

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)

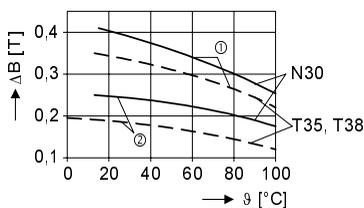


## 19. Impulzní transformátory

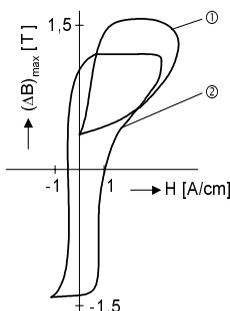
Impulzní transformátory přenášejí obvykle impulzy pravoúhlého tvaru jedno-směrné nebo obousměrné polarity. Slouží k přizpůsobení spotřebičů k tranzistorům, elektronkám apod., někde ke galvanickému oddělení částí zařízení, jako např. u spínacích zdrojů nebo ke změně polarity impulzů. Požadavek na přenos nezkreslených impulzů ovlivňuje výběr magnetických materiálů, požadavky na tvar jader impulzních transformátorů a uspořádání vinutí.

Impulzní transformátory umožňují přenášet impulzy od šíře asi 100 ns. Pro přenos impulzů užších se používají transformátory založené na vlastnostech vedení. Nejvhodnějším tvarem impulzních transformátorů jsou toroidy z feritů i kovových pásků, i když se také používají feritová hrníčková jádra. Pro přenos malých impulzních výkonů jsou vhodné ferity, pro velké výkony kovové materiály. Pro omezení parazitních vlivů vinutí bývá jednovrstvé, takže jádra vzhledem k vinutí působí obvykle robustně. Kritérium pro odvozování rozměrů magnetického obvodu pro transformátory velkých impulzních výkonů je dosažení co nejmenšího jejich objemu a co nejmenší rozptylové indukčnosti. Průřez magnetického obvodu bývá čtvercový. U skládaných obvodů z plechů nebo feritů, volí se jádra, která umožňují dosáhnout velký poměr šířky vinutí k jeho výšce. Je výhodný poměr větší než 4, který přispívá ke zmenšení činitele rozptylu. Pro přenášení malých a středních impulzních výkonů do velikostí kolem 1 kW se používají většinou jádra feritová. Pro větší výkony jádra vinutá z kovových materiálů o tloušťce pásku 0,03 a 0,05 mm. Impulzní transformátor např. se šíří impulzů 5  $\mu$ s a opakovacím kmitočtem 300 Hz, s impulzním výkonem 15 MW má toroidní jádro o rozměrech  $S_j = 5 \text{ cm}^2$ ,  $l_s = 45 \text{ cm}$  a je navinuto z kovového materiálu zn. Hipersil o tloušťce pásku 0,05 mm. (Hipersil je značka amerického magnetického materiálu o složení Fe-Si s magnetickou texturou). Pro nejmenší výkony se používají výlučně toroidní jádra z feritové hmoty o vysoké počáteční permeabilitě – větší než 1000 a nízké remanenci. Pro střední výkony jako např. transformátory s jednosměrnými impulzy pro ovládání tyristorů, kovové materiály hlavně zn. PY65ML a jeho ekvivalentu a takové, u nichž remanence bývá jen 10 % až 20 % z magnetické indukce nasycení a dosahují velkou počáteční permeabilitu.

Pro unipolární impulzy lze nejlépe využít změny magnetické indukce  $B_s - B_r$ , pro bipolární impulzy změny  $B_s + B_r$ . S feritovými jádry podle teploty jádra to bývá prakticky 100 až 250 mT popř. 200 až 400 mT (obr. 19.1), pro jádra z plechů Fe-Si s magnetickou texturou 1,2 T popř. 2,5 T. Proto jsou výhodná pro velké výkony jádra svinutá z pásků. Pro zvýšení změny indukce u impulzních transformátorů s přenosem unipolárních impulzů se používá mezera v magnetickém obvodu jádra, např. hrníčková jádra s mezerou. Pro takový účel jsou vhodná i železoprachová kruhová jádra s permeabilitou od 125 do 550, u kterých je remanence zanedbatelná. Také se používá předmagnetování jádra pomocným vinutím, které je napájeno



Obr. 19.1 Přípustný zdvih magnetické indukce pro některé feritové hmoty Siemens pro impulzní transformátory; 1 – bipolární, 2 – unipolární impulzy.



Obr. 19.2 Hysterezní smyčky pro jádro Fe-Si 0,05 mm. Doba trvání impulzů 5  $\mu$ s,  $f = 300$  Hz (toroid, mat. Hipersil); 1 – unipolární impulzy, 2 – unipolární impulzy s předmagnetováním jádra.

ze zdroje o velkém vnitřním odporu obvykle přes tlumivku. Předmagnetování působí opačně než magnetování unipolárními impulzy. Probíhaná hysterezní smyčka s předmagnetováním a bez předmagnetování pro unipolární impulzy je uvedena na obr. 19.2. Je převzata z (31). Hysterezní smyčky byly zjištěny na toroidním jádru z materiálu zn. Hipersil o tloušťce pásku 0,05 mm při době trvání impulzů 5  $\mu$ s.

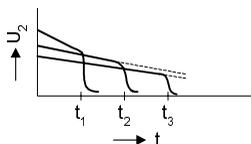
Tvar hysterezních smyček při pravoúhlém průběhu napětí na vinutí pro značný podíl ztrát vířivými proudy u kovových jader má značně odlišný tvar od smyček snímaných staticky.

U impulzních transformátorů lze využít převodu až do 1 : 100. Dále je předepsán tvar přenášených impulzů, přípustné zkreslení jejich tvarů, elektrické napětí na vinutích pro volbu izolace a přípustné oteplení. Splnění přípustného oteplení výkonových impulzních transformátorů je náročným požadavkem, neboť snadněji se dají dosáhnout požadované přenosové vlastnosti transformátorů malých objemů relativně s velkou ochlazovací plochou, vztaženou k objemu jádra, než transformátory s jádry objemnějšími a tím relativně s menší ochlazovací plochou. U feritových jader se musí mimoto uvažovat přípustný ztrátový výkon v jádru a tím přípustné

využití změny magnetické indukce v závislosti na teplotě jádra. Cílem návrhu je určení jádra, jeho materiálu a popis provedení vinutí, počet závitů, průměr vodičů a vzájemné odizolování vinutí.

Přiložené napětí na vinutí vyvolá vzrůst indukčního toku. K vytvoření toku je třeba magnetovací proud, který transformátor odebírá ze zdroje. Vzrůst indukčního toku se děje takovou rychlostí ( $dB/dt$ ), která odpovídá přiloženému napětí.

Pro napětí s pravoúhlým průběhem na cívce se stálou indukčností je vzrůst indukčního toku lineární funkcí času. Rychlost změny magnetické indukce v jádru není neomezená. Je omezena rychlostí dějů pro přemagnetování. Při změně indukčního toku dochází současně k transformačnímu účinku proudu ze zdroje do zátěže a zdroj dodává rovněž proud na vytvoření indukčního toku a na krytí ztrát pro přemagnetování. V primárním vinutí se zjistí součet všech těchto tří složek proudu. Bude-li napěťový impuls trvat déle, dosáhne indukční tok nasycení a indukčnost cívky s jádrem značně poklesne. Vznikne zkreslení tvaru přenášených impulzů. Potřebný další nárůst indukčního toku při nasycení jádra může být zachován jen odpovídajícím vzrůstem magnetovacího proudu. Ten však bude omezován hlavně vnitřním odporem zdroje.



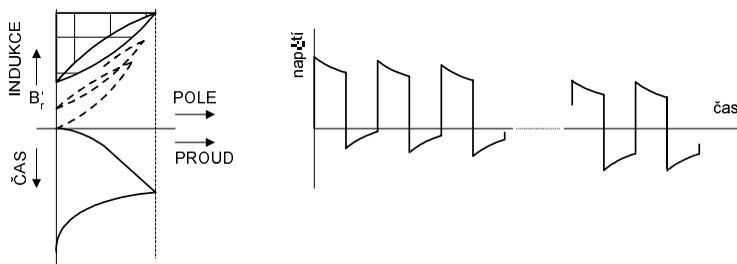
Obr. 19.3 Zjištění maximální přípustné změny magnetické indukce pravoúhlými impulzy.

Při dostatečně dlouhém napěťovém pravoúhlém impulsu na vinutí s  $N_2$  závitů a s jádrem o průřezu  $S_j$ , který je periodicky generovaný zdrojem o nezanedbatelném vnitřním odporu, se na vinutí pozoruje průběh napětí  $U_2$ , schématicky naznačený na obr. 19.3, který od určité doby je značně zkreslen. Od této doby dochází k nasycování jádra. Při snížení napětí pravoúhlých impulzů dojde k nasycování jádra později. Maximální využitelná změna magnetické indukce by se na základě tohoto principu měření zjistila výpočtem

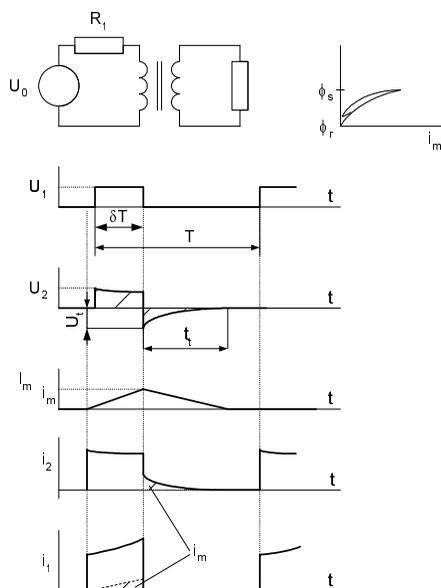
$$\Delta B_{\max} = \frac{\int_0^t u_2 dt}{N_2 S_j}, \quad 19.1$$

kde  $t$  je doba, ve které značně pokleslo napětí na vinutí.

Tento stav, při kterém je jádro nasyceno je však vzdálen normální činnosti impulzního transformátoru, u kterého nasycení nesmí nastat.



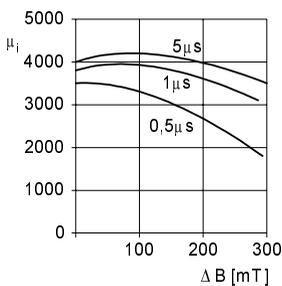
Obr. 19.4 Magnetovací cyklus a průběh výstupního napětí pravouhlých impulzů jedné polarity s plněním  $\delta = 0,5$ , v přechodné a ustálené době.



Obr. 19.5 Schematicky naznačený průběh napětí a proudů na impulzním transformátoru.

Po skončení impulzu magnetická indukce klesne do remanence. Následující napětový impulz způsobí tutéž celkovou změnu magnetické indukce jako impulz předcházející. Po několika impulzech se magnetické poměry v jádru ustálí (silně vytažené smyčky na obr. 19.4). K tomuto ustálenému cyklu náleží průběh magnetovacího proudu, který je uveden na obr. 19.5. S počínající dobou trvání napětového impulzu roste magnetovací proud nejprve prudce, později s menší strmostí, která se však s dobou působení impulzu zvětšuje. Skončí-li napětový impulz, magnetovací proud nezaniká okamžitě. Magnetovací proud z dosažené maximální hodnoty se zmenšuje

je tím, že se uzavírá přes obvodové prvky, které mu tuto cestu umožní. S poklesem magnetovacího proudu se zmenšuje indukční tok. Tím je vyvolána změna polarity napětí na vinutí impulzního transformátoru. Vzniká překmit napětíového impulsu do opačné polarity. Průběhy napětí na primárním vinutí, na sekundárním vinutí a průběh magnetovacího proudu je naznačen na obr. 19.5. V průběhu magnetovacího proudu se nejprve pozoruje strmý nárůst, který přechází do téměř rovnoměrného vzrůstu. V počátečním strmém nárůstu se magnetické jádro ještě nepodílí úplně na vzniku magnetického toku. Vznikající vířivé proudy u jader z plechů odstiňují jádro tak, že tento počáteční indukční tok prochází jen povrchem plechů. Na jeho vytvoření je třeba mnohem větší magnetovací proud, než pro tutéž změnu toku později. Vratné procesy orientace magnetických domén se začínají uplatňovat u feritů za několik desítek nanosekund, nevrátí se až za několik set nanosekund. Rychlost změny magnetické indukce pro ferity může být nejvýše 150 až 200 mT/μs. Např. pro 250 mT a šířku impulsu 5 μs je změna magnetické indukce 50 mT/μs. Tento údaj je velmi významný, neboť při změně pomalejší než tato hranice se uplatní všechny mikromagnetické děje (posuny stěn, přeskoky, stáčení) pro změnu magnetického stavu. Proto hodnota počáteční impulzní permeability je téměř totožná s hodnotou počáteční permeability zjištěné při harmonickém průběhu pole nebo indukce. Při větších rychlostech změny magnetické indukce, počáteční impulzní permeabilita je nižší než počáteční permeabilita (obr. 19.6), protože všechny děje pro změnu magnetického stavu se nemohly uplatnit. Přesněji by se měla uvažovat hodnota počáteční permeability v remanenci, jejíž hodnota je odlišná od hodnoty počáteční permeability. Pro technickou praxi odchylka však u feritů není významná.



Obr. 19.6 Impulzní permeabilita v závislosti na době trvání impulsů. Feritová hmota N30,  $\vartheta = 25$  °C,  $f = 100$  kHz. Unipolární impulsy.

Vodorovně šrafovaná plocha na obr. 19.4 značí energii, kterou dodal zdroj na krytí ztrát a na vytvoření magnetického pole v jednom magnetovacím cyklu. Po skončení napětíového impulsu část energie ve formě elektrické energie se vrací, je-li to obvodově možné, zpět do zdroje nebo se rozptýlí – svisle šrafovaná plocha. Zbytek energie, plocha magnetovací smyčky, kryje ztrátu v jádře. Je-li činitel plnění im-

pulzů  $\delta$  a  $T$  perioda impulzů, je velikost ztrátového výkonu vyjádřená náhradním ztrátovým odporem  $R_p$  při ztrátovém proudu  $I_w$  a při magnetování v mezích nenasycené remanence  $B'_r$  a  $B_r$ .  $B'_r$  je remanence nenasycené hysterezní smyčky.

$$R_p I_w^2 \delta = \frac{1}{T} V \int_{B'_r}^{B_r} H dB \quad 19.2$$

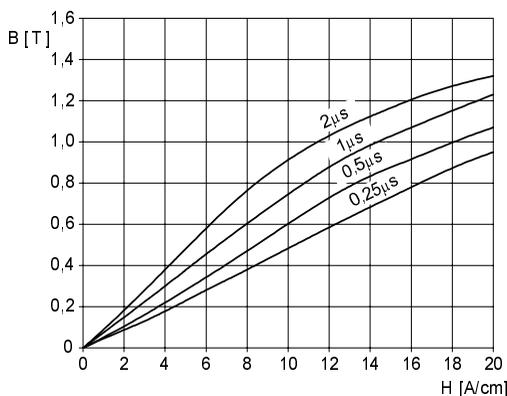
Protože magnetická energie v indukčnosti vinutí, prochází-li jím proud, podle Lenzova zákona udržuje původní směr magnetovacího proudu i po zaniknutí budících napěťových impulzů, uzavírá se magnetovací proud po skončení napěťového impulzu přes zatěžovací odpor a vnitřní odpor zdroje. Zanikající magnetovací proud se projeví překmitem napětí na vinutí transformátoru do opačné polarity. Další unipolární impulz v nezměněném tvaru se může přenášet, až když magnetovací proud dosáhne velmi malé hodnoty. Nedojde-li k tomu, bude se pracovní bod jádra posouvat a změní se tvar přenášeného impulzu. To bude nastávat, bude-li se zkracovat doba periody při zachování šíře impulzu. Výstupní napětí se bude zmenšovat. Bude-li se naopak zvětšovat šíře přenášených impulzů tak, že magnetovací proud neklesne na nulovou hodnotu, pracovní bod se tím bude postupně přesouvat k nasycení jádra a transformátor nebude schopný přinášet impulzy vůbec. Potřebná změna indukčního toku pro periodické napěťové impulzy v ustáleném stavu nebude k dispozici.

Permeabilita materiálu jádra např. při harmonickém průběhu magnetické indukce je definována rov. 2.27. Podobně i pro magnetické materiály, s impulzním magnetováním je definována impulzní permeabilita  $\mu_i$ .

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad 19.3$$

Impulzní permeabilita je definována jako poměr maximální hodnoty změny magnetické indukce a k ní náležející změna intenzity magnetického pole při definovaném časovém průběhu magnetické indukce (nebo časově definovaném průběhu napětí). Pro malé změny magnetické indukce (jednotky mT) se definuje impulzní permeabilita počáteční.

Impulzní permeabilita u magnetických kovových látek je značně závislá na šíři impulzu, jeho amplitudě, na jeho průběhu a na tloušťce plechu, z kterého je jádro impulzního transformátoru sestaveno. Není impulzní permeabilita materiálovou konstantou, ale konstantou vztaženou k určité tloušťce plechu, popřípadě k určitému jádru a době trvání impulzu a jeho amplitudy. Plechy větší tloušťky dosahují nižší impulzní permeability. Tato závislost je způsobena vířivými proudy. Zmenšením tloušťky plechů se zvýší impulzní permeabilita. Pro křemíkovou ocel značky Silectron (výrobek anglické firmy, náš materiál, přibližně ekvivalentních vlastností je materiál zn. Trafoker), lze impulzní permeabilitu pro různé šíře unipolárního impulzu pravoúhlého průběhu zjistit z obr. 19.7, kde ke změřeným změnám magnetické in-



Obr. 19.7 Magnetovací křivky pro různé šíře impulzů. Materiál Fe-Si s magnetickou texturou (tloušťka 0,05 mm). Bipolární impulzy.

dukce je uvedena odpovídající vrcholová hodnota intenzity magnetického pole. Porovná-li se hodnota impulzní permeability feritů z katalogů výrobců feritových hmot pozná se, že hodnoty zjištěné pro doby impulzů delších než  $5 \mu\text{s}$  a malé změny indukce, je možné ztotožnit s počáteční permeabilitou těchto hmot. Teprve pro doby pod  $1 \mu\text{s}$  lze zjistit měřitelné odchylky. U kovových jader, nenaleznou-li se údaje impulzní permeability pro určitý magnetický materiál, jeho tloušťku, dobu trvání impulzu a změnu indukce, je potom pro návrh impulzního transformátoru nutno uskutečnit vlastní měření. Hodnoty jsou značně odlišné od počáteční permeability. Vlastnosti související s mikromagnetickými vlastnostmi – doménovou strukturou – jsou překrývány silným vlivem vířivých proudů. Jsou závislé na změně indukce, šíři impulzů a odchylky jsou tím výraznější, čím je vyšší počáteční permeabilita.

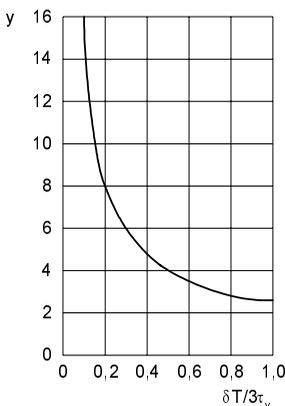
Požadavek přenosu velkých výkonů vede k využívání co největší změny magnetické indukce. Od určité hodnoty změny magnetické indukce však impulzní permeabilita klesá, neboť další vzrůst magnetické indukce se dosahuje neúměrným vzrůstem intenzity magnetického pole. Proto se někdy při velkých rozkmitech magnetické indukce zavádí do magnetického obvodu mezera, která sníží jeho remanenci, zvýší však tím indukční zdvih. Sníží se ale i impulzní permeabilita. Při vhodné velikosti mezery lze najít kompromis. Relativní délka mezery se používá pod 1 %.

U kovových magnetických jader vlivem vířivých proudů se magnetická indukce nepřizpůsobí okamžitě intenzitě magnetického pole, která by odpovídala ustálenému stavu. Vířivé proudy, které jsou způsobeny změnou magnetické indukce, tuto změnu zpomalují. Postupně, jak magnetická indukce proniká z povrchu plechu směrem dovnitř, zvyšuje se jeho permeabilita. To je jednou z příčin toho, že se přechod náběžné hrany impulzu do jeho temene projevuje aperiodickým překmitem. Čím menší vliv mají vířivé proudy, tím menší je tento překmit. Vlivem magnetického po-

vrchového jevu (tím, že indukční tok je vytlačován směrem k povrchu plechu) může dojít k přesycení jeho povrchových vrstev. S přesycením vzroste rozptyl indukčního toku i magnetovací proud. Vzhledem ke střední hodnotě indukce ( $B$ ), která se uvažuje, dosahuje v povrchových vrstvách plechu indukce větší hodnotu ( $B_m$ ). Tato hodnota závisí jednak na době trvání impulsu  $\delta T$  a na časové konstantě vířivých proudů  $\tau_v$ ,

$$\tau_v = 0,2 \frac{\mu_r d^2}{1000 \rho} \quad [I \cdot s, \text{cm}, \square \text{cm}] \quad 19.4$$

Převýšení magnetické indukce ( $y = B_m/B$ ) v povrchových vrstvách vzhledem ke střední hodnotě indukce  $B$ , je pro různé hodnoty poměru  $\delta T / 3\tau_v$  uvedeno graficky na obr. 19.8. Při návrhu magnetického obvodu impulzních transformátorů s jádry složenými z plechu je nutné kontrolovat, aby magnetická indukce  $B_m$  nedosáhla nasycení použitého materiálu.



Obr. 19.8 K magnetickému povrchovému jevu.

Popis vlastností impulzních transformátorů a jejich souvislost s magnetickými materiály se týká přenosu temene impulsu, náběžné hrany impulsu, sestupné hrany impulsu, zpětného překmitu a maximálního opakovacího kmitočtu. Popis vychází z náhradního schématu impulzního transformátoru a z vlastností magnetických materiálů.

Náhradní schéma impulzního transformátoru se neliší od náhradního schématu sdělovacího transformátoru (kap. 4). Při konstrukci impulzních transformátorů je rovněž snahou co nejvíce snížit parazitní vlivy a tím i impulzní transformátor co nejvíce přiblížit ideálnímu transformátoru. Od sdělovacích transformátorů se však impulzní transformátor značně liší provedením, návrhem, hlavně však pracovním rozkmitem magnetické indukce.