

F3	Práce s měřicími přístroji: indukčnost	3D2
30. 10. 2017		Meinlschmidt

ZADÁNÍ:

1. a) Popište vlastnosti ideálních prvků střídavého obvodu R, L, C
b) Vysvětlete princip činnosti vibračního kmitoměru
1. Změřte kmitoměrem frekvenci síťového napětí f
2. Změřte indukčnost L_{PR} všech předložených cívek pomocí přístroje na měření indukčnosti
3. Změřte indukčnost L_{OHM} předložených cívek bez feromagnetického jádra pomocí Ohmovy metody
4. Změřte indukčnost L_{3V} předložené cívky s feromagnetickým jádrem metodou tří voltmetrů
5. Vypočtete fázový posun vzniklý na cívce, dále pak činný, jalový a zdánlivý výkon na měřené cívce
6. Nakreslete fázorový diagram měření pomocí tří voltmetrů
7. Porovnejte hodnoty naměřené přístrojem na měření indukčnosti s hodnotami vypočítanými pomocí Ohmovy metody či metody tří voltmetrů

TEORIE:

Vlastní indukčnost L [H] je skalární fyzikální veličina, vyjadřující schopnost dané konfigurace elektricky vodivých těles protékáných elektrickým proudem vytvářet ve svém okolí magnetické pole. Je také jedna ze základních vlastností vodičů a dalších elektrotechnických prvků, zejména cívek. Vlastní indukčnost závisí pouze na materiálových vlastnostech prostředí, ve kterém se magnetické pole vytváří.

V obvodech proměnného elektrického proudu způsobuje indukčnost jeho prvků zpoždění průběhu proudu oproti změně napětí zdroje, a to díky *Faradayovo zákonu* (o indukci elektrického napětí v proměnlivém magnetickém poli) a *Lenzovo zákonu* (elektrické napětí v proměnlivém magnetickém poli působí proti směru proudu, který jej vytváří). V obvodech harmonického proudu se tento vliv popisuje pomocí **reaktance** X [Ω] (jalového odporu) a **fázového posunu** proudu proti napětí φ [$^\circ$]. Jelikož proud v průběhu mění svůj směr, je nutno některé veličiny považovat za vektorové.

Reaktance $X [\Omega]$ je veličina, kterou zpravidla tvoří součet **induktivní reaktance** $X_L [\Omega]$ a **kapacitní reaktance** $X_C [\Omega]$. $X = X_L + X_C$; Charakter reaktance udávají již zmíněné dvě složky. Buď je reaktance kladná (je kapacitního charakteru) nebo naopak záporná (je charakteru induktivního). Na jednotkové kružnici (fázorovém diagramu) směřuje nahoru nebo dolů vždy po ose Y. Technicky vzato i reaktanci považujeme za vektorovou veličinu, avšak, jelikož se pohybuje jen na jedné ose, je její značení jako vektorovou zbytečné. Pokud bychom značili reaktanci jako vektor, bylo by potřeba tak značit i elektrický odpor ve střídavých obvodech.

Reaktance je imaginární složkou **impedance** $\bar{Z} [\Omega]$. Na její reálné ose se nachází elektrický odpor **R**, který na rozdíl od reaktance způsobuje nulový fázový posun mezi proudem a napětím. Jelikož se impedance \bar{Z} cívky s rostoucí frekvencí zvyšuje, můžeme tak cívku využít na oddělení nízko-frekvenčního proudu od vysoko-frekvenčního.

Ohmova metoda

$$R = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}$$

$$|Z^2| = R^2 + X^2$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$L_{OHM} = \frac{\sqrt{|Z^2| - R^2}}{\omega}$$

Metoda tří voltmetrů

$$U_3^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2 \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \beta$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{U_1^2 + U_2^2 - U_3^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}$$

$$\varphi = 180^\circ - \beta$$

$$U_R = U_2 \cdot \cos \varphi$$

$$U_L = U_2 \cdot \sin \varphi$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$R_{3V} = \frac{U_R}{I}$$

$$L_{3V} = \frac{U_L}{I \cdot \omega}$$

ODPOVĚDI NA OTÁZKY:

a) Popište vlastnosti ideálních prvků střídavého obvodu R, L, C

Každá součástka (obvod) má v praxi následující vlastnosti – odpor, indukčnost a kapacitu. Pro snazší popis těchto veličin můžeme užít tzv. ideální prvky – rezistor, cívku, kondenzátor. U těchto prvků se uplatňuje vždy jen jediný z parametrů.

Rezistor popisuje činný odpor (schopnost převést elektrickou energii na tepelnou). Cívka naopak jalový odpor (napětí předbíhá proud o 90°) a indukčnost (vytváří magnetické pole a indukuje v něm napětí). Nakonec kondenzátor, který stejně jako cívka klade jalový odpor ale o opačném směru (proud předbíhá napětí o 90°) a jeho vlastností je kapacita (schopnost udržet elektrický náboj po nějakou dobu).

- Rezistor $R \in (0, \infty)$; $L = 0$; $C = 0$
- Cívka $R = 0$; $L \in (0, \infty)$; $C = 0$
- Kondenzátor $R = 0$; $L = 0$; $C \in (0, \infty)$

b) Vysvětlete princip činnosti vibračního kmitoměru

Měřicí ústrojí je sestaveno na principu mechanické rezonance. Na společném nosníku je upevněna řada pružin (jazýčků), na které působí elektromagnet buzený měřeným střídavým proudem. Jazýčky jsou naladěny na určitý, vzájemně blízký kmitočet.

Kmitoměr se nesmí užívat v místech, kde dochází k otřesům, jinak jsou logicky jeho měření nepřesná. Naměřenou hodnotu zjistíme podle nejvíce rezonujícího jazýčku.

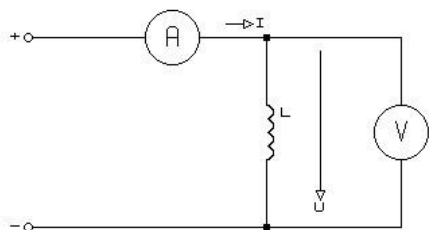
c) Porovnání hodnot

Cívky bez feromagnetického jádra:

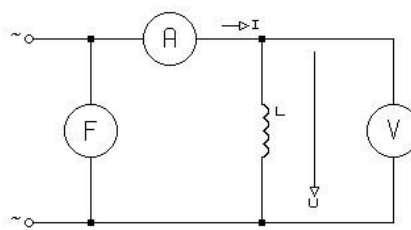
	$L_{PR} [H]$	$L_{OHM} [H]$	Rozdíl	%
1	1,886	1,779	0,107	5,673
2	0,333	0,249	0,084	25,225
3	0,513	0,352	0,161	31,384
4	0,299	0,292	0,007	2,341
5	4,940	3,336	1,604	32,470

SCHÉMA ZAPOJENÍ:

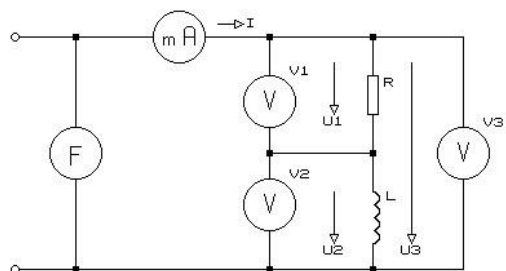
Měření odporu cívky Ohmovou metodou



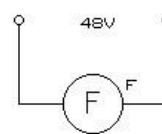
Měření impedance cívky Ohmovou metodou



Měření metodou tří voltmetrů



Měření frekvence
vibračním kmitoměrem



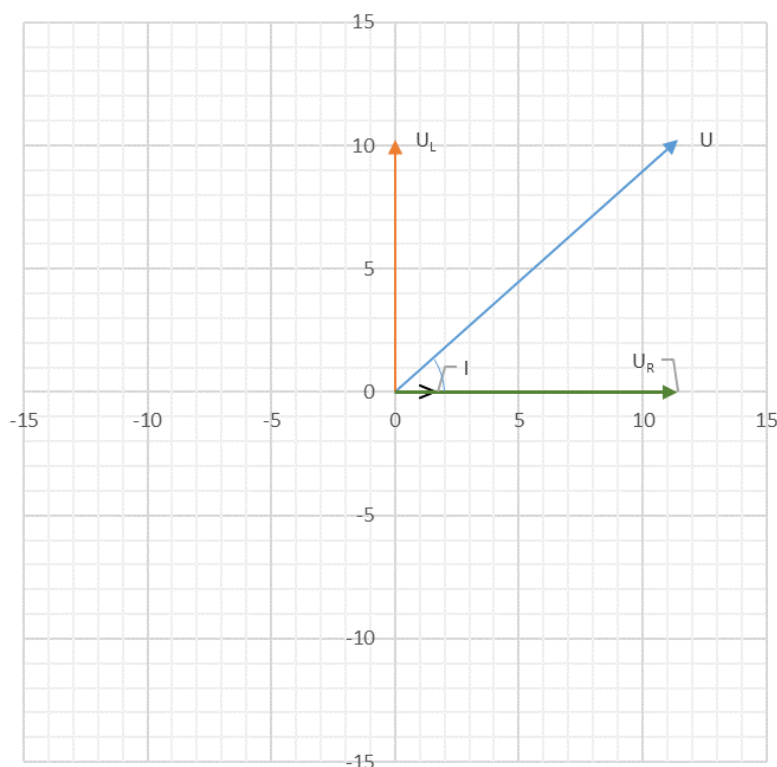
POUŽITÉ PŘÍSTROJE A POMŮCKY:

Název	Typové označení	Inventární číslo
Vibrační kmitoměr	E 74	2489
RLC-Metr	UNI-T UT603	
Napájecí zdroj	TESLA NZ 2	S064
Voltmetr 1	UNI-T UT39C	947/7
Voltmetr 2	UNI-T UT39C	947/9
Voltmetr 3	UNI-T UT39C	947/6
Ampérmetr	UNI-T UT33A	947/5

POPIS PRÁCE:

1. Příprava pomůcek a měřených součástek
2. Přímé měření frekvence f střídavého proudu použitého zdroje
3. Přímé měření vlastní indukčnosti L_{PR} na cívkách bez feromagnetického jádra
4. Zapojení prvního obvodu s cívkou bez feromagnetického jádra podle schématu (Ohmova metoda)
5. Přímé měření napětí U_{DC} a proudu I_{DC} (při zdroji stejnosměrném proudu)
6. Výpočet elektrického odporu R
7. Přímé měření napětí U_{AC} a proudu I_{AC} (při zdroji střídavého proudu)
8. Výpočet impedance Z a vlastní indukčnosti cívky L_{OHM}
9. Zapojení druhého obvodu s cívkou s feromagnetickým jádrem podle schématu (metoda tří voltmetrů)
10. Přímé měření proudu I , celkového napětí U_3 , napětí na rezistoru U_1 , napětí na cínce U_2 , odporu rezistoru R a vlastní indukčnosti cívky L_{PR}
11. Výpočet jalového U_L a činného U_R napětí na cínce, činného odporu cívky R_{3V} , vlastní indukčnosti cívky L_{3V} , fázového posunu φ , činného výkonu cívky P_L , jalového výkonu cívky Q_L a zdánlivého výkonu cívky S_L

GRAF:



TABULKY:

Zkratky:

- L_{PR} Vlastní indukčnost cívky změřená přímo přístrojem
- U_{DC} Napětí na cívce při zdroji stejnosměrného proudu změřené přímo přístrojem
- I_{DC} Proud na cívce při zdroji stejnosměrného proudu změřený přímo přístrojem
- R Elektrický odpor cívky při zdroji stejnosměrného proudu změřený nepřímo pomocí *Ohmova zákona*
- U_{AC} Napětí na cívce při zdroji střídavého proudu změřené přímo přístrojem
- I_{AC} Proud na cívce při zdroji střídavého proudu změřený přímo přístrojem
- f Frekvence střídavého proudu změřená přímo přístrojem
- Z Impedance cívky při zdroji střídavého proudu změřená přímo přístrojem
- L_{OHM} Vlastní indukčnost cívky změřená nepřímo pomocí vzorce

Cívky bez feromagnetického jádra:

	$L_{PR} [H]$	$U_{DC} [V]$	$I_{DC} [A]$	$R [\Omega]$	$U_{AC} [V]$	$I_{AC} [A]$	$f [Hz]$	$Z [\Omega]$	$L_{OHM} [H]$
1	1,886	11,74	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$1,863 \cdot 10^3$	19,06	$9,8 \cdot 10^{-3}$	50	$1,945 \cdot 10^3$	1,779
2	0,333	11,85	$15,5 \cdot 10^{-3}$	$0,765 \cdot 10^3$	18,92	$24,6 \cdot 10^{-3}$	50	$0,769 \cdot 10^3$	0,249
3	0,513	12,00	$23,8 \cdot 10^{-3}$	$0,904 \cdot 10^3$	18,80	$36,4 \cdot 10^{-3}$	50	$0,516 \cdot 10^3$	0,352
4	0,299	11,54	$81,5 \cdot 10^{-3}$	$0,142 \cdot 10^3$	18,43	$109,0 \cdot 10^{-3}$	50	$1,017 \cdot 10^3$	0,292
5	4,940	12,07	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$2,944 \cdot 10^3$	19,06	$6,1 \cdot 10^{-3}$	50	$1,863 \cdot 10^3$	3,336

Zkratky:

- f Frekvence střídavého proudu změřená přímo přístrojem
- I Proud v obvodu změřený přímo přístrojem
- U_1 Napětí na rezistoru změřené přímo přístrojem
- U_2 Napětí na cívce změřené přímo přístrojem
- U_3 Celkové napětí změřené přímo přístrojem
- R Elektrický odpor rezistoru změřený přímo přístrojem
- U_L Napětí jalové složky na cívce změřené nepřímo pomocí vzorce
- U_R Napětí činné složky na cívce změřené nepřímo pomocí vzorce
- R_{3V} Činný odpor cívky změřený nepřímo pomocí metody tří voltmetrů
- L_{3V} Vlastní indukčnost cívky změřena nepřímo pomocí metody tří voltmetrů
- φ Fázový posun napětí proti proudu v obvodu
- P Činný výkon obvodu
- Q Jalový výkon obvodu
- S Zdánlivý výkon obvodu
- L_{PR} Vlastní indukčnost cívky změřena přímo přístrojem

Cívka s feromagnetickým jádrem:

f [Hz]	50	R [Ω]	$0,754 \cdot 10^3$	φ [$^\circ$]	$41,901^\circ$
I [A]	$1,73 \cdot 10^{-3}$	U_L [V]	10,25	P_L [W]	$24,658 \cdot 10^{-3}$
U_1 [V]	4,75	U_R [V]	11,43	Q_L [VAR]	$22,153 \cdot 10^{-3}$
U_2 [V]	15,35	R_{3V} [Ω]	$6,61 \cdot 10^3$	S_L [VA]	$33,130 \cdot 10^{-3}$
U_3 [V]	19,15	L_{3V} [H]	18,86	L_{PR} [H]	7,47

VÝPOČTY:

Úhlová rychlost ω [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50$$

$$\omega = 0,314 \cdot 10^3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cívky bez feromagnetického jádra:

Odpor R [Ω]:

$$R = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R = \frac{11,74}{6,3 \cdot 10^{-3}}$$

$$R = 1,863 \cdot 10^3 \Omega$$

Impedance \bar{Z} [Ω]:

$$|Z| = \frac{U_{AC}}{I_{AC}}$$

$$|Z| = \frac{19,06}{9,8 \cdot 10^{-3}}$$

$$|Z| = 1,945 \cdot 10^3 \Omega$$

Induktivní reaktance X_L [Ω]:

$$X_L^2 = Z^2 - R^2$$

$$X_L = \sqrt{1,945 \cdot 10^3^2 - 1,863 \cdot 10^3^2}$$

$$X_L = 0,559 \cdot 10^3 \Omega$$

Vlastní indukčnost L [H]:

$$L_{OHM} = \frac{X_L}{\omega}$$

$$L_{OHM} = \frac{0,559 \cdot 10^3}{0,314 \cdot 10^3}$$

$$L_{OHM} = 1,780 \text{ H}$$

Cívka s feromagnetickým jádrem:

Fázový posun φ [°]:

$$\beta = \cos^{-1} \frac{U_1^2 + U_2^2 - U_3^2}{2 \cdot U_1 \cdot U_2}$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{4,75^2 + 15,35^2 - 19,15^2}{2 \cdot 4,75 \cdot 15,35}$$

$$\varphi = 180^\circ - 138,098^\circ$$

$$\varphi = 41,901^\circ$$

Napětí jalové složky na cívce U_L [V]:

$$U_L = U_2 \cdot \sin \varphi$$

$$U_L = 15,35 \cdot \sin 41,901^\circ$$

$$U_L = 10,25 \text{ V}$$

Napětí činné složky na cívce U_R [V]:

$$U_R = U_2 \cdot \cos \varphi$$

$$U_R = 15,35 \cdot \cos 41,901^\circ$$

$$U_R = 11,43 \text{ V}$$

Napětí cívky U_{2ZK} [V] – zkouška:

$$U_{2ZK}^2 = U_L^2 + U_R^2$$

$$U_{2ZK} = \sqrt{U_L^2 + U_R^2}$$

$$U_{2ZK} = \sqrt{10,25^2 + 11,43 \cdot 10^{-3}^2}$$

$$U_{2ZK} = 15,353 \text{ V}$$

$$U_2 \cong U_{2ZK}$$

Odpor činné složky na cívce změřený pomocí metody tří voltmetrů R_{3V} [Ω]:

$$R_{3V} = \frac{U_R}{I}$$

$$R_{3V} = \frac{11,43}{1,73 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{3V} = 6,61 \cdot 10^3 \Omega$$

Vlastní indukčnost cívky změřená pomocí metody tří voltmetrů L_{3V} [H]:

$$L_{3V} = \frac{U_L}{I \cdot \omega}$$

$$L_{3V} = \frac{10,25}{1,73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,314 \cdot 10^3}$$

$$L_{3V} = 18,86 \text{ H}$$

Činný výkon cívky P_L [W]:

$$P_L = U_2 \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_L = 15,35 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 41,901^\circ$$

$$P_L = 19,765 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Jalový výkon cívky Q_L [VAR]:

$$Q_L = U_2 \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$Q_L = 15,35 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 41,901^\circ$$

$$Q_L = 11,735 \cdot 10^{-3} \text{ VAR}$$

Zdánlivý výkon cívky S_L [VA]:

$$S_L = U_2 \cdot I$$

$$S_L = 15,35 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3}$$

$$S_L = 23,556 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

Zdánlivý výkon cívky S_L [VA] – zkouška:

$$S_{LZK}^2 = P_L^2 + Q_L^2$$

$$S_{LZK} = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2}$$

$$S_{LZK} = \sqrt{19,765 \cdot 10^{-3^2} + 11,735 \cdot 10^{-3^2}}$$

$$S_{LZK} = 22,986 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$S_L \cong S_{LZK}$$

SPOLUPRACOVALI:

Mokrejš Filip

ZÁVĚR:

Všechny úkoly se zadání byly splněny. Toto měření bylo časově velmi náročné především vzhledem k teorii, úpravám, formátování apod. Shrnul jsem se princip cívek a jejich užití vč. jejich chování v praxi. Samotné vypracování mi zabralo přes 2 týdny, kvůli čemuž nestíhám odevzdávat a snížené hodnocení pak v konečném důsledku je stejné, jako kdybych práci odbyl.

Pokud jsem nebyl omezen přesností měření, snažím se vždy užít exponenciální tvar čísla s alespoň 3 platnými číslicemi po zaokrouhlení. V některých situacích mi přišlo užití exponenciálního zápisu zbytečné.

Porovnání hodnot mne překvapilo, rozdíl mezi čísly se pohyboval přibližně v rozmezí od 2 do 30 % u cívek bez feromagnetického jádra. Výpočet ovlivňuje mnoho faktorů, a tak se na jeho přesnosti mohlo podílet zapojení měřících přístrojů v obvodu a zaokrouhlování.

U výpočtů, u kterých bylo možno, jsem provedl zkoušku, která byla vždy přibližně rovna. Při výpočtu výkonů dle zadání jsem si až při kontrole všiml, že zadání požaduje výkon cívky a ne celého obvodu, upravil jsem proto veličiny o dolní index označující cívku.

Při řešení rezistoru v obvodu s cívkou s feromagnetickým jádrem jsem nevěděl, zda elektrický odpor rezistoru měřit přímo, či vypočítat. Vzhledem k tomu, že tyto hodnoty se velmi lišily (pravděpodobně kvůli měřícím zařízením), jsem elektrický odpor raději změřil.

V poslední řadě jsem pátral v normách, zda využívat označení ~~induktance~~ či induktivní reaktance. Bohužel žádná norma v českém jazyce toto označení nezná a vždy pojednává pouze o reaktanci. Nejblíže byla norma ČSN EN 80000-6, která ale pouze užívá pojmy reaktance a vlastní indukčnost namísto samotného slova ~~indukčnost~~. Jelikož induktance je velmi podobná anglickému výrazu „inductance“ (vyjadřující vlastní indukčnost, nikoli reaktanci!) je lepší vždy užívat induktivní reaktance, aby bylo jasné, že myslíme složku reaktance a nikoli vlastní indukčnost.