

Tento článek vyšel v Ra 5/2003
ok1ayy 23.11.2006

Mění se indukčnost na feritových toroidech s kmitočtem?

Ano, a to tím více, čím nízkofrekvenčnější feritový materiál na KV použijeme. Indukčnost často měříme nízkofrekvenčním RLC metrem, počítáme pomocí cívkové konstanty A_L či z počáteční permeability uvedené v katalogu, nebo stanovujeme pomocí počítačových programů např. [1], či tabulek [2]. Oproti takto zjištěné hodnotě ale indukčnost většinou s kmitočtem mírně stoupá na hodnotu 110-150 %, u nemnoha materiálů až 250 %, na ještě vyšších kmitočtech pak klesá i pod 10 %. Kmitočtová závislost indukčnosti se týká nejen toroidů, ale i feritových hrníčků a E jader bez mezery, ale i všech ostatních uzavřených feritových jader, které vzduchovou mezeru nemají. Indukčnost cívky na feritovém toroidu na tom kterém kmitočtu je to první a nejzákladnější, co bychom měli o cívce vědět. Je zřejmé, že v rozsahu KV nebo VKV nám správnou indukčnost nezměří žádné nf RLC metry. Pokusme se proto praktickým pohledem tajemství kmitočtové závislosti indukčnosti cívek na feritových toroidech poodhalit, abychom při odhadu indukčnosti vystačili i s laciným nf RLC metrem.

Kmitočtová závislost indukčnosti na feritovém toroidu

Informaci o tom, jak se mění indukčnost cívky na feritovém toroidu a její ztráty s kmitočtem, nám říkají průběhy komplexní permeability μ_k . Výrobci feritových materiálů je publikují v katalogích. Příklady průběhů jsou na obr. 1. Reálná část komplexní permeability μ^l určuje indukčnost cívky. Na nízkofrekvenčních kmitočtech se μ^l rovná počáteční permeabilitě μ_i (initial), která je uvedena v katalogu. Míčko μ_i nebo μ_p - ve školních učebnicích μ_r (relativní) - je ono míčko, o kterém hovoříme v kroužcích na pásmech. Míčko z katalogu nám říká, kolikrát bude indukčnost L na nízkofrekvenčním kmitočtu - standardně 10 kHz/0,1 mT/25°C - větší, než indukčnost téže cívky L_0 bez jádra. To samé, ale v závislosti na kmitočtu, nám říká křivka průběhu reálné části komplexní permeability μ^l . Jak vidíme ze vztahu (1), je shodná s kmitočtovým průběhem indukčnosti L a tedy i s kmitočtovým průběhem cívkové konstanty (součinitelem indukčnosti nebo činitelem indukčnosti jádra) A_L . Mějme proto na paměti, že i hodnota A_L platí pro 10 kHz, resp. jen do kmitočtu f_k , jak uvidíme dále. V tabulce 1 jsou násobitelé pro obvykle používané materiály, kterými musíme na různých kmitočtech vynásobit indukčnost změřenou nf RLC metrem nebo spočítanou ze známé A_L konstanty, přímo z katalogového „míčka“ a rozměrů jádra, z počítačových programů nerespektujících komplexní permeabilitu [1] nebo z tabulek (např. [2]), abychom dostali skutečnou indukčnost na kmitočtu, kde budeme cívku používat.

Závislost jakosti Q na kmitočtu

Ze vztahu (1) je také zřejmé, že imaginární část komplexní permeability μ^l určuje ztráty v jádru. Pokud ve vztahu (1) podělíme hodnoty reálných a imaginárních částí komplexní permeability, dostaneme kmitočtový průběh činitele jakosti jádra Q - viz vztah (2). Není sice úplně stejný s průběhem jakosti cívky Q na feritovém toroidu, zanedbáme-li ale rozdíl, můžeme v prvním přiblížení jakost cívky Q a činitel jakosti jádra Q považovat za jedno a totéž. Při našem zjednodušení tedy klesne jakost cívky na $Q = 1$ na kmitočtu, kde se protínají průběhy reálné části μ^l a imaginární části μ^l komplexní permeability. Kmitočet, kde se průběhy protínají, jsem nazval f_{Q1} - viz obr. 1a. Tento kmitočet nám říká, že jádro na tomto a vyšším kmitočtu pro malou jakost již nemůžeme použít na cívky pro laděné obvody, ale jen na různé tlumivky a aperiodické transformátory. Jakost s kmitočtem dále klesá pod jedničku. Kmitočty f_{Q1} pro různé feritové materiály jsou v tabulce 1.

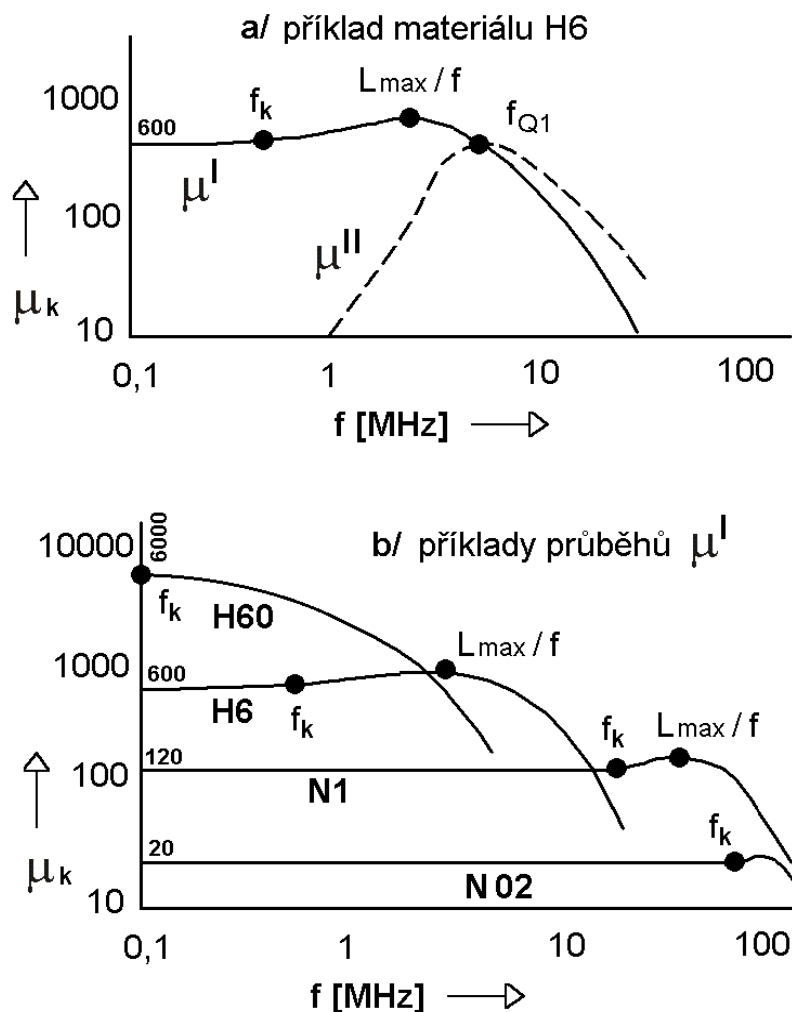
$$\mu_k = \mu' - j\mu'' = \frac{L}{L_0} - \frac{jR}{\omega L_0} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\mu'}{\mu''} = \frac{\omega L}{R} \quad (2)$$

kde μ_k - komplexní permeabilita, tedy míčko tak jak ho známe, μ' – reálná část komplexní permeability – určuje indukčnost cívky na toroidu, $j\mu''$ – imaginární část komplexní permeability – určuje ztráty v jádře, L – indukčnost cívky na toroidu, L_0 – indukčnost téže cívky bez jádra, R – ztrátový odpor jádra (ne vinutí), Q – činitel jakosti jádra (přibližně rovný jakosti cívky na jádru).

Do jakého kmitočtu je indukčnost kmitočtově nezávislá?

Obr. 1b ilustruje častý případ: průběh reálné části komplexní permeability μ' je do určitého kmitočtu souběžný s osou x a tedy indukčnost se do tohoto kmitočtu nemění. Tento kmitočet jsem nazval f_k . U některých materiálů se neobjevuje vodorovná část průběhu reálné části μ' , ale již od nízkých kmitočtů křivka mírně klesá nebo mírně stoupá. V těchto případech uvažuji v tabulce 1 jako kmitočet f_k takový, kdy je odchylka indukčnosti odpovídající počáteční permeabilitě pod 10 %. Kmitočet f_k je tedy kmitočet, do kterého bude indukčnost cívky na toroidu stejná s hodnotou, kterou jsme změřili nízkofrekvenčním RLC metrem nebo spočítali z katalogového „míčka“, rozměrů jádra, pomocí konstanty A_L nebo programů a tabulek [1], [2] apod. Nad tímto kmitočtem musíme měřit indukčnost na daném kmitočtu třeba přístroji RF1, MFJ259B či novějšími, nebo jednoduše vynásobit indukčnost údaji z tabulky 1.



Obr. 1. Příklady průběhů reálné části μ' (a tedy i indukčnosti a cívkové konstanty A_L) a imaginární části μ'' (ztrát v jádru a přibližně tedy i jakosti cívkové Q) komplexní permeability a význam radioamatérských konstant f_k – kmitočet, do kterého je indukčnost konstantní, f_{Q1} – kmitočet, kdy jakost cívkové na daném feritovém toroidu klesne na $Q = 1$ a L_{max}/f – kmitočet na kterém je indukčnost cívkové na daném materiálu největší.

Reálná cívka na feritovém toroidu

Zatím jsme uvažovali bezstrátovou indukčnost, která - jak již víme, kopíruje průběh reálné části komplexní permeability μ' . S narůstajícím kmitočtem ale cívka indukčnost ztrácí a významně narůstají ztráty jádra. Nakonec dojde k tomu, že cívka přestává být cívkou a začne se chovat převážně pouze jako činný odpor, který má ovšem pro stejnosměrný proud nepatrnou hodnotu. Na cívku se pak díváme jako na indukčnost, která odpovídá její impedanci na daném kmitočtu. To souhlasí i s hodnotami indukčnosti, které změříme přístroji RF1, MFJ259B, apod.

Vše vysvětluje příklad na obr. 2 pro materiál H6 bývalého Prametů Šumperk. Ten je uprostřed mezi vyloženě nízkofrekvenčními ferity a ferity pro KV. Jako demonstrační příklad nám proto dobře poslouží. Cívka na obr. 2 má do kmitočtu $f_k = 0,5$ MHz indukčnost $20 \mu\text{H}$. Pokud budeme tvrdit, že oněch $20 \mu\text{H}$ platí na všech kmitočtech, jsme daleko od pravdy. Druhý extrém vznikne, pokud bychom zanedbali ztráty v jádru a brali na zřetel jen čistou indukčnost, která je například na 24 MHz u dané cívkové jen $0,4 \mu\text{H}$. V praxi proto uvažujeme hodnotu indukčnosti včetně ztrát, to znamená takovou indukčnost, která odpovídá impedanci cívkové na daném kmitočtu. Ta nejlépe vystihuje chování cívkové v nějakém obvodu a změříme jí přístroji RF1, MFJ259B a podobnými přístroji novějšími. Na příkladu z obr. 2 si ještě všimněte, že jakost odečtená z průběhů komplexní permeability pro materiál H6 vychází

na kmitočtu 24 MHz $Q = 0,1$ a může se dále ještě trochu zmenšovat. U reálných toroidních cívek na různých feritových materiálech jsem ale na žádném kmitočtu neměřil jakost nižší, než asi $Q = 0,3$. Na ještě vyšších kmitočtech se měřená jakost u reálné cívky vrací zpět na $Q = 1$ až 2. V tabulce 1 jsou násobitelé indukčnosti, které odpovídají oběma složkám komplexní permeability, to znamená impedanci cívky. U materiálů Amidon 43 a 77 a Pramet N05 a H7 jsem neměl k dispozici katalogové údaje komplexní permeability, hodnoty jsou v těchto případech změřeny. Pamatujte, že katalogové údaje feritů mívají rozptyl 25 %, levné nf i vf přístroje stěží měří s chybou pod 10 %, bazarové ferity mívají rozptyl parametrů až 40 %. Vinutí reálné cívky nemusí mít dokonalou vazbu na jádro a tak různé počty závitů, průřezů a izolací vodičů znamenají další rozptyl násobitelů indukčnosti asi +/- 20%. Z tohoto důvodu jsou v tabulce 1 násobitelé zaokrouhleni na jeden platný řád. Pokud jsem uvedl více řádů, je to jen proto, aby byla vidět tendence změn indukčnosti. Pokoušet se o větší přesnost nemá vzhledem k velkým výrobním tolerancím žádný smysl.

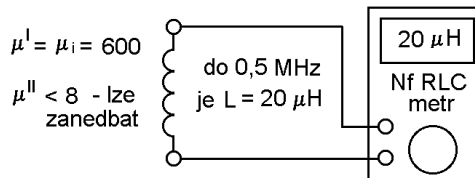
Toroid T10 / H6 / 9 závitů na 0,5, 3,5, 10 a 24 MHz

$$A_L = 245 \text{ nH} / z^2 = 0,245 \mu\text{H} / z^2$$

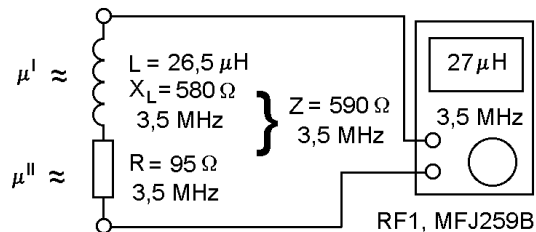
$$L = 9^2 \cdot 0,245 = 20 \mu\text{H}$$

(standardně platí na 10 kHz při sycení 0,1mT a 25°C)

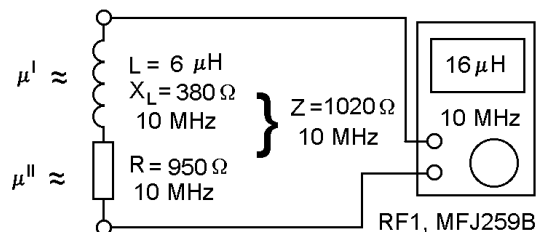
Cívka na toroidu T10/H6/9 závitů do 0,5 MHz:



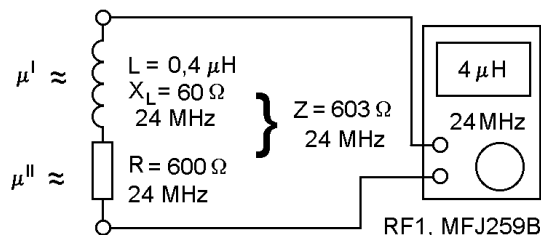
Cívka na toroidu T10/H6/9 závitů na 3,5 MHz:



Cívka na toroidu T10/H6/9 závitů na 10 MHz:



Cívka na toroidu T10/H6/9 závitů na 24 MHz:



Obr. 2. Příklad změn indukčnosti s kmitočtem u feritového materiálu Pramet Šumperk H6.

Tabulka násobitelů indukčnosti - část 1														
Materiál	N01	N01P	4E1	N02	N05	4D2	1F	N1	4C65	N2	4B1	N3	2C	H6
Výrobce	Pramet	Pramet	Philips	Pramet	Pramet	Philips	Iskra	Pramet	Philips	Pramet	Philips	Pramet	Iskra	Pramet
barevné značení	červená	růžová		sv.zelená	tm.modrá			žlutá		tm.zelená				černá
počáteční permeabilita	10	11	15	20	50	60	80	120	125	200	250	250	300	600
kmitočet [MHz]														
1,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,3	1	1,1
1,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,4	1	1,2
3,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,5	1,3	1,4
7	1	1	1,06	1	1	1	1	1	1,1	1,2	1,2	1,6	1,3	1
14	1	1	1,1	1	1	1,1	1,06	1	1,1	0,9	1,1	1,6	0,8	0,4
21	1	1	1,15	1	1,1	1,2	1,15	1,1	1,2	0,8	1,08	1,4	0,7	0,3
28	1	1	1,17	1	1,3	1,3	1,2	1,1	1,2	0,7	0,9	1,1	0,6	0,2
50	1	1	1,2	1	2	1,3	1	0,9	1,2	0,5	0,7	0,9	0,4	
100	1	1,1	1,3	1,1	0,6	1,1	0,8	0,5	0,7	0,35	0,4	0,5		
145	1,1	1,2	1,5	0,7	0,2	1	0,7	0,3	0,6	0,25	0,3	0,3		
L_{max} / f [- / MHz]	1,25/210	1,6/220	1,8/270	1,1/95	2/50	1,3/40	1,2/30	1,1/22	1,2/22	1,2/7	1,2/7	1,6/11	1,3/4,5	1,4/3,5
f_k [MHz]	100	90	10	80	20	10	10	17	10	3,5	2,5	0,7	2,5	0,5
f_{Q1} [MHz]	700	700	320	300	200	150	80	145	45	25	23	32	15	6,5

Tabulka násobitelů indukčnosti - část 2																
Materiál	H7	4A11	43	1C	3B1	4A15	H12	H21	H20	77	H22	H40	H60	A2	G52	3E9
Výrobce	Pramet	Philips	Amidon	Iskra	Philips	Philips	Pramet	Pramet	Pramet	Amidon	Pramet	Pramet	Pramet	Thomson	Iskra	Philips
barevné značení	sv.zelená						sv.modrá		šedá		oranžová	okř tmavý				
počáteční permeabilita	700	850	850	900	900	1200	1260	1900	2000	2000	2200	4300	6000	10000	15000	20000
kmitočet [MHz]																
1,1	1	1,07	2,2	1,1	1,1	1	1,1	0,8	1	0,7	0,8	0,9	0,4	0,3	0,2	0,11
1,8	1,16	1,07	1,5	1	1,1	1,1	1,2	0,7	0,8	0,4	0,6	0,7	0,2	0,15	0,15	0,01
3,5	1,06	1	0,8	0,9	1	0,8	1,1	0,6	0,5	0,2	0,4	0,5	0,04	0,08	0,09	0,005
7	0,7	0,7	0,3	0,6	0,7	0,5	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,02	0,02		0,003
14	0,4	0,5	0,12	0,4	0,5	0,2	0,4		0,15	0,05	0,03	0,06				
21	0,3	0,4	0,06	0,3	0,3	0,15	0,2		0,1	0,03						
28	0,2	0,3	0,04	0,2	0,2	0,13	0,14		0,06	0,02						
50	0,07	0,2	0,02		0,15	0,08				0,01						
100		0,13			0,09											
145																
L_{max} / f [- / MHz]	1,17/2,3	1,07/1,5	2,5/1	1,15/1,3	1,17/1,4	1,2/1,1	1,2/1,8	1,2/0,45	1,2/0,8	?	1,1/0,5	1,4/0,4	není ?	1,5/0,08	1,1/0,04	není !
f_k [MHz]	1	2	0,4	1	0,6	0,6	0,3	0,2	0,2	?	0,3	0,15	0,05	0,05	0,025	0,03
f_{Q1} [MHz]	7,3	6	10	4,5	4,3	5,5	3,2	1,2	1,7	1,5	1,3	2	0,25	0,25	0,18	0,2

Tab. 1. Násobitelé indukčnosti, kterými musíme vynásobit indukčnost změřenou nízkofrekvenčními RLC měřidly, spočítanou pomocí počáteční permeability μ_i , nebo cívkové konstanty A_L , či počítačem pomocí programů nerespektujících kmitočtové průběhy komplexní permeability např. [1], abychom na daném kmitočtu dostali skutečnou indukčnost. Kmitočet f_k [MHz] říká, do jakého kmitočtu můžeme indukčnost spočítat ze známé konstanty A_L nebo z počáteční permeability μ_i , programem [1], či z měření nř RLC metrem. Nad tímto kmitočtem musíme měřit indukčnost na příslušném kmitočtu, nebo vynásobit indukčnost hodnotami z tabulky. Kmitočet f_{Q1} [MHz] je kmitočet, při kterém jakost cívky přibližně klesne na $Q = 1$. Údaj L_{max}/f [MHz] říká, na jakém kmitočtu bude násobitel indukčnosti nejvyšší. U materiálu H60 jsem nejzjistil, pravděpodobně u něj navýšení není a u Philips 3E9 skutečně není. U Amidonu 77 jsem nemohl zjistit f_k a L_{max}/f , neboť nemám čím měřit indukčnost mezi 150 kHz a 1,1 MHz. Materiály jsou seřazeny od nejmenší do největší permeability. U materiálů bývalého Prametu Šumperk jsem uvedl prakticky celou řadu feritů, z kterých se vyráběly toroidy. U výrobců Iskra, Amidon, Thomson a Philips je pro porovnání jen výběr některých materiálů, ze kterých se vyrábí toroidy vhodné na baluny a širokopásmové transformátory. Materiály s permeabilitou nad 2000 uvádím pro získání přehledu, nikoliv proto, že by byly vhodné na výkonové baluny a transformátory pro KV.

Příklad 1:

Určete indukčnost cívky s dvaceti závitů na feritovém toroidu Amidon FT50 - 43 (průměr 12,7 mm, $A_L = 523 \text{ nH/z}^2$) a na feritovém jádru Pramet Šumperk T12,5/ H20 ($A_L = 1020 \text{ nH/z}^2$) na kmitočtech 1,1 , 1,8, 3,5 , 7, 14, 28 a 50 MHz.

Nejdříve změříme indukčnost nějakým nízkofrekvenčním RLC metrem (viz poznámka) nebo jí spočítáme ze známého μ_i , A_L či programem [1]; dostaneme indukčnost 209 μH u FT50-43 a 408 μH u T12,5/H20. Je to ovšem indukčnost platná jen do kmitočtu f_k , což je u daných materiálů 0,4 a 0,2 MHz, viz tabulka 1. Abychom dostali skutečné indukčnosti na požadovaných kmitočtech, vynásobíme proto změřenou indukčnost součiniteli z tabulky 1:

Cívka	Amidon	Pramet
20 závitů na:	FT50 - 43	T12,5 / H20
kmitočet [MHz]	indukčnost [μH]	indukčnost [μH]
(základ 10 kHz)	209	408
1,1	$2,2 \times 209 = 460$	$1 \times 408 = 408$
1,8	$1,8 \times 209 = 314$	$0,8 \times 408 = 326$
3,5	$0,8 \times 209 = 167$	$0,5 \times 408 = 204$
7	$0,3 \times 209 = 63$	$0,2 \times 408 = 82$
14	$0,12 \times 209 = 25$	$0,15 \times 408 = 61$
21	$0,06 \times 209 = 13$	$0,1 \times 408 = 41$
28	$0,04 \times 209 = 8$	$0,06 \times 408 = 25$
50	$0,02 \times 209 = 4$	

Tytéž hodnoty bychom dostali měřením přístroji RF1, MFJ259B apod. za předpokladu, že by indukčnosti nebyly mimo měřicí rozsah přístrojů. Materiál Amidon FTxxx-43 je výjimečný velkým navýšením indukčnosti kolem 1 MHz a také malými ztrátami, což se projeví větším poklesem indukčnosti s kmitočtem. Amidon 43 je prakticky nepostradatelný u reflektometrů, zejména dvutoroidních, kde vyžadujeme vysokou citlivost a velký kmitočtový rozsah. Je rovněž vhodný pro KV baluny, není ale rozšířen pro vysokou cenu 1000 až 2000 korun za jeden velký toroid. Bohužel nadějná levná náhrada N7 z Prametů Šumperk se již pravděpodobně nezačala vyrábět.

Poznámka k měření: Při měření indukčností na nf kmitočtech od 100 Hz do 100 kHz jsem narazil u feritových materiálů Amidon 43 a Pramet H20 na výrazný „efekt malého počtu závitů“. (Pozor - nejedná se o chyby měřících přístrojů při měření malých indukčností). Např. při počtu 5 závitů materiál Amidon 43 vykazuje až čtyřikrát vyšší a Pramet H20 až dvakrát nižší indukčnost proti indukčnosti odpovídající konstantě A_L nebo počáteční permeabilitě μ_i . Tento efekt není závislý na typu RLC metru, nf kmitočtu, tvaru měřícího napětí trojúhelník/sinus, metodě měření – rezonanční metody dávají shodné výsledky. Také není způsoben přesycením - stejné výsledky jsem dostal při sycení 5 mT i 0,5 mT. Nejde tedy o chyby měřícího přístroje nebo měřící metody. Vliv má pouze typ feritu. U jiných feritů – H6, H7, H12, H22, zahraniční typy podobné H40 a H60, Amidon 77 a N01, N02, N05, N1, N2, N3 – jsou tyto efekty pod 50 %, případně na hranici chyb měření a prakticky nejsou zjištělné. Vysvětlení neznám.

Abychom omezili shora uvedené chování feritů, měříme při doporučeném počtu 100 závitů, kdy jsou chyby malé. Aspoň 100 závitů pro měření, případně i více, tak aby měřená indukčnost nebyla pod 15 % hodnoty nejnižšího rozsahu levného měřícího přístroje je nutností při měření jader s malou permeabilitou. Zde se ale již nejedná o efekty malého počtu závitů, ale o neúměrné chyby nf měřících přístrojů. Změřenou indukčnost pak přepočteme buď na počty závitů pro potřebnou indukčnost, nebo si výpočtem, či bezpracně programem [1], stanovíme pro měřený toroid konstantu A_L a počáteční permeabilitu μ_i neznámého materiálu pro budoucí použití.

Příklad 2:

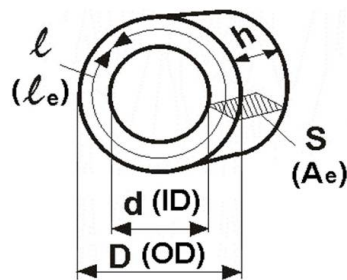
Určete cívkovou konstantu A_L a počáteční permeabilitu μ_i neznámých feritových toroidů průměru 10 mm, kterých máme doma velkou zásobu a zatím nevíme, k čemu by se mohly hodit. Dále odhadněte indukčnost při počtu 5 závitů na kmitočtech 1,8 a 28 MHz:

Abychom omezili chyby při malém počtu závitů, navineme na toroid 100 závitů. I když nízkofrekvenční RLC měřidla zpravidla nezajistí měření při standardních podmínkách tj. 10 kHz/0,1 mT/25°C, jsou chyby malé, nejvíce se projeví vliv teploty. Nf RLC metrem jsme naměřili například 2870 μH . Dále jsme posuvkou změřili rozměry jádra $D = 10$ mm, $d = 6$ mm, $h = 4$ mm. Zaoblení hran zanedbáme. Z rozměrů lze usuzovat, že patrně půjde o materiál z Prametů Šumperk - zahraniční toroidy totiž mívají rozměry v palcích a tak by rozměry nebyly tak „kulaté“. Hodnoty dosadíme do následujících vztahů:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad [\text{nH/z}^2; \text{nH}, -] \quad (3)$$

$$A_L = \frac{2870000}{100^2} = 287 \text{ nH/z}^2 = 0,287 \mu\text{H/z}^2 \\ = 287 \text{ mH/1000 záv.} = 2870 \mu\text{H/100 záv.}$$

přibližné určení délky střední siločáry a průřezu jádra, přesněji viz program DL5SWB [1]



$$l = \frac{D+d}{2} \cdot \pi$$

$$S = \frac{D-d}{2} \cdot h$$

T10 - $D=10$ mm,
 $d=6$ mm, $h=4$ mm

$$\mu_i = \frac{2500 L (D + d)}{N^2 h (D - d)} \quad [-; \mu\text{H, mm}] \quad (4)$$

$$\mu_i = \frac{2500 \cdot 2870 \cdot (10 + 6)}{100^2 \cdot 4 \cdot (10 - 6)} = 718$$

Výsledek cívkové konstanty jsem pro zopakování uvedl ve všech používaných jednotkách. Permeabilita vyšla 718, pravděpodobně půjde o materiál H7 s permeabilitou 700. „Školní“ vztah (4) nerespektuje skutečnost, že magnetické siločáry se mají tendenci stlačovat k vnitřnímu průměru toroidu. Skutečné S_e (A_e - Area) a l (l_e) je pak trochu odlišné, viz program DL5SWB. Z tabulky 1 dále odhadneme násobitele indukčnosti pro 1,8 a 28 MHz a spočítáme indukčnosti pro 5 závitů:

$$L_{10\text{kHz}} = A_L N^2 = 287 \cdot 5^2 = 7175 \text{ nH} \\ = 7,2 \mu\text{H}$$

$$L_{1,8} = 7,2 \cdot 1,16 = 8,3 \mu\text{H}$$

$$L_{28} = 7,2 \cdot 0,25 = 1,8 \mu\text{H}$$

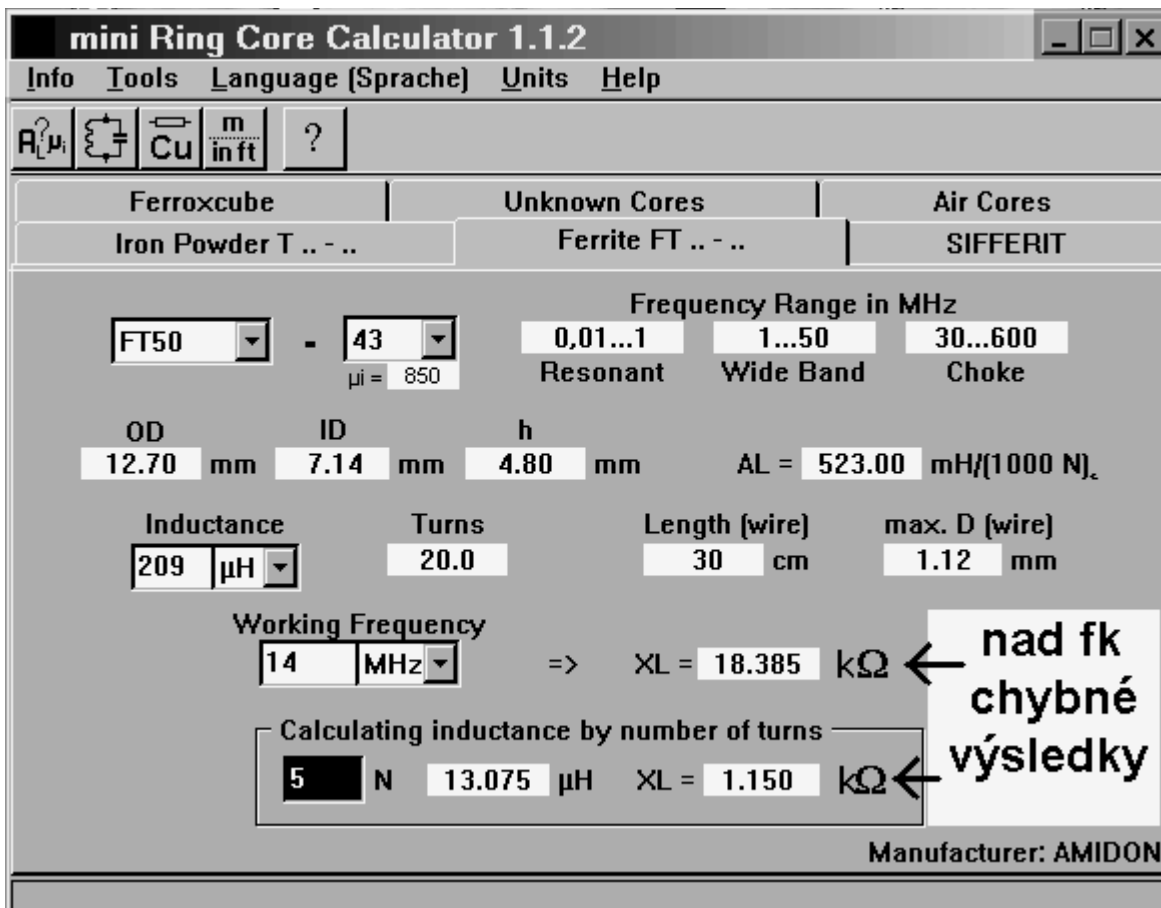
Samozřejmě může jít i o nějaký zahraniční materiál s permeabilitou 700, pro který se mohou násobitelé indukčnosti lišit. Jde tedy jen o odhad. Indukčnosti na 1,8 a 28 MHz změříme přesněji přístroji RF1, MFJ259B nebo podobnými novějšími.

Výhody a úskalí počítačových programů

Pro výpočet cívek s výhodou používáme různé programy. Program „mini Ring Core Calculator“ od DL5SWB je výbornou pomůckou. Část jeho možností ukazují následující obrázky.

Turns		Inductance	
wound	100	measured	2870 μH
Calculating core parameters			
OD	10 mm	ID	6 mm
h	4 mm	Coating	0.00 mm
Ae	7.8 mm²	le	24.1 mm
Σ(le/Ae)	3.1 1/mm		
AL =	287.00 nH/N	μi =	702.3

Obr. 3. Dosadíme-li 100 závitů z příkladu 2, změřenou indukčnost nízkofrekvenčním RLC metrem 2870 μH, rozměry jádra T10/6/4 mm, dostaneme hodnotu počáteční permeability μ_i a cívkové konstanty A_L . V příkladu 2 jsme si již řekli, že se jedná o materiál s počáteční permeabilitou 700, v daném případě o materiál Pramet Šumperk H7, případně N7, který se ale pravděpodobně již nezačal vyrábět. Program počítá ekvivalentní průřez A_e a střední délku siločáry l_e a tedy i permeabilitu μ_i z přesnějších vztahů, než jsou jen jednoduché geometrické rozměry jádra ve vztahu (4), a tak počáteční permeabilita vychází blíže skutečnosti. Náš školní výpočet je 718, program 702 - rozdíl ve výsledku je stále desetkrát menší, než výrobní tolerance permeability, a nemusí nás nijak trápit. Přesnější vztahy a vysvětlení najdeme v odstavci „Determining A_L and μ_i of Unknown Cores“ v nápovědě programu DL5SWB.



Obr. 4. Mini Ring kalkulátor nerespektuje komplexní permeabilitu, jinak řečeno neumí počítat indukčnost a následně reaktanci, či spíše impedanci, na různých kmitočtech. To znamená, že i při kmitočtu 14 MHz uvažuje u daného příkladu stále indukčnost 209 μH místo skutečných 25 μH , viz náš příklad 1; rovněž 5 závitů ve spodním políčku s údajem 13,075 μH je ve skutečnosti jen 1,57 μH a tedy i skutečné reaktance jsou jen 2,2 $\text{k}\Omega$ a 138 Ω , nikoliv programem počítaných 18,385 $\text{k}\Omega$ a 1,15 $\text{k}\Omega$. U feritových toroidů (nikoliv železopráškových, kde je vše v pořádku) proto nebudeme dva spodní řádky programu pod „Working Frequency“ používat a výpočet provedeme ručně s využitím násobitelů indukčnosti z tabulky 1.

Samozřejmě u feritů s malou permeabilitou vidíme v tabulce 1, že přes celý rozsah KV je násobitel indukčnosti 1 - v těchto případech jsou výpočty pod „Working Frequency“ v souladu se skutečností.

Závěr

Úkolem příspěvku bylo vytvoření praktické představy o kmitočtové závislosti indukčnosti cívek na feritových toroidech, představy o tom, do jakého kmitočtu je indukčnost na feritovém toroidu konstantní a tedy odpovídající měření nf RLC-metrem, výpočtu z počáteční permeability, z cívkové konstanty A_L či pomocí programu od DL5SWB [1] a představy, při jakém kmitočtu klesne jakost cívky na $Q = 1$. Program, který by uměl u feritových toroidů vypočítat skutečnou indukčnost na libovolném kmitočtu tak, jak jí měří přístroje RF1, MFJ259B a pod., se mně nepodařilo nalézt. Pravděpodobně to není problém softwaru, ale spíše otázka pracnosti, kterou je třeba věnovat měřením a zpracování průběhů komplexní permeability.

[1] Wilfried Burmeister DL5SWB - mini Ring Core Calculator, verze 1.1.2. www.qsl.net/dl5swb

[2] Radim Kabátek OK2TEJ. Tabulka indukčností feritových toroidů pro určitý počet závitů. www.qsl.net/ok2tej