

## 1 Pracovní úkoly

- Změřte velikost kapacit kondenzátorů z kapacitní dekády.
- Změřte závislost indukčnosti cívky na procházejícím proudu pro tyto případy:
  - cívka bez jádra (0 – 350 mA)
  - cívka s otevřeným jádrem (0 – 250 mA)
  - cívka s uzavřeným jádrem (0 – 250 mA)
- Přímou metodou změřte odpor cívky a určete její kvalitu.
- Odhadněte přesnost měření.
- Výsledky měření úkolu 2 zakreslete do grafu.

## 2 Teoretická část

Pokud na reálný kondenzátor přiložíme střídavé napětí  $u^* = u_0 \exp(j\omega t)$  bude celkový proud procházející kondenzátorem  $i^*$  roven součtu posuvného proudu  $i_p^* = j\omega C u^*$  a vodivostního proudu  $i_v^* = u^*/R_C$ , celkově dostaneme [1]

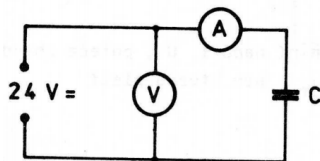
$$i^* = i_p^* + i_v^* = \left( j\omega C + \frac{1}{R_C} \right) u^* \quad (1)$$

kde  $u_0$  značí amplitudu střídavého napětí,  $\omega$  jeho úhlovou frekvenci,  $C$  kapacitu kondenzátoru a  $R_C$  odpor kondenzátoru. Komplexní veličiny přitom značíme se symbolem  $*$ , fyzikální význam mají pouze jejich reálné části a komplexní jednotku píšeme jako  $j$ .

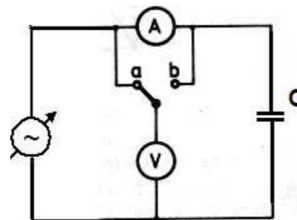
V reálném kondenzátoru bude proud posunut vůči napětí o úhel  $\varphi$ , který lze určit ze vztahu  $\tan \varphi = \omega R_C C$ . Kvalita kondenzátoru se hodnotí ztrátovým činitelem, který je nadefinován jako tangenta úhlu  $\delta$  doplňkového k fázovému posuvu proudu  $\varphi$ . Platí pro něj tedy

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi f R_C C} \quad (2)$$

kde  $f$  značí frekvenci střídavého proudu. Kondenzátor je tím kvalitnější, čím je jeho ztrátový činitel menší. Odpor kondenzátoru můžeme určit z měření v obvodu zapojeném podle obrázku 1.



Obrázek 1: Měření odporu kondenzátoru



Obrázek 2: Měření kapacity kondenzátoru

Ze známých hodnot stejnosměrného proudu  $I$  a stejnosměrného napětí  $U$  vypočítáme odpor podle Ohmova zákona

$$R_C = \frac{U}{I} \quad (3)$$

Kapacitu kondenzátoru pak můžeme změřit podle obvodu na obrázku 2. Měříme v poloze a), neboť očekáváme velký odpor kondenzátoru v porovnání s vnitřním odporem ampérmetru. Pokud je splněna podmínka  $R_C \gg (\omega C)^{-1}$  lze kapacitu kondenzátoru vypočítat z efektivních hodnot proudu  $I$  a napětí  $U$  podle vzorce

$$C = \frac{I}{2\pi f U} \quad (4)$$

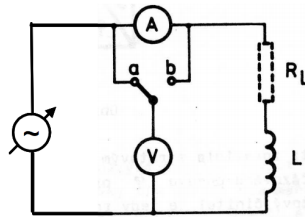
Každá reálná cívka má nenulový odpor  $R_L$ . Její chování v obvodech lze popsat jako sériové zapojení rezistoru o odporu  $R_L$  a ideální cívky bez odporu s indukčností  $L$ . Prochází-li reálnou cívku harmonický proud  $i^* = i_0 \exp(j\omega t)$  bude napětí mezi jejími konci rovno

$$u^* = (R_L + j\omega L)i^* \quad (5)$$

Napětí bude vůči proudu posunuto o úhel  $\varphi$ , tangentu z tohoto úhlu nazýváme činitelem jakosti cívky  $Q$  a platí pro něj

$$Q = \tan \varphi = \frac{2\pi f L}{R_L} \quad (6)$$

Cívka je tím kvalitnější, čím je činitel jakosti větší.



Obrázek 3: Měření odporu a indukčnosti cívky

Odpor cívky lze změřit při zapojení obvodu podle obrázku 3. Měříme vždy v poloze přepínače b), neboť očekáváme malé hodnoty odporu cívky v porovnání s vnitřním odporem ampérmetru. Cívku připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí, změříme hodnoty stejnosměrného proudu  $I$  a stejnosměrného napětí  $U$  a odpor cívky určíme z Ohmova zákona

$$R_L = \frac{U}{I} \quad (7)$$

Pro změření indukčnosti vyměníme stejnosměrný zdroj za střídavý, změříme efektivní hodnoty proudu  $I$  a napětí  $U$  a indukčnost cívky vypočítáme ze vzorce

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_L^2} \quad (8)$$

### 3 Výsledky měření

Během celého měření jsem používal multimetr Fluke 175 jako ampérmetr. Jeho přesnosti pro měření stejnosměrného proudu jsou uvedené v tabulce 1 a pro měření střídavého proudu v tabulce 2. Přesnost je uvedena ve tvaru  $\pm([\% \text{ of Reading}] + [\text{Counts}])$ .

Pro měření napětí jsou používal multimetr MY-65, jehož přesnost pro stejnosměrné napětí je vidět v tabulce 3 a pro střídavé v tabulce 4. Přesnost je zde uvedena ve tvaru  $\pm([\% \text{ of Reading}] + [\text{Digits}])$ .

Tabulka 1: Fluke DC proud		Tabulka 3: MY-65 DC napětí	
rozsah	přesnost	rozsah	přesnost
60.00 mA	1,0% + 3	200 mV	0,05% + 3 dg
400.0 mA	1,0% + 3	2 V	0,1% + 3 dg
6.000 A	1,0% + 3	20 V	0,1% + 3 dg
10.00 A	1,0% + 3	200 V	0,1% + 3 dg

Tabulka 2: Fluke AC proud		Tabulka 4: MY-65 AC napětí	
rozsah	přesnost	rozsah	přesnost
60.00 mA	1,5% + 3	2 V	0,5% + 10 dg
400.0 mA	1,5% + 3	20 V	0,6% + 10 dg
6.000 A	1,5% + 3	200 V	0,6% + 10 dg
10.00 A	1,5% + 3	700 V	0,8% + 15 dg

Odpory kondenzátorů z kapacitní dekády byly změřeny podle zapojení na obrázku 1. Změřené hodnoty napětí  $U$  a proudu  $I$  jsou uvedeny v tabulce 5 společně s hodnotou odporu  $R_C$  vypočítanou podle (3). Chyby měření proudu a napětí jsou vypočítány z přesností uvedených v tabulkách 1 až 4. Ze zákona šíření chyb jsem vypočítal chybu určení odporu jako

$$\sigma_{R_C} = \sqrt{\frac{U^2}{I^4} \sigma_I^2 + \frac{1}{I^2} \sigma_U^2} \quad (9)$$

Takto určené hodnoty  $R_C$  považuji pouze za orientační, protože přesnost ampérmetru nestačila k přesnému měření proudu, jak je vidět z hodnot  $\sigma_I$  v tabulce 5. Také proto jsem pro každý kondenzátor změřil pouze jednu hodnotu.

Tabulka 5: Odpory kondenzátorů

kondenzátor	$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{R}{M\Omega}$	$\frac{\sigma_R}{M\Omega}$
A	5,99	0,01	0,001	0,005	6,0	30,0
B	5,61	0,01	0,001	0,005	5,6	28,1
C	5,49	0,01	0,003	0,005	1,8	3,1
D	5,86	0,01	0,003	0,005	2,0	3,3
E	6,13	0,01	0,005	0,005	1,2	1,2
F	6,20	0,01	0,013	0,005	0,5	0,2

Ze změřených hodnot odporů kondenzátorů  $R_C$  je patrné, že lze jejich vliv na výpočet kapacit zanedbat a použít vzorec (4). Dále jsem měřil podle zapojení obvodu na obrázku 2.

Změřené hodnoty efektivních hodnot napětí  $U$  a proudu  $I$  jsou uvedené v tabulkách 6 a 7. Chyby měření  $\sigma_U$  a  $\sigma_I$  jsou opět vypočítány z přesností měřících přístrojů uvedených v tabulkách 1 až 4. Pro každý kondenzátor bylo naměřeno šest hodnot a pro každé měření byla vypočítaná kapacita podle vzorce (4), chyba výsledku je podle zákona šíření chyb rovna

$$\sigma_C = \frac{1}{2\pi fU} \sqrt{\sigma_I^2 + \frac{I^2}{U^2} \sigma_U^2} \quad (10)$$

Tabulka 6: Měření kapacit kondenzátorů A, B, C, D metodou přímou

kondenzátor	$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{C}{\mu F}$	$\frac{\sigma_C}{\mu F}$
A	1,15	0,02	0,24	0,03	0,66	0,09
	2,34	0,02	0,49	0,04	0,67	0,05
	3,40	0,03	0,69	0,04	0,65	0,04
	4,02	0,03	0,81	0,04	0,64	0,03
	4,93	0,04	0,99	0,04	0,64	0,03
	6,01	0,05	1,20	0,05	0,64	0,03
B	1,06	0,02	0,23	0,03	0,7	0,1
	2,19	0,02	0,47	0,04	0,68	0,05
	2,81	0,03	0,59	0,04	0,67	0,04
	3,92	0,03	0,81	0,04	0,66	0,03
	4,81	0,04	0,99	0,04	0,66	0,03
	6,08	0,05	1,24	0,05	0,65	0,03
C	0,86	0,02	0,38	0,04	1,4	0,2
	1,73	0,02	0,70	0,04	1,3	0,1
	2,75	0,03	1,14	0,05	1,3	0,1
	3,75	0,03	1,54	0,05	1,3	0,1
	4,93	0,04	2,01	0,06	1,3	0,1
	5,85	0,05	2,38	0,07	1,3	0,1
D	0,89	0,02	0,70	0,04	2,5	0,2
	1,51	0,02	1,16	0,05	2,4	0,1
	2,94	0,03	2,27	0,06	2,46	0,07
	3,93	0,03	3,02	0,08	2,45	0,06
	5,21	0,04	4,02	0,09	2,46	0,06
	5,86	0,05	4,6	0,1	2,47	0,06

Tabulka 7: Měření kapacit kondenzátorů E, F metodou přímou

kondenzátor	$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{C}{\mu F}$	$\frac{\sigma_C}{\mu F}$
E	1,15	0,02	0,99	0,04	2,7	0,1
	1,62	0,02	1,37	0,05	2,7	0,1
	3,32	0,03	2,78	0,07	2,67	0,07
	4,16	0,03	3,45	0,08	2,64	0,07
	5,15	0,04	4,27	0,09	2,64	0,06
	6,07	0,05	5,1	0,1	2,65	0,06
F	0,80	0,01	1,38	0,05	5,5	0,2
	1,73	0,01	2,95	0,07	5,4	0,1
	2,93	0,03	5,0	0,1	5,4	0,1
	4,25	0,04	7,2	0,1	5,4	0,1
	5,17	0,04	8,8	0,2	5,4	0,1
	6,07	0,05	10,3	0,2	5,4	0,1

Výslednou kapacitu kondenzátoru jsem vypočítal jako průměr z naměřených šesti hodnot a směrodatnou odchylku tohoto průměru  $\sigma_C$  jsem určil jako

$$\sigma_C = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{C_i}^2} \quad (11)$$

kde  $n = 6$  je počet měření a  $\sigma_{C_i}$  značí směrodatnou odchylku  $i$ -tého měření. Takto vypočítané kapacity jsou uvedeny v tabulce 8.

Dále jsem vypočítal ztrátové činitele  $\tan \delta$  pro všechny kondenzátory podle vzorce (2) a chybu dle zákona šíření chyb

$$\sigma_{\tan \delta} = \frac{1}{2\pi f C R_C} \sqrt{\frac{1}{R_C^2} \sigma_{R_C}^2 + \frac{1}{C^2} \sigma_C^2} \quad (12)$$

jelikož však počítám s hodnotami  $R_C$ , které jsou určeny pouze orientačně, tak i tyto hodnoty  $\tan \delta$  považuji pouze za orientační. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Výsledné kapacity a ztrátové činitele kondenzátorů

kondenzátor	$\frac{C}{\mu F}$	$\frac{\sigma_C}{\mu F}$	$\tan \delta$	$\sigma_{\tan \delta}$
A	0,65	0,02	0,0008	0,0041
B	0,67	0,02	0,0008	0,0043
C	1,32	0,05	0,0013	0,0022
D	2,46	0,04	0,0007	0,0011
E	2,67	0,04	0,0010	0,0010
F	5,44	0,06	0,0012	0,0005

Odpor cívky bez jádra jsem měřil v obvodu podle obrázku 3, kde jsem místo střídavého zdroje zapojil stejnosměrný zdroj napětí. Měřil jsem v poloze přepínače b).

Naměřené hodnoty stejnosměrného napětí a proudu jsou uvedeny v tabulce 9. Chyby měření jsou opět určeny z přesností měřících přístrojů z tabulek 1 až 4.

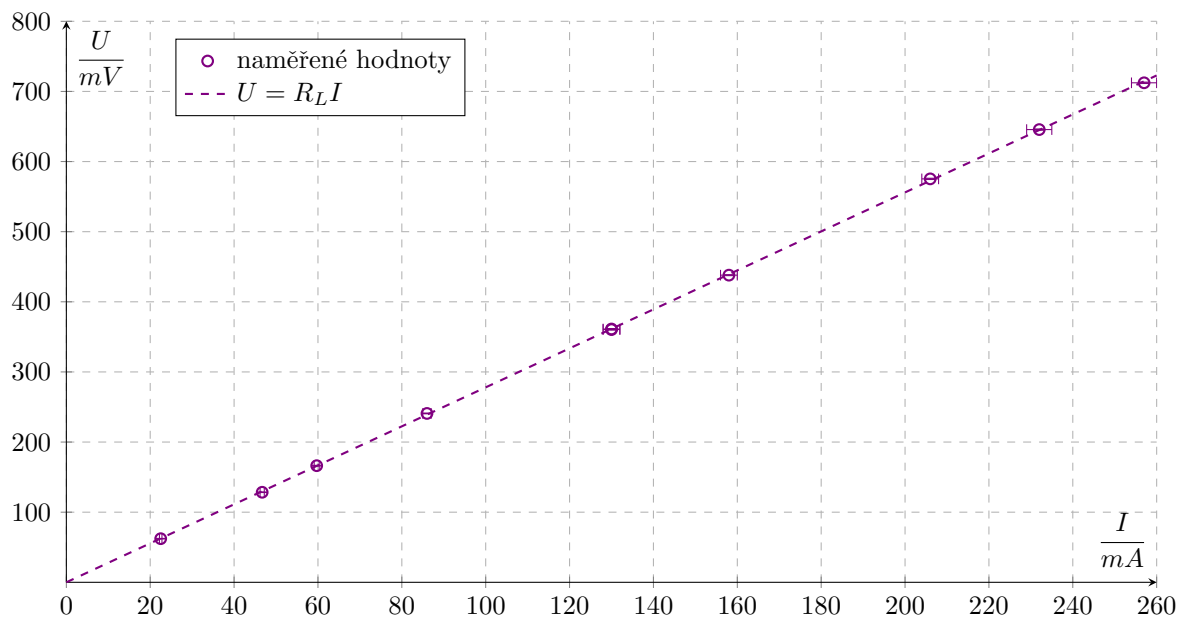
Odpor cívky  $R_L$  byl určen lineární regresí pro přímkou procházející počátkem [2]

$$R_L = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{U_i I_i}{\sigma_{U_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{I_i^2}{\sigma_{U_i}^2}} \quad \sigma_{R_L} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{I_i^2}{\sigma_{U_i}^2}}} \quad (13)$$

Naměřené hodnoty a přímkou určená lineární regresí jsou vidět v grafu 1. Ze vzorce (13) jsem určil odpor cívky na hodnotu  $R_L = (2,780 \pm 0,002) \Omega$ .

Tabulka 9: Měření odporu cívky bez jádra

$\frac{U}{mV}$	$\frac{\sigma_U}{mV}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$
62.2	0.4	22.5	0.3
128.4	0.4	46.7	0.5
166.3	0.5	59.7	0.6
240.8	0.5	86	1
360.4	0.7	130	2
361.2	0.7	130	2
438.0	0.7	158	2
575.3	0.9	206	2
645.6	0.9	232	3
712.3	1.0	257	3



Graf 1: Určení odporu cívky

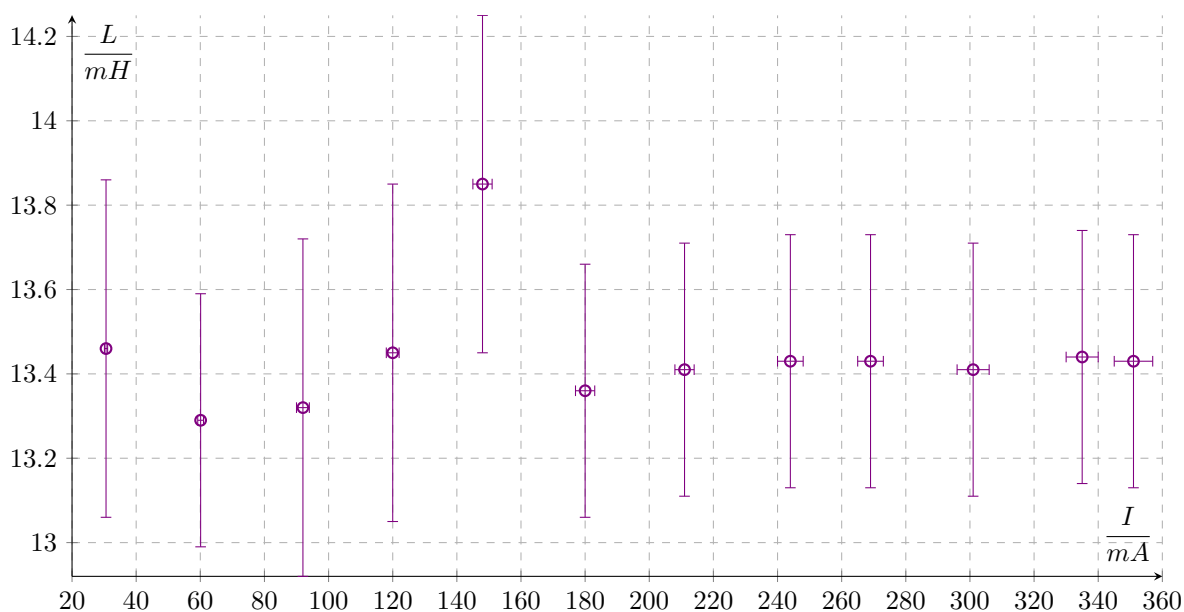
Pro měření indukčnosti jsem stejnosměrný zdroj vyměnil za střídavý zdroj napětí. Bylo odebíráno střídavé napětí ze sítě s frekvencí  $f = 50 \text{ Hz}$ , ale to bylo ještě transformováno na nižší hodnoty pomocí transformátoru.

Naměřené hodnoty efektivních hodnot napětí a proudu pro cívku bez jádra jsou uvedeny v tabule 10. Chyby měření jsou opět počítány z přesností v tabulkách 1 až 4. Pro každé měření proudu a napětí byla vypočítána indukčnost podle vzorce (8) a chyba výsledku

$$\sigma_L = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \sqrt{\frac{U^2}{I^4} \sigma_U^2 + \frac{U^4}{I^6} \sigma_I^2 + R_L^2 \sigma_{R_L}^2} \quad (14)$$

Tabulka 10: Měření indukčnosti cívky bez jádra

$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{L}{mH}$	$\frac{\sigma_L}{mH}$
0,155	0,002	30,6	0,5	13,5	0,4
0,302	0,003	60,1	0,9	13,3	0,3
0,460	0,003	92	2	13,3	0,4
0,609	0,004	120	2	13,5	0,4
0,766	0,005	148	3	13,8	0,4
0,907	0,006	180	3	13,4	0,3
1,066	0,006	211	3	13,4	0,3
1,231	0,007	244	4	13,4	0,3
1,357	0,008	269	4	13,4	0,3
1,518	0,009	301	5	13,4	0,3
1,694	0,009	335	5	13,4	0,3
1,772	0,010	351	6	13,4	0,3

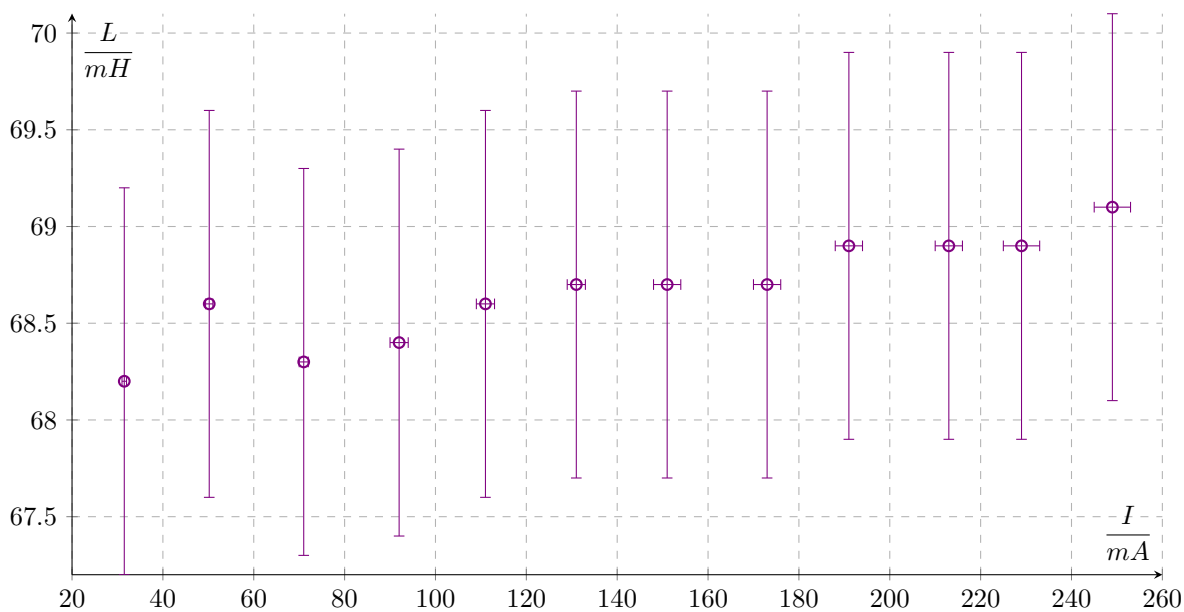


Graf 2: Indukčnost cívky bez jádra

Stejně jsem postupoval v případě cívky s otevřeným jádrem.

Tabulka 11: Měření indukčnosti cívky s otevřeným jádrem

$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{L}{mH}$	$\frac{\sigma_L}{mH}$
0,681	0,004	31,5	0,5	68	1
1,090	0,006	50,2	0,8	69	1
1,530	0,009	71	1	68	1
2,00	0,01	92	2	68	1
2,42	0,01	111	2	69	1
2,84	0,02	131	2	69	1
3,28	0,02	151	3	69	1
3,76	0,02	173	3	69	1
4,17	0,02	191	3	69	1
4,66	0,02	213	3	69	1
4,99	0,03	229	4	69	1
5,45	0,03	249	4	69	1



Graf 3: Indukčnost cívky s otevřeným jádrem

Jak je patrné z hodnot uvedených v tabulkách 10 a 11 a z grafů 2 a 3, indukčnost cívky bez jádra a s otevřeným jádrem je v rámci chyby měření konstantní. Výslednou indukčnost pro tyto dva případy tedy určím jako průměr z naměřených hodnot a chybu tohoto průměru určím stejně jako v případě (11). Pro cívku bez jádra takto dostanu  $L_1 = (13,4 \pm 0,1) mH$  a pro cívku s otevřeným jádrem  $L_2 = (68,7 \pm 0,4) mH$ .

Pro tyto dva případy pak můžu určit činitel jakosti podle (6) a jeho chybu

$$\sigma_Q = \frac{2\pi f}{R_L} \sqrt{\sigma_L^2 + \frac{L^2}{R_L^2} \sigma_{R_L}^2} \quad (15)$$

Pro cívku bez jádra takto dostanu  $Q_1 = (1,52 \pm 0,01)$  a pro cívku s otevřeným jádrem  $Q_2 = (7,76 \pm 0,04)$ .



V případě cívky s uzavřeným jádrem již napětí z transformátoru nebylo dostačující pro proměření celé závislosti  $L(I)$ , a tak bylo střídavé napětí odebíráno přímo ze sítě, zbytek obvodu zůstal stejný. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 12. Hodnoty  $L$  v tomto případě nevycházely konstantní, a tak byl činitel jakosti vypočítán pro jednotlivá měření podle (6) a jeho chyba podle (15).

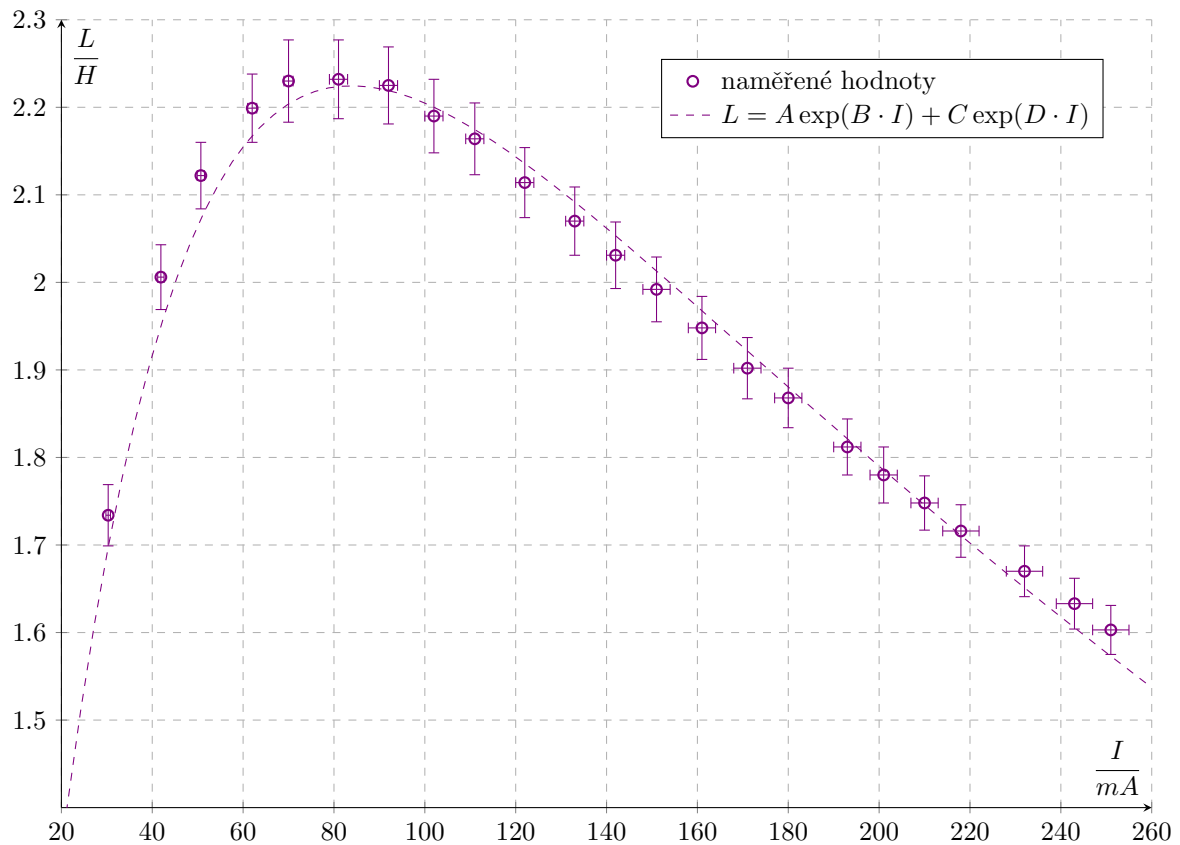
Tabulka 12: Měření indukčnosti cívky s uzavřeným jádrem

$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{L}{H}$	$\frac{\sigma_L}{H}$	$Q$	$\sigma_Q$
1,02	0,02	4,9	0,1	0,66	0,02	75	2
2,81	0,02	10,5	0,2	0,85	0,02	96	2
4,72	0,03	15,3	0,3	0,98	0,02	111	2
7,99	0,05	19,8	0,3	1,28	0,02	145	3
16,5	0,2	30,3	0,5	1,73	0,03	196	4
26,4	0,3	41,9	0,7	2,01	0,04	227	4
33,8	0,3	50,7	0,8	2,12	0,04	240	4
42,7	0,4	62	1	2,20	0,04	249	4
49,3	0,4	70	1	2,23	0,05	252	5
56,6	0,4	81	2	2,23	0,05	252	5
64,0	0,5	92	2	2,22	0,04	251	5
70,5	0,5	102	2	2,19	0,04	247	5
75,1	0,6	111	2	2,16	0,04	245	5
81,1	0,6	122	2	2,11	0,04	239	5
86,4	0,6	133	2	2,07	0,04	234	4
90,7	0,6	142	2	2,03	0,04	230	4
94,2	0,7	151	3	1,99	0,04	225	4
98,5	0,7	161	3	1,95	0,04	220	4
101,9	0,7	171	3	1,90	0,03	215	4
105,5	0,7	180	3	1,87	0,03	211	4
110,0	0,8	193	3	1,81	0,03	205	4
112,3	0,8	201	3	1,78	0,03	201	4
115,3	0,8	210	3	1,75	0,03	198	4
117,7	0,8	218	4	1,72	0,03	194	3
121,8	0,8	232	4	1,67	0,03	189	3
124,4	0,8	243	4	1,63	0,03	185	3
126,3	0,9	251	4	1,60	0,03	181	3

Graf 4 znázorňuje změřenou závislost indukčnosti cívky na procházejícím proudu. Změřené hodnoty byly proloženy křivkou  $L = A \exp(B \cdot I) + C \exp(D \cdot I)$  metodou nelineárních nejmenších čtverců. Nafitované parametry ukazuje tabulka 13. Chyby parametrů uvedené v tabulce odpovídají 95% intervalu spolehlivosti.

Tabulka 15: Nafitované parametry pro závislost indukčnosti cívky s uzavřeným jádrem na proudu

$\frac{A}{H}$	$\frac{\sigma_A}{H}$	$\frac{B}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$	$\frac{\sigma_B}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$	$\frac{C}{H}$	$\frac{\sigma_C}{H}$	$\frac{D}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$	$\frac{\sigma_D}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$
3,0	0,2	-2,6	0,4	-2,8	0,2	-32	5

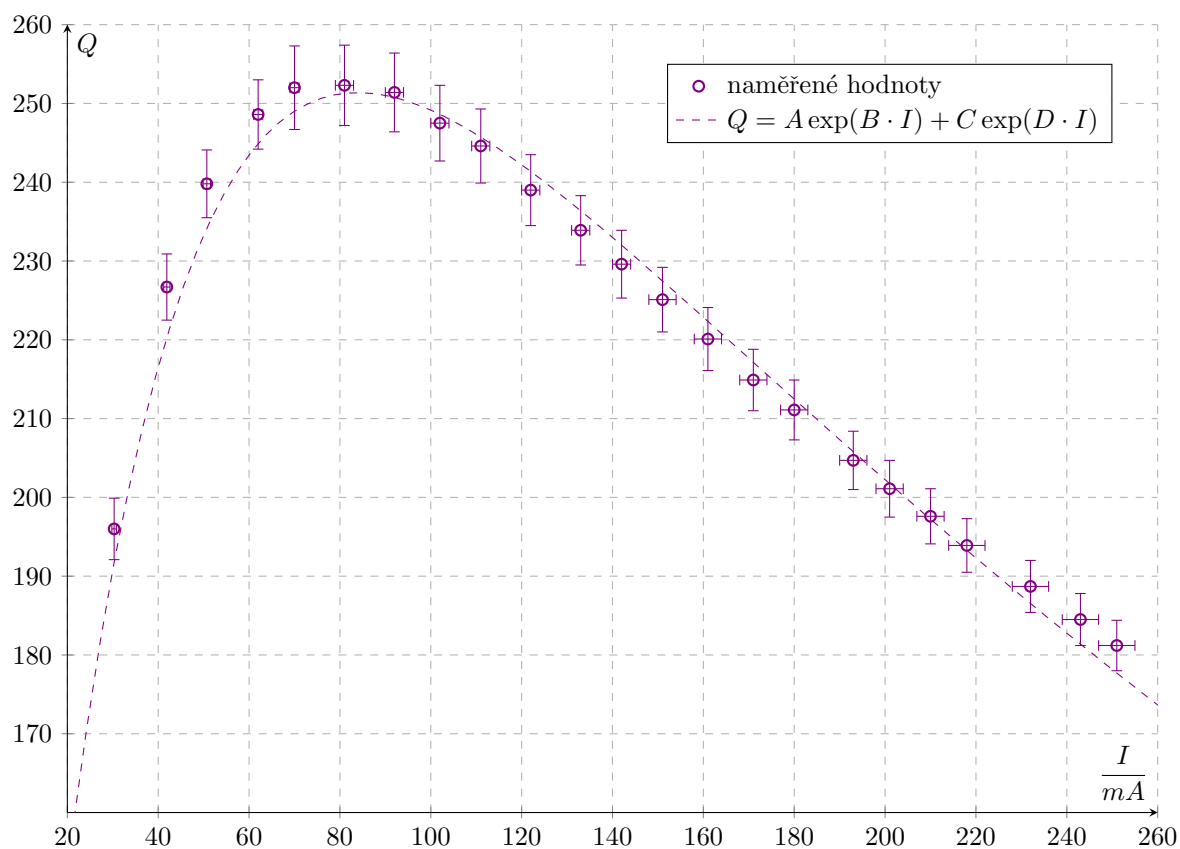


Graf 4: Indukčnost cívky s uzavřeným jádrem

Činitel jakosti je podle (6) roven indukčnosti přenásobené konstantou, proto bude mít závislost  $Q(I)$  stejný tvar jako  $L(I)$ , tuto závislost znázorňuje graf 5. Vypočítané hodnoty byly opět proloženy křivkou  $Q = A \exp(B \cdot I) + C \exp(D \cdot I)$ . Parametry i jejich chyby byly určeny stejně jako v předchozím případě. Konkrétní hodnoty parametrů jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16: Nafitované parametry pro závislost činitele jakosti cívky s uzavřeným jádrem na proud

$A$	$\sigma_A$	$\frac{B}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$	$\frac{\sigma_B}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$	$C$	$\sigma_C$	$\frac{D}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$	$\frac{\sigma_D}{10^{-3} \text{ mA}^{-1}}$
340,0	30,0	-2,6	0,4	-320,0	20,0	-32	5



Graf 5: Činitel jakosti cívky s uzavřeným jádrem

## 4 Diskuse

Kondenzátory zapojených podle obvodu na obrázku 1 protékal velmi malý proud a jak je vidět z tabulky 5, chyba měření proudu byla srovnatelná nebo dokonce větší než samotná hodnota měřeného proudu. Proto také, jak jsem již zmínil, tyto hodnoty a hodnoty odporů nebo ztrátových činitelů z nich vypočítané považuji pouze za orientační a nepoužil jsem je k výpočtu kapacit kondenzátorů. Ověřil jsem však, že jelikož kondenzátory mají tak velké odpory, lze použít vzorec (4) pro výpočet kapacity.

Vypočítané hodnoty kapacit kondenzátorů z jednotlivých měření, uvedených v tabulkách 6 a 7, se od sebe příliš neliší, dokonce si v rámci jedné směrodatné odchylky odpovídají. Největší odchylky je vidět pro malé proudy, ale to bylo pravděpodobně způsobeno tím, že při měření v dolní části rozsahu měříme s větší relativní chybou. Kapacity tedy nezávisely na procházejícím proudu, což odpovídá teoretickým předpokladům. Výsledné kapacity jsem tak mohl určit jako průměr těchto hodnot.

Z grafu 1 je patrné, že cívka dobře splňuje Ohmův zákon, takže její odpor určitě mohu určit lineární regresí. Chyba výsledku vypočítaná podle (13) ovšem zanedbává chyby určení veličiny na  $x$ -ové ose [2], tedy v našem případě proudu. To znamená, že skutečná směrodatná odchylka určení odporu cívky  $\sigma_{R_L}$  bude o něco větší než hodnota vypočítaná ze vzorce (13).

Jak lze vidět z grafů 2 a 3 tak indukčnosti cívky bez jádra a cívky s otevřeným jádrem jsou v rámci jedné směrodatné odchylky měření konstantní. Indukčnost jsem tedy v tomto případě mohl určit jako průměr z hodnot jednotlivých měření a pro tuto hodnotu indukčnosti stanovit odpovídající činitel jakosti. Indukčnost cívky s uzavřeným jádrem již konstantní nebyla, a tak jsem nemohl jednoduše zprůměrovat hodnoty z jednotlivých měření.

Konstantní hodnota indukčnosti cívky bez jádra odpovídá teoretickým očekáváním, neboť v tomto případě by indukčnost měla záviset pouze na počtu závitů a geometrii cívky.

Indukčnost cívky s otevřeným jádrem je přibližně pět krát větší než indukčnost cívky bez jádra. To odpovídá očekávání, neboť vsunutím jádra do cívky zvýšíme permeabilitu prostředí a tím i magnetický tok cívkou  $\Phi$ . Pro indukčnost cívky platí  $L = \Phi/I$ , takže zvětšením magnetického toku zvětšíme indukčnost cívky.

V materiálu jádra ovšem může docházet ke ztrátám energie, což by mohlo vést k většímu odporu cívky, než byla hodnota určená pro cívku bez jádra. Jelikož však tyto ztráty nejsem schopen z naměřených hodnot určit, tak tento faktor zanedbávám.

V cívce s uzavřeným jádrem je mnohem větší magnetický tok než v cívce s otevřeným jádrem, tomu odpovídají hodnoty indukčnosti, které jsou přibližně 30 krát větší než indukčnost cívky s otevřeným jádrem a řádově 100 krát větší než indukčnost cívky bez jádra. Změny indukčnosti v závislosti na proudu jsou v tomto případě způsobeny závislostí permeability jádra na velikosti magnetické indukce v jádře. Předpokládám, že kolem maxima indukčnosti cívky s uzavřeným jádrem došlo k nasycení jádra. To pak vysvětluje pozorovaný průběh indukčnosti.

Během celého zpracování jsem počítal s frekvencí proudu  $f = 50 \text{ Hz}$  a zanedbával jsem její chybu. Předpokládám však, že v síti je dostatečně stabilní napětí a že je tedy tato chyba zanedbatelná.

Při měření s kondenzátory byl ampérmetr zapojen vždy za voltmetr. Jelikož je však vnitřní odpor ampérmetru řádově  $100 \Omega$  a odpory kondenzátorů jsou větší než  $10^6 \Omega$ , tak jsem v tomto případě neprováděl korekci na měřící přístroje. Podobně při měření s cívkou byl voltmetr vždy za ampérmetrem a jelikož je odpor voltmetru řádově  $10^6$  a odpor cívky je řádově  $1 \Omega$ , tak jsem ani v tomto případě neprováděl korekci na měřící přístroje a jejich vliv zanedbal.

## 5 Závěr

Metodou přímou byla určena kapacita pro šest kondenzátorů z kapacitní dekády. Výsledky měření shrnuje tabulka 8.

Odpor cívky bez jádra byl určen na hodnotu  $R_L = (2,780 \pm 0,002) \Omega$ . Dále byla proměřena závislost indukčnosti cívky na procházejícím proudu pro tři různé případy. Pro cívku bez jádra byla určena indukčnost  $L_1 = (13,4 \pm 0,1) \text{ mH}$  a činitel jakosti  $Q_1 = (1,52 \pm 0,01)$ . Pro cívku s otevřeným jádrem vyšla indukčnost  $L_2 = (68,7 \pm 0,4) \text{ mH}$  a činitel jakosti  $Q_2 = (7,76 \pm 0,04)$ . Indukčnost cívky s uzavřeným jádrem nebyla konstantní, výsledný průběh ukazuje graf 4 a odpovídající průběh činitele jakosti ukazuje graf 5.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] Měření indukčnosti a kapacity metodou přímou. Fyzikální praktikum [online]. [cit. 26-10-2018]. [https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_207.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_207.pdf)
- [2] English, Jiří. Úvod do praktické fyziky I. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 2006, 145 s. ISBN 80-86732-93-2.