Transformátory a cívky -

trocha teorie nikoho nezabije :)

Napsal/a: bernard

Datum zveřejnění: : 1. 01. 2010 v 21:10

Manfred Mornhinweg: Transformátory a cívky
S laskavým svolením autora přeložil Bernard

Můžete potkat mnoho elektroniků, nejen amatérů, ale i profesionálů, kteří jsou s elektromagnetizmem na válečné stezce. Kdykoliv potřebují navrhnout cívku nebo transformátor, propadají tito nešťastníci zoufalství. Nejhorší na tom je, že většinou se tyto ubohé oběti ničím neprovinily, to jen autoři učebnic elektroniky se zřejmě spikli s cílem vysvětlit tyto věci tak zmateným způsobem, že je nikdo nemůže opravdu pochopit! Nebo snad tito autoři sami nemají ponětí o tom, co píší? Nezoufejte, internet vás zachrání! Vysvětlím vám základy jednoduchým a srozumitelným jazykem. Najdete zde většinu informací nezbytných pro návrh elektromagnetických částí vašich elektronických zařízení.

Veličiny a jednotky

První jednotkou, kterou budeme používat, je Weber, psaný jako Wb. Toto je oficiální jednotka pro magnetický tok Φ (fí). Kdybyste připojili smyčku drátu na zdroj konstantního napětí 1 V, spolu s proudem tekoucím do smyčky začne narůstat i magnetický tok uvnitř této smyčky drátu a přesně za 1 s dosáhne hodnotu 1 Wb. Uvědomte si, že toto platí bez ohledu na velikost nebo tvar smyčky, a dokonce i bez ohledu na to, jaký druh materiálu se nachází uvnitř smyčky! Formálně pro definici weberu vyjdeme ze vztahu:

$\Phi = U \times t$; a tedy: $[Wb] = [V \times s]$

Já ale dávám přednost verzi této rovnice, která bere do úvahy i počet závitů cívky a je proto praktičtější. Takže toto bude jedno z našich základních pravidel:

{1} $\Phi = U \times t \div N$

což znamená, že změna magnetického toku Φ [Wb] je daná součinem napětí U [V] a času [s], děleným počtem závitů cívky. Toto je jeden z nejmocnějších a nejužitečnějších vzorců, které máme. Pokud dokážeme sevřít magnetický tok tak, aby protékal přes určitou plochu S, pak můžeme hovořit o plošné hustotě tohoto toku, jinými slovy o magnetické indukci B. Její jednotkou je Tesla, psanou jako T, a její definice je jednoduchá a jasná:

{2} $B = \Phi \div S$ $\quad [T] = [Wb \div m^2]$

Mluvit o čtverečních metrech v elektronice může vypadat poněkud ujeté od praxe, neboť používáme díly, které mají průřezy spíše v řádu čtverečních centimetrů. Ale prosím, věřte mi, že připustit takové "nepraktické" jednotky je mnohem praktičtější než používání desítek různých konverzních konstant! Používání základních jednotek má velkou výhodu v tom, že žádné konverzní konstanty nejsou absolutně zapotřebí.

Základní charakteristikou každé cívky je její indukčnost L. Měří se v Henry, psáno jako H, a její definice je následující:

{3} $L = U \times t \div I$ $\quad [H] = [V \times s \div A]$

nebo, slovy řečeno, jeden Henry je velikost indukčnosti, která umožní vzrůst proudu o jeden ampér při připojení cívky na napětí 1 V po dobu 1 s. Tato rovnice je také velmi užitečná pro naše účely. A nyní si můžeme začít hrát! Můžeme sloučit rovnice {1} a {3} a získat:

$L = \Phi \times N \div I$; [H; Wb, A]; počet závitů N je číslo bez své jednotky.

Takové početní konverze jsou užitečné, poskytují nám možnost výpočtu nějaké hodnoty, kterou jsme jinak nevěděli zjistit!

Ale pojďme teď na nějaké praktické věci.

Návrh síťových transformátorů

Zatímco téměř každý elektronik ví, že poměr napětí transformátoru závisí na transformačním poměru závitů, před nováčky vyvstává většinou otázka: "Kolik závitů na 1 V musím použít ???"

Je to velmi jednoduché. Máte železné jádro a chcete proň zhotovit vinutí. Nejdřív změřte plochu jádra, kterou poteče magnetický tok. Řekněme, že střední sloupek EI jádra je 2 cm široký a celý svazek dobře stlačených plechů měří 3 cm. To vám dává 6 cm^2, neboli 0,0006 m^2 plochy průřezu.

Nyní se musíte rozhodnout, jak velkou indukci si můžete dovolit u svého jádra. Na nízkých frekvencích, jak je to u síťových transformátorů pravidlem, limitujícím faktorem je nasycení jádra. Nejméně náročné transformátorové plechy snesou magnetickou indukci 1 T, ale běžnější hodnoty jsou 1,2 nebo 1,3 T, a dobré magneticky orientované materiály mohou pracovat až do indukce 1,6 nebo dokonce 1,7 T. Pokud nevíte jistě, jaký máte materiál, radši počítejte s hodnotou 1 T, což bude bezpečnější volba. Pro tento příklad předpokládejme, vaše jádro je dost dobré na to, aby sneslo hodnotu 1,2 T.

Při použití vzorce {2} se zdá, že maximální magnetický tok musí být omezen na 0,00072 Wb. Ale pozor, než budete pokračovat, na chvíli se zamyslete! Už od vzorce {1} hovoříme o velikosti změn magnetického toku. A železné jádro může být magnetizováno v obou smyslech. Takže celková změna magnetického toku, od nejmenší negativní (-0,00072 Wb) po maximální pozitivní (+0,00072 Wb), může být 0,00144 Wb! S tímto poznáním použijeme vzorec {1}, a vycházejíce z nominálního síťového napětí 230 V, 50 Hz, můžeme dosadit:

$0.00144\ Wb = 230\ V \times 0.01\ s \div N$

a počet závitů primárního vinutí bychom dostali:

$N = 230V \times 0.01s \div 0.00144Wb = 1597$ závitů.

Jednoduché, že? Ve skutečnosti to, co jsme teď uvedli je příliš jednoduché na to, aby to byla pravda. Je tam i další faktor, který jsem zatím přeskočil. To, co bylo právě uvedeno by byla pravda, kdyby síťové napětí 230 V mělo obdélníkový průběh! Ale popravdě řečeno, napětí je sinusoida, která má 230 V efektivní hodnotu, přičemž její střední hodnota je mírně odlišná. A změna magnetického toku závisí na střední hodnotě napětí, nikoliv na efektivní! Takže musíme zavést malý korekční faktor, který je odvozen z průběhu funkce sinus. Místo toho, abych obtěžoval s exaktní matematikou, doporučuji vám jednoduše použít recept z mé kuchařské knihy: 11% v náš prospěch! Takže nám postačí jen 1439 závitů!

Odkud pochází těch 0,01 s, ptáte se? Zamyslete se znovu. Změnit tok z minimální negativní na maximální pozitivní hodnotu se uděje během jedné půl-periody. A při frekvenci 50 Hz trvá jedna půl-perioda 0,01 s.

Všechny tyto úvahy můžeme shrnout do jednoduchého finálního vzorce, platného pro výpočet

závitů všech vinutí a cívek s harmonickým napětím:

{4} $N = U_{ef} \div 4{,}44 \div S \div B \div f$ [V, m^2, T, Hz]

Konstanta 4,44 nevznikla nějakou konverzí jednotek, ale ze součinu 2 × 2 × 1,11. Jedna z těch "2" je tu proto, že celková změna (rozkmit) magnetického toku je dvakrát vyšší než jeho maximální hodnota (a tak můžeme dosadit maximální hodnotu nasycení jako vstupní údaj), druhá "2" odráží dvě půlperiody v každém celém cyklu (jednotka Hertz se vztahuje na celé cykly), a "1,11" upravuje dosazenou efektivní hodnotu na velikost střední hodnoty napětí sinusového průběhu.

Výkon transformátoru

Další otázkou, kterou často slyším, je: Jaký výkon dokáže transformátor určité velikosti přenést? Pojďme to analyzovat.

Magnetický tok v jádře je závislý na napětí připojeném k vinutí transformátoru, na frekvenci, ale NE na proudu, který transformátor aktuálně dodává! No ano, je tam malá závislost způsobená vlivy reálných okolností: Čím víc odebíráme proudu, tím větší úbytek napětí způsobuje odpor vinutí, a to mírně snižuje skutečné střídavé napětí na indukčnosti vinutí, a snižuje tak ve stejném poměru magnetický tok. Ale můj názor je, že jádro transformátoru se svými magnetickými vlastnostmi nepodílí na omezování dodávaného výkonu. Toto omezení pochází od vinutí a má dvě podoby: jednou z nich je pokles napětí, který je úměrný proudu do zátěže a může dosáhnout takové hodnoty, že napětí už není dostatečné pro napájení vašeho zařízení; a druhou je oteplení. Jak proud zátěží stoupá, ztrátový výkon ve vinutích narůstá kvadraticky, a pokud odebíráte přílišný výkon z transformátoru dost dlouho, ten nakonec může shořet.

Z toho, co tu bylo právě řečeno vyplývá, že velikost přenášeného výkonu přece jen podstatně závisí na velikosti průřezu jeho magnetického obvodu (protože pro větší průřez vychází méně závitů, což umožňuje použít tlustší drát), a také na velikosti průřezu okénka pro vinutí, neboť do tohoto prostoru se musí všechna vinutí vtěsnat. Ale neznáme žádný lineární vzorec ohledně závislosti přenášeného výkonu na velikosti těchto dvou průřezů! Jak roste rozměr transformátoru, roste i délka dráhy pro odvod tepla, a tak jeho výkonová zatížitelnost roste pomaleji než součin uvedených ploch.

Aby se vám vše úplně vyjasnilo, zdržím se dalších dohadů a zvu vás k provedení skutečného výpočtu: Pro dané železné jádro zjistíte potřebný počet závitů, pak s ohledem na prostor pro ně k dispozici vypočítáte průřez drátu, a z měrného odporu mědi 1,75•10-8 Ω.m zjistíte celkový odpor vinutí. A můžete vycházet z toho, že pro menší transformátory se maximální ztrátový výkon ve výši 10% (5% v každém vinutí) považuje za přijatelný. To by vám mělo umožnit vypočítat výkon, jaký můžete bezpečně odebírat z daného transformátoru, pokud máte jeho geometrické údaje potřebné pro tento výpočet! Není k tomu zapotřebí nic víc, než matematika na úrovni základní školy.

Ale no tak, nekřičte! Jenom klid, ať to tedy vidíte černé na bílém, dořešíme spolu jeden příklad! Předpokládejme, že jádro uvedené výše, se 6 cm^2 průřezu sloupku, má k dispozici pro vinutí plochu okénka 3 cm^2 , a že průměrná délka závitu je 13 cm. Plochu okénka rozdělíme rovnoměrně mezi primární a sekundární vinutí. A budeme předpokládat, že 40% plochy zabere čistá měď, zbytek je izolace, vzduch a jinak nevyužitá plocha. To přibližně odpovídá praktickým poznatkům, a dává nám to 0,6 cm^2 plochy mědi pro každé vinutí. Na 1439 primárních závitů mi vychází 0,025 mm^2 na jeden závit, a celková délka drátu bude 187 m. Číslo uvedené jako měrný odpor mědi se týká kvádru z mědi o rozměrech 1 m každé jeho strany. Ale drát našeho vinutí má průřez pouze 0,000000025 m^2 a délku 187 m. Takže jeho odpor je:

0,0000000175 Ω.m × 187 m ÷ 0,000000025 m^2 = 131 Ω.

Když připustím 5% ztrát pro jednotlivá vinutí, pro 230 V 5% je 11,5 V. Teď prostě použiji Ohmův zákon, a maximální primární proud vyjde 11,5 V/131 Ω = 88 mA, který vynásobený těmi 230 V

zhruba dává maximální příkon 20 VA pro tento transformátor.

Cool, že? 

Všimněte si, že existující magnetizační proud se tu neuvažuje. Možná řeknete, že i když je to jen 10% nebo 20% z maximálního proudu, mělo by se s ním počítat! Pokud to řeknete, jste úplně vedle. Magnetizační proud je o 90° fázově pootočen oproti transformovanému zatěžovacímu proudu, a tak, i když je to třeba 20% zatěžovacího, vektorový součet těchto dvou je velmi blízko k zatěžovacímu proudu samotnému. Přihlížet na takové malé rozdíly zkrátka za to nestojí.

Transformátory spínaných zdrojů

Předcházející kapitolu lze použít téměř v plném rozsahu výši i pro návrh transformátorů pro spínané zdroje, pracující na vyšších frekvencích. Narazíme jen na některé praktické rozdíly, o kterých se nyní zmíním.

Jedním je, že při frekvencích mnohem vyšších než několik stovek Hz saturace již přestává být limitujícím faktorem pro stanovení maximálně dovolené indukce. Důvodem je, že ztráty v magnetickém materiálu jsou tak velké, že hustota toku musí být mnohem nižší než je limit pro nasycení, jenom kvůli udržení ztrát na přijatelné úrovni!

Nevyhnutně potřebujete údaje výrobce jádra, abyste určili, jaká hodnota indukce je přijatelná. Abyste získali přibližnou představu, uvažujme nejdříve s feritovými materiály, které se nejčastěji na těchto frekvencích používají. Ferity mívají hodnotu nasycení okolo 0,3 až 0,4 T, toto bude tedy nejzazší hranice. U feritových jader typicky používaných u výkonových zdrojů při 25 kHz budete muset držet indukci pod 0,15 T, a při 100 kHz pod 0,05 T. Ale hodně také záleží na velikosti jádra. Větší jádro bude muset pracovat při nižší hustotě toku, aby se zabránilo přehřátí.

Transformátory spínaných zdrojů obyčejně fungují při buzení obdélníkovým průběhem napětí, což znamená, že ve vzorci {4} nemůžete použít 11% "harmonický faktor". A potom, v mnohých případech nedochází k střídavé přemagnetizaci jádra, ale jen k rozkmitu magnetického toku mezi nulovou hodnotou a maximem pouze jedné polarity! Zkrátka, budete muset pochopit funkci obvodu, pro který transformátor navrhujete a s použitím své šedé kůry určit, který z faktorů "2" ve vzorci {4} použít, pokud vůbec nějaký. Pro všechny ostatní souvislosti je výpočet stejný jako u síťového transformátoru.

Nebuďte překvapeni, když vám vyjde velmi málo závitů. Ve skutečnosti je to docela běžné, že na primární vinutí 300V ve výkonovém spínaném zdroji vychází jen 10 nebo 20 závitů!

Širokopásmové VF transformátory

Možná jste už viděli feritové transformátory často používané na výstupech polovodičových výkonových zesilovačů pro rozhlasové frekvence. Vypadají jako dva feritové stohy, bok po boku, se dvěma měděnými rourkami do nich vloženými, jež tvoří jeden závit primárního vinutí. Skrze tyto měděné trubky je provlečeno několik závitů izolovaného drátu, které tvoří sekundární vinutí. Dovolte mi použít takový transformátor jako příklad dalšího návrhu.

Naším hypotetickým příkladem bude 100 W push-pull zesilovač pro pásmo 1,8 až 30 MHz, napájený ze 13,8 V, jakých jsou miliony každodenně používané radioamatéry a všemi druhy komerčních služeb.

Každý tranzistor koncového stupně může stáhnout svůj konec primárního vinutí transformátoru

docela blízko k potenciálu země, ale ne úplně, vzhledem k jeho saturačnímu napětí. U vf tranzistorů je typicky saturační napětí asi 1V, takže je rozumné předpokládat, že tranzistory mohou dosáhnout celkový rozkmit ±12,8 V, což je 25,6V vrcholové hodnoty na primární straně, anebo 18 V_{ef}. Na druhé straně, od sekundární části se očekává VF výkon 100 W na zátěži 50 Ω, tedy napětí 70,7 V. Z toho nám vychází poměr napětí (a i závitů) asi 3,9. Tím, že máme jeden primární závit a můžeme realizovat pouze celočíselné poměry, zvolíme 4 závity sekundární. Důsledkem této situace je, že při výstupním výkonu 100 W tranzistory budou budit primár napětím 17.67V_{ef},, neboli 25V rozkmitem mezi nimi. Takže při rozkmitu 12,5 V od napájecího napětí máme rezervu 1,3 V pro saturaci a pokles napájecího napětí. Zatím nám to jde celkem dobře.

Při 1,8 MHz, což je naše nejnižší frekvence, typický ferit lze bezpečně sytit asi do 0,012 T. Máme pěkný, čistý sinusový průběh, takže můžeme použít rovnici {4}:

1 závit = 17, 7 V ÷ 4,44 ÷ S [m^2] ÷ 1800000 Hz ÷ 0,012 T

nebo, po přeuspořádání:

S [m2] = 17,7 V ÷ 4,44 ÷ 1 závit ÷ 1 800 000 Hz ÷ 0,012T = 0,00018 m^2

Takže potřebujeme celkový průřez 1,8 cm^2. Menší jádro by se přehřívalo při dlouhodobém plném výstupním výkoně, zatímco větší jádro by bylo dražší, ale zas by mělo výhodou z hlediska spektrální čistoty, protože nižší hustota toku znamená také nižší zkreslení! Ale pro tento příklad se přidržme velikosti 1,8 cm^2.

Ještě stále máme co na práci. Pro zjištěný průřez bychom mohli použít dlouhé a tenké rourky feritu, nebo naopak krátké a tlusté. A můžeme si vybrat mezi několika různými typy feritových materiálů! Abychom zúžili možnosti výběru, podívejme se, jaká je potřeba indukčnosti transformátoru. Pravidlem bývá, že transformátor by měl vykazovat takovou dostatečně vysokou vlastní indukčnost, aby se neprojevila při paralelním spojení se zatěžovacím odporem. Kvalifikovaný odhad říká, že reaktance této magnetizační indukčnosti by měla být aspoň desetinásobkem hodnoty zatěžovacího odporu. Můžete si vybrat, zda chcete počítat na straně 4 závitů se zátěží 50 Ω (sekundární strana), nebo pro 1 závit a 3,1 Ω (primární strana). Výsledek bude stejný. Vyberu si primární stranu. Reaktance indukčnosti se vypočte jako:

X L = 2 × π × f × L [Ω; Hz, H]

A tak nám vyjde L = 31 Ω ÷ 2 ÷ π ÷ 1800000 Hz = 0,0000027 H

Potřebujeme tedy primární indukčnost 2,7 µH, abychom splnili pravidlo 10-násobku reaktance transformátoru oproti odporu zátěže. Teď musíme použít údaje výrobce a z tabulek vybírat vhodná jádra. Pro tento příklad budu používat katalog Amidon.

Zkusme běžně používané jádro FT-50-43. Tento toroid má 0,133 cm2 průřez. Dva sloupky složené ze 7 jader by splnily požadavku na hustotu magnetického toku, tedy indukci B. Jeho konstanta AL je 0.52µH na mocninu závitů, takže 14 jader s jedním závitem by nám dalo 7,3 µH, několikrát víc, než je zapotřebí. Vzhledem k tomu, že širokopásmové zesilovače mají tendenci kmitat na nízkých frekvencích, kde tranzistory mají velmi vysoký zisk, nemusí to být dobrý nápad poskytnout výstupní výkon při nižších frekvencích, než je nutné! Zkusme jiný typ jádra.

Feritový materiál 43 má relativní permeabilitu 850. Jádro stejné velikosti, ale s permeabilitou pouze cca 330 by bylo výborné. Amidon ale nedodává žádné jádro v této velikosti s permeabilitou blízko té, jaká by se hodila ... No, nemůžete všechno získat jen tak zdarma !  Nižší permeabilita další jader dostupných z Amidonu ve velikostech použitelných pro tento projekt je 125, a to už je příliš nízko ... Takže se budeme muset držet materiálu 43. Podívejme se, co se s tím dá dělat.

K dispozici je jádro FT-82-43, vyrobené ze stejného materiálu. Je mnohem tlustší, má průřez 0,25 cm^2 a AL hodnota je docela blízko té, kterou mělo předešlé jádro: 0,55 µH na mocninu závitu. Dva sloupy po čtyřech jádrech by poskytli větší průřez než je nutné, a při indukčnosti 4,4 µH. To by mohlo být použitelné řešení, a poskytuje také více prostoru pro vinutí.

Na vyšších frekvencích bude magnetická indukce nižší, takže stále zůstane pod hranicí materiálu v celém rozsahu frekvencí. Poměr indukční reaktance k zatěžovacímu odporu se zlepšuje se stoupající frekvencí, ale na nejvyšších frekvencích se zase mohou uplatnit parazitní kapacity, takže je dobré i toto zvážit při návrhu zesilovače.

Akumulace energie v magnetickém jádře

Víte, kolik energie se do cívky ukládá? Je to definováno na pohled stejným vzorcem, pocházejícím z dob staré dobré newtonovské fyziky: „energie se rovná jedna polovina hmotnosti krát rychlost na druhou!“

{5} $W = 1/2 \times L \times I^2$ [J; H, A]

Energie je vyjádřena v joule (J), L je indukčnost v Henry, přičemž proud I se vztahuje k té hodnotě, která způsobuje magnetizaci jádra. U transformátoru tento proud musí být počítán jako proud zbývající po odečtení všech protiproudů, jako je primární a sekundární zatěžovací proud, při respektování příslušného počtu závitů. Stručně řečeno, tento proud je magnetizačním proudem.

Ve většině typických transformátorových aplikací tento efekt ukládání energie není vlastně žádoucí, ale je to nevyhnutný vedlejší účinek. Ale existují aplikace, které dokáží dobře využít efekt tohoto skladování! Jedním z velmi důležitých příkladů je fly-back topologie spínaného zdroje, tedy blokujícího měniče. Ve své podstatě takovéto zdroje nejdřív ukládají energii přicházející z primárního vinutí, aby ji zase poslaly dál sekundárním obvodem - často s napětím, které nesouvisí s počtem závitů! Tím, že primární a sekundární proudy netečou ve stejnou dobu, nemusí ani platit, že poměr napětí se musí rovnat poměru závitů!

Dejme tomu, že budeme dělat spínaný zdroj pomocí tohoto principu. Chceme mít 13,8 V na výstupu, přičemž vstupní napětí by mělo být 110 nebo 220 V střídavých. Logický přístup je použít v tomto případě primární usměrňovač, který může být nakonfigurován jako most pro 220V, nebo jako zdvojovač napětí na 110V, takže dostaneme usměrněných 300 V v obou případech, a zbytek spínaného zdroje bude stejný bez ohledu na napětí v síti.

Pojďme dále předpokládat, že máme feritové jádro o průřezu 2 cm2, 12 cm střední délku siločáry, vykazující počáteční permeabilitu 2000, s indukcí nasycení 0,35T, a chceme ho použít při frekvenci 100 kHz. Pro navrhování této jednotky potřebujeme ještě jeden údaj: hodnotu AL, která se rovná podílu indukčnosti a mocniny počtu závitů. Pokud se nám nepodaří získat tuto hodnotu z údajů výrobce jader, můžeme ji vypočítat z fyzikálních rozměrů a vlastností feritu, nebo můžeme navinout zkušební cívku a změřit indukčnost, ale rozhodně je nejjednodušší podívat se do katalogu! Dejme tomu, že pro naše jádro je tato hodnota 6 µH na závit na druhou. Což znamená, že 1 závit dá 6 µH, 10 závitů dá 600 µH, a podobně. Hodnoty předpokládané výše jsou pro konkrétní případy celkem typické.

Za účelem snížení napěťového namáhání primárního spínacího tranzistoru přiřadíme 30% času na ukládání energie do magnetického pole a 60% na její „vybíjení“. To umožňuje přenést na výstup energii při poloviční rychlosti klesání magnetického toku a tedy i snížení indukovaného napětí na poloviční úroveň, takže spínací tranzistor pocítí jen 450 V místo 600 V. Také to snižuje hodnotu špičkového proudu na sekundárním usměrňovači na úkor většího proudového dimenzování primárního obvodu a napěťového dimenzování sekundárního obvodu, což nepředstavuje žádný

problém v námi předpokládané situaci. Zbývajících 10% času jsme ponechali jako rezervu pro časové ztráty při spínání, mrtvý čas řídícího obvodu, apod. Při zvolených 100 kHz bude čas na vzrůst magnetického toku 3µs a čas na jeho zánik 6 µs. Nahlédnutím do tabulky dat feritu v katalogu zjistíme, že pro 100 kHz indukce nasycení v jednom směru je omezena na 0,1 T. Uplatněním vzorců {1} a {2} se rychle dopracujeme k těmto výsledkům:

$N = 300\ V \times 0{,}000003\ s \div 0{,}1\ T \div 0{,}0002\ m^2 = 45$ závitů

Ano, 45 závitů nasytí toto jádro na 0,1 T za dobu 3 µs při připojení na 300V. Pěkné a jednoduché. Na sekundární straně potřebujeme 13,8 V, plus asi 1 V pro úbytek na diodě, což je asi 15 V. Můžeme použít stejný vzorec opět, při dosazení patřičných hodnot pro napětí a čas:

$N = 15\ V \times 0{,}000006\ s \div 0{,}1\ T \div 0{,}00002\ m^2 = 4{,}5$ závitů

Líbilo se vám to? Transformační poměr závitů je 10:1, zatímco poměr napětí 20:1, protože poměr časů je 1:2!

Nebojte se použít buď 4 nebo 5 závitů místo necelého čísla. To jednoduše způsobí mírnou změnu časů nárůstu/zániku toku.

A teď, jaký výkon můžeme získat na výstupu takového spínaného zdroje? Ne, nehledejte úvahy, které jsem psal výše o výkonu síťových transformátorů! Zde máme dvě omezení: Jedním z nich je patřičný návrh transformátoru s ohledem na potřebný odvod tepla , ale pak je také funkční omezení vyplývající z principu, které je ještě důležitější: Náš spínaný zdroj funguje s dočasným skladováním energie, a pro každý cyklus je akumulováno jen přesně specifikované množství energie, nesmlouvavě omezující výkon, který může být přenesen!

Podle hodnoty AL předpokládané výše, našich 45 závitů primární vinutí bude mít indukčnost 12 mH. Použitím definice indukčnosti můžeme vypočítat špičkový proud, který bude téct na konci cyklu ukládání:

$I = U \times t \div L = 300\ V \times 0{,}000003\ s \div 0{,}012 = 0{,}075\ A$

Pouze 75 mA! Nevypadá to na nic moc ... Pojďme si spočítat akumulovanou energii podle vzorce {5} pro jednotlivý cyklus:

$W = 1 \div 2 \times L^* I^2 = 1 \div 2 \times 0.012\ H \times (0.075\ A)^2 = 0{,}000034\ J$

Můžete si také vypočítat energii jiným postupem: tím, že proud stoupá lineárně od nuly do 75 mA, jeho průměrná hodnota je 37,5 mA. A při 300 V a 3 µs, to je: $W = 300\ V \times 0{,}0375\ A \times 0{,}000003\ s = 0{,}000034\ J$

Není to hezké, když něco takto do sebe zapadá ...? 

Vzhledem k tomu, že při 100 kHz jsme 100000x za sekundu tyto drobečky energie přenesli na druhou stranu, a že joule je prostě Wattsekunda, skončíme s ubohým výkonem pouhých 3,4 W našeho okouzlujícího spínaného zdroje! Vypadá to jako moc špatné použití jádra takové velikosti, že? Zvlášť když to jádro je výrobcem zařazeno do kategorie "typicky 250W"!

Takže musíme zjistit, jak zvýšit množství energie uložené v jádře. Jestliže zvýšíme indukčnost, pak proud klesne, a proud se podílí na výsledku kvadraticky! Takže to není dobrý nápad. Lepší se zdá snížení indukčnosti, které zapříčiní strmější vzrůst proudu. Tím, že uložená energie závisí lineárně na indukčnosti ale na druhé mocnině proudu, je zřejmé, že pokud snížíme indukčnost, akumulovaná energie se zvýší ve stejném poměru.

Jak to uděláme? Nemůžeme jednoduše snížit počet závitů! Tím bychom se zapletli do osidel rovnice {1}, a způsobili zvýšení hustoty toku na úroveň, která je mnohem vyšší než to, co dokáže ferit snést! Uvědomujete si ten problém ? Musíme snížit indukčnost, ale při zachování počtu závitů, aby byla zachována hodnota hustoty magnetického toku, jinak řečeno magnetická indukce!

Máme velmi jednoduchý nástroj, kterým to udělat: Vzduchovou mezeru! Prostě přinutíme magnetický tok, aby se protlačil přes vzduchovou mezeru tím, že oddělíme obě části jádra do malé vzdálenosti. Důsledkem této vzduchové mezery bude snížení efektivní permeability jádra, což snižuje jeho konstantu indukčnosti AL bez vlivu na jiné parametry. Podívejme se, co se stane, když přidáme do cesty magnetického toku vzduchovou mezeru jen 1 mm, což dosáhneme tak, že obě poloviny jádra oddělíme štěrbinou 0,5 mm:

Magnetický tok bude nyní proudit přes 120 mm feritu s permeabilitou 2000, a přes 1 mm vzduchu s permeabilitou jedna. Představte si, 2000 mm feritové dráhy by mělo stejný magnetický odpor jako náš jediný mm vzduchu! Což znamená, že naše jádro v tomto uspořádání teď má efektivní permeabilitu jen 113 (2000/2120*120), místo bývalé 2000! A z toho plyne, že nová hodnota AL je jen 0,34 µH na mocninu závitu, a současně našich 45 závitů primárního vinutí má nyní indukčnost pouze 0,00069 H. V důsledku toho se primární proud vyšplhá až na 1,3 A a uloží v jednom cyklu energii 0,00058 J, což odpovídá výstupnímu výkonu našeho spínaného zdroje 58 W, a to už vypadá mnohem lépe než těch hubených 3,4 W, získaných bez vzduchové mezery! A to vše je při zachování naprosto stejné úrovně magnetického toku v jádře!

Napadlo vás někdy, že 1 mm tenká vrstva vzduchu může být tak strašně důležitá?? Vaše další otázka by mohla znít, zda je nějaký limit na šířku vzduchové mezery. Jistě, existují dokonce dva limity! Jedním z nich prostě je, že tím jak zvyšujete množství uchované energie a tedy i přenášený výkon, současně také zvyšujete ztráty ve vinutí. V určitém bodě dorazíte ke hranici tepelných ztrát ve vinutích stejně, jako u obyčejného síťového transformátoru. A tak velikost vzduchové mezery bývá návrhářem zvolena jako vhodný kompromis. Ale je tu ještě další problém: Tím, že se sníží efektivní permeabilita, klesá i vazba mezi vinutími. Transformátor začne produkovat silné rozptylové pole, způsobené zvětšením rozptylové indukčnosti, co může vést ke zničení výkonových tranzistorů a diod, a kvůli této hrozbě je potřebné použít dodatečné tlumící obvody. V některých případech se musí konstruktér spokojit s menší vzduchovou mezerou, i když z hlediska oteplení vinutí by si mohl dovolit víc. Vždy jsou však vhodná a žádoucí opatření v provedení transformátoru pro minimalizaci problémů s volnější vazbou mezi vinutími: prostřídání primárního a sekundárního vinutí, někdy je možné vinout je bifilárně; a často je užitečné přidat hrubou měděnou fólii okolo celého zkompletovaného transformátoru , která vytvoří zkratovaný závit. Takovýto zkrat zase bude snižovat celkový externí tok (ideálně až na nulu) a zabezpečí, aby tok uvnitř cívky byl stejný jako okolo ní (v bočních ramenech jádra), což zlepší vzájemnou vazbu.

V mnoha případech je lepší použít materiál jádra s nižší permeabilitou, například z práškového železa. Náš výše navržený transformátor by se choval téměř stejně, kdybychom použili jádro s permeabilitou 113 a bez vzduchové mezery, ale dosahoval by těsnější vazbu a produkoval menší rozptylový tok. Na druhé straně je velkou výhodou řešení se vzduchovou mezerou, že se konstruktér může rozhodnout přesně jakou efektivní permeabilitu chce, aniž by bylo nutné objednávat další jádro!

Tlumivky pro stejnosměrný proud

Jednou z nejhorších věcí, jaké jsem viděl v učebnicích elektroniky je, že uvádějí různé vzorce pro střídavé a stejnosměrné chování cívek. Toto je celé naprostý nesmysl! Není žádný podstatný rozdíl funkce při střídavém a stejnosměrném proudu. V daném okamžiku střídavého průběhu máte okamžitou „stejnosměrnou“ hodnotu, a v aplikaci pro stejnosměrný proud se nevyhnete střídavým změnám, minimálně při zapínání a vypínání. Takže můžeme, a dokonce bychom měli použít stejná

dosavadní návrhová pravidla i pro stejnosměrné tlumivky.

Pojďme se podívat, jak se to projevuje v praxi. Jednou z častých úloh je navrhnout tlumivku, která musí vykazovat určitou indukčnost, přičemž bude schopna vést určité množství proudu bez dosažení stavu nasycení. Uvědomte si, že u stejnosměrných aplikací je omezení hustoty magnetického toku vždy dáno dosažením hodnoty indukce nasycení. Pamatujete si, co jsem napsal předtím? Při vysokých frekvencích je limit dán ztrátami v jádře, a při nízkých frekvencích nasycením jádra. A stejnosměrný proud je prostě velmi, velmi nízká frekvence ... Předpokládejme, že potřebujeme zhotovit cívku 100 µH, které bude schopná přenést nejméně 10 A proudu bez nasycení. Dejme tomu, že máme k dispozici toroidní jádro vyrobené z práškového železa, který má průřez 1 cm^2 a střední délku silokřivky 10 cm. Jeho permeabilita je 75, a nasycení začíná při 0,5 T. Hodnota AL tohoto jádra je 0.08 µH na mocninu závitu.

Z hodnoty AL sami dokážeme snadno spočítat, že máme zapotřebí 35 závitů . A nyní, jak můžeme vypočítat magnetickou indukci? Přece nevíme, jak velké napětí je připojeno na vinutí tlumivky!

Zamyslete se znovu! Přece musí být přiloženo nějaké elektrického napětí, aby proud vůbec začal téct! Řekněme si, že bychom na naši tlumivku 100 µH připojili 1 V, a trvalo by tedy 1 ms do dosažení hodnoty proudu 10 A, což získáme ze vzorce {3}. Takže teď už máme napětí i čas pro dosazení do univerzálního vzorce číslo {1}! Tok bude:

$\Phi = U \times t \div N = 1\ V \times 0.001\ s \div 35 = 0{,}0000286\ Wb$

a výsledná indukce pro jádro s průřezem 0,0001 m2 je 0,286 T! Bingo! Tato tlumivka by mohla ve skutečnosti vést téměř dvojnásobek toho, co vyžaduje naše zadání. Konstruktér snažící se o minimalizaci nákladů by provedl stejné cvičení s jádrem o stupeň menším, které by možná bylo právě postačující na zhotovení 100 µH, 10A tlumivky.

Volba jádra

Existuje nespočet tvarů a velikostí magnetických jader, a pro každé z nich je mnoho různých materiálů! Je dobré seznámit se alespoň zhruba s tím, co je k dispozici.

Materiály:

Nejstarším materiálem je transformátorový plech, zhotovený z křemíkové ocele. Ten se dodává nastřihaný do tenkých plechových dílů, které naskládány do jádra musí být od sebe elektricky izolované, aby se zabránilo ztrátám vířivými proudy. Pouze v čistě stejnosměrných aplikacích je přijatelné použít kusovou ocel nebo neizolované plechy.

Transformátorový plech lze běžně sytit aspoň do 1 T před dosažením saturace, ale i hodnota 1,2 T je ještě přijatelná pro většinu materiálů; některé vyhoví i do 1,5 T a 1,7 T je možná tou nejlepší známkou. Permeabilita těchto materiálů se obvykle pohybuje mezi 2000 až 5000. Slitiny oceli, které umožňují vyšší indukci, mají zpravidla nižší permeabilitu. Ztráty v jádře jsou tak vysoké, že pro kmitočty nad 100 Hz se stávají limitujícím faktorem spíše než hodnota nasycení.

Železo je také používáno ve formě prachu, smíchaného s pryskyřicí a slisovaného do tvarů železových magnetických jader. Permeabilita závisí na obsahu železa ve směsi. Vzhledem k tomu, že i malé množství pryskyřice má větší magnetický odpor než velké množství železa, permeabilita je obvykle velmi nízká: Hodnoty od 2 do 100 jsou typické. Pro zvýšení permeability je velmi důležitá velikost i tvar železných zrn, neboť pro dosažení tohoto cíle je nutná velká hustá zrn v objemu jádra. Účinky nasycení se začínají projevovat dříve než u masivního železa, protože tok má tendenci být vytlačen ze železných částic. Hodnota 0,5 T může být typická, ale v každém případě oblast nasycení

je velmi "měkká", není přesně definován bod, za kterým by ostře došlo k nasycení. Ztráty jsou natolik nízké, že verze tohoto materiálu s nižší permeabilitou jsou použitelné i v rozsahu VF. Tato prachová jádra jsou rovněž vyráběna s jinými slitinami kovů, jako třeba Permalloy; a pro některé případy nabízejí atraktivní vlastnosti.

Ferity jsou nejvšestrannější materiály, jaké máme k dispozici na výrobu magnetických jader. I když k saturaci dochází při nižších hodnotách indukce, typicky 0,3 T, jsou dostupné v obrovském rozsahu permeability: Není těžké najít ferity s permeabilitou pouhých 20, nebo ohromujících 25000! Nezkušený uživatel nedokáže odhadnout magnetické vlastnosti feritového jádra pouze z pohledu naň. I když dvě jádra vypadají úplně stejně, mohou se lišit v řádu 1000x. A proto byste měli přesně vědět, jaký materiál máte, ještě před zahájením svých výpočtů!

Všeobecně řečeno, obvyklé ferity spadají do dvou kategorií: výkonové ferity, používané pro spínané napájecí zdroje, TV jha atd., které mají permeabilitu okolo 2000 a nízké ztráty při frekvencích 20 až 100 kHz; a ferity typu VF, s permeabilitou okolo 100 až 1000, a charakteristikou ztrát, která je dělá použitelnými alespoň do 30 MHz. Ale existuje mnoho typů feritů, která mohou pracovat na mnohem vyšších frekvencích a mají nižší permeabilitu. Hodnoty permeabilit nad 2000 jsou vyhrazeny jádrům pro zvláštní účely, jako jsou širokopásmové transformátory, měniče nebo odrušovací prvky.

Pokud jde o tvary, uvedu jen některé:

Toroidy: Jsou jednoduché, levné, snadné pro návrh, s nízkým rozptylem, necitlivé na rušení, ale nemohou mít vzduchovou mezeru, a navinout 10 000 závitů na toroid není zrovna práce, kterou bych rád dělal.

E-jádra: Velmi vhodná pro většinu aplikací, ale ostré hrany způsobují větší rozptyl.

U-jádra: Mírně levnější a poněkud méně účinná (vzhledem k delší dráze) než jádra E.

Hrnečková jádra: Spojují pohodlí E-jader s odolností vůči rušení toroidů (popravdě řečeno jsou dokonce lepší!), ale jsou dražší. Některá z nich jsou laditelná.

Solenoidy (tyče): Vhodné pro tlumivky. Mají opravdu pořádnou vzduchovou mezeru!  Z tohoto důvodu se nehodí pro transformátory. Vzájemná vazba vinutí by byla ubohá.

EI plechy: To je snad jediný tvar, jaký můžete dostat pro stavbu transformátorového jádra!

Navrhuji vám, abyste si sehnali několik katalogů od výrobců magnetických materiálů, a z nich se dozvíte o dalších 994 tvarech k mání. Snad bych doporučil Amidon Associates, Ferroxcube, Ferrinox (Thomson Composants), SiFerrit (Siemens), TDK, Philips, jen pro příklad. Já dosud používám Amidon, Ferrinox, a jádra ze smetiště. Nejlepší vlastnosti snad mají určité ferity z Japonska.

Na závěr

Toto krátké pojednání o elektromagnetizmu nemůže být považováno za kompletní, bylo však mým cílem soustředit se jen na ty souvislosti, které jsou pro návrh nejdůležitější. Úplně jsem přeskočil takové poznatky z elektromagnetizmu, které podle mého názoru nejsou nevyhnutné pro praktickou činnost. A také jsem přeskočil spoustu praktických doporučení, která jsou užitečná, ale proměnila by tento článek na sadu kuchařských receptů. Pokud máte dotaz, neváhejte a ptejte se. Můj email je na titulní stránce mého webu. Pokud by přišlo hodně dotazů, možná přidám sekci „Otázky a odpovědi“ k tomuto tématu!

Bernardovo doplnění z 11.1.2010:

Ještě se vám může přihodit, že v katalogu nenajdete naši známou jednotku Tesla [T] pro magnetickou indukci, místo ní bude použitá jednotka Gauss nebo kilogauss. Ničeho se nebojte, vydělte číslo s počtem Gaussů ÷10000, případně číslo s počtem kilogaussů ÷10, a máte výsledek v jednotkách Tesla [T].

Použitá literatura:
Manfred Mornhinweg: Transformátory a cívky http://www.ludens.cl/Electron/Magnet.html

S laskavým svolením autora přeložil Bernard.