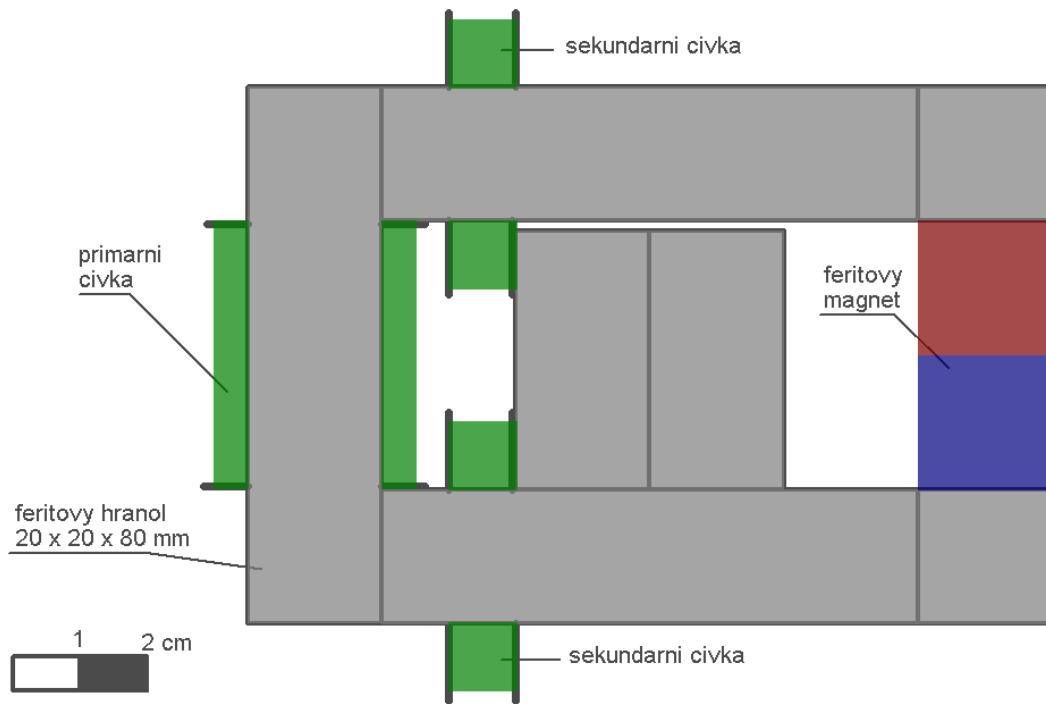


MEG jako blokující měnič s permanentním magnetem

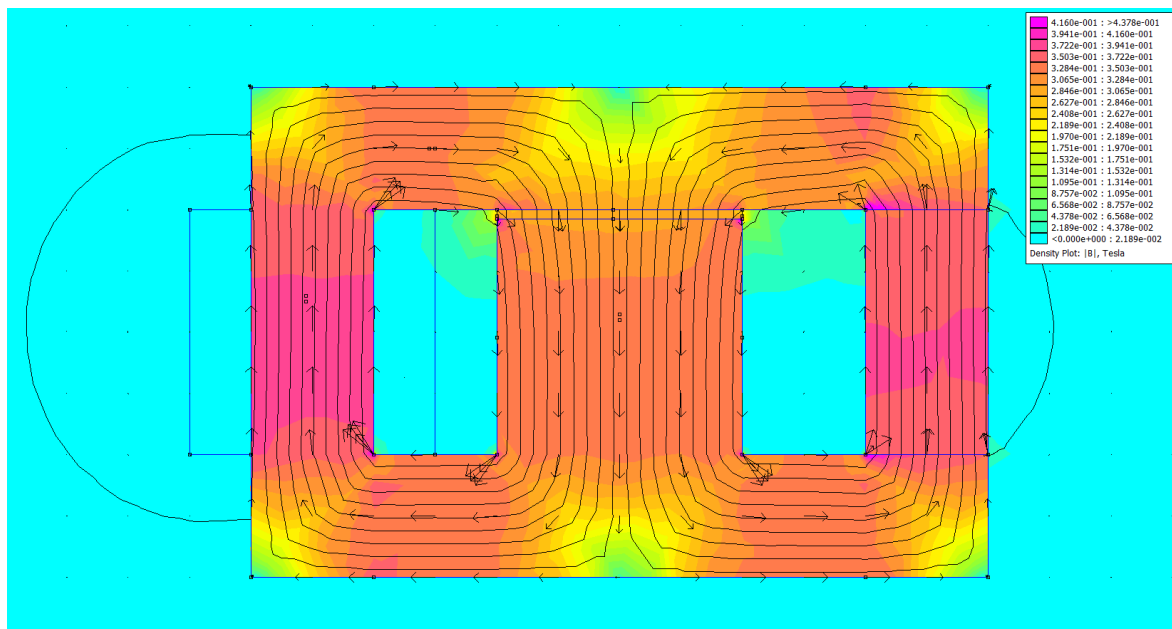
(c) Ing. Ladislav Kopecký, březen 2016

Tento článek navazuje na článek „MEG jako dvojčinný blokující měnič“. Pro pochopení principu je nutné chápat, jak funguje blokující měnič. Zde se tím nebudeme zdržovat, proto čtenáře odkazuji na zmíněný článek a na odkazy v něm. Zatímco v minulém článku byla použita klasická topologie s magnetem uprostřed, zde použijeme trochu jiné uspořádání (obr. 1).



Obr. 1: MEG se vzduchovou mezerou v netradičním uspořádání

Na obr. 1 je z jedné strany budicí cívka, z druhé strany působí permanentní magnet a uprostřed je sloupek o dvojnásobném průřezu se vzduchovou mezerou. Na dalším obrázku máme zobrazeny magnetické siločáry v MEGu, je-li cívka buzena proudem. Všimněte si, že v cívce vektor magnetické indukce směřuje kolmo nahoru, stejně jako v magnetu v pravo, zatímco ve skupku uprostřed směřuje dolů.



Obr. 2: Průběh magnetické indukce v MEGu – cívkou protéká proud

Nyní si ukážeme, jak se siločáry na obr. 2 změňí, když cívkou neprotéká proud. Na obr. 3 můžete vidět, že vektory magnetické indukce v levém sloupku nyní směřují dolů. Jaký to má význam? Víme, že velikost indukovaného napětí je dána vztahem

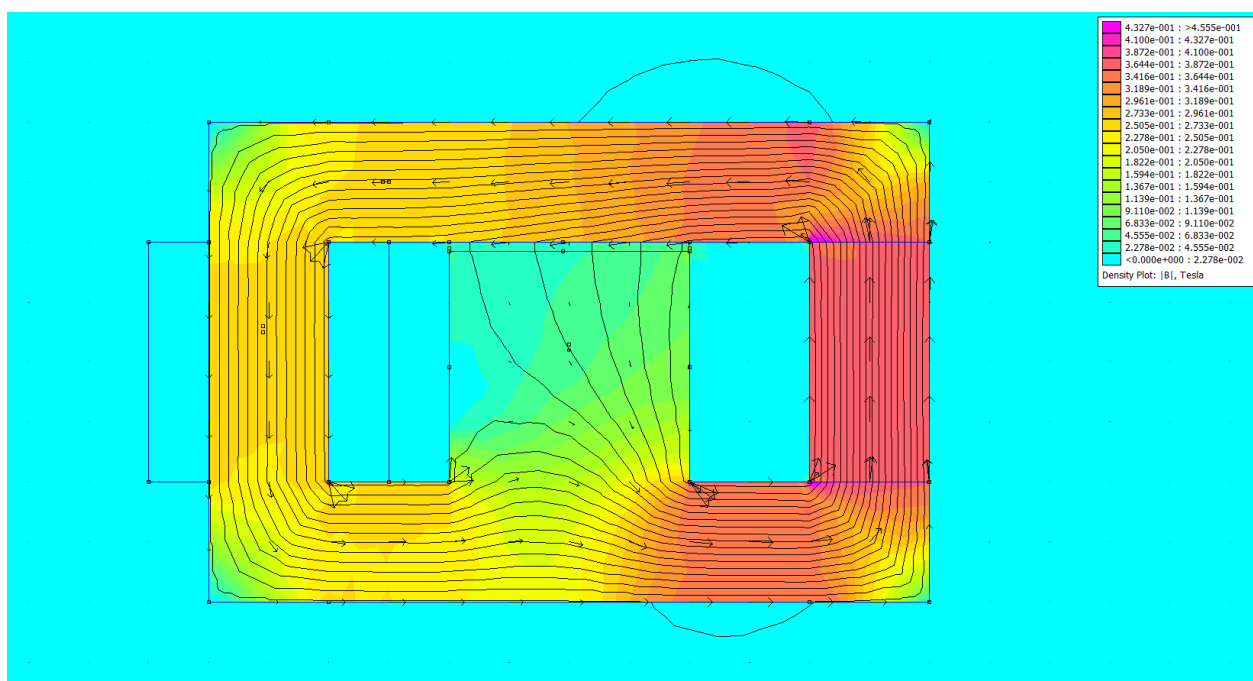
$$u = d\Phi/dt \quad (1)$$

kde

$$\Phi = B \cdot S \quad (2)$$

kde B [T] je magnetická indukce a S [m²] je plocha.

Jestliže zanedbáme rozptylové toky, můžeme říci, že změna $d\Phi$ magnetického toku Φ za dobu dt , kdy zanikne proud v cívce, je dvojnásobná oproti situaci, kdy v MEGu není permanentní magnet, čili v případě, kdy se jedná o běžný blokující měnič.



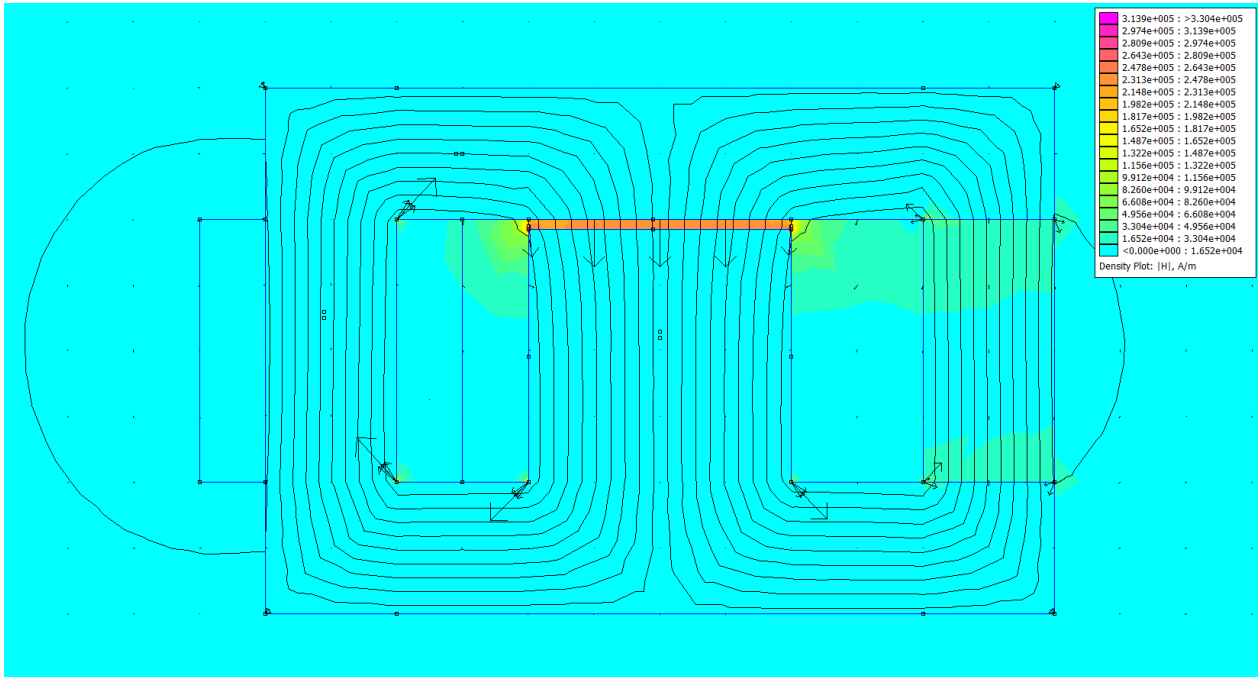
Obr. 3: Průběh magnetické indukce v MEGu – cívka bez proudu

Vzduchová mezera nad středním sloupkem by neměla být příliš malá, aby nebyl příliš velký rozptylový tok. Na druhé straně příliš velká mezera vyžaduje velký proud v budící cívce a museli bychom patřičně dimenzovat drát vinutí, takže při nepřiměřeně velké vzduchové mezeře by se na cívku nemuselo podařit navinout potřebný počet závitů. Také bychom museli zvětšit průřez magnetu.

Toto vysvětlení funkce MEGu se vzduchovou mezerou lze intuitivně snadno pochopit. Nyní se na věc podíváme více vědecky. V článku „Návrh induktoru a vysokofrekvenčního transformátoru“ je uveden následující vzorec pro výpočet energie v cívce s jádrem se vzduchovou mezerou:

$$W = \frac{1}{2} \int \vec{H} \cdot \vec{B} dV \approx \underbrace{\frac{1}{2} \vec{H}_{Fe} \cdot \vec{B}_{Fe} \cdot V_{Fe}}_{\text{energy in the ferrite}} + \underbrace{\frac{1}{2} \vec{H}_{\delta} \cdot \vec{B}_{\delta} \cdot V_{\delta}}_{\text{energy in the air gap}} \quad (3)$$

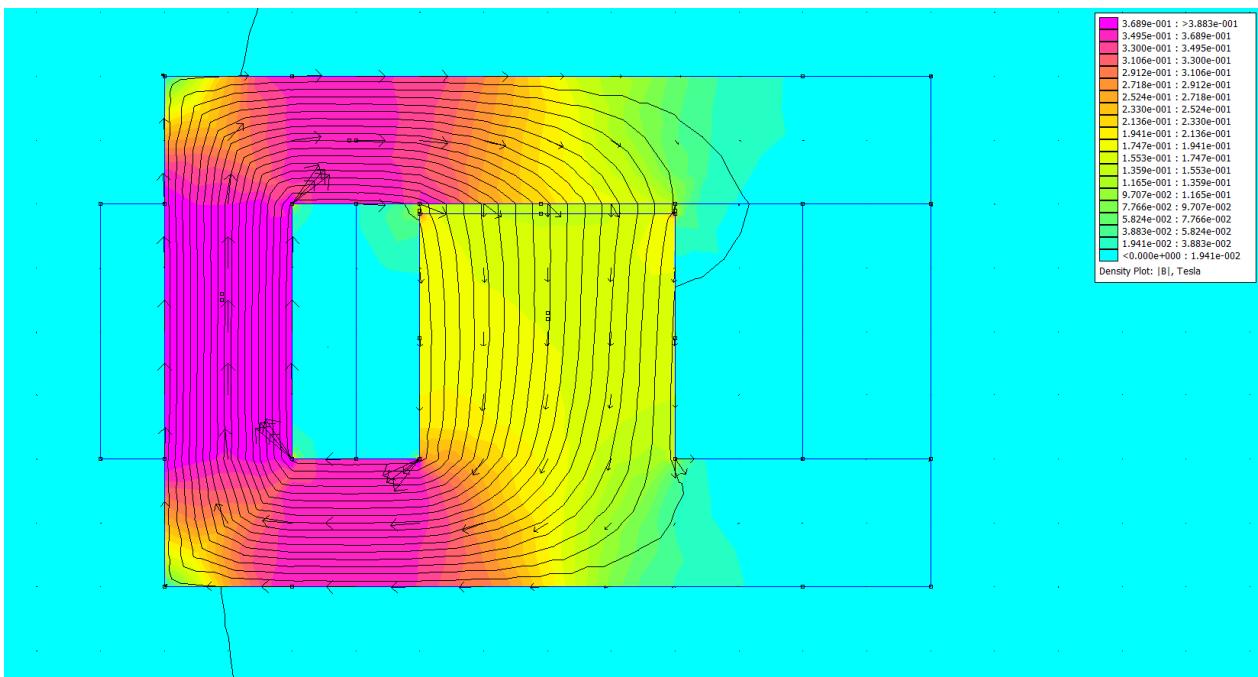
kde H [A/m] je intenzita magnetického pole a B [T] je magnetická indukce – viz (2). Dříve než budeme pokračovat ve výkladu, zobrazíme si průběh intenzity magnetického pole v našem MEGu:



Obr. 4: Průběh intenzity magnetického pole v MEGu – cívkou protéká proud

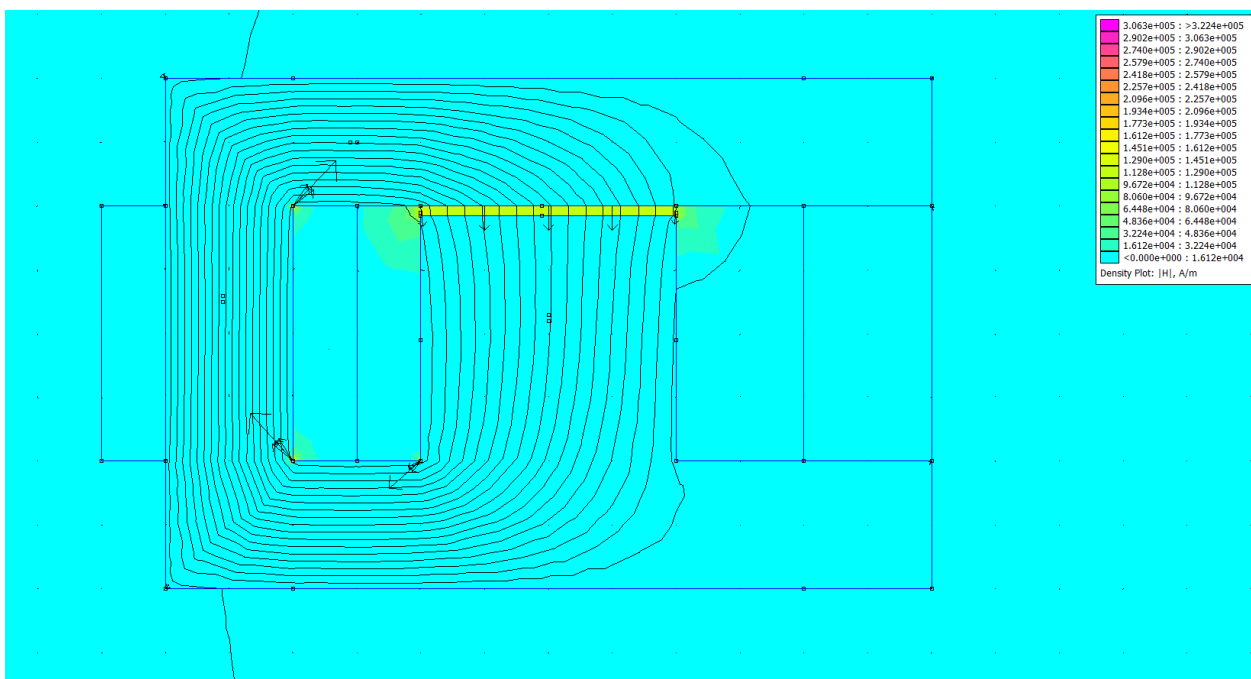
Všimněte si na obr. 4, že ve vzduchové mezeře je intenzita magnetického pole mnohonásobně vyšší než ve feromagnetickém materiálu. To znamená, že ve vztahu (2) je energie ve vzduchové mezeře mnohem větší než ve feromagnetiku.

Nyní se podívejme, co se stane, když z MEGu vyjme magnet:



Obr. 5: Průběh magnetické indukce v MEGu – cívkou protéká proud, bez magnetu

Na obr. 5 názorně vidíme, že v prostředním sloupku magnetická indukce B klesla zhruba na polovinu. Stejně tak klesne i intenzita magnetického pole H :



Obr. 4: Průběh intenzity magnetického pole v MEGu – cívkou protéká proud, bez magnetu.

Vrátíme-li se ke vztahu (2) pro energii cívky s jádrem se vzduchovou mezerou, vidíme, že magnet podstatně zvyšuje energii magnetického pole cívky, kterou protéká proud. Tato energie se po každém zániku proudu v cívce přenesla do sekundárních cívek (viz obr. 1). Je tedy zřejmé, že MEG se vzduchovou mezerou dokáže využívat energie magnetu a díky němu se zvýší jeho účinnost.

Než se pustíme do návrhu MEGu, musíme si říct něco o řešení magnetických obvodů.

Řešení magnetických obvodů

Elektromagnetický obvod je soustava těles a prostředí, kterými prochází a uzavírá se mag. tok vytvořený elektrickým proudem. Existují dvě řešení magnetických obvodů:

- 1) Zákon oběhového magnetického napětí:

$$F_m = \oint H dl = \sum_{k=1}^{k=n} H_k l_k = N \cdot I$$

kde F_m [Az = Ampér-závit] je magnetomotorické napětí, H [Az/m] je intenzita magnetického pole, N je počet závitů a I [A] je elektrický proud.

- 2) Hopkinsonův zákon

Pro homogenní magnetické pole platí:

$$H \cdot l = N \cdot I$$

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \Rightarrow B = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{l}$$

Magnetický tok:

$$\Phi = B \cdot S$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 \mu_r S}{l} N \cdot I = \frac{F_m}{R_m}$$

Hopkinsonův zákon:

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad [Wb = Vs; A, H^{-1}]$$

je analogií Ohmova zákona:

$$I = \frac{U}{R}$$

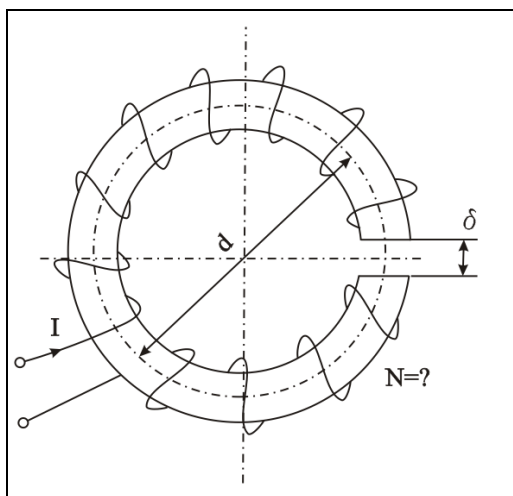
Magnetický odpor R_m , který se nazývá reluktance:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad \left[\frac{m}{\frac{H}{m} \cdot 1 \cdot m^2} = \frac{1}{H} = H^{-1} \right]$$

Je analogie elektrického odporu:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma \cdot S}$$

Pro magnetický obvod se vzduchovou mezerou:



platí:

$$F_m = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot \delta$$

Předpokládejme, že ve všech částech magnetického obvodu je konstantní průřez S a konstantní magnetická indukce B . Potom všemi jeho částmi protéká konstantní magnetický tok Φ a platí:

$$F_m = \Phi \cdot (R_{m1} + R_{m\delta}) = B \cdot S \cdot (l_1 / (\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S) + \delta / (\mu_0 \cdot S)) = B \cdot (l_1 / (\mu_0 \cdot \mu_r) + \delta / \mu_0)$$

Ještě budeme potřebovat definici indukčnosti cívky.

Statická definice indukčnosti platí pro konstantní proud I , kde pro cívku s N závitů můžeme psát:

$$N \cdot \Phi = L \cdot I$$

$$L = N \frac{\Phi}{I} \quad [H; -, Wb, A]$$

Tento vztah můžeme na základě Hopkinsonova zákona napsat ve tvaru:

$$L = N \cdot \frac{F_m}{I \cdot R_m} = N^2 \frac{N \cdot H}{I \cdot R_m}$$

Takže platí

$$L = N^2 / R_m = N^2 \cdot A_L$$

kde A_L [H] je magnetická vodivost.

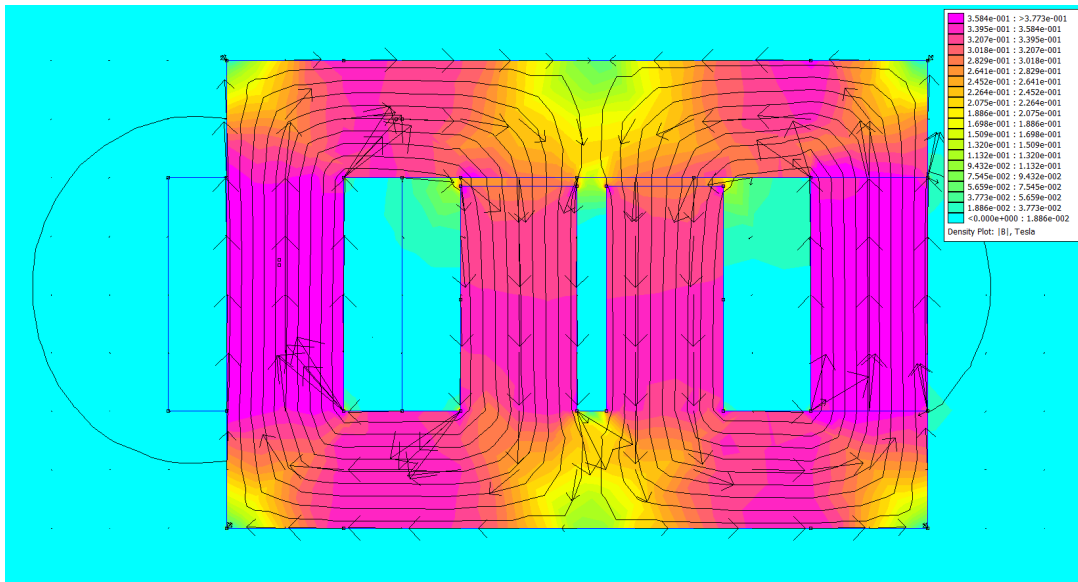
Dynamická definice indukčnosti platí pro případ, kdy proud I a magnetický tok Φ jsou funkcí času $I = f(t)$, $\Phi = f(t)$:

$$N \cdot \Phi = L \cdot I$$

$$N \cdot d\Phi = L \cdot di \Rightarrow u_L = N \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow u_L = L \frac{di}{dt} \quad [V; H, A, s]$$

Nyní jsme již dostatečně teoreticky vyzbrojeni, abychom se mohli pustit do návrhu MEGu.

Nejdříve vypočítáme odpor R_m magnetického obvodu. Budeme přitom předpokládat, že střední sloupek má stejný průřez jako levý sloupek (viz obr. 5)



Obr. 5

Magnetický obvod je složen z feritových hranolů (viz obr. 1) o rozměrech 20 x 20 x 80 mm a šířka vzduchové mezery je 1,5mm. Budeme předpokládat, že: $\mu_r = 1000$, $B = 0,35T$.

Střední délka siločáry je $l_1 \approx 16\text{cm} = 0,16\text{m}$.

$$\begin{aligned} R_m &= l_1/(\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S) + \delta/(\mu_0 \cdot S) = (l_1/\mu_r + \delta)/(\mu_0 \cdot S) = \\ &= (0,16/1000 + 0,0015)/(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,02^2) = \\ &= 0,00166/5,02655 \cdot 10^{-10} = 3302465,07 \text{ H}^{-1} \end{aligned}$$

Dále vypočítáme magnetomotorické napětí F_m :

$$F_m = \Phi \cdot R_m = B \cdot S \cdot R_m = 0,35 \cdot 0,02^2 \cdot 3302465,07 = 462,345 \text{ Az}$$

Poslední výsledek znamená, že když zvolíme například proud 1A a na cívku navineme cca 462 závitů, bude magnetická indukce v obvodu $B \approx 0,35\text{T}$.

Indukčnost cívky bude

$$L = N^2/R_m = 462^2/3302465,07 = 64,63 \text{ mH}$$

Dále odhadneme odpor drátu. Budeme předpokládat, že cívka bude buzena pulzujícím stejnosměrným napětím obdélníkového průběhu o střídění 1: 1. To znamená, že proud bude mít pilovitý průběh s amplitudou 1A a že střední hodnota proudu bude $1/4 \text{ A} = 250\text{mA}$. Zvolíme proudovou hustotu $\sigma = 4\text{A/mm}^2$, takže průřez drátu bude

$$S = I/\sigma = 0,25/4 = 0,0625\text{mm}^2$$

Průměr drátu:

$$D = \sqrt{4 \cdot S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 0,0625/\pi} = 0,28 \text{ mm}$$

Použijeme cívku, jejíž délka bude 36mm a zvolíme drát o průměru 0,3 mm. To znamená, že v jedné vrstvě bude asi $36/0,3 = 120$ závitů. Počet vrstev bude $462/120 \approx 4$. Na základě těchto výpočtů odhadneme střední délku závitu na $23\text{mm} \times 4 = 0,092\text{m}$, takže délka drátu bude $0,092 \cdot 462 = 42,5\text{m}$.

A konečně odpor drátu přibližně bude

$$R = \rho \cdot l/S = 0,0175 \cdot 42,5/0,0625 = 11,9\Omega$$

Poznámka: Prosím čtenáře, aby tyto výsledky bral s rezervou. Šlo mi pouze pro ilustraci postupu výpočtu, nikoli o výsledky použitelné v praxi. U reálných návrhů je třeba brát v úvahu tabulku normalizovaných průměrů drátu, tloušťku drátu, atd.

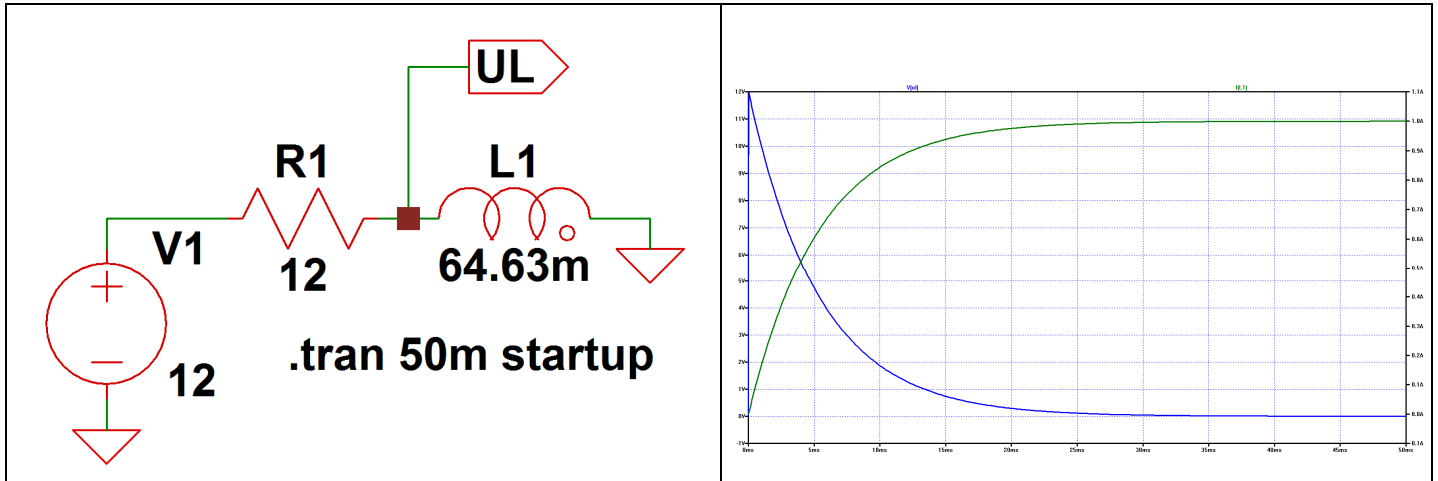
Připojíme-li cívku ke zdroji, roste v ní proud i_L podle exponenciální funkce:

$$i_L(t) = U/R \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

kde U je napětí zdroje, R je činný odpor cívky R_L a vnitřní odpor zdroje R_i ($R = R_L + R_i$) a $\tau = L/R$ je časová konstanta. Zpočátku se křivka proudu podobá přímce, jejíž sklon je dán vztahem z dynamické definice indukčnosti:

$$di/dt = u_L/L \quad (5)$$

V čase $t = 0$ se napětí u_L na cívce rovná napájecímu napětí U a tečna křivky proudu svírá s vodorovnou osou času největší úhel, který se postupně zmenšuje a teoreticky v čase $t = \infty$ je tato tečna rovnoběžná s vodorovnou osou. Pro názornost si to nasimulujeme. Pro jednoduchost budeme předpokládat, že $U = 12\text{V}$ a $R = 12\Omega$. Časová konstanta $\tau = L/R = 0,06463/12 = 5,38583\text{ms}$, takže postačí, když dobu simulace nastavíme na 50ms , čili zhruba na desetinásobek τ . Na obr. 6 máme průběh proudu (zelená) a napětí (modrá) na cívce.



Obr. 6: Průběh proudu a napětí na cívce při přechodovém ději

Z obr. 6 a předchozího textu je zřejmé, že pro praktické použití MEGU je při napájecím napětím 12V příliš velká indukčnost, resp. časová konstanta L/R . Abychom dosáhli co nejvyšší účinnosti, musíme se pohybovat na začátku exponenciální křivky, kdy proud roste téměř lineárně. Tento problém můžeme řešit dvěma způsoby: buď podstatně zvýšíme napájecí napětí U , nebo zmenšíme indukčnost L tím, že na cívku navineme méně závitů silnějším drátem. Vedle problému průběhu proudu je zde problém v tom, že pro získání maximálního výkonu z jádra potřebujeme, aby frekvence spínání byla co nejvyšší. Je to proto, že při každém pracovním cyklu měniče se do sekundárních cívek uloží konstantní množství energie. S vyšší frekvencí spínání však rostou ztráty v jádře a ztráty spínacího tranzistoru. Při použití spínacího tranzistoru typu MOSFET a feritového jádra je 100kHz vhodný kompromis.

Zkusme nyní zvýšit napájecí napětí z 12V na 240V a podívejme se, co to provede s pracovní frekvencí. Vyjdeme z rovnice (5), kterou přepíšeme do tvaru:

$$I_{\max}/\Delta t = U/L \Rightarrow \Delta t = I_{\max} \cdot L/U \quad (6)$$

Po dosazení:

$$\Delta t = I_{\max} \cdot L/U = 1\text{A} \cdot 0,06463\text{H}/240\text{V} = 269,29167\mu\text{s}$$

Pracovní kmitočet potom bude

$$f = 1/(2 \cdot \Delta t) = 1856,7 \text{ Hz}$$

Vidíme, že i při dvacetinásobném zvýšení napájecího napětí je pracovní kmitočet stále nízký.

Budeme tedy postupovat opačně: zvolíme napájecí napětí U a pracovní kmitočet f , odkud vypočteme indukčnost L , počet závitů cívky, průřez drátu atd.

Nechť je náš MEG napájen zdrojem o napětí 240V a oscilátor řídicí spínací tranzistor má frekvenci 25kHz. V rovnici (6) známe $U = 240V$, $\Delta t = 1/(2.f) = 1/50000 = 20\mu s$ a proměnné L a I_{max} jsou neznámé. Indukčnost vypočítáme podle vztahu

$$L = N^2/R_m \quad (7)$$

a proud vypočítáme z rovnic

$$F_m = \Phi \cdot R_m = N \cdot I \quad (8)$$

$$\Phi = B \cdot S \quad (2)$$

Rovnici (6) přepíšeme tak, abychom na levé straně měli známé parametry a na pravé straně neznámé parametry:

$$\Delta t \cdot U = I_{max} \cdot L$$

A do této rovnice dosadíme podle (7) a (8):

$$\Delta t \cdot U = F_m / N \cdot N^2 / R_m = N \cdot F_m / R_m$$

Odtud

$$N = \Delta t \cdot U \cdot R_m / F_m \quad (9)$$

Podle Hopkinsonova zákona platí:

$$\Phi = F_m / R_m \quad (10)$$

Takže (9) můžeme na základě (10) a (2) přepsat následovně:

$$N = \Delta t \cdot U / \Phi = \Delta t \cdot U / (B \cdot S) \quad (11)$$

Dosadíme nejdříve do (9):

$$N = \Delta t \cdot U \cdot R_m / F_m = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 240 \cdot 3302465,07 / 462,345 = 34,3z$$

A pro kontrolu ještě do (11):

$$N = \Delta t \cdot U / (B \cdot S) = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 240 / (0,35 \cdot 0,02^2) = 0,0048 / 0,00014 = 34,3z$$

Počet závitů zaokrouhlíme a na základě (8) vypočteme maximální proud cívkou:

$$I_{max} = F_m / N = 462,345 / 34 = 13,6A$$

Dále bychom pokračovali ve výpočtu, průřezu a průměru drátu, jeho odporu, atd. Výše popsaným způsobem.

V tomto případě bude indukčnost cívky:

$$L = N^2 / R_m = 34^2 / 3302465,07 = 350,04 \mu H$$

Energie dodaná z primární cívky do magnetického obvodu při každém pracovním cyklu je

$$W = 1/2 \cdot L \cdot I_{\max}^2 = 0,5 \cdot 350,04 \cdot 10^{-6} \cdot 13,6^2 = 0,032372 \text{ J}$$

Tomu odpovídá výkon

$$P = W \cdot f = 0,032372 \cdot 25000 = 809,3 \text{ W}$$

Za předpokladu, že proud roste lineárně, můžeme příkon vypočítat jako součin střední hodnoty proudu a napětí:

$$P = U \cdot I = 240 \cdot 13,6/4 = 816 \text{ VA}$$

Výstupní výkon můžeme odhadnout na základě vztahu (3). Většina energie je uložena, jak bylo uvedeno výše, ve vzduchové mezeře, proto pro ilustraci provedeme odhad pouze W_{δ} . Z grafického výstupu simulace magnetického obvodu odečteme hodnoty intenzity magnetického pole H_{δ} a magnetické indukce B_{δ} v mezeře δ a vypočítáme objem vzduchové mezery V_{δ} :

$$H_{\delta} = 237987 \text{ H/m}$$

$$B_{\delta} = 0,3 \text{ T}$$

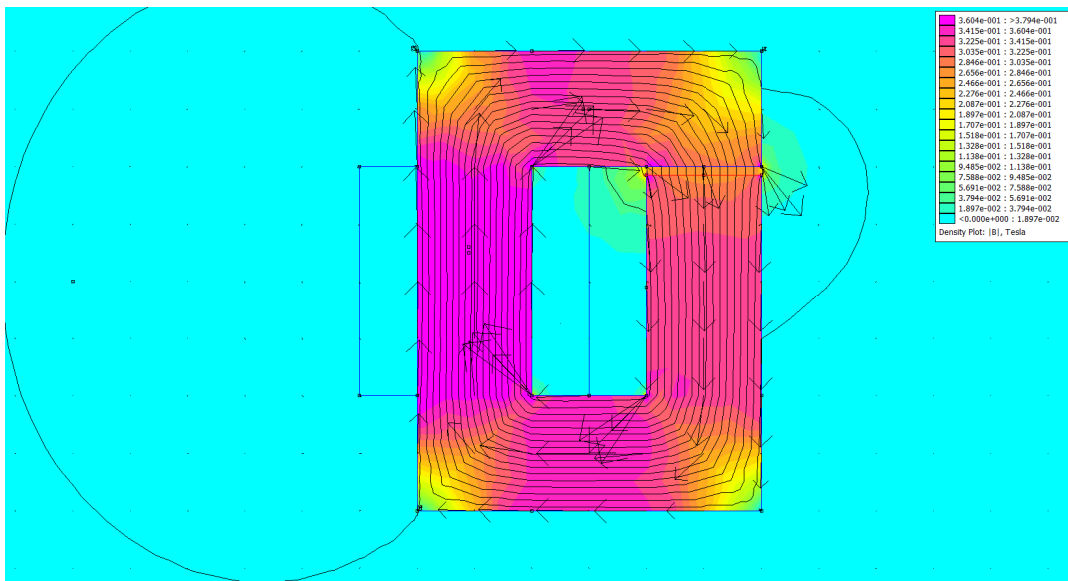
$$V_{\delta} = 0,04 \times 0,02 \times 0,0015 = 0,0000012 \text{ m}^3$$

$$W_{\delta} = 1/2 \cdot H_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot V_{\delta} = 0,5 \cdot 237987 \cdot 0,3 \cdot 0,0000012 = 0,04283766 \text{ J}$$

K hodnotě W_{δ} bychom měli ještě přičíst energii, která se naakumuluje v železe (resp. ve feritu) a odečíst energii v mezeře, neteče-li primární cívkou proud. Výstupní výkon P_2 odhadneme, pokud energii W_{δ} vynásobíme pracovním kmitočtem:

$$P_2 = f \cdot W_{\delta} = 25000 \cdot 0,04283766 = 1071 \text{ W}$$

Takže teoreticky bychom měli „zadarmo“ získat zhruba 255W. Pro kontrolu ještě určíme energii ve vzduchové mezeře ekvivalentního magnetického obvodu na obr. 7:



Obr. 7

$$H_{\delta} = 219623 \text{ H/m}$$

$$B_{\delta} = 0,27755 \text{ T}$$

$$V_{\delta} = 0,02 \times 0,02 \times 0,0015 = 0,0000006 \text{ m}^3$$

$$W_{\delta} = 1/2 \cdot H_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot V_{\delta} = 0,5 \cdot 0,27755 \cdot 219623 \cdot 0,0000006 = 0,01828691 \text{ J}$$

Odhad výstupního výkonu blokujícího měniče bez magnetu je:

$$P_2 = f \cdot W_{\delta} = 25000 \cdot 0,01828691 = 457,17 \text{ W}$$

Účinnost blokujícího měniče bez magnetu jsme odhadli na:

$$\eta = 457,17/816 = 56\%$$

Pomocí stejné metody jsme u blokujícího měniče s magnetem odhadli účinnost na:

$$\eta = 1071/816 = 131,25\%$$

Nízkou účinnost klasického blokujícího měniče přičítám příliš velké vzduchové mezeře, která způsobila zbytečně velký rozptylový magnetický tok.

Závěr:

Pomocí klasické teorie elektromagnetického pole a simulací se nám podařilo dokázat, že při vhodné topologii je možné zvýšit účinnost blokujícího měniče pomocí permanentního magnetu na více než dvojnásobek oproti klasické konfiguraci a zároveň nad 100%. Nebylo nutné si brát na pomoc hypotetický éter, ani skalární potenciál nebo jiné exotické teorie. Vědci by se však měli zamyslet nad tím, jestli permanentní magnet nečerpá svoji energii z éteru, který současná věda neuznává.