

Nestacionární magnetické pole

Co je to nestacionární magnetické pole?

Magnetická indukce takového pole se s časem mění. Zdrojem nestacionárního magnetického pole je pohybující se permanentní magnet nebo elektromagnet, pohybující se vodič s konstantním nebo proměnným proudem nebo nepohybující se vodič s časově proměnným proudem.

Magnetický indukční tok



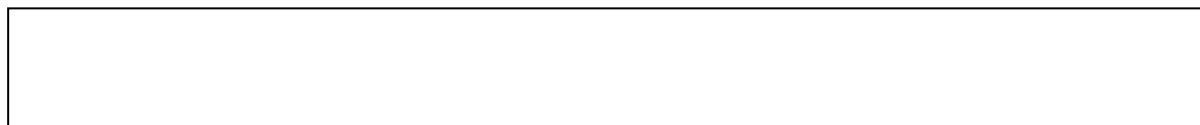
V homogenním magnetickém poli uvažujeme rovinnou plochu S , jejíž normála n má stejný směr jako vektor magnetické indukce. Potom můžeme zavést skalární veličinu **magnetický indukční tok** Φ .

Co je to magnetický indukční tok?

Je to tedy součin velikosti magnetické indukce B a obsahu plochy S , která je kolmá k \vec{B} . Úhel α bude nula.

Velikost magnetického indukčního toku: $\Phi = B \cdot S$

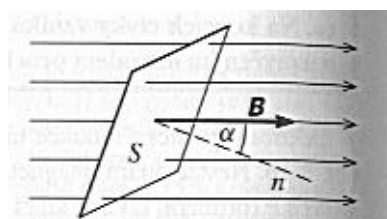
Jednotka magnetického indukčního toku Φ :



Co je jeden Webber?

Magnetický tok je 1 Wb, když plochou o obsahu 1 m² prochází magnetické pole o magnetické indukci 1 T (kolmo).

Co když plocha nebude kolmá k magnetické indukci?



Není-li uvažována plocha kolmá k magnetické indukci, tedy svírá-li normála n plochy s magnetickou indukci úhel α , pak je magnetický tok plochou dán vztahem: $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$.

Co když bude $\alpha = 90^\circ$?



V tomto případě je magnetický tok nulový.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos 90^\circ = 0 \text{ Wb}$$

Nás ani tak nezajímá velikost magnetického indukčního toku, jako jeho změna $\Delta\Phi$. Ta může nastat třemi způsoby:

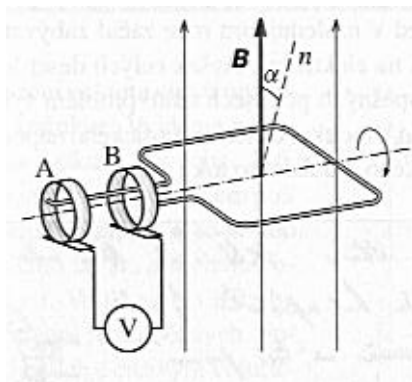
a) Změnou velikosti magnetické indukce (pokuse s magnetem a cívkou): $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S \cdot \cos \alpha$.

b) Změnou obsahu plochy: $\Delta\Phi = B \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha$

c) Změnou úhlu: $\Delta\Phi = B \cdot S \cdot \cos \Delta \alpha$. Toho docílíme otáčením plochy v magnetickém poli.

Přitom ve všech případech velmi záleží na tom, za jakou dobu Δt ke změně magnetického indukčního toku dojde. Proto zavádíme podíl $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, který nazýváme **časová změna magnetického indukčního toku**. Je to podíl změny magnetického toku a doby, během které k této změně dojde. **Je jasné, že má-li být časová změna magnetického toku co největší, musí se odehrát v co nekratším čase.**

Praxe:



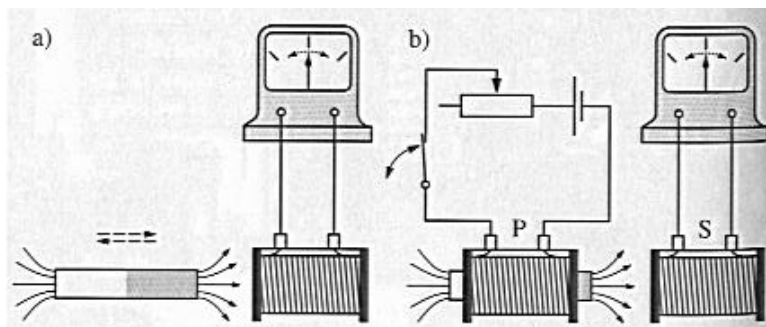
Pro praxi je důležitý případ, kdy je v homogenním magnetickém poli umístěn rovinný závit, který se otáčí kolem osy ležící v rovině závitu. Jestliže se závit otáčí úhlovou rychlostí ω , mění se úhel alfa s časem ($\alpha' = \omega \cdot t$).

Pro magnetický indukční tok platí vztah $\Delta\Phi = B \cdot \Delta S \cdot \cos(\omega \cdot t)$, což znamená, že se tato veličina mění harmonicky. Proto nás nepřekvapí, když pomocí citlivého voltmetru připojeného ke koncům rovinné cívky zjistíme, že indukované el. napětí má rovněž harmonický průběh.

Dodatek: Napětí indukované v jednom závitě je velmi malé. Jeho hodnotu však můžeme zvětšit tak, že místo jediného závitu použijeme rovinnou cívkou s N závity.

Toto se v praxi používá v elektrárnách, kde díky tomuto principu získáváme el. energii.

Elektromagnetická indukce



Nestacionární magnetické pole vytvoříme nejnadhěji tímto způsobem: Budeme pohybovat magnetem v blízkosti cívky. K cívkce je připojen citlivý voltmetr. Když magnet přiblížíme k cívkce, ručka voltmetru se vychýlí na jednu stranu a při oddálení magnetu se výchylka změní v opačnou. Jestliže bude magnet v klidu, zůstane i ručka voltmetru v klidu, v nulové poloze.

Nestacionární magnetické pole je příčinou vzniku indukovaného elektrického pole a tento jev nazýváme elektromagnetická indukce. Na koncích cívky vzniká indukované elektromotorické napětí a uzavřeným obvodem prochází indukovaný proud.

Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Indukované elektromotorické napětí U_i je rovno záporně vzaté časové změně magnetického indukčního toku.
$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Tento zákon objevil roku 1831 Michael Faraday. Na tomto zákonu pracoval 10 let.

Podívejme se na jeho slavné pokusy:

a) Prudké zasunutí magnetu do cívky



Vzroste magnetický indukční tok v cívce. Díky tomu nastane kladná časová změna (zvýšení) magnetického indukčního toku $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Na koncích cívky se indukuje napětí $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

b) Vysunutí magnetu z cívky

Prudce poklesne magnetický indukční tok v cívce, nastane záporná časová změna (pokles) magnetického indukčního toku $-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, na koncích cívky se indukuje napětí

$$U_i = -\frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

c) Proud v primární cívce – při zapnutí



Zapnutí (zesílení) proudu v primární cívce způsobí prudký vzrůst magnetické indukce i magnetického indukčního toku nejen v primární cívce, ale i v sekundární cívce. V sekundární cívce nastane kladná časová změna magnetického indukčního toku $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, na koncích

sekundární cívky se indukuje elektromotorické napětí $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

d) Proud v primární cívce při vypnutí

Při vypnutí (zeslabení) proudu v primární cívce prudce poklesne nejen magnetická indukce \vec{B} , ale i magnetický tok Φ . V obou cívkách nastane záporná časová změna magnetického indukčního toku. V sekundární cívce se indukuje indukované napětí $U_i = -\frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Kdy vzniká v cívce napětí 1V?

V cívce se indukuje elektromotorické napětí 1V při rovnoměrné změně magnetického indukčního toku o 1Wb za dobu 1s.

Indukovaný proud

Nahradíme cívku lehkým hliníkovým kroužkem, pohyblivě zavěšeným na stojánku. Jestliže do kroužku prudce zasuneme magnet, kroužek se vychýlí ve směru pohybu magnetu. Když naopak magnet vysuneme, kroužek se vychýlí na opačnou stranu, opět ve směru pohybu magnetu. Příčinou tohoto děje je **indukovaný elektrický proud**, který při elektromagnetické indukci vzniká v každém uzavřeném vodiči nebo uzavřeném el. obvodu. Dá se vyjádřit Ohmovým zákonem.

Nás zajímá jakým směrem se bude pohybovat hliníkový kroužek?

Tento problém vyřešil Emil Lenz.

Lenzův zákon udává směr indukovaného proudu:

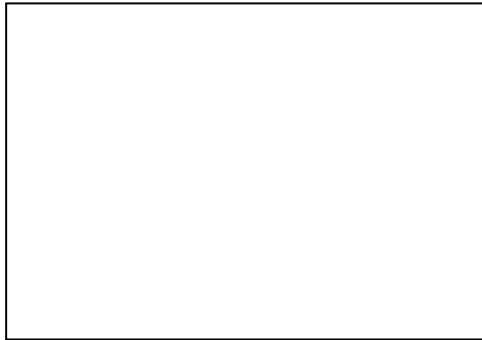
Indukovaný elektrický proud v obvodu má vždy takový směr, že svým magnetickým polem působí proti časové změně magnetického indukčního toku, která jej vyvolala.

Stručnější definice: Indukovaný proud působí svými účinky proti změně, která jej vyvolala.

Indukované proudy vznikají nejen v cívkách, ale i v masivních vodičích (plechy, desky, hranoly), které jsou v proměnném magnetickém poli.

Podívejme se na všechny čtyři Faradayovy pokusy z hlediska Lenzova zákona:

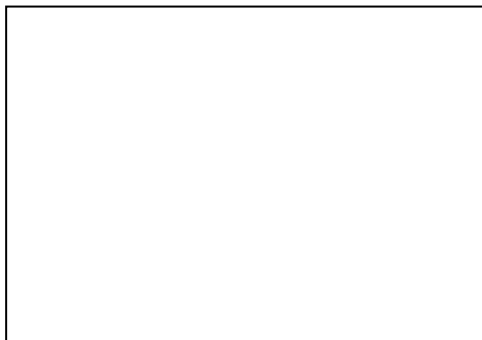
a) Prudké zasunutí magnetu do cívky



Při zasunutí magnetu do cívky prudce vzroste v cívce magnetický tok, nastává časová změna (kladná) magnetického indukčního toku. Na koncích cívky se indukuje indukované napětí, a protože je obvod uzavřen přes ampérmetr, vzniká též indukovaný elektrický proud I_i takového směru, že jeho magnetické pole o magnetické indukci \vec{B}_i působí proti

magnetické indukci \vec{B} magnetu. Cívka svým magnetickým polem odpuzuje magnet. brání se proti zasunutí magnetu. Indukovaný proud I_i se svým magnetickým polem brání proti časové změně magnetického indukčního toku, která tento proud I_i vyvolala.

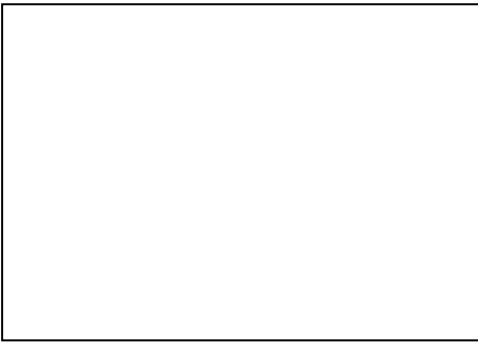
b) Vysunutí magnetu z cívky



Při vysunutí magnetu z cívky prudce klesne v cívce magnetický tok, nastane záporná časová změna magnetického indukčního toku. Na koncích cívky vzniká indukované napětí. Indukovaný proud I_i je takové směru, že jeho magnetické pole (mag. pole cívky) o magnetické indukci \vec{B}_i má stejnou orientaci jako magnetické pole vysunovacího magnetu s indukci \vec{B} . Magnetické indukce mají stejný směr. Cívka

svým magnetickým polem přitahuje magnet – brání se tedy proti vysunutí magnetu. To opět potvrzuje platnost Lenzova zákona

c) Jádno a dvě cívky (zapnutí)



Při zapnutí (zesílení) primární proudu I nastane prudká (kladná) časová změna magnetického indukčního toku. V sekundární cívce se indukuje indukovaný proud I_2 opačného směru, než je směr primárního proudu v primární cívce. Magnetické indukce \vec{B}, \vec{B}_i mají též opačný směr. Cívky se odpuzují. Je vidět, že sekundární cívka „se brání“ proti časové změně magnetického toku primární cívky. Opět to potvrzuje platnost Lenzova zákona.

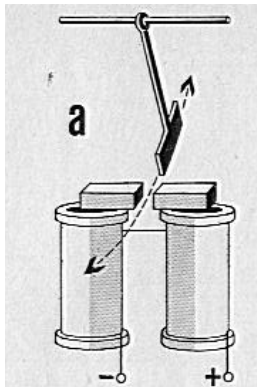
d) Jádno a dvě cívky (vypnutí)



Při vypnutí (zeslabení) primárního proudu I se v sekundární cívce indukuje proud I_2 stejného směru, jako je směr mizejícího primárního proudu I v primární cívce. Sekundární cívka vlastně za mizející magnetické pole s indukcí \vec{B}_i stejného směru jako \vec{B} . Cívka sekundární „se snaží“ zabránit změně magnetického toku primární cívky tím, že vytvoří své vlastní magn. pole. Opět to potvrzuje Lenzův zákon.

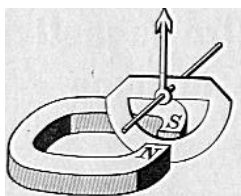
Foucaultovy proudy

Waltenhofenovo kyvadlo



Plná měděná deska kýve mezi póly silného elektromagnetu. Pokud není obvod elektromagnetu uzavřen, brzdí se pohyb desky jen nepatrně třením. **Jakmile se obvod uzavře, deska se téměř okamžitě zastaví.** Pohybem desky v nehomogenním magnetickém poli se v ní indukují uzavřené proudy, které se **nazývají proudy vířivé (Foucaultovy)**. Podle Lenzova zákona mají tyto proudy takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně, která je vyvolala. Poněvadž je vyvolal pohyb vodiče, brzdí svým magnetickým polem tento pohyb, proto se rychle zastaví.

Užití v praxi:



Tlumení kývání ručky měřicích přístrojů

Zde se využívá brzdícího účinku vířivých proudů k tlumení kývání ručky kolem rovnovážné polohy.

Zastavení kotouče elektroměru

V elektroměru dochází k tlumení hliníkového kotouče elektroměru, který zasahuje do úzké mezery mezi póly podkovového magnetu.

Transformátory

Vířivé proudy zahřívají nepohyblivé masivní vodiče, proto by se jádra transformátorů, elektromotorů a generátorů vznikem vířivých proudů silně zahřívala. Během krátké doby by došlo k jejich totálnímu zničení. Aby se tomu zabránilo, zhotovují se z mnoha tenkých plechů od sebe izolovaných.

Čím se od sebe izolují tenké plechy?

Vlastní indukce

Navazme na Faradayův pokus vzájemné indukce mezi primární a sekundární cívkou. Došlo tam k indukci proudu na sekundární cívce.

Jak by vypadala vlastní indukce?

Představme si jedinou cívku, která představuje sama pro sebe primární a současně sekundární cívku. To, co se odehrávalo v každé cívce zvlášť, probíhá nyní v jediné cívce. Tento jev se nazývá **vlastní indukce**.

Indukované elektrické pole vzniká ve vodiči i při změnách magnetického pole, které vytváří proud procházející vlastním vodičem.

Indukčnost cívky

Magnetický indukční tok Φ , přímo úměrný proudu v cívce $\Phi = L \cdot I$. A každá změna proudu ΔI má za následek změnu magnetického indukčního toku: $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$.

Dosadíme výraz $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$ do Faradayova zákona a dostaneme: $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{L \cdot \Delta I}{\Delta t}$

Vyjádříme si L a její jednotku:

Jednotkou indukčnosti L cívky je 1 H (henry):

Cívka má indukčnost 1H, když se v ní při rovnoměrné změně proudu o 1A za dobu 1s indukuje elektromotorické napětí 1V.

Důležité parametry u cívky:

U cívky sledujeme vedle odporu R , kapacity C , indukčnost L . Cívka s feromagnetickým jádrem má mnohem větší indukčnost než stejná cívka bez jádra, ale její indukčnost není konstantní.

Využití v praxi:

Tlumivky (součást obvodu zářivky)

Tlumivka je přístroj s jediným vinutím. Zařazuje se do elektrického obvodu k zvýšení jeho indukčnosti. Tlumivka se používá k tlumení proudových nárazů, ke spouštění velkých motorů, ke zlepšení paralelního chodu transformátorů apod.

Konstrukčně se podobá transformátoru. Vyrábí se buď v jádrovém provedení, s polovinou cívky na každém jádře, nebo plášťovém provedení. Jádro může být železné, nebo i z nemagnetického materiálu.

Tlumivka v obvodu



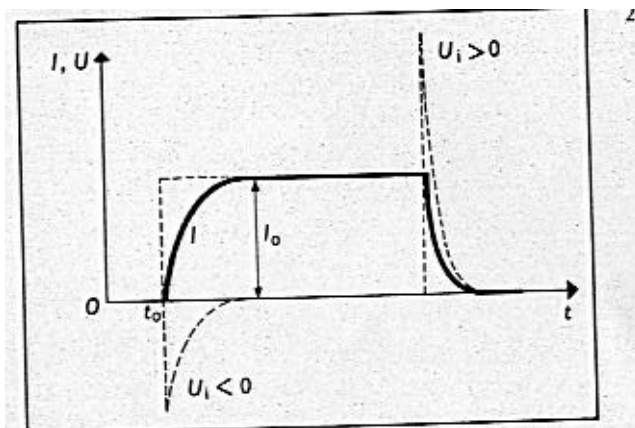
Při zapojení vypínače se žárovka 2 napájená přes cívku rozsvítí později než žárovka 1. Cívka při zapnutí tlumí proudový náraz, brání se průchodu proudu který pozvolna narůstá.

Doutnavka v obvodu



Doutnavka se zápalným napětím 60 – 90 V. Při vypnutí vypínače se indukuje v cívce značně větší indukované elektromotorické napětí U_i než je U_e zdroje, a to stejné polarity jako je polarity U_e zdroje. Toto napětí U_i rozsvítí doutnavku (tedy musí mít velikost přes 60 V).

Grafické znázornění nárůstu proudu v cívce

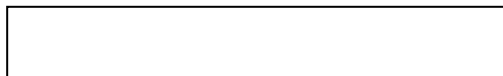


↳ Nezapomeňme si uvědomit, že nárůst proudu je pozvolný. Tudíž i po vypnutí obvodu je úbytek proudu též pozvolný.

Vysvětlení cívka v obvodu

Sledujme nyní, jak se bude měnit proud v obvodu s cívkou a indukované elektromotorické napětí U_i v cívce při zapnutí a vypnutí proudu v cívce.

schématická značka cívky v obvodu:



Zapojení cívky v reálném životě



1) Zapnutí proudu do cívky

Proud se zvětšuje ($\Delta I > 0$); na koncích cívky se indukuje elektromotorické napětí U_i opačné polaritě než je polarita napětí zdroje (U_e).

$$U_i = - \frac{L \cdot \Delta I}{\Delta t}$$

mínus znamená opačnou polaritu indukčního napětí

Výsledný proud v obvodu určíme z Ohmova zákona:

$$I = \frac{\text{celkové elektromotorické } U}{\text{celkový odpor obvodu}} = \frac{U_e + U_i}{R}$$

V okamžiku zapnutí se proud $I = 0$, proto: $0 = \frac{U_e + U_i}{R} \Rightarrow 0 = U_e + U_i \Rightarrow -U_i = U_e$

Závěr:

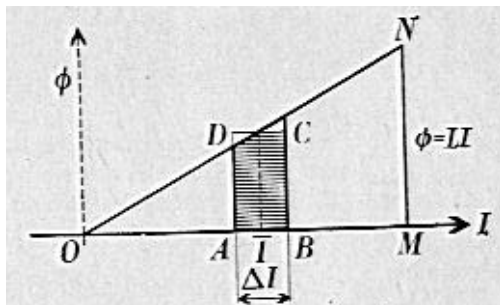
- Obě elektromotorické napětí mají stejnou velikost ale opačnou polaritu.
- Proud I pozvolna narůstá za dobu 10^{-3} s až 10 s nabude maximální hodnoty.

2) Vypnutí proudu v cívce

Proud I prudce klesá ($\Delta I < 0$). Na koncích cívky se indukuje elektromotorické napětí U_i stejné polaritě jako U_e , ale značně větší než je U_e zdroje.

$$U_i = -L \frac{(-\Delta I)}{\Delta t} = +L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad - U_i - \text{ má stejnou polaritu jako zdroj}$$

Energie magnetického pole cívky



Podobně jako el. pole má také pole magnetické energii, která se nazývá magnetická energie. Při uzavření elektrického obvodu s cívkou, naroste nám indukční tok. To je znázorněno na obrázku pomocí úsečky ON.

Obrázek sice vypadá komplikovaně, ale můžeme si říci, že práci magnetického pole nám udává trojúhelník OMN. Vypočítáme jeho plochu a tím i zjistíme výslednou energii magnetického pole cívky:

POZOR: REALITA MŮŽE BÝT JINÁ

Vše platí, vyloučíme-li všechny jiné přeměny energie. Tzn. v praxi těžko dosáhneme maximální hodnoty proudu.

Pro cívku s feromagnetickým jádrem tento vztah neplatí, protože indukčnost L cívky s tímto jádrem není konstantní (závisí na proudu v cívce) a vztah pro indukčnost není lineární. Platí pro ni vztah složitější. Po vypnutí vypínače nezánikne proud v obvodu okamžitě, ale ve velmi krátké době. Za tutéž dobu zanikne i magnetické pole cívky. Jeho energie se při tom přemění na jiné formy energie, převážně na vnitřní energii obvodu.