proměnného proudu. Při průchodu elektrického proudu  $I$  cívkou, vzniká v cívce magnetický indukční tok  $\Phi$ , který je přímo úměrný protékajícímu proudu. Konstanta úměrnosti, která charakterizuje velikost magnetické indukce, se nazývá **vlastní indukčnost** nebo jen **indukčnost** cívky. Indukčnost  $L$  je rovna podílu magnetického indukčního toku procházejícího cívkou a proudu, který tento tok vyvolal. [20]

$$L = \frac{\Phi}{I}. \quad (1.3.23)$$

Jednotkou indukčnosti je henry (H),  $[L] = [\Phi] [I] = \text{Tm}^2 \cdot \text{A}^{-1} = \text{H}$ . [2 s. 810].

Indukčnost závisí na vlastnostech cívky - na jejím tvaru, počtu a rozměru závitů, a na permeabilitě materiálu jádra cívky.

### 1.3.5 Vzájemná indukce

Vzájemná indukce nastává tehdy, když se v blízkosti jedné cívky s protékajícím proudem vyskytuje druhá cívka. Protékající proud  $I$  v první cívce vytváří magnetický tok  $\Phi$ , který může procházet i druhou cívkou. Měníme-li proud, mění se magnetický tok a podle Faradayova zákona dochází ke vzniku indukovaného napětí v druhé

cívce, jejíž magnetické pole zpětně indukuje napětí v první cívce. V obou cívkách tak změnami proudu vzniká indukované elektromotorické napětí. [2 s. 812]

Po dosazení rovnice (1.3.23) do Faradayova zákona (1.3.12) dostaneme vztah pro indukované elektromotorické napětí:

$$U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1.3.24)$$

Směr napětí určíme podle Lenzova zákona. Jeho velikost je úměrná pouze rychlosti změny proudu.

Proud protékající první cívkou je z Ohmova zákona roven podílu napětí a odporu

$$I = \frac{(U_e + U_i)}{R}, \quad (1.3.25)$$

kde  $U_e$  je elektromotorické napětí zdroje a  $U_i$  je indukované napětí na cívce.

Po dosazení rovnice (1.3.24) do rovnice (1.3.25) dostaneme vztah pro proud [21]:

$$I = \frac{U_e}{R} - \frac{L}{R} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (1.3.26)$$

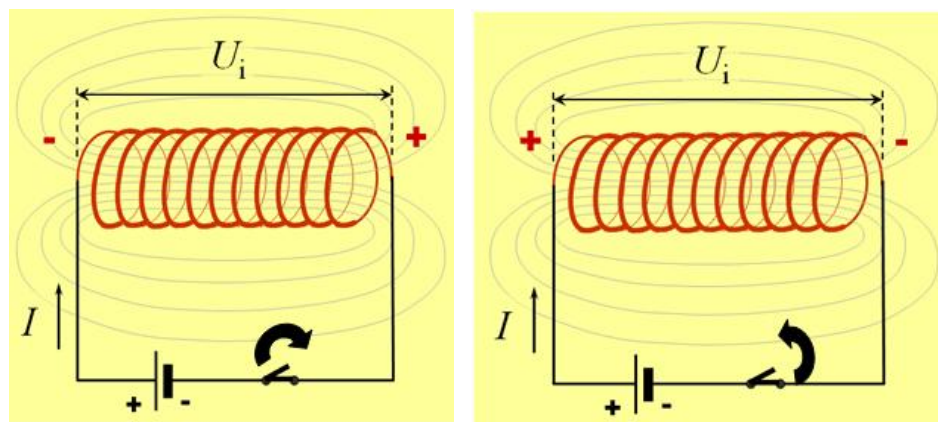
Je-li  $\Delta I > 0$ , je  $U_i < 0$ , a pak je  $U_e + U_i < U_e$ .

Je-li  $\Delta I < 0$ , je  $U_i > 0$ , pak je  $U_e + U_i > U_e$ .

Při růstu nebo klesání proudu  $I$ , bude mít indukované napětí  $U_i$  vždy takový směr, který je proti této změně, a to je v souladu s Lenzovým zákonem.

Při zapnutí obvodu má indukovaný proud opačný směr než proud z připojeného zdroje napětí (viz obr. 8a).

Při vypnutí obvodu má indukovaný proud stejný směr jako proud z připojeného zdroje napětí (viz obr. 8b).



Obrázek 8a, b: Směr indukovaného proudu a polarita napětí při vlastní indukci. [21]

**Vzájemná indukce** je jev, kdy se změnou proudu v primární cívce indukuje v sekundární cívce elektromotorické napětí. Tohoto jevu se v praxi využívá v transformátorech.

### 1.3.6 Indukční ohřev

Princip indukčního ohřevu spočívá v průchodu střídavého elektrického proudu vodičem, který kolem sebe vytváří elektromagnetické pole. Pokud se v dosahu tohoto pole nachází jiný elektricky vodivý materiál, indukuje se v něm napětí. V plošných vodičích, například tvaru desky, vytvoří indukované napětí vířivé proudy, které se uzavírají. Tím vzniká ztrátový výkon, který je zdrojem Joulova tepla.

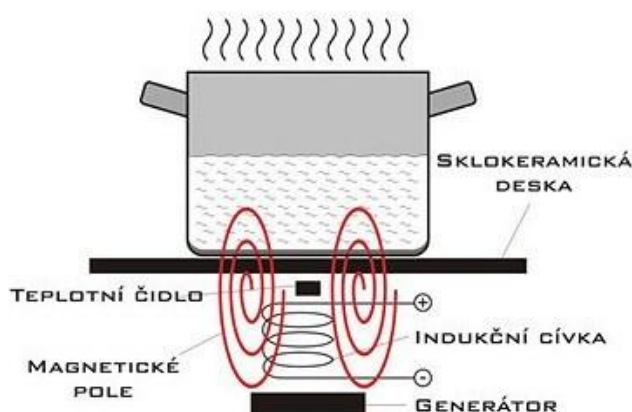
Zahřívání elektricky vodivého materiálu se využívá ke kalení ocele a kovů v indukčních pecích, k vaření na sklokeramických indukčních deskách. Vznikající teplo je však negativním jevem při činnosti transformátorů, kdy snižuje jejich účinnost. K potlačení vířivých proudů se masivní díly jader transformátorů skládají z mnoha tenkých izolovaných vrstev vodivého materiálu, ve kterých vířivé proudy téměř nevznikají. [22]



### 1.3.7 Indukční vaříč

Indukční vaříč pracuje na principu indukčního ohřevu. Pod varnou plochou z elektricky nevodivého materiálu (nejčastěji sklokeramická deska) je umístěna velká plochá cívka z materiálu s malým měrným elektrickým odporem, nejčastěji z mědi. Do cívky je ze síťového zdroje napětí (50 Hz) přiváděn přes měnič napětí vysokofrekvenční střídavý proud (30 kHz). Cívka je zdrojem vysokofrekvenčního střídavého magnetického pole. [23]

V interakci s kovovým dnem nádoby na varné desce se indukují vysokofrekvenční vířivé proudy. Vířivé proudy jsou velmi intenzivní a vlivem vodivého odporu materiálu nádoby se mění na teplo. Tím dochází k rychlému ohřívání dna nádoby. Následnou tepelnou výměnou dochází k ohřevu obsahu nádoby od jejího dna (viz obr. 9).



Obrázek 9: Princip indukčního vaříče. [24]

Z fyzikálního hlediska funguje cívka s nádobou v podstatě jako transformátor. Primární cívka je tvořena mnoha závity a dno nádoby představuje pouze jeden zkratovaný závit (sekundární cívka). Při indukčním ohřevu dochází k transformaci napětí dolů, kdy se mnohonásobně sníží napětí ale mnohonásobně vzroste proud procházející vodivým materiálem nádoby. Vznik intenzivních vířivých proudů má však u tohoto typu transformátoru žádaný účinek. Ztrátové teplo je využito k vlastnímu ohřevu obsahu nádoby. [25]

## 2 Praktická část

Praktická část je koncipována jako metodická podpora nejen pro učitele fyziky na základních a středních školách.

Cílem práce je vytvořit inspirativní materiál, který je v souladu s obsahovou náplní fyziky na základní a střední škole. S ohledem na současný požadavek motivujících a zábavných pokusů, jsme vytvořili soubor několika námětů pro praktickou demonstraci jevu elektromagnetická indukce.

Text obsahuje popis vybraných demonstračních pokusů s pomocí indukčního vařiče a jednoduchých pomůcek (viz níže body 1 – 8) a návod na výrobu demonstrační pomůcky (viz kap. 2.3.8).

- 1) Vaření ve skleněné nádobě
- 2) Vaření v kovové nádobě
- 3) Vaření přes polystyren
- 4) Alobal na indukčním vařiči
- 5) Levitace měděného prstence
- 6) Indukční vařič jako transformátor
- 7) Vířivé proudy
- 8) Indukční vláček

Náměty k vybraným pokusům jsme získali převážně z internetových zdrojů, neboť jsme v žádné dostupné literatuře tyto pokusy nenašli zpracované.

V následujícím textu je kromě podrobného popisu jednotlivých pokusů věnována jedna kapitola stručné teorii elektromagnetické indukce vhodná k doplnění komentářů jednotlivých pokusů. Jedna kapitola je věnována zásadám práce s indukčním vařičem.

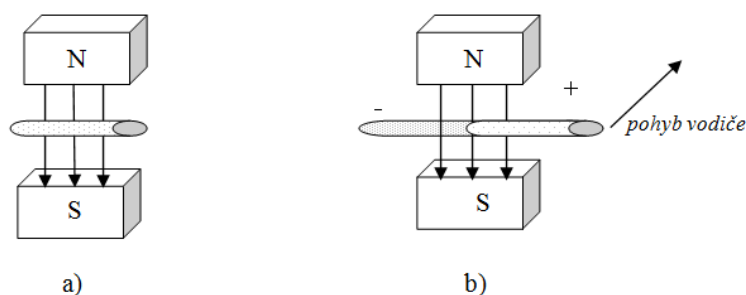
## 2.1 Obecné poznámky z teorie elektromagnetická indukce

Pohybem vodiče v magnetickém poli se ve vodiči indukuje napětí. Na tomto jevu je založen generátor.

V cívice otáčející se v magnetickém poli se indukuje střídavý proud. Na tomto jevu je založen alternátor.

Protékající proud ve vodiči v magnetickém poli způsobí pohyb tohoto vodiče. Na tomto jevu je založen elektromotor.

Odvození zákona elektromagnetické indukce lze vysvětlit na situaci, kdy se vodič pohybuje v magnetickém poli.

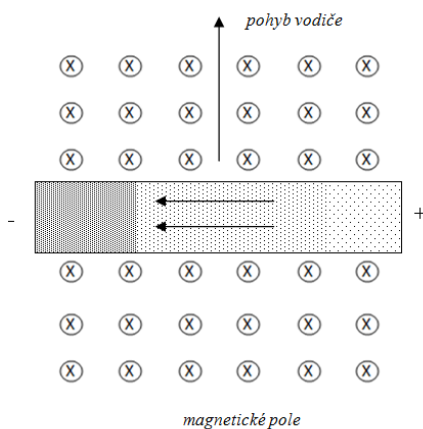


Obrázek 10: Vznik indukovaného proudu: a) vodič je v klidu, b) vodič je v pohybu

Ve vodiči, mezi jehož konci je napětí, se začnou volné elektrony působením vzniklého elektrického pole ve vodiči posouvat a tvoří elektrický proud (viz obr. 10).

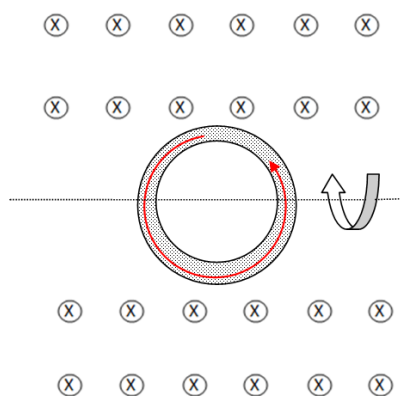
Pohybujeme-li tímto vodičem v přítomnosti magnetického pole, kolmo k magnetickým siločárám, působí magnetické pole na elektrony silou směřující kolmo na směr jejich pohybu a působí rovněž kolmo na magnetické pole. Tato síla uvede elektrony ve vodiči do pohybu proti kladným nábojům, které jsou pevně vázány na atomy. Na jednom konci vodiče dojde k nahromadění elektronů a na druhém konci k nedostatku elektronů. Podél pohybujícího se vodiče kolmo ke směru pohybu a kolmo k magnetickému poli se vytvoří elektrické napětí. Velikost tohoto

napětí kompenzuje silový účinek pole na elektrony (viz obr. 11). Tvoří-li vodič uzavřený obvod, pak po dobu jeho pohybu se udržuje přemísťování elektronů, a obvodem protéká proud – indukovaný proud.



Obrázek 11: Vznik indukovaného proudu v kovovém vodiči

V uzavřené vodivé smyčce, která se jako celek otáčí svou plochou kolem své osy souměrnosti, se elektrony pohybují smyčkou po uzavřené dráze (viz obr. 12). Směr proudu je opačný než směr pohybu elektronů.



Obrázek 12: Vznik indukovaného proudu v uzavřené smyčce

Ze silového zákona o působení magnetického pole na vodič určíme směr indukovaného proudu podle pravidla pravé ruky: *Položíme-li pravou ruku na vodič tak, aby siločáry magnetického pole vstupovaly do dlaně a palec ukazoval směr pohybu vodiče, pak nám prsty ukazují směr indukovaného proudu.* Toto pravidlo je ve shodě s Flemingovým pravidlem levé ruky. Proud, který vzniká pohybem vodiče, má právě opačný směr než proud, kterým byl tento pohyb v magnetickém poli vyvolán. Vznikající proud má tendenci způsobit pohyb v opačném směru. Původní pohyb je vznikajícím proudem brzděn.

Směr elektrického proudu, který je v uzavřené smyčce indukován, určíme podle Lenzova zákona: *Indukovaný proud ve smyčce má takový směr, že magnetické pole vytvořené tímto proudem působí proti změně magnetického pole, která ho vyvolala.*

Z výše popsaného plyne, že pravidlo pravé ruky je pouze speciálním případem obecného Lenzova zákona.

Směr indukovaného proudu ve smyčce je tedy dán Lenzovým zákonem a pravidlem pravé ruky. Protože pravá ruka je zrcadlovým obrazem levé, je Faradayův zákon elektromagnetické indukce obrácením silového zákona o působení magnetického pole na vodič. Indukované napětí má podle Faradayova zákona takovou polaritu, že indukovaný proud vytváří magnetické pole s opačným směrem indukčních čar, pak je Lenzův zákon v jeho formulaci zahrnut ve znaménku mínus.

## **2.2 Zásady práce s indukčním vaříčem**

Indukční vaříč je elektrické zařízení, při jehož používání musíme dodržovat bezpečnostní a provozní zásady. Vždy je nutné respektovat pokyny výrobce v uživatelské příručce.



### **Nebezpečí požáru!**

- Indukční vaříč nastavíme na kovové plochy a plochy pokryté hořlavým materiálem (textil, papír).
- Otvory na dně vaříče ničím nezakrýváme. Kolem vaříče ponecháme dostatek volného prostoru (10 cm), aby bylo zaručeno dostatečné větrání.



### **Nebezpečí úrazu elektrickým proudem!**

- Krypt vaříče a napájecí kabel nesmí být poškozen.
- Na vaříč nebo do ventilačních otvorů nikdy nelijeme vodu.



### **Nebezpečí popálení!**

- Nedotýkáme se plotýnky, na které před tím stála horká nádoba. Po sundání nádoby může být plotýnka stále velmi horká. (Respektujeme teplotní čidlo, které má většina vaříčů, a které světelně signalizuje, kdy je možné se bezpečně dotknout rukou plotýnky.)



### **Nebezpečí působení elektromagnetického pole!**

- Elektromagnetické pole vznikající při činnosti vaříče může ovlivnit elektronické a magnetické přístroje v okruhu 1 m.
- Při demonstračních pokusech nemáme na rukou kovové prstýnky, náramky a řetízky.



### **Nebezpečí poškození indukčního vaříče!**

- Nezahříváme prázdné nádoby.
- Vaříč nevystavujeme nárazům a vibracím.
- Plotýnku nazatěžujeme velkou hmotností. (Respektujeme údaje uvedené výrobcem.)

Obrázek 13: Piktogramy [26]

## 2.3 Popis pokusů

### 2.3.1 Vaření ve skleněné nádobě

Jednoduchým pokusem zjistíme, které nádobí je vhodné k vaření na indukčním vařiči.

#### Pomůcky:

indukční vařič, skleněná nádoba z varného skla, voda



Obrázek 14: Pomůcky - vaření ve skleněné nádobě

#### Příprava:

Na stůl položíme indukční vařič a při dodržení zásad bezpečnosti zasuneme přívodní kabel do zásuvky. Připravíme si skleněnou nádobu z varného skla (hrnec, kádinka, sklenice na zavařování) s malým množstvím vody. [27]

#### Provedení pokusu:

- 1) Skleněnou nádobu s trochou vody postavíme na plotýnku.
- 2) Zapneme vařič.
- 3) Pozorujeme, zda se voda začne vařit.
- 4) Diskutujeme, proč ohřev vody nefunguje.

**Rozbor:**

*Po zapnutí vařiče se ozve zvukový signál ohlašující chybu přístroje. Ohřev vody není možný.*

***Proč vařič nefunguje?***

Sklo je elektricky nevodivá látka, proto není skleněná nádoba vhodná na vaření na indukčním vařiči.

**Závěr:**

K vaření na indukčním vařiči nesmí být používáno nevodivé nádobí.

**Poznámky:**

Pro demonstraci lze použít i nádobu z porcelánu nebo keramiky.

**2.3.2 Vaření v kovové nádobě**

Popis funkce indukčního vařiče a jeho využití k vaření.

**Pomůcky:**

indukční vařič, kovová nádoba ze železa, smaltu, hliníku, mědi, nerezové oceli s rovným nesendvičovým dnem a se sendvičovým dnem, voda



*Obrázek 15: Pomůcky - vaření v kovové nádobě*



### **Příprava:**

Na stůl položíme indukční vařič a při dodržení zásad bezpečnosti zasuneme přívodní kabel do zásuvky. Připravíme si kovové nádoby z různých materiálů s malým množstvím vody. [27]

### **Provedení pokusu:**

- 1) Kovovou nádobu s trochou vody postavíme na plotýnku.
- 2) Zapneme vařič.
- 3) Pozorujeme, zda se voda začne vařit.
- 4) Diskutujeme, zda ohřev vody funguje a proč ohřev vody u některé nádoby nefunguje.

### **Rozbor:**

*Po zapnutí vařiče se po krátké chvíli začne v nádobě ze železa, smaltu a nerezové oceli voda vařit.*

#### ***Proč vařič funguje?***

Kovová nádoba je z elektricky vodivé látky, proto je nádoba vhodná na vaření na indukčním vařiči. Nerezová ocel je slitina, která obsahuje elektricky a tepelně vodivé kovy.

*Pokud je na plotýnce nádoba z mědi, hliníku nebo nerezová nádoba se sendvičovým dnem, ozve se po zapnutí vařiče zvukový signál ohlašující chybu přístroje.*

#### ***Proč vařič nefunguje?***

Hliník a měď jsou velmi dobrými elektrickými a tepelnými vodiči, mají velmi malé měrné elektrické odpory.

Dno hliníkové nádoby má velmi malý měrný elektrický odpor, tzn. velkou měrnou elektrickou vodivost, a pro vařič znamená nebezpečí přetížení. Hliníkové dno a cívka vařiče fungují jako transformátor. Vinutím cívky vařiče by protékal obrovský proud, který by ji zničil. Proto čidlo automaticky odpojí napájení cívky a hlásí chybu. Hliníková nádoba proto není vhodná na vaření na indukčním vařiči.

Nerezová nádoba je poměrně špatně tepelně vodivá (ucha jsou při běžném vaření velmi dlouho chladná), proto je v sendvičovém dně vložen hliníkový díl, který je velmi dobře vodivý a zajistí přenos tepla ode dna nádoby. Vložené hliníkové pláty znamenají pro vařič nebezpečí přetížení. Nerezová nádoba se sendvičovým dnem není určena pro indukční ohřev.

#### **Závěr:**

K vaření na indukčním vařiči musí být používáno nádobí z dobře elektricky vodivé látky.

#### **Poznámky:**

Nádobí z příliš dobře vodivé látky, jako je měď nebo hliník, se nesmí používat. U těchto materiálů by mohlo dojít k přetížení cívky a hrozí nebezpečí poškození vařiče – vařič automaticky odpojí napájení cívky a ohlásí chybu.

### **2.3.3 Vaření přes polystyren**

Pomocí tohoto pokusu vysvětlíme, jakým principem dochází k ohřívání dna nádoby.

#### **Pomůcky:**

indukční vařič, kovová nádoba (ocel, smalt, nerez ocel), voda, deska pěnového polystyrenu



Obrázek 16: Vaření přes polystyren

### **Příprava:**

Na stůl položíme indukční vařič a při dodržení zásad bezpečnosti zasuneme přívodní kabel do zásuvky. Připravíme si kovovou nádobu s malým množstvím vody a polystyrenovou (případně korkovou, dřevěnou) desku vysokou přiměřené velikosti (maximálně 3 cm vysokou a širokou na velikost plotýnky). [27]

### **Provedení pokusu:**

- 1) Na plotýnku položíme polystyrenovou desku přiměřené velikosti.
- 2) Nádobu s trochou vody postavíme na polystyrenovou desku.
- 3) Zapneme vařič.
- 4) Pozorujeme, zda se voda začne vařit.
- 5) Jakmile se začne voda vařit, odstavíme nádobu z plotýnky.
- 6) Rukou se dotkneme plotýnky.
- 7) Diskutujeme, proč se voda uvařila i přes „překážku“ a proč není plotýnka horká.

### **Rozbor:**

*Po zapnutí vařiče se po krátké chvíli začne v nádobě voda vařit.*

### ***Proč se voda uvařila?***

Vzniklé magnetické pole je dostatečně silné, aby prošlo skrz polystyrenovou desku a ve dně nádoby vytvořilo vířivé proudy. Tyto proudy velmi rychle zahřívají dno nádoby a tepelnou výměnou přijímá voda teplo potřebné k varu. Polystyren nepohlcuje nijak významně magnetické pole, je pro něj „dobře průhledný“.

*Plotýnka není po odstavení nádoby horká.*

### ***Proč není plotýnka horká?***

Při indukčním ohřevu nedochází k přenosu tepla tepelnou výměnou mezi vařičem a nádobou. Dno nádoby ohřívají přímo vířivé proudy indukované pouze v materiálu nádoby elektromagnetickou indukcí. V plotýnce se vířivé proudy neindukují, a proto zůstává chladná. Zahřívá se pouze vedením tepla od nádoby.

### **Závěr:**

Nádoba je zahřívána vířivými proudy, které vznikají vlivem rychle se měnícího magnetického pole v jeho okolí.

### **Poznámky:**

Pro demonstraci lze také použít podložku z korku nebo dřeva (tepelně nevodivé materiály).

Při dodržení pravidel bezpečnosti lze demonstrovat i vaření přes ruku! Nádobu na jedné straně nadzvedneme a pod okraj nádoby s vodou položíme na varnou desku dlaň tak, aby prsty směřovaly do středu desky.

Pro demonstraci studené/teplé plotýnky naplníme menší nádobu ze železa do  $\frac{3}{4}$  vodou a vodu na plotýnce přivedeme k varu. Po odstavení nádoby se plotýnky velmi opatrně dotkneme. Pozor na popálení! Plotýnka už může být velmi teplá, protože na

ní po určitou dobu stála nádoba s vařící se vodou. Doba chlazení plotýnky je závislá na měrné tepelné kapacitě materiálu plotýnky, teplotě okolí a počáteční teplotě vody. Pro tento případ má vařič vestavěné kontrolní čidlo, které signalizuje možnost popálení. [23]

### 2.3.4 Alobal na indukčním vařiči

Pomocí alobalu na indukčním vařiči demonstrujeme Lenzův zákon a princip indukčního tavení kovů.

#### Pomůcky:

indukční vařič, archy alobalu, sklenice vody



Obrázek 17: Pomůcky - alobal na indukčním vařiči

#### Příprava:

Na stůl položíme indukční vařič a při dodržení zásad bezpečnosti zasuneme přívodní kabel do zásuvky. Připravíme si hladké archy alobalu. [28]

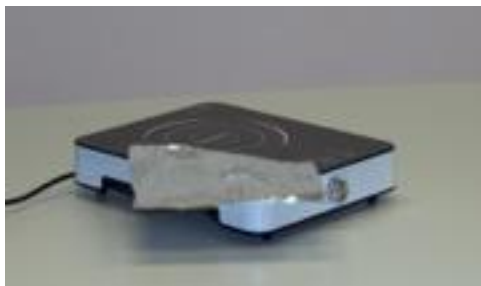
#### Provedení pokusu:

- 1) Na plotýnku položíme arch alobalu přiměřené velikosti.
- 2) Zapneme vařič.
- 3) Pozorujeme, co se s alobalem děje.
- 4) Diskutujeme, proč arch alobalu odskočil.

- 5) Na plotýnku položíme arch alobalu přiměřené velikosti a rukou ho vyhladíme.
- 6) Arch alobalu na okrajích přidržíme palci na plotýnce.
- 7) Pozorujeme tavení alobalu.
- 8) Diskutujeme, proč se alobal začal propalovat.
- 9) Z archu alobalu utvoříme mističku, do které nalijeme trochu vody, a zavřeme ho jako sáček.
- 10) Zapneme vaříč.
- 11) Pozorujeme, co se děje.
- 12) Diskutujeme, proč se vaříč nevypnul, proč se voda uvařila a proč se alobal nepropálil.

### **Rozbor:**

*Arch alobalu po zapnutí vaříče po chvíli z plotýnky odskočí.*



*Obrázek 18: Alobal na indukčním vaříči*

### ***Proč arch alobalu odskočil?***

V alobalu se indukuje proud, který působí proti změně, která ho vyvolala (Lenzův zákon). Soustava cívka – alobal se chová jako transformátor. Proud v primární cívce (cívka vaříče) a v sekundární cívce (alobal) jsou v každém okamžiku opačného směru. Oběma proudy jsou vytvářena dvě magnetická pole, která jsou opačně orientovaná, proto způsobují odpuzování alobalu, který je následně vymrštěn.

*Alobal se začne na různých místech propalovat.*



*Obrázek 19: Propalování alobalu*

### ***Proč se alobal začal propalovat?***

Alobal se rozžhaví postupně na velmi vysokou teplotu až do bílého žáru a začne se tavit. Hliník je velmi dobrý tepelný vodič, vlivem indukčního ohřevu přijímá teplo, které je během chvilky dostačující k jeho roztavení. V průměru je tloušťka alobalu asi 10  $\mu\text{m}$ , teplota tání hliníku je 660  $^{\circ}\text{C}$ .

Pokus demonstruje princip indukční pece. Soustava cívka – alobal se chová jako transformátor, kdy primární cívka má mnoho závitů (cívka vařiče) a sekundární cívka (alobal) má pouze jeden závit. Při pokusu vidíme vysoké tepelné účinky (Joulovo teplo) silného proudu při transformaci dolů. V praxi se tohoto principu používá k tavení kovů i s vysokým bodem tání, kdy se velikost „tavícího“ proudu odvíjí od velikosti primárního proudu, který lze regulovat.

Arch alobalu nesmíme nikdy zatížit prázdnou nádobou. Došlo by k poškození vařiče.

*Po zapnutí vařiče se voda po chvíli v alobalové mističce uvaří.*

### ***Proč se alobal nezačal propalovat a proč se voda uvařila?***

Tímto pokusem můžeme demonstrovat, že pokud budeme alobal chladit, na plotýnce se nepropálí. Teplo, které hliník přijímá, se nejprve spotřebuje na ohřívání vody.

Hliník je velmi dobrý vodič tepla, pozor na popálení! Vzhledem k velmi malé tloušťce alobalu, nehrozí přetížení vařiče.

### **Závěr:**

Indukovaný elektrický proud má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala (Lenzův zákon).

Měníme-li proud procházející primární cívkou, mění se magnetický tok a dochází ke vzniku indukovaného napětí v sekundární cívce.

### **Poznámky:**

Pro demonstraci odskakujícího alobalu můžeme použít malé hliníkové mističky. Chovají se podobně jako list alobalu a pokus je efektní. Při výrobě malé mističky z alobalu dbáme na to, aby dno mističky bylo dokonale rovné a hladké. [28]

## **2.3.5 Levitace kovového kroužku**

Pokus ukáže interakci magnetické síly a indukovaného proudu.

### **Pomůcky:**

indukční vaříč, kroužky měděného drátu, prstenec z alobalu, malá nádoba (plecháček s uchem, plechovka od konzervy), voda

### **Příprava:**

Na stůl položíme indukční vaříč a při dodržení zásad bezpečnosti zasuneme přívodní kabel do zásuvky. Připravíme si kroužky z měděného drátu, který stočíme z drátu o průměru 1 mm a délky 10 cm. Kroužek je nutné spojit instalátorskou svorkou. Připravíme si malý hrneček s trochou vody. Z jednoho archu alobalu si vystříhneme prstenec. Pomocí kružítka si na arch alobalu narýsujeme mezikruží 2 – 3 cm široké tak, aby se prstenec dal volně položit přes nádobu (hrneček). [28]



### Provedení pokusu:

- 1) Z důvodu ochrany vařiče položíme na plotýnku nádobu s trochou vody.
- 2) Přes hrneček položíme na plotýnku měděný kroužek.
- 3) Zapneme vařič.
- 4) Pozorujeme, jak se kroužek začne vznášet.
- 5) Diskutujeme, proč se tak děje.
- 6) Ke vznášejícímu se kroužku přiblížíme ze shora druhý kroužek.
- 7) Diskutujeme, proč se druhý kroužek neoddaluje od prvního kroužku.
- 8) Na plotýnku položíme nádobu s vodou a přes ni vystřížený hliníkový prstenec.
- 9) Zapneme vařič.
- 10) Pozorujeme, co se s prstencem děje.
- 11) Diskutujeme, proč se prstenec vznáší a je zvlněný.

### Rozbor:

*Měděný kroužek se po zapnutí vařiče po chvíli začne vznášet.*



Obrázek 20: Levitace kovového kroužku

### ***Proč měděný kroužek levituje?***

Magnetické síly vzniklé po zapnutí vařiče umožní levitaci kroužku. Soustava vařič – kroužek se chová jako transformátor. Primární cívku s mnoha závity tvoří cívka vařiče a měděný kroužek představuje sekundární cívku s jedním závitem. V sekundární cívce se v každém okamžiku indukuje proud opačného směru, než je směr proudu v cívce primární. Protože se vodiče s proudy opačných směrů odpuzují magnetickou silou, vznáší se kroužek nad plotýnkou (nad primární cívkou). Kroužek se vznáší v takové výšce, kde je tíhová síla rovna magnetické odpudivé síle. Vzdálenost kroužku od plotýnky závisí na velikosti celkového odporu v obvodu sekundární cívky. Čím bude odpor v obvodu větší, tím bude vznášející se kroužek k cívce vařiče blíže. Demonstrujeme odpuzování dvou vodičů s proudy opačného směru (menší odpudivou magnetickou silou).

### ***Proč druhý kroužek nelevituje?***

V obou kroužcích se indukují proudy, které mají stejný směr. Proudů stejného směru se přitahují, proto se druhý kroužek k prvnímu přitahuje. Demonstrujeme přitahování dvou vodičů s proudy stejného směru.

### ***Proč hliníkový prstenec levituje a je zvlněný?***



*Obrázek 21: Levitace prstence z alobalu*

Princip je stejný jako u levitace měděného kroužku. Prstenec z alobalu je velmi lehký. Při levitaci je schopný přizpůsobit se tvaru magnetických indukčních čar, které se tvoří kolem cívky vařiče při průchodu elektrického proudu.

#### **Závěr:**

Indukovaný elektrický proud má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala (Lenzův zákon).

#### **Poznámky:**

Hliník a měď mají malý měrný elektrický odpor, indukované proudy budou velké. Pokud se budeme snažit kroužek stlačit dolů, ucítíme odpor a zahřátí kroužku (tepelné účinky proudu).

Tento pokus demonstruje směr sekundárního proudu v transformátoru a v literatuře se objevuje pod názvem Thompsonův pokus s prstencem. [29]

Na plotýnce je vždy nutná nádoba s vodou, aby nedošlo k poškození vařiče.

Ucho u hrnečku zadrží kroužek v levitační poloze. U nižší nádoby bez ucha by mohl kroužek odskočit stejně jako alobalový arch z plotýnky. U vyšší nádoby bez ucha je levitace kroužků velmi efektní.

Pokus neprovádíme dlouho, kroužek se silně zahřívá. V případě použití izolovaného vodiče, dojde k roztavení izolace. V případě spojení kroužku pájkou, dojde k jejímu roztavení. Teplota tání pájky pro běžné účely je kolem 450 °C. [29 s. 228]

### **2.3.6 Indukční vařič jako transformátor**

Netradičním způsobem demonstrujeme princip transformátoru.

#### **Pomůcky:**

indukční vařič, nádoba s vodou, měděný kroužek s žárovíčkou



Obrázek 22: Pomůcky – indukční vařič jako transformátor

### **Příprava:**

Na stůl položíme indukční vařič a při dodržení zásad bezpečnosti zasuneme přívodní kabel do zásuvky. Připravíme si měděné kroužky se žárovkou. Kroužky zhotovíme z tenkého měděného drátu tak, že je stočíme do tvaru kruhových závitů vhodného počtu závitů přes menší kulatou nádobu a oba konce spojíme se žárovkou. [28]

### **Provedení pokusu:**

- 1) Kroužek se žárovčkou položíme na plotýnku.
- 2) Do středu kroužku položíme nádobu s trochou vody.
- 3) Zapneme vařič.
- 4) Pozorujeme, co se děje se žárovčkou.
- 5) Diskutujeme, proč žárovka svítí.

## **Rozbor:**

*Žárovka začne svítit.*



*Obrázek 23a, b: Rozsvícení žárovky na indukčním vaříči*

### ***Proč žárovka svítí?***

Soustava indukční vaříč – měděný kroužek se chová jako transformátor.

Primární cívku s mnoha závity tvoří cívka vaříče a sekundární cívku s jedním závitem tvoří měděný kroužek. Vlivem změn magnetického pole v primární cívce se indukuje na sekundární cívce napětí, které je dostatečné k rozsvícení žárovky. Indukované napětí je střídavé, ovšem vysoké frekvence (20 – 30 kHz) oproti síťovému napětí o frekvenci 50 Hz.

Kroužek se žárovkou můžeme vysouvat do různé výše nad indukční vaříč, vysunovat a vkládat do magnetického pole.



Obrázek 24: Rozsvícení žárovky na indukčním vařiči

### Závěr:

Indukované elektromotorické napětí vzniká vždy, když se změní magnetický indukční tok, procházející závití sekundární cívky. Indukované napětí roste s počtem závitů cívky.

### Poznámky:

Tento pokus lze demonstrovat i s dalšími žárovkami (viz tab. 1), které spojíme s cívkou s větším počtem závitů. Jednomu závitů cívky o průměru 10 cm odpovídá přibližně indukované napětí 6V. Při práci s cívkou se 40 závitů dbáme opatrnosti, pracujeme s nebezpečným napětím. Nedotýkáme se vodičů bez izolace! [30]

Parametry žárovky	Doporučený počet závitů cívky
6V/0,1 A	1 závit
24 V/100 W	4 závitů
230 V/100 W	40 závitů

Tabulka 1: Doporučené počty závitů cívky

### 2.3.7 Vířivé proudy

Jednoduchými pokusy ukážeme vznik vířivých proudů v kovové nádobě a vzájemnou interakci magnetického pole proudů s magnetickým polem trvalého magnetu.

#### Pomůcky:

užší trubice z mědi nebo hliníku, neodymový magnet (váleček), měkká podložka, hliníková nádoba, skleněná láhev, korková zátka, šicí jehla



Obrázek 25: Pomůcky – vířivé proudy



Obrázek 26: Vířivé proudy

#### Příprava:

Na stůl položíme měkkou podložku (složený ručník). Připravíme si prázdnou skleněnou láhev s úzkým vyšším hrdlem (od vína, moštu, šťávy) s korkovou zátkou, větší šicí jehlu, měděnou nebo hliníkovou trubici širokou cca 3 cm, hliníkovou nádobu a silný neodymový magnet (možno různé velikosti).

### **Provedení pokusu:**

- 1) Z ruky upustíme nad měkkou podložkou magnet svisle dolů. Všimáme si rychlosti, s jakou magnet padá na stůl.
- 2) Trubicí, kterou držíme svisle nad měkkou podložkou, pouštíme shora dolů magnet. Všimáme si rychlosti, s jakou magnet padá trubicí na stůl.
- 3) Diskutujeme, proč je rychlost pádu magnetu trubicí jiná než ve vzduchu.
- 4) Prázdnou skleněnou láhev s úzkým hrdlem pevně uzavřeme korkovou zátkou, do které ve středu zapíchneme dlouhou jehlu. Otočenou hliníkovou nádobu zavěsíme středem na hlavičku jehly.
- 5) Po straně okolo dna nádoby pohybujeme silným magnetem.
- 6) Všimáme si pohybu hliníkové nádoby v souvislosti s pohybujícím se magnetem.
- 7) Diskutujeme, proč se nádobka točí.
- 8) Směr pohybu magnetu okolo nádoby změníme v opačný.
- 9) Pozorujeme téměř okamžité zastavení otáčející se nádoby a roztočení na druhou stranu.
- 10) Diskutujeme, proč se nádoba zastavila a proč se roztočila na opačnou stranu.

### **Rozbor:**

Při pouštění magnetu volně z ruky padá magnet volným pádem se zrychlením. Rychlost pádu magnetu je úměrná tíhovému zrychlení. Magnetka je ve vzduchu minimálně brzděna.

Při pouštění magnetu kovovou trubicí z neferomagnetického materiálu je magnet při svém pohybu trubicí zpomalen. Rychlost zpomalení magnetu je úměrná elektrické vodivosti trubice.



### ***Proč padá magnet měděnou trubicí pomaleji?***

Pád neodymového magnetu trubicí je oproti volnému pádu zpomalený. Měď a hliník nejsou feromagnetické látky, pohyb magnetu tedy nebrzdí přitažlivá magnetická síla. Magnet padající pod vlivem gravitace indukuje v trubici elektrický proud s příslušným magnetickým tokem. Zpomalení pohybu magnetu v trubici způsobuje elektromagnetická indukce. Trubice se chová jako cívka s jedním závitem. Při pohybu magnetu trubicí dolů se mění podél trubice magnetické pole a v cívce (trubicí) se indukuje napětí. Měděná trubice současně tvoří uzavřený obvod, a proto se v ní indukují vířivé proudy, které působí proti změně, která je vyvolala (proti pohybu magnetu dolů působí magnetické pole od vířivých proudů směrem nahoru) silou. Tato síla závisí na elektrické vodivosti trubice a na rychlosti padajícího magnetu. Pohyb magnetu směrem dolů je touto silou brzděn. Tíhová síla působící na magnet je větší než síla, která tlačí magnet vzhůru. Proto magnet propadne trubicí.

*Pohybujeme-li magnetem kolem dna hliníkové nádoby, nádoba se roztočí. Směr otáčení je závislý na směru pohybu magnetu.*

### ***Proč se hliníková nádoba roztočí?***

Hliníková nádoba se chová jako rotor motoru, který se roztáčí pomocí točivého magnetického pole. Pohyb magnetu kolem dna nádoby indukuje vznik vířivých proudů.

### ***Proč se hliníková nádoba zastaví a začne se točit opačným směrem?***

Při změně směru pohybu magnetu se v nádobě indukují vířivé proudy opačného směru než dosud. Pohyb nádoby se tedy začne brzdit a poté se zastaví. Pokud budeme pohybovat magnetem kolem nádoby stále opačným směrem, začne se nádoba roztáčet v tomto směru.

**Závěr:**

V masivních vodičích vznikají změnou magnetického toku vířivé proudy – Foucaultovy proudy. Ty krouží kolmo na směr proměnného magnetického pole.

**Poznámky:**

Jako hliníkovou nádobu lze použít plechovku od nápoje, obal od konzervy, obal od paštiky, obal od čajové svíčky.

Pokud nemáme k dispozici trubici z neferomagnetického materiálu, lze použít dno velkého hrnce nebo plechu na pečení, po kterém pouštíme magnet dolů.

Pokud nemáme k dispozici kovovou trubici, lze také použít papírovou trubici s namotaným potravinářským alobalem. Zpomalení padajícího magnetu je méně výrazné. [32 s. 50]

Pro demonstraci vířivých proudů jsme si vyrobili demonstrační pomůcku. Pomocí ní jsme zároveň experimentálně porovnali hodnoty rezistivity různých materiálů, které jsme porovnali s údaji v tabulkách [33 s. 163].

### 2.3.7.1 Experiment

K demonstraci vířivých proudů v různých materiálech a ke srovnání rezistivity látek jsme užili sadu pěti stejně dlouhých kovových tyčí z různých materiálů a stejných průměrů. Tyče v délce asi 1 m jsou upevněny pomocí závitů v dřevěném rámu 10 cm od sebe. Na tyčích jsou navléknuty kruhové magnetky, vždy stejnou polaritou jedním směrem. V dolní části tyčí je na jejich konci navlečena malá gumová zarážka (gumový kroužek z hadičky) tak, aby při sjíždění magnetky dolů nedošlo k jejímu rozbití.

*Parametry použitých magnetek:*

- prstencový neodymový magnet: NdFeB, materiál N38, poniklovaný
- prsteneček: vnější průměr 20 mm, vnitřní průměr 10 mm, výška 6 mm, hmotnost: 10,2 g
- remanentní magnetizace:  $B_r = 1,22 - 1,25$  T
- koercitivní pole:  $H_c > 899$  kA/m
- Curieova teplota:  $T_c = 310$  °C

(Pozn.: Magnet nesmíme vystavovat teplotám nad  $T_c$ !)



Obrázek 27: Demonstrační pomůcka – sjíždění magnetek po tyči

*Parametry použitých tyčí:*

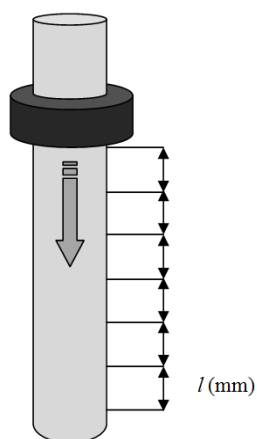
- materiál: měď (Cu – ETP), hliník, mosaz (CuZn40Pb2), bronz (CuSn8), nerez (AISI304)

(Pozn.: Označení Cu-ETP je pro téměř čistou měď 99,9 %. Mosaz CuZn40Pb2 má složení 2 % olova, 40 % zinku a 58 % mědi. Bronz CuSn8 má složení 8 % cínu a 92 % mědi. Označení AISI304 je pro nerez ocel třídy 18/10, ze které jsou vyrobeny např. příbory, označuje složení 18 % chrom a 10 % nikl, zbytek železo)

- průměr: 10 mm, délka: 1 m

Pro demonstraci vířivých proudů posuneme pomocí rovné tyče všechny magnetky nahoru. Oddálením pomocné tyče uvolníme všechny magnetky najednou, které podle vodivosti materiálu sjíždějí různou rychlostí dolů. Magnetky lze pouštět také z ruky jednotlivě.

Pád magnetky je pohyb rovnoměrně zrychlený v tíhovém poli Země tlumený magnetickou silou závislou na rychlosti. K měření pohybu pádu magnetky použijeme tyč, ke které si přiložíme délkové měřidlo a vyznačíme si délkové intervaly (viz obr. 28). Tyč představuje mnoho navinutých závitů cívky, které jsou navzájem spojené sériově. Při pohybu magnetky po tyči měříme čas  $t$ , za který magnetka urazí jednotlivé délkové intervaly  $l$ .



Obrázek 28: Schéma experimentu- sjíždění magnetky po tyči

Vypočítáme rychlost v jednotlivých intervalech:  $v = l/t$  [m/s]. (2.3.1)

Zjistíme dráhu pohybu magnetky potřebnou k ustálení rychlosti  $v_m$  (mezní rychlost), k pohybu s konstantní rychlostí. Ze získaných hodnot sestrojíme graf časové závislosti dráhy padající magnetky. Magnetka dosáhne mezní rychlosti  $v_m$  v okamžiku, kdy se magnetická síla rovná tíhové síle. Další pohyb je pak rovnoměrný přímočarý.

Z hodnoty ustálené rychlosti  $v_m$  a hmotnosti magnetky  $m$  vypočítáme konstantu úměrnosti  $K$ , která přímo úměrně závisí na elektrické vodivosti materiálu tyče.

Během pádu magnetky na tyči zanedbáme odpor vzduchu a také případné tření magnetky o tyč. Na magnetku působí svisle vzhůru odporová síla  $F_o$  a svisle dolů tíhová síla  $G$ . Sestavením pohybové rovnice sil, které působí na magnetku během volného pádu, dostaneme vztah pro určení konstanty  $K$ .

*pohybová rovnice:*  $m \cdot a = G - F_o$

$$m \cdot a = m \cdot g - K \cdot v$$

Při ustáleném pohybu rychlostí  $v_m$  (rovnoměrný přímočarý pohyb) je zrychlení rovno nule ( $a = 0$ ) a tedy platí:

$$m \cdot g = K \cdot v_m \tag{2.3.2}$$

Z pohybové rovnice (2.3.2) je konstanta úměrnosti  $K$  rovna:

$$K = \frac{m \cdot g}{v_m} \tag{2.3.3}$$

## **Rezistivita**

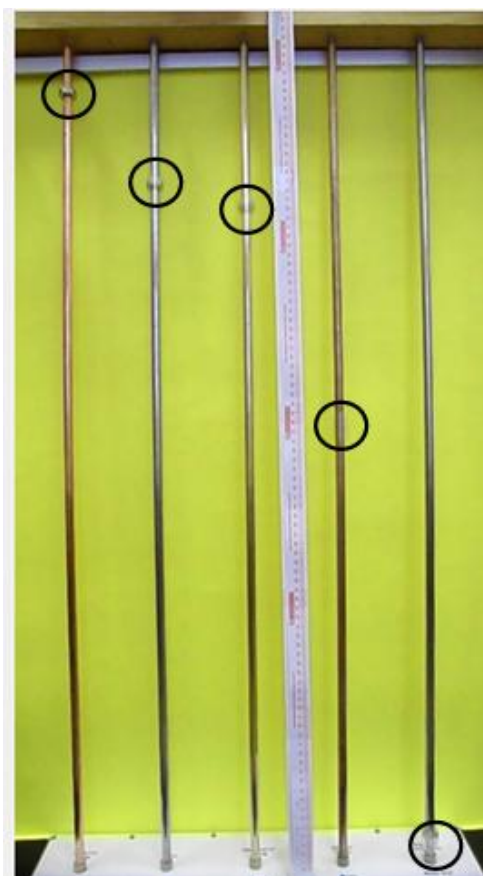
Na velikost vířivých proudů má vliv rezistivita (měrný elektrický odpor). Rezistivita  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] je vlastnost látky charakterizující elektrickou vodivost látky. Vyjadřuje elektrický odpor vodiče o délce 1 m a průřezu 1  $\text{m}^2$ . Je závislá na chemickém složení, technologické úpravě materiálu a na teplotě. S rostoucí rezistivitou  $\rho$  klesá vodivost látky  $\gamma$  (konduktivita) a roste elektrický odpor vodiče.

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \tag{2.3.4}$$

Vzhledem k úměrnosti konstanty  $K$  elektrické vodivosti, lze poměr konstant  $K_1, K_2$  pro různé materiály tyčí vyjádřit pomocí poměru měrných odporů  $\rho_1, \rho_2$ :

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (2.3.5)$$

### Výsledky experimentu



Obrázek 29: Sjíždění magnetek po tyčích

Magnetku pouštíme vždy ze stejné výšky 90 cm od místa dopadu. Změříme čas  $t$  pohybu magnetky po tyči v určitém délkovém intervalu  $l$  tyče.

Ze získaných hodnot vypočítáme rychlost  $v$  podle vztahu (2.3.1) konstantu  $K$  pro dané materiály tyčí podle (2.3.3). Převrácená hodnota konstanty  $K$  je úměrná rezistivitě látky  $\rho$ . Tyto hodnoty vzájemně porovnáme podle vztahu (2.3.5).

Provedeme také vzájemné porovnání rezistivity látek  $\rho$  z tabulkových hodnot [33].

## Ruční měření

Změřili jsme čas pohybu magnetky z výšky 90 cm, 80 cm, ..., 10 cm nad místem dopadu magnetky pro tyč měděnou, hliníkovou a mosaznou.

Měření jsou zatížena chybami při odečtu hodnot, zvláště pak reakční dobou měřitele. Čas jsme měřili mechanickými stopkami s chybou danou reakční dobou  $\vartheta(t) = 0,1$  s. Dráhu pohybu magnetky jsme měřili milimetrovým měřidlem s chybou  $\vartheta(l) = 1$  mm.

*Tabulky hodnot:*

### MĚĎ

$l$ [m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$t$ [s]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
$v$ [m/s]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

*Tabulka 2: Měď I*

### HLINÍK

$l$ [m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$t$ [s]	0,20	0,60	1,00	1,60	1,80	2,20	2,40	2,90	3,20
$v$ [m/s]	0,50	0,33	0,30	0,25	0,28	0,27	0,29	0,28	0,28

*Tabulka 3: Hliník I*

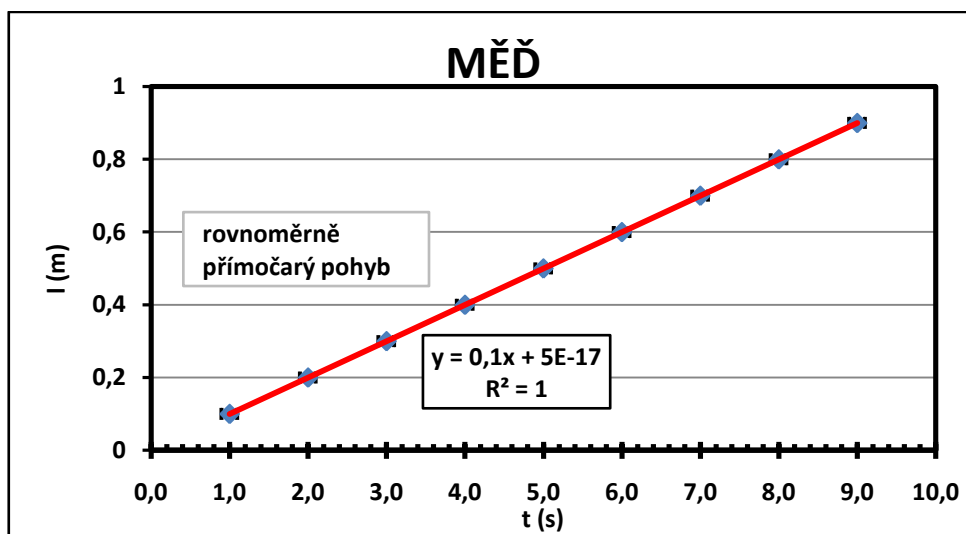
### MOSAZ

$l$ [m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$t$ [s]	-	0,60	0,90	1,30	1,60	1,80	1,90	2,10	2,30
$v$ [m/s]	-	0,33	0,33	0,31	0,31	0,33	0,37	0,38	0,39

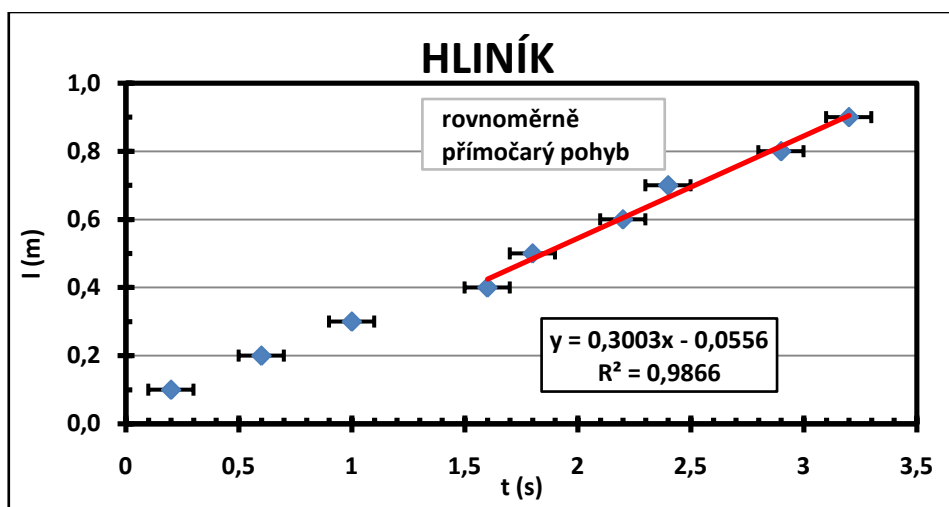
*Tabulka 4: Mosaz I*

(Pozn.: Šedě zvýrazněné údaje již odpovídají rovnoměrnému pohybu magnetky po tyči. Tyto hodnoty jsme použili k proložení grafu přímkou.)

Grafy:

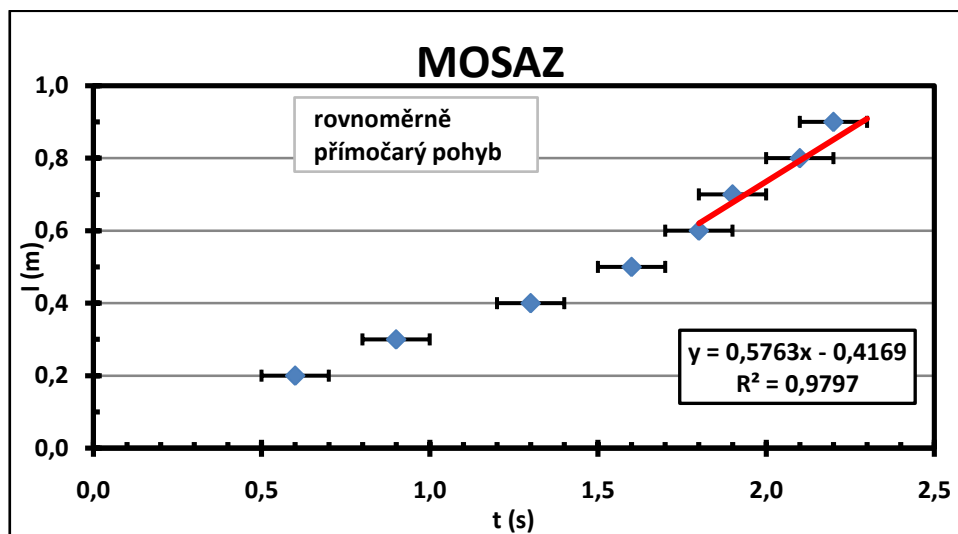


Obrázek 30: Graf dráhy magnetky po měděné tyči



Obrázek 31: Graf dráhy magnetky po hliníkové tyči





Obrázek 32: Graf dráhy magnetky po mosazné tyči

Z rovnice proložení křivky v grafech (viz obr. 30 – 32) jsme zjistili mezní rychlost  $v_m$  při pádu magnetky na tyči. Korelační koeficienty  $R^2$  udávají spolehlivost měření  $v_m$ .

MĚĎ:  $v_m = 0,10$  m/s;  $R^2 = 100$  %

HLINÍK:  $v_m = 0,30$  m/s;  $R^2 = 98$  %

MOSAZ:  $v_m = 0,58$  m/s;  $R^2 = 98$  %

Ze získaných hodnot jsme vypočítali podle vztahu (2.3.3) konstantu  $K$  pro dané materiály tyčí. Její převrácené hodnoty jsme vzájemně porovnali s tabulkovými hodnotami rezistivity látek  $\rho$ . [33]

	$v_m$ [m/s]	$K$ [kgs <sup>-1</sup> ]	$1/K$ [10 <sup>-4</sup> skg <sup>-1</sup> ]	$\rho_{tab}$ [μΩm]
<b>měď</b>	0,10	1001	10	0,0155
<b>hliník</b>	0,30	334	30	0,05
<b>mosaz</b>	0,58	173	58	0,07 - 0,09

Tabulka 5: Mezní rychlosti klouzání magnetky po tyči I

(Pozn.: Pro hliníkovou tyč jsme použili tabulkovou hodnotu rezistivity  $\rho_{tab}$  uvedenou pro dural. Tyč není z čistého hliníku, jedná se o jeho slitinu s procentuálně malou příměsí jiných prvků.)

<b>poměr vodivosti</b>	<b>experimentálně (1/K)</b>	<b>tabulkově <math>\rho_{\text{tab}}</math></b>
<b>hliník : měď</b>	3,00	3,23
<b>mosaz : hliník</b>	1,93	1,40
<b>mosaz : měď</b>	5,80	4,52 - 5,81

Tabulka 6: Mezní rychlosti klouzání magnetky po tyči I

Relativní chyby měření (typicky):

$$\vartheta_r(K) = \vartheta_r(v_m) = 5,5 \%$$

$$\vartheta_r(v_m) = \vartheta_r(l) + \vartheta_r(t)$$

$$\vartheta_r(l) = \frac{\vartheta(l)}{l} = \frac{1 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,005 = 0,5 \%$$

$$\vartheta_r(t) = \frac{\vartheta(t)}{t} = \frac{0,1 \text{ s}}{2 \text{ s}} = 0,05 = 5 \%$$

### Závěr:

Experimentálně jsme změřili rychlost padání magnetky pouze na třech kovových tyčích – měděné, hliníkové a mosazné. Měření času sjíždění magnetky na ostatních tyčích je technicky náročnější. Magnetky po bronzové a nerezové tyči sjížděly velmi rychle. Bronz a nerez jsou látky s poměrně velkou rezistivitou a jejich elektrická vodivost je malá. Při pádu magnetky po tyči dolů se indukují velmi malé vířivé proudy a brzdící síly jsou malé. Hodnoty vodivosti materiálu klesají v pořadí měď – hliník – mosaz. Hodnoty rezistivity v témže pořadí stoupají. To znamená, že s rostoucí rezistivitou klesá vodivost materiálu a roste jeho elektrický odpor.

Převrácené hodnoty konstanty úměrnosti  $K$  jsme porovnali s tabulkovými hodnotami rezistivity  $\rho_{\text{tab}}$  materiálu. Porovnali jsme vzájemné poměry jejich velikostí. Odlišnosti jsou dány tím, že měrná elektrická vodivost látky  $\gamma$  je závislá na její čistotě a chemickém složení. Vzájemný poměr velikostí rezistivity  $\rho$  jsme velmi přesně určili u mosazi a mědi, kdy měď má zhruba 5x menší rezistivitu a 5x větší vodivost než mosaz. Poměry rezistivity ukazují na kvalitativně dobrou shodu s tabulkovými hodnotami.

## Video měření

Zajímalo nás, zda se při přesnějším měření získané hodnoty vodivosti materiálu více přiblíží tabulkovým.

Natočili jsme současný pohyb všech magnetek po tyčích. Videosoubor ve formátu MP4 jsme zpracovali pomocí počítačového programu. Přehrávání videa jsme nastavili na 30 snímků za sekundu. V časových intervalech  $t = 0,033$  s jsme změřili uraženou dráhu  $l$  padající magnetky po tyči měděné, hliníkové a mosazné. Pomocí programu malování Windows jsme na jednotlivých snímcích určili uraženou dráhu  $l$  v pixelech.

Hodnoty dráhy  $l$  v jednotkách pixelů jsme přepočítali pomocí koeficientu, který se rovná součinu příslušné uražené dráhy  $l$  v pixelech a podílu skutečné délky tyče v cm a délky tyče v pixelech. Skutečné délce tyče 92,5 cm, po které magnetky sjížděly, odpovídá 1220 px.

počáteční poloha [px]	[cm]	[px]	koeficient přepočtu [ $10^{-3}$ cm/px]	
<b>měď</b>	1232	92,5	1202	77
<b>hliník</b>	1234	92,5	1204	77
<b>mosaz</b>	1235	92,5	1206	77

Tabulka 7: Přepočet hodnot px na cm

Tabulky hodnot:

MĚŘ

t [s]	$\Delta t$ [s]	x [px]	$\Delta l$ [px]	$\Delta l$ [cm]	v [ $\text{cm s}^{-1}$ ]
14,233	0,00	1232	0	0,00	0,00
14,333	0,10	1219	13	1,03	10,30
14,433	0,20	1205	27	2,11	10,79
14,533	0,30	1196	36	2,80	6,95
14,633	0,40	1185	47	3,65	8,44
14,733	0,50	1171	61	4,72	10,75
14,833	0,60	1160	72	5,57	8,49

14,933	0,70	1146	86	6,65	10,75
15,033	0,80	1133	99	7,65	10,00
15,133	0,90	1118	114	8,80	11,56
15,233	1,00	1105	127	9,80	9,99
15,333	1,10	1094	138	10,65	8,46
15,433	1,20	1079	153	11,80	11,52
15,533	1,30	1065	167	12,88	10,82
15,633	1,40	1052	180	13,88	9,97
15,733	1,50	1039	193	14,88	10,02
15,833	1,60	1026	206	15,88	9,99
15,933	1,70	1013	219	16,88	10,03
16,033	1,80	1000	232	17,88	9,99
16,133	1,90	986	246	18,96	10,75
16,233	2,00	974	258	19,88	9,24
16,333	2,10	958	274	21,11	12,31
16,433	2,20	947	285	21,96	8,47
16,533	2,30	933	299	23,04	10,76
16,633	2,40	919	313	24,11	10,76
16,733	2,50	906	326	25,12	10,03
16,833	2,60	893	339	26,12	10,00
16,933	2,70	879	353	27,19	10,76
17,033	2,80	866	366	28,19	9,99
17,133	2,90	852	380	29,27	10,79
17,233	3,00	838	394	30,34	10,75
17,333	3,10	824	408	31,42	10,78
17,433	3,20	812	420	32,35	9,24
17,466	3,23	805	427	32,88	16,34
18,033	3,80	728	504	38,81	10,45
19,033	4,80	591	641	49,35	10,54
20,033	5,80	455	777	59,81	10,46
21,033	6,80	320	912	70,19	10,38
22,033	7,80	192	1040	80,04	9,85
23,033	8,80	77	1155	88,89	8,84
23,466	9,23	30	1202	92,50	8,35

*Tabulka 8: Měď II*

(Pozn.: Uraženou dráhu  $l$  padající magnetky po měděné tyči jsme do tabulky ke konci uvedli v delších časových intervalech vzhledem k již ustálené rychlosti padání magnetky.)

# HLINÍK

t [s]	$\Delta t$ [s]	x [px]	$\Delta l$ [px]	$\Delta l$ [cm]	v [cms <sup>-1</sup> ]
14,233	0,00	1234	0	0,00	0,00
14,333	0,10	1217	17	1,29	12,91
14,433	0,20	1180	54	4,13	28,41
14,533	0,30	1143	91	6,97	28,41
14,633	0,40	1108	126	9,66	26,87
14,733	0,50	1071	163	12,50	28,41
14,833	0,60	1035	199	15,26	27,64
14,933	0,70	1002	232	17,80	25,34
15,033	0,80	967	267	20,49	26,88
15,133	0,90	932	302	23,17	26,87
15,233	1,00	898	336	25,78	26,11
15,333	1,10	860	374	28,70	29,18
15,433	1,20	822	412	31,62	29,18
15,533	1,30	784	450	34,54	29,18
15,633	1,40	742	492	37,76	32,24
15,733	1,50	706	528	40,52	27,64
15,833	1,60	665	569	43,67	31,47
15,933	1,70	626	608	46,67	29,94
16,033	1,80	587	647	49,66	29,94
16,133	1,90	545	689	52,88	32,25
16,233	2,00	505	729	55,96	30,71
16,333	2,10	465	769	59,03	30,71
16,433	2,20	424	810	62,17	31,48
16,533	2,30	383	851	65,32	31,48
16,633	2,40	343	891	68,39	30,71
16,733	2,50	305	929	71,31	29,18
16,833	2,60	262	972	74,61	33,01
16,933	2,70	222	1012	77,68	30,71
17,033	2,80	186	1048	80,47	27,88
17,133	2,90	147	1087	83,44	29,72
17,233	3,00	112	1122	86,13	26,86
17,333	3,10	79	1155	88,66	25,33
17,433	3,20	37	1197	91,89	32,25
17,466	3,23	29	1205	92,50	18,60

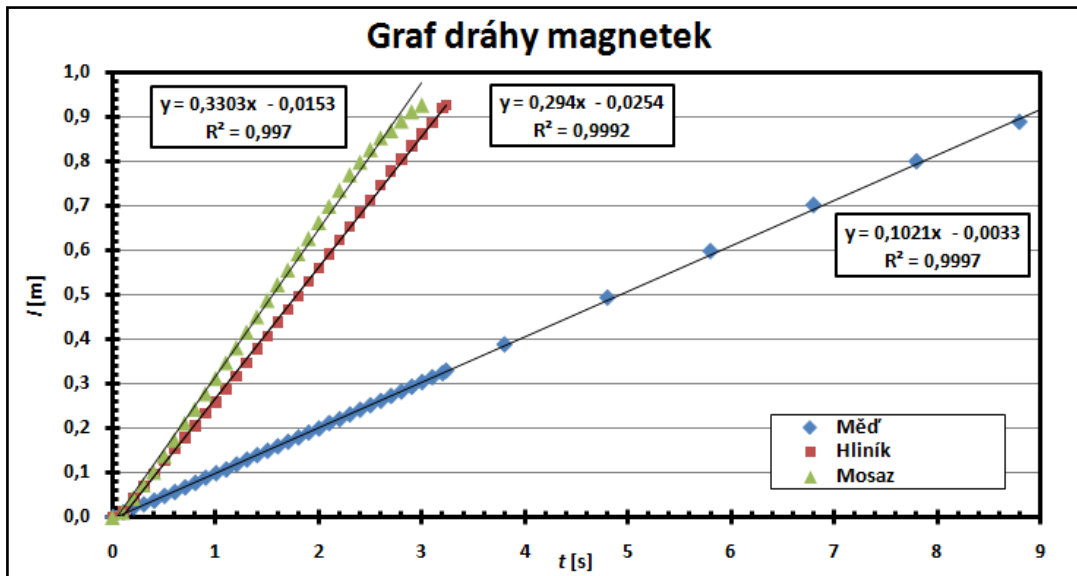
Tabulka 9: Hliník II

MOSAZ

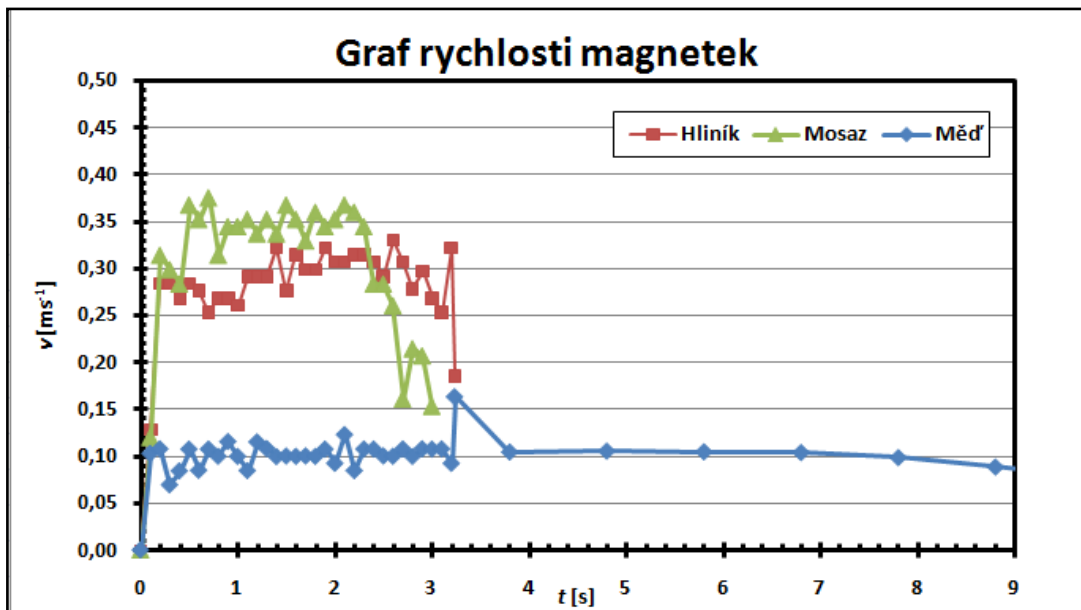
<b>t</b> [s]	<b>Δt</b> [s]	<b>x</b> [px]	<b>Δl</b> [px]	<b>Δl</b> [cm]	<b>v</b> [cms <sup>-1</sup> ]
14,233	0,00	1235	0	0,00	0,00
14,333	0,10	1219	16	1,20	12,02
14,433	0,20	1178	57	4,35	31,45
14,533	0,30	1139	96	7,34	29,91
14,633	0,40	1102	133	10,18	28,38
14,733	0,50	1054	181	13,86	36,82
14,833	0,60	1008	227	17,39	35,28
14,933	0,70	959	276	21,14	37,58
15,033	0,80	918	317	24,29	31,45
15,133	0,90	873	362	27,74	34,51
15,233	1,00	828	407	31,19	34,51
15,333	1,10	782	453	34,72	35,28
15,433	1,20	738	497	38,10	33,75
15,533	1,30	692	543	41,62	35,28
15,633	1,40	648	587	45,00	33,75
15,733	1,50	600	635	48,68	36,81
15,833	1,60	554	681	52,21	35,28
15,933	1,70	511	724	55,51	32,98
16,033	1,80	464	771	59,11	36,05
16,133	1,90	419	816	62,56	34,52
16,233	2,00	373	862	66,09	35,28
16,333	2,10	325	910	69,77	36,82
16,433	2,20	278	957	73,38	36,05
16,533	2,30	233	1002	76,83	34,51
16,633	2,40	196	1039	79,67	28,38
16,733	2,50	159	1076	82,50	28,38
16,833	2,60	125	1110	85,11	26,08
16,933	2,70	104	1131	86,72	16,11
17,033	2,80	76	1159	88,87	21,48
17,133	2,90	49	1186	90,94	20,71
17,233	3,00	29	1206	92,48	15,34

*Tabulka 10: Mosaz II*

Grafy:



Obrázek 33: Graf dráhy magnetek



Obrázek 34: Graf rychlosti magnetek

Z rovnice proložení křivky v grafu (viz obr. 33) dráhy magnetek jsme zjistili mezní rychlost  $v_m$  při sjíždění magnetky po tyči. Korelační koeficienty  $R^2$  udávají spolehlivost měření  $v_m$ .

$$\text{MĚĎ: } v_m = 0,10 \text{ m/s; } R^2 = 99,99 \%$$

$$\text{HLINÍK: } v_m = 0,29 \text{ m/s; } R^2 = 99,92 \%$$

$$\text{MOSAZ: } v_m = 0,33 \text{ m/s; } R^2 = 99,97 \%$$

Ze získaných hodnot jsme vypočítali podle vztahu (2.3.3) konstantu  $K$  pro dané materiály tyčí. Její převrácené hodnoty jsme vzájemně porovnali s tabulkovými hodnotami rezistivity látek  $\rho_{\text{tab}}$ . [33]

	$v_m$ [m/s]	$K$ [kgs <sup>-1</sup> ]	$1/K$ [10 <sup>-4</sup> skg <sup>-1</sup> ]	$\rho_{\text{tab}}$ [μΩm]
<b>měď</b>	0,102	980	10	0,0155
<b>hliník</b>	0,294	345	29	0,05
<b>mosaz</b>	0,330	303	33	0,07 – 0,09

Tabulka 11: Rezistivita materiálu II

(Pozn.: Pro hliníkovou tyč jsme použili hodnotu rezistivity  $\rho_{\text{tab}}$  uvedenou pro dural. Tyč není z čistého hliníku, jedná se o jeho slitinu s procentuálně malou příměsí jiných prvků.)

<b>poměr vodivosti</b>	<b>experimentálně (1/K)</b>	<b>tabulkově <math>\rho_{\text{tab}}</math></b>
<b>hliník : měď</b>	2,84	3,23
<b>mosaz : hliník</b>	1,14	1,40
<b>mosaz : měď</b>	3,23	4,52 - 5,81

Tabulka 12: Mezní rychlosti klouzání magnetky po tyči II

Relativní chyby měření (typicky):

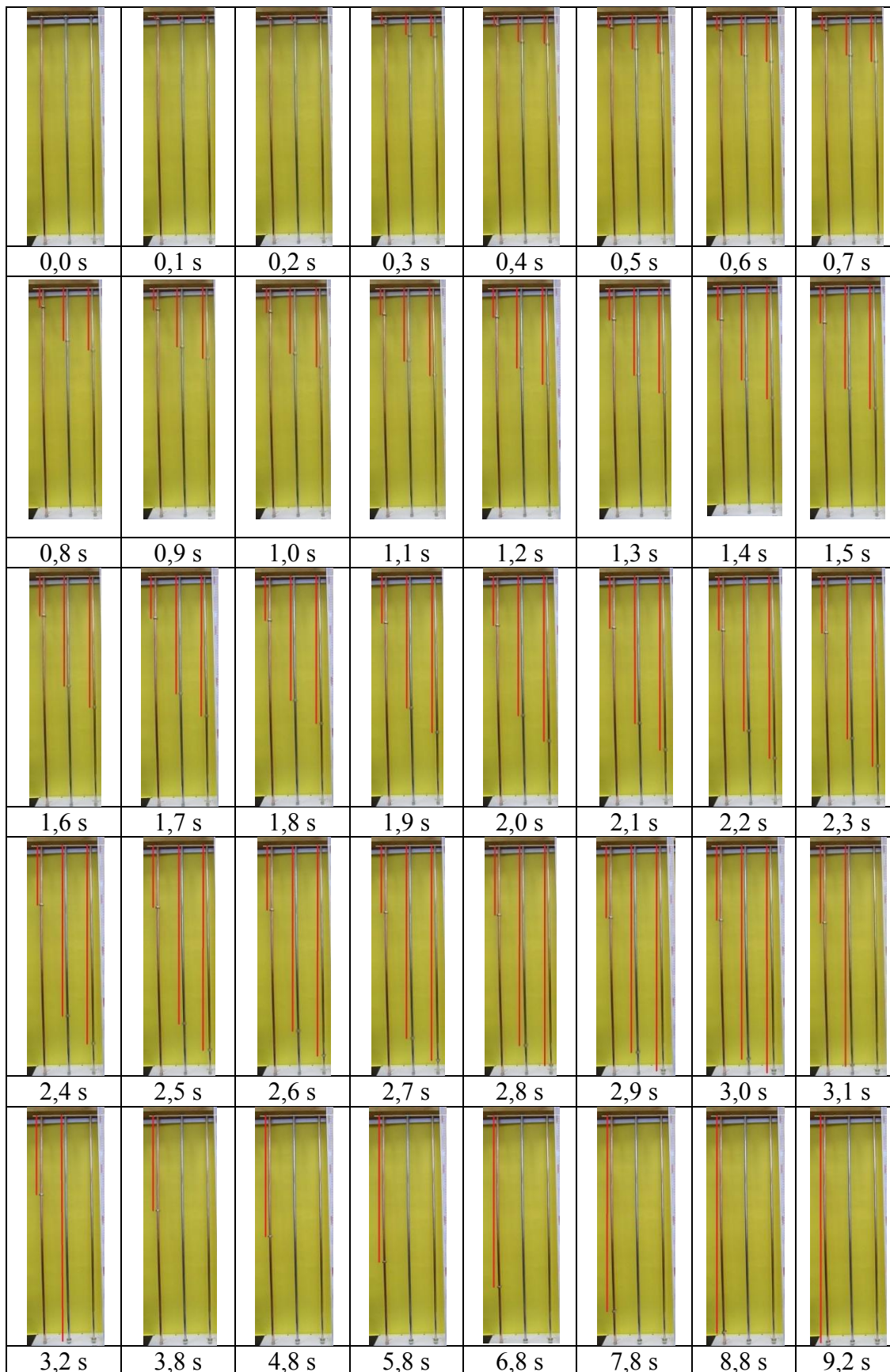
$$\vartheta_r(K) = \vartheta_r(v_m) = 2,15 \%$$

$$\vartheta_r(v_m) = \vartheta_r(l) + \vartheta_r(t)$$

$$\vartheta_r(l) = \frac{\vartheta(l)}{l} = \frac{1 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,005 = 0,5 \%$$

$$\vartheta_r(t) = \frac{\vartheta(t)}{t} = \frac{0,033 \text{ s}}{2 \text{ s}} = 0,0165 = 1,65 \%$$





Obrázek 35: Videosekvence pohybu magnetek v časových intervalech

## Závěr

Pomocí videosekvencí (viz obr. 35) jsme experimentálně zjistili mezní rychlost sjíždění magnetky na měděné, hliníkové a mosazné tyči. Magnetky nejprve zrychlují až do mezní rychlosti  $v_m$ , dále se pohybují rovnoměrně přímočaře. Při ustálené rychlosti  $v_m$  jsou magnetky brzděny vířivými proudy, které jsou tím větší, čím je větší vodivost materiálu. Hodnoty rychlosti  $v_m$  materiálu rostou v pořadí měď – hliník – mosaz. To odpovídá hodnotám vodivosti materiálu, které klesají v pořadí měď – hliník – mosaz. Měď má nejvyšší vodivost a proto po tyči magnetka sjížděla nejpomaleji.

Porovnáme-li poměry konstanty  $K$  a ustálených mezních rychlostí  $v_m$  při sjíždění magnetek po tyčích, dostaneme stejné výsledky. Měď má zhruba 3x větší vodivost než hliník a rychlost sjíždění magnetky po měděné tyči je zhruba 3x menší než po hliníkové tyči. Měď má zhruba 4x větší vodivost než mosaz a rychlost sjíždění magnetky po měděné tyči je zhruba 4x menší než po mosazné tyči.

Poměry konstanty úměrnosti  $K$  pro různé tyče jsme porovnali s poměry tabulkových hodnot rezistivity  $\rho_{\text{tab}}$  materiálu. Vzájemný poměr velikostí rezistivity  $\rho_{\text{tab}}$  jsme velmi přesně určili u mosazi a hliníku, kdy měď má zhruba 1,4x menší rezistivitu a 1,4x větší vodivost než mosaz. U ostatních materiálů jsme se přiblížili. Malé odchylky hodnot mohou být způsobeny třením vznikající při pohybu magnetek po tyčích, které jsme zanedbali.

## Poznámky:

Experiment s ručním měřením lze zařadit pro žáky základní školy. Vzhledem k technické náročnosti zpracování údajů, je experiment s videoměřením vhodné zařadit spíše pro žáky střední školy. Tento experiment zároveň velmi dobře demonstruje pohyb rovnoměrný přímočarý, který je těžce realizovatelný. Začátek pohybu padající magnetky je pohyb přímočarý rovnoměrně zrychlený s proměnným zrychlením, po ustálení mezní rychlosti se již jedná o pohyb rovnoměrný přímočarý.

### 2.3.8 Indukční vláček

Pomocí měděné spirály a tužkové baterie ukážeme, že elektromagnetické pole je původcem silového působení.

#### Pomůcky:

měděný drát nenalakovaný (průměr 0,7 – 1 mm), neodymové magnety (2 ks), tužková baterie (AAA)



Obrázek 36: Pomůcky – indukční vláček

#### Příprava:

Z měděného nelakovaného drátu si stočíme přes pevnou trubku spirálu se závity vedenými stále stejným směrem. Tužková baterie musí být kvalitní s velkou kapacitou. [34]

#### Provedení pokusu:

- 1) Měděnou spirálu položíme na rovnou podložku.
- 2) Na konce tužkové baterie přiložíme po jednom magnetu vždy stejným pólem směrem k baterii.
- 3) Magnety musí držet svým středem u baterie pevně.
- 4) Takto připravený vláček vložíme do spirály a lehce postrčíme.
- 5) Všimáme si pohybu baterie.
- 6) Magnety u baterie otočíme stejnou polaritou směrem od baterie a pokus opakujeme.
- 7) Všimáme si pohybu baterie.
- 8) Diskutujeme, proč se baterie pohybuje.

## **Rozbor:**

Baterie nám představuje malý vláček, který jezdí tunelem ze spirály.



*Obrázek 37: Indukční vláček*

### ***Jaký pohon vláček využívá?***

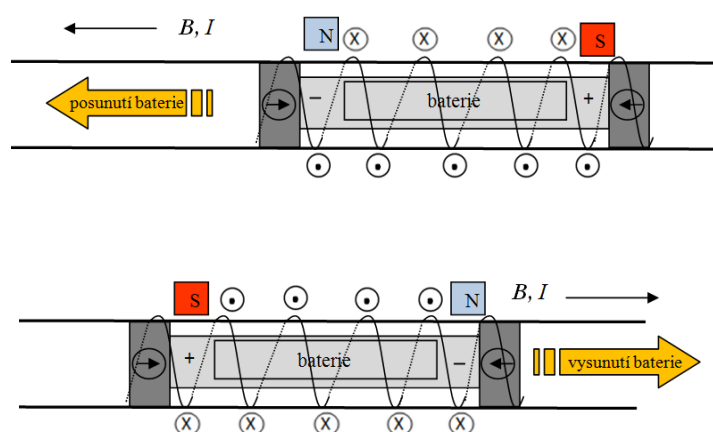
Měděný drát stočený do spirály tvoří cívku se závity. Každá cívka, kterou protéká proud, se chová jako magnet. Uvnitř cívky vzniká homogenní magnetické pole. V okolí cívky je magnetické pole velmi slabé.

Vložíme-li do spirály baterii s magnety tak, je v okolí magnetů uvnitř cívky magnetické pole. Vlivem tohoto magnetického pole dochází k pohybu nosičů elektrického náboje. Baterie do cívky pouští proud, který teče nejkratší možnou cestou, tedy přes poniklovaný povrch magnetu rovnou do cívky, přes její závity a magnetem na druhém konci zpět do baterie.

Částí cívky mezi magnety prochází proud. Cívka se zmagnetizuje a vytvoří se na ní vlastní magnetické póly. Dochází ke vzájemné interakci dvou magnetických polí. Opačné magnetické póly se přitahují, proto na jednom konci baterie cívka magnet přitahuje – vtahuje vláček do spirály. Shodné magnetické póly se odpuzují, proto na druhém konci baterie cívka magnet odpuzuje – vysunuje vláček ze spirály. Celý vláček se posune o jeden závit dopředu. Toto se opakuje dále po každém závitě po celé délce spirály.

Vložíme-li baterii s magnety do spirály takovou polaritou, že směr protékajícího proudu  $I$  a směr vektoru magnetické indukce  $B$  je do spirály, dojde k posouvání vláčku dovnitř spirálou (viz obr. 38a).

Vložíme-li baterii s magnety do spirály opačně, takovou polaritou, že směr protékajícího proudu  $I$  a směr vektoru magnetické indukce  $B$  je ze spirály, dojde k vysunutí vláčku ven ze spirály (viz obr. 38b).



Obrázek 38a, b: Schéma indukčního vláčku

### Závěr:

Indukce elektrického proudu vyvolá síly, které mají pohybový účinek.

Elektromagnetické pole je původcem silového působení. Může také přenášet energii. Má schopnost vykonávat práci.

### Poznámky:

Spirálu si lze připravit v libovolné délce.

Po vložení vláčku můžeme spirálu uzavřít konci k sobě. Vláček bude jezdit dokola. Musíme dát pozor na to, aby byly závity točeny jedním směrem.

Uzavřenou spirálu lze místy vypodložit a překřížit do osmičky.

### 2.3.9 Demonstrační pomůcka elektromagnetické indukce

#### Obvod s LED diodami

Interaktivní formou demonstrujeme elektromagnetickou indukci pomocí obvodu s LED diodami.

Pro demonstraci elektromagnetické indukce pohybem magnetu v cívce jsme si vyrobili vlastní pomůcku. Změřit velikost indukovaného napětí je běžným voltmetrem nesnadné, proto jsme pro jeho indikaci zvolili obvod se svítivými diodami.



*Obrázek 39: Pomůcka k demonstraci indukovaného napětí*

### **Pomůcky:**

cívka (1 000 závitů), neodymový magnet (válec), LED dioda červené a zelené barvy, držák LED, PVC trubka (vnitřní průměr 12 mm - dle použitého magnetu a velikosti dutiny cívky), dřevěný hranol (1000 mm x 20 mm x 80 mm), vruty, příchytka na trubku (o průměru velikosti cívky), nástěnný držák, menší dřevěná krabička bez víčka, lepidlo, tenká překližka, dřevěná laťka

### *Parametry magnetu:*

- válcový neodymový magnet poniklovaný, materiál N38
- výška: 40 mm
- průměr: 10 mm
- hmotnost: 24 g

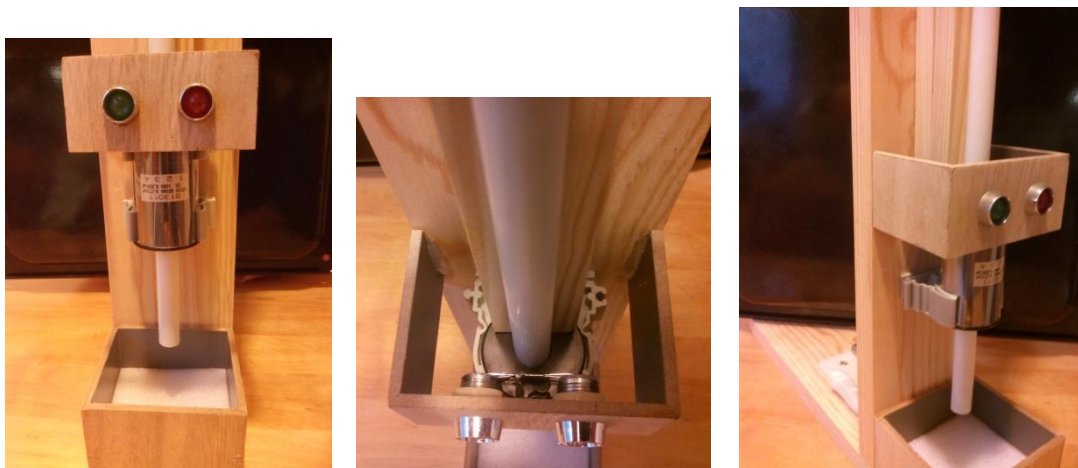
### *Parametry LED:*

- LED červená: Ø 10 mm; 20 mA; 1,9 V
- LED zelená: Ø 10 mm; 20 mA; 3,2 V

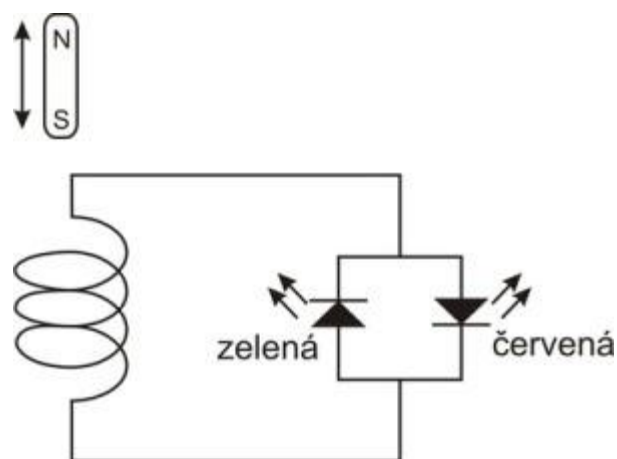
### **Příprava – návod na výrobu pomůcky:**

- 1) Dřevěnou lať si rozřízneme na dva díly tak, aby menší díl tvořil základnu pro stojan na cívku.
- 2) Oba díly latí přiložíme k sobě do tvaru obráceného T a sešroubujeme.
- 3) Na zadní stranu stojanu přišroubujeme pro zpevnění kovový držák tvaru L.
- 4) Na podstavu na přední stranu stojanu přilepíme menší krabičku, která bude sloužit pro dopad magnetu. Dno krabičky vyplníme vatou.
- 5) Ve vhodné výšce nad krabičkou přivrtáme držáky na uchycení cívky. Cívku přichytíme jejími vývody směrem nahoru.
- 6) Přes tělo cívky přilepíme nebo přivrtáme dřevěný pás (tvar U), ve kterém je nutné vyvrtat dva otvory pro LED diody.

- 7) Do otvorů ukotvíme pomocí reflektorů LED diody a antiparalelně spájíme s vývody cívky.
- 8) Dutinou cívky prostrčíme PVC trubku. Její délku přizpůsobíme stojanu. Místo mezi ní a stojanem je nutné vypořadžit dřevěnou laťkou, kterou ke stojanu přivrtáme nebo přilepíme. Je nutné, aby PVC trubka byla kolmá k vodorovné podložce. Trubku přilepíme ke svislé podložce lepidlem.



Obrázek 40a - c: Demonstrační pomůcka

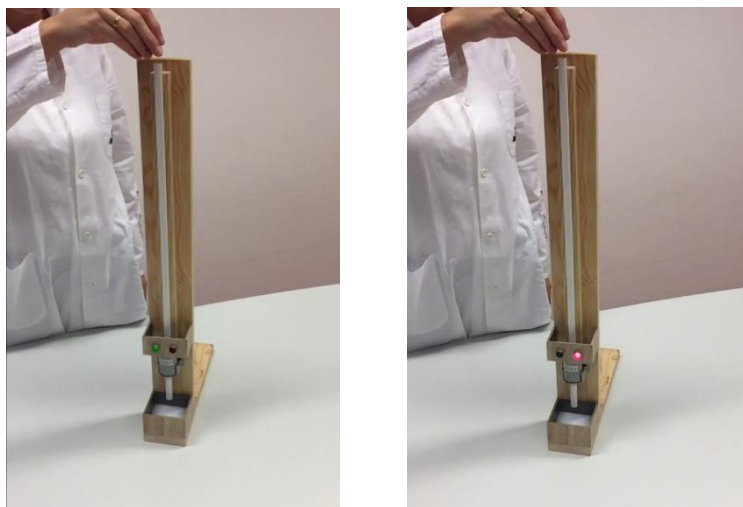


Obrázek 41: Schéma obvodu s LED diodami [35]



### Provedení pokusu:

- 1) Použijeme demonstrační pomůcku (viz obr. 39).
- 2) Pouštíme trubkou magnet jedním pólem do cívky.
- 3) Pozorujeme rozsvěcování LED diod.
- 4) Pouštíme trubkou magnet opačným pólem do cívky (viz obr. 42).
- 5) Pozorujeme rozsvěcování LED diod.
- 6) Diskutujeme, jak se LED diody rozsvěčují.



Obrázek 42: Vhazování magnetu do cívky

### Rozbor:

#### *Proč LED diody svítí?*

Vzájemným pohybem permanentního magnetu vůči cívce, při jeho zasouvání nebo vysouvání, vzniká na svorkách cívky indukované elektromotorické napětí. Indukované napětí je zdrojem elektrického proudu, který prochází obvodem. LED dioda svítí pouze tehdy, je-li v obvodu zapojena v propustném směru. Magnetické pole tyčového magnetu je nehomogenní, proto se při jeho pohybu vůči cívce mění směr a velikost magnetické indukce, tím vzniká indukované elektromotorické napětí. Při vysunutí magnetu z cívky protéká obvodem proud opačným směrem než při zasunutí magnetu do cívky. Protože jsou LED diody zapojeny opačnou polaritou, rozsvítí se vždy pouze ta LED dioda, kterou prochází proud v propustném směru.

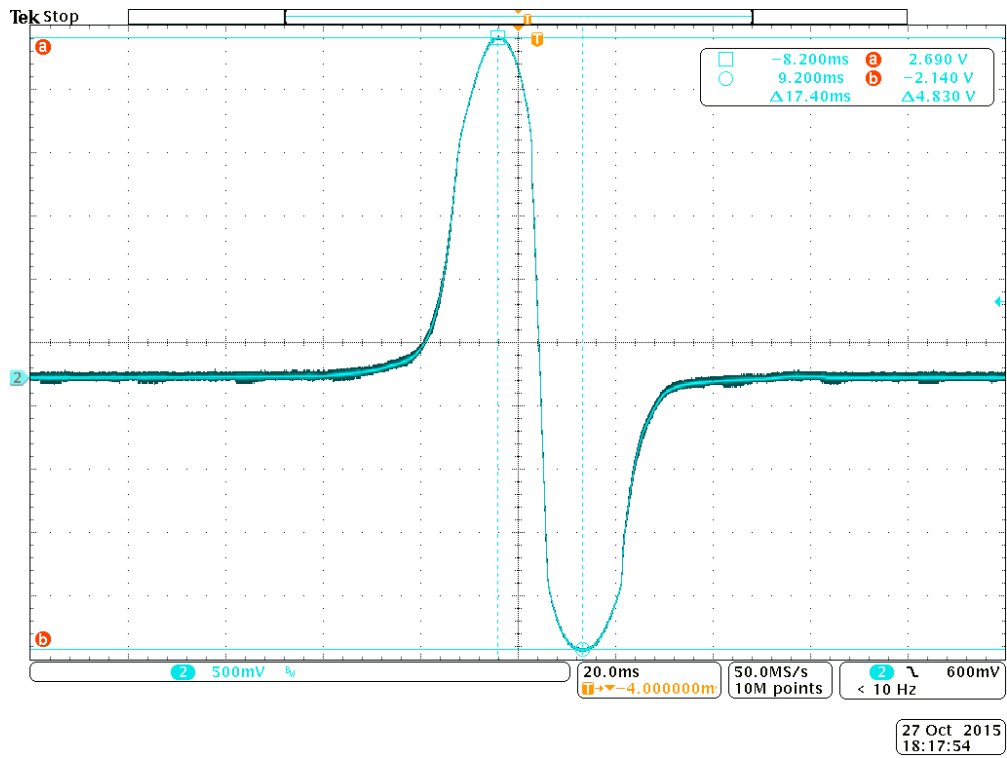
**Závěr:**

Demonstrujeme vznik indukovaného napětí, které vzniká pouze při změně vzájemné polohy magnetu a cívky.

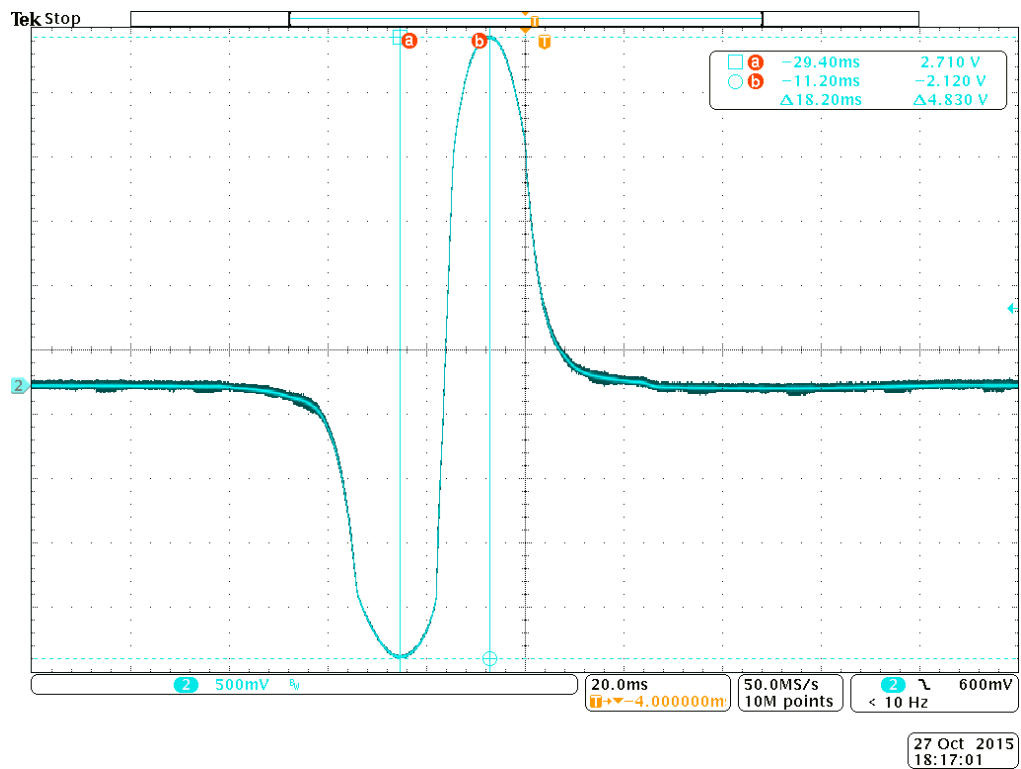
**Poznámky:**

Změnou magnetického pole vzniká indukované napětí na svorkách cívky. Při spojení svorek cívky se spotřebičem/měřicím přístrojem začne obvodem protékat proud. Platí, čím větší napětí, tím větší indukovaný proud. Také platí Ohmův zákon. Je-li odpor celého obvodu (cívky a LED diody) velký, může být indukovaný proud slabý, i když vznikne na cívce velké indukované napětí (použijeme cívku s velkým počtem závitů). Čím větší počet závitů cívka má, tím má větší vlastní odpor. [35]

Experimentálně jsme na osciloskopu naměřili hodnoty indukovaného napětí na svorkách cívky při antiparalelním zapojení LED diod. Provedli jsme dva pokusy, kdy jsme pouštěli magnet do cívky daným pólem směrem nahoru a podruhé daným pólem směrem dolů. Vynesli jsme grafy časové závislosti indukovaného napětí při volném pádu magnetu cívkou.



Obrázek 43: Graf indukovaného napětí na cívce při volném pádu magnetu



Obrázek 44: Graf indukovaného napětí na cívce při volném pádu magnetu s opačnou polaritou

Volný pád magnetu dutinou krátké cívky je pohyb přímočarý rovnoměrně zrychlený s tíhovým zrychlením  $g$ . Rychlost pohybu magnetu při zasouvání do cívky je menší než rychlost pohybu při vysouvání z cívky. Při zasouvání magnetu do cívky roste magnetický indukční tok cívkou a při vysouvání magnetu z cívky magnetický indukční tok klesá. Z grafů (viz obr. 43 a 44) je patrné, že indukované napětí při vstupu magnetu do cívky a při výstupu magnetu z cívky má opačnou orientaci. Změna při poklesu magnetického indukčního toku je opačná než při jeho růstu. Kladné napětí se indukuje kratší čas s větší výchylkou. [36]

Hodnoty indukovaného napětí odpovídají parametrům LED diod. Nižší absolutní hodnota napětí odpovídá červené LED diodě, vyšší absolutní hodnota napětí odpovídá zelené LED diodě.

Při pádu magnetu cívkou se v prvním případě při zasunutí do cívky rozsvítila zelená LED dioda, při vysunutí magnetu z cívky se rozsvítila červená LED dioda.

Ve druhém případě se nejprve rozsvítila červená LED dioda, po té zelená LED dioda. Postupné rozsvícení LED diod je okem těžce rozeznatelné. Napěťové pulsy následují po sobě v intervalu jen asi 18 ms (viz obr. 41 a 42). Při použití vysokorychlostní kamery lze však postupné rozsvěcování LED diod zachytit.

# Závěr

Jev elektromagnetická indukce je teoreticky obtížně vysvětlitelný. Cílem práce bylo popsat a vysvětlit teorii elektromagnetické indukce, vytvořit soubor několika praktických námětů k demonstraci jevu a navrhnout novou demonstrační pomůcku.

V teoretické části jsou popsány a vysvětleny základní pojmy a vztahy k elektromagnetické indukci. Text je doplněn obrázky a historickými poznámkami o významných fyzicích v oblasti elektromagnetismu.

Závislost elektromagnetické indukce na změně magnetického pole velmi dobře prokazují experimenty. Tomuto je věnována druhá část, která je praktická. Jednotlivé kapitoly se věnují popisu a realizaci osmi netradičních demonstračních pokusů a popisu výroby didaktické pomůcky na demonstraci elektromagnetické indukce.

S pomocí indukčního vařiče jsme realizovali demonstrační pokusy vaření ve skleněné a kovové nádobě, vaření přes polystyren, alobal na indukčním vařiči, levitaci měděného prstence a indukční vařič jako transformátor. S pomocí jednoduchých pomůcek jsme realizovali pokus k demonstraci vířivých proudů a indukční vláček.

Navrhli jsme novou didaktickou pomůcku k demonstraci elektromagnetické indukce. Pomocí ní jsme provedli také měření hodnot indukovaného napětí na cívce a získali grafy časové závislosti indukovaného napětí při volném pádu magnetu dutinou krátké cívky. Grafy lze použít k názornému prokázání teoretických souvislostí mezi účinky magnetického pole a směrem indukovaného proudu.

Součástí práce je také popis dvou experimentálních měření. Kvalitativně jsme ověřili závislost vířivých proudů na elektrické vodivosti / rezistivitě materiálu. Z měření pohybu prstencových magnetek po kovových tyčích jsme získali hodnoty ustálené rychlosti magnetek  $v_m$  a konstanty tlumení  $K$ . Poměr konstant tlumení  $K$  pro různé materiály tyčí jsme srovnali s poměry tabulkových hodnot rezistivit  $\rho_{\text{tab}}$  pro stejné materiály. Hodnoty poměrů kvalitativně odpovídají použitým materiálům kovových

tyčí. Ustálený pohyb magnetek po kovových tyčích s mezní rychlostí  $v_m$  rovněž dobře demonstruje pohyb rovnoměrný přímočarý, který je jinak obtížně realizovatelný.

Přínosem nejen pro učitele je didaktický materiál uvedený v příloze, kde jsou námi realizované pokusy formou přehledných metodických listů zjednodušeně popsány. U každého metodického listu je uveden odkaz na kapitolu věnovanou danému pokusu.

Téma práce jsme splnili podle stanovených cílů. Praktické náměty pro realizaci experimentů prokazující elektromagnetickou indukci lze zařadit do hodin fyziky na základních a středních školách. Vzhledem k požadavkům na vyšší technické, počítačové a časové možnosti lze zpracované experimenty s pohybem magnetky po kovové tyči zařadit spíše do výuky na střední a vyšší škole.

# Seznam použitých zdrojů

- [1] LEPIL, O., ŠEDIVÝ, P. *Fyzika pro gymnázia. Elektřina a magnetismus*. Dotisk 5. vydání. Praha, 2013. ISBN 978-80-7196-385-1.
- [2] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 3, Elektřina a magnetismus*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Wilhelm Eduard Weber*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Eduard\\_Weber](https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Eduard_Weber)
- [4] KRAUS, I. *Fyzikové ve službách průmyslové revoluce*. Praha: Academia, 2012. ISBN 978-80-200-2087-1.
- [5] KOPAL, A., aj. *Fyzika II: Elektřina, magnetismus, Maxwellovy rovnice*. Liberec: Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-7372-311-8.
- [6] Elektrizátor.cz. *Galerie slavných. Michael Faraday* [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: [http://www.elektrizator.cz/slavni/slavni\\_faraday.htm](http://www.elektrizator.cz/slavni/slavni_faraday.htm)
- [7] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Michael Faraday*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)
- [8] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Hans Christian Ørsted*. [online]. [cit. 2015-10-28]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Hans\\_Christian\\_%C3%98rsted](https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Christian_%C3%98rsted)
- [9] VEČEŘOVÁ, A. *Elektromagnetická indukce v učivu středoškolské fyziky*. Olomouc, 2014. Diplomová práce. Univerzita Palackého.
- [10] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Flemingovo pravidlo levé ruky*. [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/ManoLaplace.svg/337px-ManoLaplace.svg.png>

- [11] Canov.jergym.cz. *Sir John Ambrose Fleming*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/objevite/objev4/fle.htm>
- [12] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *John Ambrose Fleming*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Ambrose\\_Fleming](https://en.wikipedia.org/wiki/John_Ambrose_Fleming)
- [13] Fyzikalniolympiada.cz. *Elektromagnetická indukce* [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>
- [14] Fyzika.jreichl.com. *Encyklopedie fyziky* [online]. Indukovaný proud. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/306-indukovany-proud>
- [15] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Heinrich Lenz*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Lenz](https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Lenz)
- [16] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Vířivý proud*. [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%AD%C5%99iv%C3%BD\\_proud](https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%AD%C5%99iv%C3%BD_proud)
- [17] Fyzsem.fjfi.cvut.cz. *Vířivé (Foucaultovy proudy)* [online]. PEKAŘ, J., aj. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2006-2007/Leto07/proc/virivepr.pdf>
- [18] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Léon Foucault*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on\\_Foucault](https://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Foucault)
- [19] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Georg Ohm*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Georg\\_Ohm](https://en.wikipedia.org/wiki/Georg_Ohm)



- [20] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Indukčnost*. [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dnost>
- [21] PAČLÍK, M. Gyza.cz. *Vlastní indukce* [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: <http://gyza.cz/storepage?page=paclik>
- [22] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Indukční ohřev*. [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dn%C3%AD\\_oh%C5%99ev](https://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dn%C3%AD_oh%C5%99ev)
- [23] Fyzmatikpise.cz. *Indukční ohřev* [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/826-indukcni-ohrev.html>
- [24] Eluc.cz. *Indukční generátor* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/807>
- [25] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Indukční vaříč*. [online]. [cit. 2015-07-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dn%C3%AD\\_va%C5%99i%C4%8D](https://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dn%C3%AD_va%C5%99i%C4%8D)
- [26] Safetyshop.cz. *Výstražné tabulky*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [http://www.safetyshop.cz/c3\\_2-vystrazne-tabulky](http://www.safetyshop.cz/c3_2-vystrazne-tabulky)
- [27] *Fyzika s indukčním vaříčem*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <http://kmdsosag.wikifoundry.com/page/Fyzika+s+induk%C4%8Dn%C3%A4Dm+va%C5%99i%C4%8Dem>
- [28] Kmdsosag.wikifoundry.com. *Pokusy s indukčním vaříčem*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [http://kdf.mff.cuni.cz/~zilavy/clanky/Pokusy\\_s\\_indukcnim\\_varicem.pdf](http://kdf.mff.cuni.cz/~zilavy/clanky/Pokusy_s_indukcnim_varicem.pdf)
- [29] KUŠNEROVÁ, M. *Školní pokusy ve fyzice*. Ostrava: Ostravská univerzita, 1994. ISBN 80-7042-717-5.

- [30] ŽILAVÝ, P. *Tajemství indukčního vaříče*. Veletrh nápadů učitelů fyziky 13. Plzeň, 2008, ISBN9 78-80-7043-728-5.
- [31] Fyzmatikpise.cz. *Magnet padající měděnou trůbkou*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/1262-magnet-padajici-medenou-trubkou.html>
- [32] POLÁK, Z. *Hrátky s magnetismem*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2014/01-leden/hratky\\_magnet\\_net.pdf](http://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2014/01-leden/hratky_magnet_net.pdf)
- [33] MIKULČÁK, J. a kol. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Prometheus, 1988. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [34] Badatelna. 17. díl. *Jak funguje magnetický vláček?* [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=NOX6op7Li4>
- [35] Fyzik.9e.cz. *Elektromagnetická indukce*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <http://fyzik.9e.cz/tag/indukce/>
- [36] Ucebnice.krynicky.cz. *Elektromagnetická indukce*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: [http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/4\\_Elektřina\\_a\\_magnetismus/5\\_Magnetické\\_pole/4508\\_Elektromagnetická\\_indukce.pdf](http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/4_Elektřina_a_magnetismus/5_Magnetické_pole/4508_Elektromagnetická_indukce.pdf)
- [37] LIU TAO ET AL in PHYS. EDUC. Vol. 27. Num. 1. Year 1992. Str. 36 – 38. *Using LEDs to demonstrate induced current*.
- [38] MARK DIXON in PHYS. EDUC. Vol. 40. Num. 2. Year 2005. *Datalogger demonstrates electromagnetic induction* [online]. Str. 125 – 126.
- [39] ŽILAVÝ, P. *Indukční vaříč*. [online]. [cit. 2015-10-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qqc5ZtprWq0>

# Přílohy

Metodické listy k pokusům

**Název pokusu: VAŘENÍ VE SKLENĚNÉ NÁDOBĚ**

(kap. 2.3.1, str. 38)

**Pomůcky:** indukční vaříč, skleněná nádoba z varného skla, voda

**Popis činnosti:**

1. Skleněnou nádobu s trochou vody postavíme na plotýnku.
2. Zapneme vaříč.

**Komentář:**

1. Po zapnutí vaříče se ozve zvukový signál ohlašující chybu přístroje.

***Proč vaříč nefunguje?***

Sklo je magneticky a elektricky nevodivá látka, proto není skleněná nádoba vhodná na vaření na indukčním vaříči.

**Závěr:**

K vaření na indukčním vaříči nesmí být používáno nevodivé nádobí.

**Poznámky:**

Pro demonstraci lze použít i nádobu z porcelánu nebo keramiky.

**Název pokusu: VAŘENÍ V KOVOVÉ NÁDOBĚ**

(kap. 2.3.2, str. 39)

**Pomůcky:** indukční vaříč, kovová nádoba ze železa, smaltu, hliníku, mědi, nerezové oceli s rovným nesendvičovým dnem, voda

**Popis činnosti:**

1. Kovovou nádobu s trochou vody postavíme na plotýnku.
2. Zapneme vaříč.

**Komentář:**

1. Po zapnutí vaříče se po krátké chvíli začne v nádobě ze železa, smaltu, oceli voda vařit.

***Proč vaříč funguje?***

Kovová nádoba je z elektricky vodivé látky, proto je nádoba vhodná na vaření na indukčním vaříči.

2. Po zapnutí vaříče s hliníkovým nebo měděným hrncem se ozve zvukový signál ohlašující chybu přístroje.

***Proč vaříč nefunguje?***

Hliník a měď jsou mnohem lépe vodivé než železo (smalt) nebo nerez ocel. To vede k indukci mnohem větších vířivých proudů a hrozí přetížení (spálení) cívky v indukčním vaříči. Čidlo automaticky hlásí chybu, proto není nádoba z hliníku a mědi vhodná na vaření na indukčním vaříči.

**Závěr:**

K vaření na indukčním vaříči musí být používáno nádobí z elektricky dobře vodivého materiálu, ale zase ne příliš dobře vodivého jako je hliník a měď.

**Poznámky:**

Nádoba z neferomagnetické nerezové oceli se sendvičovým dnem není k indukčnímu vaření vhodná. Nerezová nádoba je slabě tepelně vodivá, proto je v sendvičovém dně vložen hliníkový díl, který je velmi dobře vodivý. Velmi dobrá elektrická vodivost

hliníkového dílu vede však na velké vířivé proudy a představuje nebezpečí přetížení pro cívku vařiče.

*Elektromagnetická indukce*

**Název pokusu: VAŘENÍ PŘES POLYSTYREN**

(kap. 2.3.3, str. 41)

**Pomůcky:** indukční vaříč, nádoba z vodivé látky, voda, deska pěnového polystyrenu (cca 1 cm vysokou)

**Popis činnosti:**

1. Na plotýnku položíme polystyrenovou desku přiměřené velikosti.
2. Nádobu s trochou vody postavíme na polystyrenovou desku.
3. Zapneme vaříč.
4. Jakmile se začne voda vařit, odstavíme nádobu z plotýnky.
5. Rukou se dotkneme plotýnky.

**Komentář:**

1. Po zapnutí vaříče se po krátké chvíli začne v nádobě voda vařit.
2. Plotýnka je po odstavení nádoby chladná.

***Proč se voda uvařila?***

Vzniklé magnetické pole je dostatečně velké, aby magnetické proudy prošly skrz polystyrenovou desku a ve dně nádoby vytvořily vířivé proudy. Tyto proudy velmi rychle zahřívají dno nádoby a tepelnou výměnou přijímá voda teplo potřebné k varu.

***Proč je plotýnka chladná?***

1. Při indukčním ohřevu nedochází k přenosu tepla tepelnou výměnou. Dno nádoby ohřívají přímo vířivé proudy indukované v materiálu nádoby elektromagnetickou indukcí.

**Závěr:**

Nádoba je zahřívána vířivými proudy, které vznikají vlivem rychle se měnícího magnetického pole v jeho okolí.

**Poznámky:**

- a) Při demonstraci vaření vody přes polystyren může dojít teplem k deformaci polystyrenu.
- b) Pro demonstraci lze použít podložku z korku nebo dřeva.

- c) Při dodržení pravidel bezpečnost lze demonstrovat i přes ruku! Nádoby na jedné straně nadzvedneme a pod okraj nádoby s vodou položíme na varnou desku dlaň tak, aby prsty směřovaly do středu desky.
- d) Pro demonstraci teplé plotýnky naplníme menší nádobu ze železa do  $\frac{3}{4}$  vodou a vodu na plotýnce přivedeme k varu. Po odstavení nádoby se plotýnky velmi opatrně dotkneme. Pozor na popálení! Ploténka už může být velmi teplá, protože na ní po určitou dobu stála nádoba s vařící se vodou. Doba chlazení plotýnky je závislá na měrné tepelné kapacitě materiálu plotýnky, teplotě okolí a počáteční teplotě vody. Pro tento případ má vařič vestavěné kontrolní čidlo, které signalizuje možnost popálení.



**Název pokusu: ALOBAL NA INDUKČNÍM VAŘIČI**

(kap. 2.3.4, str. 44)

**Pomůcky:** indukční vaříč, arch alobalu, voda

**Popis činnosti:**

1. Na plotýnku položíme arch alobalu přiměřené velikosti.
2. Zapneme vaříč.
3. Na plotýnku položíme arch alobalu přiměřené velikosti a rukou ho vyhladíme.
4. Zapneme vaříč a současně arch alobalu na okrajích přidržujeme na plotýnce.

**Komentář:**

1. Alobal po chvíli z ploténky odskočí.
2. Alobal se začne propalovat.

***Proč arch alobalu odskočil?***

V alobalu se indukuje proud, který vytvoří magnetické pole a působí proti změně, která ho vyvolala (Lenzův zákon). Magnetické pole vaříče a alobalu se navzájem odpuzují.

***Proč se alobal začal propalovat?***

Alobal se rozžhaví postupně na velmi vysokou teplotu až do bílého žáru a začne se tavit. Hliník je velmi dobrý tepelný vodič, vlivem indukčního ohřevu přijímá teplo, které je během chvilky dostačující k jeho roztavení. V průměru je tloušťka alobalu asi 10  $\mu\text{m}$ , teplota tání hliníku je 660  $^{\circ}\text{C}$ .

**Závěr:**

Indukovaný elektrický proud má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala (Lenzův zákon). Měníme-li proud procházející primární cívkou, mění se magnetický tok a dochází ke vzniku indukovaného napětí v sekundární cívce (Faradayův zákon).

**Poznámky:**

- a) Pro demonstraci odskakujícího alobalu můžeme použít malé hliníkové

mističky. Chovají se podobně jako list alobalu a je efektní.

- b)** Arch alobalu nesmíme nikdy zatížit prázdnou nádobou. Mohlo by dojít k poškození vařiče.
- c)** Z archu alobalu utvoříme mističku, do které nalijeme trochu vody, a zavřeme ho jako sáček. Po zapnutí vařiče v něm lze vodu uvařit. Pozor na popálení! Tímto pokusem můžeme demonstrovat, že pokud budeme alobal chladit, na plotýnce se nepopálí. Teplo, které hliník přijímá, se nejprve spotřebuje na ohřívání vody.

*Elektromagnetická indukce*

**Název pokusu: LEVITACE MĚDĚNÉHO KROUŽKU**

(kap. 2.3.5, str. 47)

**Pomůcky:** indukční vaříč, kroužky měděného drátu (drát o průřezu 1 mm, délky 10 cm, uzavřený instalátorskou svorkou), malý hrneček (plecháček s uchem), voda

**Popis činnosti:**

1. Na plotýnku položíme malou nádobu s trochou vody.
2. Přes hrneček položíme na plotýnku měděný kroužek.
3. Zapneme vaříč.

**Komentář:**

1. Kroužek se po chvíli začne vznášet.

***Proč kroužek levituje?***

Magnetické síly vzniklé po zapnutí vaříče umožní levitaci kroužku.

**Závěr:**

Indukovaný elektrický proud má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která ho vyvolala (Lenzův zákon).

**Poznámky:**

- a) Na plotýnce je vždy nutná nádoba s vodou, aby nedošlo k poškození vaříče.
- b) Ucho u hrnečku zadrží kroužek v levitační poloze. U menší nádoby bez ucha by mohl kroužek odskočit stejně jako alobalový arch.
- c) Jako variantu můžeme použít kroužky vyrobené z hliníku.
- d) Pokus neprovádíme dlouho, kroužek se silně zahřívá. V případě použití izolovaného vodiče, dojde k roztavení izolace. V případě spojení kroužku pájkou, dojde k jejímu roztavení. Teplota tání pájky pro běžné účely je kolem 450 °C.

*Elektromagnetická indukce*

**Název pokusu: INDUKČNÍ VAŘIČ JAKO TRANSFORMÁTOR**

(kap. 2.3.6, str. 50)

**Pomůcky:** indukční vařič, nádoba s vodou, měděný kroužek s žárovíčkou

**Popis činnosti:**

1. Kroužek se žárovíčkou položíme na plotýnku.
2. Dovnitř do středu kroužku položíme nádobu s trochou vody.
3. Zapneme vařič.

**Komentář:**

1. Žárovíčka začne svítit.

***Proč žárovíčka svítí?***

Soustava indukční vařič – měděný kroužek se chová jako transformátor.

Primární cívku s mnoha závitů tvoří cívka vařiče a sekundární cívku s jedním závitěm tvoří měděný kroužek. Primární cívka vlivem změn magnetického pole indukuje na sekundární cívce napětí, které je dostatečné k rozsvícení žárovíčky.

**Závěr:**

Indukované elektromotorické napětí vzniká vždy, když se změní magnetický indukční tok, procházející závitů sekundární cívky.

**Poznámky:**

- a) Kroužek se žárovíčkou můžeme vysouvat kolem nádoby do různé výšky.
- b) Pokus lze demonstrovat také s nádobou s větší plochou dna (hrnec). Nejprve položíme nádobu s vodou na plotýnku a zapneme vařič. Na jedné straně nádobu lehce nadzvedneme a pod dno nádoby postupně zasunujeme a vysunujeme kroužek se žárovíčkou.
- c) Tento pokus lze demonstrovat i s dalšími žárovkami, které spojíme s cívku s větším počtem závitů. Jednomu závitě cívky o průměru 10 cm odpovídá přibližně indukované napětí 6V. Při práci s cívku se 40 závitů dbáme opatrnosti, pracujeme již s nebezpečným napětím. Nedotýkáme se vodičů bez izolace!

6V/0,1 A ..... 1 závit  
24 V/100 W ..... 4 závitů  
230 V/100 W ..... 40 závitů

**Název pokusu: VÍŘIVÉ PROUDY**

(kap. 2.3.7, str. 54)

**Pomůcky:** užší trubice z mědi nebo hliníku, válcový neodymový magnet, měkká podložka, hliníková nádoba, skleněná láhev, korková zátka, šicí jehla

**Popis činnosti:**

1. Z ruky upustíme nad měkkou podložkou magnet svisle dolů.
2. Trubicí, kterou držíme svisle nad měkkou podložkou, pouštíme shora dolů magnet.
3. Prázdnou skleněnou láhev s úzkým hrdlem zašpuntujeme korkovou zátkou, do které zapíchneme dlouhou jehlu. Otočenou hliníkovou nádobu zavěšíme středem na hlavičku jehly.
4. Kolem dna nádoby pohybujeme magnetem.

**Komentář:**

1. Magnet padá volným pádem se zrychlením.
2. Magnet je při pohybu trubící výrazně zpomalen.

***Proč padá magnet měděnou trubící pomaleji?***

Pád neodymového magnetu trubící je oproti volnému pádu zpomalený. Měď a hliník jsou neferomagnetické látky, pohyb magnetu tedy nebrzdí přitažlivá magnetická síla. Magnet padající pod vlivem gravitace indukuje v trubici elektrický proud s příslušným magnetickým polem. Zpomalení pohybu magnetu v trubici způsobuje elektromagnetická indukce. Trubice se chová jako cívka s jedním závitem. Při pohybu magnetu trubící dolů se mění magnetické pole a v cívce (trubici) se indukuje napětí. Měděná trubice současně tvoří uzavřený obvod, a proto se v ní indukují vířivé proudy, které působí proti změně, která je vyvolala (proti pohybu magnetu dolů působí magnetické pole vířivých proudů směrem nahoru). Pohyb magnetu směrem dolů je jimi brzděn. Tíhová síla působící na magnet je větší než síla, která tlačí magnet vzhůru. Proto magnet propadne trubící.

***Proč se hliníková nádoba roztočí?***

Hliníková nádoba se chová jako rotor motoru, který se roztáčí pomocí točivého magnetického pole. Pohyb magnetu nad dnem nádoby (deskou) indukuje vznik vířivých proudů.

**Závěr:**

V masivních vodičích vznikají změnou magnetického toku vířivé proudy – Foucaultovy proudy.

**Poznámky:**

- a) Jako hliníkovou nádobu lze použít plechovku od nápoje, obal od konzervy, obal od paštiky, obal od čajové svíčky.
- b) Pokud nemáme k dispozici trubici z neferomagnetického materiálu, lze použít dno velkého neferomagnetického hrnce nebo plechu, po kterém pouštíme magnet dolů.

## *Elektromagnetická indukce*

### **Název pokusu: INDUKČNÍ VLÁČEK**

(kap. 2.3.8, str. 74)

**Pomůcky:** měděný drát nenalakovaný (průměr 0,7 – 1 mm), diskové neodymové magnety o průměru 12 mm, tloušťce 6 mm (2 ks), tužková baterie (AAA)

#### **Popis činnosti:**

1. Z měděného drátu stočíme spirálu.
2. Spirálu položíme na rovnou podložku.
3. Na konce baterie přiložíme po dvou magnetech vždy stejným pólem směrem k baterii.
4. Magnety drží svým středem u baterie pevně díky magnetické síle.
5. Takto připravený vláček vložíme do spirály a lehce postrčíme dovnitř.
6. Pokud se vláček nerozjede, naopak ze spirály vyskočí, je nutné ho do spirály vložit opačnou stranou.

#### **Komentář:**

1. Vláček jezdí spirálou a po ní.

#### ***Jaký pohon vláček využívá??***

Měděný drát stočený do spirály tvoří cívku se závity. Kolem pólů magnetů se tedy nachází cívka. Každá cívka, kterou protéká proud, se chová jako magnet. Baterie do cívky pouští proud, který teče nejkratší možnou cestou, tedy přes poniklovaný povrch magnetů rovnou do cívky, přes její závity a magnetem na druhém konci zpět do baterie. Cívkou prochází proud, zmagnetizuje se a vytvoří se na ní vlastní magnetické póly. Opačné magnetické póly se přitahují, proto jeden magnet cívka přitahuje – vtahuje baterii do spirály. Shodné magnetické póly se odpuzují, proto druhý magnet cívka odpuzuje – vystrkuje baterii ze spirály. Celý vláček se posune o jeden závit dopředu. Toto se opakuje dále po každém závitě po celé délce spirály.

#### **Závěr:**

Indukce elektrického proudu vyvolá síly, které mají pohybový účinek.

Elektromagnetické pole je původcem silového působení. Může také přenášet energii.

Má schopnost vykonávat práci.

**Poznámky:**

- a) Po vložení vláčku můžeme spirálu uzavřít konci k sobě. Vláček bude jezdit dokola. Musíme dát pozor na to, aby byly závity točeny jedním směrem.
- b) Uzavřenou spirálu lze místy vypodložit a překřížit do osmičky.



## *Elektromagnetická indukce*

### **Název pokusu: OBVOD S LED**

(kap. 2.3.9, str. 77)

**Pomůcky:** válcový neodymový magnet o průměru 10 mm a délce 40 mm, demonstrační pomůcka

#### **Popis činnosti:**

1. Použijeme demonstrační pomůcku (viz obr. 41)
2. Pouštíme trubkou magnet jedním pólem do cívky.
3. Pozorujeme rozsvěcování LED diod.
4. Pouštíme trubkou magnet opačným pólem do cívky.
5. Pozorujeme rozsvěcování LED diod.
6. Diskutujeme, jak se LED diody rozsvěcují.

#### **Komentář:**

1. Při pádu magnetu cívkou se rozsvítí LED diody.

#### ***Proč LED diody svítí?***

Vzájemným pohybem permanentního magnetu vůči cívce, při jeho zasouvání nebo vysouvání, vzniká na svorkách cívky indukované elektromotorické napětí. Indukované napětí je zdrojem elektrického proudu, který prochází obvodem. LED dioda svítí pouze tehdy, je-li v obvodu zapojena v propustném směru. Magnetické pole tyčového magnetu je nehomogenní, proto se při jeho pohybu vůči cívce mění směr a velikost magnetické indukce, tím vzniká indukované elektromotorické napětí. Při vysunutí magnetu z cívky protéká obvodem proud opačným směrem než při zasunutí magnetu do cívky. Protože jsou LED diody zapojeny opačnou polaritou, rozsvítí se vždy pouze ta LED dioda, kterou prochází proud v propustném směru.

#### **Závěr:**

Demonstrujeme vznik indukovaného napětí, které vzniká pouze při změně vzájemné polohy magnetu a cívky.

**Poznámky:**