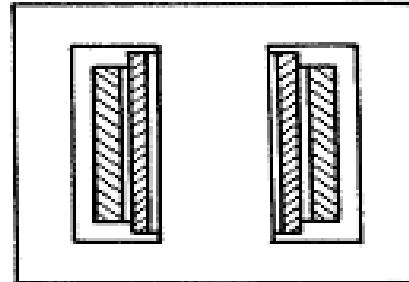
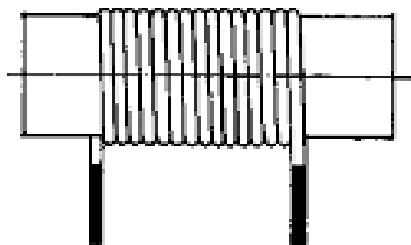


CÍVKY TLUMIVKY A TRANSFORMÁTORY

Součástky, u kterých je nejméně rozšířena hromdná seriová výroba -- během vývoje elektronického zařízení se musí zkonstruovat a vyrobit

Konstrukce se rozlišují podle jádra

- bez jádra - vzduchové
- s feromagnetickým jádrem - kovy
 - polykrystalické
 - lištěná jádra
 - prášková jádra
- amorfni materiály
- oxidy (ferity)
- kovová skla
- manganatozinečnaté
- nikelnatozinečnaté



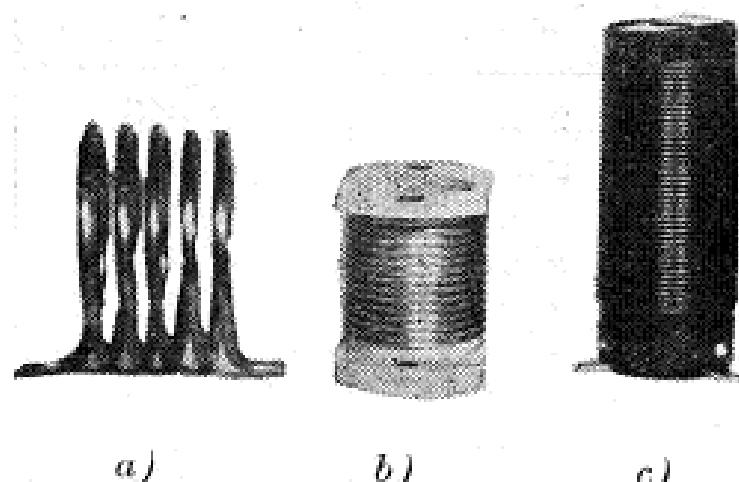
Základní parametr cívky: velikost indukčnosti

Důležité parametry: teplotní závislost indukčnosti

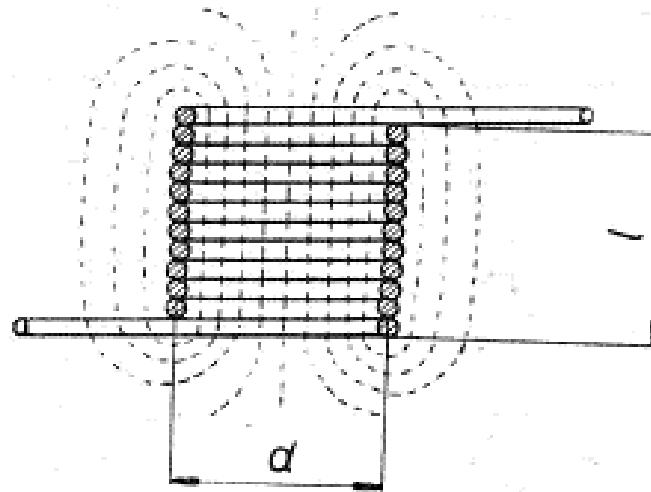
proudová a napěťová závislost indukčnosti
kmitočtová závislost indukčnosti (impedance)
činitel jakosti (ztrátový činitel)
maximální provozní proud
maximální provozní napětí
maximální výkon
stárnutí cívky

Transformátor navíc: přenosové parametry
rozptylová, vzájemná, indukčnost

Vzduchové cívky



Obr. 29. Válcové cívky.

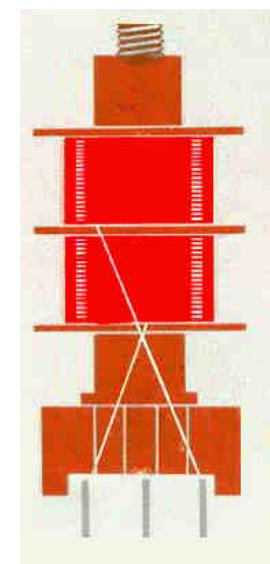
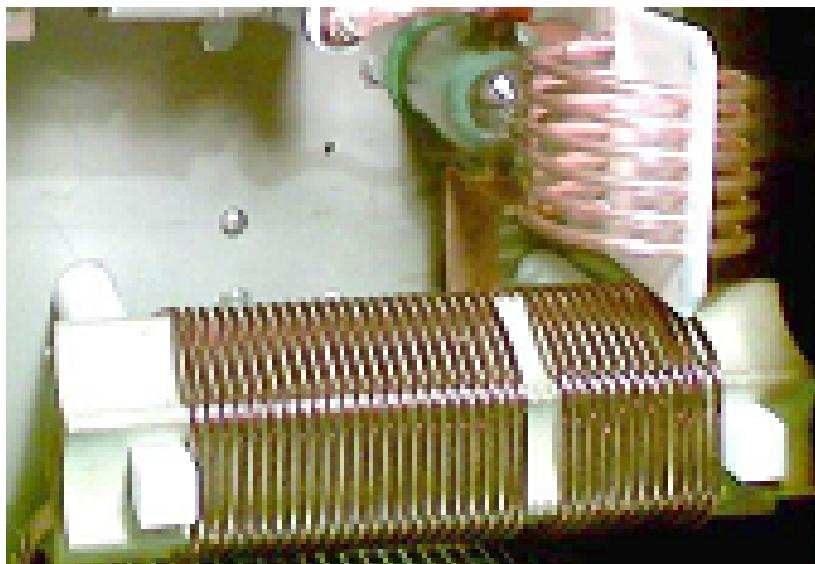


Obr. 30. Rozměry válcové cívky.

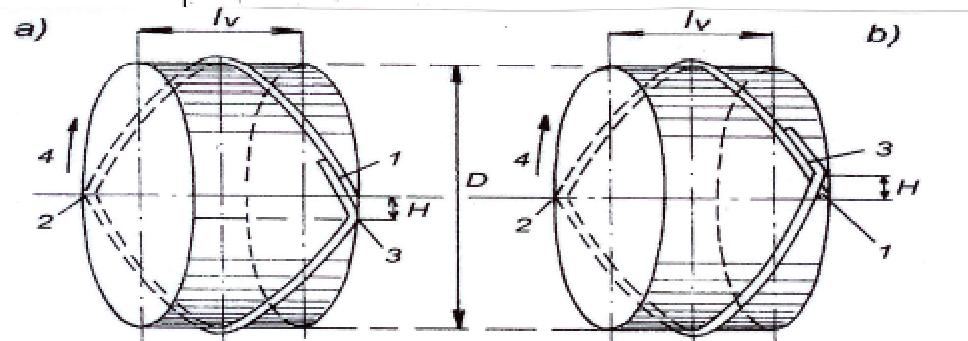
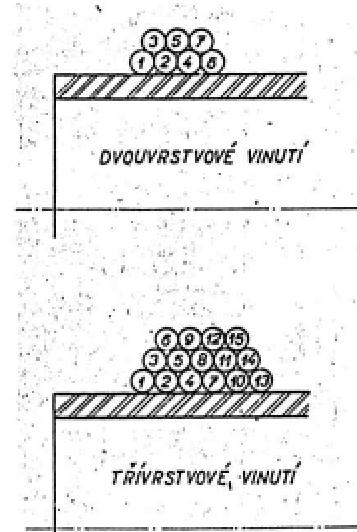
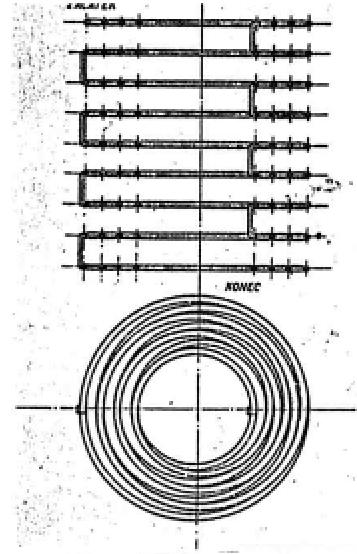
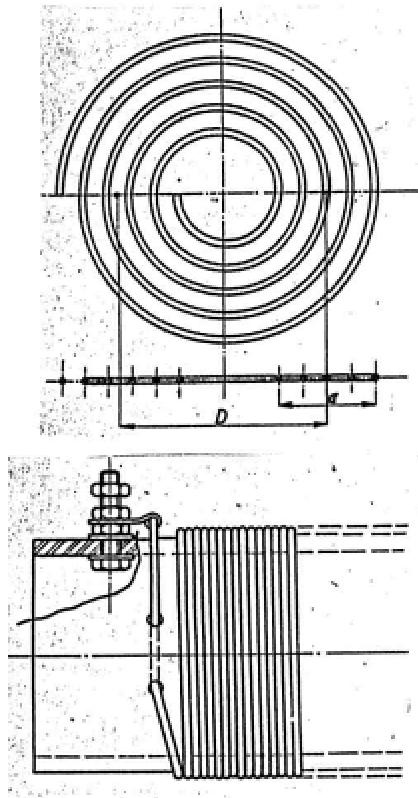
- cívky s malou indukčností řádu desetin uH až jednotek mH, stabilní, lineární
- v nízkovýkonových obvodech cívky selektivních obvodů, řešené zejména s ohledem na dosažení maximálního činitele jakosti
- ve výkonových obvodech cívky, které musí být lineární při zatížení velkým reakčním výkonem.
- Transformátory bez jádra se používají zřídka, jen na vysokých frekvencích, zejména jsou-li jejich indukčnosti součástí rezonančních obvodů.

Konstrukce cívky

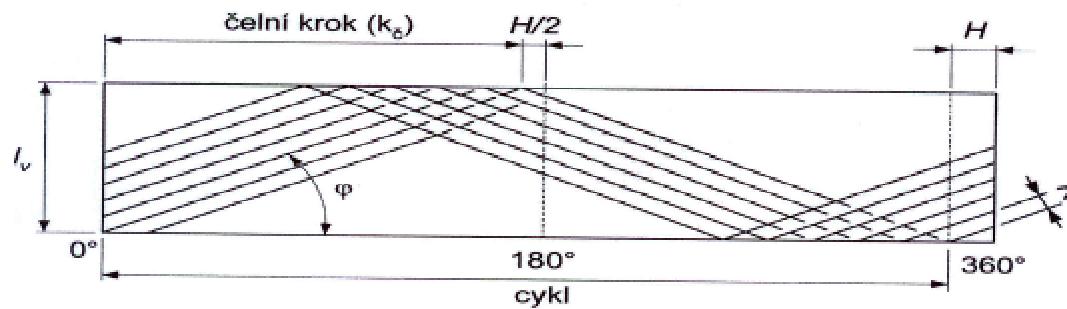
-jedno - nebo vícevrstvé vinutí kruhového nebo mnohoúhelníkového průřezu na tuhé izolační kostře. Je-li použitý vodič dostatečně tuhý, cívky mohou být provedeny jako samonosné.



Pro dosažení minimální vlastní kapacity cívky a maximální indukční vazby mezi závity je vinutí někdy i komorové, kotoučové, hrázové, křížové, polohové.



Ukládání vodiče při křížovém vinutí:
*a) – vinutí s předstihem, b) – vinutí se zpožděním; 1 – začátek závití
 2 – první přehyb, 3 – druhý přehyb, 4 – směr otáčení kostry čívky.*



Obraz křížového vinutí se dvěma kroky.

KONKRÉTNÍ KONSTRUKCE

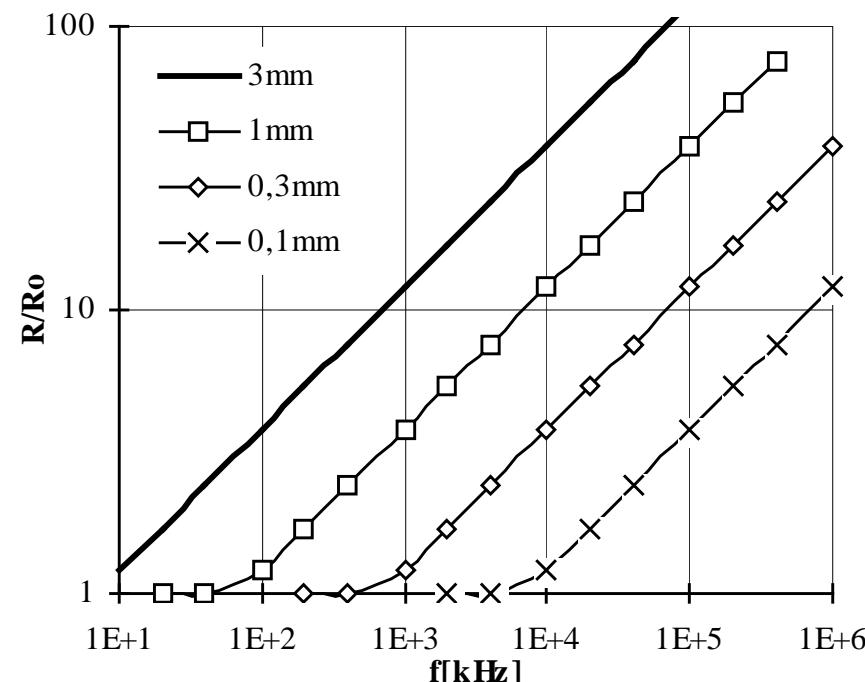
Rozměry cívky, počet závitů, vodič pro vinutí, rozměry krytu se řeší obvykle postupnými approximacemi a podle empirických vztahů

Pro maximální činitel jakosti musí mít velkou indukčnost a malý ODPOR. »

Cívka s většími rozměry má větší činitel jakosti

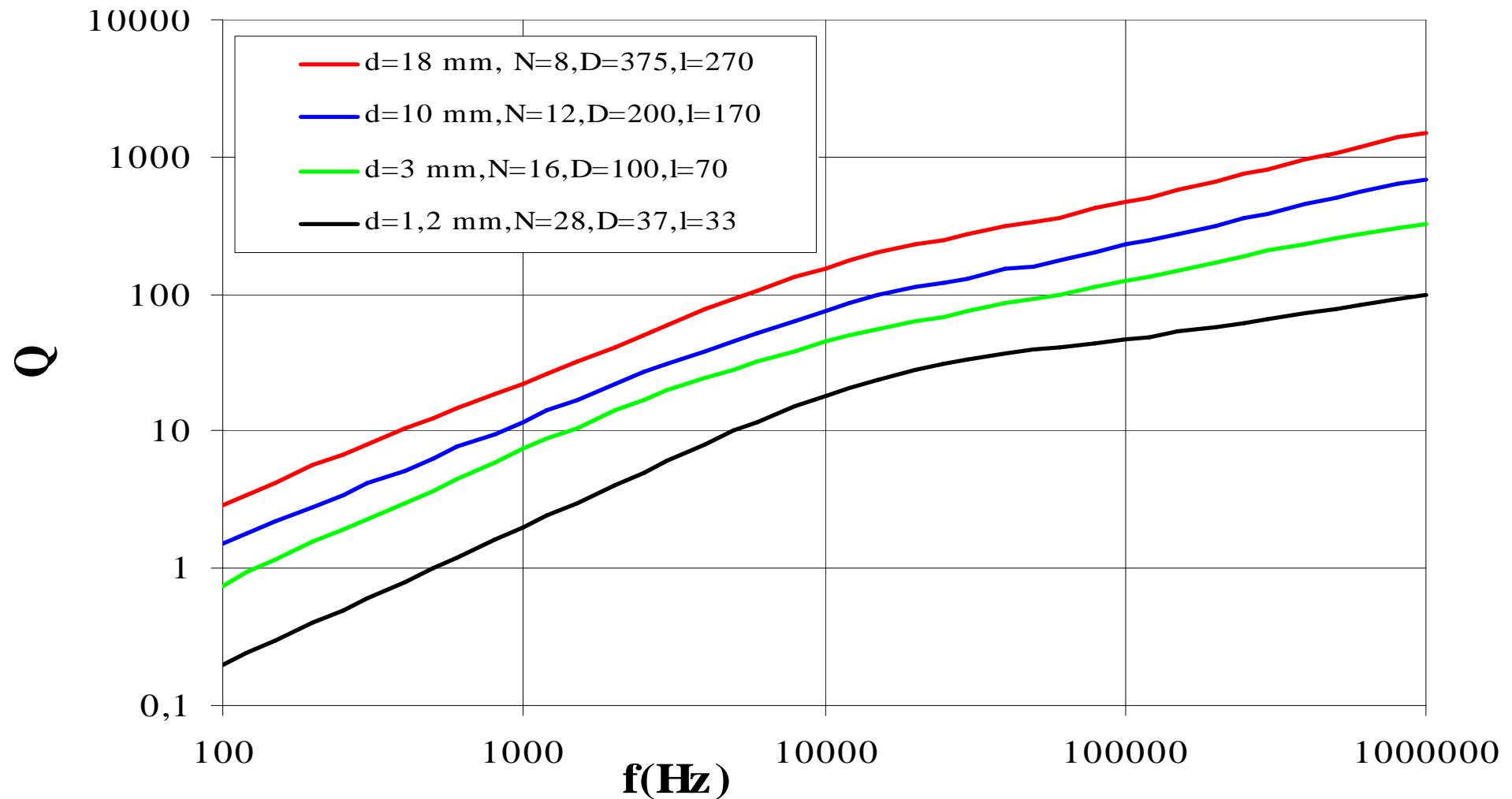
Optimální délka cívky se pohybuje v rozmezí 0,5D až D

Odpor vodiče na VF je silně ovlivněn povrchovým jevem a jevem blízkosti



ČINITEL JAKOSTI

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$



ZVÝŠENÍ ODPORU VODIČE PŘI VF

Použití vodičů menšího průřezu s malými mezerami mezi závity dává obvykle lepší výsledky než použití nejtlustšího vodiče, který se na cívku vejde
Lanko je lepší než plný vodič jen v úzké kmitočtové oblasti (f_{opt})

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad f_{opt} = \frac{67 \cdot 10^2 \rho}{sd^2 \sqrt{N}}$$

kde α ekvivalentní hloubka vniku

ω kruhová frekvence

μ permeabilita vodiče (pro neferomagnetické látky $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

σ vodivost vodiče pro ss proud (pro Cu $\sigma = 5,6 \cdot 10^7$ S/m)

d průměr drátků v lanku (cm)

s délka zkrutu (cm)

N počet drátků v lanku

ρ měrný odpor (Cu $0,0173 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

Velikost indukčnosti

U vzduchových cívek zhruba od 10 nH do několika desítek mH

Tolerance indukčnosti cívek a tlumivek pro širokopásmové obvody, oddělovacích a filtračních tlumivek může dosahovat 10-20 %, někdy jsou přípustné i hodnoty vyšší.

VF cívky pro laděné obvody a filtry mají přípustné tolerance mnohem menší maximálně řádu desetin procenta. Obvykle bývají VF cívky řešeny tak, aby jejich indukčnost byla v určitých mezích nastavitelná. Nastavení indukčnosti je prováděno až po montáži cívky slad'ování zařízení. (pohyblivými jádry, změnou geometrie vinutí cívky).

Indukčnost cívky nebo tlumivky je v prvním přiblížení určena geometrickou konfigurací jeho vinutí, počtem závitů. Pro výpočet se používají empirické vztahy, např. Nagaokův vzorec. Konstanta K je závislá na poměru D/l a lze ji stanovit interpolací podle tabulky

$$L = \frac{0,03948 D^2 N^2 K}{4l} \quad (\mu H, cm)$$

L	indukčnost cívky (μ H)
D	střední průměr cívky (cm)
N	počet závitů cívky
l	délka cívky (cm)

Tab.

D/l	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3	3,5	4
K	1	0,902	0,818	0,748	0,688	0,638	0,595	0,525	0,472	0,429	0,394	0,365

Pro odhad indukčnosti lze použít i jednoduché přibližné vzorce,

$$L = \frac{\pi^2 N^2 D^2}{1 + 0,4D} \quad (nH, cm)$$

Výroba:

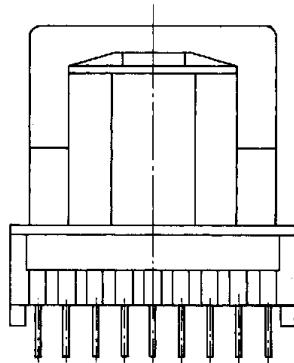
Vinutí na kostry (lisované z plastické hmoty, keramické), hladké, se závitem pro ukládání vinutí . Zvláštní pozornost je třeba věnovat napínání vodiče při vinutí, upevnění konců vinutí. Volné vinutí činí cívku nestabilní a to je neštěstí.

Cívky s vpalovanými závity: cívky s nejlepší teplotní i časovou stabilitou. Tělíska je křemen, keramika, vinutí se nanáší do drážek jako Ag pasta (válečkem , tiskem). Po vypálení ($850-900^{\circ}\text{C}$) vzniká souvislá vrstva Ag, která se může galvanicky zesílit.

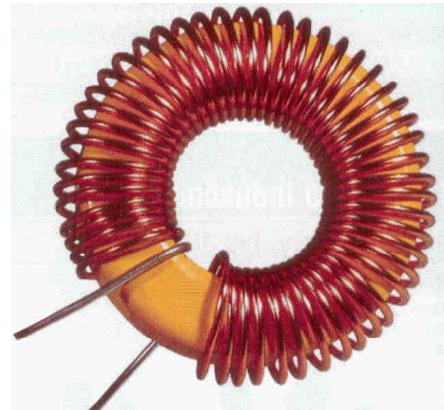
Možný je i postup, kdy se povrch kostry pokoví souvisle celý a vybrousí se dělicí spirála mezi závity

Kryt – zamezuje vazbu cívky s okolím. Musí být velký a dobře vodivý , jinak silně snižuje L i Q. Malý kovový kryt (Al) silně zvyšuje i teplotní závislost.

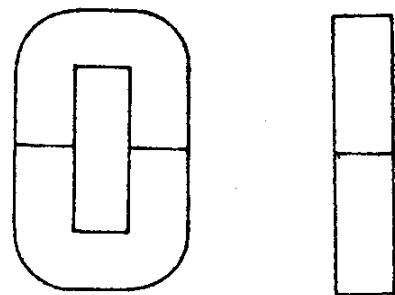
CÍVKY S FEROMAGNETICKÝMI JÁDRY



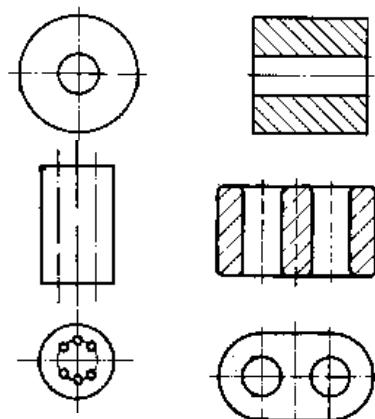
Jádro EE



Toroidní jádro



vinuté jádro C



trubičkové, mnohoděrové a
dvouotvorové jádro



Hrníčková jádra
činky, zvonky

Velikost indukčnosti

Zhruba od $50\mu\text{H}$ do několika desítek H

Tolerance indukčnosti závisí na použití. U cívek pro rezonanční obvody VF je velmi malá a obvykle musí být možné nastavení.

Tlumivky, např. odrušovací, vyhovují s tolerancí i několik desítek procent.

Indukčnost cívky nebo tlumivky je v prvním přiblížení určena geometrickou konfigurací jádra, materiélem jádra, počtem závitů.

Obvykle předpokládáme, že veškerý magnetický tok cívky prochází jádrem takže indukčnost cívky lze vyjádřit na základě indukční konstanty jádra A_L nebo jeho reluktance R_M jednoduchým vztahem. A_L bývá katalogovým údajem sériově vyráběných feromagnetických jader a cíkových sestav.

$$L = A_L N^2 = \frac{N^2}{R_M}$$

A_L nebo R_M lze podle rozměrů jádra určit výpočtem:

$$R_M = \frac{1}{A_L} = \frac{l_J}{\mu_0 \mu_r S_J}$$

l_J střední délka magnetického obvodu nebo jeho úseku

S_J průřez magnetického obvodu nebo jeho úseku

μ_0 μ_r permeabilita vakua a relativní permeabilita magnetického materiálu

Není-li magnetický obvod homogenní (má vzduchovou mezeru), určíme reluktanci celého magnetického obvodu jako součet reluktancí jeho jednotlivých částí.

JÁDRO - dosažení vyšší B při nižším H

CO TO STOJÍ: nelinearita

- magnetická indukce má maximální hodnotu B_{\max}
- frekvenční závislost
- ztráty

vířivé ztráty $P_v = k_v f^2 B^2 d^2 V$ d tloušťka plechu ($k_v \sim 0,6 \sigma$)

hysterezní ztráty $P_v = k_h f B^\alpha V$ $\alpha \sim 2$ $k_h \sim 100$

CO S TIM jadro z tenkých plechů

vzduchová mezera - snižuje H (B) v jádru, ztraty, linearizuje, zmenšuje vliv μ na L

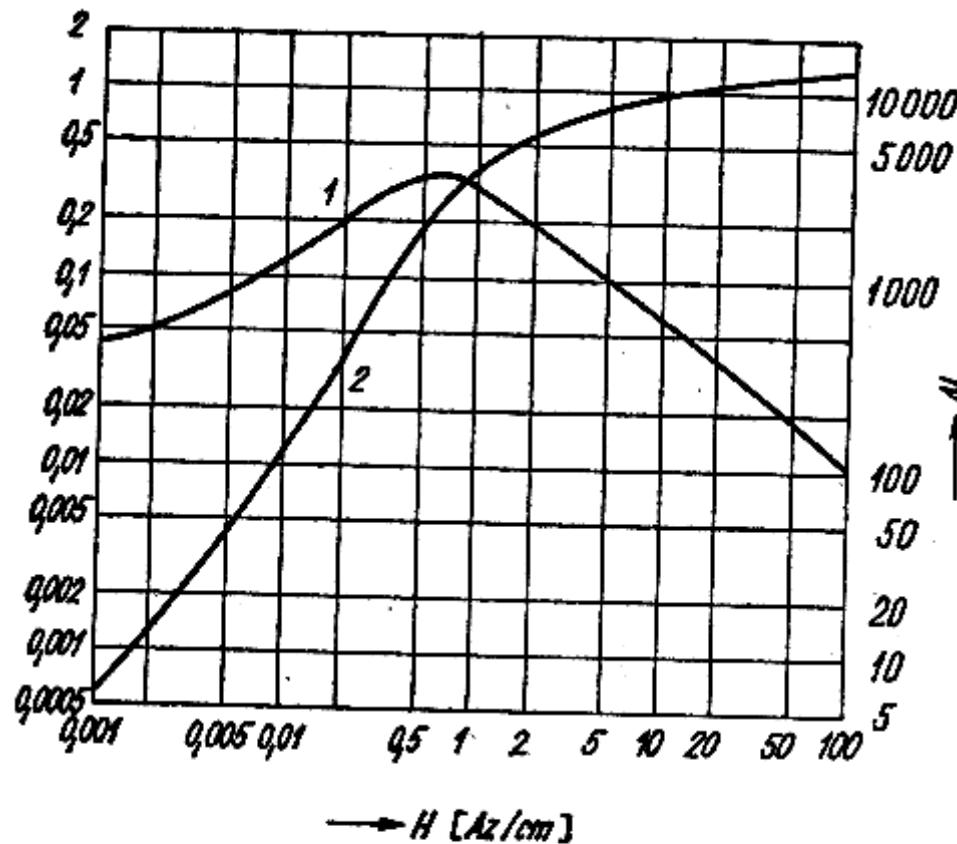
KOVOVÉ MATERIÁLY

PLECHY

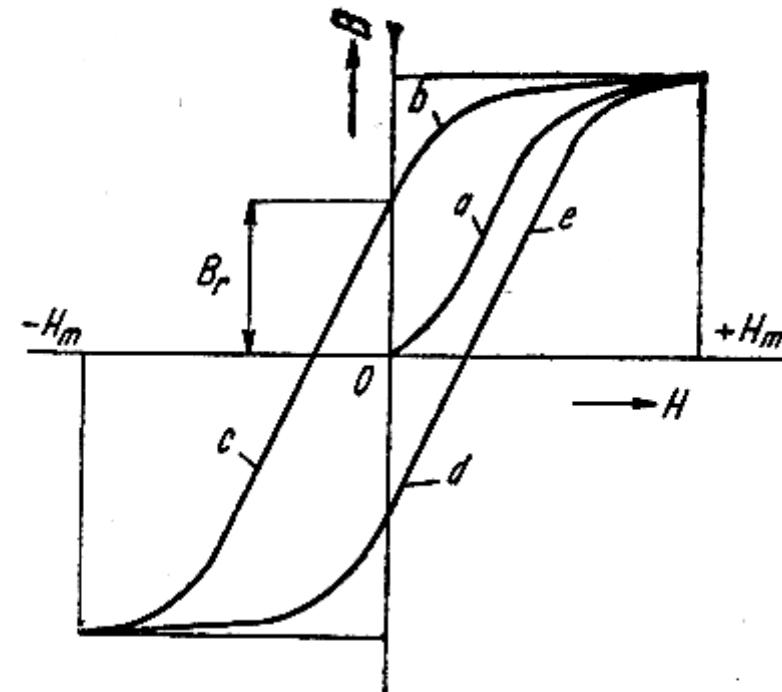
nejobyčejnejší – valcovane za tepla, orientovane – valcovane za studena
na povrchu izolovane – oxid, lak, fosfat

výroba jadra: obyčejna mala z vysekavanych rezů EI, M, UI, L, EB
z orientovaných plechů - VINUTÁ

TRANSFORMÁTOROVÉ PLECHY



Obr. 15. 2 – Statická magnetizační křivka materiálu $B = f(H)$; I – statická permeabilita téhož materiálu $\mu = f(H)$



Obr. 16. Magnetizační cyklus materiálu

KOVOVÁ SKLA

nemají krystalickou strukturu, výroba – velmi rychlým tuhnutím taveniny, tenké folie, lepší vlastnosti než plechy, B_{max} přes 2T, malé ztráty

PRÁŠKOVÁ JÁDRA

zrna 1 až 10 μm slisovaná s nevodivým pojivem. Malý vliv vřívých proudů až do VF, zároveň ale malé μ (max 100 až 200). Pojivo: bakelit, polystyren, jiný plast, feromagnetický materiál : nejstarší karbonylové železo (rozklad pentakarbonylu železa), novější silit, mumetal, alsifer, sendast, permalloy . Vše závisí na tom, jak se to slisuje (AMIDON, MICROMETAL)

MATERIÁLY

křemíková ocel válcovaná za tepla: 0,5 až 5 % Si zvyšuje ρ , B_{max} asi 2 T, P 0,5 až 5 W/kg (50Hz), $d= 0,35, 0,5$ mm, $\mu_p = 150$ až 500, $\mu_{max} = 5000$ až 30 000, na síťová trafa, nenáročné akustické aplikace

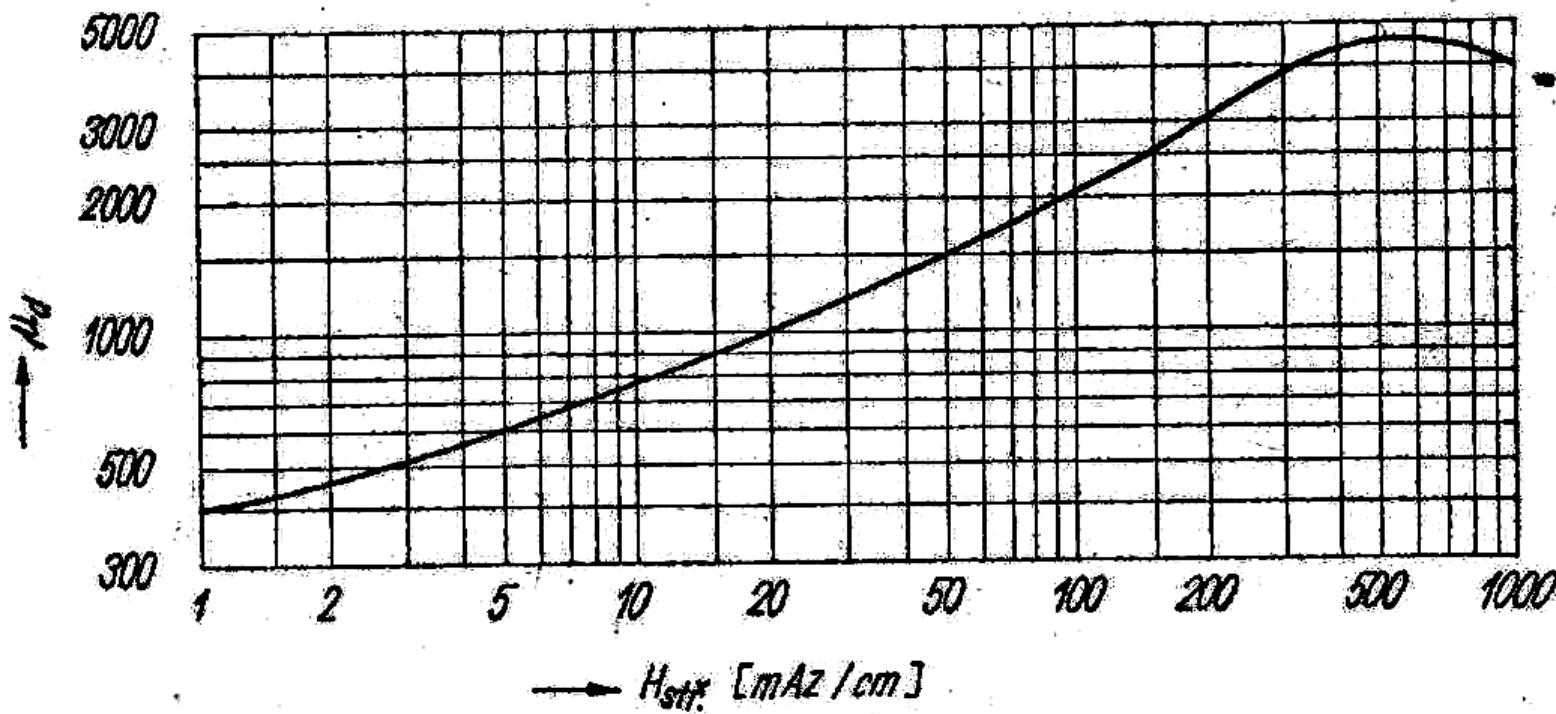
křemíková ocel válcovaná za studena: B_{max} asi 2 T, P 0,5 až 2,5 W/kg (50Hz), $d= 0,35$ mm i méně, $\mu_p \sim 500$, $\mu_{max} \sim 60 000$, na lepší trafa, tenké (0,13mm) na vyšší frekvence – 400Hz

slitinové materiály Fe, Ni, Cu, Cr, Mo, Mn- malé ztráty na vyšších frekvencích, malé B_{max} 0,5 až 1 T:

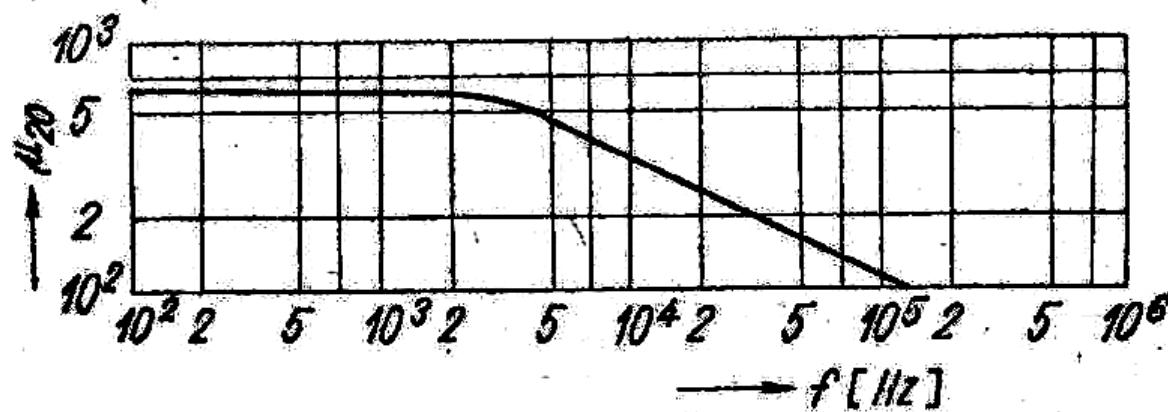
PERMALLOY klasický 78,5 Ni, (4 Mo) , $\mu_p \sim 6000$, $\mu_{max} \sim 70 000$

MUMETAL 76 Ni, 5 Cu, 2 Cr $\mu_p \sim 20 000$, $\mu_{max} \sim 100 000$

SUPERMALLOY 79 Ni, 5 Mo, 0,5 Mn $\mu_p \sim 1E5$, $\mu_{max} \sim 1E6$

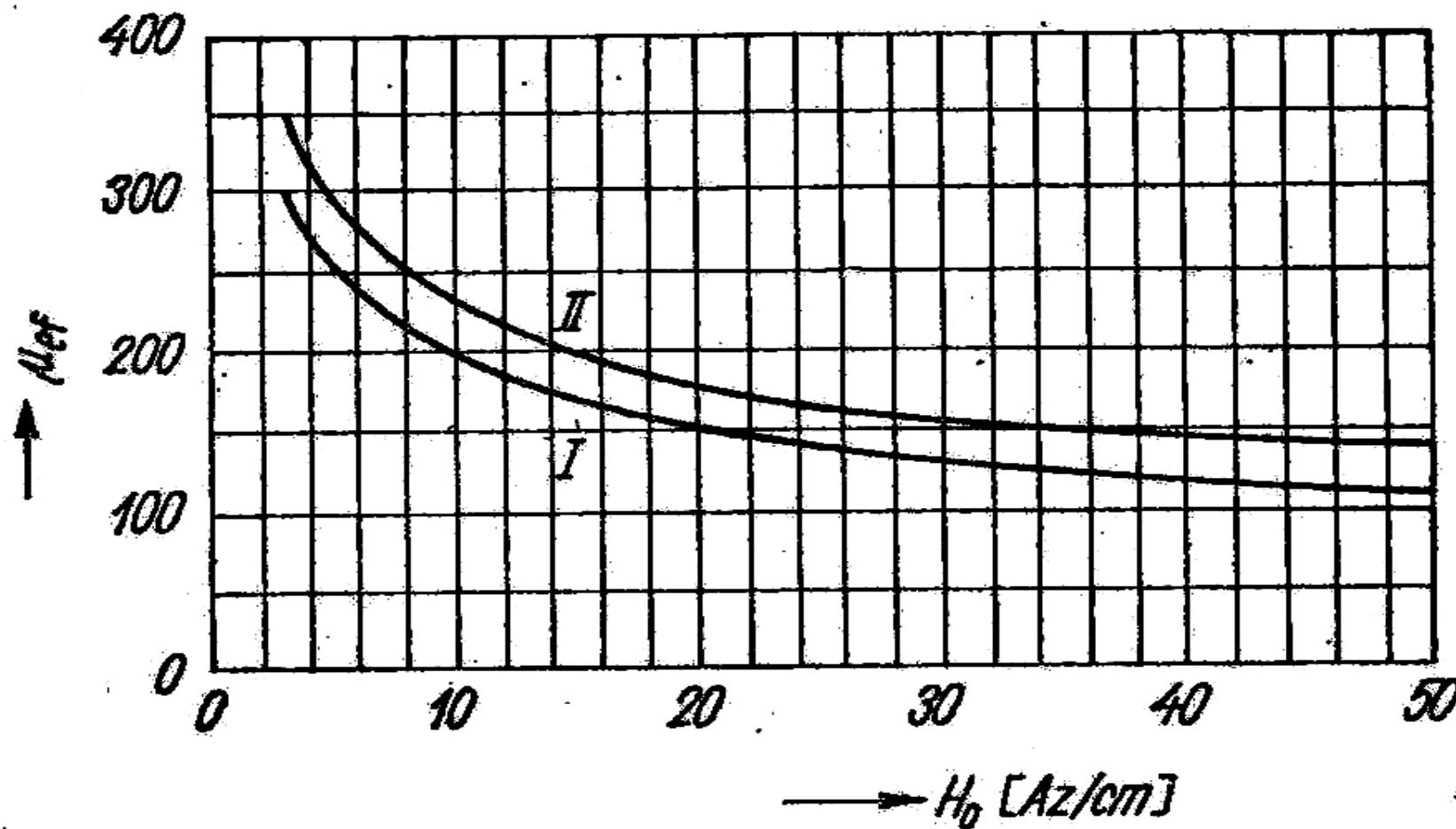


Obr. 17. Průběh dynamické permeability materiálu $\mu_d = f(H_{eff})$



Obr. 18. Kmitočtová závislost dynamické permeability $\mu_d = f(f)$

STEJNOSMÉRNÁ PŘEDMAGNETIZACE



Závislost efektivní permeability na stejnosměrné předmagnetizaci;
I. — plechy TN 1,3—0,35 mm, II. — Ortoperm

FERTITY

spékané keramické materiály, směsi dvojmocných kysličníků kovů MeO Fe_2O_3
kde Me je Mn, Co, Cu, Zn, Ni

Ferity jsou nevodivé(izolanty, polovodiče), nejsou v nich vířivé proudy
 B_{\max} jen asi 0,3 až 0,4 T, μ_{\max} podle složení 10 až 10 000, ztráty tg δ desetiny
až jednotky %

ZPRACOVÁNÍ FERITŮ

stejně jako každá keramika: míchání směsi, lisování, sušení, pálení, broušení

Tvary jader: uzavřená – hrníčková, křížová, EE, UI, toroidy, děrová

otevřená –tyče, trubky

Feritová jádra jsou velmi křehká, tvrdá, špatně vedou teplo. Špatné stažení
nebo místní přehřátí vede k prasknutí

Vyráběné ferity ozn. N ferity Ni Zn

H ferity Mn Zn

Ni Zn ferity:

menší μ v rozsahu 10 až 300, ztráty $\tg \delta$ v rozsahu nižších frekvencí (1 MHz) 1%

Použitelné pro cívky a transformátory v rozsahu 1 až 200 MHz, pro širokopásmové neladěné tlumivky a transformátory do 1 GHz

Mn Zn ferity :

větší μ v rozsahu 600 až 10 000, ztráty $\tg \delta$ v oblasti nízkých frekvencí (10 kHz) desetiny %, na frekvencích 100 kHz až 1 MHz jednotky %.

Kolem 1MHz klesá reálná část μ .

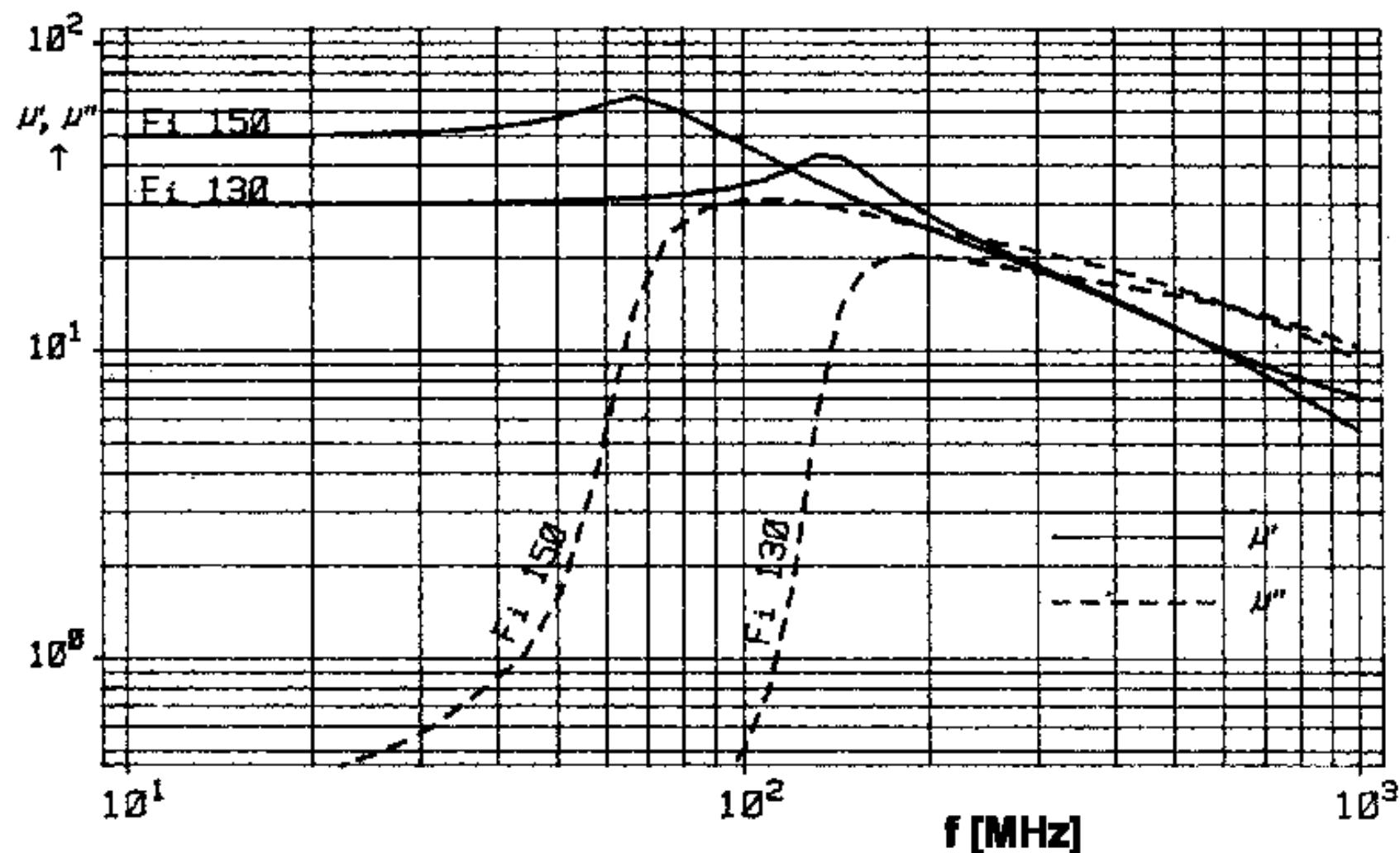
Malé B_{\max} 0,3 až 0,4 T komplikuje konstrukci výkonových součástek, výrobci se snaží vyvinout ferity pro velké \mathbf{B} .

Použití v rozsahu desítek a stovek kHz použití pro cívky rezonančních obvodů (se vzduchovou mezerou), transformátory malých i velkých výkonů , transformátory měničů a spínaných zdrojů.

Jsou velmi citlivé na stejnosměrnou magnetizaci, nebo magnetizaci nízkou frekvencí (sítový kmitočet)

Komplexní permeabilita nikelnateho feritu

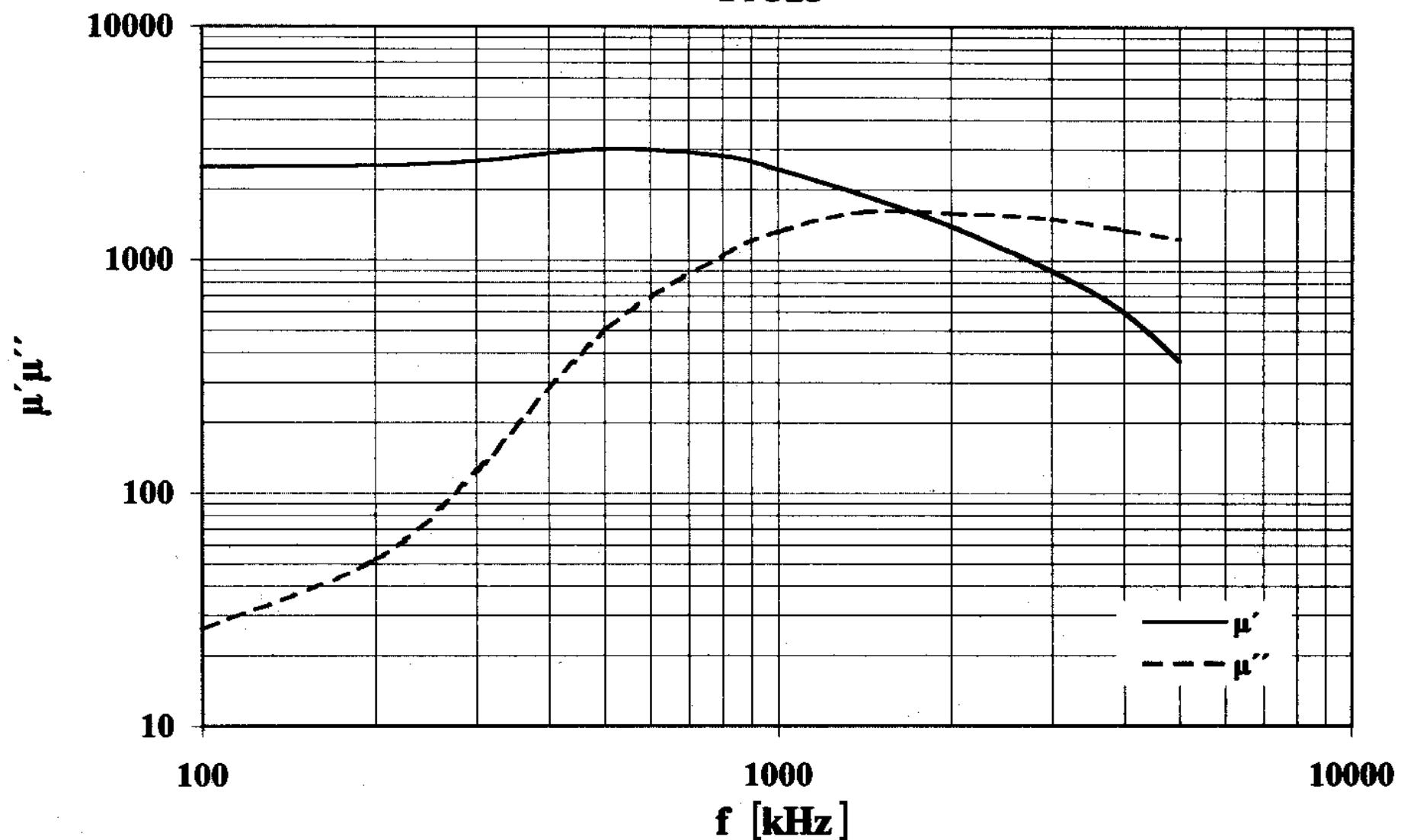
Vogt Fi 130 a Fi 150



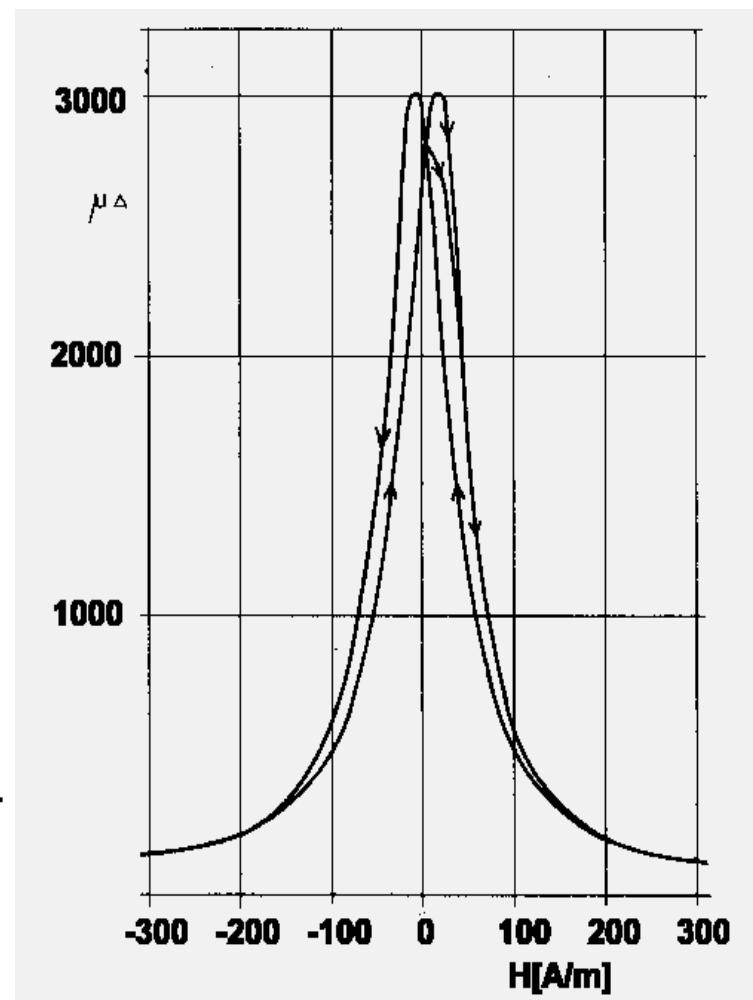
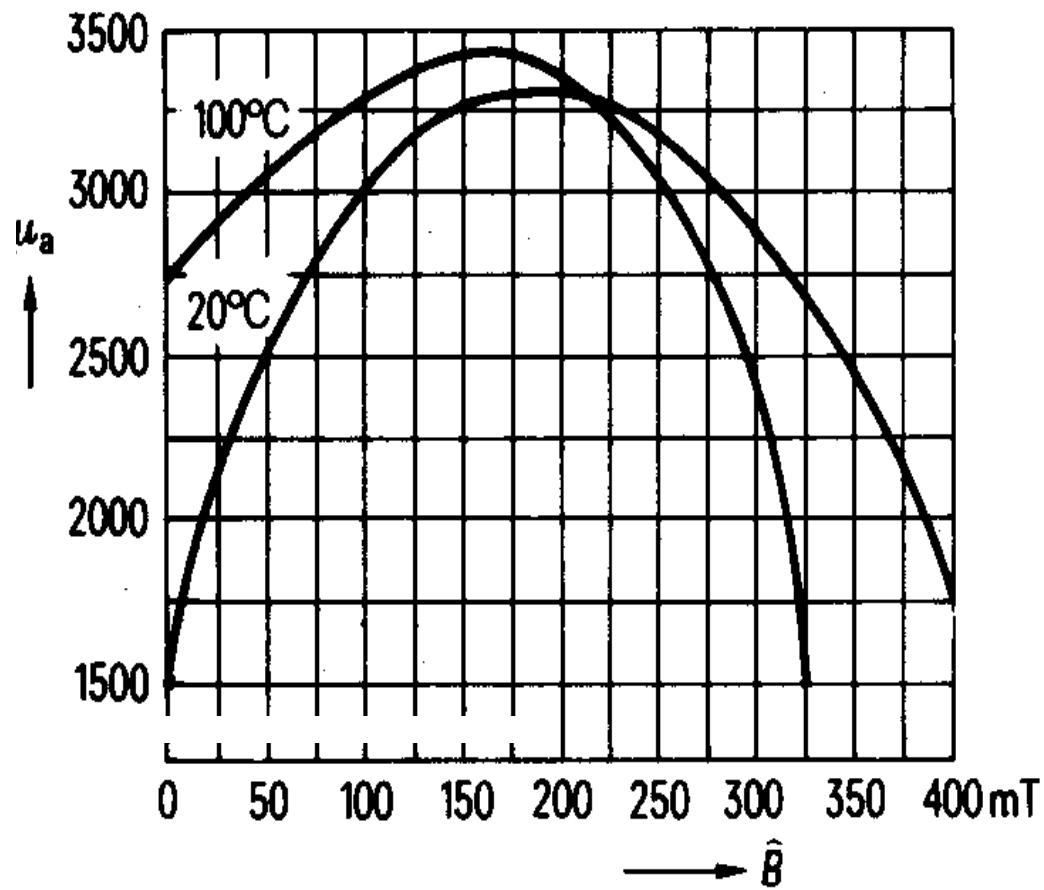
Komplexní permeabilita manganateho feritu

Vogt Fi 323

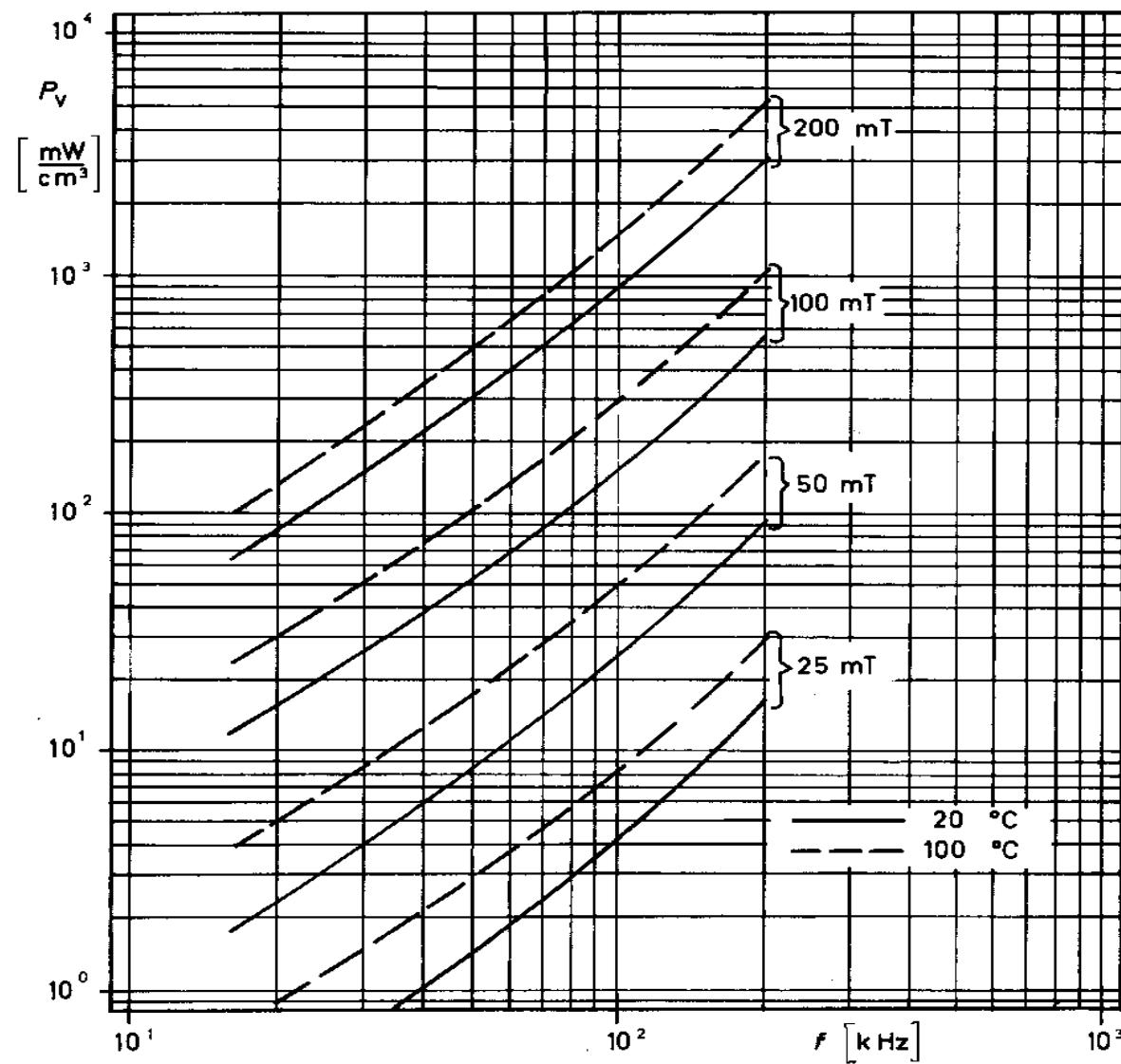
Fi 323



Závislost permeability na magnetické indukci (ss předmagnetizaci)



Závislost měrných ztrát feritu Vogt Fi 323 na magnetické indukci
(pětina z hodnoty odpovídá běžné jednotce W/kg)



Konstrukce cívek a transformátorů s feromagnetickým jádrem

Jádro:

Jádra EI a M skládaná z řezů vysekaných z plechu jsou nejběžnější jádra pro síťové transformátory a nenáročné NF nebo impulzní transformátory a tlumivky.

Toroidní jádra, jádra C z orientovaného materiálu se vinou z pásu plechu Hodí pro síťové, nízkofrekvenční, širokopásmové i impulzní transformátory pracující na nižších frekvencích (plechy tloušťky 0,13 mm lze použít do několika kHz). Slitinové materiály s vyšší počáteční permeabilitou (Permalloy PY65ML, PY 76Cu) a amorfni materiály o tloušťce pod 0,1 mm lze použít pro impulzní transformátory značně velkých výkonů a pro ochranné impulzní tlumivky.

Jádra E jsou feritová jádra tvarově podobná jádrům z transformátorových plechů. Používají se pro širokopásmové a impulzní transformátory pracující na frekvencích řádu desítek až stovek kHz s výkonem až několik set VA.

Hrníčková jádra jsou feritová, mají prakticky rotačně symetrický tvar, takže cívka, vložená do jádra je téměř beze zbytku obklopena feromagnetickým materiálem. Hrníčková jádra se proto vyznačují poměrně malým rozptylem magnetického pole a lze je s výhodou používat jako jádra laděných cívek s malými rozměry na frekvencích do několika MHz. Kromě toho se hrníčková jádra používají i pro širokopásmové a impulzní transformátory menších výkonů

Feritová toroidní jádra jsou používána zejména pro VF širokopásmové tlumivky a transformátory s malým výkonem pracující na frekvencích až do několika set MHz, jako jádra maticových transformátorů pro vyšší výkony na frekvencích řádu jednotek MHz. Nevýhodou toroidních jader je obtížné navíjení cívek na které je třeba použít speciální navíječky.

Feritová trubičková a mnohoděrová jádra se používají pro širokopásmové tlumivky, kde vystačíme s malým počtem závitů, **dvouotvorová jádra** se používají pro širokopásmové a vysokofrekvenční transformátory symetrikační členy pro malé i velké výkony u kterých je vinutí obvykle tvořeno úseky VF vedení.

Mechanickou konstrukci všech cívek a transformátorů s feritovými jádry, zvláště s jádry, která se skládají z více dílů, značně komplikují mechanické vlastnosti feritů. Ferity jsou tvrdé, mají značnou pevnost v tlaku a malou v tahu, jsou též značně křehké a náchylné k odštípání hran a rohů. Nevhodné upevnění nebo stažení feritového jádra vede obvykle k jeho zničení. Proto je pro feritová jádra nejvhodnější používat stahovací a upevňovací armatury dodávané jejich výrobcem. Je-li konstrukce armatury nevyhnutelná, je třeba postupovat velmi obezřetně. Armatura musí být pružná, při stažení nesmí v jádře nikde vzniknout tah, v rozptylových polích kolem spár a mezer v jádrech nesmí být umístěny feromagnetické a vodivé materiály

Jádro EE

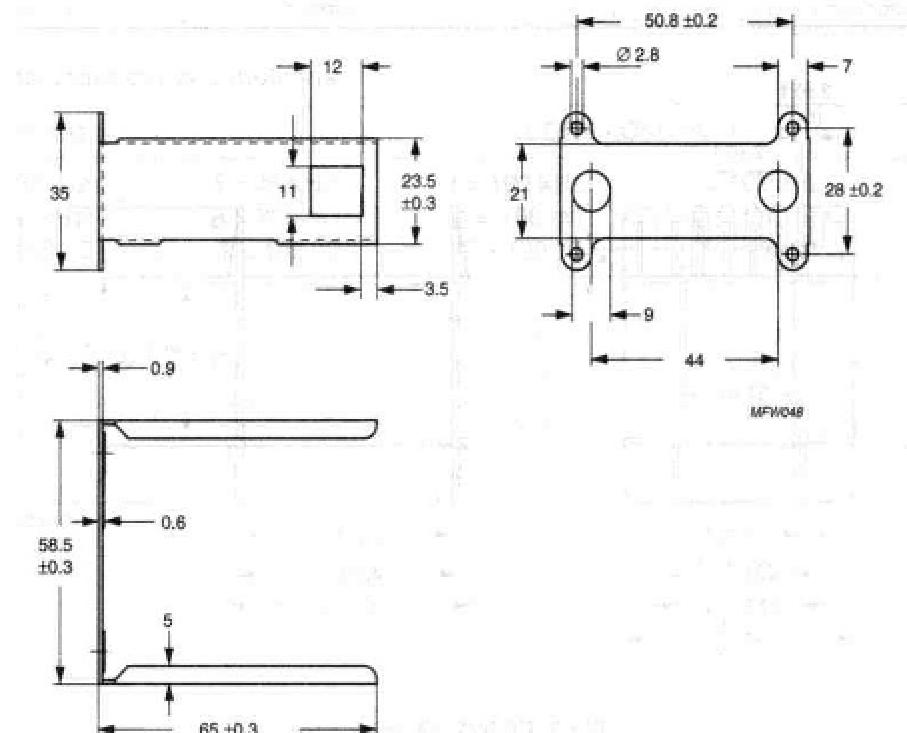
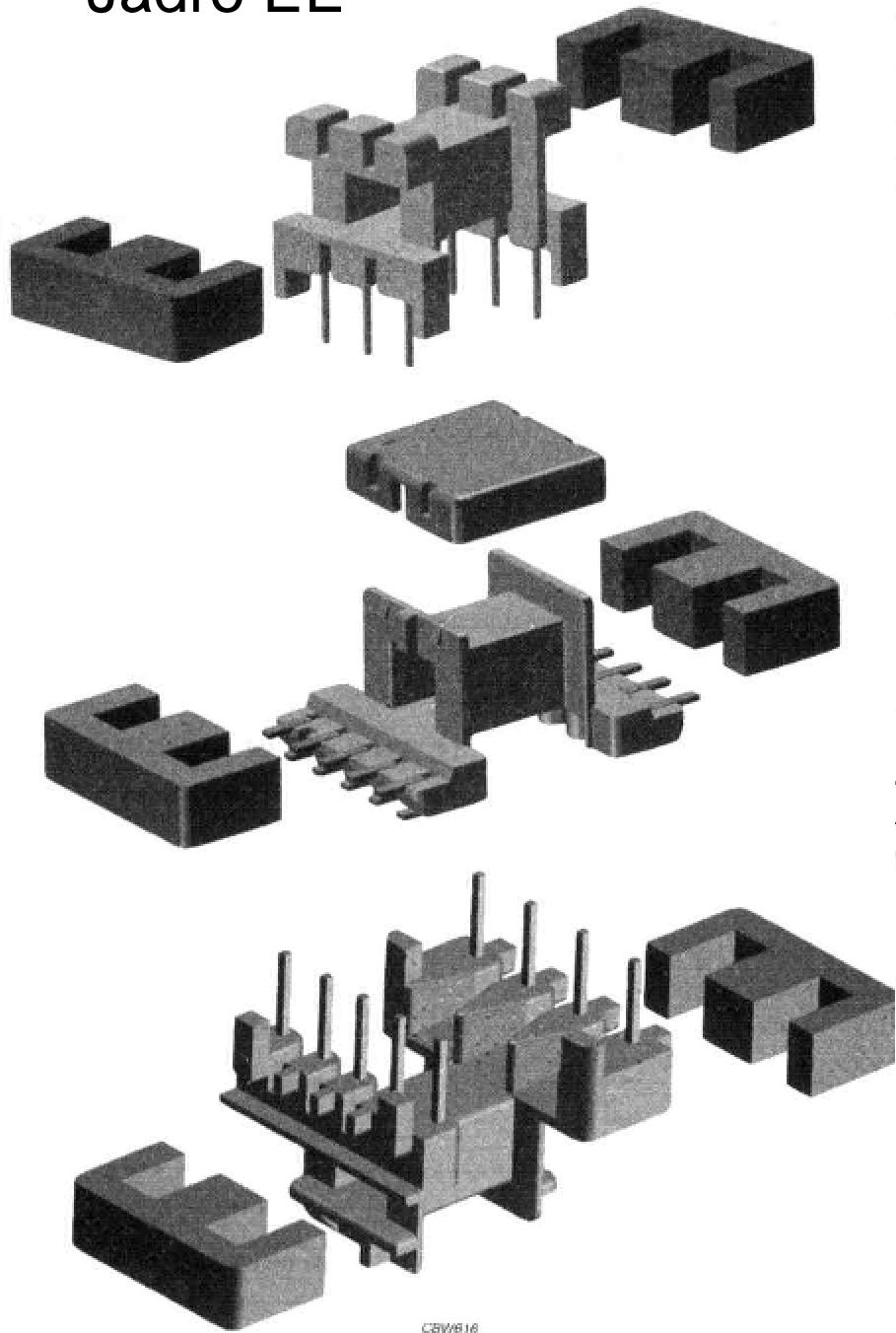
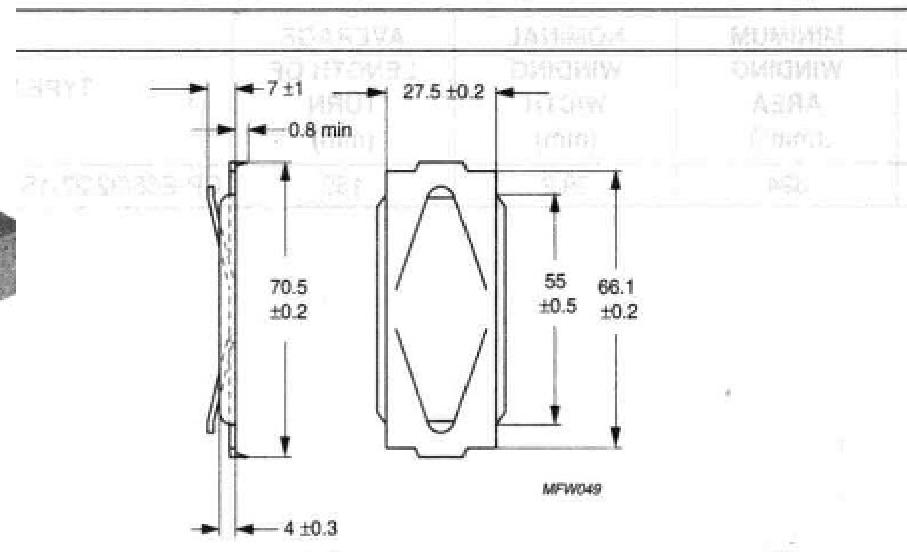
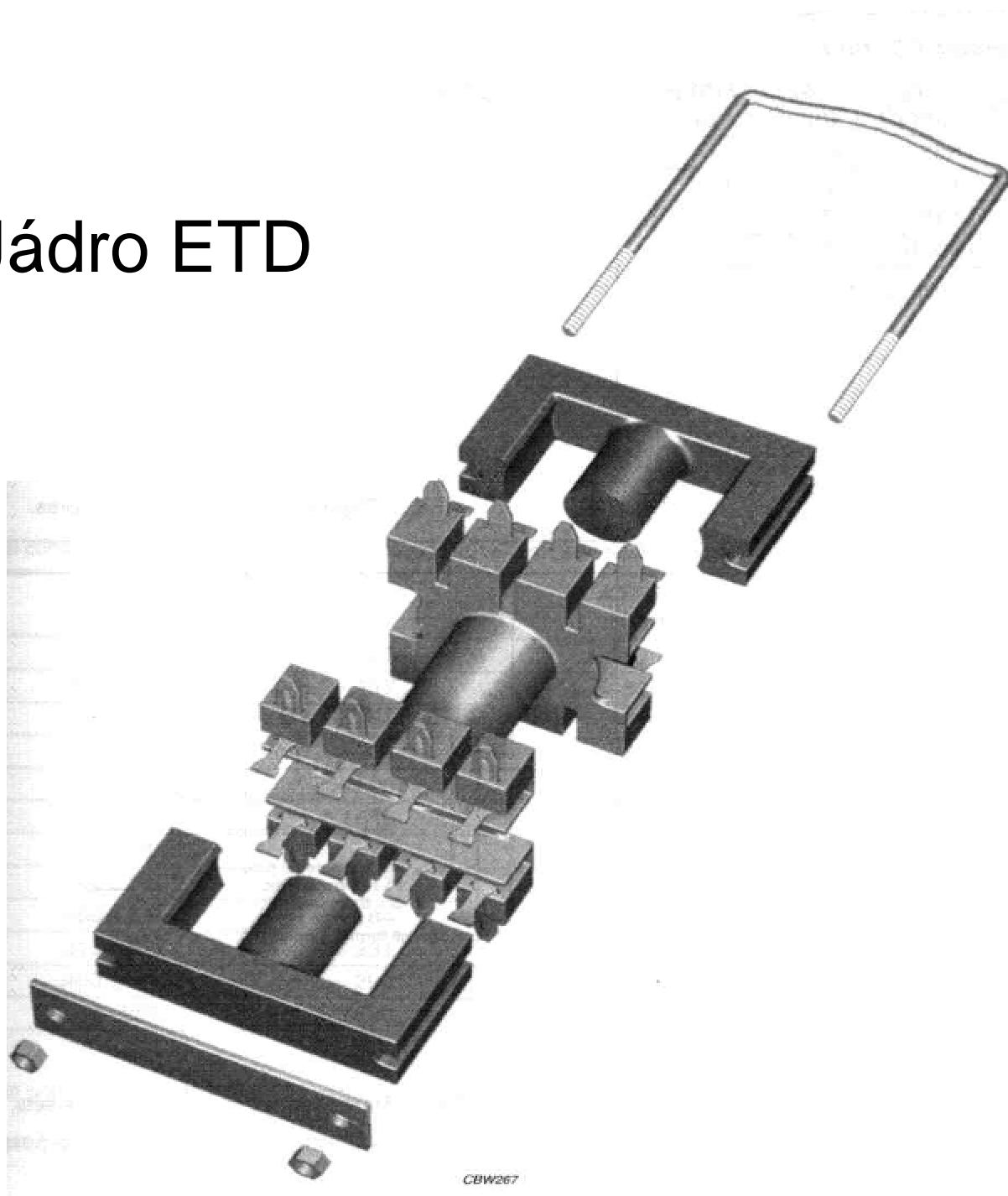


Fig.3 E65/32/27 clasp.



Jádro ETD



Vinutí

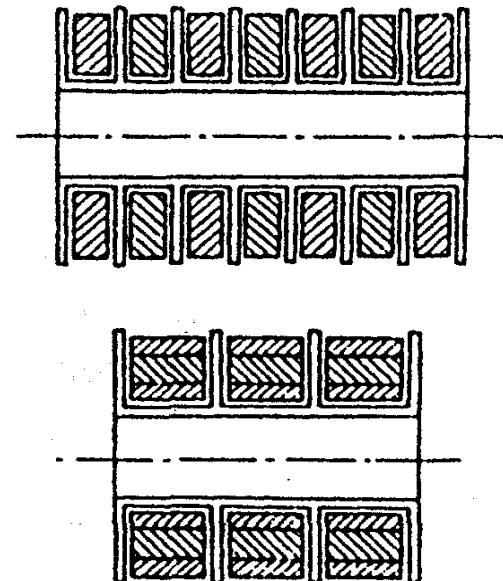
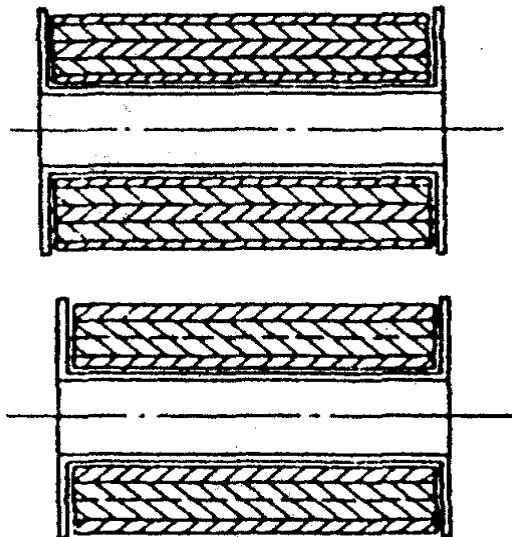
Vinutí cívek a transformátorů s feromagnetickými jádry je většinou vícevrstvé.

Vrstvy a sekce vinutí se obvykle oddělují proklady z papíru nebo plastových folií .

Proklady bývají širší (cca. o 2 mm) než je šířka vinutí a na okrajích do hloubky přibližně 1,5 mm krepovány, aby se zabránilo možnosti propadnutí vodičů do nižších vrstev.

Vývody se obvykle chrání izolační trubičkou, vývody tenčí než 0,2 mm se zesilují uvnitř cívky připájením silnějšího vodiče.

Pro snížení rozptylové indukčnosti a kapacity může být vinutí rozděleno do sekcí.



Počet závitů

$$L = A_L N^2 = \frac{N^2}{R_M} \quad R_M = \frac{1}{A_L} = \frac{l_J}{\mu_0 \mu_r S_J}$$

$U_{ef} = 4,44 f B_{max} S_J N$ pro sinusový průběh

$U = 4 f B_{max} S_J N$ pro střídavý obdélníkový průběh

$U = 2 f B_{max} S_J N$ pro obdélníkový průběh jedné polarity

U_{ef} je efektivní hodnota napětí na cívce

f pracovní frekvence

S_J průřez sloupku, na kterém je cívka navinuta

$$H_{SS} = \frac{NI_{SS}}{l_J} \frac{R_{MJ}}{R_{MC}}$$

I_{SS} je stejnosměrný proud protékající vinutím induktoru,

R_{MJ} R_{MC} reluktance feromagnetického jádra a celková reluktance magnetického obvodu, stanovené pro statickou permeabilitu feromagnetika

Vinutí ze zkroucených silnějších vodičů,(u impulzních transformátorů) je nutno provádět tak, aby bylo dodrženo prostřídání všech vodičů, aby indukovaná napětí v jednotlivých vodičích vlivem rozdílného umístění v rozptylovém poli cívky nebyla různá.

U transformátorů kde je jedno vinutí galvanicky spojeno s elektrovodnou sítí a druhé je částí od sítě oddělených obvodů malého napětí, je třeba zvláštní pozornost věnovat provedení izolace mezi vinutími.

Pokud není použita kostřička s více komůrkami (u impulzních transformátorů zřídka) musí být izolace dimenzována na zkušební napětí 4 kV (např 2x PETP folie 0,1 mm, 3x prokladový papír) a musí být zajištěno, že vodiče vyšších vrstev se nesesmeknou pod izolací mezi vinutími.

Stínicí folie mezi vinutími nesmí tvořit závit nakrátko a musí být dostatečně izolována od obou vinutí.

Vinutí se na povrchu chrání obalem, který je tvořen několika vrstvami olejového papíru nebo plastovou folií.

Impregnace:

Vinutí transformátorů a cívek s feritovými jádry se impregnují samotná, transformátory a cívky s jádry složenými z plechů se impregnují kompletně sestavené.

Před impregnací se výrobky nejdříve suší za zvýšené teploty, atmosferického a sníženého tlaku a dále se impregnují vhodnou impregnační látkou (lakem, polymerem, voskem) vakuově-tlakovým způsobem.



Montáž jader

Jádra z plechů musí být skládána velmi pečlivě, výseky plechů musí být dobře urovnány a staženy, jinak vzniká nežádoucí rozptyl magnetických vlastností jader.

Nejpřísnější jsou tyto požadavky u jader s mezerou, která je buď tvořena izolační vložkou mezi díly jádra (např. plechy EI) nebo je mezera přímo vyražena ve výseku plechu (plechy M), kde je nutno zajistit požadovanou šířku mezery a jednotlivé plechy do ní nesmí vyčnívat.

Složené jádro se v tělisku utěsňuje klíny, aby cívkové tělisko bylo pevně spojeno s jádrem a stahuje armaturou, která přísluší k danému typu jádra.

Slitinové materiály s vysokou permeabilitou - permalloye - jsou velmi citlivé na mechanické namáhání, příliš velké stažení jádra může způsobit snížení permeability až o 20%. Speciální jádra jsou v pevném nevodivém obalu, aby se mechanické namáhání vyloučilo úplně.

Sestavování feritových jader je náročné, je komplikováno citlivostí feritů na mechanické napětí a jejich křehkostí.

Sestavené a stažené díly jader na sebe musí doléhat pružným tlakem, který je vyvozován pružnými díly stahovací armatury.

Dosedací plochy jader jsou velmi pečlivě broušeny a musí být před sestavením dokonale očištěny. Proti posunutí se díly jádra zajišťují lepením epoxidovými pryskyřicemi, lepí se jen po obvodě styčných ploch, aby vrstva lepidla nezvětšovala vzduchovou mezeru. Přilepením se obvykle fixuje i cívková kostřička.

VLASTNOSTI CÍVEK

Základní parametr cívky: velikost indukčnosti

Důležité parametry: teplotní závislost indukčnosti
proudová a napěťová závislost indukčnosti
kmitočtová závislost indukčnosti (impedance)
činitel jakosti (ztrátový činitel)
maximální provozní proud
maximální provozní napětí
maximální výkon
stárnutí cívky

Transformátor navíc: přenosové parametry
rozptylová, vzájemná, indukčnost

Velikost indukčnosti je základním parametrem indukční cívky. U individuálně vyráběných cívek se vyrábějí hodnoty, které jsou potřeba.

Komerčně vyráběné cívky se vyrábějí v řadách s malým počtem členů – E3, E6, E12 v rozsahu indukčností 100 nH až 0,1 H.

Tolerance závisí na předpokládaném použití cívky. U cívek pro širokopásmové obvody, oddělovacích a filtračních tlumivek může být 10-20 %, někdy i vyšší. U cívek pro laděné obvody je ale daleko menší, desetiny procenta, i menší.

Protože by bylo velmi obtížné vyrábět cívky a transformátory s dostatečně malou tolerancí indukčnosti, jsou řešeny tak, aby indukčnost byla nastavitelná. Nastavením indukčnosti je kompenzována i tolerance ostatních součástek v obvodu. Rozsah nastavení bývá 10-20 %, k nastavení indukčnosti se používají nejčastěji pohyblivá feromagnetická jádra.

Teplotní závislost indukčnosti resp. velikost teplotní závislosti, je velmi důležitým parametrem cívek, které mají být použity především v selektivních laděných obvodech, filtroch a oscilátorech, kde indukčnost spoluurčuje jejich pracovní kmitočty.

Teplotní závislost indukčnosti se běžně vyjadřuje lineární závislostí a kvantifikuje teplotním součinitelem indukčnosti α_L

$$L(\vartheta) = L_0 [1 + \alpha_L (\vartheta - \vartheta_0)]$$

Lineární závislost platí vcelku přesně pro cívky vzduchové, je-li použit feromagnetický materiál, je teplotní závislost nelineární a určuje ji nelineární teplotní závislost permeability.

U vzduchových cívek je malá řádu 10^{-5} K^{-1} , pokud jsou použity materiály s malou teplotní roztažností (keramika, křemenné sklo).

U cívek s feromagnetickým jádrem bez vzduchové mezery může být vysoká (10^{-2} K^{-1}).

Vzduchová mezera může snížit hodnotu teplotního součinitele indukčnosti kolem 10^{-4} K^{-1} .

Nevratné změny indukčnosti mohou vznikat posunem vodiče po kostře nebo jeho uvolněním vlivem změn teploty.

Proudová a napěťová závislost indukčnosti se projevuje prakticky výhradně u cívek a transformátorů s feromagnetickým jádrem, nejvíce nemá-li jádro vzduchovou mezeru. Příčinou je nelineární závislost permeability jádra na magnetické indukci resp. na intenzitě magnetického pole v jádře. Změna indukčnosti může být způsobena střídavým magnetickým polem nebo i předmagnetizací proudem nízké frekvence nebo stejnosměrným, který protéká vinutím.

Napěťová závislost indukčnosti je určena závislostí efektivní střídavé permeability jádra na velikosti magnetické indukce, většinou při zvětšujícím se napětí indukčnost zpočátku mírně roste, při určité hodnotě napětí vykazuje maximum a dále klesá.

Proudová závislost indukčnosti je určena závislostí permeability na magnetickém poli. Míra, jakou je indukčnost ovlivňována protékajícím proudem, závisí na intenzitě magnetického pole v jádře, kterou proud vyvolá a na podílu, jakým se na celkovém magnetickém odporu magnetického obvodu uplatňuje magnetický odpor jádra.

Intenzita magnetického pole i vliv změn parametrů jádra klesají u magnetických obvodů se vzduchovou mezerou, zvětšujeme-li její velikost. Proto jsou feromagnetická jádra cívek a transformátorů, kterými má protékat velký proud, přerušena velkou vzduchovou mezerou.

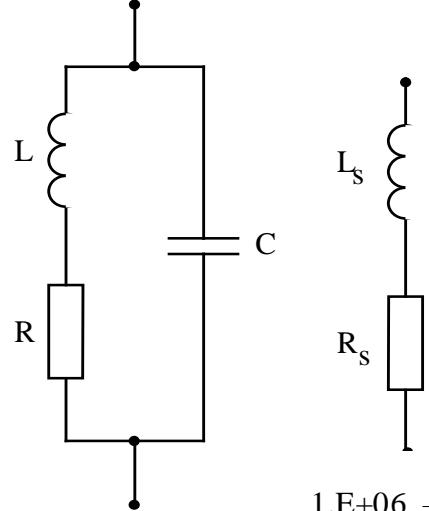
Změny permeability lze určit podle závislosti permeability na B a H.

Kmitočtová závislost indukčnosti je pozorovatelná téměř u všech cívek a transformátorů.

Je způsobena jednak reálnou závislostí vlastní indukčnosti cívky nebo transformátoru na kmitočtu, která je způsobena změnou proudového rozložení v cívce nebo změnou permeability jádra a dále vlivem parazitních parametrů.

Parazitní parametry způsobují, že velikost náhradní indukčnosti L_s , se kterou je vlastní indukčnost L zaměňována, protože je snadno měřitelná, je funkcí nejen vlastní indukčnosti, ale i frekvence.

KMITOČTOVÁ ZÁVISLOST



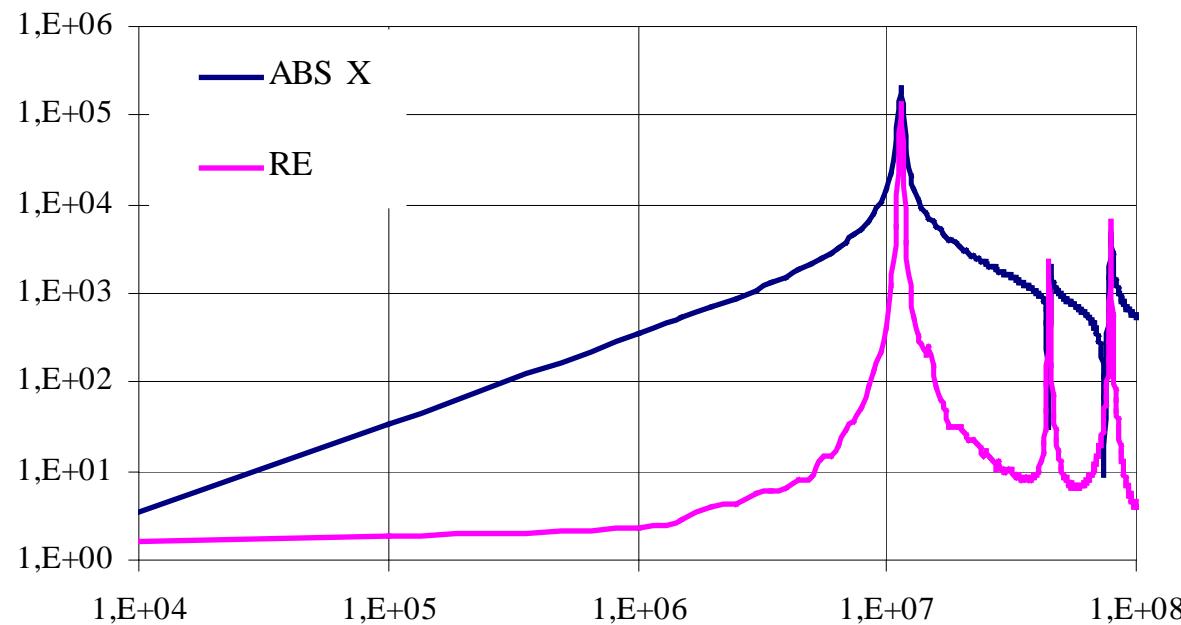
$$Z = R_s + j\omega L_s = \frac{r + j\omega L}{1 - \omega^2 LC_0 + j\omega r C_0}$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{L}{C_0}}$$

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

$$L_s \cong \frac{L}{1 - (f / f_r)^2}$$

$$R_s \cong \frac{R}{(1 - (f / f_r)^2)^2}$$



Nad f_r je reaktance cívky KAPACITNÍ,
další rezonance způsobuje odraz vlny na vedení, které tvoří vinutí

Činitel jakosti cívky je možné vyjádřit jako poměr jalového výkonu na indukčnosti k činnému výkonu, který je disipován vlivem ztrát nebo z parametrů náhradního obvodu pomocí hodnot L a R.

$$Q = \frac{\omega L I}{P_V + P_J + P_K} \quad Q = \frac{\omega L}{R}$$

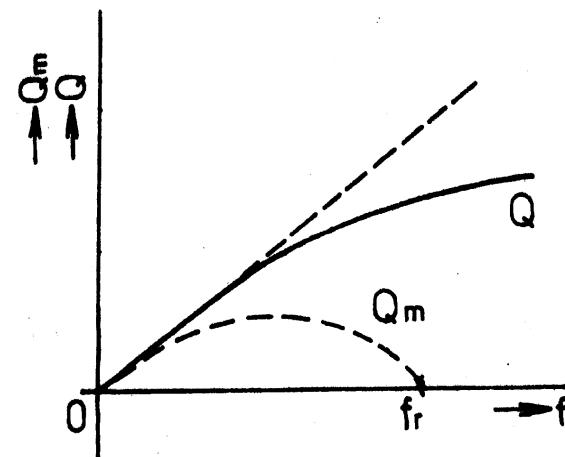
P_V je výkon ztracený ve vinutí vlivem jeho ohmického odporu

P_J výkon ztracený v jádře vlivem ztrát feromagnetického materiálu

P_K výkon ztracený ve stínícím krytu cívky vlivem indukovaných proudů

Když cívku měříme, dostaneme impedanci odpovídající L_s a R_s a činitel Q_m obvykle nazývaný činitel převýšení (podle Q metru)

$$Q_m = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad Q = \frac{Q_m}{1 - (f / f_r)^2}$$



Maximální provozní proud, napětí a výkon cívky jsou veličiny vzájemně svázané komplexní impedancí cívky.

Co cívka vydrží je určeno odvodem tepla vznikajícího v cívce nebo jejích částech v důsledku ztrát, dosažením maximální přípustné hodnoty intenzity magnetického pole nebo magnetické indukce v jádře nebo nebezpečím napěťového průrazu izolace vinutí.

Celkový jalový výkon je omezen všemi těmito veličinami a o maximu rozhoduje ze všech veličin ta, která bude na dané frekvenci dosažena první a která to konkrétně bude je určeno frekvencí a konstrukcí cívky.

$$S = UI = \omega LI^2 = \frac{U^2}{\omega L} = QP_z$$

Ztrátový výkon můžeme přímo vyjádřit podle proudu cívkou a měrných ztrát feromagnetického materiálu.

$$P_Z = I^2 R_{VF} + mP_m$$

I je proud protékající vinutím

R_{VF} střídavý (vysokofrekvenční) odpor vinutí

m hmotnost feromagnetického jádra

P_m měrné ztráty feromagnetického materiálu

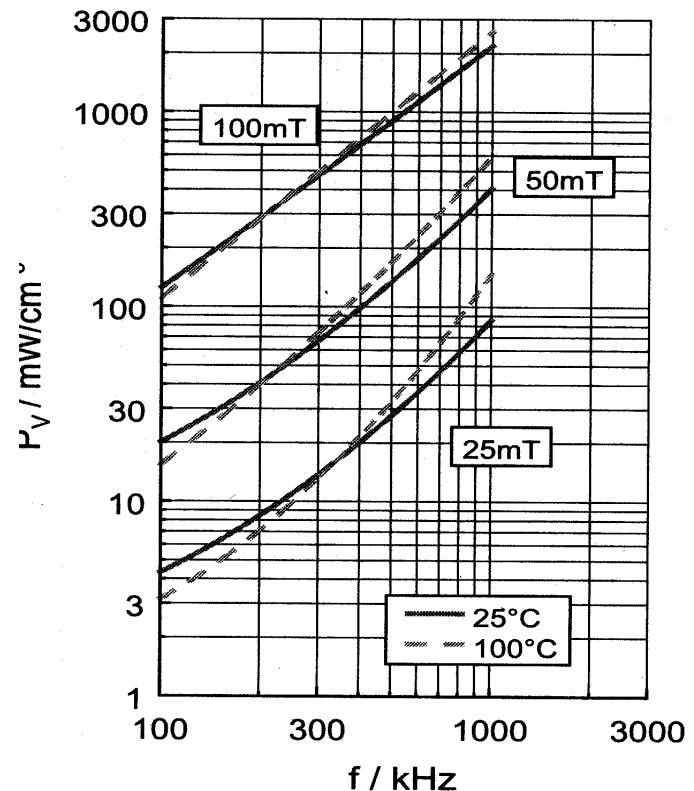
Stárnutí cívek se projevuje postupnou změnou parametrů, která může vyústit v katastrofickou poruchu. Projevy stárnutí jsou:

Změna indukčnosti vlivem mechanických nestabilit

Zvyšování ztrát v důsledku koroze vodiče – na povrchu u holých, zejména stříbřených vodičů, v místech kde byl pájen s agresivním tavidlem. Koroze může vodič přerušit, postupně přerušovat vodiče VF lanka.

Zvýšení ztrát v důsledku postupné degradace všech izolačních materiálů vlivem vysoké teploty, intenzity elektrického pole nebo vlhkosti

Průraz izolace v důsledku degradace všech izolačních materiálů



Transformátory

jsou popisovány na základě náhrady transformátoru dvojbranem nebo n-branem

Parametry, které souvisí pouze s jednou branou n-branu, lze popsát stejnými parametry, jako vlastnosti cívek.

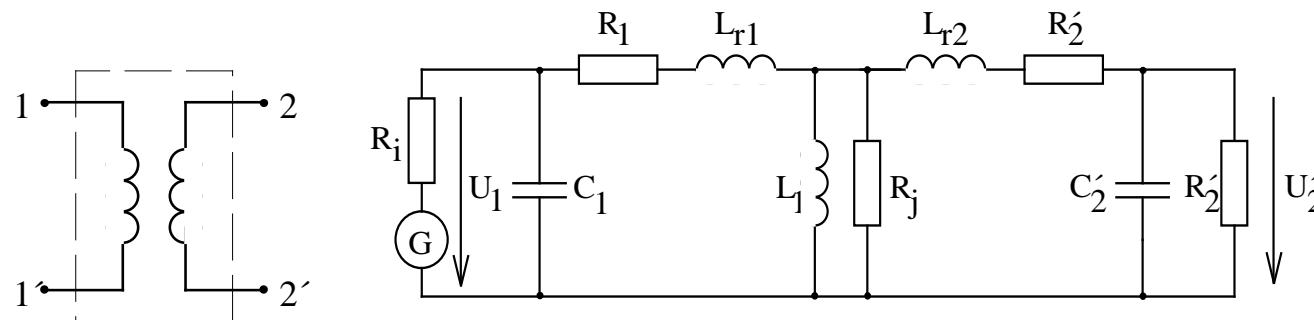
Parametry transformátoru, které se týkají více jeho vinutí, tj. několika bran náhradního n-branu, mají obecně tvar komplexních přenosových funkcí.

V nejjednodušších případech, obvykle na jednom kmitočtu, jsou definovány pouze svými absolutními hodnotami, jako napěťové, proudové nebo výkonové přenosy mezi jednotlivými bránami - vinutími transformátoru.

U širokopásmových transformátorů jsou tyto přenosy udávány jako funkce kmitočtu a bývají definovány jako komplexní čísla, což znamená, že udávají nejen poměry napětí (proudů), ale i jejich fázové posuny.

U přizpůsobovacích nebo symetrizačních transformátorů u kterých jsou stanoveny zatěžovací impedance, jsou základní údaje definovány pomocí rozptylových parametrů, tj. pomocí komplexních koeficientů odrazu a přenosu na bránách.

Důležitými parametry jsou indukčnosti všech vinutí, kapacity a ohmické odpory vinutí, maximální proudy a napětí na všech vinutích i maximální výkony, které mohou být k vinutím přiváděny nebo z nich odebírány a s tím související ztráty transformátoru.



C_1 kapacita primárního vinutí

L_{r1} rozptylová indukčnost primárního vinutí

R_1 ohmický odpor primárního vinutí

L_1 hlavní indukčnost transformátoru

R_j odpor reprezentující ztráty v jádře

L_{r2}' rozptylová indukčnost sekundárního vinutí, přepočtená $L_{r2}' = L_{r2} \cdot p^2$

R_2' ohmický odpor sekundárního vinutí, přepočtený $R_2' = R_2 \cdot p^2$

C_2' kapacita sekundárního vinutí, přepočtená na primární stranu $C_2' = C_2 / p^2$

Další prvky reprezentují obvody připojené k transformátoru

R_i vnitřní odpor zdroje

R_z' zatěžovací odpor sekundárního vinutí, přepočtený na primární stranu

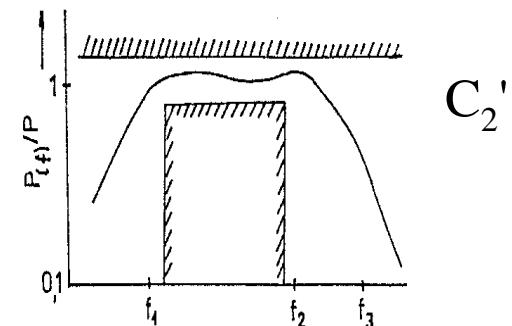
Zjednodušený rozbor přenosu transformátoru

1) V pásmu středních kmitočtů, kde reaktance kapacit C_1 , a reaktance indukčnosti L_1 jsou mnohonásobně větší než zatěžovací odpor R_z' (R_i paralelně R_z') a zároveň reaktance rozptylových indukčností $L_{r1} L_{r2}'$ a odpory $R_1 R_2'$ jsou mnohonásobně menší než zatěžovací odpor R_z' , je náhradní přenos transformátoru U_1/U_2' přibližně roven jedné. Přenos skutečného transformátoru je přibližně roven poměru p a jeho ztráty jsou určeny odporem R_j .

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

2) V pásmu nízkých kmitočtů reaktance indukčnosti primárního vinutí $L_p = L_1 + L_{r1}$ klesá k hodnotě odporu R_2' (R_2' paralelně R_i) eventuálně pod ní. V důsledku proudu, který prochází touto indukčností, klesá na nízkých kmitočtech přenos transformátoru. Dolní mezní kmitočet, na kterém bude přenos vykazovat pokles o 3 dB lze přibližně určit ze vztahu. Dále směrem k nižším kmitočtům přenos klesá zhuba o 20 dB na dekádu, pro kmitočet blížící se k nule je přenos nulový.

$$f_1 = \frac{R}{2\pi L_1} \quad \text{kde } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1 + R_i} + \frac{1}{R_2' + R_z'}$$

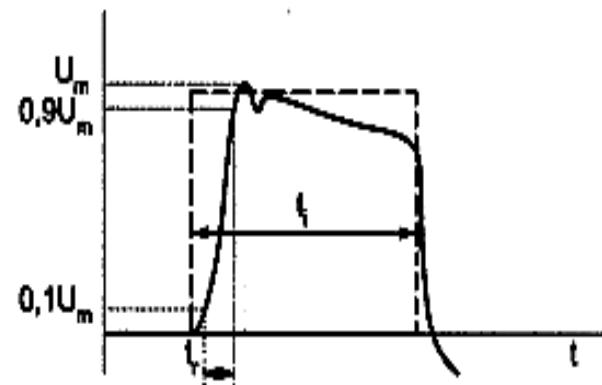
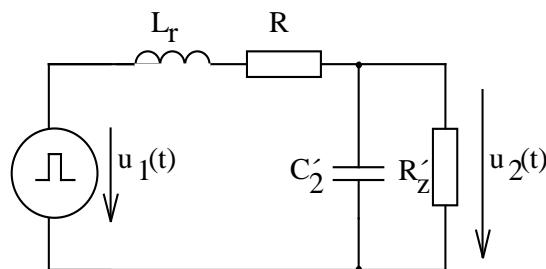


3) V pásmu vysokých kmitočtů náhradní obvod představuje dva vázané tlumené rezonanční obvody. Přesný průběh kmitočtové charakteristiky závisí nejen na jejich rezonančních kmitočtech, ale i na tlumení a na velikosti vzájemné vazby. V běžných případech je transformátor aperiodicky tlumen zatěžovacím odporem nebo vnitřním odporem zdroje. V oblasti vysokých kmitočtů mohou potom v prvním přiblžení existovat dva zlomové kmitočty z nichž nižší určuje mezní kmitočet celého transformátoru.

$$f_2' = \frac{R_2'}{2\pi(L_{r1} + L_{r2}')} \quad f_3' = \frac{1}{2\pi R(C_1 + C_2')}$$

Malé tlumení a rezonance se projeví zejména impulzních transformátorů. Na málo tlumeném vinutí může v rezonanci vzniknout vysoké napětí. Pro malou hodnotu R rezonanční kmitočet a mez periodicity lze vyjádřit:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_2}} \quad \sqrt{L_r C_2} \ll 2R_z C_2$$



Impulzní transformátory

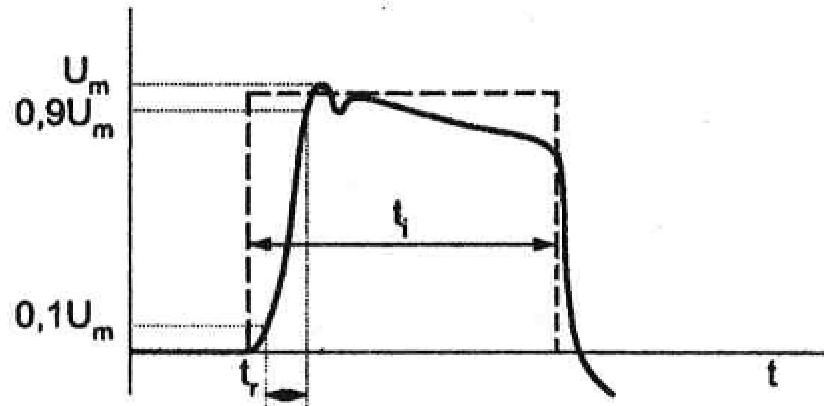
Řešení v časové oblasti: Typický tvar zkresleného impulzu zobrazen na obr.

Dochází k prodloužení doby náběhu i doběhu impulzu omezením strmosti čela a týlu impulzu, čelo a týl impulzu mohou být zkresleny překmity.

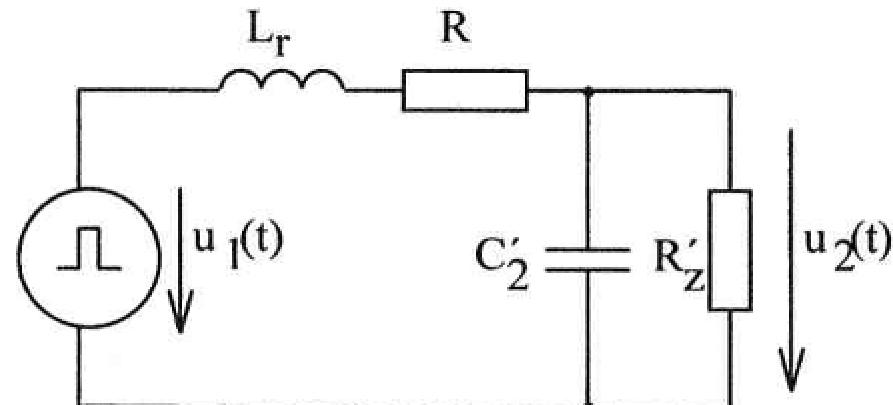
Během trvání impulzu může na jeho temeni dojít k poklesu.

Pro nezkreslený přenos čela a týlu impulzu musí transformátor přenášet **vysoké** kmitočty

Pro nezkreslený přenos **temene** impulzu musí transformátor přenášet **nízké** kmitočty



Obr. 3.41. Ideální videoimpulz a jeho zkreslení



Obr. 3.42. Náhradní obvod transformátoru pro čelo impulzu

Na přenos čela impulzu transformátorem mají rozhodující vliv rozptylové indukčnosti a parazitní kapacity transformátoru. Pro účely rozboru zejména výkonového impulzního transformátoru můžeme jeho náhradní obvod dle obr. 3.39 zjednodušit do tvaru 3.42, ve kterém indukčnost L_r reprezentuje rozptylové indukčnosti a ohmický odpor primárního a sekundárního vinutí $R = R_1 + R'_2$.

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + 2\alpha \frac{du}{dt} + \omega^2 u = 0 \quad 3.28$$

Průběh napětí $u_2(t)$ při buzení napěťovým skokem $u_1(t)$ o velikosti U lze potom vyjádřit diferenciální rovnicí 2. řádu obdobnou 3.28, jejíž řešení je opět rozhodujícím způsobem ovlivněno činitelem tlumení obvodu. Při označení běžném pro charakteristickou rovnici a její řešení (3.62) lze průběhy řešení $u_2(t)$ pro všechny tři typy řešení diferenciální rovnice

$$\lambda^2 + 2\alpha\lambda + \omega_0^2 = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega^2} = -\alpha \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}} \right)$$

kde $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L_r} + \frac{1}{R_z' C_2'} \right)$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{a L_r C_2'} \quad (3.62)$$

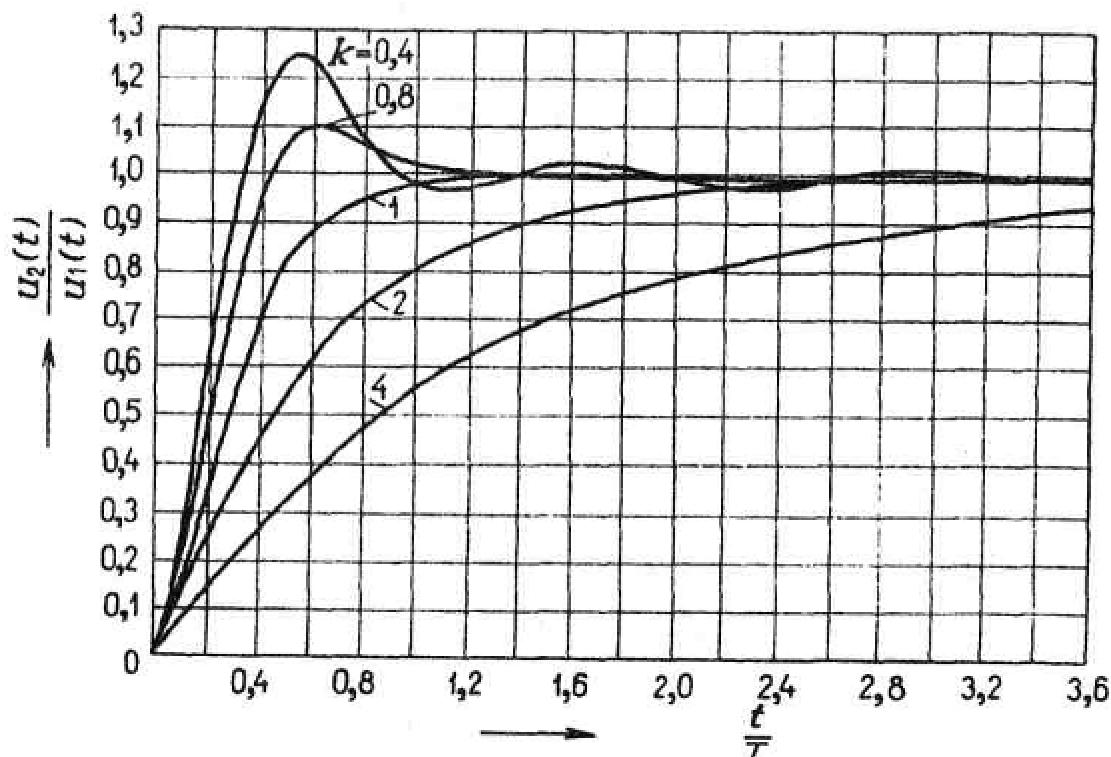
$$a = \frac{R_z'}{(R + R_z')}$$

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0}$$

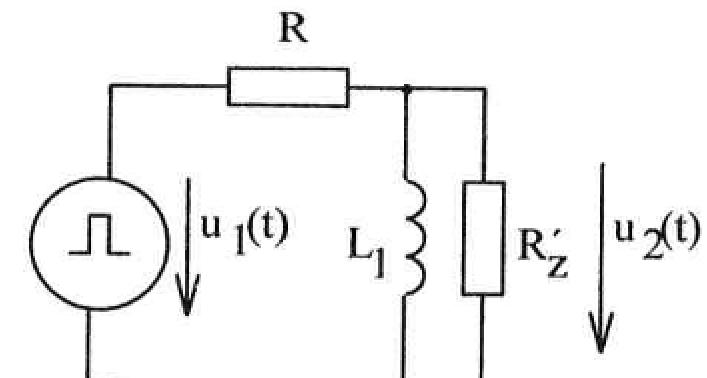
zobecnit normovanými průběhy podle obr 3.43. Pro činitele tlumení $k > 1$ je průběh aperiodický, pro $k=1$ nastává případ kritického tlumení a pro $k < 1$ je odezva periodická s překmitem čela impulzu. Doba čela impulzu roste s rostoucí rozptylovou indukčností a kapacitou vinutí a je přibližně souměřitelná s hodnotou T (3.63), pro vyšší tlumení mírně roste. Při velmi vysokém tlumení obvodu je odezva určena dvěma časovými konstantami, kterým odpovídají doby čela impulzu T_1 a T_2 (3.64) z nichž rozhodující je ta větší, tj. převládá vliv kapacity nebo rozptylové indukčnosti.

$$T \approx 2\pi\sqrt{aL_rC'_2} \quad (3.63)$$

$$T_1 \approx \frac{2L_r}{R + R'_z} \quad T_2 \approx 2C'_2 \frac{RR'_z}{R + R'_z} \quad (3.64)$$



Obr.3.43 Normované průběhy výstupního napětí impulzního transformátoru ($T = 2\pi/\omega_0$)



Obr. 3.44 Náhradní obvod transformátoru pro vrchol impulzu

Dobu trvání týlu impulzu lze určit stejným postupem jako dobou trvání jeho čela, v lineárním obvodu budou shodné. V praxi je možné, že výpočet je nutno opakovat pro jiné náhradní parametry zdroje a zátěže, které jsou v době trvání impulzu a mimo ni různé.

Rozbor zkreslení temene impulzu je vhodné provést v náhradním schematu podle obr 3.44, ve kterém indukčnost L_1 představuje hlavní indukčnost transformátoru. V případě, že náhradní obvod (zejména indukčnost L_1) lze považovat za lineární, je výstupní napětí $u_2(t)$ určeno jednoduchým přechodným dějem v obvodu LR, jehož průběh je určen vztahem

$$u_2 = aUe^{-\frac{t}{\tau}} = aUe^{-\frac{tRR'_z}{L_1(R+R')}} \quad (3.65)$$

Má-li být zkreslení temene impulzu malé, musí být časová konstanta přechodného děje velká vůči době trvání impulzu a pokles vrcholové části impulzu v čase $t=t_i$ lze vyjádřit přibližným vztahem 3.66.

$$\frac{aU - u_2(t_i)}{aU} = t_i \frac{RR'_z}{L_1(R+R'_z)} \quad (3.66)$$

Uvažujeme-li možné nelinearity obvodu, může být zkreslení impulzu způsobeno přetížením zdroje velkým proudem indukčnosti transformátoru (3.67) nebo přesycením feromagnetického jádra při vysoké magnetické indukci (3.68)

$$I_{\max} = \frac{aUt_i}{L_1} \quad (3.67)$$

$$B_{\max} = \frac{aUt_i}{SN} \quad \text{pro impulzy jedné polarity} \quad (3.68)$$

$$B_{\max} = \frac{aUt_i}{2SN} \quad \text{pro střídavé impulzy} \quad (3.69)$$