

Návrh induktoru a vysokofrekvenčního transformátoru

Induktory energii ukládají, zatímco transformátory energii přeměňují. To je základní rozdíl. Magnetická jádra induktorů a vysokofrekvenčních transformátorů se výrazně liší: Induktory potřebují vzduchovou mezeru pro ukládání energie, ale transformátory ne. Transformátory pro blokující měniče musí ukládat energii, což znamená, vlastně to nejsou transformátory, ale ve skutečnosti to jsou induktory s primárním a sekundárním vinutím. Materiálem jader je běžně **ferit**. Dále jsou používány jiné materiály s vysokou permeabilitou a vysokým bodem saturace.

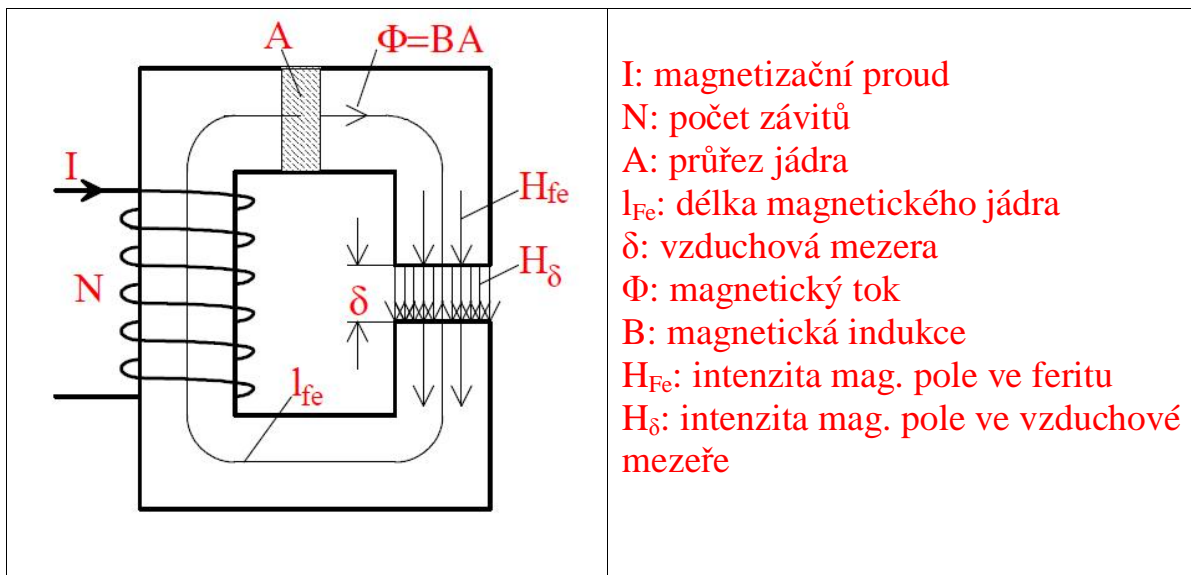
Výpočet induktoru:

Induktor o jisté indukčnosti L a jistém špičkovém proudu \hat{I} může být určen následujícím výpočtem:

Úkolem induktoru je ukládat energii. Energie uložená v induktoru je

$$W = \frac{1}{2} L \hat{I}^2 \quad (1)$$

Tato energie je uložena jako energie magnetického pole ve feritu a ve vzduchové mezeře (viz obr. 1). Čím více energie je třeba uložit, tím větší musí být jádro. Velikost induktoru je přibližně přímo úměrná uložené energii.



Obr. 1: Induktor a jeho magnetické veličiny a mechanické rozměry

Energie pole v induktoru je:

$$W = \frac{1}{2} \int \vec{H} \cdot \vec{B} dV \approx \underbrace{\frac{1}{2} \vec{H}_{Fe} \cdot \vec{B}_{Fe} \cdot V_{Fe}}_{\text{energy in the ferrite}} + \underbrace{\frac{1}{2} \vec{H}_{\delta} \cdot \vec{B}_{\delta} \cdot V_{\delta}}_{\text{energy in the air gap}} \quad (2)$$

Magnetická indukce B je spojitá a ve feritu a ve vzduchové mezeře je zhruba stejná, tj. $B \approx B_{Fe} \approx B_{\delta}$. Intenzita magnetického pole H není spojitá, ve vzduchové mezeře je zvýšena faktorem μ_r v porovnání s feritem. Pokud to dosadíme do rovnice (2) a vezmeme v úvahu, že

$B = \mu_0 \mu_r \cdot H$, $V_{Fe} = l_{Fe} \cdot A$ a $V_{\delta} = \delta \cdot A$ dostaneme:

$$W \approx \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_r} + \delta \right) \cdot A \quad (3)$$

μ_r má hodnotu v rozsahu 1000...4000. Vzhledem k tomu, že délka mag. obvodu l_{Fe} je v porovnání s μ_r zanedbatelná a energie je uložena převážně ve vzduchové mezeře, můžeme pro energii induktoru napsat:

$$W \approx \frac{1}{2} \frac{B^2 \cdot A \cdot \delta}{\mu_0} \quad (4)$$

Protože energie je uložena převážně ve vzduchové mezeře, induktor vyžaduje jistý objem vzduchové mezery pro uložení daného množství energie. Tato energie je dána vztahem (1). Materiál jádra má omezenou maximální magnetickou indukci B . Pro běžné feritové materiály je tento limit cca $B_{max} = 0,3 \text{ T}$. To vede k minimálnímu požadovanému objemu V_{δ} vzduchové mezery:

$$V_{\delta} = A \cdot \delta \geq \frac{L \hat{I}^2 \cdot \mu_0}{B_{max}^2} \quad \text{where } B_{max} = 0,3 \text{ T} \quad (5)$$

Známe-li objem vzduchové mezery V_{δ} , můžeme zvolit jádro o určitém průřezu A a vypočítat šířku vzduchové mezery $\delta = V_{\delta} / A$, nebo můžeme vybrat jádro z databáze feritových jader s pevně danou vzduchovou mezerou.

Počet závitů N může být vypočítán s pomocí magnetické vodivosti A_L :

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad A_L : \text{magnetic conductance} \quad (6)$$

Maximální magnetická indukce B by neměla být vyšší než 0,3 Tesla. Maximální B feritu může být spočítána pomocí datasheetu daného feritového jádra:

$$B = \frac{L \cdot \hat{I}}{N \cdot A_{min}} = \frac{N \cdot A_L \cdot \hat{I}}{A_{min}} \leq 0,3 \text{ T} \quad (7)$$

kde A_{min} je minimální průřez jádra, který najdeme v datasheetu zvoleného jádra.

Výpočet průměru drátu:

Proudová hustota S drátu může být zvolena v rozmezí 2 až 5 A/mm² (v závislosti na velikosti a izolaci, která určuje přenos tepla do okolí induktoru). Na základě toho určíme průměr d drátu:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{RMS}}{\pi \cdot S}} \quad \text{with } S = 2 \dots \underline{3} \dots 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (8)$$

Poznámka překladatele:

Pokud použijeme standardní jádro se vzduchovou mezerou, můžeme z katalogu vyčíst magnetickou vodivost A_L a na jejím základě vypočítat počet závitů podle vztahu (6) na základě známé indukčnosti L . Pokud použijeme běžné feritové jádro bez mezery např. ve tvaru „E“, můžeme sice mezeru také vytvořit, ale ta nám značně ovlivní magnetickou vodivost A_L , kterou musíme vypočítat, jak si ukážeme dále.

Nejdříve se podíváme na závislost indukčnosti L na délce δ vzduchové mezery. Magnetický odpor R_m je převrácenou hodnotou magnetické vodivosti A_L :

$$R_m = 1/A_L = l/(\mu_0 \mu_r S) \quad (9)$$

kde l je délka magnetického obvodu, μ_0 je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita feritu a S je průřez jádra.

Délka l magnetického obvodu se skládá z délky feritu l_{Fe} a délky vzduchové mezery δ :

$$l = l_{Fe} + \delta \quad (10)$$

Magnetický odpor potom můžeme napsat následovně:

$$R_m = R_{mFe} + R_{m\delta} = l_{Fe}/(\mu_0 \mu_r S) + \delta/(\mu_0 S) \quad (11)$$

kde S je průřez jádra.

Indukčnost vypočítáme na základě R_m :

$$L = N^2/R_m \quad (12)$$

nebo na základě A_L :

$$L = N^{2*} A_L \quad (13)$$

kde R_m vypočítáme podle vztahu (11). Vztah (11) samozřejmě platí pouze do určité velikosti vzduchové mezery, kde magnetická indukce v mezeře se přibližně rovná magnetické indukci ve feritu.

Permeabilita vakua je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, relativní permeabilitu μ_r vyčteme z katalogu pro daný materiál jádra.

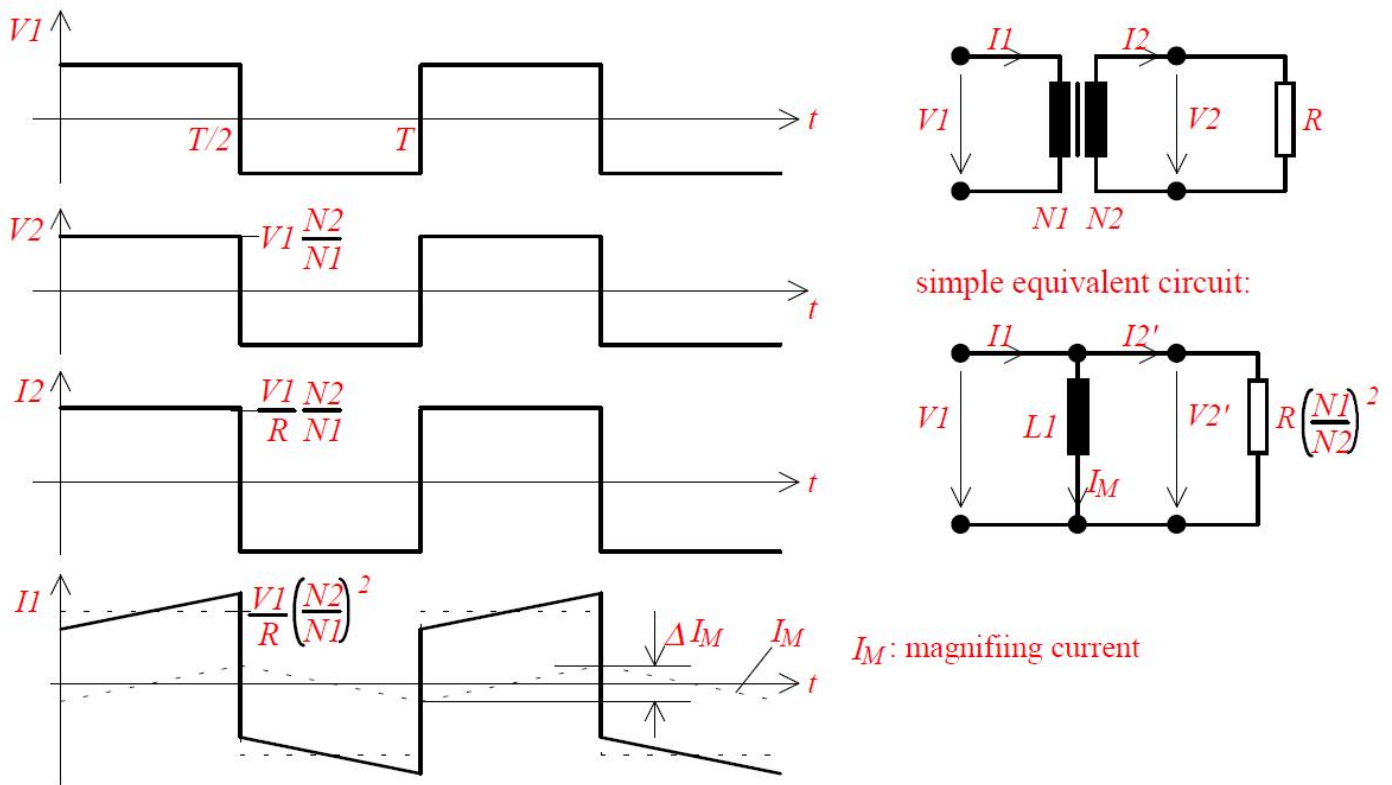
Výpočet vysokofrekvenčního transformátoru

Vysokofrekvenční transformátor přenáší elektrickou energii. Jeho mechanické rozměry závisí na výkonu, který se má přenášet, a pracovním kmitočtu. Čím vyšší je frekvence, tím menší jsou mechanické rozměry. Frekvence jsou obvykle v rozsahu 20 až 100kHz. Materiálem jádra je ferit.

Katalogy příslušných jader poskytují informace o maximálním výkonu, který různá jádra dokážou přenést.

Prvním krokem ve výpočtu vysokofrekvenčního transformátoru je volba vhodného jádra s pomocí katalogu. Velikost jádra je závislá na přenášeném výkonu a pracovním kmitočtu. Druhým krokem je výpočet počtu závitů primárního vinutí. Toto číslo závisí na magnetické indukci v jádře. Počet závitů sekundáru je dán poměrem primárního a sekundárního napětí. Následuje výpočet průměru primárních a sekundárních vodičů, který závisí na efektivní hodnotě proudů.

Výpočet minimálního počtu závitů primárního vinutí:

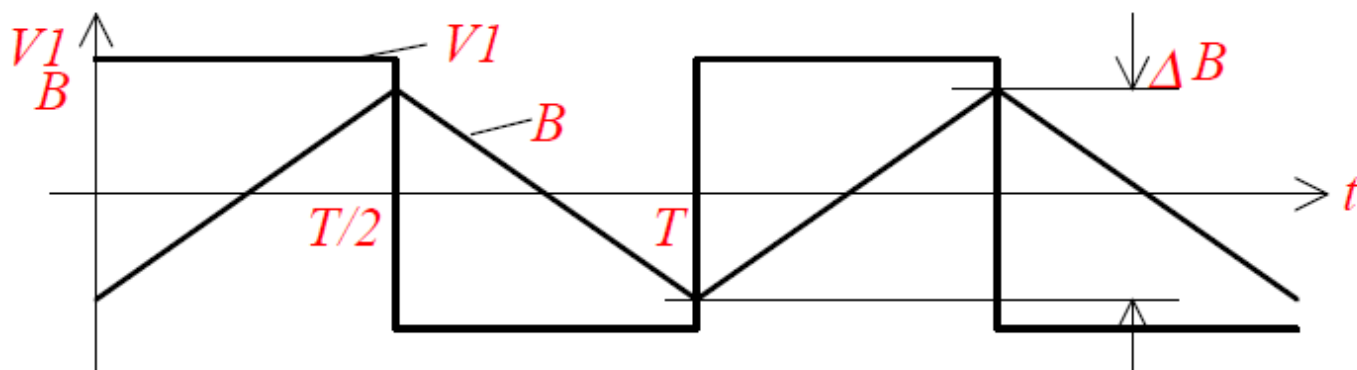


Obr. 2: Napětí a proudy v transformátoru

Napětí V_1 na primární straně transformátoru má obdélníkový tvar. To způsobuje vznik vstupního proudu I_1 , který se skládá ze zpátky transformovaného sekundárního proudu I_2 a magnetizačního proudu I_M (viz obr. 2). Aby byl magnetizační proud I_M udržen na nízké úrovni, je použito magnetické jádro bez vzduchové mezery.

Obdélníkové napětí V_1 způsobuje trojúhelníkový tvar magnetizačního proudu I_M . Magnetizační proud je v podstatě nezávislý na sekundárním proudu I_2 (viz jednoduchý ekvivalentní obvod na obr. 2). Magnetizační proud je přibližně přímo úměrný magnetické indukci B . Vstupní napětí V_1 určuje velikost magnetického toku Φ . Fyzikální vztahy jsou dány Faradayovým indukčním zákonem:

$$V = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$



Obr. 3: Vstupní napětí a elektromagnetická indukce v transformátoru.

Pro transformátor na obr. 2 (z Faradayova vzorce) vyplývá:

$$\Delta B = \frac{V_1 \cdot T/2}{N_1 \cdot A}$$

- Změna ΔB magnetické indukce B závisí na frekvenci $f = 1/T$ a počtu závitů N_1 . Čím vyšší je frekvence a počet závitů, tím menší je změna indukce.

Můžeme vypočítat minimální počet závitů $N_{1\min}$, abychom zajistili, že nebude překročena určitá velikost změny indukce ΔB . Saturační indukce cca $B_{\max} \approx 0,3\text{T}$ (což znamená $\Delta B_{\max} \approx 0,6\text{T}$) nemůže být ve fv transformátorech použita. V protitaktních (push-pull) měničích by takové obíhání hysterezní smyčky při každém cyklu hodin způsobilo nepřijatelné ztráty, tj. generování tepla. Pokud nejsou k dispozici další informace o ztrátách v jádře a tepelném odporu, ΔB by měla být omezena na $\Delta B \approx 0,2 \dots 0,3\text{T}$ pro pracovní kmitočty od 20 do 100kHz. Čím nižší ΔB , tím menší ztráty v jádře.

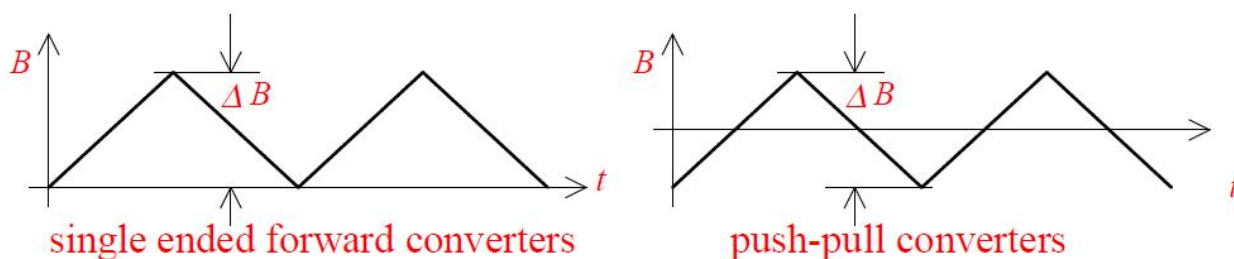
Toto vede k minimálnímu počtu závitů pro N_1 :

$$N_{1\min} \geq \frac{V_1 \cdot T/2}{\Delta B \cdot A_{\min}} \quad \text{where} \quad \Delta B \approx 0,2 \dots 0,3\text{T}$$

kde A_{\min} je minimální průřez jádra. To je v místě, kde je největší indukce B . A_{\min} můžeme najít v datasheetu.

Poznámka:

V propustných měničích s jedním koncem je jádro magnetizováno pouze v jedné polaritě. V protitaktních měničích je jádro magnetizováno střídavě v obou polaritách.



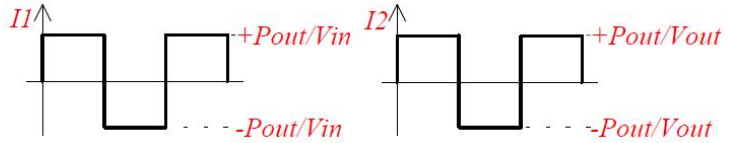
Výpočet minimálního počtu závitů $N_{1\min}$ je u různých druhů spínaných zdrojů stejný.

Výpočet průměru vodičů vinutí:

Průměr vodičů závisí na efektivní hodnotě (RMS) proudu. Proud může být vypočítán pomocí výkonu.

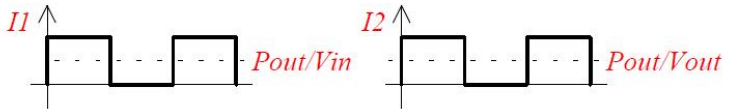
Pro protitaktní měnič platí:

$$I_{1RMS} \approx \frac{P_{out}}{V_{in}} \quad \text{and} \quad I_{2RMS} = \frac{P_{out}}{V_{out}}$$



Pro propustný měnič s jedním koncem platí:

$$I_{1RMS} \approx \frac{\sqrt{2} P_{out}}{V_{in}} \quad \text{and} \quad I_{2RMS} = \frac{\sqrt{2} P_{out}}{V_{out}}$$

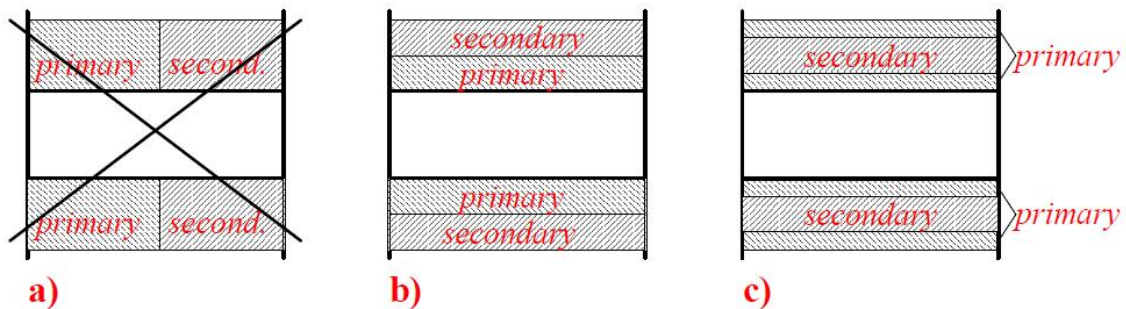


V těchto výpočtech může být magnetizační proud zanedbán. Proudová hustota může být zvolena v rozsahu 2 až 5 A/mm² v závislosti na tepelném odporu izolace a jádra transformátoru. Průřez A_{wire} a průměr d_{wire} mohou být vypočítány následovně:

$$A_{wire} = \frac{I}{S} \quad \text{and} \quad d_{wire} = \sqrt{\frac{I \cdot 4}{S \cdot \pi}} \quad \text{where} \quad S = 2 \dots \underline{3} \dots 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Poznámky:

- 1) Pokud je důležitá těsná vazba, primární a sekundární vinutí by měla být navinuta na sobě. Zlepšení vazby je dosaženo, když jsou vinutí do sebe uzamčena (interlocked). Činitel vazby je špatný v případě a) dobrý v b) a v c) asi 4x lepší než v b).



- 2) Počet primárních závitů by neměl být volen významně vyšší než NI_{min} , jinak se ztráty v mědi zbytečně zvýší vlivem většího odporu vinutí (nehledě na to, že by se vinutí nemuselo vejít do jádra, pp)
- 3) Pro vyšší frekvence a větší průměry drátu by měl být brán v úvahu skin efekt. Pro pracovní kmitočty vyšší než 20kHz a průměry drátu větší než 1mm by měly být použity měděné fólie nebo vysokofrekvenční lanka.

Zdroj: <http://schmidt-walter.eit.h-da.de/>

Překlad: Ladislav Kopecký