

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

## PRAKTIKUM ...

Úloha č. ....

Název: .....

Pracoval: ..... stud. skup. .... dne .....

Odevzdal dne: .....

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
<b>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval: ..... dne .....

# Pracovní úkoly

1. Změřte závislost indukčnosti cívky na procházejícím proudu pro tyto případy:
  - (a) cívka bez jádra,
  - (b) cívka s otevřeným jádrem,
  - (c) cívka s uzavřeným jádrem.
2. Přímou metodou změřte odpor cívky a určete její kvalitu.
3. Změřte velikost kapacit kondenzátorů z kapacitní dekády.
4. Odhadněte přesnost měření.

## 1 Teoretická část

### 1.1 Impedance, indukance a indukčnost cívky a její kvalita

V obvodu střídavého napětí  $\hat{U}$  a proudu  $\hat{I}$  harmonického průběhu platí pro jejich efektivní hodnoty  $U$  a  $I$ :

$$U = ZI, \quad (1)$$

kde  $Z$  je velikost tzv. impedance  $\hat{Z}$  obvodu. Ta je při zapojení ideální cívky rovna (např. [1]):

$$Z = \omega L, \quad (\hat{Z} = j\omega L) \quad (2)$$

kde  $L$  je její indukčnost a  $\omega$  je úhlová frekvence napětí (z frekvence  $f$  jako  $\omega = 2\pi f$ ), člen  $\omega L$  se nazývá indukance cívky a napětí je vůči proudu v obvodu posunuto o  $\pi/2$ . V každé reálné cívce však dochází ke ztrátám elektrické energie (např. vlivem odporu jejího vinutí). Toto chování popisujeme náhradním sériovým zapojením indukčnosti  $L$  a odporu  $R_L$ , jak je vidět i na obr. 1. Velikost impedance  $Z$  je pak dána vztahem

$$Z = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2}, \quad (3)$$

kde  $R_L$  je již zmiňovaný odpor reálné cívky. Indukčnost  $L$  můžeme nyní vyjádřit jako

$$L = \frac{\sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_L^2}}{\omega}. \quad (4)$$

Činitel jakosti  $Q$  popisuje kvalitu cívky. Je definován jako tangens fázového posunutí napětí vůči proudu  $\varphi$

$$Q = \tan \varphi = \frac{\omega L}{R_L}, \quad (5)$$

tedy kolikrát je její indukance větší než parazitní odpor.

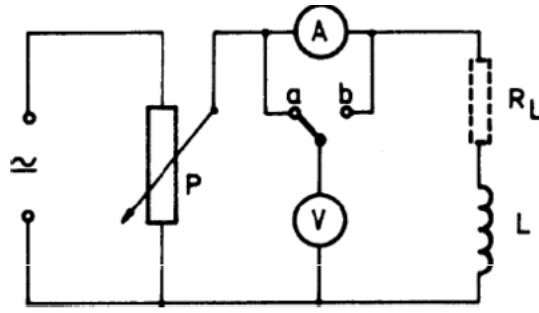
### 1.2 Kapacita a kapacitance kondenzátoru

Reálné kondenzátory narozdíl od reálných cívek svým chování daleko více odpovídají ideálním reprezentacím, kdy velikost impedance  $Z = 1/\omega C$  (zkráceně označujeme jako kapacitance,  $C$  je kapacita kond.). Vždy jimi však vedle posuvného proudu prochází i proud vodivostní v závislosti na jejich odporu  $R_C$ . To schematicky znázorňujeme jako paralelní zapojení ideální kapacity  $C$  a odporu  $R_C$ . Velikost impedance obvodu je pak dána jako (viz. [1])

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_C^2} + \omega^2 C^2}}. \quad (6)$$

V případě, že je  $R_C$  dostatečně velké ( $R_C \gg 1/\omega C$ ), je možné kapacitu určit přímo ze vztahu

$$C = \frac{1}{\omega Z} = \frac{I}{\omega U}. \quad (7)$$



Obr. 1: Schéma zapojení obvodu pro měření indukčnosti  $L$  nebo odporu  $R_L$  cívky.

### 1.3 Měření indukčnosti

Měření probíhá podle schématu na obr. 1 nejprve pod stejnosměrným proudem ( $I_s, U_s$ ) kvůli určení odporu cívky  $R_L$ . Protože odhadovaná hodnota  $R_L$  je v řádu jednotek ohmů (srovnatelné s vnitřním odp. ampérmetru), předpokládáme vhodnější zapojení při poloze přepínače  $\underline{b}$ .

Měření indukčnosti v obvodu se střídavým napětím provádíme pro několik hodnot proudů (cívka bez jádra 0.1 až 0.5 A, s jádrem 0.05 až 0.25 A). Přesnost není ovlivněna vnitřním odporem ampérmetru  $R_A$  a voltmetru  $R_V$ , pokud platí  $R_V \gg \frac{U}{I}$  pro polohu přepínače  $\underline{b}$ , resp.  $R_A \ll \frac{U}{I}$  pro polohu přepínače  $\underline{a}$ .

### 1.4 Měření kapacity

Neboť předpokládaný odpor kondenzátoru je  $R_C \gg R_A$ , je výhodnější v tomto zapojení předřadit voltmetr před ampérmetr (ve schématu na obr. 1 by to byla poloha přepínače  $\underline{a}$ ).

### 1.5 Použité přístroje a pomůcky

**Analogový ampérmetr pro stejnosměrný obvod** Přístroj je třídy přesnosti 0.5 se stupnicí o 120 dílcích, při použitím rozsahu 600 mA a započtení chyby odečítání 0.5 dílku tak dostávám podle [2]:  $\sigma_{I_s} = 3$  mA.

**Analogový voltmetr pro stejnosměrný obvod** Třída přesnosti 0.5 dává při použitím rozsahu 2.4 V a započtení chyby odečítání 0.5 dílku (120 dílků stupnice):  $\sigma_{U_s} = 0.01$  V.

**Analogový ampérmetr pro střídavý obvod** Třída přesnosti je 1.5, započtená chyba odečítání pak 0.5 dílku (100 dílků stupnice). Použitý rozsah je u každého měření specifikován.

**Digitální multimetr, režim voltmetr AC** Přístroj má chybu 0.8 % + 10 digit, což je při použitím rozsahu 20 V 0.01 V a při rozsahu 200 V 0.1 V.

**Zdroj harmonického střídavého napětí** Frekvence výstupního napětí je  $f = 50$  Hz. Hodnota byla ověřena multimetrem, její odchylku neuvažují.

**Zdroj napětí pro stejnosměrný proud**

### 1.6 Zpracování

Chyby měření jsou počítány podle [2] jako

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{stat}^2 + \sigma_{mer}^2}, \quad (8)$$

kde  $\sigma_{stat}$  je statistická chyba a  $\sigma_{mer}$  chyba měřidla (polovina dílku) při měření veličiny  $v$ . Není-li uvedeno jinak, jsou chyby spočtených veličin zjišťovány podle:

$$\sigma_{f(x_i)} = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (9)$$

## 2 Výsledky měření

### 2.1 Odpor cívky $R_L$

Nejprve jsem pomocí stejnosměrného proudu určil odpor reálné cívky  $R_L$ . Zapojení odpovídá schématu na obr. 1, pouze výstupní napětí (resp. proud) není regulováno naznačeným potenciometrem, ale přímo na zdroji (tzn. v praxi obdobně). Jak je zmíněno v teor. části, vhodnější je poloha přepínače  $\underline{b}$ . Naměřené hodnoty se nachází v tab. 1. Pomocí nich a z Ohmova zákona pak lineární regresí získáme odpor cívky  $R_L$ :

$$R_L = (2.75 \pm 0.03) \Omega$$

$U_s$ [V]	1.38	1.22	1.1	0.7	0.3
$I_s$ [mA]	495	445	395	250	105

Tabulka 1: Velikost napětí  $U_s$  a odpovídající stejnosměrný proud  $I_s$  protékající cívkou. Měřeno při rozsahu voltmetru 2.4 V a ampérmetru 600 mA.

### 2.2 Indukčnost cívky

V obvodu se střídavým napětím o frekvenci  $f = 50$  Hz jsem pak naměřil efektivní hodnoty proudu a napětí k určení indukčnosti cívky  $L$  podle (4). V tabulkách jsou jak hodnoty naměřeného napětí pro polohu přepínače  $\underline{a}$  ( $U_a$ ) tak i  $\underline{b}$  ( $U_b$ ). K vypočtení indukčnosti byly však použity pouze  $U_b$ , neboť dobře splňují podmínku z části 1.3 ( $R_V \gg U_b/I$ ) lépe než  $U_a$ , při přibližném vnitřním odporu voltmetru v řádech  $M\Omega$  a ampérmetru v jednotkách  $\Omega$ . Výsledky jsou tak dopočítány bez korekce na měřící přístroje.

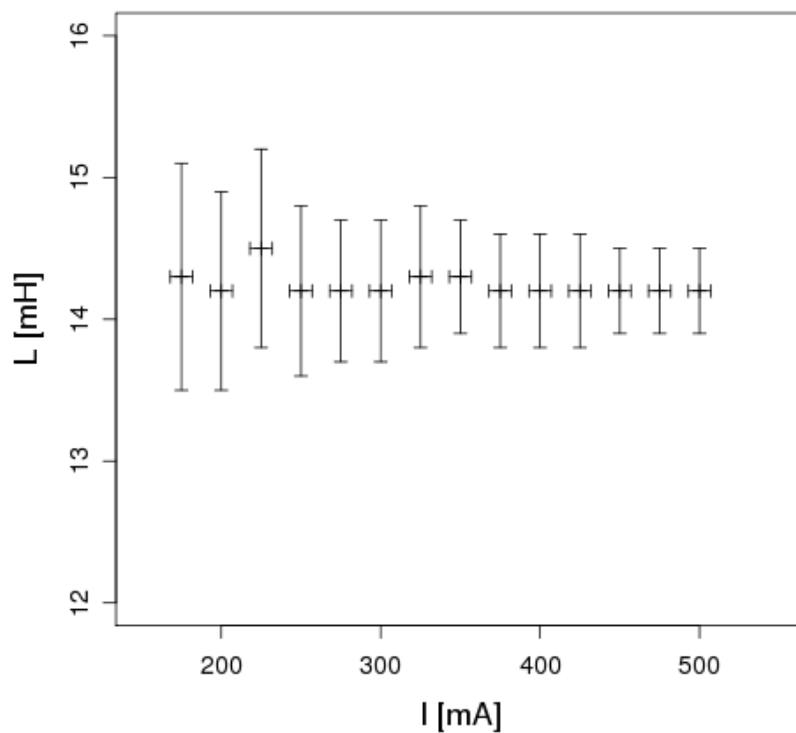
$U_a$ [V]	$U_b$ [V]	$I$ [mA]	$L$ [mH]
1.55	0.92	175	$14.3 \pm 0.8$
1.78	1.05	200	$14.2 \pm 0.7$
2.01	1.20	225	$14.5 \pm 0.7$
2.21	1.31	250	$14.2 \pm 0.6$
2.42	1.44	275	$14.2 \pm 0.5$
2.65	1.57	300	$14.2 \pm 0.5$
2.88	1.71	325	$14.3 \pm 0.5$
3.11	1.84	350	$14.3 \pm 0.4$
3.31	1.97	375	$14.2 \pm 0.4$
3.52	2.10	400	$14.2 \pm 0.4$
3.74	2.23	425	$14.2 \pm 0.4$
3.96	2.36	450	$14.2 \pm 0.3$
4.17	2.49	475	$14.2 \pm 0.3$
4.38	2.62	500	$14.2 \pm 0.3$

Tabulka 2: Naměřené ef. hodnoty  $U_a$ ,  $U_b$  a  $I$  a dopočtená indukčnost  $L$  při zapojení cívky bez jádra. Všechna měření proběhla za rozsahu ampérmetru 500 mA a voltmetru 20 V.

$U_a$ [V]	$U_b$ [V]	$I$ [mA]	$L$ [mH]
2.20	1.54	50	$98 \pm 3$
3.03	2.15	70	$97 \pm 2$
3.81	2.78	90	$98 \pm 2$
4.19	3.08	100	$98 \pm 2$
4.84	4.68	150	$99 \pm 5$
5.62	5.43	175	$98 \pm 4$
6.46	6.25	200	$99 \pm 4$
7.28	7.03	225	$99 \pm 3$
8.10	7.84	250	$99 \pm 3$

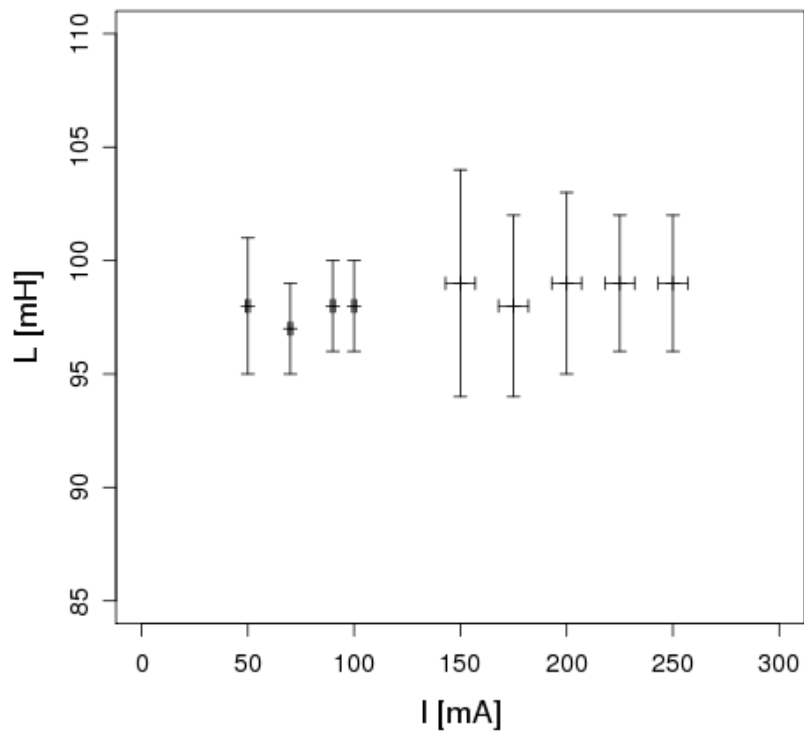
Tabulka 3: Ef. hodnoty  $U_a$ ,  $U_b$  a  $I$  a dopočtená indukčnost  $L$  cívky s otevřeným jádrem. Měření pro  $I = 50, 70, 90$  a  $100$  mA proběhla při rozsahu ampérmetru 100 mA, ostatní při rozsahu 500 mA, voltmetr při rozsahu 20 V.

**Závislost indukčnosti cívky bez jádra na protékajícím proudu**



Obr. 2: Graf závislosti indukčnosti cívky bez jádra na procházejícím proudu.

**Záv. indukčnosti cívky s otev. jádrem na procházejícím proudu**

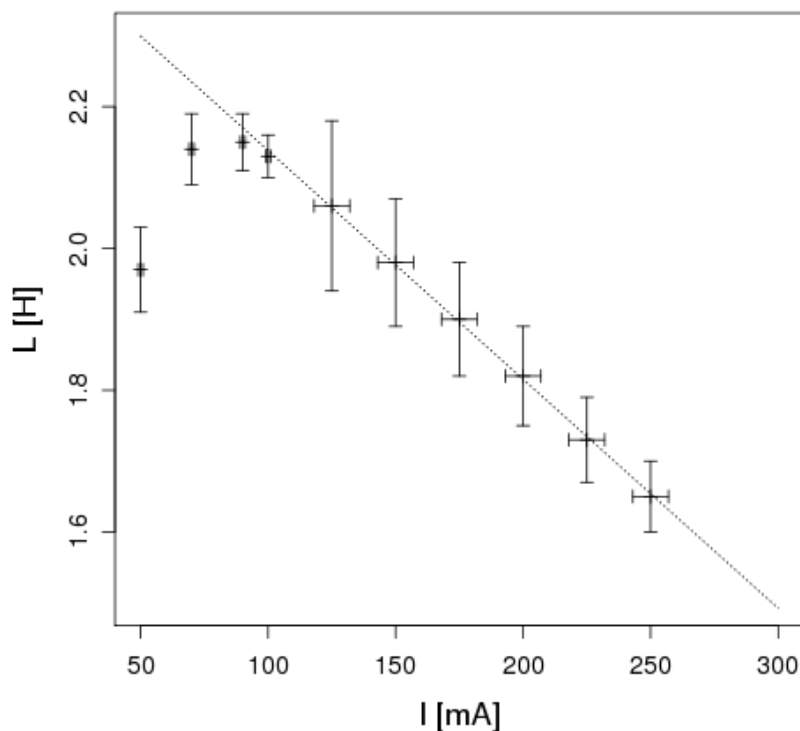


Obr. 3: Graf závislosti indukčnosti cívky s otevřeným jádrem na procházejícím proudu.

$U_a$ [V]	$U_b$ [V]	$I$ [mA]	$L$ [H]
31.3	30.9	50	$1.97 \pm 0.06$
47.6	47.0	70	$2.14 \pm 0.05$
61.5	60.8	90	$2.15 \pm 0.04$
67.7	67.0	100	$2.13 \pm 0.03$
80.8	80.8	125	$2.06 \pm 0.12$
93.6	93.5	150	$1.98 \pm 0.09$
104.5	104.4	175	$1.90 \pm 0.08$
113.7	114.2	200	$1.82 \pm 0.07$
122.3	122.0	225	$1.73 \pm 0.06$
129.8	129.5	250	$1.65 \pm 0.05$

Tabulka 4: Ef. hodnoty  $U_a$ ,  $U_b$  a  $I$  a dopočtená indukčnost  $L$  cívky s uzavřeným jádrem. Měření pro  $I = 50, 70, 90$  a  $100$  mA proběhla při rozsahu ampérmetru  $100$  mA, ostatní při rozsahu  $500$  mA, voltmetr při rozsahu  $200$  V.

**Záv. indukčnosti cívky s uzav. jádrem na protékajícím proudu**



Obr. 4: Graf závislosti indukčnosti cívky s uzavřeným jádrem na procházejícím proudu. Posledních sedm bodů je proloženo lineární fcí.

Z výsledků ilustrovaných tabulkami 1, 3, 4 a obrázky 2, 3, 4, pak můžu určit hledanou indukčnost cívky (jako arit. průměr) při zapojení bez jádra  $L_1$  a s otevřeným jádrem  $L_2$ :

$$L_1 = (14.2 \pm 0.14) \text{ mH}, \quad L_2 = (98 \pm 1) \text{ mH}$$

Při zapojení s uzavřeným jádrem je celá věc trochu složitější, neboť indukčnost cívky je hodně závislá na proudu jí procházejícím. Proto uvádím pouze maximální naměřenou hodnotu indukčnosti  $L_3$ , kde byl zaznamenán peak:

$$L_3 = (2.15 \pm 0.04) \text{ H}$$

### 2.3 Kvalita cívky

Díky výše zjištěným indukčnostem  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  a odporu cívky  $R_L$  lze už snadno podle (5) zjistit kvalitu cívky, činitel jakosti  $Q$ :

$$Q_1 = (1.63 \pm 0.03), \quad Q_2 = (11.2 \pm 0.2), \quad Q_3 = (246 \pm 5)$$

kondenzátor č. 1			kondenzátor č. 2			kondenzátor č. 3		
$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]
0.98	0.94	$3.05 \pm 0.08$	1.10	0.70	$2.03 \pm 0.07$	1.04	0.62	$1.90 \pm 0.07$
1.97	2.65	$4.28 \pm 0.10$	2.01	1.30	$2.06 \pm 0.04$	2.06	1.26	$1.95 \pm 0.04$
2.98	4.05	$4.33 \pm 0.07$	3.03	2.00	$2.10 \pm 0.03$	3.06	1.90	$1.98 \pm 0.03$
3.65	4.95	$4.32 \pm 0.06$	3.92	2.95	$2.40 \pm 0.05$	4.01	2.80	$2.22 \pm 0.05$
4.10	6.4	$4.97 \pm 0.18$	5.10	3.85	$2.40 \pm 0.04$	5.00	3.50	$2.23 \pm 0.04$
4.94	7.8	$5.03 \pm 0.15$	5.93	4.50	$2.42 \pm 0.03$	5.91	4.15	$2.24 \pm 0.03$
6.00	9.4	$4.99 \pm 0.13$	–	–	–	–	–	–

kondenzátor č. 4			kondenzátor č. 5			kondenzátor č. 6		
$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]
1.07	0.38	$1.13 \pm 0.07$	3.06	0.36	$0.37 \pm 0.02$	2.28	0.40	$0.56 \pm 0.03$
2.11	0.76	$1.15 \pm 0.04$	3.55	0.66	$0.59 \pm 0.02$	3.03	0.54	$0.57 \pm 0.02$
2.98	1.06	$1.13 \pm 0.03$	4.62	0.86	$0.59 \pm 0.02$	3.70	0.66	$0.57 \pm 0.02$
3.93	1.42	$1.15 \pm 0.02$	5.06	0.94	$0.59 \pm 0.01$	4.36	0.78	$0.57 \pm 0.02$
5.01	1.82	$1.16 \pm 0.02$	5.60	1.04	$0.59 \pm 0.01$	5.07	0.92	$0.58 \pm 0.01$
6.05	2.30	$1.21 \pm 0.03$	5.98	1.12	$0.59 \pm 0.01$	5.72	1.04	$0.58 \pm 0.01$
–	–	–	–	–	–	5.97	1.10	$0.59 \pm 0.01$

Tabulka 5: Naměřené napětí  $U$  a proud  $I$  na kondenzátorech v obvodu se střídavým napětím a dopočtená kapacita  $C$ . Rozsah voltmetru byl pro všechna měření 20 V, rozsah ampérmetru byl volen následujícím způsobem postupně, jak jsou měření v tabulce zaznamenána: pro kond. č. 1 - 2, 5, 5, 5, 20, 20, 20 mA; pro kond. č. 2 - 2, 2, 2, 5, 5, 5 mA; pro kond. č. 3 - 2, 2, 2, 5, 5, 5 mA; pro kond. č. 4 - 2, 2, 2, 2, 2, 5 mA; pro kond. č. 5 a 6 - všechna měření s rozsahem 2 mA.

## 2.4 Kapacity kondenzátorů z kapacitní dekadý

Měření kapacit probíhalo v obvodu s voltmetrem předřazeným ampérmetru, tedy jakoby v zapojení polohy přepínače a podle schématu na obr. 1. Naměřené hodnoty a výsledky jsou v tab. 5, kde je kapacita spočtena podle (7). Pro zjištění, zda lze vztah (7) použít, je nutné ve stejnosměrném obvodu ověřit, že kondenzátory mají dostatečně velký odpor, jak je naznačeno v teoretické části ( $R_C \gg 1/\omega C$ ). To bylo provedeno při konstantním výstupním napětí 24.0 V a je zaznamenáno v tab. 6. Řádivým odhadem se přesvědčíme, že podmínka je splněna a vztah (7) lze skutečně použít.

Pro kontrolu správnosti měření jsem zkoumal ještě paralelní zapojení vybraných kondenzátorů, konkrétně kondenzátorů č. 1 a 5, resp. č. 3 a 4. Naměřené hodnoty a výsledky v tab. 7.

Konečné velikosti kapacit kondenzátorů  $C$  určené z výsledků jednotlivých měření a jejich porovnání s uvedenými hodnotami na kond. dekadě jsou k nalezení v tab. 8.

kond. č.	$U_s$ [V]	$I_s$ [ $\mu$ A]
1	24.0	10
2	24.0	15
3	24.0	5
4	24.0	5
5	24.0	5
6	24.0	5

Tabulka 6: Hodnoty  $U_s$  a  $I_s$  při zapojení kondenzátorů v stejnosměrném obvodu pro řádivý odhad odporů  $R_C$ . Rozsah voltmetru 24.0 V, ampérmetru 0.6 mA.

kondenzátor č. 1 a 5			kondenzátor č. 3 a 4		
$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]	$U$ [V]	$I$ [mA]	$C$ [ $\mu$ F]
1.11	1.12	$3.21 \pm 0.07$	1.09	0.88	$2.57 \pm 0.07$
1.94	1.98	$3.25 \pm 0.05$	2.01	1.64	$2.60 \pm 0.04$
3.01	4.40	$4.65 \pm 0.07$	2.97	3.00	$3.22 \pm 0.07$
4.01	7.0	$5.56 \pm 0.19$	3.95	4.00	$3.22 \pm 0.05$
5.02	8.8	$5.58 \pm 0.15$	4.84	4.95	$3.26 \pm 0.04$
6.00	10.6	$5.62 \pm 0.13$	6.05	6.8	$3.58 \pm 0.12$

Tabulka 7: Hodnoty  $U$  a  $I$  při paralelním zapojení vybraných kondenzátorů. Rozsah voltmetru 20 V, rozsah ampérmetru postupně podle zaznamenaných měření: pro kond. č. 1 a 5 - 2, 2, 5, 20, 20, 20 mA; pro kond. č. 3 a 4 - 2, 2, 5, 5, 5, 20 mA.

kond. č.	$C$ [ $\mu$ F]	uvedené $C$ [ $\mu$ F]
1	$4.42 \pm 0.04$	4.84
2	$2.23 \pm 0.02$	2.41
3	$2.08 \pm 0.02$	2.23
4	$1.15 \pm 0.02$	1.16
5	$0.56 \pm 0.01$	0.57
6	$0.57 \pm 0.01$	0.56
1+5	$4.65 \pm 0.05$	–
3+4	$3.07 \pm 0.03$	–

Tabulka 8: Konečné stat. hodnoty kapacit kondenzátorů  $C$  v porovnání s hodnotami uvedenými na kond. dekádě.

### 3 Diskuse výsledků

Všechny hodnoty byly změřeny při minimálním možném rozsahu měřících přístrojů, aby tak byla minimalizována jejich stat. chyba. Zároveň nebyla provedena korekce na měřící přístroje, neboť

1. při měření odporu cívky je ten řádově daleko menší než odpor voltmetru,
2. při měření závislosti indukčnosti na procházejícím proudu splňují hodnoty v zapojení přepínače v poloze  $\underline{b}$   $R_V \gg U_b/I$  s dostatečnou rezervou (tzn. min. 100x spíše i 1000x větší),
3. stejně tak odpor jednotlivých kondenzátorů je řádově větší než odpor ampérmetru (viz. tab. 6).

Indukčnost cívky bez jádra splňuje teoretický předpoklad nezávislosti na protékajícím proudu. Při uzavření jádra se naopak naplno projevila závislost jeho permeability na intenzitě mag. pole. Maximální hodnota indukčnosti cívky s uzav. jádrem byla zaznamenána pro  $I = 90$  mA, poté indukčnost nepřímo úměrně proudu klesá, jak se dá odtušit z tvaru závislosti (je tak naznačeno v grafu na obr. 4).

Naměřené kapacity kondenzátorů 4, 5 a 6 se dobře shodují se zapsanými na kond. dekádě. Oproti tomu kapacity kondenzátorů 1, 2 a 3 jsou menší s výraznou odchylkou od těch uvedených. Důvodů může být několik: zanedbání odporu kondenzátorů, nebo spíše fakt, že dlouhým používáním a opotřebením se jejich kapacita snížila. Nakonec z diskutovaných nezapomněme i na hrubou chybu experimentátora, kterou indikuje výsledek prvního měření kond. č. 1 v tab. 5, jenž se velmi výrazně liší od ostatních výsledků pro stejný kondenzátor. I proto jsem jako kontrolu změřil ještě dvě kombinace paralelního zapojení kondenzátorů (č. 1 a 5, č. 3 a 4). Jak je dobře známo, při paralelním zapojení kondenzátorů se jejich kapacita sčítá, tedy výsledná kapacita obvodu by měla odpovídat součtu kapacit jednotlivých kondenzátorů. Jak vidíme z tabulky 8, naměřená kapacita paralelního zapojení je vždy trochu menší, než jak vychází z pouhého sečtení odpovídajících naměřených kapacit samostatných kondenzátorů (při počítání s hodnotami uvedenými na kond. dek. je rozdíl ještě více patrný). Domnívám se tedy, že skutečná kapacita kondenzátorů je ještě o něco málo nižší než zjištěná.



## 4 Závěr

Metodou přímou byl zjištěn odpor cívky  $R_L = (2.75 \pm 0.03) \Omega$ . Změřena byla indukčnost a kvalita (činitel jakosti) cívky bez jádra

$$L_1 = (14.2 \pm 0.14) \text{ mH}, \quad Q_1 = (1.63 \pm 0.03),$$

s otevřeným jádrem

$$L_2 = (98 \pm 1) \text{ mH}, \quad Q_2 = (11.2 \pm 0.2)$$

a maximální indukčnost a činitel jakosti cívky s uzavřeným jádrem

$$L_3 = (2.15 \pm 0.04) \text{ H}, \quad Q_3 = (246 \pm 5).$$

Měření a závislost indukčnosti na protékajícím proudu ilustrují tab. 2, 3, 4 a grafy na obr. 2, 3 a 4.

Zjištěny byly kapacity jednotlivých kondenzátorů kapacitní dekády

$$\begin{aligned} C_1 &= (4.42 \pm 0.04) \mu\text{F}, & C_2 &= (2.23 \pm 0.02) \mu\text{F}, & C_3 &= (2.08 \pm 0.02) \mu\text{F}, \\ C_4 &= (1.15 \pm 0.02) \mu\text{F}, & C_1 &= (0.56 \pm 0.01) \mu\text{F}, & C_1 &= (0.57 \pm 0.01) \mu\text{F}, \end{aligned}$$

Měření a výsledky jsou zaznamenány v tab. 5, 7 a 8.

Výsledky byly zpracovány a grafy sestrojeny pomocí programu *R 2.10.1*.

## Použitá literatura

- [1] Bakule R., Šternberk J.: Fyzikální praktikum II, SPN, Praha 1989
- [2] English J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření, 1999, <http://physics.mff.cuni.cz/to.en/vyuka/zfp>