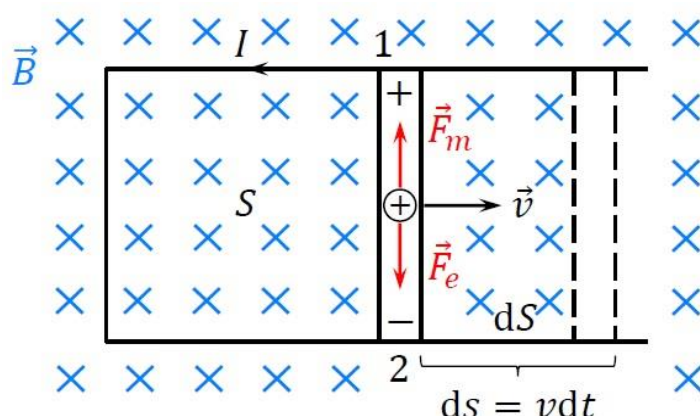


Úloha 19

Studium elektromagnetická indukce

Faradayův zákon

Mějme přímý vodič délky l , který se pohybuje po jiném vodiči rychlostí \vec{v} kolmo na homogenní magnetické pole (viz obr. 1). Na kladné náboje uvnitř pohybujícího se vodiče bude působit magnetická síla, která v naší situaci způsobí pohyb těchto nábojů k horní části vodiče 2. V dolní části vodiče 1 se tak bude hromadit záporný náboj. Mezi konci vodiče 1 a 2 se vytvoří elektromotorické napětí U_e (stane se z něj zdroj napětí) a obvodem tak bude procházet elektrický proud I .



Obr. 1 – pohyb vodiče v magnetickém poli

Pokud vezmeme v úvahu pouze pohybující se vodič, tak po chvíli nastane statická rovnováha mezi vytvořeným elektrickým polem a magnetickou silou a bude platit $F_e = F_m$. V případě uzavřeného obvodu nastane se stejnou podmínkou dynamická rovnováha vlivem přichodících a odchozích nábojů kvůli procházejícímu proudu obvodem. Vlivem toho má vytvořené elektrické pole mezi konci vodiče 1 a 2 elektrickou intenzitu o velikosti

$$E = \frac{F_e}{|Q|} = \frac{F_m}{|Q|} = \frac{|Q\vec{v} \times \vec{B}|}{|Q|} = vB \sin 90^\circ = vB, \quad (1)$$

kde \vec{B} je intenzita magnetického pole. Použitím integrální definice pro napětí, které vznikne mezi konci vodiče 1 a 2, tak bude pro jeho velikost platit

$$|U_e| = \left| \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} \right| = \int_1^2 E dl = El = lvB. \quad (2)$$

Pokud rozepíšeme rychlost pohybu náboje jako $v = \frac{ds}{dt}$, pak platí

$$|U_e| = lvB = l \frac{ds}{dt} B = \frac{d(ls)}{dt} B = \frac{dS}{dt} B = \frac{d(BS)}{dt} = \frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (3)$$

kde Φ_m je magnetický indukční tok plochou S obepnutou obvodem. **K indukci napětí dochází, když se v čase mění magnetický tok.**

Vztah, který jsme odvodili, platí pro velikost napětí. Je tedy třeba ještě určit jeho znaménko. Zvolme si směr vektoru \vec{S} např. ve směru vektoru \vec{B} . Podle obr. 1 se plocha S , kterou prochází magnetické pole, s pohybem vodiče zvětšuje. Platí tedy $dS > 0$ a to způsobí, že i změna toku je kladná $d\Phi_m = BdS > 0$. Efekt, který ale vyvolá obvod jako celek, je opačný kvůli směru proudu v obvodu. Použitím Ampérova pravidla pravé ruky dostaneme, že proud v obvodu způsobuje magnetické pole v opačném směru, než je vektor magnetické indukce \vec{B} . Tok způsobený tímto polem tudíž bude opačný. Indukovaným elektromotorickým napětím se obvod snaží potlačit působení vnějšího pole a platí

$$U_e = -\frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (4)$$

kde znaménko mínus je tzv. Lenzův zákon. Popisuje, že indukované napětí vzniká tak, aby působilo proti změně, která ho vyvolala. Jinými slovy obvod se snaží setrvat v předchozím stavu potlačením změny. Vztah (4) se nazývá **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**.

Cívka není nic jiného než sériové zapojení N závitů, a proto napětí na cívce bude součtem napětí na závitěch

$$U_e = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d(N\Phi_m)}{dt} = -\frac{d(NBS)}{dt}, \quad (5)$$

kde magnetický indukční tok jedním závitěm je $\Phi_m = BS$.

Zadání:

- 1) Určete závislosti indukovaného napětí na magnetické indukci, počtu závitů cívky, frekvenci a průřezu cívky. Graficky je znázorněte.

Pokud se cívka nachází v proměnném magnetickém poli, tak se na ní indukuje elektromotorické napětí. Velikost okamžité hodnoty napětí bude

$$u = N \frac{d\Phi_m}{dt} = \frac{d(N\Phi_m)}{dt} = \frac{d(NBS)}{dt}. \quad (6)$$

Jestliže cívkou protéká střídavý proud i , pak i magnetická indukce v dutině cívky se bude v čase měnit a platí pro ni

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{l} = \mu_0 ni, \quad (7)$$

kde N je počet závitů cívky, l její délka a $n = \frac{N}{l}$ je počet závitů na jednotku délky.

Naše experimentální sestava sestává z větší cívky, skrz kterou protéká proud i . Tato cívka vytváří proměnné magnetické pole vlivem proměnného elektrického proudu. Uvnitř větší cívky se nachází menší cívka. Proměnné magnetické pole na této cívce indukuje napětí. Větší cívka má počet závitů na jednotku délky $n = 485 \text{ m}^{-1}$.

Střídavý proud je popsán vztahem

$$i = I_0 \sin \omega t \quad (8)$$

a magnetické indukce v dutině větší cívky pak je dána jako

$$B = \mu_0 n I_0 \sin \omega t. \quad (9)$$

Pro indukované napětí pak dostáváme

$$u = N \frac{d(BS)}{dt} = NS \frac{dB}{dt} = NS \mu_0 n I_0 \omega \cos \omega t. \quad (10)$$

Pro efektivní hodnotu napětí pak platí.

$$U = NS \mu_0 n I \omega = \omega NBS = 2\pi fNBS, \quad (11)$$

kde f je frekvence střídavého proudu a I je efektivní hodnota střídavého proudu a platí $B = \mu_0 n I$.

Měření

1) Vezměte menší cívku s větším počtem závitů (300). Zvolte frekvenci v rozmezí 1-10 kHz a držte ji konstantní během měření. Měňte proud v rozmezí od 20-60 mA po zhruba 10 mA.

měření	$I(\text{A})$	$B(\text{T})$	$U(\text{mV})$	$\log B$	$\log U$
1					
2					
3					
4					
5					

$$U = \omega N B^a S \rightarrow \log U = \log \omega N S + a \log B \rightarrow y = b + ax$$

Ukažte z lineární regrese, že mocnina a pro B^a je rovna 1.

2) Vezměte menší cívky se stejným průměrem (41 mm), ale s různým počtem závitů (100, 200, 300). Zvolte frekvenci v rozmezí 1-10 kHz a držte ji konstantní během měření. Zvolte hodnotu proudu v rozmezí od 20-60 mA a držte ji konstantní během měření.

měření	N	U (mV)	$\log N$	$\log U$
1				
2				
3				

$$U = \omega N^a BS \rightarrow \log U = \log \omega BS + a \log N \rightarrow y = b + ax$$

Ukažte z lineární regrese, že mocnina a pro N^a je rovna 1.

3) Vezměte menší cívku s větším počtem závitů (300). Zvolte hodnotu proudu v rozmezí od 20-60 mA a držte ji konstantní během měření. Měňte frekvenci v rozmezí od 1-10 kHz po zhruba 2 kHz.

měření	f (Hz)	U (mV)	$\log f$	$\log U$
1				
2				
3				
4				
5				

$$U = 2\pi f^a NBS \rightarrow \log U = \log 2\pi NBS + a \log f \rightarrow y = b + ax$$

Ukažte z lineární regrese, že mocnina a pro f^a je rovna 1.

4) Vezměte menší cívky se stejným počtem závitů (300), ale s různým průměrem (26 mm, 33 mm, 41 mm). Zvolte frekvenci v rozmezí 5-10 kHz a držte ji konstantní během měření. Zvolte hodnotu proudu v rozmezí od 20-60 mA a držte ji konstantní během měření.

měření	d (cm)	S (cm ²)	U (mV)	$\log S$	$\log U$
1					
2					
3					

$$U = \omega NBS^a \rightarrow \log U = \log \omega NB + a \log S \rightarrow y = b + ax$$

Ukažte z lineární regrese, že mocnina a pro S^a je rovna 1.

Pokud jsou všechny mocniny rovny jedné, pak je vztah $U = \omega NBS$ platný.

Nejistoty měření

Nejistoty měření v této úloze vlivem složitosti neurčujeme.