

V TOMTO SEŠITĚ

Z dějin vědy a techniky	1
Ročník 2004 na CD ROM	2
Naskenované ročníky 1996 až 1998 na CD ROM	2

FEROMAGNETICKÉ MATERIÁLY VE VĚ OBVODECH

Úvod	3
Katalogové údaje vybraných feromagnetických materiálů	8
Symetizační články	25
Vf širokopásmové transformátory ...	32
Praktická konstrukce toroidních cívek	34
Příklady použití feromagnetických materiálů	36

KONSTRUKČNÍ ELEKTRONIKA A RADIO

Vydavatel: AMARO spol. s r. o.
Redakce: Zborovská 27, 150 00 Praha 5,
tel.: 2 57 31 73 11, tel./fax: 2 57 31 73 10.
Šéfredaktor ing. Josef Kellner, sekretářka
redakce Eva Kelárková, tel. 2 57 31 73 14.
Ročně vychází 6 čísel. Cena výtisku 36 Kč.
Rozšiřuje PNS a. s., Transpress spol. s r. o.,
Mediaprint & Kapa a soukromí distributoři.
Předplatné v ČR zajišťuje Amaro spol. s r. o.,
- Michaela Jiráčková, Hana Merglová (Zborovská
27, 150 00 Praha 5, tel./fax: 2 57 31 73 13, 2 57
31 73 12. Distribuci pro předplatitele také
provádí v zastoupení vydavatele společnost Media-
servis s. r. o., Abocentrum, Moravské náměstí
12D, P. O. BOX 351, 659 51 Brno, tel: 5 4123
3232; fax: 5 4161 6160; abocentrum@mediaser-
vis.cz; reklamační - tel.: 800 171 181.
Objednávky a předplatné v Slovenskej republike
vybavuje MAGNET-PRESS Slovakia s. r. o., Teslo-
va 12, P. O. BOX 169, 830 00 Bratislava 3, tel./
fax (02) 44 45 45 59, (02) 44 45 06 97 - předplat-
né, (02) 44 45 46 28 - administrativní, email:
magnet@press.sk
Podávání novinových zásilek povoleno Českou
poštou - ředitelstvem OZ Praha (č.j. nov 6005/96
ze dne 9. 1. 1996).
Inzerce v ČR přijímá redakce, Zborovská 27,
150 00 Praha 5, tel.: 2 57 31 73 11, tel./fax:
2 57 31 73 10.
Inzerce v SR vyřizuje MAGNET-PRESS Slovakia
s. r. o., Teslova 12, 821 02 Bratislava, tel./
fax (02) 44 45 06 93.
Za původnost a správnost příspěvků odpovídá autor
(platí i pro inzerce). Nevyžádané rukopisy nevracíme.
<http://www.aradio.cz>; E-mail: pe@aradio.cz
ISSN 1211-3557, MK ČR E 7443
© AMARO spol. s r. o.

Z dějin vědy a techniky

Historie elektřiny a magnetizmu

Již před časem jsme přinesli životopisy zajímavých vědců, kteří měli vliv na rozvoj výpočetní techniky (KE 5/02, 6/02, 1/03). Dnes několik zajímavostí o dalším z nich, který byl de facto průkopníkem v oblasti moderní výpočetní techniky.

John Vincent Atanasoff

John Vincent Atanasoff se narodil 4. října 1903 v Hamiltonu, stát New York. Jeho předkové byli bulharského původu. Již od mládí se velmi zajímal o matematiku. V pouhých deseti letech pronikl do zákonitostí logaritmického pravítka (tehdejší provedení Dietzgenovo) a s pomocí matky začal studovat matematiku z vysokoškolské učebnice algebry krátce po tom.

Rodina se pak přestěhovala na Floridu a tam vystudoval nižší stupeň univerzity (Mulberry High School - elektrotechnické inženýrství) v roce 1925. Studium zvládl za dva roky, byl zapsán do všech matematických kurzů, avšak z finančních důvodů nebyl řádným studentem koleje. Pak pokračoval ve studiu matematiky na státní koleji v Iowě, kde graduoval jako bakalář. Poznal tam i svou budoucí ženu Luru Meeks a oženil se zakrátko po absolvování.

V roce 1930 skončil jako doktor filozofie z teoretické fyziky na univerzitě ve Wisconsinu. Na koleji v Iowě, kde dříve studoval, se stal v roce 1936 odborným asistentem matematiky a fyziky. Po válce začal pracovat na různých místech ve vojenských laboratořích, později se dostal na nejvyšší posty ve významných organizacích (jako např. Cybernetics Inc.) a byl konzultantem u dalších firem (Control Data Corp., Honeywell apod.). V roce 1990 získal od prezidenta Busha národní medaili za technologii.

Jeho největším objevem byla realizace myšlenky využít Booleovy algebry a elektrických veličin k sestrojení výpočetního stroje. Od prvopočátku se o matematické stroje, které tehdy existovaly, zajímal - především o různé kalkulátory, jakými byly např. stroje IBM. Záhy ale zjistil, že jsou velmi pomalé a konečně i nepřesné.

Definoval zásady, které musí „správný“ počítač splňovat:

- Musí pracovat s elektrickými signály jako vstupním médiem,
- jako nejvhodnější je binární systém způsobu výpočtu s využitím principu Booleovy algebry, neboť možnost pracovat pouze se dvěma symboly nesmírně zjednoduší vlastní obvodovou realizaci počítače a také zrychlí vlastní výpočet,

- musí mít paměť (pro tu použil kondenzátory) a musí mít schopnost regenerovat signál při výpadcích nebo změnách napájecího napětí,

- musí počítat přímo, nikoliv prostřednictvím dalších výpočtů, jak se to do té doby dělalo v analogových kalkulátorech.

Na projektu pracoval se svým kolegou Cliffordem Berrym, který mu byl doporučen jako „čerstvý“ inženýr elektrotechniky.

Prototyp počítače měli hotový v prosinci roku 1939. Když se ukázalo, že pracuje podle předpokladů a bezchybně, podali patentovou přihlášku na počítač „ABC“ (= Atanasoff-Berry Computer). Vydání patentu se však stále protahovalo. Počítač měl pochopitelně z dnešního pohledu řadu nedostatků, neboť jej nebylo možné programovat a neměl procesorovou jednotku. Ovšem jeho architektura se stala základem pozdějších moderních počítačů.

V roce 1940 se Atanasoff zúčastnil na přednáškách Dr. John W. Mauchlyho a mluvili spolu. Mauchly se seznámil s principem jeho počítače a s myšlenkami, které měl na další vylepšování. To se později ukázalo jako chyba, neboť tyto myšlenky pak Mauchly využil při sestrojení počítače, který je všeobecně znám jako ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) a který je větší částí populace dodnes považován za první digitální počítač. Jeho původci jsou právě Dr. Mauchly a Dr. Eckert. Trvalo ještě 30 let, než soudce Judge Larson prohlásil, že ENIAC byl sestrojen na základě principů použitých již Atanasoffem. Teprve od té doby je možné oficiálně tvrdit, že vynálezem digitálního počítače pracujícího na binárním principu je Atanasoff.

Dr. John Vincent Atanasoff zemřel 15. června 1995 ve věku 91 let v Monrovi, USA. Nedočkal se sice patentu na princip počítače, ale je držitelem jiných 32 patentů v oborech, kterým se věnoval. Můžeme říci, že jeho objevem začala nová éra - éra výpočetní techniky, která ohromným způsobem změnila život celého lidstva. Jak jeho objev zasáhne do života lidí, to jistě v době, kdy na něm pracoval, ani nemohl tušit.

Právem lze jeho jméno uvádět v souvislosti s jinými vědci, kteří se na pokroku v oblasti matematických strojů podíleli, jako Charles Babbage, Presper Eckert, John Mauchly, Alan Turing, John von Neumann, Konrad Zuse a další.

QX

(Historie je ještě na 3. straně obálky)



Ročník 2004 na CD ROM

Vážení čtenáři, nyní vychází nový CD ROM s ročníkem 2004 všech časopisů našeho vydavatelství.

CD ROM 2004 zahrnuje kompletní obsah časopisů Praktická elektronika A Radio, Konstrukční elektronika A Radio, Electus 2004 a Amatérské radio za rok 2004 (inzerce je vynechána).

Vše je zpracováno ve formátu pro elektronické publikování **Adobe PDF**.

Na disku je nahrán prohlížeč program **Adobe Acrobat Reader 6.02CECZ**. Nelze použít starší verzi 3.0, proto si musíte vždy starý prohlížeč přeinstalovat.

Po nainstalování prohlížečiho programu Acrobat Reader jsou tři možnosti otevření požadovaného časopisu. První možností je otevřít přímo soubor, např. **_PE07_2004.pdf**

a ukáže se první stránka čísla 7 Praktické elektroniky A Radio. V ní můžeme listovat pomocí šipek v liště nástrojů nebo stačí kliknout na číslo stránky v obsahu a ta se sama zobrazí.

Druhou možností je otevřít soubor **_Amaro2004.pdf**. Objeví se dvě stránky se všemi titulními listy jednotlivých časopisů. Stačí kliknout na jeden z nich, otevře se žádaný časopis na první straně a dále pokračujeme jako v předchozím odstavci.

Poslední možnost je otevřít soubor **_obsah2004.pdf**, objeví se známý obsah z PE 12/2004 (nebo na soubor obsahAR2004.pdf - pro obsah Amatérského radia) a kliknutím na číslo stránky se otevře přímo požadovaný článek.

Na zbytek místa na CD ROM jsme nahráli:

- **Aktualizovanou vyhledávací databázi EC našich časopisů. Pokračování z CD ROM 1996 a 2001.**
- **Nejnovější testovací verzi známého programu pro kreslení schémat a návrh desek s plošnými spoji OrCAD 10.0.**
- **Katalog firmy Compo (katalog stovebnic).**
- **Katalog firmy PS electronic. Obsahuje katalogové listy součástek.**
- **Programy ke konstrukcím uveřejněným v PE a KE.**

Věříme, že se vám bude nový CD ROM líbit a že jím opět rozšíříte svou elektronickou knihovnu.

Redakce



Naskenované ročníky 1996 až 1998 na CD ROM

Vážení čtenáři, na mnohé žádosti, že chcete mít naše časopisy kompletní, nyní vydáváme naskenované ročníky 1996 až 1998 časopisů Amatérské Radio řady A (červeně) a 1996 až 1997 řady B (modře).

V tomto období naše vydavatelství tyto tituly nevlastnilo, proto za jejich obsah a kvalitu nemůžeme odpovídat.

Zdůrazňujeme, že ročníky jsou naskenovány přímo z časopisů, protože z té doby nejsou k dispozici podklady pro počítačové zpracování. Tím samozřejmě utrpěla kvalita, která není taková, jako na předchozích CD ROM.

Vše je umístěno na jednom CD ROM opět ve formátu pro elektronické publikování **Adobe PDF**.

Na disku je nahrán prohlížeč program **Adobe Acrobat Reader 6.02CECZ**. Nelze použít starší verzi 3.0, proto si musíte vždy starý prohlížeč přeinstalovat.

Po nainstalování prohlížečiho programu Acrobat jsou dvě možnosti otevření požadovaného časopisu. První možností je otevřít přímo soubor požadovaného čísla a ukáže se jeho první strana.

Druhou možností je otevřít soubor požadovaného ročníku, např. **A-1996.pdf**. Objeví se stránka se všemi obrázky jednotlivých časopisů. Stačí kliknout na jeden z nich a otevře se žádaný časopis.

To je asi vše, co se dá o tomto CD ROM napsat. Věříme, že i přes uvedené nedostatky vám pomůže zkompletovat váš archiv.

Popsané CD ROM si lze objednat telefonicky na 257 317 312 a 257 317 313 nebo na naší adrese: AMARO spol. s r. o., Zborovská 27, 150 00 Praha 5.

CD ROM vám mohou být doručeny na dobírku (k ceně bude přičteno poštovné a balné) nebo si je můžete vyzvednout osobně. CD ROM si také lze zakoupit v některých prodejnách knih a součástek.

Objednávejte také přes Internet:

www.aradio.cz; E-mail: pe@aradio.cz

Cena CD ROM PE 2004 je 350 Kč.

Předplatitelé časopisů u firmy AMARO mají výraznou slevu, mohou si jej zakoupit za 220 Kč.

Cena CD ROM AR 1996 až 1998 je pro všechny jednotná - 220 Kč.

Zájemci na Slovensku si mohou CD ROM objednat u firmy Magnet-Press Slovakia s. r. o., P. O. BOX 169, 830 00 Bratislava, tel./fax (02) 672 019 31-33, predplatne@press.sk

FEROMAGNETICKÉ MATERIÁLY VE vf OBVODECH

Ing. Martin Kratoška

OK1RR@tiscali.cz

Cívky a transformátory patří k základním součástkám vf elektroniky. Ne vždy je vhodné či možné použít klasické vzduchové cívky, nejen kvůli mnohdy značnému počtu závitů cívky a jejím rozměrům, ale také kvůli skutečnosti, že magnetické pole ve značné míře „vystupuje“ ze vzduchové cívky a mohou tak vzniknout nejrůznější nežádoucí vazby a ztráty.

Proto se velmi často používají jádra z nejrůznějších magnetických materiálů. Ze známých magnetik, tj. feromagnetik, ferimagnetik a paramagnetik mají pro elektroniku zásadní význam pouze feromagnetika. Používala se jádra kovová (Al, mosaz či různé slitiny – permaloy, alsifer apod.), avšak běžnější je používání feritových a práškových jader, která bývají konstruována nejen jako válcová (šroubovací), ale též jako hrníčková, rámečková, toroidní, dvouotvorová apod. Pro nejnižší kmitočty se používají rovněž jádra zhotovená z plechových lamel, jaké známe z běžných síťových transformátorů. I zde se však stále častěji uplatňují feritové materiály.

Úvod

Při průchodu střídavého proudu cívkou navinutou na jádře z feromagnetického materiálu vzniká uvnitř jádra magnetické pole, které je příčinou vzniku vířivých proudů, projevujících se jako ztráta energie. Ztráty vířivými proudy jsou do značné míry ovlivněny nízkým měrným odporem materiálu jádra. Vliv tohoto odporu je poněkud omezen tím, že jádro není kompaktní celek, ale je složeno z jednotlivých od sebe vzájemně izolovaných částic. Tím je omezena dráha vířivých proudů.

Při daném kmitočtu a magnetické indukci lze ztráty vířivými proudy omezit dvěma způsoby:

1. Zmenšováním částic jádra.
2. Zvětšením měrného odporu materiálu jádra.

Při použití kovových feromagnetických materiálů, kdy jsou jádra cívek zhotovována ze vzájemně izolovaných plechů (tedy částice jsou tvořeny kovovými lamelami), je zmenšování částic (lamel) limitováno především výrobními náklady, které stoupají se zmenšující se tloušťkou plechu. Navíc roste i podíl izolačních vrstev, což vede k větším rozměrům jádra. Kovové materiály mají malý měrný odpor, pokusy o jeho zvětšení nepřinesly očekávaný úspěch.

Práškové materiály

Snahy o omezení ztrát vířivými proudy tedy vedly k použití jiných materiálů,

než kovových. Významným technologickým krokem bylo zavedení práškových jader na bázi karbonylového železa, železa s redukováním vodíkem, permaloye, alsiferu apod.

Základem práškových feromagnetických materiálů jsou částičky kovů nebo slitin, vázané izolačním prostředím tak, že jsou vzájemně odděleny. Tímto způsobem se podařilo dosáhnout významného zmenšení ztrát vířivými proudy, neboť bylo dosaženo jak zmenšení částic, tak i výrazného zvětšení měrného odporu materiálu.

Největší permeability (kolem 120) bylo dosaženo u jader z práškového permaloye. Izolační pojiva hmoty však působí jako rozptýlená vzduchová mezera jejíž rozměry nelze ovlivnit, proto je celková permeabilita těchto materiálů menší, než u materiálů kovových.

Mají-li být cívky použity na vyšších kmitočtech, je nutné dále zmenšovat ztráty vířivými proudy, tedy zmenšovat velikost částic, vlivem čehož permeabilita dále klesá.

Feritové materiály

Hledání materiálů s velkým měrným odporem vedlo k použití nekovových látek na bázi kyslíčků železa a k feritům. Poprvé se podařilo připravit nekovovou hmotu s feromagnetickými vlastnostmi německému fyzikovi Hilpertovi roku 1909. Materiál měl velmi vysoký měrný odpor (řádově 10^5 až $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$) a tedy malé ztráty vířivými proudy, avšak celková permeabilita byla nízká a ztráty velké.

První použitelné ferity (manganatozinečnaté) připravil Snoek v roce 1933 spékáním směsných krystalů feritů. Dosáhl rovněž velkého měrného odporu (řádově 10 až $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) a počáteční permeability 10 až 3000 .

Příčinou velkého měrného odporu feritových materiálů jsou elektrony, vázané valenčními silami. U kovových materiálů jsou elektrony vázány velmi volně a k jejich uvolnění z oběžných drah stačí velmi malá energie. Odtud tedy velká vodivost (malý měrný odpor) kovů a tedy i velké ztráty vířivými proudy.

Ferity jsou chemické sloučeniny, které lze vyjádřit obecným vzorcem MeFe_2O_3 , kde Me je zpravidla dvojmocný kov, obvykle Mn, Ni, Zn, Mg, Cu, Fe či Cd, z jednomocných Li.

První pozorování magnetismu byla prováděna u magnetitu FeO . Zde se železo vyskytuje ve dvou valencích Fe^{2+} a Fe^{3+} . Chemicky lze tedy magnetit vyjádřit jako $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ neboli oxid železnato-železitý, jinak ferit železitý. Jeho měrný odpor je $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$. I když je nepoměrně větší, než u vlastního železa, je stále příliš malý na to, aby se výrazněji omezily ztráty vířivými proudy.

Zjistilo se, že nahrazením železnatého iontu iontem některého výše uvedeného dvojmocného (jednomocného) kovu se zvětší měrný odpor řádově na 10^2 až $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, tedy na velikost, která je oproti kovovým feromagnetickým materiálům 10^6 až 10^{12} krát větší.

Aby se dosáhlo vysoké počáteční permeability, je nutné, aby intramolekulární napětí bylo minimální. To vede ke kubické struktuře, u které je smrštnění

při ochlazování stejné ve směru všech krystalografických os. Tato vlastnost je velmi důležitá, neboť materiál se zpracovává (vypaluje) v rozmezí teplot 1100 až 1400 °C.

Ferity krystalizují v tzv. spinelové struktuře, tedy stejně, jako minerál spinel $MgAl_2O_4$. Záporně nabitý kyslíkový iont vytvářejí těsný kubický systém.

V krystalové mřížce jsou možné dva druhy poloh, ve kterých jsou umístěny ionty kovů:

1. Tetraedrická poloha, ve které je iont kovu obklopen čtyřmi ionty kyslíku, umístěnými v rozích tetraedru.

2. Oktaedrická poloha, ve které je iont kovu obklopen šesti ionty kyslíku, umístěnými v rozích oktaedru.

V elementární spinelové buňce obsazují kovové ionty 8 tetraedrických a 16 oktaedrických poloh. Díky dvěma druhům iontů a dvěma druhům podmřížek jsou možná dvě umístění kovových iontů v krystalu.

První, normální spinelová struktura, znamená obsazení tetraedrických poloh dvojmocnými ionty a oktaedrických trojmocnými. Tomuto uspořádání odpovídá zinečnatý a kadmenný ferit.

Druhá, tzv. inverzní spinelová struktura, má všechny dvojmocné ionty umístěny v oktaedrických polohách a trojmocné obsazují rovnoměrně tetraedrické a zbývající oktaedrické polohy.

Pouze zinečnaté a kadmenné ferity jsou nemagnetické a jako jediné vytvářejí normální spinelovou strukturu. Ostatní ferity jsou magnetické.

Běžně vyráběné ferity jsou tvořeny směsnými krystaly několika jednoduchých feritů, z nichž nejvýznamnější jsou manganato-zinečnaté a nikelnato-zinečnaté ferity.

Elektromagnetické vlastnosti feromagnetických materiálů

Permeabilita

V praxi rozeznáváme permeabilitu počáteční, efektivní, cívkovou, vratnou, komplexní a amplitudovou.

Počáteční permeabilita μ_i je dána směrnici tečny magnetizační charakteristiky v bodě, kde je $H = 0$ a $B = 0$.

Počáteční permeabilita je:

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}, \quad (1)$$

kde:

μ_i je počáteční permeabilita,

μ_0 je permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$],

H, B jsou souřadnice bodů dané magnetizační charakteristiky [$A \cdot m^{-1}$, T].

Počáteční permeabilita je materiálová konstanta, která bývá v praxi nahražována amplitudovou permeabilitou,

měřenou bez stejnosměrné předmagnetizace při malých amplitudách střídavé intenzity magnetického pole (obvykle při $H = 4 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-1}$).

Efektivní permeabilita μ_e není materiálovou konstantou, protože je vztažena vždy k určitému tvaru jádra a může zahrnovat též i případnou vzduchovou mezeru, je-li obsažena. Představuje permeabilitu, kterou by měl mít hypotetický homogenní materiál, aby bylo při stejných rozměrech dosaženo stejné reluktance, jako má jádro, vyrobené z různých materiálů.

Platí:

$$\mu_e = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{L}{N^2} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{A_k}, \quad (2)$$

kde:

μ_e je efektivní permeabilita,

μ_0 je permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$],

L je indukčnost měřicí cívky s jádrem [H],

N je počet závitů měřicí cívky,

l_k je délka siločáry k -tého úseku jádra [m],

A_k je průřez k -tého úseku jádra [m^2].

Efektivní permeabilita není materiálovou konstantou, neboť se vztahuje k určitému tvaru jádra z daného materiálu, zpravidla se vzduchovou mezerou. Uvádí se u složených tvarů spolu s parametry výpočtu:

A_e je efektivní průřez [cm^2]

V_e je efektivní objem [cm^3]

l_e je střední délka magnetické siločáry [cm]

popř. $\Sigma 1/A$, vypočtené podle doporučení IEC-205.

Cívková permeabilita μ_{app} je permeabilita materiálu jádra, vypočítaná z poměru indukčnosti měřicí cívky s jádrem a indukčnosti měřicí cívky bez jádra:

$$\mu_{app} = \frac{L}{L'}, \quad (3)$$

kde:

μ_{app} je cívková permeabilita,

L je indukčnost měřicí cívky s jádrem [H],

L' je indukčnost téže cívky bez jádra [H].

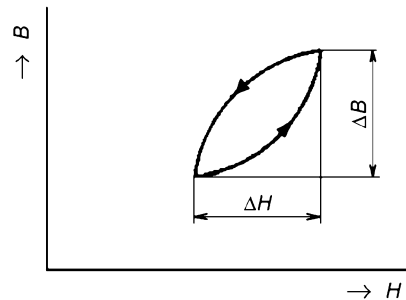
Cívková permeabilita závisí na tvaru a velikosti jádra, na tvaru a poloze měřicí cívky apod. Používá se především u otevřených magnetických obvodů s cívkami, vinutými na závitových, tyčinkových, trubičkových jádrech, feritových antén atd.

Vratná (reverzibilní) permeabilita μ_{rev} je mezní hodnotou inkrementální permeability pro amplitudu střídavé složky magnetického pole blížící se nule:

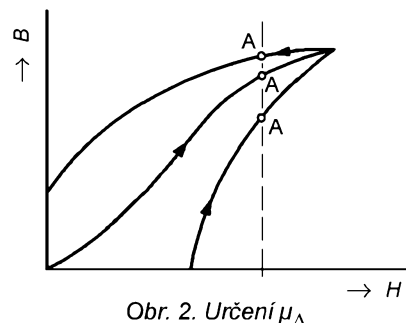
$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_{\Delta}, \quad (4)$$

kde:

μ_{rev} je vratná permeabilita,



Obr. 1. Inkrementální permeabilita μ_{Δ}



Obr. 2. Určení μ_{Δ}

ΔH je amplituda střídavé složky magnetického pole [$A \cdot m$],

μ_{Δ} je inkrementální permeabilita.

Inkrementální permeabilita (obr. 1) je permeabilita pro střídavé magnetování za přítomnosti stejnosměrné předmagnetizace:

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (5)$$

kde:

μ_{Δ} je inkrementální permeabilita,

μ_0 je permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$],

ΔH je amplituda střídavé složky magnetického pole [$A \cdot m$],

ΔB je odpovídající amplituda magnetické indukce.

Pro výpočet inkrementální permeability je třeba znát (viz obr. 2):

a) relativní směr stejnosměrného a střídavého pole,

b) magnetizační charakteristiku (dráhu), po níž se dospělo k výchozímu bodu A střídavých změn,

c) amplitudu střídavé složky intenzity magnetického pole a její průběh.

Komplexní permeabilita je poměr vektorů (fázorů) indukce a intenzity magnetického pole, dělený permeabilitou vakua:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\bar{B}}{\bar{H}}, \quad (6)$$

kde:

$\bar{\mu}$ je komplexní permeabilita,

μ_0 je permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$],

$\bar{H}$ je vektor intenzity pole [$A \cdot m^{-1}$],

$\bar{B}$ je vektor indukce [T].

Uvažujeme-li cívku o N závitů na uzavřeném feromagnetickém jádru

o délce l_e a průřezu A_e , impedance této cívky je dána magnetickými vlastnostmi jádra. Vlastní kapacita vinutí a ztráty v mědi jsou zanedbatelné.

Platí:

$$\bar{\beta} = j \cdot \omega \cdot L_0 \cdot \bar{\mu} \quad (7)$$

kde:

$\bar{\beta}$ je vektor impedance cívky $[\Omega]$,

ω je kruhová frekvence ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$),

L_0 je indukčnost při $\mu_i = 1$ při nezměněném rozložení toku $[H]$,

$\bar{\mu}$ je komplexní permeabilita.

Za předpokladu $\mu_i = 1$ je indukčnost L_0 dána vztahem:

$$L_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot 10^{-9}}{\sum \frac{1}{A}} \quad (8)$$

Má-li jádro zbytkové ztráty, je třeba položit na permeabilitu jako na vektorovou veličinu, jejíž reálná složka zvětšuje indukčnost a imaginární složka zvětšuje zbytkové ztráty jádra.

Uvažujeme nejdřív sériové náhradní schéma cívky s jádrem:

$$\begin{aligned} \beta &= j \cdot \omega \cdot L_0 \cdot (\mu' - j \cdot \mu'') = \\ &= R_s + j \cdot \omega \cdot L_s \end{aligned} \quad (9)$$

kde:

μ' , μ'' jsou složky (reálná a imaginární) komplexní permeability pro sériové náhradní schéma cívky s jádrem,

R_s je sériový odpor zbytkových ztrát v jádře $[\Omega]$,

L_s je sériová indukčnost $[H]$.

Z rovnice (9) lze určit:

$$L_s = L_0 \cdot \mu' \quad (10)$$

$$a \quad R_s = L_0 \cdot \mu'' \quad (11)$$

Tg δ , který je definován vztahem:

$$\frac{R_s}{\omega \cdot L_s} = \frac{\mu''}{\mu'} = \text{tg} \delta \quad (12)$$

se nazývá ztrátový činitel.

Průběhy μ' a μ'' v závislosti na kmitočtu se zpravidla uvádějí v katalogových listech příslušných materiálů. Z těchto křivek lze poměrně snadno stanovit typické hodnoty sériové indukčnosti, odporu a zbytkových ztrát uvažovaného jádra v celém rozsahu pracovních kmitočtů.

Uvažujeme-li paralelní náhradní schéma cívky s jádrem, lze odvodit:

$$L_p = L_s \cdot \left(1 + \frac{1}{Q_r^2}\right) \quad (13)$$

$$a \quad R_p = R_s \cdot \left(1 + Q_r^2\right), \quad (14)$$

$$\text{kde: } Q_r = \frac{\omega \cdot L_s}{R_s} = \frac{R_p}{\omega \cdot L_p} = \frac{1}{\text{tg} \delta} \quad (15)$$

R_p je paralelní odpor zbytkových ztrát v jádře $[\Omega]$,

L_p je paralelní indukčnost $[H]$,

R_s je sériový odpor zbytkových ztrát v jádře $[\Omega]$,

L_s je sériová indukčnost $[H]$,

Q_r je činitel jakosti.

Pokud by neexistovaly ztráty v jádře, byla by admitance:

$$Y = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L_0 \cdot \mu_i} \quad (16)$$

Existují-li však zbytkové ztráty, lze admitanci vyjádřit pomocí složek komplexní permeability pro paralelní náhradní schéma analogicky k náhradnímu schématu sériovému:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L_0} \cdot \left(\frac{1}{\mu'_p} - \frac{1}{j \cdot \mu''_p} \right) = \\ &= \frac{1}{R_p} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot L_p} \end{aligned} \quad (17)$$

kde:

μ'_p je reálná složka komplexní permeability pro paralelní náhradní schéma,

μ''_p je imaginární složka komplexní permeability pro paralelní náhradní schéma.

Z rovnice (17) vyplývá, že:

$$L_p = L_0 \cdot \mu'_p \quad (18)$$

$$R_p = \omega \cdot L_0 \cdot \mu''_p \quad (19)$$

$$a \quad \text{tg} \delta = \frac{\omega \cdot L_p}{R_p} = \frac{\mu''_p}{\mu'_p} \quad (20)$$

Komplexní permeabilita má význam především na vyšších kmitočtech, kde se hodnota počáteční permeability s kmitočtem prudce mění a činitel jakosti Q_r je menší než 10.

Amplitudová permeabilita je poměr amplitudy magnetické indukce a intenzity magnetického pole:

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_a}{H_a} \quad (21)$$

kde:

μ_a je amplitudová permeabilita,

μ_0 je permeabilita vakua $[H \cdot m^{-1}]$,

B_a je amplituda magnetické indukce $[T]$,

H_a je amplituda intenzity magnetického pole $[A \cdot m^{-1}]$.

Amplitudová permeabilita se používá především u jader, pracujících při vysokých hodnotách magnetické indukce. Průběhy závislosti amplitudové permeability na magnetické indukci a teplotě bývají uvedeny v katalogových listech příslušných jader.

Indukce v nasycení B_s

Indukce v nasycení B_s je ve srovnání s kovovými nebo práškovými materiály malá. Proto se feritové materiály nehodí pro výkonové aplikace na nízkých kmitočtech.

Koercitivní síla H_e

Koercitivní síla H_e je intenzita magnetického pole, nutná k potlačení remanentní indukce B_r . Hodnoty H_e se uvádějí v katalogových listech příslušných jader.

Curieho teplota (bod)

Curieho teplota je kritická teplota, při které materiál přechází z feromagnetického stavu do paramagnetického. Tento přechod je plynulý, proto bývá Curieho teplotu obtížné určit. V praxi se Curieho teplota definuje jako teplota, při které počáteční permeabilita materiálu klesne na polovinu původní hodnoty. Rovněž hodnoty Curieho teploty bývají uvedeny v katalogových listech.

Teplotní koeficient počáteční permeability μ_i a ztrátového činitele tg δ

Teplotní koeficient počáteční permeability pro daný teplotní interval (střední koeficient) je podíl poměrné změny počáteční permeability a změny teploty, která tuto změnu počáteční permeability vyvolala:

$$TK\mu_i = \frac{\Delta\mu_i}{\Delta T} \cdot \frac{1}{\mu_i} \quad (22)$$

Teplotní koeficient počáteční permeability bývá obvykle definován pro teplotu 20 až 60 °C.

Teplotní koeficient pro danou teplotu je mezí hodnotou středního koeficientu pro velmi malou změnu teploty $\Delta T \rightarrow 0$:

$$TK\mu_i = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta\mu_i}{\Delta T} \cdot \frac{1}{\mu_i} \quad (23)$$

kde:

$\Delta\mu_i$ je změna počáteční permeability,
 ΔT je změna teploty $[K]$.

Tyto vztahy lze aplikovat i na ztrátový činitel tg δ , efektivní permeabilitu μ_e apod.

Používá se také měrný teplotní koeficient:

$$TK\mu_s = \frac{\Delta\mu}{\Delta T} \cdot \frac{1}{\mu^2} \quad (24)$$

kde:

$TK\mu_s$ je měrný teplotní koeficient $[K^{-1}]$,

$\Delta\mu$ je změna permeability,

ΔT je změna teploty $[K]$,

μ je permeabilita při výchozí teplotě T .

Hodnoty měrného teplotního koeficientu bývají uvedeny v katalogových listech jader.

Ztráty v jádře

Celkové ztráty v jádře lze definovat jako výkon absorbovaný jádrem a přeměněný v teplo při periodicky proměnné magnetické indukci.

Ztráty při malých magnetických indukcích v Rayleighově oblasti lze rozdělit na ztráty vířivými proudy, ztráty hysterezní a ztráty zbytkové (remanentní).

Rayleighova oblast je definována jako oblast, v níž platí (s dostatečnou přesností) kvadratická závislost magnetické indukce na intenzitě podle vztahu:

$$\frac{B}{\mu_0} = (\mu_i + v \cdot H_a) \cdot H \pm \frac{v}{2} \cdot (H_a^2 - H^2) \quad (25)$$

kde:

B je okamžitá hodnota indukce [T],

μ_0 je permeabilita vakua [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$],

μ_i je počáteční permeabilita,

v je Rayleighův hysterezní koeficient [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$],

H_a je amplituda intenzity magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$],

H je okamžitá hodnota intenzity magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$].

Hysterezní ztráty

V aplikacích s nízkým sycením bývají hysterezní ztráty malé a lze je proto zanedbat ve srovnání s ostatními ztrátami.

Je-li indukčnost taková, že se hysterezní ztráty začínají uplatňovat, pak se stává podíl ztrátového činitele a počáteční permeability ($\text{tg} \delta / \mu_i$) závislým na amplitudě, která je opět závislá na rozměrech magnetického obvodu, indukčnosti L a efektivní hodnotě střídavého proudu I .

Označíme-li odpor, představující hysterezní ztráty R_h a jeho nárůst (při $f = 800 \text{ Hz}$) při zvětšení proudu o 1 mA jako hysterezní koeficient q_2 , pak při $f < 50 \text{ kHz}$ platí:

$$\frac{\Delta R_z}{\omega \cdot L} = \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot 800} \cdot \Delta I \cdot \sqrt{L} \quad (26)$$

a z toho:

$$q_2 = \frac{800 \cdot \Delta R_h}{\Delta I \cdot f \cdot L \cdot \sqrt{L}} \quad (27)$$

kde:

ΔR_h je rozdíl ztrátového odporu vlivem hysterezních ztrát,

ΔI je rozdíl proudů [A],

L je indukčnost [H],

f je měřicí kmitočet [Hz].

Hodnoty hysterezního koeficientu bývají opět uvedeny v katalogových listech materiálu. Uvádí se zpravidla pro jádro o objemu 24 cm^2 .

Rozměr hysterezního koeficientu je:

$$\left[\frac{\Omega}{\text{H}^{3/2} \cdot \text{mA}} \right] \quad (28)$$

Pro libovolný objem V a efektivní permeabilitu μ_e lze hysterezní koeficient určit ze vztahu:

$$q_2 = q_2(24 - 100) \cdot \left(\frac{\mu_e}{100} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{24}{V} \right)^{1/2} \quad (29)$$

Není-li průřez jádra konstantní, lze objem V vypočítat ze vztahu:

$$V = \frac{\left(\sum \frac{l}{A} \right)^3}{\left(\sum \frac{l}{A^2} \right)^2} \quad (30)$$

Hodnoty l a A lze pro běžně používané tvary jader určit podle doporučení IEC 205. Objem lze samozřejmě určit i jinými metodami.

V praxi se rovněž používá tzv. měrný hysterezní koeficient h/μ_i^2 , vztah mezi ním a koeficientem $q_2(24-100)$ je:

$$q_2(24 - 100) = 1,455 \cdot \frac{h}{\mu_i^2} \quad (31)$$

Ztrátový činitel $\text{tg} \delta$ a měrný ztrátový činitel $\text{tg} \delta / \mu$

Ztrátový úhel δ je úhel fázového posuvu mezi fázory B a H . Tangens tohoto úhlu se nazývá ztrátovým činitelem a je podílem imaginární a reálné složky komplexní permeability nebo podílem reálné a imaginární složky převrácené hodnoty komplexní permeability:

$$\text{tg} \delta = \frac{\mu''}{\mu'} = \frac{\mu_p'}{\mu_p''} = \frac{R_s}{\omega \cdot L_s} = \frac{\omega \cdot L_p}{R_p} \quad (32)$$

kde:

μ' je reálná složka komplexní permeability,

μ'' je imaginární složka komplexní permeability,

$1/\mu_p'$ je reálná složka převrácené hodnoty komplexní permeability,

$1/\mu_p''$ je imaginární složka převrácené hodnoty komplexní permeability,

R_s je ztrátový odpor cívky pro sériové náhradní zapojení [Ω],

ωL_s je induktivní reaktance cívky pro sériové náhradní zapojení [Ω],

ωL_p je induktivní reaktance cívky pro paralelní náhradní zapojení [Ω],

R_p je ztrátový odpor cívky pro paralelní náhradní zapojení [Ω].

Pokud je $\text{tg} \delta$ menší než 0,1, lze jej dělit na složky, odpovídající ztrátám hysterezním, ztrátám vířivými proudy a ztrátám zbytkovým:

$$\text{tg} \delta \approx \text{tg} \delta_h + \text{tg} \delta_e + \text{tg} \delta_r \quad (33)$$

kde:

$\text{tg} \delta_h$ je tangens dílčího ztrátového úhlu, daného vlivem hystereze,

$\text{tg} \delta_e$ je tangens dílčího ztrátového úhlu, daného vlivem vířivých proudů,

$\text{tg} \delta_r$ je tangens dílčího ztrátového úhlu, daného vlivem zbytkových ztrát.

Ve vf technice se častěji používá činitel jakosti Q , který je převrácenou hodnotou ztrátového úhlu:

$$Q = \frac{1}{\text{tg} \delta} \quad (34)$$

Kromě již uvedených veličin se také používá veličina zvaná měrný ztrátový úhel, který je materiálovou konstantou. Je to poměr ztrátového úhlu k počáteční permeabilitě.

Pro obvody se vzduchovou mezerou (také pro práškové materiály) se používá měrný ztrátový úhel, definovaný poměrem ztrátového úhlu k efektivní permeabilitě.

Hodnoty měrného ztrátového úhlu lze najít v katalogových listech materiálu.

Optimální frekvenční oblast

Nejsnazší metodou určení optimální frekvenční oblasti pro rezonanční obvody je zjištění příslušných hodnot činitele jakosti Q z grafů pro daný typ jádra. Při použití materiálu pro širokopásmové transformátory lze použít průběhu složek komplexní permeability μ' a μ'' .

Horní mezní kmitočet $f_{\max}$

Za horní mezní kmitočet lze považovat takový, při němž Q poklesne na 50, resp. $\text{tg} \delta$ na 0,02. Jádra se vzduchovou mezerou mají horní mezní kmitočet vždy vyšší než jádra bez mezery.

Dolní mezní kmitočet $f_{\min}$

V praxi se za dolní mezní kmitočet považuje takový, při kterém je vhodné přejít na jiný typ materiálu, čímž se dosáhne snížení ztrát.

Ztráty při vysoké indukci N_v

Jsou důležité především při návrhu výkonových transformátorů. Uvádají se v [$\text{mW} \cdot \text{g}^{-1}$] nebo v [$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-3}$].

Měrný odpor ρ

Hodnoty měrného odporu pro příslušnou teplotu a proudovou hustotu bývají uvedeny v katalogových listech materiálu. Při měření měrného odporu se používají ruťové kontakty nebo je na

povrch materiálu nanesena speciální grafitová emulze.

Činitel indukčnosti A_L

Činitel indukčnosti A_L patří k nejdůležitějším parametrům jádra. Představuje indukčnost, kterou by měla cívka daného tvaru a rozměrů, umístěná na jádru v dané poloze, kdyby byla tvořena jedním závitěm. Ve vf technice se častěji setkáváme s činitelem indukčnosti A_L pro 10, 100 či jiný počet závitů, neboť se zde setkáváme s jádry z materiálu s malou permeabilitou a použití A_L pro větší počet závitů vede k přesnějším výsledkům.

Platí, že:

$$A_L = \frac{L}{N^2}, \quad (35)$$

kde:

A_L je činitel indukčnosti [$\text{H} \cdot \text{z}^{-2}$],

L je indukčnost cívky [H],

N je počet závitů [z].

V praxi se spíše setkáme s jednotkami $\text{nH} \cdot \text{z}^{-2}$ nebo $\mu\text{H} \cdot \text{z}^{-2}$.

V některých případech se používá i tzv. činitel závitů α , představující počet závitů, který by musela mít cívka daného tvaru a rozměrů, umístěná v dané poloze, aby se dosáhlo jednotkové indukčnosti:

$$\alpha = \frac{N}{\sqrt{L}}. \quad (36)$$

Je-li např. indukčnost L uvedena v μH , pak vztah mezi α a A_L bude:

$$\alpha = \frac{10^6}{\sqrt{A_L}}. \quad (37)$$

Činitel indukčnosti musí být měřen za podmínky, že měřicí proud je určen tak, aby $H < 4 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-1}$.

V praxi lze počet závitů cívky pro požadovanou indukčnost stanovit z nomogramů, které bývají uvedeny v katalo-
gických listech pro daný typ jádra, nebo lze použít vhodný program, který vybere pro daný kmitočet vhodný typ jádra, vypočítá počet závitů, určí předpokládané Q cívky a popř. další parametry. Vhodné programy zdarma nabízejí někteří výrobci feritových a práškových jader nebo lze použít univerzální, většínou komerční software.

Činitel odporu A_R

S činitelem odporu A_R se ve vf technice nesetkáváme příliš často, neboť se používají cívky o malé indukčnosti (tedy s malým počtem závitů), vinuté zpravidla tlustším vodičem.

Činitel odporu A_R nebo také konstanta A_R je analogií k činiteli indukčnosti A_L . Představuje stejnosměrný odpor R_{ss} jednoho závitů:

$$A_R = \frac{R_{ss}}{N^2}. \quad (38)$$

Ze známých údajů vinutí lze činitele odporu A_R vypočítat ze vztahu:

$$A_R = \frac{\rho \cdot l_z}{f_k \cdot A_z}, \quad (39)$$

kde:

ρ je měrný odpor materiálu vinutí (pro Cu je $1,72 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$),

l_z je střední délka závitů [cm],

A_z je plocha jednoho závitů [cm^2],

f_k je činitel plnění mědi.

Při použití uvedených jednotek má A_R rozměr [$\mu\Omega$], tedy $10^{-6} \Omega$.

Hodnoty činitele plnění mědi jsou udávány pro cívky tělíska obvykle při $f_k = 0,5$. Přepočtení pro jiné velikosti f_k lze provést pomocí vztahu:

$$A_R(f_k) = A_R(0,5) \cdot \frac{0,5}{f_k}. \quad (40)$$

Na obr. 3 jsou uvedeny závislosti f_k pro licnu (vf lanko) a na obr. 4 pro drát.

Časová konstanta τ

Časová konstanta je definována jako poměr indukčnosti L a ztrátového odporu R_z :

$$\tau = \frac{L}{R_z}, \quad (41)$$

kde:

τ je časová konstanta [s],

L je indukčnost [H],

R_z je ztrátový odpor [Ω].

Pro nízké kmitočty lze ztrátový odpor nahradit stejnosměrným odporem R_{ss} . Časová konstanta pak bude:

$$\tau_{ss} = \frac{L}{R_{ss}}, \quad (42)$$

kde:

τ_{ss} je časová konstanta [s],

L je indukčnost [H],

R_{ss} je stejnosměrný odpor [Ω].

Z výrazů (35) a (38) vyplývá:

$$\tau_{ss} = \frac{A_L}{A_R}. \quad (43)$$

Časová nestabilita permeability (desakomodace)

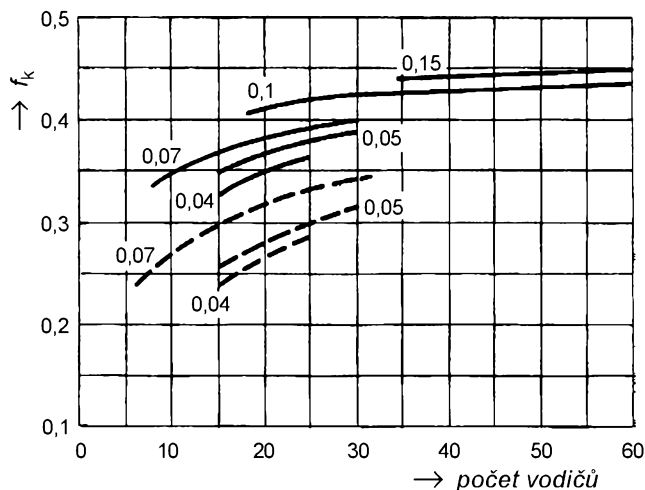
Časová nestabilita permeability se také nazývá desakomodace. Je to poměrná změna počáteční permeability, která vznikne za určitou dobu při stanovené teplotě po úplném odmagnetování bez působení dalších vlivů (magnetických, teplotních, mechanických atd.).

Desakomodace je definována vztahem:

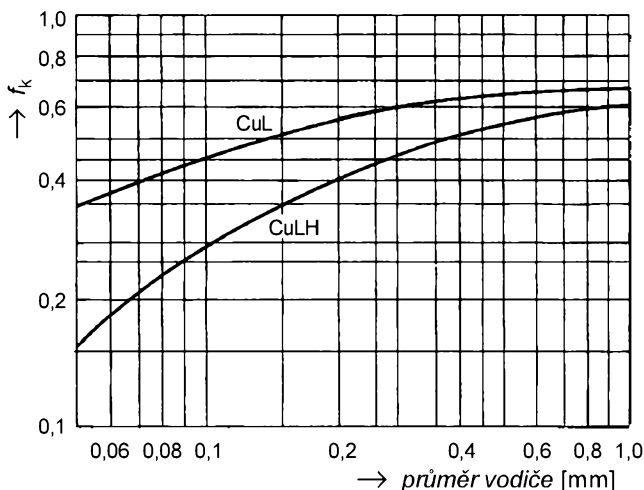
$$D = \frac{\mu_i 1 - \mu_i 2}{\mu_i 1} \cdot 100, \quad (44)$$

kde:

D je desakomodace [%],



Obr. 3. Závislosti činitele plnění mědi f_k na počtu a průměru vodičů [mm] v licně. Plné čáry platí pro neopředené lanko, čárkované čáry pro lanko opředené jednou vrstvou hedvábí



Obr. 4. Závislost činitele plnění mědi f_k na průměru plného vodiče. Čára CuL platí pro drát izolovaný lakem, čára CuLH pro drát izolovaný lakem a jednou vrstvou hedvábí

μ_1 je počáteční permeabilita měřená v dané (krátké) době t_1 po úplném od-magnetování,

μ_2 je počáteční permeabilita měřená v dané (delší) době t_2 po úplném od-magnetování.

Činitel desakomodace d je dán vztahem:

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 \cdot \log \frac{t_2}{t_1}} \quad (45)$$

V praxi se používá $t_1 = 10$ min a $t_2 = 100$ min. Pak $\log t_1/t_2 = 1$.

Někdy se také používá měrný činitel desakomodace DF , který je dán vztahem:

$$DF = \frac{d}{\mu_i} \quad (46)$$

Používané jednotky

Pojmy magnetická indukce a intenzita magnetického pole jsou často používány jako synonyma. V mnoha případech je totiž možné z magnetické indukce odvodit intenzitu magnetického pole a obráceně.

Intenzita magnetického pole H popisuje pole, vyvolané samotným proudem, protékajícím vodičem, zatímco magnetická indukce B popisuje pole, určené průtokem proudu a spolupůsobením magnetizačního efektu v materiálu.

Samotný materiál může indukci zmenšovat nebo zvětšovat, podle toho se nazývá paramagnetický nebo diamagnetický.

Souvislost mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole ve vakuu, podobně jako ve vzduchu nebo jiném nemagnetickém prostředí, je konstantní a lze ji vyjádřit vztahem:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (47)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ V/A·m nebo $1,256$ V/A·m].

Pro magnetické materiály platí:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (48)$$

kde μ_r je relativní permeabilita materiálu.

V měrové soustavě SI má magnetická indukce B jednotku 1 T (1 tesla) o rozměru [V/A·m²]. Intenzita magnetického pole H má jednotku 1 ampér na 1 metr a rozměr [A·m⁻¹].

Ve starší měrové soustavě má magnetická indukce B jednotku 1 G (1 gauss) a platí 1 G = 10^{-4} T. Intenzita magnetického pole H má jednotku 1 Oe (1 oersted) a platí 1 Oe = $10^3 \cdot 4 \cdot \pi^{-1}$ A·m⁻¹.

Jednotky soustavy SI (Système Internationale) se používají ve většině evropských zemích, kde jsou předepsány.

Tab. 1. Převod mezi některými jednotkami z oblasti magnetizmu

	mT (militesla)	G (gauss)	kA·m ⁻¹	Oe (oersted)
1 mT	1,0000	10,000	0,7960*	10,000*
1 G	0,1000	1,0000	0,0796*	1,0000*
1 kA·m ⁻¹	1,2560*	12,560*	1,0000	12,560
1 Oe	0,1000*	1,0000*	0,0796	1,0000

* Platí pro vzduch

Starší jednotky jsou používány mnoha výrobci a distributory v USA a je možné se s nimi velmi často se-

tkat v jejich katalogových listech. Převod mezi některými jednotkami je v tab. 1.

Katalogové údaje vybraných feromagnetických materiálů

Feritová toroidní jádra Amidon

Feritová toroidní jádra se vyrábějí v různých velikostech z materiálů s permeabilitou v rozsahu od 20 do více než 15 000. Jsou určena k použití v rezonančních obvodech, širokopásmových transformátorech a rovněž jsou vhodná i pro vf tlumivky.

Toroidní jádra se dodávají o vnějším průměru od 5,8 do 61 mm.

Feritová toroidní jádra jsou navržena pro vf aplikace a jejich relativně velká permeabilita umožňuje konstruovat cívky s velkou indukčností při minimálním počtu závitů. Tím je také možné dosáhnout minimálních rozměrů cívek.

Používané feritové materiály lze rozdělit do dvou skupin:

1. Nikelnato-zinečnaté s permeabilitou μ_i v rozsahu 20 až 800.
2. Manganato-zinečnaté s permeabilitou μ_i větší než 800.

Nikelnato-zinečnatá feritová jádra se vyznačují velkým objemovým odporem, středně velkou teplotní stabilitou a vysokým Q v kmitočtovém rozsahu od 500 kHz do 100 MHz. Jsou také vhodná pro rezonanční obvody, pracující s malým výkonem, kde je požadována velká indukčnost. Jejich malá permeabilita je vhodná rovněž pro širokopásmové transformátory.

Manganato-zinečnaté ferity mívají permeabilitu kolem 800, poměrně malý měrný odpor a dovolují střední sycení. Dosahují vysokého činitele jakosti Q v kmitočtovém rozsahu od 1 kHz do 1 MHz. Jádra z manganato-zinečnatých feritů se často používají ve spínacích zdrojích, pracujících v kmitočtovém rozsahu 20 až 100 kHz. Tato jádra jsou velmi vhodná ke konstrukci tlumivek, které potlačují signály v kmitočtovém rozsahu od 20 do více než 400 MHz.

Zvětšení průrazného napětí cívek je dosaženo vhodnou povrchovou úpravou jádra. Dostupná jsou povrchově upravená jádra z materiálů F, J, W a H. Jako povrchová úprava se používá šedý a černý lak, případně Parylen C.

Jádra s povrchem ošetřeným vrstvou Parylenu C o tloušťce 0,012 až 0,05 mm zaručují průrazné napětí 760 V.

Vrstva šedého laku o tloušťce 0,1 až 0,2 mm zaručuje průrazné napětí 500 V.

Černý lak mívá tloušťku 0,012 až 0,05 mm, zvýšené průrazné napětí však není zaručeno.

Charakteristiky feritových materiálů Amidon

Materiál 33 ($\mu = 850$) - manganato-zinečnatý materiál s malým objemovým odporem. Používá se pro feritové antény pro pásmo 1 kHz až 1 MHz. Vyrábějí se pouze tyčky.

Materiál 43 ($\mu = 850$) - má velký měrný odpor. Je vhodný pro středovlnné cívky, širokopásmové transformátory do 50 MHz a tlumivky, které potlačují signály o kmitočtech 40 až 400 MHz. Vyrábějí se toroidní jádra, perly, víceotvorová jádra a speciální tvary pro vf tlumivky.

Materiál 61 ($\mu = 125$) - vyznačuje se střední teplotní stabilitou a vysokým Q v rozsahu 0,2 až 15 MHz. Je vhodný pro širokopásmové transformátory do 200 MHz a pro tlumivky pro kmitočty nad 200 MHz. Vyrábějí se toroidní jádra, tyčky, cívkovitá a víceotvorová jádra.

Materiál 63 ($\mu = 40$) - je vhodný pro cívky s vysokým Q v pásmu 15 až 25 MHz. Vyrábějí se pouze toroidní jádra.

Materiál 64 ($\mu = 250$) - materiál, určený především pro feritové perly. Má velký měrný odpor, vynikající teplotní stabilitu a je velmi vhodný ke konstrukci tlumivek nad 400 MHz.

Materiál 67 ($\mu = 40$) - je podobný materiálu 63. Dovoluje větší sycení a má velmi dobrou teplotní stabilitu. Je vhodný pro cívky s vysokým Q pro kmitočty 10 až 80 MHz a pro širokopásmové transformátory do 200 MHz. Vyrábějí se pouze toroidní jádra.

Materiál 68 ($\mu = 20$) - vyznačuje se velkým objemovým odporem a vynikající teplotní stabilitou. Je vhodný pro rezonanční obvody s vysokým Q, které pracují v rozsahu 80 až 180 MHz. Vyrábějí se pouze toroidní jádra. Výroba byla ukončena, nahrazují jej materiály 61 a 67.

Materiál 73 ($\mu = 2\,500$) - materiál, určený především pro feritové perly. Je

vhodný pro tlumivky na kmitočtech 1 až 50 MHz. Vyrábějí se perly a víceotvoro-vá jádra.

Materiál 77 ($\mu = 2\,000$) - dovoluje velké sycení při vyšších teplotách. Vyznačuje se nízkými ztrátami v rozsahu 1 kHz až 1 MHz. Používá se pro transformátory malého výkonu ve spínaných zdrojích a pro širokopásmové transformátory a tlumivky v kmitočtovém rozsahu 0,5 až 50 MHz. Vyrábějí se toroidní jádra, hr-ničková a E jádra, perly, jádra pro širokopásmové baluny a trubčková jádra. Materiál je zdokonalením staršího materiálu 72, který se sice stále dodává v několika provedeních, ale v nových konstrukcích by měl být používán ma-teriál 77.

Materiál F ($\mu = 3\,000$) - dovoluje velké sycení při vysokých teplotách. Vhodný pro transformátory ve spínaných zdrojích a měničích. Dobře tlumí signály v kmitočtovém rozsahu od 0,5 do 50 MHz. Vyrábějí se pouze toroidní jádra.

Materiál J (materiál 75) ($\mu = 5\,000$) - má malý měrný odpor a malé ztráty v kmitočtovém pásmu 1 kHz až 1 MHz. Používá se pro pulsní transformátory a širokopásmové transformátory malého výkonu. Výborně tlumí signály v pásmu od 0,5 do 20 MHz. Vyrábějí se toroidní jádra a feritové perly, které bývají skladem, vyskytují se rovněž hr-ničková, RM, E a U jádra, ovšem pouze na objednávku.

Tab. 2. Magnetické vlastnosti feritových materiálů Amidon. Údaje o kmitočtových oblastech využitelnosti jader platí při malých výkonech a pro malá jádra. Při větších výkonech jsou skutečné kmitočty nižší než uvedené

Materiál	33	43	61	64	67	68	73
Počáteční permeabilita	800	850	125	250	40	20	2 500
Maximální permeabilita	1 380	3 000	450	375	125	40	4 000
Maximální indukce při 10 Oe [G]	2 500	2 750	2 350	2 200	3 000	2 000	4 000
Zbytková indukce [G]	1 350	1 200	1 200	1 100	100	1 000	1 000
Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$]	1×10^2	1×10^5	1×10^8	1×10^8	1×10^7	1×10^7	1×10^2
Teplotní součinitel v rozmezí -20 až +70 °C [%/°C]	0,1	1	0,15	0,15	0,13	0,06	0,8
Ztrátový činitel	3×10^{-6} na 0,2 MHz	20×10^{-6} na 0,1 MHz	32×10^{-6} na 2,5 MHz	100×10^{-6} na 2,5 MHz	150×10^{-6} na 50 MHz	400×10^{-6} na 0,1 MHz	7×10^{-6} na 0,1 MHz
Koercitivní síla [Oe]	0,3	0,3	1,6	1,4	3,0	10	0,18
Curieova teplota [°C]	150	130	350	210	500	500	160
Použití v rezonančních obvodech [MHz]	0,1 až 1	0,01 až 1	0,2 až 10	0,05 až 4	10 až 80	80 až 180	0,001 až 1
Oblast použití [MHz]	1 až 30	1 až 30	10 až 200	50 až 500	200 až 1 000	0,5 až 30	0,2 až 15
Tlumivky [MHz]	20 až 80	30 až 200	30 až 10 GHz	200 až 5 000	>1 GHz	>10 GHz	1 až 40

Materiál	77	83	F	J	K	W	H
Počáteční permeabilita	2 000	300	3 000	5 000	290	10 000	15 000
Maximální permeabilita	6 000	3 600	4 300	9 500	400	20 000	23 000
Maximální indukce při 10 Oe [G]	4 600	3 900	4 700	4 300	330	4 300	4 200
Zbytková indukce [G]	1 150	3 450	900	500	250	800	800
Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$]	1×10^2	$1,5 \times 10^3$	1×10^2	1×10^2	20×10^7	$0,15 \times 10^2$	1×10^2
Teplotní součinitel v rozmezí -20 až +70 °C [%/°C]	0,25	0,4	0,25	0,4	0,15	46	0,4
Ztrátový činitel	$4,5 \times 10^{-6}$ na 0,1 MHz	50×10^{-6} na 0,1 MHz	4×10^{-6} na 0,1 MHz	15×10^{-6} na 0,1 MHz	28×10^{-6} na 1 MHz	7×10^{-6} na 10 kHz	15×10^{-6} na 10 kHz
Koercitivní síla [Oe]	0,22	0,45	0,2	0,1	1,0	0,04	0,04
Curieova teplota [°C]	200	300	250	140	280	125	120
Použití v rezonančních obvodech [MHz]	0,001 až 2	0,001 až 5	0,001 až 1	0,001 až 1	0,0001 až 30	0,001 až 0,25	0,001 až 0,15
Oblast použití [MHz]	0,5 až 30	1 až 15	0,5 až 30	1 až 15	200 až 1 000	0,001 až 1	0,001 až 1
Tlumivky [MHz]	1 až 40	0,5 až 20	1 až 20	0,5 až 10	>1 GHz	0,1 až 1	0,001 až 0,5

Tab. 3. Rozměry feritových toroidních jader Amidon

Označení	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	Materiál	Permeabilita μ_i	Označení	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	Materiál	Permeabilita μ_i
FT-114-43	29,0	19,0	7,5	43	850	FT-240-67	61,0	35,6	12,7	67	40
FT-114-61	29,0	19,0	7,5	61	125	FT-240-77	61,0	35,6	12,7	61	2 000
FT-114-67	29,0	19,0	7,5	67	40	FT-240-F	61,0	35,6	12,7	F	3 000
FT-114-68	29,0	19,0	7,5	68	20	FT-240-J	61,0	35,6	12,7	J	5 000
FT-114-77	29,0	19,0	7,5	77	2 000	FT-240-K	61,0	35,6	12,7	K	290
FT-114-F	29,0	19,0	7,5	F	3 000	FT-240-W	61,0	35,6	12,7	W	10 000
FT-114-H	29,0	19,0	7,5	H	15 000	FT-290-43	73,7	38,9	12,7	43	850
FT-114-J	29,0	19,0	7,5	J	5 000	FT-290-77	73,7	38,9	12,7	77	2 000
FT-114-W	29,0	19,0	7,5	W	10 000	FT-290-F	73,7	38,9	12,7	F	3 000
FT-114A-43	29,0	19,0	13,8	43	850	FT-290-J	73,7	38,9	12,7	J	5 000
FT-114A-61	29,0	19,0	13,8	61	125	FT-290-W	73,7	38,9	12,7	W	10 000
FT-114A-77	29,0	19,0	13,8	77	2 000	FT-37-43	9,5	4,7	3,2	43	850
FT-125-K	31,8	19,0	9,5	K	290	FT-37-61	9,5	4,7	3,2	61	125
FT-140-43	35,6	22,9	12,7	43	850	FT-37-67	9,5	4,7	3,2	67	40
FT-140-61	35,6	22,9	12,7	61	125	FT-37-68	9,5	4,7	3,2	68	20
FT-140-67	35,6	22,9	12,7	67	40	FT-37-F	9,5	4,7	3,2	F	3 000
FT-140-77	35,6	22,9	12,7	77	2 000	FT-37-H	9,5	4,7	3,2	H	15 000
FT-140A-F	36,0	23,0	15,0	F	3 000	FT-37-J	9,5	4,7	3,2	J	5 000
FT-140A-J	36,0	23,0	15,0	J	5 000	FT-37-W	9,5	4,7	3,2	W	10 000
FT-140A-W	36,0	23,0	15,0	W	10 000	FT-50-43	12,7	7,1	4,8	43	850
FT-150-F	38,1	19,0	6,4	F	3 000	FT-50-61	12,7	7,1	4,8	61	125
FT-150-J	38,1	19,0	6,4	J	5 000	FT-50-67	12,7	7,1	4,8	67	40
FT-150-W	38,1	19,0	6,4	W	10 000	FT-50-68	12,7	7,1	4,8	68	20
FT-150A-F	38,1	19,0	12,7	F	3 000	FT-50-F	12,7	7,1	4,8	F	3 000
FT-150A-J	38,1	19,0	12,7	J	5 000	FT-50-H	12,7	7,1	4,8	H	15 000
FT-150A-K	38,1	19,0	12,7	K	290	FT-50-J	12,7	7,1	4,8	J	5 000
FT-150A-W	38,1	19,0	12,7	W	10 000	FT-50-W	12,7	7,1	4,8	W	10 000
FT-193-F	49,1	31,8	15,9	F	3 000	FT-50A-43	12,7	7,9	6,4	43	850
FT-193-J	49,1	31,8	15,9	J	5 000	FT-50A-61	12,7	7,9	6,4	61	125
FT-193-W	49,1	31,8	15,9	W	10 000	FT-50A-67	12,7	7,9	6,4	67	40
FT-193A-F	49,1	31,8	19,0	F	3 000	FT-50A-68	12,7	7,9	6,4	68	20
FT-193A-J	49,1	31,8	19,0	J	5 000	FT-50A-77	12,7	7,9	6,4	77	2 000
FT-193A-W	49,1	31,8	19,0	W	10 000	FT-50A-F	12,7	7,9	6,4	F	3 000
FT-23-43	5,8	3,0	1,5	43	850	FT-50A-H	12,7	7,9	6,4	H	15 000
FT-23-61	5,8	3,0	1,5	61	125	FT-50A-J	12,7	7,9	6,4	J	5 000
FT-23-63	5,8	3,0	1,5	63	40	FT-50A-W	12,7	7,9	6,4	W	10 000
FT-23-67	5,8	3,0	1,5	67	40	FT-50B-43	12,7	7,9	12,7	43	850
FT-23-68	5,8	3,0	1,5	68	20	FT-50B-61	12,7	7,9	12,7	61	125
FT-23-F	5,8	3,0	1,5	F	3 000	FT-50B-67	12,7	7,9	12,7	67	40
FT-23-H	5,8	3,0	1,5	H	15 000	FT-50B-75	12,7	7,9	12,7	75	5 000
FT-23-J	5,8	3,0	1,5	J	5 000	FT-50B-77	12,7	7,9	12,7	77	2 000
FT-23-W	5,8	3,0	1,5	W	10 000	FT-82-43	21,0	13,1	6,4	43	850
FT-240-43	61,0	35,6	12,7	43	850	FT-82-61	21,0	13,1	6,4	61	125
FT-240-61	61,0	35,6	12,7	61	125	FT-82-67	21,0	13,1	6,4	67	40

Tab. 3 (dokončení). Rozměry feritových toroidních jader Amidon

Označení	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	Materiál	Permeabilita μ_i	Označení	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	Materiál	Permeabilita μ_i
FT-82-68	21,0	13,1	6,4	68	20	FT-87-H	22,1	13,7	6,4	H	15 000
FT-82-75	21,0	13,1	6,4	75	5 000	FT-87-J	22,1	13,7	6,4	J	5 000
FT-82-77	21,0	13,1	6,4	77	2 000	FT-87-W	22,1	13,7	6,4	W	10 000
FT-87-43	22,1	13,7	6,4	43	850	FT-87A-F	22,1	13,7	12,7	F	3 000
FT-87-61	22,1	13,7	6,4	61	125	FT-87A-H	22,1	13,7	12,7	H	15 000
FT-87-77	22,1	13,7	6,4	77	2 000	FT-87A-J	22,1	13,7	12,7	J	5 000
FT-87-F	22,1	13,7	6,4	F	3 000	FT-87A-W	22,1	13,7	12,7	W	10 000

Tab. 4a. **Materiál 43, permeabilita 850** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-23-43	5,8	3	1,5	1,34	0,021	0,029	188
FT-37-43	9,5	4,7	3,2	2,15	0,076	0,163	420
FT-50-43	12,7	7,1	4,8	3,02	0,133	0,401	523
FT-50A-43	12,7	7,9	6,4	3,68	0,152	0,559	570
FT-50B-43	12,7	7,9	12,7	3,18	0,303	0,963	1 140
FT-82-43	21	13,1	6,4	5,26	0,246	1,290	557
FT-114-43	29	19	7,5	7,42	0,375	2,790	603
FT-140-43	35,6	22,9	12,7	9,02	0,806	7,280	952
FT-240-43	61	35,6	12,7	14,8	1,610	23,900	1 240

Tab. 4b. **Materiál 67, permeabilita 40** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-23-67	5,8	3	1,5	1,34	0,021	0,029	7,8
FT-37-67	9,5	4,7	3,2	2,15	0,076	0,163	19,7
FT-50-67	12,7	7,1	4,8	3,02	0,133	0,401	22,0
FT-50A-67	12,7	7,9	6,4	3,68	0,152	0,559	24,0
FT-50B-67	12,7	7,9	12,7	3,18	0,303	0,963	48,0
FT-82-67	21	13,1	6,4	5,26	0,246	1,290	22,4
FT-114-67	29	19	7,5	7,42	0,375	2,790	25,4
FT-140-67	35,6	22,9	12,7	9,02	0,806	7,280	45,
FT-240-67	61	35,6	12,7	14,8	1,610	23,900	50,0

Tab. 4d. **Materiál F, permeabilita 3 000** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-87A-F	22,1	13,7	12,7	5,42	0,315	1,710	3 700
FT-114-F	29	19	7,5	7,42	0,375	2,783	1 902
FT-150-F	38,1	19	6,4	8,3	0,591	4,905	2 640
FT-150A-F	38,1	19	12,7	8,3	1,110	9,213	5 020
FT-193-F	49	31,8	15,9	12,31	1,360	16,742	3 640
FT-193A-F	49	31,8	19	12,31	1,620	19,942	4 460

Tab. 4c. **Materiál 77, permeabilita 2 000** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-23-77	5,8	3	1,5	1,34	0,021	0,029	396
FT-37-77	9,5	4,7	3,2	2,15	0,076	0,163	884
FT-50-77	12,7	7,1	4,8	3,02	0,133	0,401	1 100
FT-50A-77	12,7	7,9	6,4	3,68	0,152	0,559	1 200
FT-50B-77	12,7	7,9	12,7	3,18	0,303	0,963	2 400
FT-82-77	21	13,1	6,4	5,26	0,246	1,294	1 170
FT-114-77	29	19	7,5	7,42	0,375	2,783	1 270
FT-114A-77	29	19	13,8	7,42	0,690	5,120	2 340
FT-140-77	35,6	22,9	12,7	9,02	0,806	7,270	2 250
FT-240-77	61	35,6	12,7	14,8	1,610	22,608	3 130

Tab. 4e. **Materiál J (75), permeabilita 5 000** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-23-J	5,8	3	1,5	1,34	0,021	0,029	990
FT-37-J	9,5	4,7	3,2	2,15	0,076	0,163	2 110
FT-50-J	12,7	7,1	4,8	3,02	0,133	0,401	2 750
FT-50A-J	12,7	7,9	6,4	3,68	0,152	0,559	2 990
FT-87-J	22,1	13,7	6,4	5,42	0,261	1,414	3 020
FT-87A-J	22,1	13,7	12,7	5,42	0,315	1,710	6 040
FT-114-J	29	19	7,5	7,42	0,375	2,783	3 170
FT-140A-J	35,6	22,9	15	9,02	0,806	7,270	6 736
FT-150-J	38,1	19	6,4	8,3	0,591	4,905	4 400
FT-150A-J	38,1	19	12,7	8,3	1,110	9,213	8 370
FT-193-J	49	31,8	15,9	12,31	1,360	16,742	6 065
FT-193A-J	49	31,8	19	12,31	1,620	19,942	7 435
FT-240-77	61	35,6	12,7	14,4	1,570	22,608	6 845
FT-337-J	85,7	35,6	12,7	pouze na objednávku			

Tab. 4g. **Materiál W, permeabilita 10 000** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-50A-W	12,7	7,9	6,4	3,68	0,152	0,559	5 936
FT-87-W	22,1	13,7	6,4	5,42	0,261	1,414	6 040
FT-150A-W	38,1	19	12,7	8,3	1,110	9,213	16 700
FT-193-W	49	33,8	15,9	12,31	1,360	16,742	11 800
FT-240-W	61	35,6	12,7	14,4	1,570	22,608	13 690

Tab. 4h. **Materiál H, permeabilita 15 000** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-23-H	5,8	3	1,5	1,34	0,021	0,029	2 940
FT-37-H	9,5	4,7	3,2	2,15	0,076	0,163	6 590

Tab. 4f. **Materiál K, permeabilita 290** (sortiment feritových toroidních jader Amidon podle materiálu)

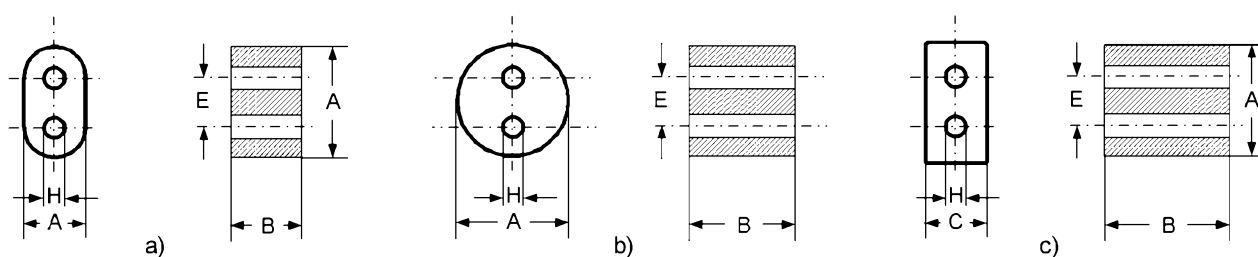
Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [mH/1000 z]
FT-115-K	31,8	19	9,5	8,05	0,617	4,970	2 615
FT-150A-K	38,1	19	12,7	8,3	1,110	9,213	1 508
FT-200-K	50,8	30,5	12,7	12,9	1,290	16,641	5 353
FT-240-K	61	35,6	12,7	14,4	1,570	22,608	4 912

Tab. 5. Vlastnosti a rozměry dvouotvorových feritových jader Amidon

Typ jádra	Materiál	Obrázek	Typická 1) impedance [Ω]		Hmotnost [g]	A [mm]	B 2) [mm]	C [mm]	E [mm]	H [mm]
			25 MHz	100 MHz						
BN-43-2402 2843002402	43	obr. 5a	100	-	1,5	7,0 ±0,25	6,2 ±0,25	4,2 ±0,25	2,9 ±0,1	1,7 ±0,2
BN-43-302 284300302	43	obr. 5a	-	130	2,6	13,3 ±0,6	10,3 ±0,3	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
BN-43-202 284300202	43	obr. 5a	-	180	3,7	13,3 ±0,6	14,35 ±0,5	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
BN-43-3312 2843010302	43	obr. 5c	-	400	18	19,45 ±0,4	25,4 ±0,7	9,5 ±0,25	9,9 ±0,25	4,75 ±0,2
2861001802	61	obr. 5b	-	119	0,8	6,35 ±0,25	6,15 ±0,25	-	2,75 ±0,2	1,1 ±0,3
2873001702	73	obr. 5b	200	-	1,6	6,35 ±0,25	12,0 ±0,35	-	2,75 ±0,2	1,1 ±0,3
2843001702	43	obr. 5b	-	256	1,6	6,35 ±0,25	12,0 ±0,35	-	2,75 ±0,2	1,1 ±0,3
2861001702	61	obr. 5b	-	230	1,6	6,35 ±0,25	12,0 ±0,35	-	2,75 ±0,2	1,1 ±0,3
2873001502	73	obr. 5a	50	-	1,7	13,3 ±0,6	6,6 ±0,25	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2843001502	43	obr. 5a	-	88	1,7	13,3 ±0,6	6,6 ±0,25	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2861001502	61	obr. 5a	-	69	1,7	13,3 ±0,6	6,6 ±0,25	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2873000302	73	obr. 5a	75	-	2,6	13,3 ±0,6	10,3 ±0,3	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2861000302	61	obr. 5a	-	106	2,6	13,3 ±0,6	10,3 ±0,3	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2873000102	73	obr. 5a	94	-	3,5	13,3 ±0,6	13,4 ±0,3	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2843000102	43	obr. 5a	-	175	3,5	13,3 ±0,6	13,4 ±0,3	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2861000102	61	obr. 5a	-	138	3,5	13,3 ±0,6	13,4 ±0,3	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2873000202	73	obr. 5a	106	-	3,7	13,3 ±0,6	14,35 ±0,5	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2861000202	61	obr. 5a	-	150	3,7	13,3 ±0,6	14,35 ±0,5	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2873006802	73	obr. 5a	180	-	7,0	13,3 ±0,6	27,0 ±0,75	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2843006802	43	obr. 5a	-	300	7,0	13,3 ±0,6	27,0 ±0,75	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2861006802	61	obr. 5a	-	280	7,0	13,3 ±0,6	27,0 ±0,75	7,5 ±0,35	5,7 ±0,25	3,8 ±0,25
2843010402	43	obr. 5c	-	200	7,5	19,45 ±0,4	12,7 ±0,5	9,5 ±0,25	9,9 ±0,25	4,75 ±0,2
2843009902	43	obr. 5c	-	500	48	28,7 ±0,6	28,7 ±0,7	14,25 ±0,3	14,0 ±0,3	6,35 ±0,15
2861010002	61	obr. 5c	-	600	45	30,2 ±0,6	28,7 ±0,7	15,0 ±0,4	14,0 ±0,3	6,8 ±0,2

1) Typická impedance jednoho závitu vodiče procházejícího oběma otvory jádra. Zaručená minimální impedance je o 20 % menší.

2) Rozměr B lze přizpůsobit požadavkům odběratele.



Obr. 5. Používané tvary dvouotvorových jader Amidon

Tab. 6. Feritové perly Amidon

Označení (xx je číslo materiálu)	Vnější průměr A [mm]	Průměr otvoru [mm]	Výška B [mm]	Tvar	Materiál					
					61 $\mu = 125$	64 $\mu = 250$	43 $\mu = 850$	73 $\mu = 2\,500$	75 $\mu = 5\,000$	77 $\mu = 2\,000$
FB-xx-101	3,5	1,3	3,25	1 otvor (obr. 6)	ano	ano	ano	ano	ano	ne
FB-xx-201	1,93	1,09	3,81	1 otvor (obr. 6)	ne	ano	ano	ano	ne	ne
FB-xx-301	3,5	1,3	6,0	1 otvor (obr. 6)	ano	ne	ano	ano	ne	ne
FB-xx-401	5,08	1,52	6,35	1 otvor (obr. 6)	ne	ne	ano	ne	ne	ne
FB-xx-801	4,52	2,39	4,54	1 otvor (obr. 6)	ne	ano	ano	ano	ne	ne
FB-xx-901	6,35	1,27	10,6	2 otvory (obr. 5b)	ne	ano	ne	ne	ne	ne
FB-xx-1501	3,5	1,6	3,25	1 otvor (obr. 6)	ne	ano	ne	ne	ne	ne
FB-xx-1801	5,08	1,52	11,1	1 otvor (obr. 6)	ne	ano	ano	ano	ne	ne
FB-xx-2401	9,65	5,0	4,83	1 otvor (obr. 6)	ne	ne	ano	ano	ne	ne
FB-xx-5111	6,0	0,96	10,0	6 otvorů (obr. 7)	ne	ano	ano	ne	ne	ne
FB-xx-6301	9,5	4,9	10,4	1 otvor (obr. 6)	ne	ne	ano	ne	ne	ano

Materiál K ($\mu = 290$) - používá se pro linkové transformátory v pásmu od 1 do 50 MHz. Bývá dostupný skladem, avšak pouze toroidní jádra v několika rozměrech.

Materiál W ($\mu = 10\,000$) - materiál s velkou permeabilitou, používaný pro tlumivky, které potlačují signály od 100 kHz do 1 MHz v EMI/RFI filtrech. Používá se také pro širokopásmové transformátory. Na skladě jsou toroidní jádra. Lze objednat i hrníčková, EP a RM jádra.

Materiál H ($\mu = 15\,000$) - materiál s velkou permeabilitou, používaný pro tlumivky, které potlačují signály o kmitočtu nižším než 200 kHz. Používá se rovněž pro širokopásmové transformátory. Vyrábějí se pouze toroidní jádra.

Magnetické vlastnosti feritových materiálů Amidon

Podrobnější údaje o magnetických vlastnostech feritových materiálů Amidon jsou shrnuty v tab. 2, která je umístěna na straně 9.

Rozměry feritových toroidních jader Amidon

Podrobnější údaje o rozměrech feritových toroidních jader Amidon jsou shrnuty v tab. 3, která je umístěna na stranách 10 a 11.

Sortiment feritových toroidních jader Amidon

Sortiment feritových toroidních jader Amidon rozčleněn podle druhu materiálů je uveden v tab. 4a až tab. 4h, které jsou umístěny na stranách 11 až 13.

Dvouotvorová feritová jádra Amidon

Dvouotvorová jádra jsou určena pro baluny a širokopásmové transformátory. Jádra se dodávají leštěná.

Používané tvary dvouotvorových jader a jejich vlastnosti jsou uvedeny na straně 13 na obr. 5 a v tab. 5.

Feritové perly

Feritové perly se navlékají na vývody vřezů tranzistorů, aby se zabránilo jejich parazitnímu kmitání. Perly též mohou sloužit jako tlumivky pro potlačení nežádoucích velmi vysokých kmitočtů na napájecích a signálních vodičích.

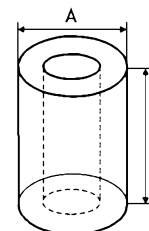
Rozměry a vlastnosti feritových perel Amidon jsou uvedeny na obr. 6 a obr. 7 a v tab. 6.

V tab. 6 je ve sloupcích s označením materiálu uvedena dostupnost perel zhotovených z příslušného materiálu. Pokud ve sloupci Materiál není uvedeno ano, perla neexistuje. Číslo materiálu se v označení perly dosadí za znaky xx (např. FB-61-101 apod.).

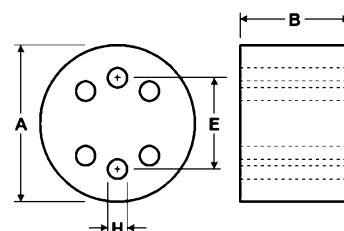
Firma Palomar vyrábí shodné perly, avšak typ materiálu uvádí až na konci označení.

Platí, že:

Amidon FB-43-101 je Palomar FB1-43
Amidon FB-xx-201 je Palomar FB-2-xx,
Amidon FB-xx-301 je Palomar FB-3-xx,
Amidon FB-xx-801 je Palomar FB-8-xx,
Amidon FB-xx-1801 je Palomar FB-18-xx,
Amidon FB-xx-2401 je Palomar FB-24-xx,
Amidon FB-xx-6301 je Palomar FB-63-xx,
Amidon FB-xx-1020 je Palomar FB-102-xx,
Amidon FB-xx-2401 je Palomar FB-24-xx.



Obr. 6.
Feritová perla
Amidon



Obr. 7. Feritová perla se šesti otvory

Feritová toroidní jádra firmy Palomar Engineers

Přehled sortimentu feritových toroidních jader firmy Palomar s uvedenými orientačními cenami v US dolarech je v tab. 7.

Charakteristiky jednotlivých materiálů jsou v tab. 8.

Feritová toroidní jádra dalších firem

Popisy konstrukcí v literatuře často uvádějí jádra, která jsou buď obtížně dostupná nebo se již nevyrábějí. K vyhledání náhrady mohou posloužit následující tab. 9 a tab. 10.

Feritová toroidní jádra Palomar s označením F jsou shodná s jádry Amidon s označením FT.

Železová prášková jádra Palomar i Amidon jsou označena shodně.

Tab. 7. Přehled sortimentu feritových toroidních jader firmy Palomar

Jádno	Vnější průměr		Vnitřní průměr		Tloušťka jádra		Orientační cena	Používané hmoty
	[In.]	[mm]	[inch]	[mm]	[inch]	[mm]		
F-240	2,40	60,96	1,40	35,56	0,50	12,7	\$ 13,65	43, 61, 77
F-140	1,40	35,56	0,90	22,86	0,50	12,7	\$ 6,25	43, 61, 77
F-114A	1,14	28,96	0,75	19,05	0,55	13,97	\$ 4,50	61, 77
F-114	1,14	28,96	0,75	19,05	0,30	7,62	\$ 3,50	43, 61, 67, 77
F-82	0,82	20,83	0,52	13,21	0,25	6,35	\$ 1,70	43, 61, 67, 68, 77
F-50B	0,50	12,7	0,30	7,62	0,50	12,7	\$ 1,60	43, 61, 67, 77
F-50A	0,50	12,7	0,30	7,62	0,25	6,35	\$ 1,45	43, 61, 67, 75, 77
F-50	0,50	12,7	0,30	7,62	0,20	5,08	\$ 1,10	43, 61, 67, 68, 75, 77
F-37	0,37	9,4	0,20	5,08	0,12	3,05	\$ 0,85	43, 61, 67, 68, 75, 77
F-23	0,23	5,84	0,12	3,05	0,06	1,52	\$ 0,75	43, 61, 67, 68, 77

Tab. 8. Použití jednotlivých materiálů a využitelný kmitočtový rozsah

Hmota	Permeabilita μ_i	Odrušovací tlumivky	Cívky	Transformátory
75	5 000		1 až 30 kHz	1 až 300 kHz
77	1 800	0,5 až 100 MHz	1 až 100 kHz	1 kHz až 2 MHz
43	850	1 až 1 000 MHz	0,01 až 1 MHz	0,01 až 10 MHz
61	125	100 až 2 000 MHz	0,2 až 10 MHz	0,2 až 100 MHz
67	40		10 až 80 MHz	10 až 800 MHz
68	20		80 až 180 MHz	80 až 1800 MHz

Tab. 9. Označení feritových toroidních jader podle rozměrů

Vnější průměr		Katalogové číslo Palomar	Katalogové číslo Indiana General	Starší katalogové číslo Indiana General
2,4"	61 mm	F-240	F568-1	CF-123
1,14"	29 mm	F-114	F626-12	CF-114
0,82"	21 mm	F-82	F624-19	CF-111
0,50"	12,7 mm	F-50A	F627-8	CF-108
0,37"	9,5 mm	F-37	F625-9	CF-102
0,23"	6 mm	F-23	F303-1	CF-101

Tab. 10. Označení feritových materiálů různými výrobci

Permeabilita μ	Palomar	Indiana General	Stackpole	Ferroxcube
125	61	Q1	C/11	4C4
40	63	Q2	C/12	-
40	67	Q2	C/12	-
20	68	Q3	C/14	-
850	43	H	C/7D	SD3
5 000	75	O6	-	3E2A
1 800	77	TC9	C/24B	3B7/3B9
1 800	73	-	C/24	3C8

Pozn.: Hmota 67 nahrazuje starší hmotu 63. Hmota 77 nahrazuje starší hmotu 73. Vždy je nutné uvádět rozměr jádra i hmotu, např. F-50-61

Feritové materiály PRAMET Šumperk

Magnetické vlastnosti feritových materiálů řady H a N firmy PRAMET Šumperk jsou uvedeny v tab. 11 a tab. 12 na stranách 16 a 17.

Železová prášková toroidní jádra Amidon

Tato jádra jsou tvořena směsí přesně definovaných železových částic, které jsou vzájemně od sebe izolované a propojené pojivem.

Železový prášek a pojivo jsou smíchány, pod velkým tlakem stlačeny a jádro je vypáleno za vysoké teploty.

Charakteristiky jádra jsou určeny jeho velikostí a hustotou použitého materiálu a vlastnostmi železového prášku. Železová prášková jádra dovolují velké sycení, mají výbornou teplotní stabilitu a vysoké Q, materiál má však malou permeabilitu (nejvýše $\mu_i = 110$).

Výborná teplotní stabilita předurčuje tato jádra ke konstrukci úzkopásmových filtrů, laděných transformátorů, oscilátorů a přizpůsobovacích obvodů.

Železová prášková jádra se vyrábějí v mnoha provedeních a tvarech - toroidní a E-jádra, hrníčková jádra, trubičky atd. a bývají zhotovena z mnoha různých

Tab. 11. Magnetické vlastnosti feritových materiálů řady H firmy PRAMET Šumperk

Materiál	H6	H7	H10	H11	H12	H7	H18
Barevné označení	černá	sv. zelená	-	bílá	sv. modrá	1)	fialová
Počáteční permeabilita μ	600 ± 20 %	700 ± 20 %	1 300 ± 20 %	1 100 ± 20 %	1 260 ± 20 %	2 200 ± 20 %	1 800 ± 20 %
Magnetická indukce B [mT] při intenzitě magnetického pole H [A·m ⁻¹]	440 1 000	440 3 000	360 1 000	360 3 000	420 1 000	390 3 000	360 1 000
Koercitivní síla H_e [A·m ⁻¹]	70	70	30	30	30	20	20
Měrný ztrátový činitel $\tan \delta/\mu_i$ [10 ⁻⁶] při kmitočtu f [kHz]	< 30 1000	< 45 1000	- -	< 20 100	< 10 100	< 3,5 100	< 0,8 100
Hysterezní konstanta nB [10 ⁻³ ·T ⁻¹]	< 1,8	-	-	-	< 1,6	< 0,4	-
Curieova teplota T [°C]	> 200	> 200	> 120	> 160	> 160	> 130	> 100
Měrný teplotní činitel ρ [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	0,5 až 3,5	-	-	< 2	0 až 3	0,4 až 1,0	< 2,5
Měrný odpor ρ [Ω·m]	1	0,5	0,5	0,5	1	3	1
Činitel desakomodace DF [10 ⁻⁶]	-	-	-	-	≤ 5	≤ 3	-
Měrná hmotnost γ [kg·m ⁻³]	4 400	4 400	4 800	4 800	4 800	4 700	4 700

Materiál	H20	H21	H22	H24	H40	H60	H23
Barevné označení	šedá	hnědá	oranžová	1)	okr tmavý	1)	sv. krémová
Počáteční permeabilita μ	2 000 ± 20 %	1 900 ± 20 %	2 200 ± 20 %	2 100 ± 20 %	4 300 ± 20 %	6 000 ± 20 %	2 300 ± 20 %
Magnetická indukce B [mT] při intenzitě magnetického pole H [A·m ⁻¹]	400 1 000	505 3 000	360 1 000	505 3 000	380 1 000	380 1 000	410 1 000
Koercitivní síla H_e [A·m ⁻¹]	20	20	20	18	13	6	20
Měrný ztrátový činitel $\tan \delta/\mu_i$ [10 ⁻⁶] při kmitočtu f [kHz]	< 22 100	- -	< 8 20	- -	- -	- -	< 0,8 100
Hysterezní konstanta nB [10 ⁻³ ·T ⁻¹]	-	-	< 3,7	< 1,4	< 1,1	< 1,1	< 0,9
Curieova teplota T [°C]	> 140	> 200	> 100	> 200	> 130	> 130	> 150
Měrný teplotní činitel ρ [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	< 4,5	-	< 2	-	< 1	-	0,4 až 1,5
Měrný odpor ρ [Ω·m]	0,5	3	0,5	4	0,5	0,2	1
Činitel desakomodace DF [10 ⁻⁶]	-	-	-	-	-	-	≤ 5
Měrná hmotnost γ [kg·m ⁻³]	4 800	4 800	4 800	4 800	4 800	4 900	4 800

1) Materiál se zatím sériově nevyrábí, jedná se o předběžná data. Výrobky z materiálu H60 jsou již omezeně v prodeji

ných materiálů. K základním materiálům patří karbonylové železo a železo s redukovaným vodíkem.

Jádra z karbonylového železa vynikají svojí teplotní stabilitou a konstantními parametry při různých hodnotách magnetické indukce. Permeabilita μ_i tohoto materiálu se pohybuje v rozmezí 3 až 35 a rovněž lze dosáhnout velmi vysokého činitele jakosti Q v rozsahu 50 kHz až 200 MHz.

Jádra z tohoto materiálu jsou vhodná především pro vf aplikace, kde je kladen důraz na vysoké Q a stabilitu. Často se na ně vinou cívky širokopásmových obvodů, pracujících s velkým výkonem.

Jádra z železa s redukovaným vodíkem mají větší permeabilitu v rozmezí 35 až 110. V rezonančních obvodech však vykazují poněkud nižší Q . Hlavními oblastmi použití těchto materiálů jsou EMI filtry a tlumivky pro nízké kmitočty. Často se také používají ve filtrech spínaných zdrojů.

Toroidní jádra jsou obecně považována za jeden z neefektivnějších tvarů. Významný je samostínící účinek toroidního jádra, neboť magnetické siločáry jsou prakticky soustředěny uvnitř jádra a jejich rozptyl směrem ven je minimální. Siločáry mají jednotný průběh po celé délce magnetické dráhy a vnější magnetická pole mohou cívku ovlivnit

jen minimálně, proto je málokdy nutné toroidní cívku stínit.

Charakteristiky železových práškových materiálů Amidon

Materiál 0 ($\mu_i = 1$, barva světle hnědá/bez barvy). Používají se pro kmitočty vyšší než 100 MHz. Vyrábějí se pouze toroidní jádra. Z povahy materiálu vyplývá poměrně značný rozptyl součinitele počtu závitů A_L . Závislost indukčnosti na počtu závitů se mění a je velmi závislá na technice vinutí.

Materiál 1 ($\mu_i = 20$, barva modrá/bez barvy). Materiál z karbonylového

Tab. 12. Magnetické vlastnosti feritových materiálů řady N firmy PRAMET Šumperk (pozn. 1) viz tab. 11)

Materiál	N01P	N01	N02	N05	N08P	N1	N2	N3	N7
Barevné označení	růžová	červená	sv. zelená	tm. modrá	-	žlutá	tm. zelená	-	1)
Počáteční permeabilita μ	11 $\pm 20\%$	10 $\pm 20\%$	20 $\pm 20\%$	50 $\pm 20\%$	80 $\pm 20\%$	120 $\pm 20\%$	200 $\pm 20\%$	250 $\pm 20\%$	700 $\pm 20\%$
Magnetická indukce B [mT] při intenzitě magnetického pole H [A·m ⁻¹]	-	200	270	300	-	350	400	400	250
Koercitivní síla H_e [A·m ⁻¹]	1 500 2)	1 500	1 200	460	120 2)	250	120	120	50
Měrný ztrátový činitel $\tan \delta/\mu_i$ [10 ⁻⁶] při kmitočtu f [MHz]	< 1250 200	< 800 100	< 600 40	< 200 20	< 150 12	< 100 10	< 50 1	< 50 1	< 100 1
Hysterezní konstanta nB [10 ⁻³ ·T ⁻¹]	-	-	-	-	< 36	-	-	-	-
Curieova teplota T [°C]	> 500	> 550	> 450	> 350	> 350	> 260	> 200	> 200	> 125
Měrný teplotní činitel ρ [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	0 až 80	< 50	3 až 14	0 až 50	1 až 6	< 10	< 10	0 až 10	-
Měrný odpor ρ [kΩ·m]	10	100	1	0,1	10	0,1	0,1	1	100
Měrná hmotnost γ [kg·m ⁻³]	4 400	4 400	4 300	4 600	4 300	4 700	4 700	4 700	4 700

železa C, velmi podobný materiálu 3 (šedá), od kterého se liší nejen menší permeabilitou, ale zejména větším objemovým odporem a lepší stabilitou. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

Materiál 2 ($\mu_i = 10$, barva červená/bez barvy). Materiál z karbonylového železa E s velkým objemovým odporem. Má velmi vysoké Q v rozsahu od 2 do 30 MHz. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

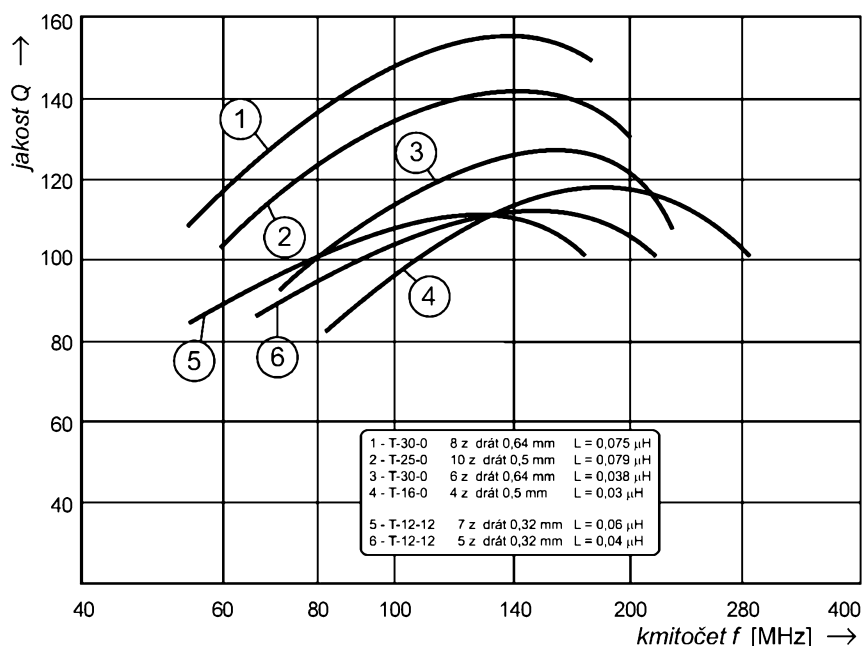
Materiál 3 ($\mu_i = 35$, barva šedá/bez barvy). Materiál z karbonylového železa HP má vynikající stabilitu a vysoké Q v rozsahu 50 až 500 kHz. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

Materiál 6 ($\mu_i = 8$, barva žlutá/bez barvy). Karbonylové železo SF vykazuje vysoké Q a velmi dobrou teplotní stabilitu v rozsahu 20 až 50 MHz. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

Materiál 7 ($\mu_i = 9$, barva bílá/bez barvy). Karbonylové železo TH, je velmi podobné materiálům 2 (červená/bez barvy) a 6 (žlutá/bez barvy), avšak má lepší teplotní stabilitu než oba tyto materiály. Je velmi vhodné pro rozsah 5 až 35 MHz. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

Materiál 10 ($\mu_i = 6$, barva černá/bez barvy). Materiál z karbonylového železa W má vysoké Q a velmi dobrou teplotní stabilitu v rozsahu 40 až 100 MHz. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

Materiál 12 ($\mu_i = 4$, barva zelená/bílá). Materiál ze syntetického oxidu železa má vysoké Q a průměrnou stabilitu v rozsahu 50 až 200 MHz. Je-li kladen důraz na vysoké Q , bývá tomuto materiálu dáována přednost. Je-li však požadována především stabilita, bývá vhodnější materiál 17 (modrá/žlutá).



Obr. 8. Závislost činitele jakosti Q na kmitočtu u různých cívek na toroidních jádrech z železového práškového materiálu 0 ($\mu_i = 1$) a 12 ($\mu_i = 4$)

Materiál 12 je dostupný ve formě toroidních jader až do rozměru T-94, hrníčková jádra se však nevyrábějí.

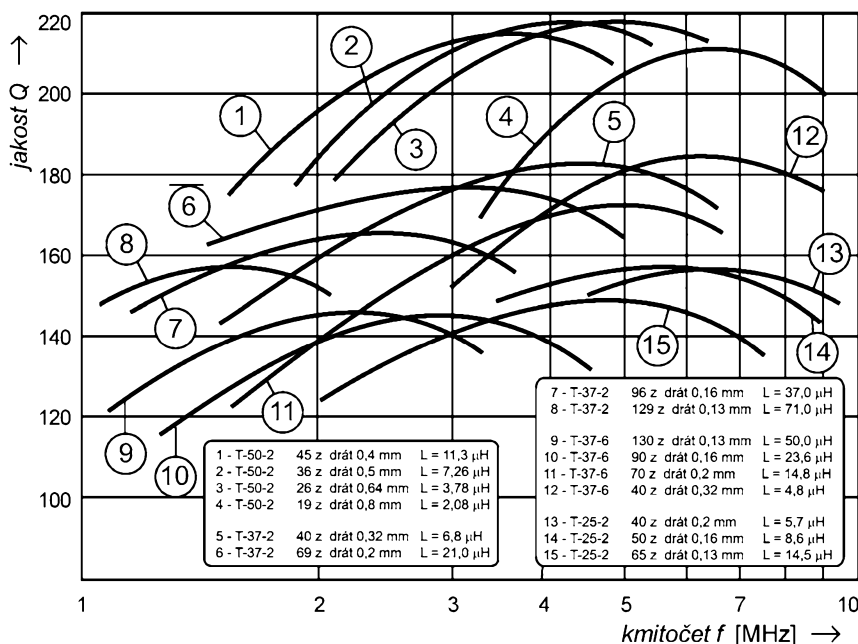
Materiál 15 ($\mu_i = 25$, barva červená/bílá). Karbonylové železo GS6, vyznačuje se vynikající stabilitou a vysokým Q v pásmu rozhlasových kmitočtů. Vyrábějí se pouze toroidní jádra.

Materiál 17 ($\mu_i = 4$, barva modrá/žlutá). Nový materiál z karbonylového železa, který je velmi podobný materiálu 12, avšak má lepší teplotní stabilitu. Ve srovnání s materiálem 12 má však v rozsahu 50 až 100 MHz nižší Q o 10 %, nad 100 MHz má Q nižší o 20 %. Vyrábějí se toroidní a hrníčková jádra.

Materiál 26 ($\mu_i = 75$, barva žlutá/bílá). Materiál z železa s redukováným vodíkem. Používá se většinou pro EMI filtry, síťové filtry a stejnosměrné tlumivky. Materiál 26 je levnější než materiál 52 a používá se v levnějších, méně náročných aplikacích.

Materiál 52 ($\mu_i = 75$, barva zelená/modrá). Tento materiál je podobný materiálu 26, má však menší ztráty a lepší vř vlastnosti. Je přibližně o 20 % dražší než materiál 26. Je velmi vhodný pro vř tlumivky.

Materiál 18 ($\mu_i = 55$, barva zelená/červená). Materiál z železa s redukováným vodíkem, vhodný k použití v mís-



Obr. 9 (nahore). Závislost činitele jakosti Q na kmitočtu u různých cívek na toroidních jádrech z železového práškového materiálu 2 ($\mu_i = 10$) a 6 ($\mu_i = 8$)

Obr. 10 (dole). Závislost činitele jakosti Q na kmitočtu u různých cívek na toroidních jádrech z železového práškového materiálu 6 ($\mu_i = 8$)

tech s vysokou teplotou. Má lineární charakteristiky a poměrně dobré vln vlastnosti. Je vhodný ke konstrukci tlumívek pro zdroje UPS.

Materiál 8 ($\mu_i = 35$, barva žlutá /červená). Vysokofrekvenční materiál. Má nejnižší ztráty, patří však k nejdražším. Je vhodný ke konstrukci vln filtrů, tlumívek atd.

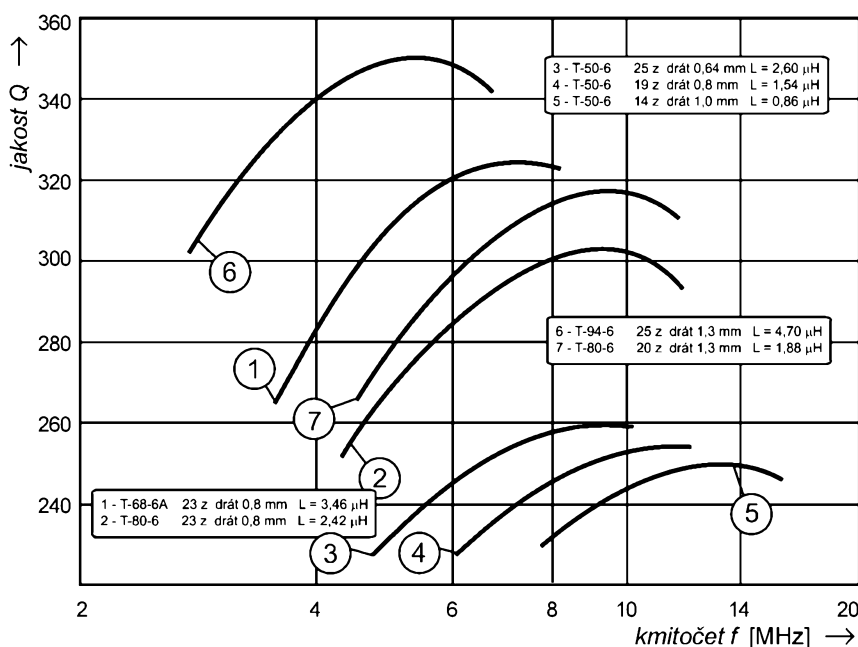
Materiál 45 ($\mu_i = 100$, barva černá). Materiál s největší permeabilitou, který je vhodnou alternativou k materiálu 52. Vykazuje poměrně velké ztráty v jádře. Je vhodný pro aplikace na nižších kmitočtech.

Uvedené materiály patří k nejběžnějším. Můžete se setkat i s jinými materiály, např. materiály značenými 00 až 09, které však nejsou shodné s materiály 0 až 9, tj. např. materiál 06 není shodný s materiálem 6. Podrobnější údaje ani barevné značení však nebyly k dispozici, na tuto zmínku jsem narazil pouze v propagačních materiálech firmy Amidon, avšak nikoli v materiálech distributorů.

Existují i materiály 11, 16, 19, 23, 27, 28 a další, ani u nich nebyly k dispozici potřebné údaje.

Údaje o toroidních jádrech z nejpoužívanějších materiálů najdete v tab. 13a až tab. 13k.

Grafy závislosti činitele jakosti Q na kmitočtu pro různé provedené cívky na železových toroidních jádrech Amidon jsou na obr. 8 až obr. 10.



Tab. 13a. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 0, permeabilita $\mu_i = 1$, kmit. rozsah 100 až 300 MHz, barva světle hnědá/bez barvy

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μ H/100 z]
T-12-0	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	3,0
T-16-0	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	3,0
T-20-0	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	3,5
T-25-0	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	4,5
T-30-0	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	6,0
T-37-0	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	4,9
T-44-0	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	6,5
T-50-0	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	6,4
T-68-0	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	7,5
T-80-0	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	8,5
T-94-0	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	10,6
T-106-0	26,9	14,5	11,1	6,50	0,690	4,485	18,0
T-130-0	33,0	19,8	11,1	8,29	0,730	6,052	15,0

Tab. 13b. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 1, permeabilita $\mu_i = 20$, kmitočtový rozsah **0,5 až 5 MHz**, barva **modrá/bez barvy**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-1	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	48
T-16-1	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	44
T-20-1	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	52
T-25-1	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	70
T-30-1	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	85
T-37-1	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	80
T-44-1	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	105
T-50-1	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	100
T-68-1	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	115
T-80-1	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	115
T-94-1	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	160
T-106-1	26,9	14,5	11,1	6,50	0,690	4,485	325
T-130-1	33,0	19,8	11,1	8,29	0,730	6,052	200
T-157-1	39,9	24,1	14,5	10,05	1,140	11,457	320
T-184-1	46,7	31,8	18,0	11,12	2,040	22,685	500
T-200-1	50,8	31,8	14,0	12,97	1,330	17,250	250

Tab. 13c. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 2, permeabilita $\mu_i = 10$, kmitočtový rozsah **2 až 30 MHz**, barva **červená/bez barvy**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-2	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	20
T-16-2	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	22
T-20-2	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	25
T-25-2	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	34
T-30-2	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	43
T-37-2	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	40
T-44-2	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	52
T-50-2	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	49
T-68-2	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	57
T-80-2	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	55
T-94-2	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	84
T-106-2	26,9	14,5	11,1	6,50	0,690	4,485	135
T-130-2	33,0	19,8	11,1	8,29	0,730	6,052	110
T-157-2	39,9	24,1	14,5	10,05	1,140	11,457	140
T-184-2	46,7	31,8	18,0	11,12	2,040	22,685	240
T-200-2	50,8	31,8	14,0	12,97	1,330	17,250	120
T-200A-2	50,8	31,8	25,4	12,97	2,240	29,050	218
T-225-2	57,2	35,7	14,0	14,56	1,508	21,956	120
T-225A-2	57,2	35,7	25,4	14,56	2,730	39,749	215
T-300-2	77,4	48,9	12,7	19,83	1,810	35,892	114
T-300A-2	77,4	48,9	25,4	19,83	3,580	70,991	228
T-400-2	101,6	57,2	16,5	24,93	3,660	91,244	180
T-400A-2	101,6	57,2	33,0	24,93	7,432	185,250	360
T-520-2	132,1	78,2	20,3	33,16	5,460	181,000	207

Tab. 13d. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 3, permeabilita $\mu_i = 35$, kmitočtový rozsah **0,05 až 0,5 MHz**, barva **šedá/bez barvy**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-3	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	60
T-16-3	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	61
T-20-3	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	76
T-25-3	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	100
T-30-3	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	140
T-37-3	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	120
T-44-3	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	180
T-50-3	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	175
T-68-3	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	195
T-80-3	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	180
T-94-3	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	248
T-106-3	26,9	14,5	11,1	6,50	0,690	4,485	450
T-130-3	33,0	19,8	11,1	8,29	0,730	6,052	350
T-157-3	39,9	24,1	14,5	10,05	1,140	11,457	420
T-184-3	46,7	31,8	18,0	11,12	2,040	22,685	720
T-200-3	50,8	31,8	14,0	12,97	1,330	17,250	425
T-200A-3	50,8	31,8	25,4	12,97	2,240	29,050	460
T-225-3	57,2	35,7	14,0	14,56	1,508	21,956	425

Tab. 13e. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 6, permeabilita $\mu_i = 8$, kmitočtový rozsah **10 až 50 MHz**, barva **žlutá/bez barvy**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-6	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	17
T-16-6	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	19
T-20-6	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	22
T-25-6	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	27
T-30-6	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	36
T-37-6	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	30
T-44-6	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	42
T-50-6	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	46
T-68-6	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	47
T-80-6	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	45
T-94-6	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	70
T-106-6	26,9	14,5	11,1	6,50	0,690	4,485	116
T-130-6	33,0	19,8	11,1	8,29	0,730	6,052	96
T-157-6	39,9	24,1	14,5	10,05	1,140	11,457	115
T-184-6	46,7	31,8	18,0	11,12	2,040	22,685	195
T-200-6	50,8	31,8	14,0	12,97	1,330	17,250	100
T-200A-6	50,8	31,8	25,4	12,97	2,240	29,050	180
T-225-6	57,2	35,7	14,0	14,56	1,508	21,956	100

Tab. 13g. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 10, permeabilita $\mu_i = 6$, kmit. rozsah **30 až 100 MHz**, barva **černá/bez barvy**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-10	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	12
T-16-10	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	13
T-20-10	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	16
T-25-10	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	19
T-30-10	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	25
T-37-10	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	25
T-44-10	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	33
T-50-10	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	31
T-68-10	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	32
T-80-10	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	32
T-94-10	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	58

Tab. 13h. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 12, permeabilita $\mu_i = 4$, kmit. rozsah **50 až 200 MHz**, barva **zelená/bílá**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-12	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	7,5
T-16-12	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	8,0
T-20-12	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	10,0
T-25-12	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	12,0
T-30-12	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	16,0
T-37-12	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	15,0
T-44-12	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	18,5
T-50-12	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	18,0
T-68-12	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	21,0
T-80-12	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	22,0
T-94-12	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	32,0

Tab. 13k. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 17, permeabilita $\mu_i = 4$, kmit. rozsah **20 až 200 MHz**, barva **modrá/žlutá**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-17	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	7,5
T-16-17	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	8,0
T-20-17	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	10,0
T-25-17	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	12,0
T-30-17	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	16,0
T-37-17	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	15,0
T-44-17	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	18,5
T-50-17	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	18,0
T-68-17	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	21,0
T-80-17	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	22,0
T-94-17	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	32,0

Tab. 13f. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 7, permeabilita $\mu_i = 9$, kmit. rozsah **3 až 35 MHz**, barva **bílá/bez barvy**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-25-7	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	29
T-37-7	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	32
T-50-7	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	43
T-68-7	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	52

Tab. 13j. Železová prášková toroidní jádra Amidon

Materiál 15, permeabilita $\mu_i = 25$, kmitočtový rozsah **0,1 až 2 MHz**, barva **červená/bílá**

Označení jádra	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Výška jádra [mm]	l_e [cm]	A_e [cm ²]	V_e [cm ³]	A_L [μH/100 z]
T-12-15	3,2	1,6	1,3	0,74	0,010	0,007	50
T-16-15	4,1	2,0	1,5	0,95	0,016	0,015	55
T-20-15	5,1	2,2	1,8	1,15	0,025	0,029	65
T-25-15	6,5	3,0	2,4	1,50	0,042	0,063	85
T-30-15	7,8	3,8	3,3	1,83	0,065	0,119	93
T-37-15	9,5	5,2	3,3	2,32	0,070	0,162	90
T-44-15	11,2	5,8	4,0	2,67	0,107	0,286	160
T-50-15	12,7	7,7	4,8	3,03	0,121	0,367	135
T-68-15	17,5	9,4	4,8	4,24	0,196	0,831	180
T-80-15	20,2	12,6	6,4	5,15	0,242	1,246	170
T-94-15	23,9	14,2	7,9	6,00	0,385	2,310	200
T-106-15	26,9	14,5	11,1	6,50	0,690	4,485	345
T-130-15	33,0	19,8	11,1	8,29	0,730	6,052	250
T-157-15	39,9	24,1	14,5	10,05	1,140	11,457	360

Údaje o železových práškových toroidních jádrech Micrometals jsou v tab. 14.

Tab. 14. Železová prášková toroidní jádra Micrometals

Označení jádra	A_L [nH/N ²]	Vnější průměr [inch, mm]	Vnitřní průměr [inch, mm]	Výška jádra [inch, mm]	l [cm]	A [cm ²]	V [cm ³]
T5-6 T5-10 T5-17 T5-0	1,0 0,7 0,42 0,16	0,050/1,27	0,025/0,64	0,025/0,64	0,30	0,0019	0,0006
T7-1 T7-2 T7-6 T7-10 T7-12 T7-17 T7-0	3,5 1,5 1,3 0,9 0,6 0,6 0,3	0,070/1,78	0,035/0,89	0,030/0,76	0,42	0,0035	0,0015
T10-1 T10-2 T10-6 T10-10 T10-12 T10-17 T10-0	3,2 1,35 1,15 0,8 0,5 0,5 0,24	0,097/2,46	0,044/1,12	0,030/0,76	0,56	0,0045	0,0025
T12-1 T12-2 T12-3	4,8 2,0 6,0	0,125/3,18	0,062/1,57	0,050/1,27	0,75	0,010	0,0077

Tab. 14 (1. pokračování). Železová prášková toroidní jádra Micrometals

Označení jádra	A_L [nH/N ²]	Vnější průměr [inch, mm]	Vnitřní průměr [inch, mm]	Výška jádra [inch, mm]	l [cm]	A [cm ²]	V [cm ³]
T12-6 T12-7 T12-10 T12-12 T12-15 T12-17 T12-0	1,7 1,8 1,2 0,75 5,0 0,75 0,24	0,125/3,18	0,05/1,27	0,025/0,64	0,75	0,010	0,0077
T12-2B T12-6B T12-10B	1,85 1,35 1,0	0,125/3,18	0,062/1,57	0,042/1,07	0,75	0,008	0,0091
T16-1 T16-2 T16-3 T16-6 T16-10 T16-12 T19-15 T16-17 T16-0	4,4 2,2 6,1 1,9 1,3 0,8 5,5 0,8 0,3	0,160/4,06	0,078/1,98	0,060/1,52	0,93	0,015	0,0141
T18-6	0,9	0,185/4,70	0,102/2,59	0,040/1,02	1,14	0,010	0,0114
T20-1 T20-2 T20-3 T20-6 T20-7 T20-10 T20-12 T20-15 T20-17 T20-0	5,2 2,5 7,6 2,2 2,4 1,6 1,0 6,5 1,0 0,35	0,200/5,08	0,088/2,24	0,070/1,78	1,15	0,023	0,026
T22-2 T22-6 T22-10	5,5 4,5 3,2	0,223/5,66	0,097/2,46	0,143/3,63	1,28	0,052	0,067
T25-1 T25-2 T25-3 T25-6 T25-7 T25-10 T25-12 T25-15 T25-17 T25-0	7,0 3,4 10,0 2,7 2,9 1,9 1,5 8,5 1,2 0,45	0,255/6,48	0,120/3,05	0,096/2,44	1,50	0,037	0,055
T27-2 T27-6 T27-10 T25-12 T25-17 T25-0	3,3 2,7 2,2 1,5 1,3 0,45	0,280/7,11	0,151/3,84	0,128/3,25	1,71	0,047	0,080
T30-1 T30-2 T30-3 T30-6 T30-7 T30-10 T30-12 T30-15 T30-17 T30-0	8,5 4,3 14,0 3,6 3,7 2,5 1,6 9,3 1,6 0,6	0,307/7,80	0,151/3,84	0,128/3,25	1,84	0,061	0,110
T37-1 T37-2 T37-3 T37-6 T37-7	8,0 4,0 12,0 3,0 3,2	0,375/9,53	0,205/5,21	0,128/3,25	2,31	0,064	0,147

Tab. 14 (2. pokračování). Železová prášková toroidní jádra Micrometals

Označení jádra	A_L [nH/N ²]	Vnější průměr [inch, mm]	Vnitřní průměr [inch, mm]	Výška jádra [inch, mm]	l [cm]	A [cm ²]	V [cm ³]
T37-10 T37-12 T37-15 T37-17 T37-0	2,5 1,5 9,0 1,5 0,49	0,375/9,53	0,205/5,21	0,128/3,25	2,31	0,064	0,147
T44-1 T44-2 T44-3 T44-6 T44-7 T44-10 T44-12 T44-15 T44-17 T44-0	10,5 5,2 18,0 4,2 4,6 3,3 1,85 16,0 1,85 0,65	0,440/11,2	0,229/5,82	0,159/4,04	2,68	0,099	0,266
T44-2A	3,6	0,440/11,2	0,229/5,82	0,128/3,25	2,68	0,080	0,215
T50-1 T50-2 T50-3 T50-6 T50-7 T50-10 T50-12 T50-15 T50-17 T50-0	10,0 4,9 17,5 4,0 4,3 3,1 1,8 13,5 1,8 0,64	0,500/12,7	0,303/7,70	0,190/4,83	3,19	0,112	0,358
T51-2B T51-6B	13,8 10,2	0,500/5,08	0,200/5,08	0,312/7,92	2,79	0,282	0,786
T60-2 T60-6	6,5 5,5	0,600/5,08	0,336/8,53	0,234/5,94	3,74	0,187	0,699
T68-1 T68-2 T68-3 T68-6 T68-7 T68-10 T68-12 T68-15 T68-17 T68-0	11,5 5,7 19,5 4,7 5,2 3,2 2,1 18,0 2,1 0,75	0,690/17,5	0,370/9,40	0,190/4,83	4,23	0,179	0,759
T68-2A T68-3A T68-6A T68-7A	7,0 26,0 6,2 7,3	0,690/17,5	0,370/9,40	0,250/6,35	4,23	0,242	1,03
T72-2 T72-3 T72-7	12,8 36,0 9,5	0,720/18,3	0,280/7,11	0,260/6,60	4,01	0,349	1,40
T80-1 T80-2 T80-3 T80-6 T80-10 T80-12 T80-15 T80-17 T80-0	11,5 5,5 18,0 4,5 3,2 2,2 17,0 2,2 0,85	0,795/20,2	0,495/12,6	0,250/6,35	5,14	0,231	1,19
T80-7B	8,4	0,795/20,2	0,495/12,6	0,375/9,53	5,14	0,346	1,78
T94-1 T94-2 T94-3 T94-6 T94-10 T94-15	16,0 8,4 24,8 7,0 5,8 20,0	0,942/23,9	0,560/14,2	0,312/7,92	5,97	0,362	2,16

Tab. 14 (3. pokračování). Železová prášková toroidní jádra Micrometals

Označení jádra	A_L [nH/N ²]	Vnější průměr [inch, mm]	Vnitřní průměr [inch, mm]	Výška jádra [inch, mm]	l [cm]	A [cm ²]	V [cm ³]
T94-17 T94-0	2,9 1,06	0,942/23,9	0,560/14,2	0,312/7,92	5,97	0,362	2,16
T106-1 T106-2 T106-3 T106-6 T106-7 T106-15 T106-17 T106-0	32,5 13,5 45,0 11,6 13,3 34,5 5,1 1,9	1,06/26,9	0,570/14,5	0,437/11,1	6,49	0,659	4,28
T130-1 T130-2 T130-3 T130-6 T130-7 T130-15 T130-17 T130-0	20,0 11,0 35,0 9,6 10,3 25,0 4,0 1,5	1,300/33,0	0,780/19,8	0,437/11,1	8,28	0,698	5,78
T157-1 T157-2 T157-3 T157-6 T157-17	32,0 14,0 42,0 11,5 5,3	1,570/39,9	0,950/24,1	0,570/14,5	10,1	1,06	10,7
T175-2 T175-6	15,0 12,5	1,750/44,5	1,070/27,2	0,650/16,5	11,2	1,34	15,0
T184-1 T184-2 T184-3 T184-6 T184-17	50,0 24,0 72,0 19,5 8,7	1,840/46,7	0,950/24,1	0,710/18,0	11,2	1,88	21,0
T200-1 T200-2 T200-3 T200-6 T200-7	25,0 12,0 42,5 10,0 10,5	2,000/50,8	1,250/31,8	0,550/14,0	13,0	1,27	16,4
T200-2B	21,8	2,000/50,8	1,250/31,8	1,000/25,4	13,0	2,32	30,0
T225-2 T225-3 T225-6	12,0 42,5 10,0	2,250/57,2	1,400/35,6	0,550/14,0	14,6	1,42	20,7
T225-2B	21,5	2,250/57,2	1,400/35,6	1,000/25,4	14,6	2,59	37,8
T300-2	11,4	3,040/77,2	1,930/49,0	0,500/12,7	19,8	1,68	33,4
T300-2D	22,8	3,040/77,2	1,930/49,0	1,000/25,4	19,8	3,78	67,0
T400-2	18,0	4,000/102	2,250/57,2	0,650/16,5	25,0	3,46	86,4
T400-2D	36,0	4,000/102	2,250/57,2	1,300/33,0	25,0	6,85	171
T520-2	20,0	5,200/132	3,808/78,2	0,800/20,3	33,1	5,24	173

Symetrizační články

Je-li přenášena energie mezi zdrojem, který je nesymetrický vůči zemi, a zátěží, která je vůči zemi symetrická, bude systém negativně ovlivňován asymetrickými (soufázovými) proudy.

Nejčastěji se to projevuje u antén, proto si na příkladu napájení antény ukážeme, jak tento problém elegantně řešit pomocí symetrizačního členu, využívajícího feromagnetický materiál.

Symetrizační členy jsou zvláštním případem vf transformátorů. Jejich úko-

lem je přenášet energii mezi zdrojem, který je nesymetrický vůči zemi, a zátěží, která je vůči zemi symetrická.

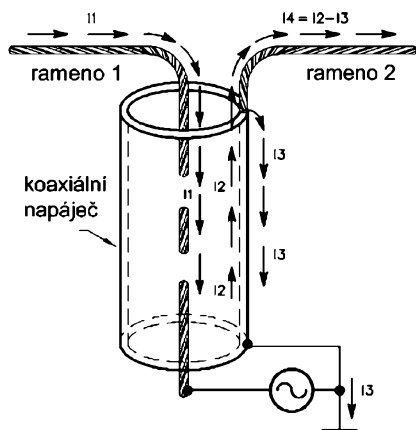
Někdy zároveň transformují impedanci v určitém poměru, jindy zachovávají poměr impedancí 1:1.

Takové transformátory jsou často označovány jako BALUN (z anglického BALanced-UNbalanced). Můžeme se rovněž setkat s označením UNUN (UNbalanced-UNbalanced), případně BALBAL (BALanced-BALanced), které

se používá pro oddělovací členy v systémech nesymetrických, popř. symetrických vůči zemi.

Zpravidla předpokládáme, že anténa je napájena dvou vodičovým vedením, jehož oběma vodiči v daném okamžiku protékají shodné proudy opačné fáze. Tento předpoklad však většinou není splněn, pokud nejsou učiněna zvláštní dodatečná opatření.

Důvody, proč tento předpoklad nebývá splněn, mohou být dva - anténa, symetrická vůči zemi, je napájena vedením, které je nesymetrické, nebo je u symetrické antény z konstrukčních důvodů nutné použít napájecí a při-



Obr. 11. Přímé napájení dipólu koaxiálním kabelem

způsobovací obvody, které jsou nesymetrické.

Výsledkem je vznik asymetrických soufázových proudů, které způsobují vyzařování napáječe, zhoršení přizpůsobení (činitele stojatých vln, ČSV) a zkreslení vyzařovacího diagramu antény.

Přímé napájení dipólu koaxiálním kabelem

Předpokládejme, že platí tzv. teorém recipacity, tedy vysílací a přijímací anténa se chová z hlediska vyzařování, napájení a přizpůsobení stejně. Pro přehlednější výklad tedy můžeme použít anténu vysílací, tedy anténu, chovající se jako zátěž.

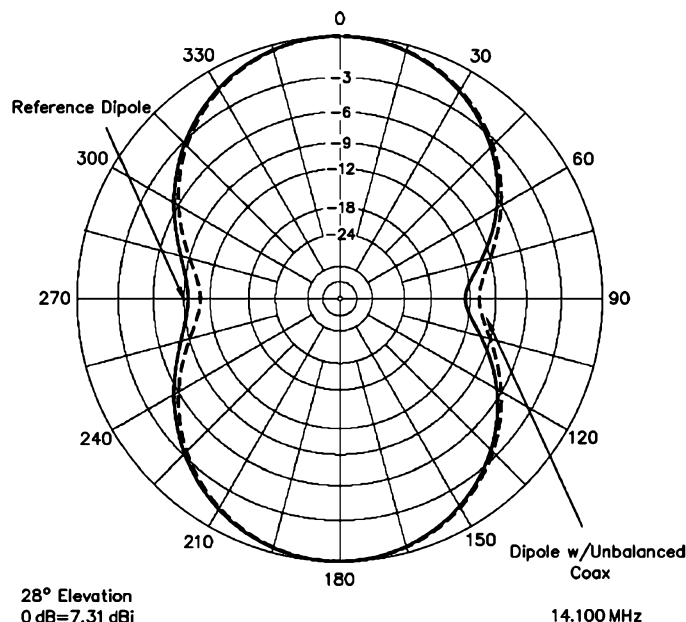
Je-li půlvlnný dipól napájen koaxiálním kabelem přímo, bez jakékoli symetrizace, nastává situace, naznačená na obr. 11. Symetrická anténa je uprostřed napájena nesymetrickým napáječem, který je umístěn kolmo k zářiči. Díky symetrii indukují jedno rameno dipólu v napájecí proud, který je úplně vyrušen proudem, vyvolávaným druhým ramenem antény.

Proudy I_1 a I_2 tečou od vysílače koaxiálním kabelem. Díky skin efektu teče I_1 po vnějším povrchu středního vodiče a I_2 po vnitřním povrchu opletení. Vnější pole, obklopující koaxiální napáječ, je tedy nulové, protože I_1 a I_2 mají stejnou amplitudu a jsou vzájemně fázově posunuty o 180° .

Proudy, tekoucí anténou, jsou označeny I_1 a I_4 a oba tečou v daném okamžiku stejným směrem. V rameni 1 teče v tomtéž okamžiku proud I_1 přímo do středního vodiče koaxiálního kabelu. Na druhé straně dipólu je však situace rozdílná. Dosáhne-li I_2 konce koaxiálního napáječe, rozdělí se na dvě části - na I_4 , tekoucí přímo do ramene 2, a na I_3 , tekoucí po vnějším povrchu opletení kabelu. Díky skin efektu je I_3 oddělen od I_2 , tekoucímu po vnitřním povrchu. Proud, tekoucí ramenem 2, je tedy rovný rozdílu $I_2 - I_3$.

Velikost proudu I_3 je úměrná relativním impedancím v obou cestách před rozdělením. Impedance v napájecím

Obr. 12. Zkreslení vyzařovacího diagramu půlvlnného dipólu při jeho přímém napájení koaxiálním kabelem bez symetrizace.



bodě dipólu se pohybuje mezi 50 až 75Ω v závislosti na jeho výšce nad zemí. Impedance, promítnutá do poloviny dipólu je poloviční, tedy 25 až $37,5 \Omega$. Impedance, promítnutá z vnějšího povrchu stínícího opletení koaxiálního kabelu k zemi bývá označována jako tzv. soufázová nebo asymetrická impedance (anglicky common-mode impedance), a I_3 proto bývá nazýván jako soufázový nebo asymetrický proud (angl. common-mode current).

Toto označení lze snadno vysvětlit, pokud si místo koaxiálního kabelu představíme dvoulinku (dva paralelní vodiče). Proud, indukovaný do obou vodičů dvoulinky je tedy soufázový proud, neboť teče oběma vodiči tímtež směrem, zatímco proud, tekoucí do antény by tekli oběma vodiči v daném okamžiku vzájemně opačnými směry. Vnější opletení kabelu stíní vnitřní vodič a tím brání indukování soufázového proudu v něm, avšak opletením soufázový proud skutečně teče.

Soufázová impedance je ovlivněna celou řadou faktorů, např. délkou a průměrem napájecího koaxiálního kabelu, způsobem jeho vedení i jeho umístěním a vlastnostmi vř. země v místě přijímače (vysílače).

Nejméně příznivá situace nastane v případě, kdy je délka napájecího kabelu spolu s délkou vodičů, tvořících vř. zem, lichým násobkem $\lambda/2$ (poloviny vlnové délky). Vedení v tomto případě představuje opakovač impedance a nízká impedance v místě připojení k zemi je přenášena do napájecího bodu dipólu. Proud I_3 se stává významnou součástí proudu I_2 a způsobuje nejen nesymetrii celého systému, ale také vyzařování napáječe, následkem čehož je zkreslení vyzařovacího diagramu antény (obráz. 12) a ovlivnění polarizace.

Toto zkreslení se může projevit zvláště významně u směrových antén, u kterých způsobuje známé „šilhání“ vyzařovacího diagramu a anténa se v případě příjmu stává citlivá na lokální průmyslové rušení, přicházející zpravidla s vertikální polarizací atd.

Na obr. 12 jsou porovnávány vyzařovací diagramy správně napájeného referenčního půlvlnného dipólu, umístěného $\lambda/2$ nad průměrnou zemí, a dipólu, napájeného bez symetrizace.

Oba diagramy byly vypočítány pro elevační úhel 28° , tedy maximum vyzařování dipólu ve výšce $\lambda/2$ nad zemí. Vyzařovací diagram referenčního dipólu je znázorněn plnou čarou a má známý osmičkový tvar s typickým poklesem 12 dB ve směru vodiče dipólu. Přerušovaná čára je znázorněn vyzařovací diagram dipólu, napájeného bez symetrizace kabelem o délce $\lambda/2$, který je zavěšen vertikálně, kolmo k dipólu. Z obrázku je patrná nesymetrie vyzařovacího diagramu a jeho pootočení směrem doprava. Rozdíl v maximu vyzařování je pouhých 0,1 dB, což se zdá být zanedbatelné. Je však třeba mít na paměti, že uvažujeme dipól, napájený kabelem, umístěným přesně kolmo na zářič. V praxi tomu zpravidla bývá jinak a celková situace je tedy mnohem horší a je třeba počítat s rozdíly 0,5 dB i většími.

Rozdíl v maximu vyzařování představuje energii, vyzářenou napáječem, která v případě vysílací antény způsobuje rušení ostatních zařízení v místě antény, v případě příjmu představuje citlivost antény na lokální rušení.

Podobným způsobem se rovněž ovlivňuje i ČSV antény.

I když se negativní účinky chybějící symetrizace zdají na první pohled málo významné, bývá skutečnost vždy mnohem horší, a proto se nevyplácí tyto účinky podceňovat. U antén mohou nastávat skokové změny ČSV, způsobené pohybem napáječe ve větru, vlivy počasí apod. Bezvýznamný není ani vliv na koncový stupeň vysílače. V případě příjmu se projevuje nejen zmíněné lokální průmyslové rušení, ale mohou se uplatnit i různé nežádoucí odrazy, které jsou např. při příjmu TV příčinou „duchů“ apod.

I když je příklad antény typický, mohou se vlivy chybějící symetrizace projevovat všude tam, kde je symetrická

zátěž napájena nesymetrickým napájecím či nesymetrickým zdrojem a obráceně. Proto se setkáváme s používáním balunů velmi často.

Balun lze konstruovat mnoha různými způsoby jako čtyřpól s rozloženými i soustředěnými parametry. Každé řešení má své typické výhody i nevýhody.

Je-li nutné balun řešit, ať již z rozměrových důvodů nebo z důvodů širokopásmovosti jako čtyřpól se soustředěnými parametry, používají se většinou cívky, vinuté na feromagnetických jádrech. Jejich úkolem je vnutit symetrii systému tím, že do cesty nežádoucích soufázových proudů je postavena impedance tak velká, že brání jejich toku. Samozřejmě tím není možné dosáhnout naprosto dokonalé symetrie, ale nežádoucí vlivy soufázových proudů jsou tím omezeny na zanedbatelnou míru.

Ve zmíněném případě antén tak lze považovat napáječ do značné míry za neutrální a nikoli za vyzařující součást antény.

Balun může zároveň plnit úlohu impedančního transformátoru, který transformuje impedance v prakticky libovolném poměru až do 1 : 16.

Z hlediska funkce lze baluny rozdělit na napěťové a proudové.

Napěťový balun

- Napětí na jeho výstupu jsou shodná, avšak v protifázi (symetrická vůči zemi).
- Přesná symetrie nastává jen v případě, když je zátěž symetrická vůči zemi.
- Konstrukce napěťových balunů je snadná, a proto bývají levnější a používají se častěji než baluny proudové. Není však možné dosáhnout přesné napěťové symetrie.

Proudový balun

- Jeho výstupní proudy jsou shodné, avšak v protifázi (symetrické vůči zemi).
- S výjimkou proudového balunu 1 : 1 bývá konstrukce náročnější a baluny bývají dražší, proto se používají méně často.

Analýza proudového balunu 1 : 1 (lit. [1])

- Analytický rozbor obvodového modelu proudového balunu 1 : 1 s konečnou impedancí.
- Odvození rovnic, popisujících nejdůležitější charakteristické vlastnosti proudového balunu 1 : 1 v typických aplikacích.
- Analýza použití proudového balunu 1 : 1 v anténním přizpůsobovacím členu (tuneru), je-li zapojen na jeho vstupu nebo výstupu.

Proudový balun 1 : 1 lze zkonstruovat navinutím dvou vodičového vedení (např. zkrouceného dvou vodiče) nebo

koaxiálního kabelu na toroidní jádro nebo feritovou tyčku, popř. navlečením několika feritových jader na dvou vodičové vedení nebo koaxiální kabel. Další možností je navinout několik závitů koaxiálního kabelu a svázat je do formy cívky, čímž vznikne rezonanční obvod s malým Q , tlumící soufázové proudy, tekoucí pláštěm kabelu.

Pro všechny tyto případy lze použít jeden a tentýž model, který je na obr. 13.

Následující rozbor platí za předpokladu, že délka linky, navinuté na feromagnetickém jádru, je malá ve srovnání s vlnovou délkou, takže je možné ji reprezentovat pomocí soustředěných parametrů. Není-li tento předpoklad splněn, analýza neplatí.

Z_W je impedance vinutí. Je to impedance, kterou by mělo vinutí tvořené jedním vodičem. Je-li použito jádro vhodné pro nižší frekvence nebo je-li balun tvořen jádrem, navlečenými na vodič, má Z_W převážně reálný charakter, při použití jádra, vhodného pro vyšší frekvence, bude mít Z_W převážně indukční charakter. Ve skutečnosti může mít Z_W libovolný charakter.

Bez jádra nebo cívky je Z_W tzv. délková impedance - impedance samotného vodiče.

Pro koaxiální kabel představuje Z_W impedanci, ovlivňující proudy, tekoucí pláštěm kabelu, zatímco ideální transformátor vzniká uvnitř kabelu.

Funkce ideálního transformátoru je dosaženo díky úplné vazbě polí, vznikajících proudem proudů pláštěm i vnitřním vodičem kabelu.

Není-li linka tvořena koaxiálním kabelem, předpokládá se opět úplná vazba polí, vznikajících proudem proudů oběma vodiči. Tento předpoklad lze splnit, pokud je linka tvořena dvěma vodiči ve velmi těsné blízkosti.

Impedance vinutí Z_W v modelu ovlivňuje soufázové proudy (tj. proudy, tekoucí oběma vodiči v daném okamžiku stejným směrem, někdy označované jako asymetrické proudy), které si lze představit buď rovnoměrně rozložené mezi oba vodiče nebo tekoucí pouze jedním z vodičů, zatímco druhým vodičem teče nulový proud. Oba tyto pohledy lze považovat za rovnocenné díky účinkům ideálního transformátoru.

Transformátor lze považovat za ideální, pokud platí:

$$U_a - U_c = U_b - U_d \quad (1)$$

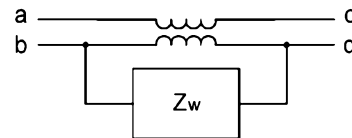
a proudy v obou vinutích jsou stejné a jsou v protifázi.

Z rovnice (1) lze odvodit, že také:

$$U_a - U_b = U_c - U_d.$$

Zjednodušený model balunu je znázorněn na obr. 14.

Velmi důležité je spojení zemí (GND) do jednoho společného bodu. Představují-li Z_1 a Z_2 impedance antény nebo antény/napáječe, musí v sobě zahrnovat i vlastnosti připojení antény či napáječe k balunu. Jinými slovy, Z_1 je impedance, měřená mezi svorkami c a b a



Obr. 13. Náhradní schéma proudového balunu 1 : 1

Z_2 je impedance mezi svorkami d a b při odpojení balunu.

Označíme-li hodnotu Z_2 , k níž je paralelně připojena Z_W , jako $Z_2 || Z_W$, můžeme vyjádřit poměr proudů, tekoucích impedancemi Z_1 a Z_2 , jako:

$$I_1/I_2 = (Z_2 + Z_W)/Z_W. \quad (2)$$

Vstupní impedance balunu je:

$$U_s/I_s = Z_1 + (Z_2 || Z_W). \quad (3)$$

Napětí na vinutí balunu je:

$$U_b - U_d = U_s \cdot (Z_2 || Z_W) / [Z_1 + (Z_2 || Z_W)]. \quad (4)$$

Poměr proudů, tekoucích vnějším pláštěm kabelu (nebo asymetrického proudu dvoulinky) k celkovému proudu je dán výrazem:

$$\begin{aligned} (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) &= \\ &= (Z_2 || Z_W) / [2 \cdot Z_W - (Z_2 || Z_W)] = \\ &= Z_2 / (Z_2 + 2 \cdot Z_W). \end{aligned} \quad (5)$$

Tyto rovnice ukazují několik zajímavých souvislostí.

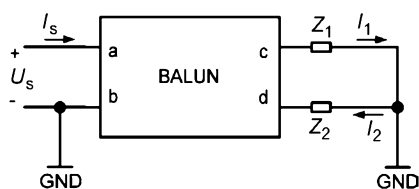
První z nich je skutečnost, že pokud je Z_W značně velká, budou proudy I_1 a I_2 stejné a asymetrický proud se zmenší na nulu. To představuje dokonalý proudový balun a ukazuje, proč má význam se snažit o maximální impedanci vinutí Z_W .

Další zajímavou skutečností je, že vyváženost proudů je závislá pouze na Z_2 a Z_W a je zcela nezávislá na Z_1 .

Bude-li Z_2 nulová, bude vyváženost proudů dokonalá bez ohledu na Z_W .

Představují-li Z_1 a Z_2 impedanci antény nebo antény a napáječe, je velmi nepravděpodobné, že tento stav nastane - pamatujme, že Z_2 je impedance, měřená mezi svorkou d přes zem ke svorce b. I kdyby byl jeden konec vnějšího pláště kabelu připojen ke svorce d a druhý konec připojen k zemi, stále by byla mezi těmito body poměrně značná impedance. Je-li délka kabelu srovnatelná s vlnovou délkou (můžeme uvažovat délku $\geq 0,1 \cdot \lambda$), může být tato impedance relativně velká.

Pamatujme, že Z_2 se objevuje pouze jako paralelně připojená k Z_W . Sku-



Obr. 14. Zjednodušený model balunu

tečně tomu tak je, a můžeme vypočítat, že proudy v Z_1 a Z_2 lze vyrovnat tak, že mezi svorku c a zem připojíme další impedanci o velikosti $Z_W \cdot Z_1/Z_2$.

I když je tato impedance připojena stejným způsobem jako terciární vinutí napětového balunu 1 : 1, tuto funkci neplní vzhledem k vazbě s dalšími vinutími. Tuto vyrovnávací impedanci je proto nutné vytvořit jako separátní část izolovanou od proudového balunu 1 : 1.

Je-li anténa symetrická vůči zemi, bude přídavná vyrovnávací impedance rovna Z_W a bude možné použít další balun se zkratovanými vstupními a zkratovanými výstupními svorkami. Při dostatečně nízké impedanci balunu může být taková konfigurace nutná k dosažení symetrie, avšak balunem by tekly velké proudy, což by mohlo způsobovat přehřívání jádra.

Rovnice dále ukazují, že k analýze některých důležitých parametrů je nutné znát Z_1 , Z_2 a Z_W , i když pro výpočet symetrie proudů je nutné znát pouze Z_2 a Z_W .

Co se stane, je-li balun použit v anténním přizpůsobovacím členu (tuneru)? Chceme-li analyzovat tuto situaci, vytvoříme model tuneru jako transformátor s vinutími s poměrem počtu závitů 1 : n (obr. 15).

Společnou zemnici svorku tuneru vytvoříme spojením spodních konců obou vinutí transformátoru. Model neobsahuje žádnou impedanci vinutí, protože tuner není především transformátor, ale zcela jiný obvod, který mimo jiné také transformuje impedanci. Tento model byl zvolen proto, aby bylo možné vyšetřit některé základní vlastnosti balunů, které se uplatní bez ohledu na topologii tuneru.

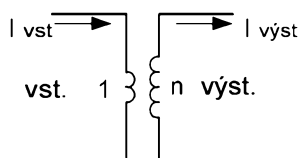
Uveďme znovu dvě základní pravidla chování modelu:

$$U_{out} = n \cdot U_{in}, \quad (6)$$

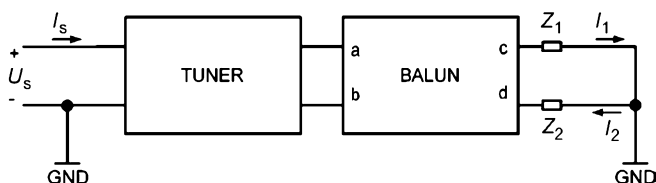
$$I_{out} = I_{in}/n. \quad (7)$$

Konfiguraci balunu s tunerem znázorňuje obr. 16.

V zapojení není žádná zvláštní zemnicí svorka, společným zemnicím bodem je svorka GND, vzniklá spojením spodních konců obou vinutí transformátoru.



Obr. 15. Model tuneru znázorněný jako transformátor s vinutími s poměrem počtu závitů 1 : n



Obr. 16. Uspořádání tuneru s balunem na výstupu

Aplikací dvou základních pravidel chování modelu (6), (7) dostáváme následující vztahy:

Poměr proudů tekoucích impedancemi Z_1 a Z_2 je:

$$I_1/I_2 = (Z_2 + Z_W)/Z_W. \quad (8)$$

Vstupní impedance systému je:

$$U_s/I_s = [Z_1 + (Z_2 \parallel Z_W)]/n^2. \quad (9)$$

Napětí na vinutí balunu je:

$$U_b - U_d = n \cdot U_s \cdot (Z_2 \parallel Z_W) / [Z_1 + (Z_2 \parallel Z_W)]. \quad (10)$$

Poměr proudů, tekoucího vnějším pláštěm koaxiálního kabelu (popř. soufázových proudů, tekoucích dvoulinkou vinutí) k celkovému proudu pak bude:

$$\begin{aligned} (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) &= \\ &= (Z_2 \parallel Z_W) / [2 \cdot Z_W - (Z_2 \parallel Z_W)] = \\ &= Z_2 / (Z_2 + 2 \cdot Z_W). \end{aligned} \quad (11)$$

Jedinými změnami oproti zapojení bez tuneru je vstupní impedance Z , která je transformována v poměru 1 : n^2 , a napětí na vinutí balunu, které se zvětší v poměru 1 : n.

Pro dosažení vyhovující symetrie proudů je nutné, aby impedance vinutí Z_W byla mnohem větší než impedance Z_2 . V mnoha situacích je však vyžadováno, aby tuner přizpůsoboval velkou impedanci Z_2 , čímž je dosažení vyhovující symetrie proudů velmi obtížné.

Nyní přemístíme balun na vstup tuneru a dostaneme další vztahy.

Poměr proudů tekoucích impedancemi Z_1 a Z_2 je:

$$I_1/I_2 = (Z_2 + Z_W)/Z_W. \quad (12)$$

Vstupní impedance systému je:

$$U_s/I_s = [Z_1 + (Z_2 \parallel Z_W)]/n^2. \quad (13)$$

Napětí na vinutí balunu je:

$$U_b - U_d = n \cdot U_s \cdot (Z_2 \parallel Z_W) / [Z_1 + (Z_2 \parallel Z_W)]. \quad (14)$$

Poměr proudů, tekoucího vnějším pláštěm koaxiálního kabelu (popř. soufázových proudů, tekoucích dvoulinkou vinutí) k celkovému proudu pak bude:

$$\begin{aligned} (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) &= \\ &= (Z_2 \parallel Z_W) / [2 \cdot Z_W - (Z_2 \parallel Z_W)] = \\ &= Z_2 / (Z_2 + 2 \cdot Z_W). \end{aligned} \quad (15)$$

Docházíme ke zjištění, že výsledky jsou naprosto totožné! Stejně je i napětí na vinutí balunu.

Tento závěr je velmi neobvyklý a mnozí experimentátoři mu na první pohled neuvěří. Je však skutečností a byl potvrzen i měřeními. Pomocí těchto modelů lze analyzovat proudový balun 1 : 1 za různých podmínek. Je však nutné připomenout, že tento neobvyklý závěr se vztahuje pouze ke zmiňovaným parametrům, zatímco např. napětí mezi jednotlivými závití vinutí, proudy v jednotlivých závitech, vlivy nežádoucích kapacitních vazeb na balun apod. se se změnou umístění balunu mění.

Praktická konstrukce balunů

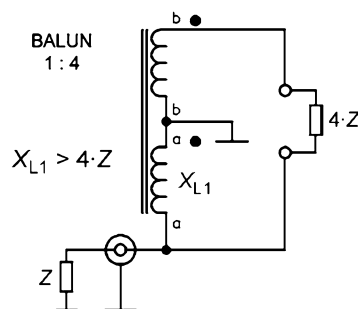
Při návrhu balunu použijeme tzv. pravidlo čtyř (obr. 17), které říká, že dolní kmitočtová mez použitelnosti balunu je kmitočet, na kterém je induktivní reaktance vinutí 4x větší než impedance připojená k vinutí. Je-li induktivní reaktance menší než tento čtyřnásobek, bude balun nepoužitelný.

Je tedy vhodné změřit indukčnost vinutí a pomocí nomogramu nebo výpočtem stanovit minimální kmitočet pro uvažovanou impedanci. Horní mezní kmitočet je takový, při kterém kapacitní reaktance parazitní kapacity vinutí (popř. kapacity mezi jednotlivými vinutími - záleží na zapojení balunu) je 4x větší než impedance připojená k vinutí. Pokud se mohou uplatnit obě tyto reaktance, bereme v úvahu samozřejmě tu nižší.

V mnoha případech se však při návrhu balunu berou v úvahu jiné faktory. Platí to zejména pro baluny přenášející výkon.

Šířku pásma použitelnosti balunu ovlivňují zejména ztráty v jádře, které jsou kmitočtově závislé. Výkon se na ztrátovém odporu mění teplo a jádro se zahřívá. Při dosažení Curieho teploty (Curieho bodu) materiál přechází z feromagnetického stavu do paramagnetického. V praxi se Curieho teplota definuje jako teplota, při které počáteční permeabilita materiálu klesne na polovinu původní hodnoty. Změna magnetického stavu jádra je nevratná, nastane-li tato změna, je jádro zničené.

Dalším limitujícím faktorem je samotná impedance, ke které je vinutí při-



Obr. 17. Pravidlo čtyř

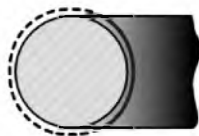
pojeno. Při větších výkonech a velkých impedancích (řádu stovek Ω) mohou být mezi vinutími balunu značná napětí a může se prorazit dielektrikum vodičů použitých ke konstrukci vinutí.

Praktické vlastnosti balunů jsou určeny vlastnostmi použitého jádra a jeho provedením. Výběru jádra je nutné věnovat velkou péči a je nutné brát v úvahu především charakteristické vlastnosti materiálu. Vždy bývá vhodné použít materiál s větší permeabilitou, neboť tak se dosáhne maximální indukčnosti při minimálním počtu závitů. Malý počet závitů znamená menší odpor vinutí i menší parazitní kapacitu.

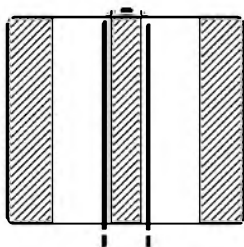
Velkou permeabilitu můžeme však očekávat pouze u feritových jader. Jejich nevýhodou je především 10x až 15x menší přípustné sycení než u železových jader.

V aplikacích, ve kterých se pracuje s malým výkonem, se nemusíme touto otázkou zabývat - materiál jádra je však vždy nutné volit s ohledem na princip funkce balunu.

Tlumivkový balun 1 : 1 (tedy takový, ve kterém má cívka plnit funkci tlumivky) bude vhodné navinout na jádře, které bude mít na pracovním kmitočtu co největší ztráty. Pro výkonové aplikace bude u tohoto typu balunu jádro zatěžováno pouze výkonem vytvářeným souřadovými proudy. Ty jsou však závislé na charakteru zátěže i na použitých přizpůsobovacích obvodech. Lze však konstatovat, že vhodným materiálem



Obr. 18. U toroidních jader se uplatní jen část délky závitu (plnou čarou), zatímco zbytek délky vodiče (přerušovaná čarou) má na výslednou indukčnost jen zanedbatelný vliv



Obr. 19. U dvouotvorových jader se uplatní větší část délky závitu (plnou čarou)



Obr. 20. Praktické provedení balunu na dvouotvorovém jádře



Obr. 21. Náhrada dvouotvorového jádra sestavou trubičkových nebo toroidních jader

bude takový, který výrobce doporučuje v uvažované kmitočtové oblasti používat ke konstrukci tlumivky. Např. v oblasti kmitočtů řádu jednotek až desítek MHz to bude feritový materiál s permeabilitou $\mu_i = 300$ až 2000.

U balunů, které se chovají jako linekový transformátor, bude spíše důležité sycení. Proto u výkonových aplikací raději zvolíme práškové jádro. Pro kmitočty řádu jednotek až desítek MHz a impedance řádu desítek Ω je oblíbený materiál 2 (červená barva) s $\mu_i = 10$.

Je nutné znovu připomenout, že závit u toroidních jader v praxi znamená průchod vodiče vnitřkem jádra a jeho zbývající délka se téměř neuplatní. To je poměrně nevýhodné - zejména u jader s kruhovým průřezem se tak uplatní jen menší část délky vodiče (obr. 18).

Právě pro baluny je mnohem výhodnější dvouotvorové jádro, u něhož se při vinutí na střední sloupek naopak většina délky vodiče uplatní (obr. 19).

Praktické provedení balunu na dvouotvorovém jádře je na obr. 20. Balun je vinut tak, aby se uplatnila většina délky vodiče, neboť jde o dosažení maximální indukčnosti - je určen pro kmitočty 1 až 2 MHz, na kterých by již mohlo být obtížné splnit pravidlo čtyř. Pro vyšší kmitočty se baluny často vinou tak, aby bylo dosaženo minimální kapacity vinutí a jeho symetrie.

Dvouotvorová jádra však bývají hůře dostupná a nevyskytují se ve větších velikostech, vhodných pro výkonové aplikace. V těchto případech se dvouotvorová jádra nahrazují sestavou trubičkových nebo toroidních jader odpovídajících rozměrů (obr. 21). V takové sestavě lze použít měděné trubičky, procházející vnitřkem jader, které plní nejen funkci nosného prvku, ale slouží rovněž jako elektrostatické stínění. Trubičky samozřejmě nemohou být propojeny na obou koncích, neboť by tvořily závit nakrátko.

Péči je rovněž nutné věnovat vinutí balunu. Vinout lze různým způsobem (obr. 22, 23, 24, 25) ale ne vždy se podaří splnit všechny požadavky na minimální kapacitu vinutí a impedanci linky.

Často se baluny vinou zkrouceným dvou, troj či čtyřvodičem, který lze vyrobit stočením příslušného počtu měděných lakovaných drátů pomaloběžnou vrtačkou. V některých případech bývá použit i obyčejný, tzv. zvonkový drát s různobarevnou izolací PVC.

Tento způsob není příliš výhodný, neboť nelze ovlivnit impedanci takto vzniklé linky a v případě použití lakovaného drátu je před zapojením nutné

každé vinutí určit ohmmetrem. Vzniká riziko chyby v zapojení, která se pak velmi těžko hledá. Navíc se při zkroucování vodičů nebo při vlastním vinutí může laková izolace porušit, čímž vzniknou mezizávitové zkraty. Tento způsob vinutí je rovněž nevhodný pro výkonové aplikace, při kterých se pracuje s tlustšími vodiči. Výhodou je však velmi snadná výroba i v případě, kdy je potřeba troj či čtyřvodič.

Z obecného hlediska vhodnějším způsobem je použít dvoulinku. Vyskytují se speciální dvoulinky s přesně definovanou impedancí, často s teflonovou izolací. Ty jsou ovšem drahé a obtížně dostupné, proto se často používá dvoulinka vlastní konstrukce (obr. 23).

Dva paralelně natažené vodiče jsou spojeny v pravidelných vzdálenostech kapkami tavného lepidla tak, že dvoulinka tvoří miniaturní žebříček. Výslednou impedanci dvoulinky je možné poměrně přesně určit, tímto způsobem lze pracovat i s tlustšími vodiči a riziko



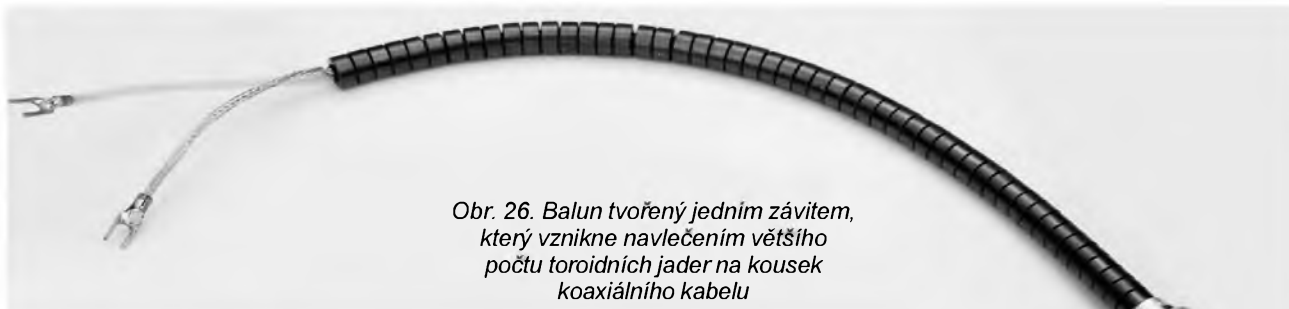
Obr. 22. Balun navinutý zkrouceným dvouvodičem



Obr. 23. Dvoulinka vlastní konstrukce - dva lakované dráty jsou mechanicky spojeny kapkami tavného lepidla



Obr. 24. Balun navinutý dvoulinkou vlastní konstrukce



Obr. 26. Balun tvořený jedním závitem, který vznikne navlečením většího počtu toroidních jader na kousek koaxiálního kabelu



Obr. 25. Balun s tzv. divokým vinutím

omylu při zapojování je rovněž menší. Možnost mezizávitového zkratu je téměř vyloučena a stejným způsobem lze zkonstruovat i troj či čtyřvodič, nutný pro baluny s trifilárním či kvadrofilárním vinutím. Výroba je však pracnější a zdlouhavější.

Balun navinutý dvoulinkou vlastní konstrukce je na obr. 24.

Snad nejhorším způsobem vinutí je tzv. divoké vinutí, ve kterém jsou závity kladeny bez jakéhokoli systému, často přes sebe, další vinutí bývá vinuto do druhé vrstvy apod. (obr. 25).

Taková konstrukce má snad všechny nevýhody kromě jediné - výroba je nejméně pracná a nejrychlejší. Divoký způsob vinutí lze tolerovat snad jen u ověřovacích konstrukcí, ale v hotových přístrojích by se neměl objevovat.

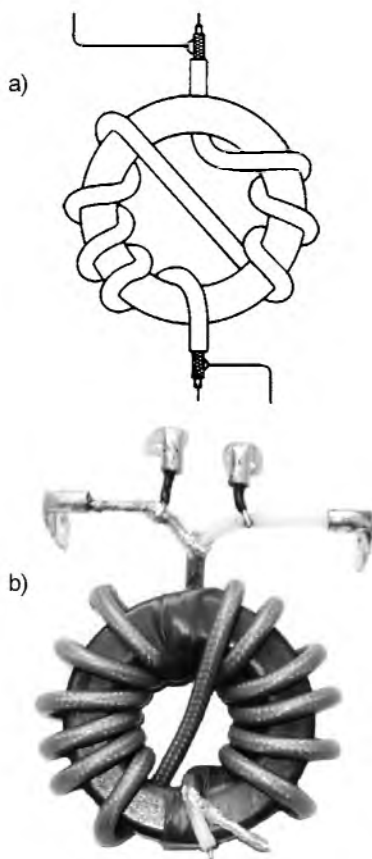
Proudové (tlumivkové) baluny 1 : 1 pro výkonové aplikace (např. pro KV vysílací antény) bývají konstruovány zvláštním způsobem. Mohou být tvořeny cívkou o jednom závitě, která vznikne navlečením většího počtu toroidních jader na kousek koaxiálního kabelu (obr. 26). Vhodná jsou samozřejmě jádra, která vykazují co největší ztráty na pracovním kmitočtu.

Oblíbeným způsobem konstrukce proudových (tlumivkových) balunů 1 : 1 je navinout 4 až 12 závitů koaxiálního kabelu na toroidní jádro, popř. na sestavu jader (obr. 21), která nahrazují dvou- otvorové jádro. Je ovšem nutné použít poměrně tenký a měkký kabel, téměř požadavkům vyhovují pouze nejkvalitnější typy s teflonovou izolací, např. RG-174 nebo RG-303 (nezkoušejte vyrobit výkonový balun z kabelu RG-58!).

Balun, vzniklý prostým navinutím několika závitů na toroidní jádro však mívá na vyšších kmitočtech (> 20 MHz) poněkud horší útlum soufázových proudů, což je zaviněno poměrně velkou vlastní kapacitou vinutí. Tu lze zmenšit vhodným upořádáním, např. rozdělením vinutí na dvě poloviny, vinuté opačným směrem (obr. 27).

U takto provedeného vinutí je však elektricky namáhán i vnější izolační plášť kabelu. Proto je vhodné vinout závity kabelu s mezerami.

Na obr. 28 je schéma proudového balunu 1 : 4. Je tvořen dvěma proudovými baluny 1 : 1, které jsou na levé straně spojeny paralelně a na pravé sériově. Tím je dosaženo požadovaného převodu impedance v poměru 1 : 4. Dílčí baluny 1 : 1 jsou navinuty dvoulinkou



Obr. 27. Balun s vinutím rozděleným na dvě poloviny. Toto uspořádání umožňuje zmenšit parazitní kapacitu vinutí.

a) principiální schéma vinutí,
b) praktické provedení balunu

na dvou samostatných toroidních jádrech nebo na dvou polovinách dvou- otvorového jádra. Tečkami jsou označeny začátky vinutí. I když nápisy na obr. 28 naznačují, že uvedený balun je určen pro převod symetrických impedancí, tj. pro převod symetrické impedance na nesymetrickou a naopak. Postačí jeden z vývodů uzemnit. Takto byly řešeny symetizační členy signálu z antény pro I. a III. TV pásmo u většiny starších televizních přijímačů.

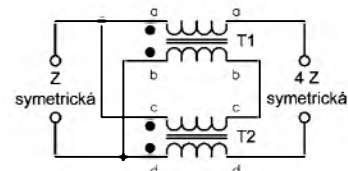
Na obr. 29 je znázorněno řešení proudového balunu 1 : 4 z obr. 28 se dvěma vzduchovými cívkami, které se používalo před nástupem feritů.

Na obr. 30 je načrtnuta praktická konstrukce napěťového balunu 1 : 4 s jedním toroidním jádrem.

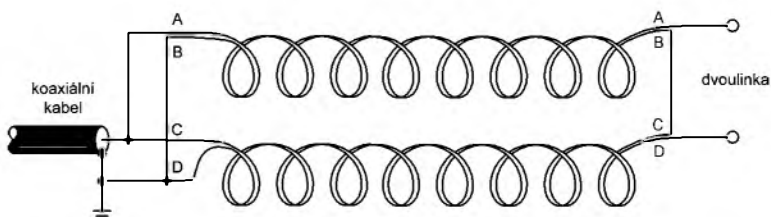
Zapojení balunů s různým transformačním poměrem je uvedeno v tab. 15.

Obrázky v tabulce pouze naznačují principiální možnosti zapojení balunů a mj. znázorňují i způsob připojení proudového balunu 1 : 1 na vstup transformátoru pro zlepšení symetizačního účinku.

Jsou-li v náčrtcích v tab. 15 znázorněny odbočky na vinutí nebo vinutí s odlišným počtem závitů, platí pro polohu odbočky (resp. poměr počtu závitů primárního a sekundárního vinutí) vztahy, které jsou uvedeny dále v popisu balunu s libovolným transformačním poměrem.

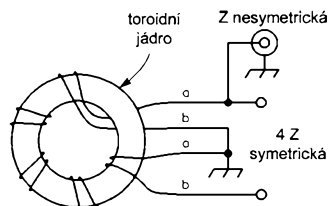
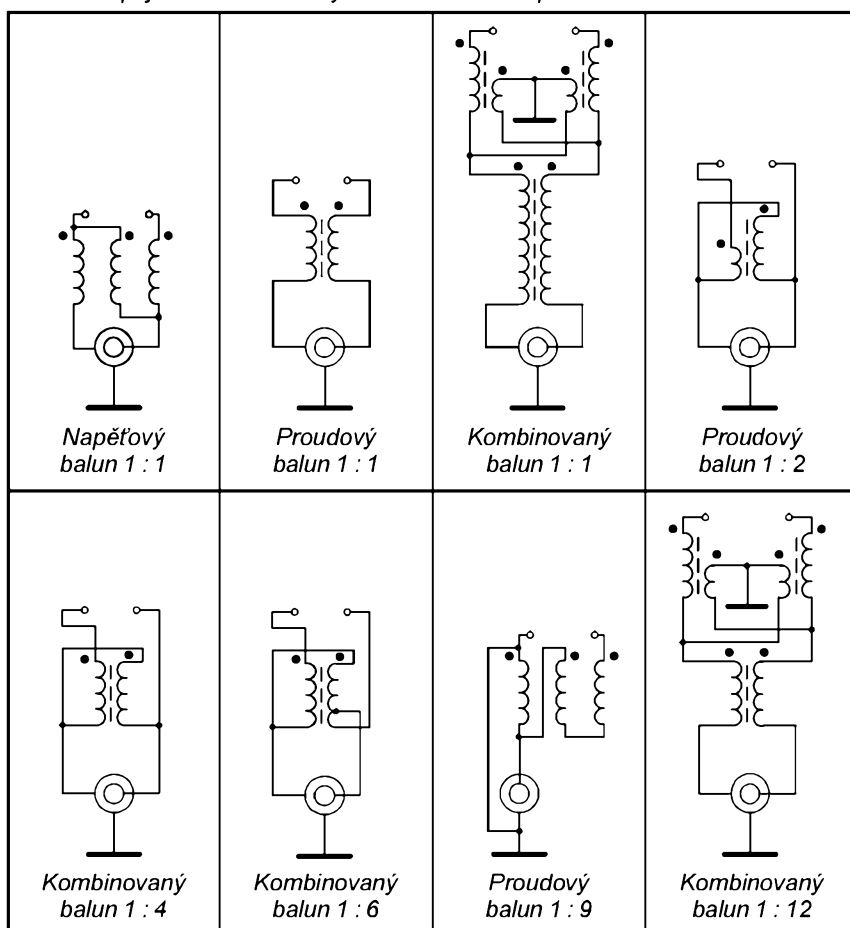


Obr. 28. Balun 1:4



Obr. 29. Principiální schéma balunu 1:4 se vzduchovými cívkami

Tab.15. Zapojení balunů s různým transformačním poměrem

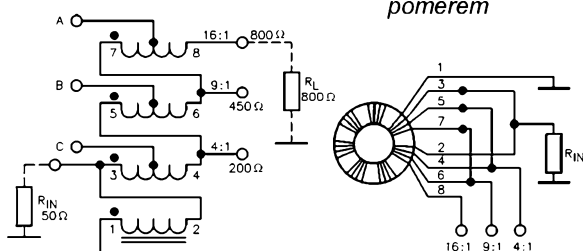


Obr. 30. Náčrtek vinutí balunu 1 : 4 na toroidním jádru

Transformátor s nastavitelným transformačním poměrem

Pro experimentování s rádiovými vysílači a přijímači je vhodný transformátor s nastavitelným transformačním poměrem, který přizpůsobuje zátěže 200, 450 a 800 Ω ke zdroji s výstupní impedancí 50 Ω (obr. 31).

Tento transformátor je určen pro zdroj s nesymetrickým výstupem a nesymetrickou zátěží, není tedy vhodný



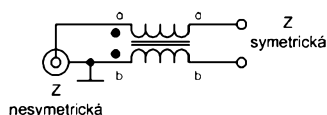
Obr. 31. Transformátor s nastavitelným transformačním poměrem

k symetrizaci. Je tvořen kvadrofilárním vinutím, zapojeným podle obrázku. I zde je třeba dodržet pravidlo čtyř, kritická situace může nastat při zátěžích kolem 800 Ω (transformační poměr 1:16) na nižších kmitočtech.

Pro aplikace s malým výkonem (do 100 W) vyhoví transformátor, který zhotovíme navinutím 10 závitů čtveřice měděných lakovaných vodičů o průměru 0,5 mm na tři feritová jádra FT140-43 přiložená k sobě.

Konstruovat experimentální transformátor pro větší výkony nemá smysl, pro výkonové aplikace je vždy vhodnější použít transformátor s pevně zvoleným transformačním poměrem.

Má-li tento experimentální transformátor zároveň plnit funkci symetrizá-



Obr. 32. Proudový balun 1 : 1, vhodný k použití na vstupu transformátoru s nastavitelným transformačním poměrem

toru, je nutné zapojit s ním do kaskády ještě proudový balun 1 : 1 podle obr. 32. Nesymetrický vstup transformátoru se připojí k symetrickému výstupu proudového balunu a výstup transformátoru je pak symetrický.

Balun s libovolným transformačním poměrem

Je známou věcí, že transformační poměr impedancí je roven druhé mocnině poměru počtu závitů jednotlivých vinutí transformátoru.

Této skutečnosti lze využít ke konstrukci balunu s libovolným transformačním poměrem (obr. 33).

Balun je vinut trifilárně a jeho funkce je patrná z obrázku.

Platí:

$$Z1/Z2 = (N1/N2)^2$$

nebo

$$N1/N2 = \sqrt{Z1/Z2}$$

Potřebujeme-li např. balun, který transformuje impedance v poměru 1 : 3 (50/150 Ω), bude poměr počtu závitů jednotlivých vinutí $\sqrt{(50/150)} = 1 : 1,73$.

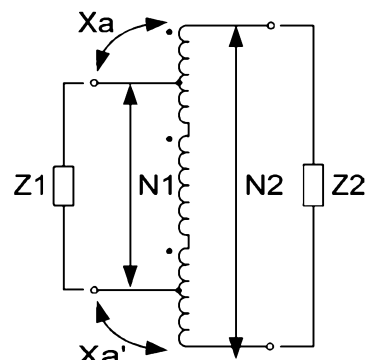
Je-li (s ohledem na již zmíněné pravidlo čtyř) balun navinut např. osmi závitů trojice vodičů (trifilárně), je zátěž 150 Ω připojena ke třem dílčím vinutím zapojeným do série, tedy k 24 závitům, a mezi odbočkami, ke kterým je připojen zdroj o výstupní impedanci 50 Ω , je 24/1,73 závitů, tj. asi 14 závitů.

Aby balun mohl zároveň plnit funkci symetrizátoru, měla by být jeho konstrukce symetrická. Za předpokladu symetrické zátěže by tedy reaktance X_a a $X_{a'}$ měly být shodné. Proto bude balun vinut tak, že jedna odbočka bude na pátém závitě prvního vinutí a druhá na třetím závitě třetího vinutí.

I na vstup tohoto balunu je možné zapojit pro zlepšení symetrizačního účinku proudový balun 1 : 1.

V každém případě je nutné před konečnou instalací balunu změřit indukčnosti ze strany vstupních i výstupních svorek a výpočtem ověřit, je-li splněno pravidlo čtyř.

Ve skutečnosti transformační poměr nemůže být zcela libovolný, neboť bývá nutné respektovat pravidlo čtyř,



Obr. 33. Balun s libovolným transformačním poměrem

kteří omezuje dolní kmitočtovou mez, a vzájemnou kapacitu mezi vinutími, která omezuje horní kmitočtovou mez.

V praxi je možné zkonstruovat baluny, které kromě symetrizace také transformují impedanci v poměru až 1 : 25. Takové baluny však mohou pracovat pouze v relativně úzkém kmitočtovém pásmu (poměr horního a dolního mezního kmitočtu je 1 : 3, nejvýše 1 : 4).

Literatura k balunům

[1] Lewallen, R.: The 1 : 1 Current Balun, <http://www.eznec.com>

[2] Maxwell, W.: Some Aspects of the Balun Problem, QST (ARRL), March, 1983, str. 38.

[3] Baluns: Chat They Do and How They Do It, ARRL Antenna Compendium, Volume 1, str. 157.

mární stranu a jsou označeny indexy s čárkou.

Obvod lze dále zjednodušit tak, že se příslušné prvky složí (paralelně, sériově) a jejich hodnoty příslušně přepočítají (obr. 36).

Na obr. 36 je:

$$C_d = C_1 + C_2',$$

$$R_c = R_1 + R_2',$$

$$L_1 = L_{11} + L_{12}',$$

ostatní parametry jsou stejné jako na obr. 35.

V pásmu nízkých kmitočtů se vložený útlum zvětšuje vlivem poklesu impedance paralelně připojené ke zdroji, která je funkcí reaktance X_{Lp} . Paralelní odpor, který představuje ztráty v jádru, k tomuto přispívá jen nepatrně.

Vložený útlum A_i lze pak vyjádřit:

$$A_i = 10 \cdot \log[1 + (R/(\omega \cdot L_p))^2], \quad [\text{dB}] \quad (16)$$

kde: $R = R_a \cdot R_b' / R_a = R_b'$.

U většiny vf transformátorů vinutých na feromagnetických jádrech se na ztrátách v oblasti středních kmitočtů největší měrou podílí odpor vinutí.

Vložený útlum v oblasti středních kmitočtů je dán vztahem:

$$A_i = 10 \cdot \log[1 + R_c/(R_a + R_b')], \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

kde: $R_c = R_1 + R_2'$.

V oblasti vysokých kmitočtů je přenosová charakteristika funkcí převážně rozptylové indukčnosti a paralelní kapacity. Většinou je nutné brát v úvahu oba tyto parametry, rozhodující je přitom impedance připojených obvodů.

V obvodech s malou impedancí se uplatní nejvíce vliv rozptylové indukčnosti:

$$A_i = 10 \cdot \log[1 + (\omega \cdot L_1/(R_a + R_b'))^2], \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

V obvodech s velkou impedancí se naopak uplatní převážně vliv paralelní kapacity:

$$A_i = 10 \cdot \log[1 + (\omega \cdot C_d \cdot R_b')^2], \quad [\text{dB}] \quad (19)$$

Vezmeme-li v úvahu vložený útlum ve všech třech kmitočtových oblastech, bude určujícím faktorem při výběru feromagnetického materiálu a tvaru jádra co největší indukčnost na jeden závit vi-

Vf širokopásmové transformátory

Vf transformátor je tvořen několika vinutími na feromagnetickém jádru. Jeho účelem je přenést energii v širokém kmitočtovém rozsahu s minimálními ztrátami. Používá se tam, kde je nutné transformovat impedanci, napětí nebo proud nebo stejnosměrně nebo vysokofrekvenčně oddělit zdroj od zátěže. Vf širokopásmové transformátory se navrhují také pro přenos výkonu, pulsní provoz apod., najdeme je však většinou v zařízeních, která pracují s malým výkonem.

Na obr. 34 je typická kmitočtová charakteristika vf transformátoru, tj. závislost vloženého útlumu transformátoru na frekvenci. Šířka pásma představuje rozdíl mezi kmitočty f_2 a f_1 nebo f_2' a f_1' a je funkcí základního vloženého útlumu a magnetických parametrů jádra. Je zřejmé, že větší šířku pásma vykazují transformátory s pozvolnějším průběhem kmitočtové charakteristiky. Při návrhu se klade důraz většinou na malý základní vložený útlum ve středu pásma, na šířku pásma, danou mezními kmitočty f_1 a f_2 a na útlum na těchto kmitočtech.

Náhradní schéma širokopásmového transformátoru, vyjádřené prvky se soustředěnými parametry, je na obr. 35.

Kromě ideálního transformátoru jsou na obr. 35 zakresleny i parazitní odpory a reaktance:

U_a je zdroj elektromotorické síly (EMS),

R_a je vnitřní odpor zdroje elektromotorické síly,

C_1 je kapacita primárního vinutí,

R_1 je odpor primárního vinutí,

L_{11} je rozptylová indukčnost primárního vinutí

L_p je indukčnost primárního vinutí otevřeného obvodu,

R_p je paralelní odpor, představující ztráty v jádru.

Parametry sekundárního vinutí, promítnuté na stranu primárního vinutí:

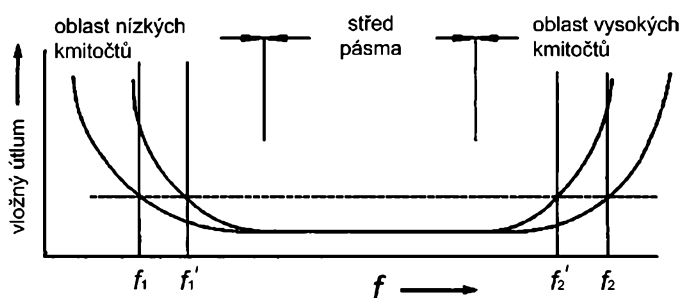
C_2' je kapacita sekundárního vinutí,

R_2' je odpor sekundárního vinutí,

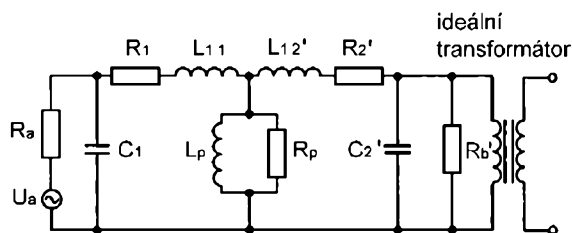
L_{12}' je rozptylová indukčnost sekundárního vinutí,

R_b' je zatěžovací odpor.

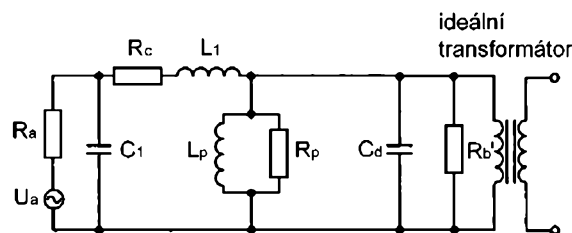
Odpory a reaktance, které se uplatňují na sekundární straně transformátoru, jsou překresleny na jeho pri-



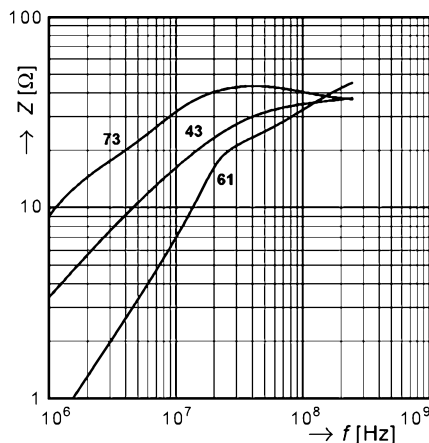
Obr. 34. Kmitočtová závislost vloženého útlumu širokopásmového transformátoru



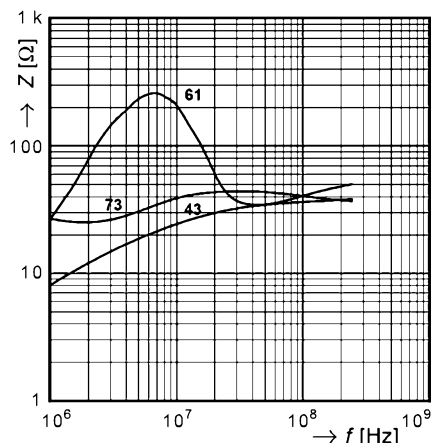
Obr. 35. Náhradní schéma širokopásmového transformátoru



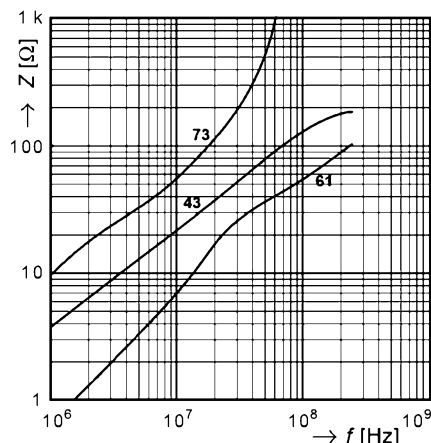
Obr. 36. Zjednodušené náhradní schéma širokopásmového transformátoru



Obr. 37. Kmitočtová závislost impedance pro jádra Fair-Rite 28-002302 z materiálu 73, 43 a 61



Obr. 38. Kmitočtová závislost paralelního odporu R_p pro jádra Fair-Rite 28-002302 z materiálu 73, 43 a 61



Obr. 39. Kmitočtová závislost paralelní reaktance X_p pro jádra Fair-Rite 28-002302 z materiálu 73, 43 a 61

nutí na nejnižším kmitočtu f_1 . Tím se rovněž dosáhne minimálního počtu závitů vinutí pro danou indukčnost.

Co nejmenší počet závitů je důležitý pro dosažení minimálních ztrát v pásmu středních kmitočtů a znamená i menší kapacitu vinutí v oblasti kolem horního mezního kmitočtu f_2 .

Výběr vhodného materiálu

Pro širokopásmové transformátory je nevhodnějším materiálem takový, který má největší počáteční permeabilitu na dolním mezním kmitočtu f_1 . Pro transformátory, které pracují na nízkých a středních kmitočtech (desítky až stovky kHz), jsou vhodné feritové materiály 77 a 78.

Jak již bylo uvedeno, kritickým parametrem je paralelní reaktance ωL , která roste s kmitočtem (pokud je permeabilita použitého materiálu konstantní) nebo se zmenšuje v poměru menším, než je nárůst kmitočtu (např. při zdvojnásobení kmitočtu se nesmí permeabilita zmenšit více než na polovinu).

Tato podmínka je splněna při použití manganato-zinečnatých feritů, je-li f_1 v horní polovině ploché části křivky, vyjadřující závislost permeability na kmitočtu. Přenos transformátoru však nebude významněji ovlivněn ani v oblasti, ve které se permeabilita začne zmenšovat.

Tvar jádra je třeba volit tak, aby byl dosažen minimální poměr stejnosměrného odporu vinutí k jeho indukčnosti. Vhodná jsou např. hrníčková jádra, případně jádra EP a PQ. Často však bývá rozhodující technika vinutí, rozměry jádra apod.

U transformátorů, jejichž vinutím protéká stejnosměrný proud, je vhodné použít jádra se vzduchovou mezerou, aby se omezil vliv zmenšování paralelní indukčnosti.

Pro transformátory, které pracují na vyšších kmitočtech (nad 500 kHz), jsou vhodné nikelnato-zinečnaté ferity. Zde se uplatňují komplexní parametry v mnohem větší míře, než jednoduché mate-

riálové konstanty, jako např. činitel indukčnosti A_L .

Na vyšších kmitočtech se širokopásmové transformátory nejčastěji používají v obvodech s malou impedancí. Stejnosměrný odpor vinutí již nebývá tak důležitý s ohledem na skutečnost, že vinutí je zpravidla tvořeno jen několika závitů tlustšího vodiče. Proto již nebývá nutné minimalizovat poměr stejnosměrného odporu vinutí k jeho indukčnosti. Kritickým parametrem se stává rozptylová indukčnost vinutí.

Na paralelní impedanci má zásadní vliv permeabilita použitého materiálu a jeho ztráty. Na obr. 37, obr. 38 a obr. 39 jsou uvedeny kmitočtové závislosti impedance Z a jí odpovídající paralelní reaktance X_p , platné pro dvouotvorové jádro Fair-Rite 28-002302 z materiálu 73, 43 a 61 s vinutím o jednom závitě, proplečeným oběma otvory.

Pro širokopásmové transformátory, pracující na vyšších kmitočtech, jsou rovněž vhodná toroidní jádra, několik závitů vinutí zde většinou nepředstavuje technologickou překážku při vinutí.

Rozptylovou indukčnost lze minimalizovat těsnou vazbou mezi primárním a sekundárním vinutím, transformátory proto bývají často vinuty bifilárně (viz obr. 22 na str. 29).

Dvouotvorová jádra často bývají vhodnější než jádra toroidní, neboť lze dosáhnout větší indukčnosti a menší kapacity na jeden závit a tím i větší šířky pásma. Vhodným materiálem je nikelnato-zinečnatý ferit 73, 43 a 61 z produkce Fair-Rite (nabízený pod obchodní značkou Amidon), který rovněž koprodukcí vyrábí řada jiných firem buď pod stejným označením, nebo pod jiným označením, které lze najít v převodních tabulkách v katalogové části tohoto časopisu.

Častou otázkou je vhodnost využití feritů z produkce Pramet Šumperk, které byly nabízeny pod obchodní značkou FONOX.

Nikelnato-zinečnaté ferity N01P až N1 s malou permeabilitou mají oproti práškovým materiálům zahraniční produkce se srovnatelnou permeabilitou větší ztráty, zejména na vyšších kmito-

čtech v oblasti od 10 do 400 MHz, snesou mnohem menší sycení a mají rovněž horší teplotní i dlouhodobou stabilitu.

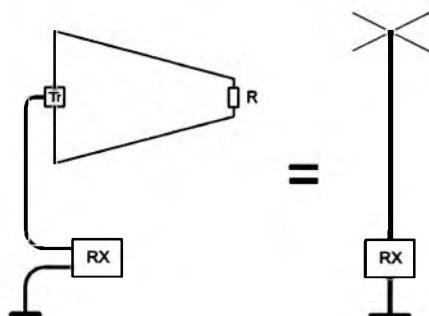
Poměrně nevýhodné je i použití materiálů N2 a N3 na kmitočtech řádu jednotek MHz. Materiál N7, který by se mohl svými vlastnostmi blížit materiálu Fair-Rite 43, je poměrně vzácný, protože nikdy nebyl nasazen do výroby ve velkých sériích.

Existují i případy, kdy není vhodné a často ani možné vinout širokopásmové transformátory způsobem, doporučeným pro minimalizaci rozptylové indukčnosti, tedy s těsnou vazbou mezi primárním a sekundárním vinutím, popř. bifilárně. Na závadu může být právě tato těsná vazba a z konstrukčního uspořádání plynoucí značná kapacita mezi oběma vinutími. Typickým příkladem jsou zvláštní přijímací antény typu Flag, Pennant či Delta, používané k příjmu vzdálených stanic na středních vlnách nebo na krátkovlnných pásmech 160 a 80 m.

Situaci kolem antény ilustruje obr. 40. Můžeme si představit svod antény jako vertikální zářič (monopól), u které anténa Flag (Pennant, Delta) funguje pouze jako jeho kapacitní zátěž. Taková soustava tedy bude přijímat nežádoucí signály ze všech směrů a bude citlivá na lokální rušení, stejně jako každá jiná vertikální anténa. Zvlášť patrné je to u otočných přijímacích antén, umístěných na vrcholu stožáru, např. modifikované antény Flag. Situaci zhoršuje zejména dlouhá vertikální část koaxiálního svodu, fungující jako velmi efektivní anténa, přijímající lokální rušení a další nežádoucí signály.

Signály vzdálených stanic vybudí ve smyčce (tedy anténě Flag či Pennant) proudy a úkolem napájecího systému je přivést takto vzniklý signál ze smyčky k přijímači bez jakýchkoli dalších efektů - je nutné zabránit soustavě Flag + napáječ, aby se chovala jako vertikální monopól.

Proto je nutné, aby byla anténa oddělena od napáječe, napáječ byl na obou koncích zakončen charakterickou impedancí, a je třeba rovněž zabránit



Obr. 40. Situace kolem přijímací antény, asymetrické vůči zemi

postupu nežádoucích proudů po plášti koaxiálního kabelu.

Transformátor tedy plní dvoji funkci - transformuje vstupní impedanci antény na impedanci napáječe a současně zajišťuje účinné oddělení napáječe od antény.

Co z toho vyplývá? Především se musí v energii přenášet výhradně jádrem. Přitom je nutné minimalizovat vzájemnou kapacitní vazbu mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru (naznačenou na obr. 41 symbolem kondenzátoru).

Následující úvaha ukazuje, jaká smí být největší hodnota vzájemné kapacity.

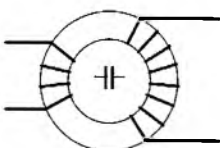
Zisk antény Flag či Pennant dosahuje velikosti mezi -30 až -36 dBi a předozadní poměr je 20 dB. Signály ze směru, odpovídajícího minimu vyzařovacího diagramu antény, tedy budou na úrovni -50 až -56 dB oproti referenčnímu dipólu (použili jsme jednotky dBi).

Monopól, který nežádoucím způsobem ovlivňuje funkci antény, byl modelován pomocí programu MMANA. Modelování ukazuje na výslednou impedanci 0,76 - j 7507 Ω u antény Pennant a 0,68 - j 19175 Ω u antény Flag, což za předpokladu impedance systému 50 Ω odpovídá útlumu nepřizpůsobením v rozmezí 43,5 až 51,7 dB.

Aby nebyl předozadní poměr antény zhoršován o více než 1 dB, je nutné, aby nežádoucí signály, přijímané naším nechtěným monopólem, byly nejméně o 6 dB slabší, než žádoucí signály, přijímané anténou, tedy na úrovni -56 až -61 dB oproti referenčnímu dipólu.

Z toho vyplývá, že transformátor musí poskytnout míru oddělení (tedy potlačit nežádoucí soufázové signály) o 61 - 43,5 = 17,5 dB. Kmitočet známe, proto můžeme z těchto hodnot již stanovit maximální přípustnou kapacitu mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru.

Problém můžeme řešit stejným postupem, jako při návrhu odporového děliče s uvedeným útlumem. Minimální hodnota kapacitní reaktance kondenzátoru, představujícího vzájemnou



Obr. 41. Kapacitní vazba mezi vinutími transformátoru

kapacitu mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru, je tedy: $7507 \cdot 10^{(17,5/20)} = 56295 \Omega$, což na kmitočet 1,83 MHz odpovídá kapacitě 1,54 pF.

Pro konstrukci transformátoru z toho vyplývá, že bude nutné použít přiměřeně velké toroidní jádro, zaručující dostatečnou vzdálenost mezi primárním a sekundárním vinutím (viz obr. 42) a volit takový materiál jádra, který zaručí vyhovující přenos kmitočtů v pásmech 160 a 80 m. Každý závit primárního a sekundárního vinutí přispívá k celkové vzájemné kapacitě mezi vinutími, proto je vhodné použít takový materiál jádra, který umožní dosáhnout požadované indukčnosti vinutí s co nejmenším počtem závitů.

Aby transformátor zaručoval přenos jádrem s přijatelnou účinností, je nutné, aby reaktance vinutí byla nejméně 4x vyšší než impedance, ke které je vinutí připojeno. Primární vinutí, připojené k anténě, by tedy mělo mít reaktanci nejméně 3 600 Ω, sekundární vinutí, připojené ke koaxiálnímu kabelu, by mělo mít reaktanci 200 Ω. Na kmitočet 1,83 MHz tedy z této úvahy vyplývá minimální indukčnost primárního vinutí 313 μH a sekundárního 17,4 μH.

Měřením i katalogovými údaji bylo prokázáno, že nejvhodnějším materiálem pro takový transformátor je nikelnato-zinečnatý ferit s efektivní permeabilitou $\mu_i = 850$, který vyrábí společnost Fair-Rite a distribuuje Amidon pod označením 43. Ten je bohužel u nás obtížněji dostupný, byly proto zkoušeny nikelnato-zinečnaté ferity N1 a N2 z produkce Pramet Šumperk a manganato-zinečnaté materiály H12 a H20 s velkou permeabilitou téže firmy.

Zkoušky však nebyly úspěšné, transformátory na jádrech N měly na 160 m útlum kolem 10 dB a i na jádru N2 o průměru 50 mm nebyla výsledná kapacita mezi primárem a sekundárem v požadovaných mezích. Materiály H pak vykazovaly značný útlum na požadovaných kmitočtech.

Po zkouškách jader Amidon FT82-43, FT114-43 a FT140-43 se podařilo do-



Obr. 42. Praktické provedení transformátoru

sáhnout přijatelných výsledků s jádrem FT140-43 (vnější průměr 35,6 mm, vnitřní průměr 22,7 mm a výška 12,7 mm). Primární vinutí na tomto jádru mělo 18 závitů a sekundární vinutí 4 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,3 mm. Jednotlivé závitů byly vinuty co nejtěsněji k sobě a obě vinutí byla umístěna na protilehlé strany jádra tak, aby mezi nimi byla co největší vzdálenost. Výsledná kapacita mezi vinutími (po zkratování začátku a konce vinutí) byla 1,4 pF.

Hotový transformátor byl zkoušen pomocí impedančního analyzátoru MFJ-259B v pásmu 1 až 5 MHz. Na primární straně byl připojen odpor 900 Ω (šest hmotových rezistorů s odporem 150 Ω v sérii). ČSV dosahoval maximální velikosti 1,7. Pro měření vložného útlumu nebylo k dispozici lepší vybavení než signální generátor a osciloskop. Takto improvizovaným měřením byl vložný útlum odhadnut na 5 až 6 dB.

Je tedy zřejmé, že neexistuje žádný univerzálně platný návod na konstrukci širokopásmových transformátorů a není jednoduché ani stanovit kmitočtové meze jeho použitelnosti.

Konstrukci transformátoru je proto nutné přizpůsobit daným požadavkům a vlastnosti transformátoru ověřovat měřením.

Praktická konstrukce toroidních cívek

Jedním z nejdůležitějších pravidel je, že **za závit je považován průchod vodiče vnitřkem toroidního jádra** (obráz. 43).

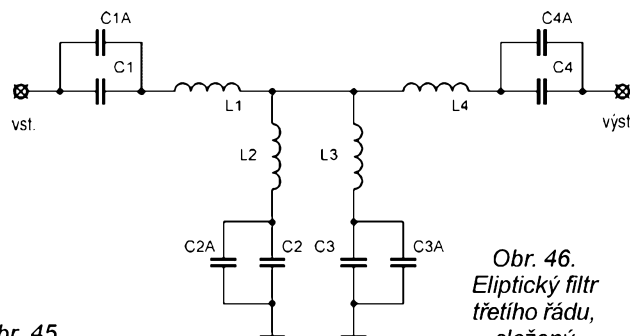
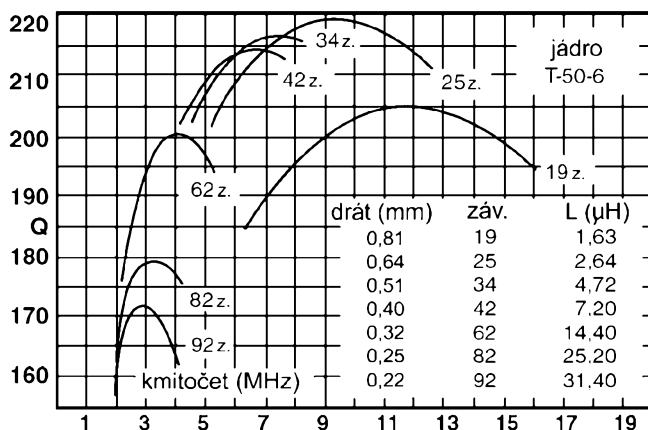
Značnou roli přitom hraje i způsob vinutí a rovnoměrné rozprostření vinutí po obvodu jádra. Na obr. 44 je ukázán tento vliv na vzorku cívky, tvořené deseti závity drátu o průměru 0,72 mm CuL navinutého na toroidu T50-17.

Je zřejmé, že změnou rozprostření vinutí lze dosáhnout indukčnosti téměř o 100 % větší. Navíc předpisy, kde je uveden pouze typ jádra, počet závitů a druh vodiče (popř. délka vodiče), jsou

tedy naprosto nedostatečné. Vždy je nutné uvádět indukčnost, kterou je nutné po navinutí cívky ověřit měřením.

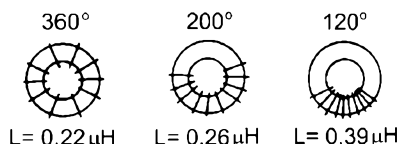


Obr. 43. Praktické provedení cívky na toroidním jádru



Obr. 45.
Typické průběhy
činitele jakosti Q
pro jádro T-50-6

Obr. 46.
Eliptický filtr
třetího řádu,
složený
z obvodů
s nepříznivým
poměrem L/C



Obr. 44. Vliv rozprostření vinutí
po obvodu jádra na celkovou
indukčnost cívky

Je-li cívka součástí rezonančního obvodu, je kromě indukčnosti důležitý i její činitel jakosti Q.

Na ten má zásadní vliv především volba typu jádra, a to nejen použitá hmota, ale i jeho rozměry. Zatímco cívky vinuté na běžných bakelitových kostřičkách se šroubovým jádrem, umístěné v hliníkovém stínícím krytu, dosahují Q asi 80 až 120, bývá činitel jakosti u cívek vinutých na toroidních jádrech přibližně dvojnásobný. Podmínkou je ovšem správná volba hmoty a velikosti jádra. Mezi feritovými a práškovými jádry zpravidla nebývá větší rozdíl, na kmitočtech řádu jednotek až stovek kHz se většinou dává přednost feritovým materiálům, zatímco na kmitočtech řádu jednotek až desítek MHz bývají preferovány práškové materiály, většinou z karbonylového železa.

Typické průběhy činitele jakosti Q pro jeden zvolený typ jádra jsou graficky znázorněny na obr. 45.

Z grafů lze snadno přičíst, že tento typ jádra bude vhodný ke konstrukci cívek s indukčností 2,5 až 7,5 μH pro obvody pracující na kmitočtech 7 až 15 MHz. Tomu samozřejmě musí odpovídat i kapacita kondenzátoru, který bude součástí rezonančního obvodu.

Velmi často bývá nutné minimalizovat vlastní kapacitu vinutí cívky. Tato kapacita má nežádoucí vliv na vlastnosti rezonančního obvodu především v případech, ve kterých je nutné volit velký poměr L/C.

Rezonanční obvody s takovým nepříznivým (velmi velkým) poměrem L/C obsahuje např. eliptický filtr třetího řádu, jehož schéma je na obr. 46. Ve filtru je nutné minimalizovat vlastní kapacity vinutí cívek, jinak jej není možné naladit.

Zapojení filtru bylo již jednou publikováno na stránkách PE-AR a nyní je uveden pouze jako příklad, ilustrující problém, který může způsobovat vlast-

ní kapacita vinutí cívek. Uvedme proto i hodnoty jednotlivých součástek filtru (tab. 16).

Umístění pólů je dáno rezonančními kmitočty f_{r1} až f_{r4} obvodů C1, L1; C2, L2; C3, L3 a C4, L4 (tab. 17).

Vliv vlastní kapacity se nejvíce projevuje u filtrů, navrhovaných pro kmitočty 18,1 a 21 MHz. Nepříliš příznivý poměr L/C je u obvodů C1, L1 a C4, L4, ve kterých je obvodová kapacita až 1,5 nebo 1,8 pF. Při nevhodné konstrukci cívek L1 a L4 (a stejně tak i při nevhodné konstrukci filtru) nebude vůbec možné filtr naladit, protože obvody C1, L1 a C4, L4 budou rezonovat na nižším kmitočtu i při vynechání kondenzátorů C1 a C4 - vlastní kapacita cívky může být

větší než jejich kapacita, vyplývající z návrhu.

Bude proto nutné zvolit jádro tak, aby cívka měla minimální počet závitů, vinutí musí být rozprostřeno po celém obvodu jádra a filtr bude nutné konstruovat tak, aby v blízkosti cívek nebyly žádné zemnicí plochy, zvětšující parazitní kapacity celé konstrukce.

I při konstrukci, která bere tyto skutečnosti v úvahu, je však naladění takového filtru poměrně obtížné.

Je-li to možné, vyhneme se konstrukci vícevrstvových cívek.

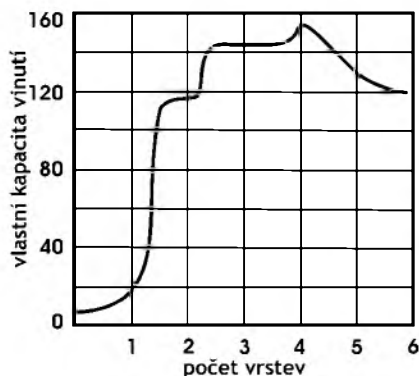
Graf na obr. 47 znázorňuje, jak se změni (v %) vlastní kapacita cívky, bude-li použito vícevrstvové vinutí. Z grafu je patrné, že i několik závitů

Tab. 16. Hodnoty součástek eliptického filtru pro jednotlivá radioamatérská pásma

Pásmo [MHz]	C1 = C4 [pF]	C2 [pF]	C3 [pF]	L1 = L4 [μH]	L2 [μH]	L3 [μH]
1,8	82	3 900	2 200	85,8	3,29	1,75
3,5	565	2 200	1 200	33,6	1,72	0,783
7	10	330	270	51,0	1,98	1,48
10,1	2,2	82	68	112	3,28	3,34
14,0	3,3	120	100	38,1	1,24	1,06
18,1	1,5	47	47	51,3	1,8	1,49
21,0	1,8	68	56	31,2	0,961	0,865
24,9	3,9	150	100	10,6	0,391	0,292
28,0	3,9	150	100	7,75	0,302	0,201

Tab. 17. Kmitočty f_r pólů eliptických filtrů pro jednotlivá radioamatérská pásma

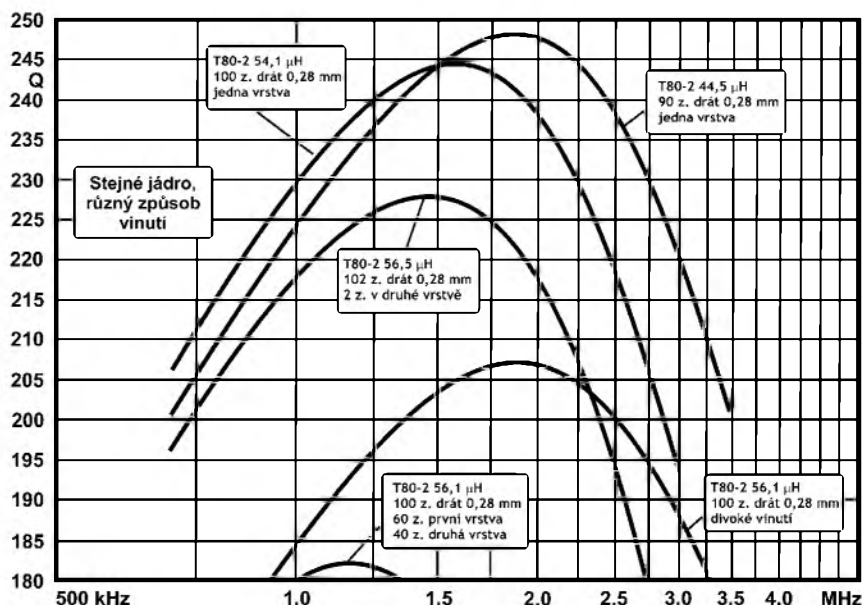
Pásmo [MHz]	f_{r1} a f_{r4} [MHz] obvodů L1, C1 a L4, C4	f_{r2} [MHz] obvodů L2, C2	f_{r3} [MHz] obvodů L3, C3
1,8	1,9	1,41	2,56
3,5	3,67	2,59	5,19
7	7,05	6,23	7,97
10,1	10,1	9,7	10,6
14,0	14,2	13,1	15,4
18,1	18,1	17,3	19,0
21,0	21,2	19,7	22,9
24,9	24,7	20,8	29,5
28,0	29,0	23,6	35,5



Obr. 47. Závislost vlastní kapacity vinutí cívky na počtu závitů a na počtu vrstev vinutí. Vlastní kapacita je vyjádřena relativně v %

navinutých ve druhé vrstvě způsobí prudký nárůst vlastní kapacity vinutí a např. polovina počtu závitů, umístěná ve druhé vrstvě, již prakticky znamená zvětšení kapacity vinutí o 110 %.

Vícevrstvé vinutí však ovlivňuje i celkovou indukčnost cívky a její činitel jakosti Q (viz obr. 48). Z grafů na obr. 48 je vidět, že zejména změny Q mohou být významné. Např. jednovrstvová cívka tvořená 100 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,28 mm na jádru T80-2 má indukčnost 54,1 μH a



Obr. 48. Změny činitele jakosti Q a indukčnosti cívky při stejném jádru v závislosti na počtu vrstev vinutí

na kmitočtu 1,8 MHz má jakost $Q = 244$, zatímco pokud bude navinuta ve dvou vrstvách tak, že v první vrstvě bude 60 závitů a ve druhé vrstvě 40 závitů, poklesne její Q na 135 (již mimo plochu obr. 48) a indukčnost se změní na 56,1 μH . Vícevrstvé vinutí tedy není vhodné

ani ke konstrukci cívek pro rezonanční obvody, ani ke konstrukci tlumivek.

Vyplývá z toho i další skutečnost - každý typ jádra je vhodný pouze ke konstrukci cívek v určitém rozsahu indukčnosti, který odpovídá jeho materiálu a rozměrům.

Příklady použití feromagnetických materiálů

Feromagnetické materiály umožňují konstruovat celou řadu obvodů, které by nebylo možné bez nich realizovat.

Využívá se výhod uzavřeného magnetického obvodu a poměrně velké permeability jádra. To umožňuje konstruovat cívky s minimálním počtem závitů a vysokým činitelem jakosti Q . Tyto cívky mají zpravidla zanedbatelné rozptylové pole, takže je možné je umístit i do poměrně stěsnaných konstrukcí. V neposlední řadě dovolují feromagnetické materiály realizovat i účinné tlumivky.

Bez těchto materiálů si lze těžko představit širokopásmové obvody pro impedanční přizpůsobení nebo efektivní řešení problémů elektromagnetické sloučitelnosti (EMC).

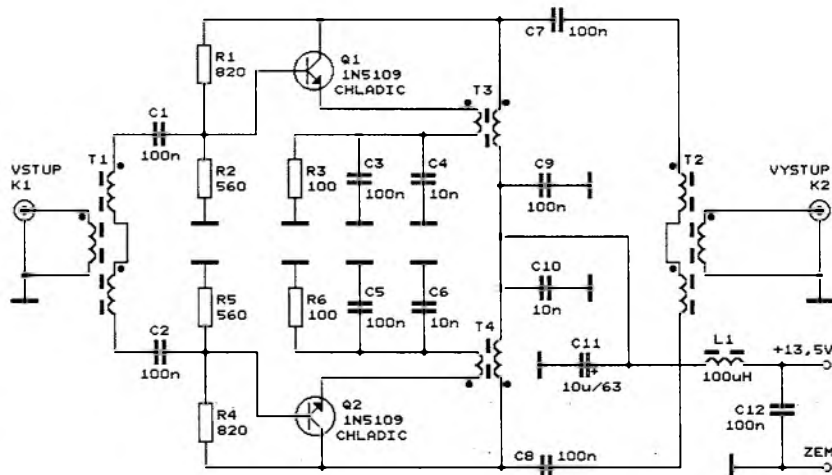
Jedním z typických použití feromagnetických materiálů jsou tranzistorové

zesilovače výkonu. Širokopásmové transformátory na feritových jádrech jsou dobře vidět na konstrukci lineárního výkonového zesilovače AR347 firmy Communication Concepts, Inc. (obráz. 49), určeného pro rozsah 2 až 50 MHz, který svým výkonem 1000 W umožňuje nahradit elektronkové zesilovače ve vysílačích malého výkonu. Modul včetně chladiče je mnohem menší než elektronkový zesilovač srovnatelného výkonu, nepoužívá vysoké napětí a je širokopásmový.

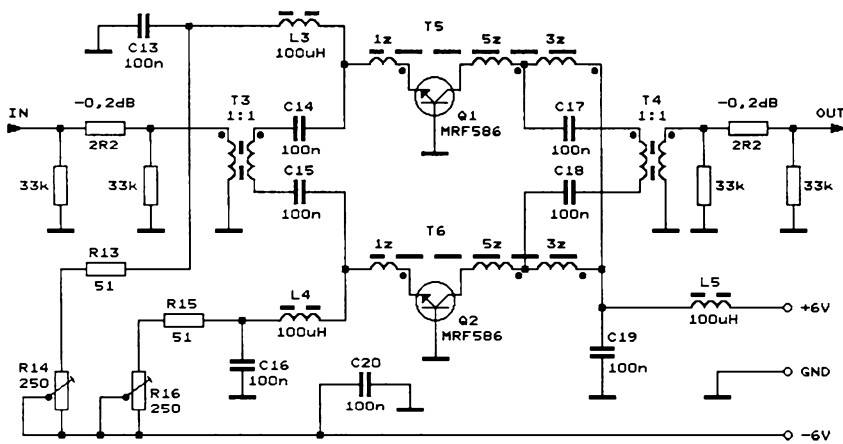
Autorem prvního zapojení na obr. 50 je známý U. L. Rohde. Zesilovač dosahuje zisku kolem 12 dB a šumového čísla 3,5 dB při $IP3 = 35 \text{ dBm}$. Použity jsou běžné CATV tranzistory 2N5109, opatřené chladičem. Zesilovač má konstantní vstupní a výstupní impedanci 50 Ω v rozsahu 1 až 100 MHz. Je vhodný jako vstupní zesilovač přijímače a díky své konstantní vstupní a výstupní impedanci v širokém rozsahu i jako oddělovací zesilovač za kruhový směšovač.



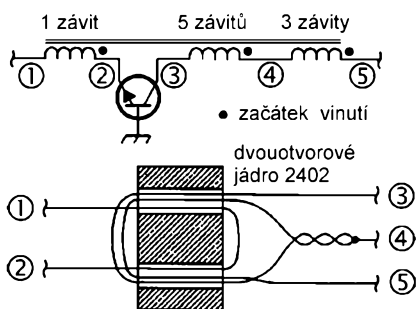
Obr. 49. Zesilovač AR347 o výkonu 1000 W pro rozsah 2 až 50 MHz firmy Communication Concepts, Inc.



Obr. 50. Vstupní zesilovač U. L. Rohdeho, určený pro KV přijímače



Obr. 51. Modifikovaný Nortonův zesilovač určený pro vstupní obvody KV přijmačů



Obr. 52. Konstrukce širokopásmových transformátorů T5 a T6 použitých v modifikovaném Nortonově zesilovači

Transformátory T1 a T2 mají 3x 12 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,3 mm a jsou navinuty na toroidních jádrech Amidon FT-50-43. Vinutí je trifilární (třemi zkroutěnými vodiči) a je rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu jádra.

Transformátory T3 a T4 mají primární vinutí (v emitoru) 2 závitů a sekundární vinutí 9 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,3 mm a jsou navinuty na toroidních jádrech Amidon FT-37-43.

Podobný zesilovač s ještě větší intermodulační odolností je na obr. 51 a vznikl modifikací Nortonova zesilovače. Jeho vynikající linearita je dosaženo optimalizací záporných zpětných vazeb. Jsou v něm použity modernější CATV tranzistory Motorola MRF586 a může dosáhnout zisku kolem 8,5 dB a šumového čísla 2,5 dB při $IP3 = 41$ dBm. Autorem zapojení je Jacob Makhinson.

Pozornost je třeba věnovat zejména konstrukci širokopásmových transformátorů T5 a T6 - viz obr. 52. Použito je dvouotvorové jádro BN-43-2402 (nebo 2843002402). Vinutí navineme měděným lakovaným drátem o průměru 0,3 mm podle obrázku, přičemž musíme dát pozor zejména na smysl vinutí - jeho chyba může ohrozit stabilitu zesilovače.

Transformátory T3 a T4 mají 2x 12 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,3 mm a jsou navinuty na toroidních jádrech Amidon FT-37-43. Vinu-

tí je bifilární (dvěma zkroutěnými vodiči) a je rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu jádra.

Za zmínku stojí i malé napájecí napětí ± 6 V. Pomocí trimrů R14 a R16 se nastavují přesně shodné kolektorové proudy obou tranzistorů. Doporučená velikost kolektorového proudu každého tranzistoru je 25 až 40 mA.

Feromagnetické materiály nacházejí uplatnění i v pasivních aplikacích. Jako příklad mohou posloužit směrové vazby, používané ke konstrukci průchozích reflektometrů.

Nejznámější bude pravděpodobně tzv. Brueného můstek (obr. 53).

Princip jeho funkce je jednoduchý - z průchozího signálu jsou odebrány vzorek napětí a vzorek proudu. Ty jsou pak fázově porovnávány takovým způsobem, že výstupní napětí z portu POSTUPNÝ VÝKON je (po usměrnění vnějším detektorem) úměrné postupujícímu výkonu a výstupní napětí z portu ODRAŽENÝ VÝKON je úměrné odraženému výkonu.

Vzorek napětí je odebrán kompenzovaným kapacitním děličem napětí se součástkami C1, C2 a R1, vzorek proudu je snímán širokopásmovým transformátorem T1. Jeho primární vinutí má jeden závit a symetrické sekundární vinutí má počet závitů odpovídající odporu zatěžovacího rezistoru R2. Volbou odporu R2 a počtem závitů sekundárního vinutí je určena citlivost reflektometru. Protože transformátor T1 je již zatížen rezistorem R2, mohou být porty POSTUPNÝ VÝKON a ODRAŽENÝ VÝKON zatíženy pouze velkou impedancí detektorů v napětí.

V praxi je primární vinutí transformátoru tvořeno vnitřní žilou krátkého koaxiálního kabelu, který prochází otvorem toroidního jádra. Primární vinutí je elektrostaticky stíněno opletením kabelu, které je spojeno se zemí pouze na jednom konci (u výstupního konektoru).

Příklad realizace Brueného můstku je na obr. 55 a obr. 56. Uvedená konstrukce bez problémů snese výkon až 4 kW v kmitočtovém rozsahu 1,8 až 54 MHz při maximálním ČSV = 5.

Celek je umístěn v krabici z měděného (v nouzi ze železného pocínovaného) plechu tloušťky 0,5 mm, která má vnitřní rozměry 55 x 111 x 50 mm (Š x V x H). Většina součástek je připájena na desce s jednostrannými plošnými spoji o rozměrech 111 x 55 mm. Obrázec spojů je na obr. 54.

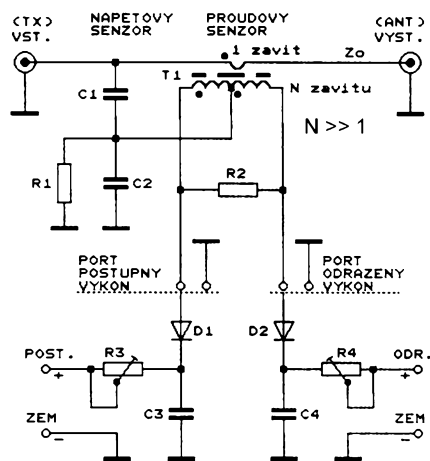
Transformátor T1 je navinut na dvou jádrech přiložených bokem k sobě, jedno je typu T94-2 a druhé typu T94-6. Sekundární vinutí je bifilární a má 2x 8 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 1,0 mm. Primární vinutí je tvořeno koaxiálním kabelem procházejícím oběma jádry. Stínění kabelu je uzemněno pouze u anténního konektoru.

Primární vinutí má indukčnost 43,5 nH, která je fakticky v sérii se zátěží. S ohledem na uvažovaný kmitočtový rozsah ji však můžeme zanedbat. Brueného můstek s takto navrženým transformátorem má činitel vazby 47 dB.

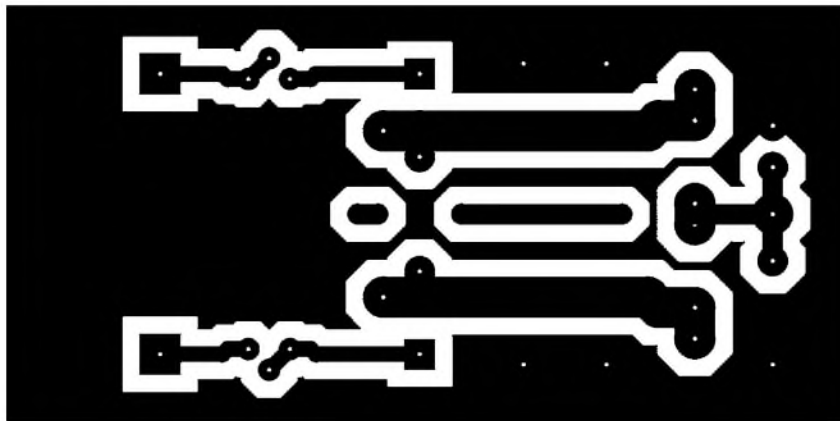
Kondenzátor C1 kapacitního děliče má kapacitu 0,5 pF/4 kV a lze jej jednoduše vyrobit ze dvou kousků kabelu RG-402 délky 1 cm, u nichž je dohromady spájeno stínící opletení. Vnitřní vodiče obou kousků kabelu tvoří vývody (viz obr. 56), z nichž jeden je připojen ke střednímu vodiči koaxiálního kabelu, procházejícího reflektometrem, a druhý k pájecímu bodu na desce s plošnými spoji.

Kondenzátor C2, doplňující kapacitní dělič, je rozdělen do několika menších, paralelně spojených kondenzátorů. Je tvořen dvěma kondenzátory SMD, připájenými ze strany spojů, a trimrem, sloužícím k nastavení dělicího poměru. Všechny kondenzátory paralelně by měly mít celkovou kapacitu $C2 = 113$ pF. Je tedy možné použít dva kondenzátory SMD o kapacitě 47 pF a trimr o kapacitě 2 až 33 pF (vhodný je např. slídový typ z produkce Tronser).

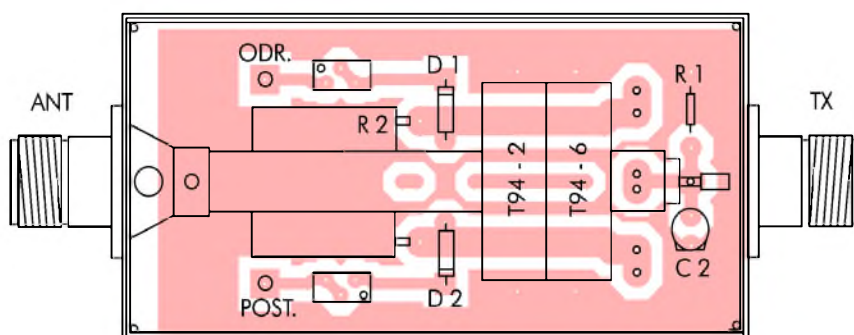
Rezistor R1 by měl mít odpor 7603 Ω /1 W (lze jej složit např. z rezistorů 4,3 k Ω /0,6 W a 3,3 k Ω /0,6 W zapojených do série), rezistor R2 by měl mít odpor 10 Ω /10 W.



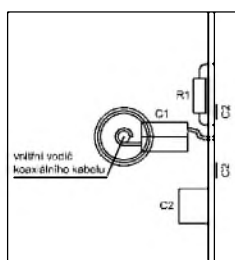
Obr. 53. Brueného můstek použitý jako reflektometr



Obr. 54. Obrazec spojů Brueného můstku z pohledu na stranu pájení (měř.: přibližně 1 : 1)



Obr. 55. Rozmístění součástek na desce s plošnými spoji a celková konstrukce Brueného můstku



Obr. 56. Uspořádání součástek Brueného můstku v krabici - pohled z boku

Ještě je nutné zmínit se o dimenzování součástek. V uvedeném příkladu můstku pro výkon až 4 kW by C1 měl mít provozní napětí 4 kV, u kondenzátorů, tvořících C2, postačí provozní napětí 200 V. Kritickou součástkou je rezistor R2, který by měl být bezindukční a měl by snést 10 W. Sekundárním vinutím

transformátoru protéká v proud až 2,1 A, proto jsou použita dvě relativně velká jádra.

Uvnitř krabice jsou rovněž umístěny detekční diody D1 a D2. Velmi vhodné jsou Schottkyho diody (libovolný vs usměrňovací typ na napětí asi 40 V). Detekované napětí je filtrováno kondenzátory C3 a C4 o kapacitě např. 100 nF. Tyto kondenzátory jsou v provedení SMD a jsou připájeny ze strany spojů.

Detekované napětí je vyvedeno na vývody POST. a ODR. přes odporové trimry R3 a R4, které slouží jako předřadné odpory pro vnější ručkové měřidlo. Odpory trimrů nejsou uvedeny, protože závisí na citlivosti měřidla. Výstupní napětí na vývodu POST. (z portu postupného výkonu) má velikost max.

7,53 V, na vývodu ODR. (z portu odraženého výkonu) má velikost max. 4,85 V.

Podobným můstkem je i Tandem Match na obr. 57. Jedná se o novější zapojení, propagované zejména v posledních deseti letech. Princip funkce je podobný s tím rozdílem, že i napěťový vzorek je snímán širokopásmovým transformátorem.

Tandem Match se jednodušeji nastavuje - zatímco u Brueného můstku je nutné nastavit děliče C1, C2 a R1, zde se nenastavuje nic.

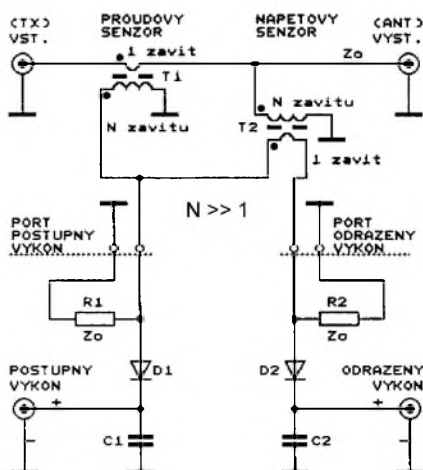
Konstrukce můstku je velmi jednoduchá (obr. 58), důraz je kladen na stínění mezi proudovým a napěťovým senzorem.

Širokopásmové transformátory T1 a T2 mají toroidní jádra T-50-3 a jsou konstruovány podobně jako u Brueného můstku. Primární vinutí je vytvořeno průchodem koaxiálního kabelu otvorem jádra. Primární vinutí (vnitřní vodič kabelu) je elektrostaticky stíněno opletením kabelu, které je uzemněno vždy pouze na jednom konci (viz obr. 58). Sekundární vinutí má 31 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,5 mm a je rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu jádra.

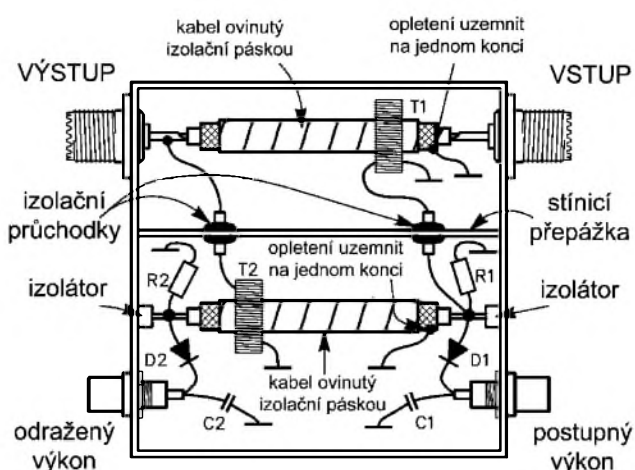
Výstupní porty POSTUPNÝ VÝKON a ODRAŽENÝ VÝKON musí být zatíženy přízpusobovacími odpory rovnými charakteristické impedanci Z_0 vedení mezi konektory VSTUP a VÝSTUP, která je 50 Ω . Proto mají rezistory R1 a R2 odpor 74 $\Omega/0,5$ W a měly by být bezindukční. Detekční diody jsou vs Schottkyho např. typu 1N5711, lze použít rovněž GA201 nebo podobné germaniové. Blokovací kondenzátory nejsou kritické, vhodné jsou keramické s kapacitou např. 10 nF/40 V.

Důležitým kvalitativním parametrem těchto můstků je útlum mezi porty POSTUPNÝ VÝKON a ODRAŽENÝ VÝKON. Tento útlum by měl být co největší a konstantní v celém pásmu pracovních kmitočtů, aby se změny jedné veličiny nepromítaly na veličinu druhou.

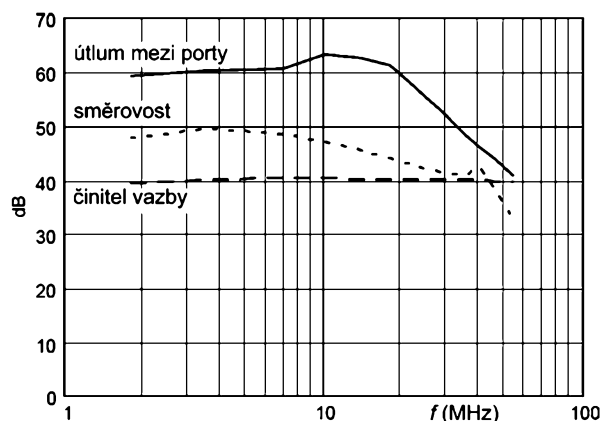
Zajímavé je porovnat útlum mezi porty Brueného můstku a můstkem Tandem Match. Porovnání jednoznačně vy-



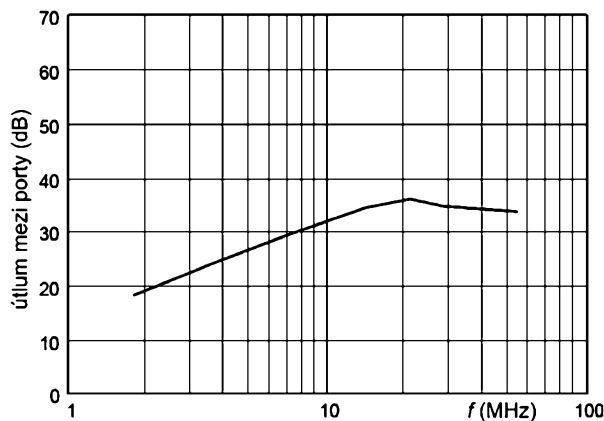
Obr. 57. Můstek Tandem Match, použitý jako reflektometr



Obr. 58. Konstrukční návrh reflektometru s můstkem Tandem Match



Obr. 59. Kmitočtová závislost útlumu mezi porty a dalších parametrů u Bruenhe můstku



Obr. 60. Kmitočtová závislost útlumu mezi porty můstku Tandem Match

znívá ve prospěch Bruenhe můstku (obr. 59, obr. 60).

Dalším, méně obvyklým použitím feromagnetických materiálů, může být fázovací jednotka, která potlačuje lokální rušení příjmu, způsobené různým sršením a jiskřením nebo silnými lokálními signály.

Jednotka se předřazuje před přijímač a zpracovává dva signály.

Prvním je žádaný signál z hlavní antény přijímače, který rovněž obsahuje nežádoucí rušivé složky.

Druhý signál je dodáván z pomocné antény, která by měla být konstruována a umístěna tak, aby byla citlivá především na lokální rušení, což zejména u místního sršení a jiskření nebývá problémem.

Signály z obou antén jsou přivedeny do fázovací jednotky, ve které je nejdříve upravena jejich amplituda. Pak je pootočena fáze signálu z pomocné antény tak, aby po sečtení signálů z obou antén se rušící složky z hlavní a pomocné antény navzájem odečetly a na výstupu jednotky se tak zcela potlačily. Přitom žádaný signál by teoreticky neměl být nijak ovlivněn.

Další možností je použít dvou přijímacích pevně směřovaných antén a manipulaci s amplitudou a fází signálů, přicházejících z těchto antén, dosáhnout efektu podobného otáčení směrovou anténou.

Podobným postupem lze i lokalizovat zdroj rušení apod. - možnosti použití fázovací jednotky jsou opravdu široké.

Princip fázovací jednotky však má i svá omezení. Rušivý signál lze dokonale potlačit jen v případě, že nevykazuje únik a že obě antény dodávají rušivý signál s konstantní amplitudou a fází. Takový případ však bývá v praxi velmi vzácný a nastává prakticky jen tehdy,

je-li lokální zdroj velmi blízko místa příjmu. Při změnách rušivého signálu ho bývá možné potlačit jen částečně a toto potlačení se navíc mění s časem.

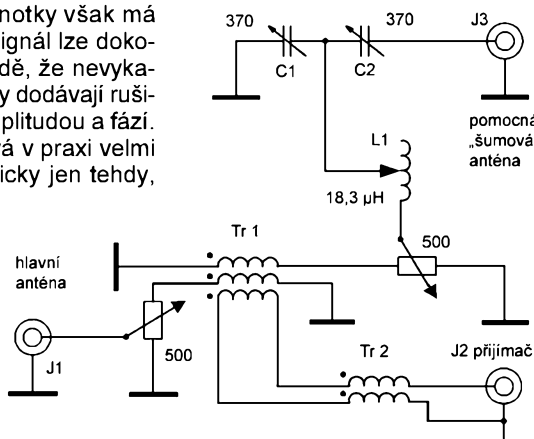
Fázovací jednotku lze řešit jako číste pasivní obvod (obr. 61). K jeho nesporným výhodám patří skutečnost, že nijak nezhoršuje intermodulační parametry přijímače.

Signály z obou antén se ve fázovací jednotce podle obr. 61 sčítají širokopásmovým transformátorem Tr1, na kterém tedy nastává vlastní fázové „vyrušení“ nežádoucího signálu.

Amplituda signálů se nastavuje potenciometry o odporu 500 Ω , které jsou zařazeny v obou signálových cestách. Ke změnám fáze signálu z pomocné antény je použit článek T se součástkami C1, C2 a L1. Rozsah dosažitelných změn fáze je dán hodnotami použitých kondenzátorů a cívky a je kmitočtově závislý. Většinou není možné dosáhnout změny fáze v rozsahu od 0 do 360°, proto je vhodné v případě potřeby zaměnit vstupy žádaného (J1) a rušivého (J3) signálu. Přijímač, připojený ke konektoru J2, je od fázovací jednotky oddělen balunem 1:1.

Dále jsou uvedeny hodnoty součástek, které byly vyzkoušeny v praxi:

Cívka L1 má 45 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,65 mm, který je navinut na tělísko o průměru 25 mm v délce 58 mm. Tato cívka by měla být konstruována jako proměnná (např. s jezdcem) s indukčností 0 až 18,3 μH .



Obr. 61. Pasivní fázovací jednotka.

C1 a C2 jsou samostatné otočné kondenzátory o maximální kapacitě 370 pF. C2 nesmí mít rotor ani stator spojen se zemí ani s ladicí hřídelí.

Transformátor Tr1 má 3x 16 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 1 mm CuL a je navinut na toroidním jádru Amidon FT-82-61. Vinutí je trifilární (třemi zkroucenými vodiči) a je rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu jádra. Pro ulehčení práce je možné použít i tenčí vodič.

Transformátor Tr2 je balun 1:1. Má 2x 18 závitů stejného drátu jako u Tr1 a je navinut na jádru Amidon FT-82-61. Vinutí je bifilární (dvěma zkroucenými vodiči) a je opět rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu toroidního jádra.

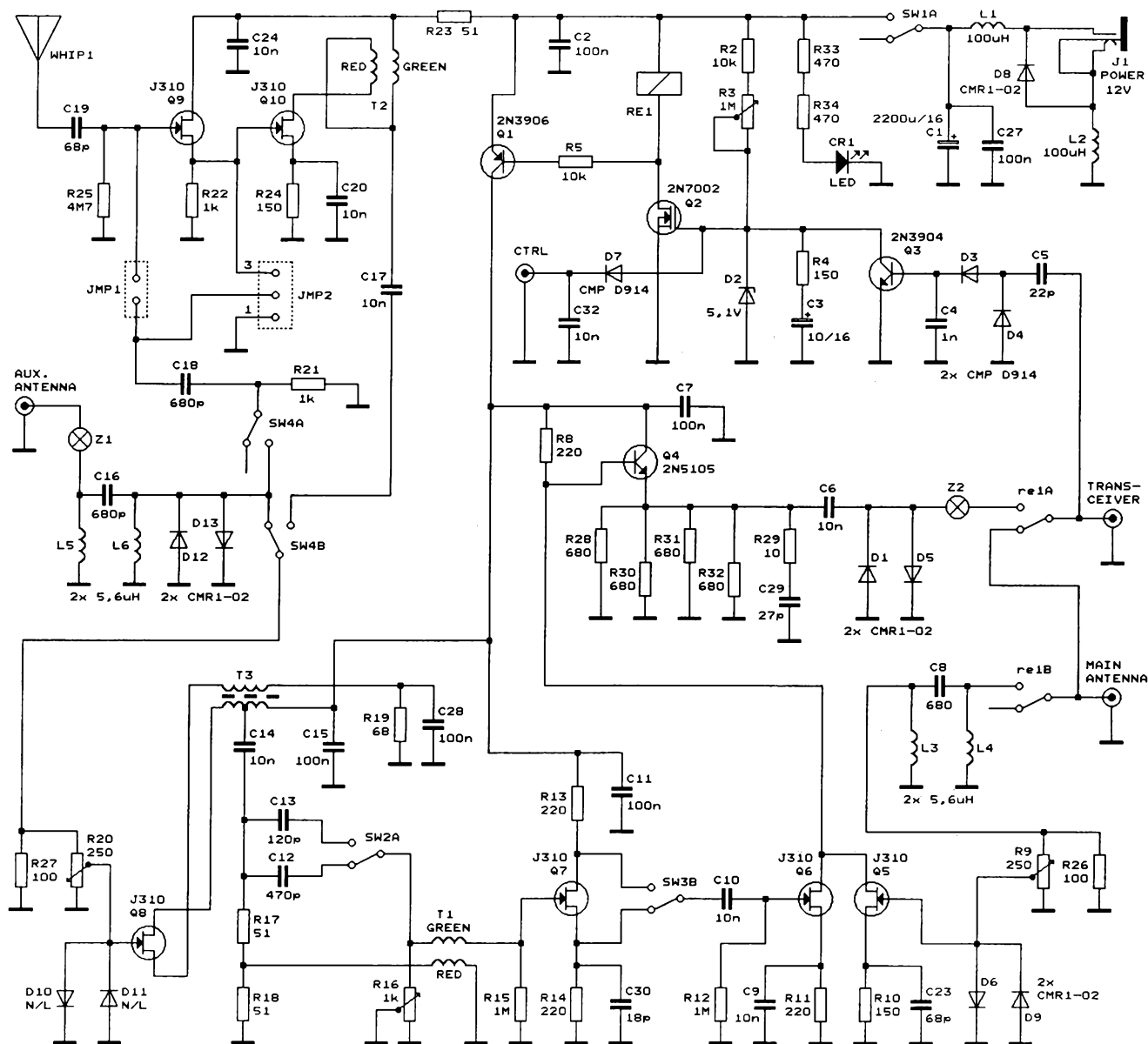
Předchozí fázovací jednotka se stala inspirací komerčně vyráběné jednotky MFJ-1026, jejíž schéma je na obr. 62.

Tato jednotka již není pasivní, ale používá v signálových cestách zesilovače s tranzistory FET J310 s malým šumem. Výsledky dosahované s touto jednotkou jsou opravdu vynikající, i když výrobce použil zapojení, které může výrazněji zhoršit intermodulační vlastnosti přijímače. Proto se doporučuje provést několik úprav, především odstranit antiparalelně zapojené diody D12 + D13, D10 + D11, D6 + D9 a D1 + D5.

Jednotka se dodává s vestavěnou prutovou anténou, která je využita jako „sběrač“ rušivého signálu. Je však rovněž možné použít externí „šumovou“ anténu (zapojenou do konektoru AUX. ANTENNA), v tomto případě se doporučuje upravit zisk zesilovače nežádoucího signálu s tranzistorem Q10 (J310) nastavením zkratovacích spojek JMP1 a JMP2 podle uživatelského manuálu.

V praxi se vestavěná prutová anténa příliš neosvědčila a většina uživatelů jednotku používá s vnější „šumovou“ anténou, jako vhodná anténa se ukázala např. drátová HB9CV, „namiřená“ vzhůru.

Pro použití v rozhlasovém pásmu středních vln není tato jednotka příliš účinná díky filtru L5, L6 a C16. Proto je vhodné tento filtr buď zcela vypustit nebo změnit hodnoty cívek a kondenzátorů tak, aby filtr nepotlačoval kmitočty pod 1,8 MHz.



Obr. 62. Aktivní fázovací jednotka MFJ-1026

Obvod, který je tvořen tranzistory Q1, Q2, Q3, relé RE1 a příslušnými součástkami slouží k vyřazení jednotky při vysílání, je-li použita spolu s transceiverem. Vzhledem k tomu, že se tím komplikuje přepínání příjem/vysílání a zavádí se nutnost dalšího nastavování časové prodlevy při tomto přepínání, je vhodné uvedený obvod vypustit a používat výhradně oddělený vstup přijímače transceiveru, pokud má být jednotka používána v radioamatérském provozu.

Změny fáze, dosažitelné jednotkou MFJ-1026, jsou omezeny poměrem odporu rezistoru R16 k reaktanci kondenzátoru C12 nebo C13. Běžně lze fázi otáčet o 130°, což je ovšem málo. Přepínačem SW3B lze fázi obrátit o 180°. Celková změna fáze, dosažitelná jednotkou MFJ-1026, je tedy přibližně 280°. K dosažení nutného minima 360° je tedy vhodné zaměnit hlavní a „šumovou“ anténu, např. pomocí přídavného relé, přepínacího příslušenství.

Transformátory T1 a T2 mají 2x 12 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,3 mm a jsou navinuty na to-

roidních jádrech Amidon FT-37-43. Vinutí je bifilární (dvěma zkroutenými vodiči) a je rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu jádra.

Transformátor T3 má 3x 16 závitů měděného lakovaného drátu o průměru 0,5 mm a je navinut na toroidním jádru Amidon FT-82-61. Vinutí je trifilární (třemi zkroutenými vodiči) a je rozprostřeno rovnoměrně po celém obvodu jádra.

Ještě malý dodatek k navijecímu předpisu transformátoru T3 ve fázovací jednotce MFJ-1026: transformátor je zapojen zdanlivě jinak než v pasivní jednotce z předchozího příkladu. Trifilární vinutí bude zapojeno tak, že odbočka ke kondenzátoru C14 vznikne spojením konce jednoho vinutí se začátkem druhého a toto spojení slouží jako odbočka. Zbývající začátek a konec vinutí jsou připojeny ke drainu Q8 (J310), resp. k blokovacímu kondenzátoru C15. Třetí vinutí je připojeno k source Q8 a k paralelní kombinaci R19/C28. Je třeba dát pozor na smysl vinutí, pokud jednotka nefunguje dobře, bude nutné prohodit začátek s koncem třetího vinutí.

Pokud by se nepodařilo ani pak dosáhnout vyhovujícího potlačení nežádoucích signálů, bude třeba upravit transformátor - a sice navinout ho kvadofilárně čtyřmi zkroutenými vodiči (4x 16 závitů). Jako třetí vinutí se pak použijí dvě vinutí, u kterých se začátek jednoho spojí s koncem druhého (tento spoj se nikam nepřipojuje) a zbývající začátek, resp. konec tohoto „dvouvinití“ se připojí k source Q8 a k paralelní kombinaci R19/C28. Vtip je v tom, že pak budou reaktance v drainu i source Q8 stejné.

Jednotka MFJ-1026 je tovární výrobek a detaily provedení transformátoru pochopitelně nejsou v dokumentaci uvedeny. Tyto údaje jsem získal po konzultacích a vyčetl v mailing listech, bude tedy nutné experimentovat.

Parametry jednotky by se výrazně zlepšily i použitím odolnějších zesilovačů na místě původních zesilovačů s tranzistory J310. Vhodné by mohly být např. popisovaný Rohdeho zesilovač s tranzistorem 2N5109 nebo modifikovaný Nortonův zesilovač s MRF586.

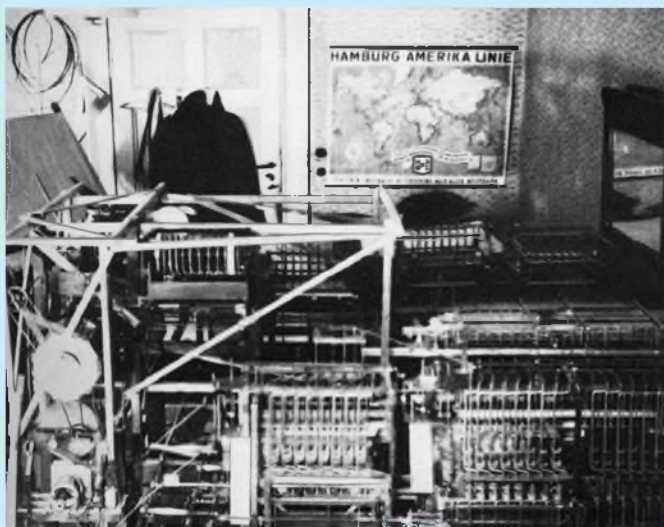
Krátký přehled nejdůležitějších letopočtů, které ovlivnily vývoj v oblasti výpočetní techniky

1623. Wilhelm Schickard (1592 až 1635) ve městě Tübingen (Německo) sestavil šestimístní „kalkulační hodiny“ - stroj, který uměl sečítat a odečítat, přičemž při překročení desítky vždy zazněl zvonek oznamující operátorovi, že má ručně posunout sousední ukazatel. Byl přítelem Keplera. Plány tohoto stroje byly zničeny, ale dvakrát zrekonstruovány téměř člověkem (ve 2. svět. válce byly rovněž ztraceny). Nakonec se podařilo v roce 1960 sestavit fungující repliku tohoto zajímavého stroje.

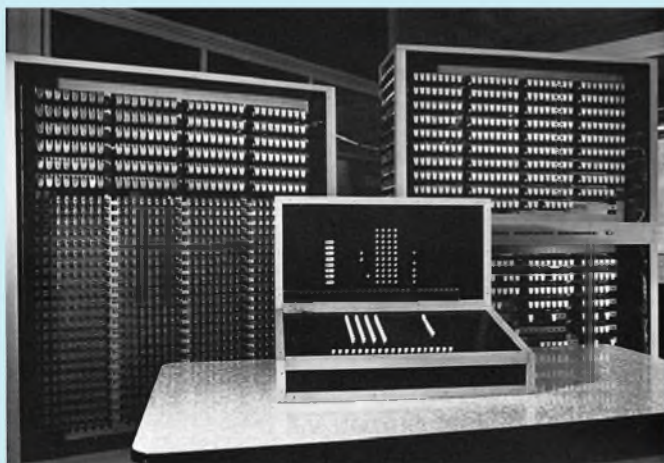
1644 až 1665. Blaise Pascal (1623 až 1662) v Paříži sestavil svůj první pětimístní stroj „Pascaline“. Na rozdíl od Schickarda vyrobil strojů několik, pravděpodobně 10 až 15, z nichž jeden byl dokonce osmimístní, a seznámil s nimi tehdejší společnost. Změnu desítek již nebylo třeba nastavovat ručně. Podle jeho patentu i jiní pak tyto výpočetní stroje vyráběli. Více viz KE 6/2002.

1674. Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646 až 1716) v Lipsku navrhl svůj výpočetní stroj, který byl sice teoreticky v pořádku a uměl i násobit, ovšem po mechanické stránce byl velice složitý, takže se nerozšířil (viz KE 6/2002). Ještě předtím, asi v letech 1668 až 1670, přišel Samuel Morland na zajímavý stroj k počítání anglické měny, která, jak víme, neutilovala desítkovou soustavu.

1820. Francouz Charles Xavier Thomas de Colmar (1785 až 1870), sestavil „Arithmometer“ - stroj, který byl posléze vyráběn ve velkém. Uměl násobit a s pomocí operátora dokonce i dělit. Vyráběl se až do začátku 20. století.



Zuseho počítače Z1 (nahore) a Z2 (dole)



Wilhelm Schickard



Hermann Hollerith

1822. Angličan Charles Babbage (1792 až 1871) vymyslel stroj na řešení diferenciálních rovnic, později s J. Clemen-tem dokonce i stroj na řešení diferenciálních rovnic 2. a 3. řádu. Jeho stroje nakonec byly schopny pracovat až se 40místními čísly, měly paměť atd. Více viz KE 5/2002.

1843. Švéd George Scheutz se svým synem Edvardem Scheutzem začali vyrábět stroj k řešení diferenciálních rovnic 3. řádu, který byl schopen ovládat tiskárnu.

1890. V USA přišli na systém výpočetní techniky, využívající děrných štítků. Jeho „otcem“ byl **Herman Hollerith** (1860 až 1929), který pracoval ve známém institutu MIT v Cambridge. Holleritovy stroje se hojně používaly i u nás ještě v 60. letech minulého století.

1919. W. H. Eccles a F. W. Jordan publikovali klopný obvod (flip-flop), jehož princip byl základem budoucích strojů pracujících v binární soustavě.

1935. Továrna International Business Machines přišla s převratnou novinkou - strojem „IBM 601“ na děrnostítkovém základě, jehož aritmetická jednotka byla řešena soustavou relé a byla schopna vynásobit dvě čísla během jedné sekundy. Stroj byl okamžitě využíván k vědeckým i obchodním výpočtům a vyrobilo se ho přes 1 500 kusů.

1938. Claude E. Shannon (1916 až 2001) publikoval práci zabývající se aplikací Booleovy algebry na reléovou techniku. V tomtéž roce Němec Helmut Schreyer navrhl logické obvody s využitím elektronek a plynem plněných výbojek a pracoval také na prototypu paměťové jednotky využívající tuto technologii. Ve stejném roce Konrad Zuse (1910 až 1995), německý vynálezce, sestavil výpočetní stroj pracující zprvu na mechanickém principu (Z1), později v roce 1941 s reléovou logikou, jehož program byl zadáván pomocí děrné pásky. Pak již následoval Atanasoff se svým výpočetním strojem a Mauchly s Eniacem.

1943. Howard H. Aiken (1900 až 1973) s týmem Harvardské univerzity sestavil plně programovatelný počítač na elektromechanickém principu s pevnou desetinnou čárkou. Stroj vážil 5 tun (!), obsahoval paměti, mechanický registr a aritmetickou jednotku. Právě proto bývá i tento vynálezce označován za otce počítačů.

Mohli bychom pokračovat - přišly polovodiče, magnetické paměti, integrované obvody a mikroprocesory, menší a menší počítače, z nichž ty dnešní, které má dnes většina lidí pracující téměř ve všech oborech lidské činnosti „hlavou“ na pracovním stole, dokáží mnohem více a rychleji, než ty, o kterých byla řeč.

Literatura

[1] Williams, M. R.: A History of Computing Technology, Prentice-Hall, USA 1985.

[2] Internetové stránky: Virtual Museum od Computing a řada dalších článků o výpočetní technice.