

4.5.10 Lenzův zákon

Předpoklady: 4502, 4503, 4507, 4508

Pomůcky: autobaterie, vodiče, cívka 600 závitů, dlouhé tyčové jádro, hliníkový kroužek se závěsem, stojan, měděný kroužek bez závěsu, prodlužovačka, pokus na elektromagnetickou kotvu.

Pokus:



Uvnitř cívky je zastrčeno dlouhé tyčové jádro (zesiluje magnetické pole). Na závěsu je upevněn hliníkový kroužek, tak aby byl „navlečen“ na jádro, nedotýkal se ho a mohl se volně kývat. Cívku připojíme ke zdroji, chvíli necháme proud procházet, pak cívku opět vypneme.

Př. 1: Popiš průběh pokusu. Do kolika částí ho můžeme rozdělit?

Pokus má tři části:

Cívku připojíme ke zdroji \Rightarrow kroužek se odpudí od cívky a začne se trochu kývat.

Kroužek v se ustálí v původní rovnovážné poloze.

Cívku vypneme \Rightarrow kroužek se přitáhne k cívce (na druhou stranu než při zapnutí) a opět se rozkývá.

Pedagogická poznámka: Hodně dobrý pozorovatel si může už v tomto okamžiku všimnout, že ustálení cívky po vypnutí proudu trvá daleko déle než při zapnutí. Pokud se to stane, nerozebírám to před třídou. Je možné tomu zabránit tím, že po vypnutí proudu kroužek zastavíte rukou.

Př. 2: Vysvětli průběh pokusu. Proč se při zapínání kroužek vždy odpudí? Proč se při vypínání vždy přitahuje?

První nápad: Při zapínání se z cívky stává magnet \Rightarrow kroužek se zmagnetuje \Rightarrow působí na něj magnetické pole cívky.

Tak to být nemůže:

- Kroužek je z mědi (paramagnetická látka) \Rightarrow není možné ho zmagnetovat a magnet na něj téměř nepůsobí (o čemž se můžeme přesvědčit, když k němu pomalu přiblížíme magnet. Pokud ho naopak budeme ke kroužku přibližovat rychle, můžeme dosáhnout stejného efektu jako při zapínání cívky).
- Všechny látky se zmagnetovávají tak, aby se začaly přitahovat k magnetu, který je zmagnetoval \Rightarrow kroužek by se musel přitahovat.
- Cívka na kroužek viditelně nepůsobí, když už je chvíli zapojená (a je tedy stále elektromagnetem).

Efekt se objevuje pouze při zapínání a vypínání proudu (stejně jako elektromagnetická indukce) \Rightarrow zřejmě tam hraje roli indukování napětí v kroužku.

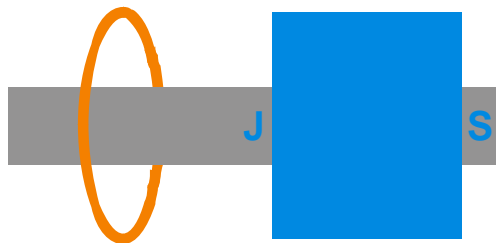
Opatrnější pohled:

- Zapínáme cívku \Rightarrow zvětšuje se její magnetické pole a protože kroužek je navlečen na stejném jádru zvětšuje se magnetické pole i uvnitř kroužku \Rightarrow v kroužku se mění magnetický indukční tok \Rightarrow v kroužku se indukuje elektrické napětí \Rightarrow protože je vodivý a uzavřený začne v něm téct proud \Rightarrow stane se magnetem a může se přitahovat nebo odpuzovat od cívky.
- Cívka je zapnutá \Rightarrow nemění se magnetické pole cívky a tím ani magnetický indukční tok v kroužku \Rightarrow v kroužku se neindukuje proud \Rightarrow kroužek není magnetem a magnetické pole cívky na něj nepůsobí.
- Vypínáme cívku \Rightarrow zmenšuje se její magnetické pole a protože kroužek je navlečen na stejném jádru zmenšuje se magnetické pole i uvnitř kroužku \Rightarrow v kroužku se mění magnetický indukční tok \Rightarrow v kroužku se indukuje elektrické napětí \Rightarrow protože je vodivý a uzavřený začne v něm téct proud \Rightarrow stane se magnetem a může se přitahovat nebo odpuzovat od cívky.

Pedagogická poznámka: Diskuse o tom, proč nemůže pohyb kroužku způsobit zmagnetování je důležitá. Pokud s tímto návrhem nikdo nepřijde (nepravděpodobné), navrhu ho sám. První fázi pokusu vysvětlujeme s většinou třídy společně, na další fáze se snažím nechat vysvětlování na žácích.

Nyní můžeme pro oba okamžiky určit i směr indukovaného proudu v závitě.

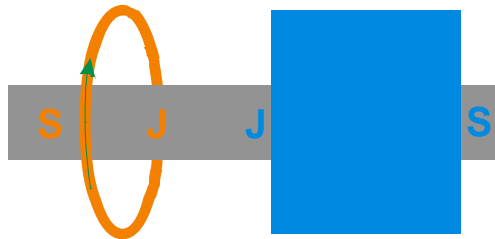
Př. 3: Na obrázku je vyznačena orientace elektromagnetu, který vznikne z cívky po zapojení k baterii. Vyznač do kroužku směr indukovaného proudu. Jak působí magnetické pole závitů vůči poli cívky? Analogicky zachyť situaci při vypínání proudu.
zapínáme cívku, indukční tok roste



a) Zapínání obvodu

Kroužek se odpuzuje \Rightarrow můžeme si označit póly magnetu, který vznikl z kroužku \Rightarrow z označených pólů poznáme směr proudu v kroužku.

zapínáme cívku, indukční tok roste

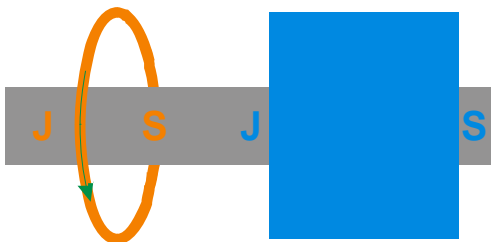


magnetické pole kroužku má opačný směr než magnetické pole cívky a zeslabuje ho

b) Vypínání obvodu

Kroužek se přitahuje \Rightarrow můžeme si označit póly magnetu, který vznikl z kroužku \Rightarrow z označených pólů poznáme směr proudu v kroužku.

vypínáme cívku, indukční tok klesá



magnetické pole kroužku má stejný směr jako magnetické pole cívky a zesiluje ho

Př. 4: Jak bude kroužek reagovat na zapnutí a vypnutí, když připojíme cívku ke zdroji s obrácenou polaritou?

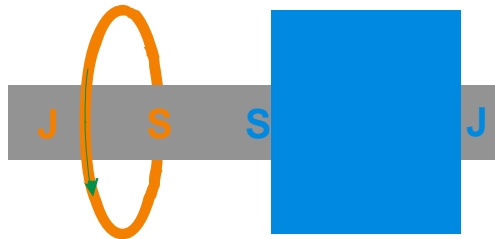
Překvapivě, i když připojíme cívku ke zdroji obráceně, pokus proběhne přesně stejně:

- Cívku připojíme ke zdroji \Rightarrow kroužek se odpudí od cívky a začne se trošku kývat.
- Ustálíme kroužek v rovnovážné poloze, kroužek se nevychyluje.
- Cívku vypneme \Rightarrow kroužek se přitáhne k cívce a opět se rozkývá.

Pedagogická poznámka: Žáci nemohou dát s jistotou správnou odpověď na otázku předchozího příkladu. Jde o test intuice (ta klasická napovídá, že to půjde obráceně). Otázka není zbytečná, fakt, že neplatí klasické „obrátime proud, obrátí se i všechno ostatní“, vede k tomu, že za chováním kroužku je nějaké hlubší pravidlo, které ze čtyř obrázků na tabuli hledáme v dalším příkladu.

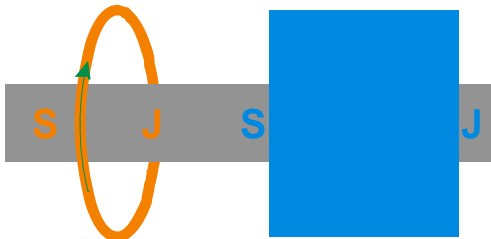
Př. 5: Nakresli obrázky analogické s obrázky v příkladu 3 pro provedení pokusu s obrácenou polaritou. Najdi společné pravidlo, které řídí chování kroužku ve všech čtyřech případech.

zapínáme cívku, indukční tok roste



magnetické pole kroužku má opačný směr než magnetické pole cívky a zeslabuje ho

vypínáme cívku, indukční tok klesá



magnetické pole kroužku má stejný směr jako magnetické pole cívky a zesiluje ho

Když se pole cívky zvětšuje, magnetické pole kroužku má opačný směr a zeslabuje ho. Když se pole cívky zmenšuje, magnetické pole kroužku má stejný směr a zesiluje ho. Elektrický proud se indukuje v kroužku tak, že se jeho magnetické pole snaží zmenšit změnu magnetického pole cívky (když pole cívky roste, kroužek ho zmenšuje, když pole cívky klesá, kroužek ho zvětšuje)

Pedagogická poznámka: U předchozího příkladu nakreslím všechny čtyři obrázky na tabuli a snažím se postupným zobecňováním dojít k výsledku.

Předchozí závěr je zformulován jako **Lenzův zákon**:

Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, aby svým magnetickým polem působil proti změně magnetického indukčního toku, která jeho vznik vyvolala.

Docela dobře si můžeme představit Lenzův zákon jako mínus, které nás trápilo v zákonu elektromagnetické indukce.

Náš předchozí pokus trochu vylepšíme, aby byl kapánek efektnější.

Cívku s jádrem otočíme tak, aby jádro směřovala kolmo vzhůru. Kroužek sundáme ze závěsu a navlékneme ho na jádro tak, aby ležel na cívce. Cívku připojíme do zásuvky a kroužek vyletí více než metr na cívku.

Př. 6: Vysvětli, proč byl v tomto případě efekt daleko znatelnější než v prvním pokusu.

Napětí v zásuvce je podstatně větší než napětí baterie z prvního pokusu \Rightarrow při pokusu poteče cívkou větší proud a budou větší i působící síly.

Předchozí vysvětlení není špatné, ale není ani úplné. Vezmeme do ruky knížku a přiložíme ji k seshora k jádru tak, aby kroužek nemohl vyletět. Po zapojení kroužek vyletí od cívky a zůstane zespona přilepen ke knížce.

Př. 7: Vysvětli, jak je možné, že cívka odpuzuje kroužek i poté, co proud cívkou už nějakou dobu prochází.

V zásuvkách máme střídavé napětí \Rightarrow proud procházející cívkou neustále mění směr (50x za sekundu) \Rightarrow neustále se mění indukční tok procházející kroužkem \Rightarrow v kroužku se neustále indukuje elektrický proud \Rightarrow kroužek se neustále odpuzuje od cívky.

Z předchozího pokusu je zřejmé, že kromě rozdílné velikosti působících sil hraje roli i různá doba, po kterou se v kroužku indukuje proud (a působí na něj magnetické pole).

Pedagogická poznámka: Můj fyzikář na střední škole předváděl pokus ještě efektněji. Poté, co nechal kroužek vyletět do stropu, se vsadil, že ho nikdo neudrží. Samozřejmě se našel svalovec, který byl přesvědčen, že kroužek udržet půjde. Vzhledem k tomu, že jde o pokus se síťovým napětím, nikdy jsem neměl odvahu to udělat stejně.

Pedagogická poznámka: Interpretace pokusu se střídavým napětím není tak jednoduchá, jak se v tomto okamžiku zdá. Střídavý proud neustále mění svou polaritu a proto se neustále střídají okamžiky, kdy proud (a tedy i magnetické pole) roste (a kroužek je odpuzován), s okamžiky, kdy proud (a tedy i magnetické pole) klesá (a kroužek je přitahován). Podle tohoto podrobnějšího rozboru by měl kroužek stát na místě. Napadají mě dvě možná vysvětlení. Na počátku proud roste, kroužek se tedy odpudí a při přitahovací fázi bude od cívky dál a přitahování bude slabší než předchozí odpuzování a nevrátí ho zpátky na původní místo. Další odpuzovací fáze nastává v menší vzdálenosti od cívky \Rightarrow kroužek se oddálí do větší vzdálenosti, než ze které se stihl vrátit a tak dále. Nezdá se mi, že by tímto způsobem bylo možné vysvětlit odpuzování kroužku, který pevně držíme v ruce. I když připustím, že i v ruce se kroužek neznatelně hýbe, mělo by alespoň platit, že čím pevněji se ho snažím držet tím menší silou je odpuzován, což jsem nepozoroval. Druhou možností je studium fázového posunu proudu v cívce a proudu v kroužku. V ideálním případě by měl být $\frac{\pi}{4}$, což by znamenalo, rozdělení jedné periody na čtyři stejné části, ve dvou se kroužek s cívkou přitahuje, ve dvou odpuzuje. Výsledná síla je nulová. Při zvětšení fázového posunu se části, ve kterých dochází k odpuzování prodlouží a výsledná síla by byla odpudivá. Jak je to doopravdy, zatím nevím. Kdyby si této logické díry někdo ze žáků všiml zaslouží určitě pochvalu, ale rozpitvávat situaci se třídou nemá smysl.

Kromě vystřelení kroužku si žáci všimnou i toho, že se cívka zvedne z roviny stolu a vznáší se ve vzduchu.

Př. 8: Co se stane, pokud cívku položíme opět vodorovně a železné jádro umístíme na její kraj?

Jádru se přesune do středu cívky tak, aby na obě strany přesahovalo o stejný kus.

Další zajímavý efekt: Pokud chvilku kroužek knížkou přidržujeme ve vzduchu, silně se zahřeje.

Př. 9: Vysvětli, proč se kroužek levitující nad cívkou zahřívá.

Protože je nadlehčován značnou silou, musí přes něj téct značný proud, který ho samozřejmě silně zahřeje (jako vlákno žárovky nebo jiný vodič).

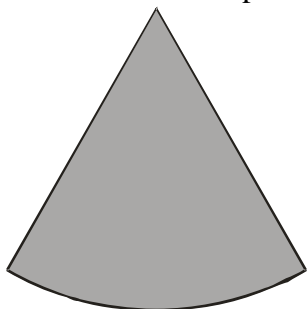
Př. 10: Najdi využití předchozího pokusu v praxi.

Zahřívání kovového předmětu proudy, které se indukují v proměnném magnetickém poli, můžeme využít pro zahřívání předmětů:

indukční vaříč v domácnostech,
indukční pec v průmyslu.

Nasadíme dvě cívky na U jádro tak, aby společně vytvořili elektromagnet. Na vrchní stranu jádra přiložíme speciální nástavce tak, aby se magnetické pole koncentrovalo do úzké štěrbině. Na celou aparaturu přiděláme kyvadélko v hliníkového plechu tak, aby se kývalo ve štěrbině.

- Cívkami neprochází proud \Rightarrow kyvadlo po vychýlení rukou houpe.
- Cívkami prochází proud \Rightarrow houpání kyvadla se rychle zastaví a kyvadlo se pomalu vrátí do klidové polohy.

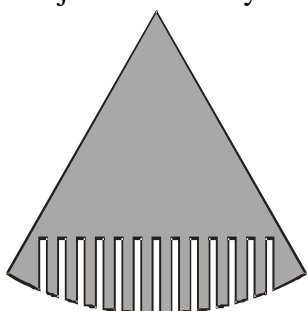


Podobně jako v kroužku i v kyvadle vznikají indukované proudy. Mají tvar vírů a nazývají se Foucaultovy proudy. Tyto proudy vytvářejí z kyvadélka magnet, který působí proti změnám magnetického pole ve svém okolí a tím brzdí pohyb kyvadla \Rightarrow **(elektro) magnetická brzda** – brzdí například kotouček elektroměru (otáčení hliníkového kotoučku mezi póly permanentního magnetu se zastaví, jakmile přestaneme odebírat elektrický proud, právě díky naindukování proudů do kotoučku elektroměru).

Většinou o Foucaultovy proudy moc nestojíme. Svým průchodem materiál zahřívají \Rightarrow ztráty energie \Rightarrow snaha zmenšit indukované proudy \Rightarrow

- například jádra transformátoru nejsou z jednoho kusu plechu, ale jsou slepena z více izolovaných vrstev (na menším prostoru je menší naindukované napětí a tím i menší proudy),
- jádra se vyrábí z nevodivých ferimagnetických látek.

Vliv tvaru vodiče na velikost Foucaultových proudů můžeme ověřit pomocí kyvadla se zubatým okrajem. Takové kyvadlo se při zapnutí proudu zastaví, ale až po delší době.



Př. 11: Vysvětli, proč se jádra vysokofrekvenčních cívek nedělají z plátkové ocele, ale z málo vodivého feritu.

Vysokofrekvenční cívky jsou určeny do obvodů, kde se velmi rychle mění napětí a proud \Rightarrow obrovské změny magnetického toku v těchto cívkách \Rightarrow obrovské hodnoty indukovaného napětí v jádrech \Rightarrow jádra musí mít velký odpor, aby v nich netekly velké proudy.

Př. 12: Pozoruj ještě jednou pečlivě pokus z úvodu hodiny. Všiměj si efektu, který souvisí s předchozí diskusí.

Po zapnutí se kroužek rozhoupe, ale jeho houpání se zastaví za daleko kratší čas než po vypnutí. Po zapnutí se kroužek houpe v magnetickém poli zapnuté cívky \Rightarrow zřejmě se v něm indukují Foucaultovy proudy, které ho zahřívají a jejichž silové působení pohyb kroužku rychle utlumí.

Shrnutí: Indukovaný proud má takový směr, aby jeho magnetické účinky působili proti změně, která ho vyvolala.