

Zadání:

- 1) Změřte a graficky znázorněte závislost činitele jakosti Q na kmitočtu $Q=f(f)$ alespoň dvou různých cívek z výbavy Q -metru metodou přímého měření Q .
- 2) Zkontrolujte přesnost předchozí metody na stejných cívkách metodou kapacitního rozladění obvodu. Výsledné hodnoty znázorněte do stejného grafu jako v bodě 1. Kontrolu proveďte alespoň pro 5 různých hodnot u každé cívky. V závěru proveďte porovnání přesnosti a náročnosti obou metod.
- 3) Změřte vlastní kapacitu alespoň tří cívek :
 - a) analytickou metodou - měření proveďte u každé cívky alespoň pro tři různé kmitočty. Výsledky měření porovnejte s údaji výrobce.
 - b) grafickou metodou - typy cívek a kmitočty volte podle předchozího zadání. V závěru proveďte porovnání přesnosti a náročnosti obou metod.
- 4) Změřte a graficky znázorněte indukčnost alespoň dvou cívek v závislosti na kmitočtu $L=f(f)$. Měření proveďte pro jednu cívku na nižších a jednu cívku na vyšších kmitočtech. **Pozor na výběr cívky !**

Teoretický úvod:

Činitel jakosti sériového rezonančního obvodu:

V součástkách skutečného rezonančního obvodu vznikají při průchodu proudu ztráty. Tyto ztráty můžeme brát jako zařazené ztrátové odpory R_L a R_C do série s cívkou a kondenzátorem, které potom dále uvažujeme jako bezeztrátové. Oba odpory dohromady dávají ztrátový odpor $R_{SO} = R_L + R_C$, jehož pomocí definujeme pro rezonanční frekvenci činitele jakosti sériového rezonančního obvodu naprázdno Q_0 . Tento výsledný činitel jakosti nelze změřit. Můžeme jej pouze vypočítat.

$$Q_{0L} = \frac{\omega * L}{R_L} \quad Q_{0C} = \frac{1}{\omega * C * R_C} \quad Q_0 = \frac{Q_{0L} * Q_{0C}}{Q_{0L} + Q_{0C}}$$

V provozních podmínkách je obvod napájen ze zdroje s vnitřním odporem R_i , popř. je-li v sérii s cívkou a kondenzátorem další rezistor R , působí všechny sériové odpory na vlastnosti obvodu souhlasně a tvoří dohromady odpor R_s .

$$Q = \frac{\omega_0 * L}{R_s} = \frac{1}{\omega_0 * C * R_s} \quad R_s = R_i + R + R_{SO}$$

Činitel jakosti, který respektuje všechny tyto odpory se nazývá provozní činitel jakosti. Protože R_s je větší než R_{SO} , je činitel jakosti Q menší vždy než činitel jakosti Q_0 . Z tohoto poznatku plyne závěr. Abychom příliš nezmenšovali činitel jakosti, musíme sériové rezonanční obvody napájet ze zdrojů s malým vnitřním odporem R_i .

Činitel jakosti paralelního rezonančního obvodu:

Ztráty v součástkách použitých ke konstrukci rezonančního obvodu vyjádříme pro tento případ paralelními ztrátovými odpory cívky R_L a kondenzátoru R_C . Jejich paralelní spojení určuje ztrátový odpor R_{PO} , jehož pomocí definujeme činitele jakosti paralelního obvodu naprázdno Q_0 .

$$Q_0 = \frac{R_{PO}}{\omega_0 * L} = R_{PO} * \omega_0 * C \quad R_P = \frac{R_L * R_C}{R_L + R_C}$$

Dá se vypočítat stejně jako pro sériový obvod pomocí činitele jakosti cívky Q_L a kondenzátoru Q_C .

$$Q_0 = \frac{Q_L * Q_C}{Q_L + Q_C}$$

V provozních podmínkách je ale obvod připojen ke zdroji signálu s vnitřním odporem R_i a k zátěži R_z . Tyto odpory tvoří vnější tlumící odpor R_{TL} . Vypočte se jako paralelní kombinace těchto dvou odporů a paralelně se řadí ke ztrátovému odporu R_{p0} a zmenšuje činitel jakosti. Výsledný činitel jakosti Q se nazývá také provozní činitel jakosti a vypočítá se ze

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 * L} = R_p * \omega_0 * C$$

kde R_p je paralelní kombinací odporů R_{TL} a R_{p0} . Porovnáním činitelů jakosti dostaneme poměr:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{R_{TL}}{(R_{p0} + R_{TL})}$$

ze kterého plyne

$$Q = Q_0 \frac{R_{TL}}{R_{p0} + R_{TL}} \quad R_{TL} = R_{p0} \frac{Q}{Q_0 - Q}$$

Oba poslední vztahy se dají použít v případech, kdy jde o připojení dalšího tlumícího odporu k rezonančnímu obvodu. Místo činitele jakosti Q_0 dosazujeme provozní činitel jakosti Q před připojením dalšího tlumícího rezistoru. Odpor dalšího tlumícího rezistoru dosazujeme za odpor R_{TL} . Místo odporu R_{p0} uvažujeme původní ztrátový odpor R_p .

Princip činnosti Q-metru :

Činitel jakosti Q-metru je bezrozměrná veličina, která se rovná součinu 2π krát poměr energie uchované v obvodu a energie rozptýlované obvodem za dobu odpovídající jedné periodě kmitů. Činitel jakosti odvozený z této definice a vyjádřený pomocí soustředěných parametrů má tvar

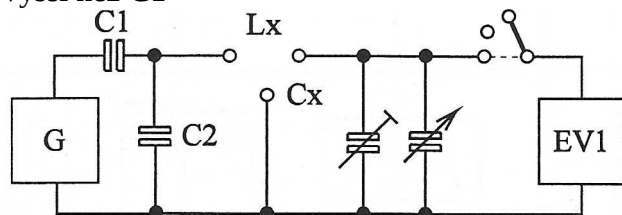
$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}$$

L, C ... indukčnost a kapacita obvodu

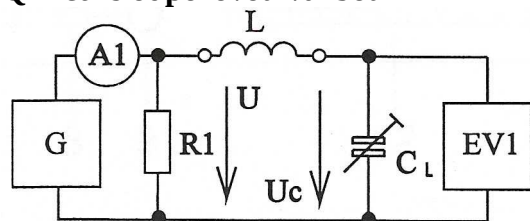
R ekvivalentní ztrátový odpor obvodu při rezonanci

V Q-metru vytváří měřená indukčnost spolu s otočným kondenzátorem sériový rezonanční obvod připojený na napájecí zdroj přes vazební transformátor s prstencovým jádrem, jehož odpor je zanedbatelně malý. Napětí na otočném kondenzátoru se měří ručkovým přístrojem se stupnicí cejchovanou v hodnotách Q .

Q-metr s kapacitní vazbou - $C1$... poměrně malá kapacita, asi 10pF, $C2$... zhruba o 3 řády vyšší než $C1$

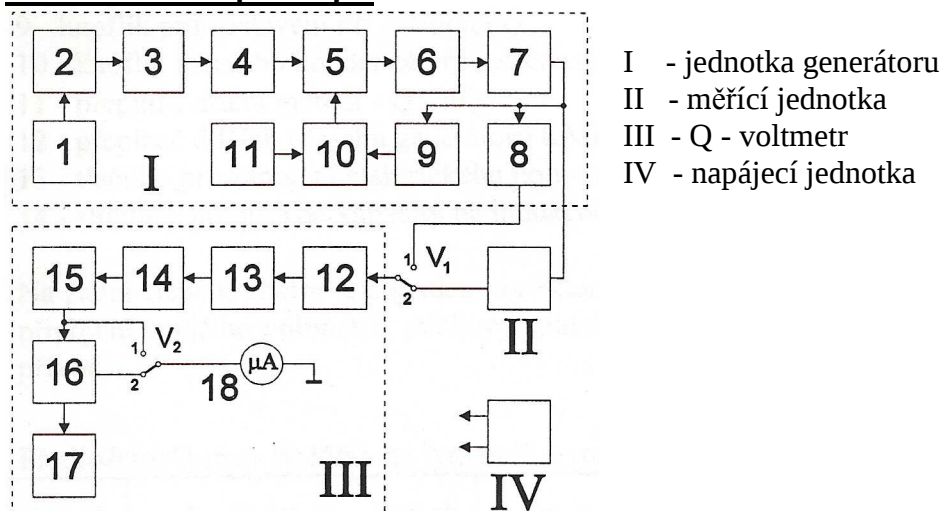


Je vidět, že Q-metr s kapacitní vazbou musí mít dosti výkonný generátor.

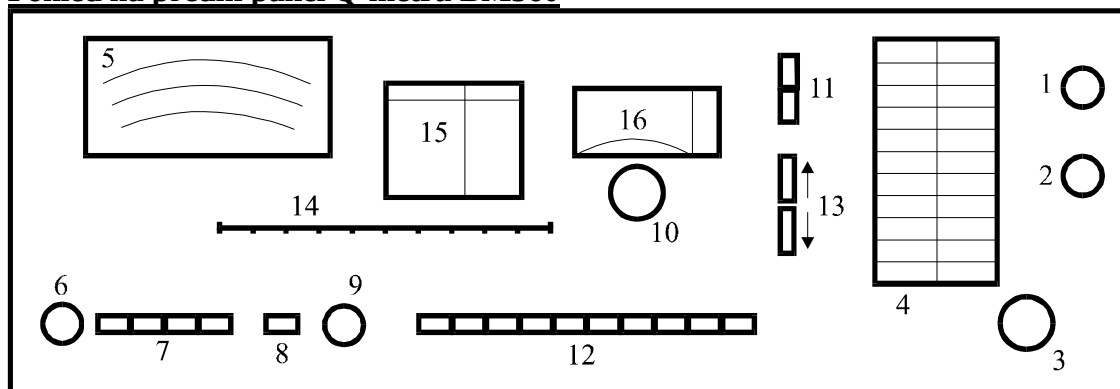
Q-metr s odporovou vazbou

$$U = I \cdot R, \quad Q = \frac{U_c}{U}, \quad \text{pak pro } U = 1V \dots \dots \quad Q = U_c$$

Pozor na odpor R - aby nezhoršil činitel jakosti obvodu, je jeho hodnota pouze několik setin Ω (asi $0,04\Omega$).

Schéma zapojení:**Funkční schéma přístroje :**

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1 - řídicí laditelný oscilátor | 10 - rozdílový ss zesilovač |
| 2 - zesilovač budícího napětí | 11 - zdroj referenčních napětí |
| 3 - dělič kmitočtu | 12 - emitorový sledovač |
| 4 - dolnofrekvenční propusti | 13 - regulační zeslabovač |
| 5 - řízený elektronický zeslabovač | 14 - širokopásmový zesilovač |
| 6 - širokopásmový zesilovač | 15 - detektor |
| 7 - emitorový sledovač | 16 - rozdílový zesilovač DQ |
| 8 - kalibrační dělič | 17 - nastavitelný zdroj referenčních napětí |
| 9 - detektor | 18 - měřicí přístroj – mikroampérmetr |

Pohled na přední panel Q-metru BM560

1-indikační žárovka, 2-napájení, 3-knoflík k nastavení kmitočtu generátoru, 4-stupnice generátoru, 5-měřicí přístroj (ukazatel rezonance a činitele Q), 6-knoflík pro nastavení nuly, 7-přepínač rozsahů (citlivosti) měřidla Q, 8-tlačítko kalibrace, 9-knoflík pro kalibraci, 10-knoflík měrného kondenzátoru C_N , 11-přepínač druhu měření, 12-přepínač rozsahů generátoru, 13-tlačítko elektrického pohonu knoflíku měrného kondenzátoru, 14-stupnice pro převod kapacity na indukčnost při měření indukčnosti, 16-stupnice měrného kondenzátoru C_N

Na zadní stěně Q-metru je pojistka, konektor MĚŘENÍ KMITOČTU, svorka ochranného uzemnění, svorky pro připojení vnějšího voltmetru, páčkový spínač pro vypínání vestavěného (vnitřního) měřicího přístroje a síťový přívod.

Předložený Q-metr BM560 má tyto měřicí rozsahy :

rozsah	kmitočet	rozsah	Kmitočet
I.	50 - 70 kHz	VI.	1,1 - 2,2 MHz
II.	70 - 140 kHz	VII.	2,2 - 4,4 MHz
III.	140 - 280 kHz	VIII.	4,4 - 9,0 MHz
IV.	280 - 550 kHz	IX.	9,0 - 18 MHz
V.	550 - 1100 kHz	X.	18 - 35 MHz

Rozsah přímého odečítání činitele jakosti je od 5 do 1000. Odečítá se na čtyřech stupnicích : 0 - 30, 0 - 100, 0 - 300, 0 - 1000. Měrný kondenzátor měřící jednotky má nejmenší kapacitu 25 pF a největší 45 pF. Q-metr umožňuje měření napětí na měřeném objektu. **Maximální napětí na měřeném objektu může být 500 mV !!!** Měření indukčnosti se provádí rezonanční metodou v rozsahu $5 \cdot 10^{-8}$ až 0,4 H. K tomuto účelu má Q-metr na přední straně stupnici pro převod kapacity měrného kondenzátoru na ekvivalentní hodnoty indukčnosti.

Postup měření, naměřené a vypočítané hodnoty :**Příprava přístroje k činnosti :**

Ovládací prvky Q-metru nastavte do této **výchozí polohy** :

- přepínač druhu měření Q - ΔQ do polohy Q,
- přepínač VNITŘNÍ VOLTMETR (INT.VOLTMETER) - VYP (OFF) do polohy VNITŘNÍ VOLTMETR,
- zapněte napájení - po 15 minutách je Q-metr připraven k měření.

Poté proveďte funkční kontrolu Q-metru :

- přepínač kmitočet (FREQUENCY) nastavte na první dílčí rozsah,
- přepínač ROZSAHY Q (Q RANGES) dejte do polohy 300,

- stiskněte tlačítko kalibrace Q (Q CALIBRATION),
- knoflíkem KALIBRACE Q (Q CALIBRATION) zkontrolujte rezervu kalibrace (za značkou V) na stupnici měřicího přístroje,
- zkontrolujte rezervu kalibrace na všech dílčích rozsazích generátoru
- přepínač Q - ΔQ dejte do polohy ΔQ ,
- knoflíky NULA ΔQ (ΔQ ZERO) a kalibrace Q (Q CALIBRATION) prověřte možnost nastavení nuly na stupnici měřicího přístroje při stisknutí tlačítka kalibrace Q (Q CALIBRATION),
- povolte tlačítko kalibrace Q (Q CALIBRATION),
- stiskněte tlačítko 13 a zkontrolujte otáčení stupnice měrného kondenzátoru.

Proveďte kalibraci Q-metru :

- nastavte přepínač KMITOČET (FREQUENCY) na požadovaný dílčí rozsah kmitočtu,
- knoflíkem KMITOČET (FREQUENCY) nastavte požadovaný kmitočet,
- přepínač Q - ΔQ dejte do polohy Q,
- stiskněte tlačítko KALIBRACE Q (Q CALIBRATION),
- **knoflíkem KALIBRACE Q (Q CALIBRATION) nastavte ručku přesně na rysku pod značkou V a povolte tlačítko KALIBRACE Q - tím je Q-metr připraven k měření.**

1) Metoda přímého měření Q

Při měření postupujte takto:

- připojte měřený objekt (např. indukční cívku) ke svorkám Lx.
- přepínač ROZSAHY Q (Q RANGES) dejte do polohy odpovídající předpokládané hodnotě Q měřeného objektu.
- proveďte kalibraci Q-metru - postup uveden výše
- nalad'te obvod do rezonance - hrubé naladění se provede stisknutím tlačítka, kterým se zapíná pohon rotoru měrného kondenzátoru, jemné naladění se provede knoflíkem KAPACITA pF (CAPACITANCE pF). Okamžik naladění měřeného objektu do rezonance odpovídá maximálnímu údaji ručky měřicího přístroje.
- jestliže ručka měřicího přístroje je v rozsahu 1/3 stupnice, proveďte přepnutí na citlivější stupnici přepínačem ROZSAHY Q (Q RANGES)
- po přesném naladění obvodu do rezonance stiskněte tlačítko KALIBRACE Q (Q CALIBRATION) a knoflíkem KALIBRACE Q nastavte ručku měřicího přístroje přesně na rysku opatřenou značkou V. Poté povolte tlačítko KALIBRACE Q.
- odečtěte činitel jakosti Q na příslušné stupnici měřicího přístroje.

Požaduje-li se větší přesnost měření, zkontrolujte před provedením odečtů přesnost naladění obvodů do rezonance a podle potřeby proveďte doladění. Při polohách přepínače ROZSAHY Q (Q RANGES) 300 a 1000 proveďte odečet na stupnicích 30 a 100 a odečtené údaje násobte deseti.

2) Měření Q metodou kapacitního rozladění obvodu

Tato metoda spočívá v měření šíře propustného pásma obvodu a využívá závislosti obvodu na jeho propustném pásmu. Při měření postupujte takto:

- připojte měřený objekt na svorky Lx
- proveďte kalibraci Q-metru
- nalad'te obvod do rezonance a odečtěte Q na stupnici měřicího přístroje a kapacitu C na stupnici KAPACITA pF.
- rozlad'te obvod knoflíkem KAPACITA pF tak, že údaj měřicího přístroje zmenšíte na úroveň 0,707 hodnoty naměřeného Q. Tuto operaci proveďte dvakrát: při rozladění

směrem k malým a směrem k velkým kapacitám a odečtěte hodnoty C_1 a C_2 . Současně je nutno vždy kontrolovat kalibraci a v případě potřeby dostavit.

Činitel jakosti Q_0 měřeného objektu se vypočte ze vzorce $Q_0 = \frac{2C}{C_2 - C_1}$.

3a) Analytická metoda zjišťování vlastní kapacity indukčních cívek C_0

Při měření postupujte takto:

- připojte cívku ke svorkám L_x
- přepínač $Q - \square Q$ přepněte do polohy Q
- přepínač ROZSAHY Q přepněte do polohy 1000
- přepínač KMITOČET přepněte na libovolný dílčí rozsah
- stiskněte tlačítko KALIBRACE Q
- proved'te kalibraci měřicího přístroje knoflíkem KALIBRACE Q
- povolte tlačítko KALIBRACE Q
- knoflíkem KAPACITA pF nastavte na kapacitní stupnici měrného kondenzátoru kapacitu C_1 blízkou maximálním hodnotám
- odečtěte hodnotu kapacity C_1
- knoflíkem KMITOČET nalad'te obvod do rezonance, přitom nastavte potřebný dílčí rozsah přepínačem KMITOČET
- odečtěte rezonanční kmitočet f_1
- knoflíkem KMITOČET nastavte kmitočet $f_2 = 2 \cdot f_1$
- proved'te kalibraci měřicího přístroje
- knoflíkem KAPACITA pF nalad'te obvod do rezonance
- odečtěte hodnotu kapacity C_2 na kapacitní stupnici měrného kondenzátoru

Vlastní kapacita indukční cívky C_0 se vypočte pomocí vzorce

$$C_0 = \frac{C_1 - 4C_2}{3}$$

Poznámky:

V obecném případě, zanedbá-li se chyba nastavení kmitočtu f_2 , pak při $f_2 = \alpha \cdot f_1$ a za

podmínky $\alpha > 1$ platí v obecném případě výraz $C_0 = \frac{C_1 - \alpha^2 C_2}{\alpha^2 - 1}$.

Pro případ $\alpha = \sqrt{2}$ se tento výraz zjednodušuje do tvaru $C_0 = C_1 - 2C_2$, kde α je koeficient udávající, kolikrát se f_2 liší od f_1 .

3b) Grafická metoda zjišťování vlastní kapacity cívek

Výraz $L \cdot \omega^2(C + C_0) = 1$ lze znázornit přímkou v rovině, jestliže se C bude považovat za

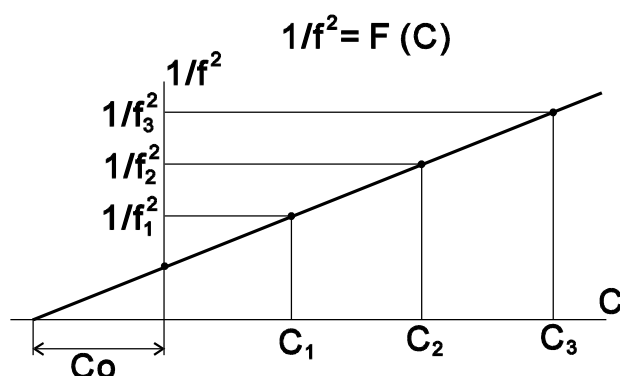
nezávislou a $\frac{1}{f^2}$ za závislou proměnnou. Potom $\frac{1}{f^2} = (2\pi)^2 \cdot LC + (2\pi)^2 \cdot LC_0$

Při $\frac{1}{f^2} = 0$ obdržíme $C = -C_0$.

Proměřovaná cívka se připojí ke svorkám L_x . Při několika hodnotách kapacity C podle stupnice měrného kondenzátoru se změří rezonanční kmitočet a na základě těchto hodnot se

sestrojí graf funkce $\frac{1}{f^2} = f(C)$ (viz.obr.).

Graf pro stanovení vlastní kapacity indukční cívky C_0



Přímku sestrojenou podle obdržených bodů je nutno prodloužit až do protnutí osy C . Záporný úsek na ose C mezi průsečíkem této přímky s osou C a počátkem souřadnic odpovídá hodnotě vlastní kapacity C_0 měřené indukční cívky.

ad 1)

cívka č.2

f [Hz]	80k	90k	100k	110k	120k	130k	140k
Q [-]	140	152	161	166	170	175	178

cívka č.8

f [MHz]	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
Q [-]	205	212	220	225	230	232	237	240	246

ad 2)

cívka č.2

f [Hz]	80k	90k	100k	110k	120k	130k	140k
Q [-]	140	152	160	165	170	173	178
0,707 Q [-]	98,98	107,464	113,12	116,655	120,19	122,311	125,846
C1 [pF]	378,5	298,5	239,2	197,4	167,2	139,8	121
C2 [pF]	385,2	303,1	242,7	200,2	165,1	141,5	119,6
C[pF]	381,7	300,7	240,4	198,7	166,3	140,7	120,4
Qo [-]	113,94	130,739	137,371	141,929	158,381	165,529	172

cívka č.8

f [MHz]	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
Q [-]	205	210	219	220	230	230	235	240	245
0,707 Q [-]	144,93	148,4	154,83	155,54	162,61	162,61	166,14	169,68	173,2
C1 [pF]	216,5	183	158,2	138,1	114	104,4	93	82,8	75,1
C2 [pF]	214,3	185	156,7	136,4	120	105,8	233,2	237,4	74,4
C[pF]	215,5	184	157,5	137,5	114,5	105,3	93,3	83,1	74,8
Qo [-]	195,90	184	210	161,76	38,166	150,42	1,3309	1,0750	213,7

$$Q_0 = 2C / (C_1 - C_2) = 2 \cdot 215,5 / (216,5 - 214,3) = 195,9$$

ad 3a)

L1:

$$C1=340\text{pF}$$

$$f1=50,5\text{kHz} \rightarrow f2=2f1=101\text{kHz}$$

$$C2=78,7\text{pF}$$

$$C0=(C1-4.C2)/3=(340-4.78,7)/3=8,4\text{pF}$$

L7:

$$C1=380\text{pF}$$

$$f1=1,36\text{MHz} \rightarrow f2=2f1 = 2,72\text{MHz}$$

$$C2=91,2\text{pF}$$

$$C0= (C1-4C2) / 3 = (380-4.91,2) / 3 = 5,06\text{pF}$$

ad 3b)

	L1				L7	
f[Hz]	50k	65k	80k	1,5M	2M	2,5M
C[pF]	349,6	204,8	132	313	174	110

odečteno z grafu: 8pF

4,5pF

Použitá literatura:

sešit základů elektroniky

dokumentace ke Q-metru BM560

internetová stránka <http://hellweb.jinak.cz>**Použité přístroje:**

Q-metr 9-9a-AL1640

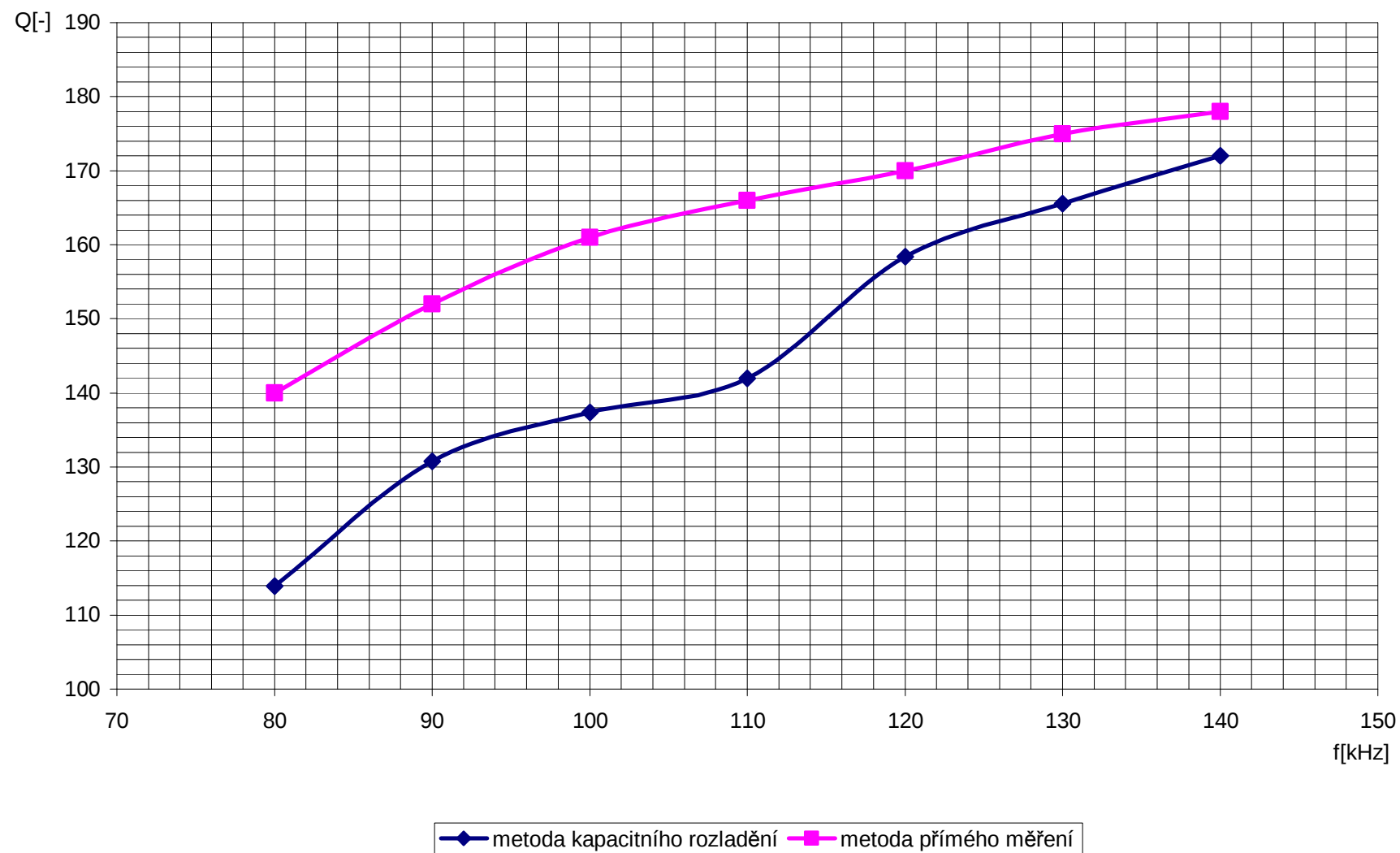
cívky L1, L2, L7, L8

Závěr:

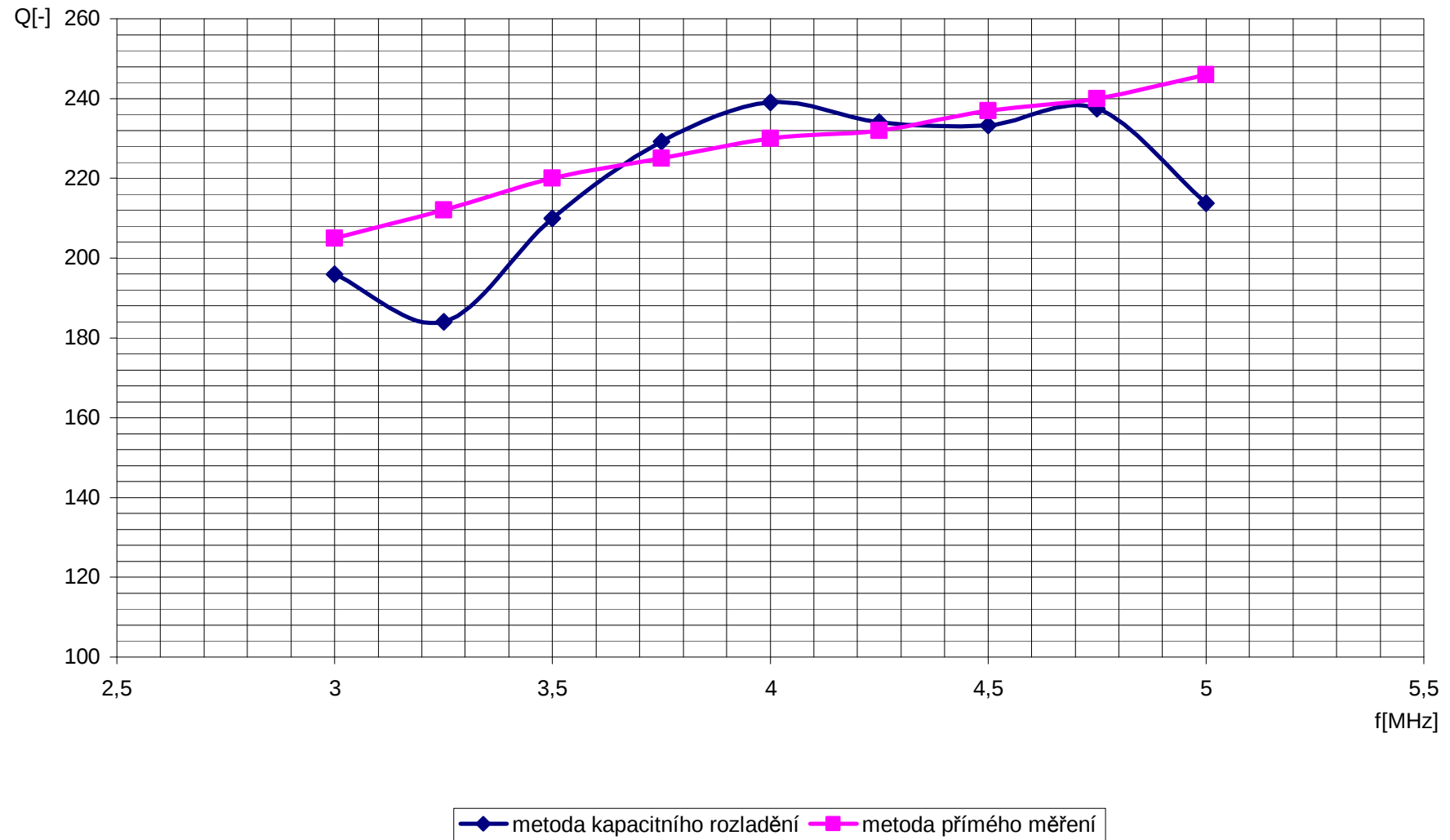
Z výsledků měření vyplynulo, že přímá metoda je přesnější, než metoda kapacitního rozladění. Výpočet vlastní kapacity je mnohem přesnější než grafická metoda, protože při odečítání z grafu se můžeme dopustit chyby.

Naměřené hodnoty nám vyšly podle údajů výrobce, jen u cívky č.8 nám vyšlo Q o něco větší(při 5MHz 246), než udává výrobce(200-230).

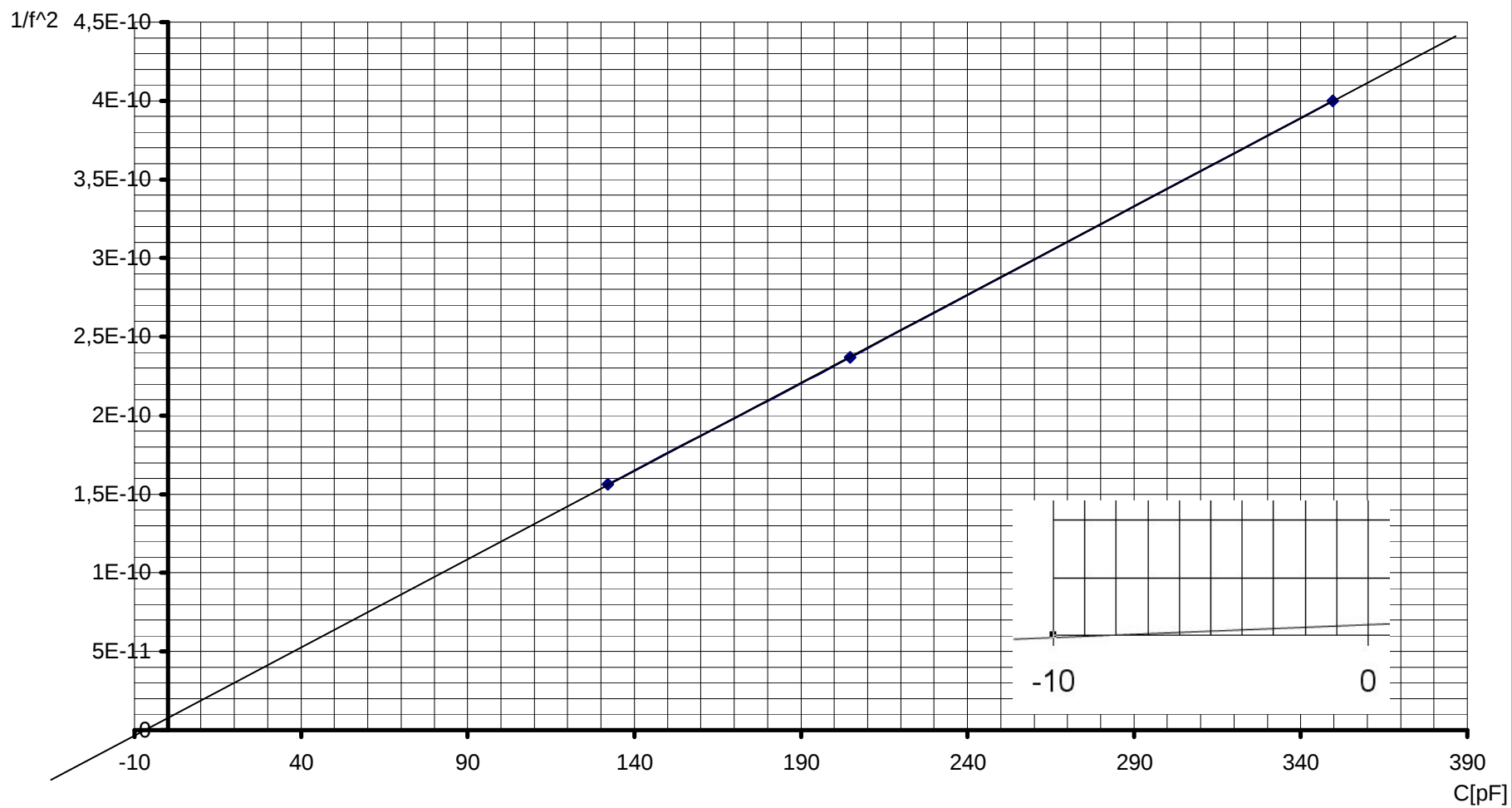
Závislost činitele jakosti na frekvenci pro L2



Závislost činitele jakosti na frekvenci pro L8



Graf pro stanovení vlastní kapacity indukční cívky L1



Graf pro stanovení vlastní kapacity indukční cívky L8

