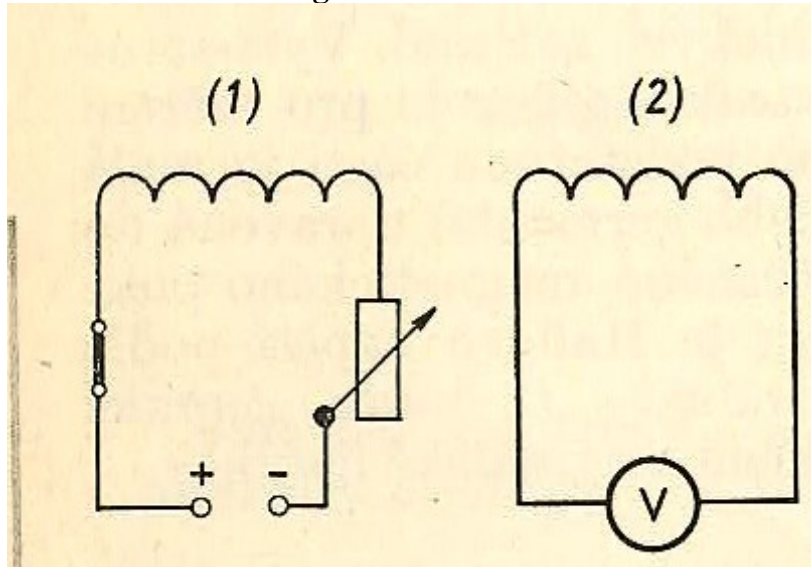


10. Elektromagnetická indukce

10.1 Jev – elektromagnetická indukce



Magnetické pole cívky (1) postupuje cívku (2). Při zapnutí a vypnutí obvodu (1) zaznamenáme na voltmetru výchylku. Při změnách polohy cívky (1) se též objeví výchylka. při zvyšování nebo snižování proudu se opět objeví na voltmetru výchylka. Výchylka se objeví, i když budeme do cívky (2) zasouvat a vysouvat magnet. ve všech případech je výchylka způsobena změnu

magnetického pole a jev označujeme jako **elektromagnetická indukce**.

Shrnutí jevu elektromagnetické indukce

Měníme-li uvnitř cívky magnetické pole, existuje ve vodiči cívky indukované elektromotorické napětí a uzavřeným obvodem prochází indukovaný elektrický proud.

10.2 Magnetický indukční tok

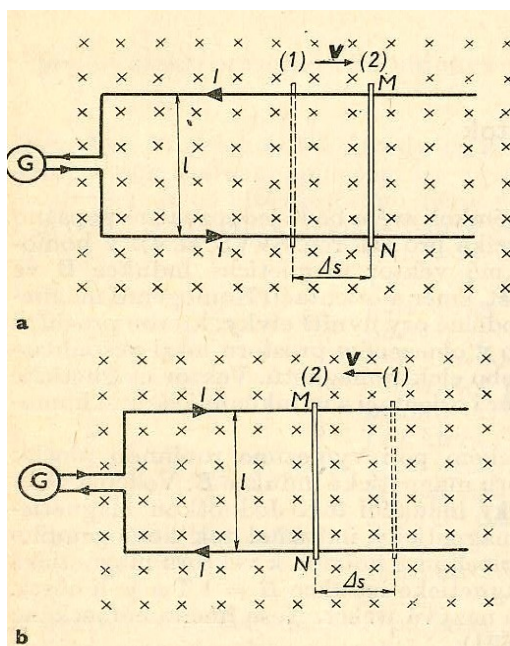
Magnetické pole je popsáno vektorem \vec{B} . V homogenním poli má \vec{B} stálý směr i velikost.

V homogenním magnetickém poli vymežíme rovinnou plochu o obsahu S , kolmou k vektoru magnetické indukce \vec{B} . Veličina $\Phi = B \cdot S$ se nazývá **magnetický indukční tok**.

Jednotka magnetického indukčního toku: $[\Phi] = 1T \cdot 1m^2 = 1Wb$

10.3 Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Elektromagnetickou indukci objevil Faraday v roce 1831.



Obrázek znázorňuje homogenní magnetické pole, jehož vektor magnetické indukce je kolmý k nákrešně a orientovaný za nákrešnu. V rovině nákrešny jsou znázorněny dva rovnoběžné přímé vodiče připojené citlivému galvanometru.

Přes oba vodiče je třetí vodič se kterým budeme posouvat. V (1) je výchylka nulová. Při posunu z (1) do (2) se vychýlí na jednu stranu, při přechodu z (2) do jedničky se vychýlí na druhou stranu.

Indukovaný proud vytváří magnetické pole i indukci B' z (1) do (2) má opačnou orientaci než B z (2) do (1).

Nechť vodič se posouvá z (1) do (2) za dobu Δt , pak se v něm posunují i elektrony. na každý z těchto

elektronů působí síla $F_m = B \cdot e \cdot v$ je orientovaná z M do N. Na jednotkový náboj ve vodiči magnetická síla o velikosti: $\frac{F_m}{e} = B \cdot v$.

Mějme soustavu S' spojenou s vodičem MN. Vůči ní je vodič v klidu a pole \vec{B} se pohybuje rychlostí $-\vec{v}$. Lorenzova síla je zde rovna nule. Když MN prochází elektrický proud je dle elektrické pole a ve vodiči působí síla $F_e = e \cdot E \Rightarrow E = \frac{F_e}{e}$.

S a S' jsou inerciální a můžeme psát $\frac{F_e}{e} = \frac{F_m}{e}$. Po úpravě dostaneme vztah: $E = B \cdot v$.

Při přemístění jednotkového kladného náboje po dráze $l = MN$ vykoná elektrické pole práci $E \cdot l = B \cdot v \cdot l$. Tato práce vyjadřuje velikost indukovaného napětí $U_i = B \cdot v \cdot l$.

Tzn. S_1 obsah smyčky je MN v poloze (1), S_2 v poloze (2) při posunutí o Δs je $\Delta S = S_2 - S_1 = l \cdot \Delta s$

Označme Φ_1 magnetický indukční tok prostupující smyčkou je-li vodič MN v poloze (1) a Φ_2 je-li vodič v poloze (2). Pak $\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = B \cdot \Delta s$

Indukované elektromotorické napětí lze pak vyjádřit takto:

$$U_i = B \cdot v \cdot l = B \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot l = \frac{B \cdot \Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Nechť S je konstantní pak $\Delta B = B_2 - B_1$ (změna magnetické indukce z počáteční hodnoty na konečnou)

$\Delta \Phi = \Delta B \cdot S$ probíhá v časovém úseku Δt tak, že v každém okamžik je magnetické pole homogenní a můžeme psát $U_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.

Shrnutí:

V obvodu vzniká indukované elektromotorické napětí, jestliže probíhá změna indukčního magnetického toku prostupujícího obvodem. Indukované elektromotorické napětí je nulové, je-li magnetický indukční tok stálý $\Delta \Phi = \text{konst.}$, $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = 0(V)$. Indukované elektromotorické napětí je v každém okamžiku časového úseku stálé, jestliže změna magnetického indukčního toku probíhá rovnoměrně $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \text{konst}$

Faradayův zákon elektromagnetické indukce:

Okamžitá velikost indukovaného elektromotorického napětí se rovná časové změně magnetického indukčního toku.

Pro smyčku platí: $u_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.

Pro cívku s N závitů: $u_i = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

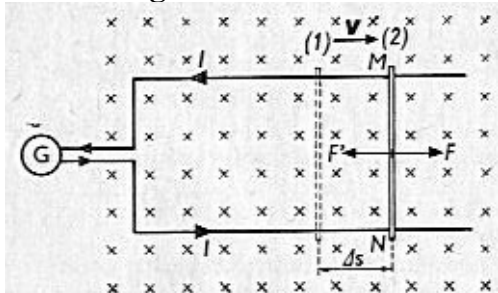
Potřebujeme určit směr indukovaného proudu. K tomu nám slouží Lenzův zákon.

Lenzův zákon:

Indukovaný elektrický proud v obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku indukujícího pole.

Můžeme psát: $u_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

10.4 Energie indukovaného elektrického proudu



V čase Δt se indukuje U_i a obvodem protéká proud I .
 Při posunutí o dráhu Δs a působení silou F , se vykoná práce ΔW a tu určíme
 $\Delta W = F \cdot \Delta s$
 Na vodič působí magnetické pole silou $F' = B \cdot I \cdot l$
 Síly F a F' jsou v rovnováze, a proto práci určíme
 $\Delta W = B \cdot I \cdot l \cdot \Delta s = B \cdot I \cdot l \cdot v \cdot \Delta t$
 Energie indukovaného elektrického proudu je:

$$\Delta E = U_i \cdot I \cdot \Delta t = B \cdot l \cdot v \cdot I \cdot \Delta t$$

10.5 Elektrický náboj přenášený indukovaným elektrickým proudem

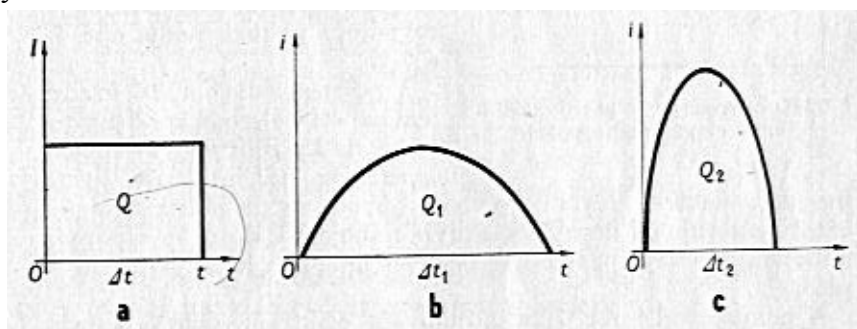
Nechť R je odpor vodiče MN .

Při posunu se za Δt indukuje napětí $U_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ a vodičem protéká $I = \frac{U_i}{R}$. Proud přenáší

$$\text{náboj: } \Delta Q = I \cdot \Delta t = \frac{U_i}{R} \cdot \Delta t = \frac{\Delta \Phi}{R}$$

Elektrický náboj je úměrný změně $\Delta \Phi$ a nezávisí na délce trvání této změny.

Při dané $\Delta \Phi$ je proud velký, je-li změna rychlá a malý, je-li změna pomalá. Pokaždé se však přenesou tentýž náboj. Je-li indukované elektromotorického napětí proměnné, je i proud proměnný.

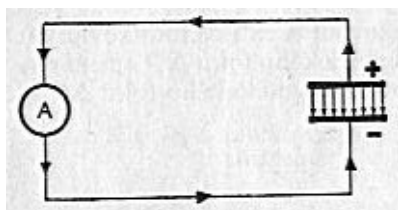


$$Q = Q_1 = Q_2$$

10.6 Vírové indukované elektrické pole

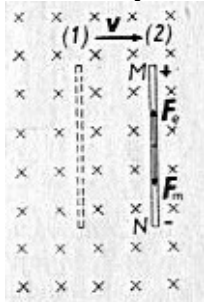
Kolem tělesa s elektrickým nábojem vzniká elektrické pole. Je vázáno na tento náboj. S jeho zánikem zaniká. Elektrostatické pole, znázorňují její elektrické siločáry, které začínají a končí na elektrickém náboji. Indukované elektrické pole není vázáno na náboj. Má jinou strukturu než elektrostatické pole.

Elektrické pole – zřídlové – siločáry začínají a končí na nábojích.



Indukované pole je vírové – siločáry jsou uzavřené křivky. Při přemístění náboje v elektrostatickém poli se vykoná práce, nezávislá na tvaru dráhy. Při přemístění po uzavřené křivce je práce nulová. Při přemístění elektrického náboje po uzavřené dráze ve vírovém poli je práce větší než nula a odpovídá elektromotorickému napětí ve vodiči.

10.7 Pohyb izolovaného vodiče v homogenním magnetickém poli



Předpokládejme, že izolovaný vodič MN se posunuje rovnoměrným pohybem v homogenním magnetickém poli kolmo k \vec{B} . V soustavě spojené s magnetickým polem působí na elektrony ve vodiči síla $F_m = B \cdot e \cdot v$ a přemísťuje je od M k N. U N je záporný náboj a M je kladný náboj. Vznik elektrického pole E (od M k N). Vznikne elektrická síla $F_e = e \cdot E$.

F_m a F_e jsou nesouhlasné orientovány a po krátké době jsou v rovnováze. Počáteční elektrický proud zanikne. Mezi konci vodiče M a N bude stálý rozdíl potenciálů $\Delta \varphi = U = B \cdot v \cdot l$. Uvnitř i vně vodiče je elektrostatické

pole.

10.8 Foucaultovy proudy

Indukované proudy vznikají v masivních vodičích. Jakmile v jejich vnitřku mění magnetické pole označíme je jako **vířivé proudy**. Působí proti změnám magnetického pole.

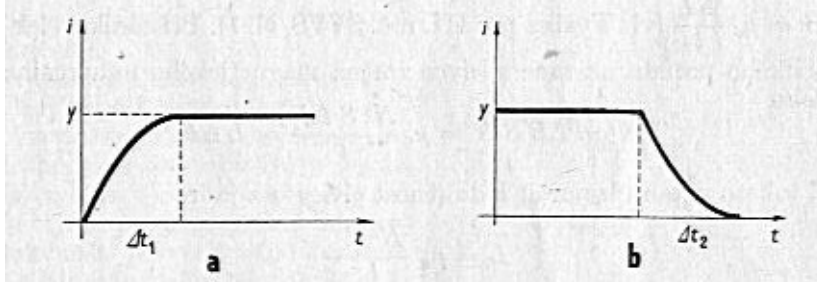
Waltenhofenovo kyvadlo – Cu deska se kývá mezi pól elektromagnetu. Po zapnutí proudu se zastaví kyvadlo.

Praktické použití: tlumení kyvů měřících přístrojů (elektroměry). Vířivé proudy v Fe jádrech elektromagnetů působí škodlivě – jádra vyrábíme z plechů.

10.9 Vlastní indukce

Prochází-li obvodem s cívkou ustálený proud, je magnetické pole stálé. Cívkou prostupuje magnetický indukční tok.

Prochází-li cívkou proud, který se v čase mění, mění se magnetický indukční tok a v cívce vzniká indukované elektromotorické napětí a tomu říkáme **vlastní indukce cívk**.



Při zvětšování proudu v obvodu cívk prochází obvodem indukovaný proud, který má nesouhlasný směr s indukujícím proudem. Indukované elektromotorické napětí

zpomaluje narůstání proudu. Při zmenšování proudu má indukční proud souhlasný směr s indukujícím proudem. Indukované elektromotorické napětí zpomaluje zmenšování proudu.

Vlastní indukce se projeví při uzavření nebo otevření obvodu při pojeného ke stálému napětí. Při uzavření nabývá proud své velikosti až po určitém časovém úseku, při přerušení poklesne až po určitém čase.

Pro danou cívku je magnetický indukční tok přímo úměrný velikosti ustáleného proudu I: $\Delta \Phi$ je úměrná ΔI

Změnu magnetického indukčního toku při přerušení obvodu lze vyjádřit: $\Delta \Phi = L \cdot \Delta I$, L – **indukčnost cívk**. Je konstantou cívk, mění se s počtem závitů.

Velikost průměrného indukovaného elektromotorického napětí: $U_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{L \cdot \Delta I}{\Delta t}$

Okamžitá hodnota elektromotorického napětí: $u_i = \frac{L \cdot \Delta i}{\Delta t}$

Vztah pro indukčnost: $L = \frac{U_i \cdot \Delta t}{\Delta I}$.

Jednotka indukčnosti: $[L] = \frac{1V \cdot 1s}{1A} = 1H$ (jeden henry)

Vztahy pro indukčnost pro některé případy u cívky:

Uvnitř dlouhé cívky bez jádra délky l , průřezu S a s počtem závitů N , kterou prochází proud I , je velikost magnetické indukce: $B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l}$.

Při zániku proudu nastane v cívce změna magnetického indukčního toku:

$$\Delta \Phi = \Delta B \cdot S \cdot N = \mu_0 \frac{S \cdot N^2 \cdot \Delta I}{l} = L \cdot \Delta I$$

Z toho plyne vztah pro indukčnost cívky bez jádra: $L = \mu_0 \frac{S \cdot N^2}{l}$

Pro cívku s jádrem: $L = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{S \cdot N^2}{l}$

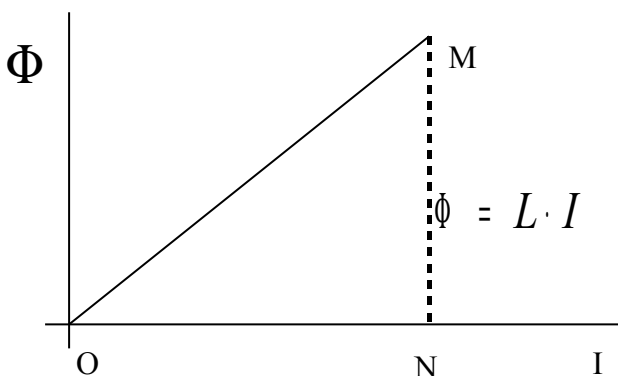
10.10 Energie magnetického pole cívky

Při zavedení proudu do cívky koná proud práci, která se zpočátku spotřebuje na vznik magnetické energie.

Změna magnetického indukčního toku: $\Delta \Phi = L \cdot \Delta I$. Necht' je $U = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Práce proudu, celkovou práci lze spočítat pomocí integrálů obejdeme grafem (viz. energie kondenzátoru): $\Delta W = U \cdot I \cdot \Delta t = L \cdot I \cdot \Delta I = \Phi \cdot \Delta I$

Graf práce magnetického pole



Práce je číselně rovna ploše trojúhelníku OMN : $W = E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$