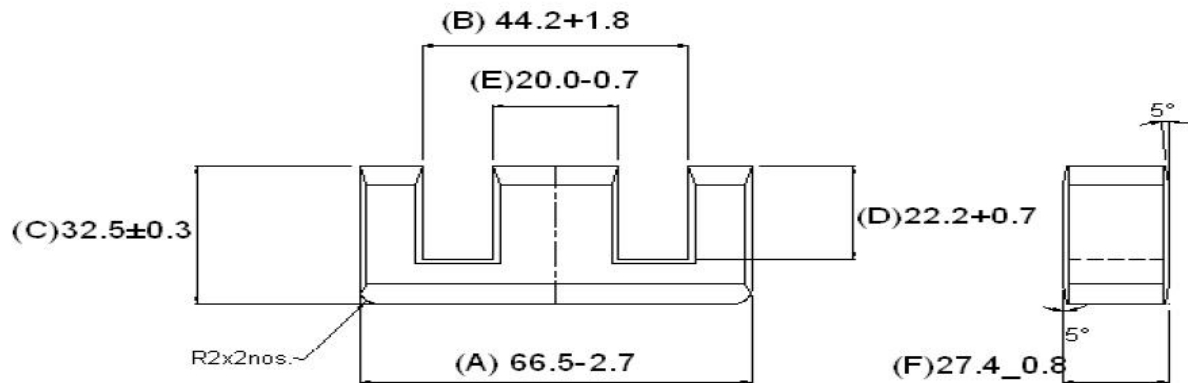


Návrh realizace transformátoru Thane C. Heirse III.

© Ing. Ladislav Kopecký, červenec 2016

Ve třetí části článku se vrátíme k variantě TH transformátoru s jádrem EE a provedeme návrh s konkrétním typem jádra. Zvolíme feritové jádro EE6527 (viz obr. 1 a tabulka s parametry pod ním).



Obr. 1: Rozměry jádra EE6527

EE6527 Un-gapped (OL)

Test Conditions: 1kHz/1mT/CFR COIL, N=100/25°C

Material Grade	Initial Permeability (μ_{iac})	AL Value (nH)	μ_e Approx./Set	P_V (W/set) (25kHz,200mT, 100°C)	P_V (W/set) (100kHz,100mT, 100°C)	P_V (W/set) (100kHz,200mT, 100°C)	Ordering code
CF139	2100 ±20%	8100 +30%/-20%	≈ 1790	≤ 7.82	≤ 6.7	≤ 47	CF139 EE6527 OL
CF297	2300 ±20%	8300 +30%/-20%	≈ 1810	≤ 7.43	≤ 6.26	≤ 44.97	CF297 EE6527 OL

EE6527 Gapped

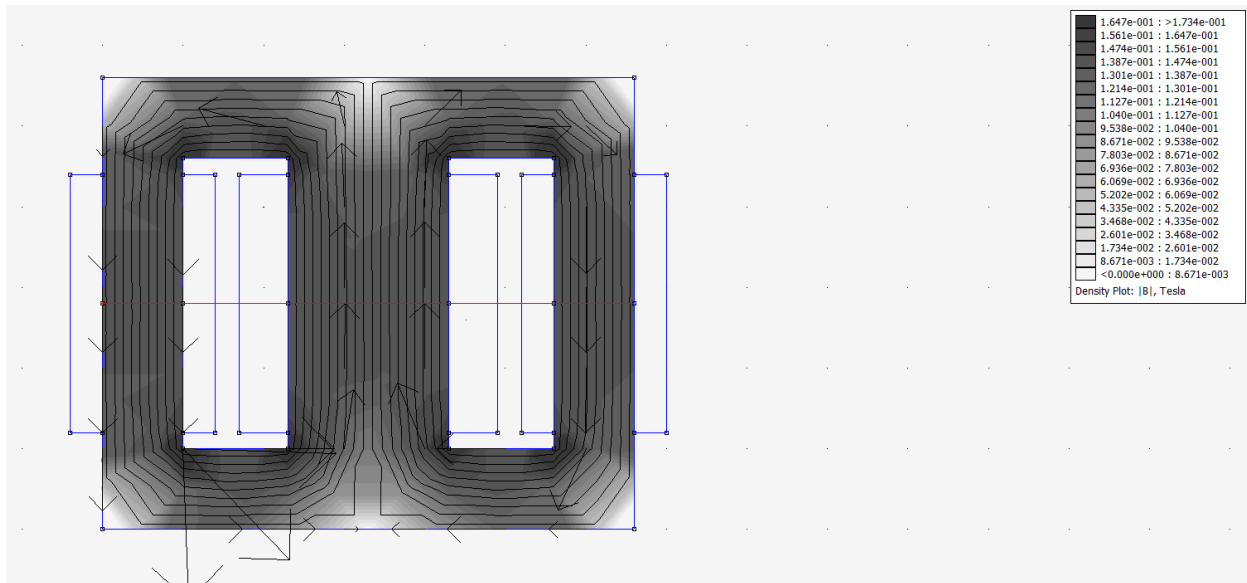
Test Conditions: 1kHz/300mV/CFR COIL, N=100/25°C

Material Grade	Gap Value mm/Pc	S, T		D		Ordering code
		AL(nH) Approx. /Set	μ_e Approx./Set	AL(nH) Approx. /Set	μ_e Approx./Set	
CF139	0.2 ±0.05	≈ 2440	≈ 534	≈ 1440	≈ 315	CF139 EE6527 G 0.2 S/T/D
CF139	0.5 ±0.05	≈ 1214	≈ 265	≈ 716	≈ 157	CF139 EE6527 G 0.5 S/T/D
CF139	0.6 ±0.05	≈ 1056	≈ 231	≈ 623	≈ 136	CF139 EE6527 G 0.6 S/T/D
CF139	0.85 ±0.05	≈ 810	≈ 177	≈ 478	≈ 104	CF139 EE6527 G 0.85 S/T/D
CF139	1.0 ±0.05	≈ 716	≈ 157	≈ 422	≈ 92	CF139 EE6527 G 1.0 S/T/D
CF139	1.5 ±0.05	≈ 526	≈ 115	≈ 310	≈ 68	CF139 EE6527 G 1.5 S/T/D
CF139	2.0 ±0.05	≈ 422	≈ 92	≈ 220	≈ 50	CF139 EE6527 G 2.0 S/T/D
CF139	2.8 ±0.05	≈ 327	≈ 71	≈ 165	≈ 35	CF139 EE6527 G 2.8 S/T/D
CF139	3.0 ±0.05	≈ 310	≈ 68	≈ 157	≈ 32	CF139 EE6527 G 3.0 S/T/D

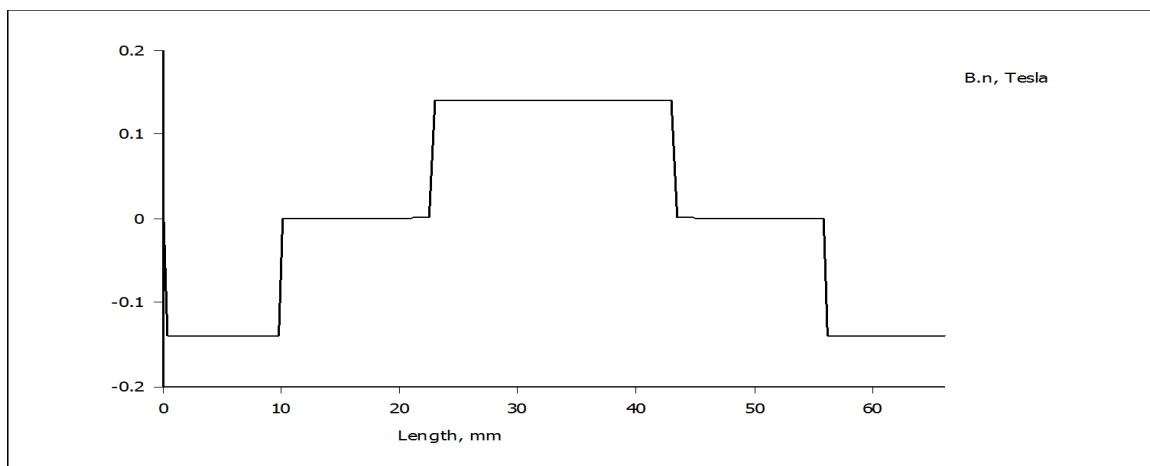
Tabulka parametrů jádra EE6527

Nejdříve provedeme simulaci transformátoru bez vzduchové mezery, kde primární cívku navineme na prostřední sloupek a na krajní sloupky navineme dvě sekundární cívky o stejném počtu závitů jako jsme navinuli na střední sloupek. Budeme sledovat magnetickou indukci ve všech třech sloupcích v závislosti na proudu v jednotlivých vinutích. Na obr. 2 máme obrázek simulace našeho transformátoru, kde primárním vinutím protéká proud 1A a sekundární cívky nejsou zatíženy. Uprostřed jádra je červená čára, která značí místa, kde budeme sledovat průběh magnetické indukce B. Na obr. 3 najdete průběh B v místech, jimiž probíhá zmíněná červená čára. Na obr. 3 můžete vidět, že ve středním sloupcu je B kolem 0,14T a stejně velká indukce opačného znaménka je v krajních sloupcích. Nyní do obou krajních cívek přivedeme proud 0,95A a budeme sledovat, co to udělá s B. Na obr. 4 můžete vidět, že magnetická indukce ve všech třech sloupcích dramaticky poklesla. Aby B zase stoupla, museli bychom zvětšit proud, což by vyvolalo nárůst sekundárního proudu, který vytvoří větší sekundární magnetický tok, který působí proti primárnímu toku. Vidíme tedy, že se tyto toky vzájemně přetlačují, proto nelze pomocí klasického transformátoru transformovat elektrickou energii s

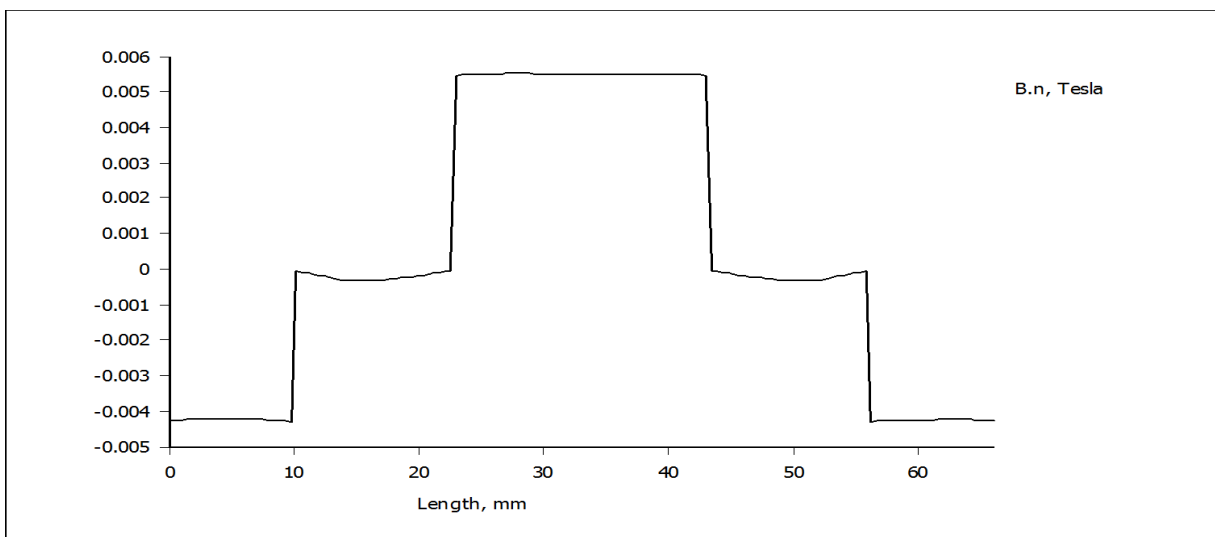
účinností větší než 100%. Ve skutečnosti bude vždy menší, protože v transformátoru působí ztráty jednak ve vinutí, jednak ve feromagnetickém jádře. Abychom dosáhli účinnosti větší než 100% musíme vytvořit nesymetrii. Thane Heins ji vytvořil tak, že zařídil, aby sekundární magnetický tok nepůsobil proti toku primární cívkky, ale uzavřel se jinou magnetickou cestou.



Obr. 2: Simulace transformátoru naprázdno

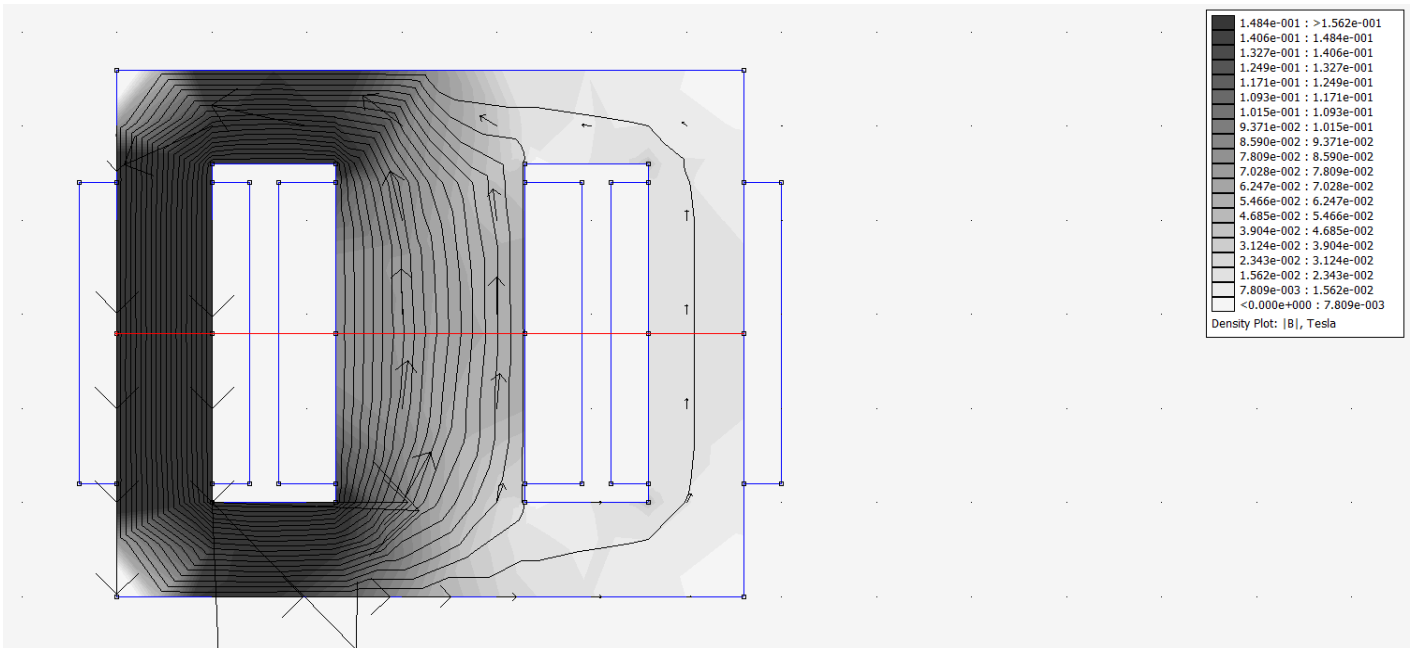


Obr. 3: Průběh magnetické indukce v transformátoru - naprázdno

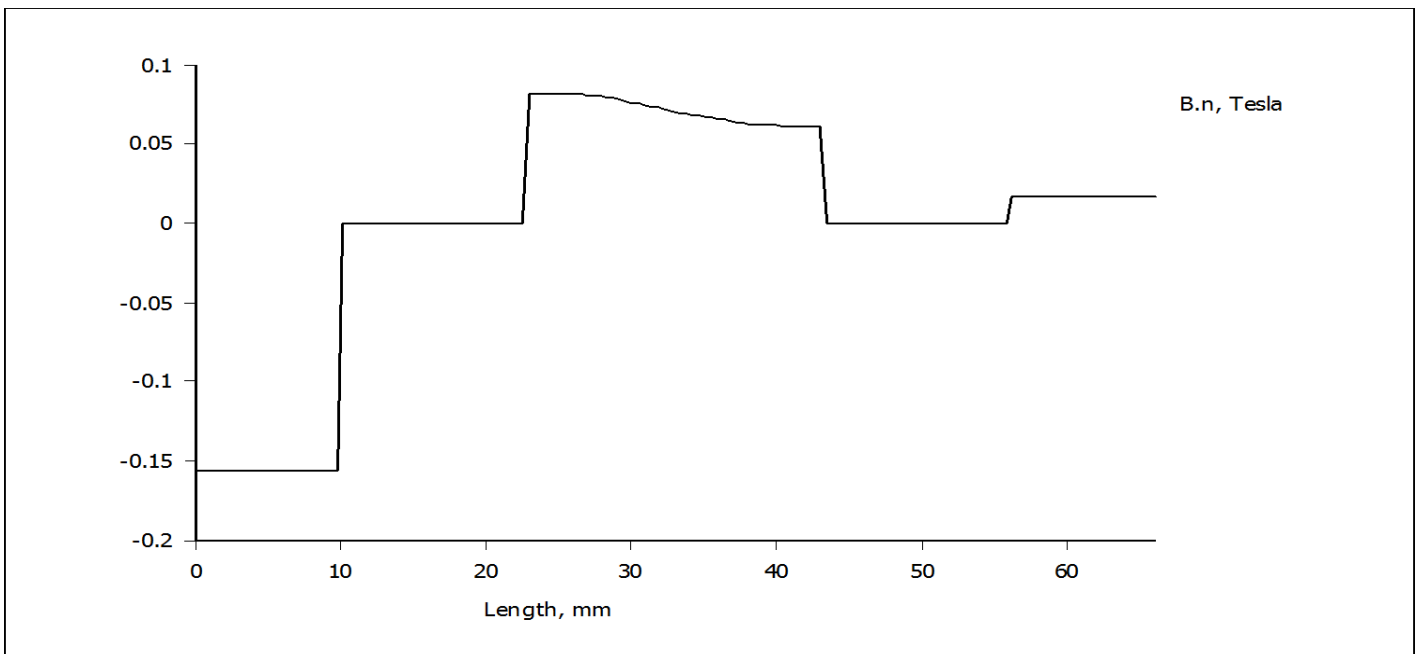


Obr. 4: Průběh magnetické indukce v transformátoru – pod symetrickou zátěží

My nesymetrii vytvoříme tak, že různě zatížíme sekundární cívky. Aby to bylo zřejmé, zatížíme pouze jednu z cívek a budeme opět sledovat průběh B ve sloupcích magnetického obvodu transformátoru.



Obr. 5: Simulace transformátoru bez mezery s nesymetrickou zátěží



Obr. 6: Průběh magnetické indukce v transformátoru – nesymetrická zátěž

Na obr. 6 vidíme, že B v prostředním sloupcu sice poklesla, ale ne tak dramaticky jako při symetrické zátěži. V levém sloupcu B dokonce vzrostla na více než 0,15T.

Kdybychom měli jednu sekundární cívku maximálně zatíženou a druhou naprázdno, jako to máme ve výše uvedené simulaci, žádnou výhodu tím nezískáme, protože pravým sloupcem neteče téměř žádný magnetický tok a v levé cívce zase neteče žádný proud. Musíme proto zvolit vhodný kompromis: při určité hodnotě zátěže levé cívky budou výkon a účinnost maximální, přičemž zatížení pravé cívky se bude rovnat téměř zkratu. Ani takto to nebude žádná výhra, protože z poměrně velkého jádra získáme malý výkon. Proč? U běžného transformátoru, kde dochází k „přetlačování“ mezi primárním a sekundárním magnetickým tokem, dosáhneme přenosu výkonu mnohem většího, protože tím, že toky působí proti sobě, nemůže dojít k přesycení jádra. Prakticky můžeme zvyšovat přenesený výkon, dokud se nebude přehřívat vinutí. V TH transformátoru budeme

potřebovat jen malé magnetomotorické napětí $F_m = N \cdot I$, kde N je počet závitů a I je proud, abychom dosáhli maximální přípustné magnetické indukce B . Jestliže pro daný proud I a indukci B nám stačí málo závitů vinutí, bude se v sekundární cívce indukovat malé napětí, protože pro indukované napětí platí

$$u_i = N \cdot d\Phi/dt$$

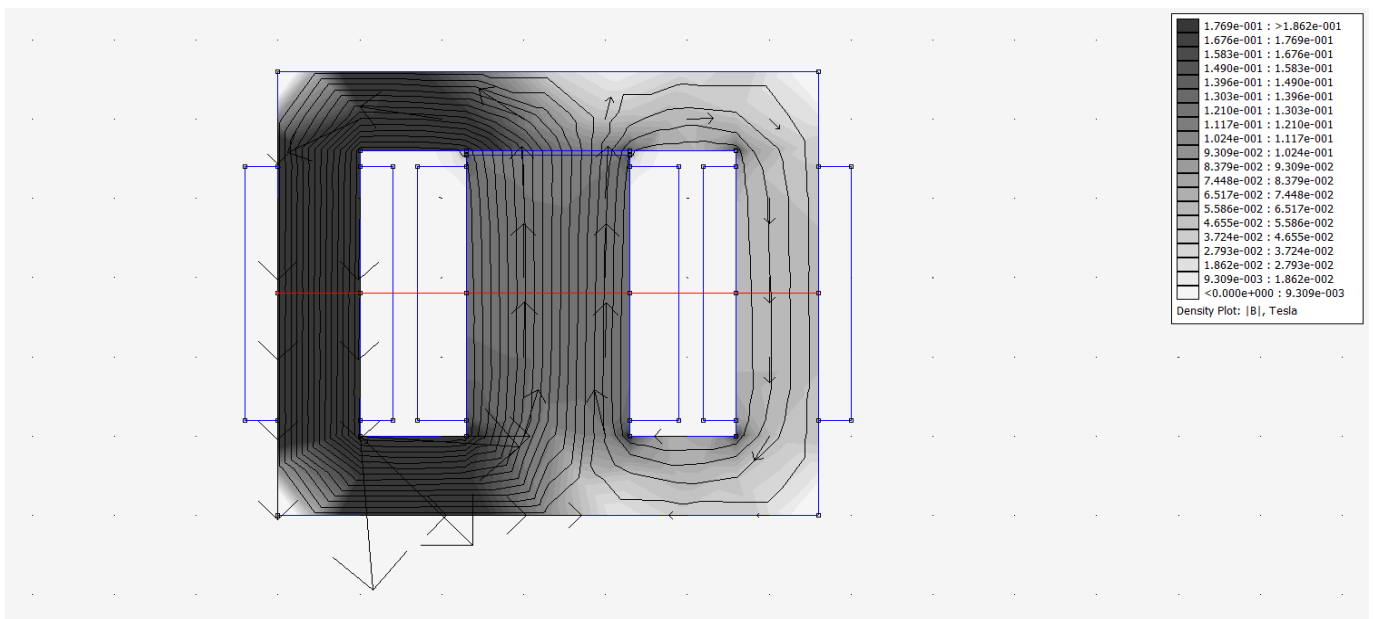
Jak zajistíme, abychom mohli na cívku navinout více závitů? Pro odpověď si vezmeme na pomoc Hopkinsonův zákon:

$$\Phi = F_m/R_m$$

kde Φ je magnetický tok, F_m je magnetomotorické napětí a R_m je odpor magnetického obvodu. Protože

$$F_m = N \cdot I$$

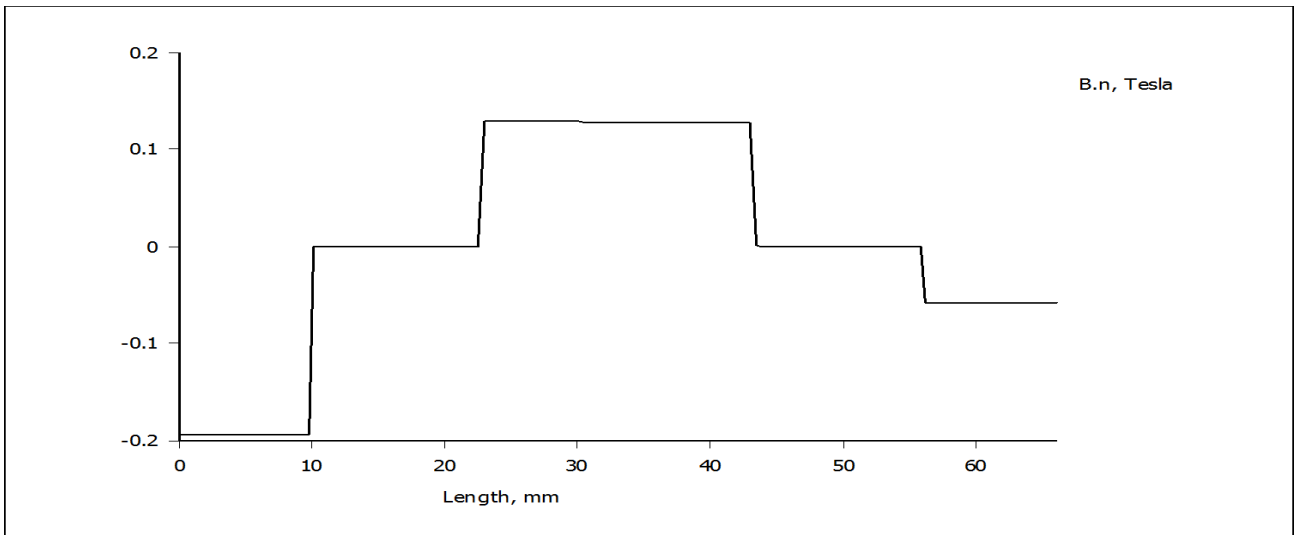
musíme zvětšit R_m , abychom dosáhli většího počtu závitů N pro daný magnetický tok Φ . V praxi to znamená, že do magnetického obvodu vložíme vzduchovou mezeru. Jak ukazuje tabulka výše, jádra EE se vzduchovou mezerou se vyrábějí. Zvolíme tedy mezeru např. 0,5mm. Zvýšíme proud primární cívkou tak, abychom dostali indukci cca 0,14T při sekundáru naprázdno. Simulace ukázala, že při proudu 6A je průměrná hodnota $B = 0,142726T$. Potom zatížíme pravou sekundární cívku proudem 0,95A, provedeme opět simulaci a zjistíme průběh B .



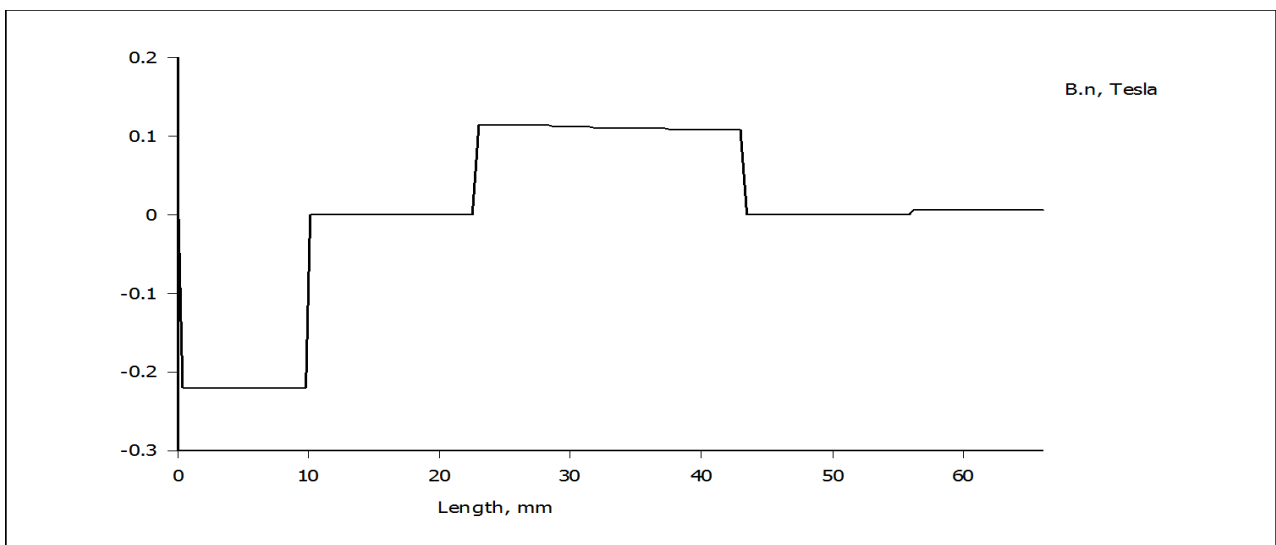
Obr. 7: Transformátor s mezerou na středním sloupcu

Na obr. 7 a 8 vidíme, že proud pravou sekundární cívkou nestačí přetlačit tok primární cívky. Dále jsme zjistili, v prostředním sloupcu klesla indukce na $B = 0,127876T$, což je asi o 10,4% méně oproti situaci, kdy je sekundární cívka bez proudu.

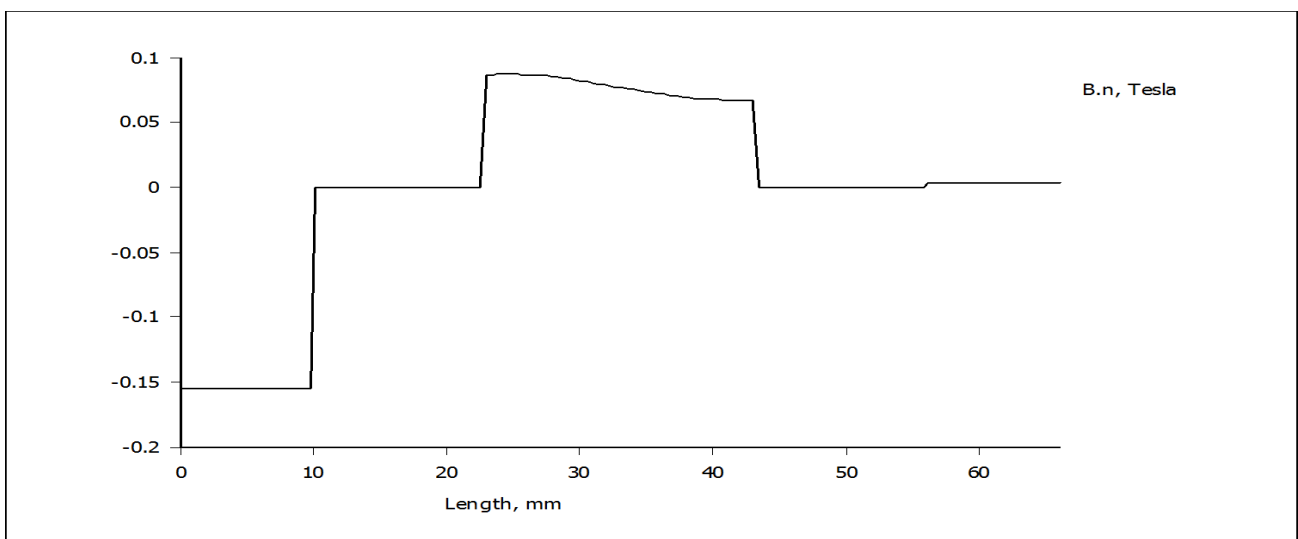
Nyní zvýšíme proud v pravé cívce tak, aby v pravém sloupcu nebyl téměř žádný mag. tok. Na výsledek se můžete podívat na obr. 9. Proud pravou cívkou jsme zvýšili na hodnotu 2A, přičemž střední hodnota indukce v prostředním sloupcu poklesla na $B = 0,109867T$. Pro kontrolu se vrátíme k transformátoru bez mezery a provedeme stejný postup. Výsledek najdete na obr. 10. V tomto případě jsme v pravé cívce nastavili proud 0,85A a střední hodnota indukce v prostředním sloupcu je $B = 0,0769945T$. Můžeme tedy učinit závěr, že vzduchová mezeru u prostředního sloupcu zmenšuje závislost magnetické indukce na zátěži a můžeme se domnívat, že čím větší mezeru je, tím ta závislost bude menší. Zároveň se zvýší výstupní výkon.



Obr. 8: Průběh B u trafo s jednou mezerou – s menší zátěží

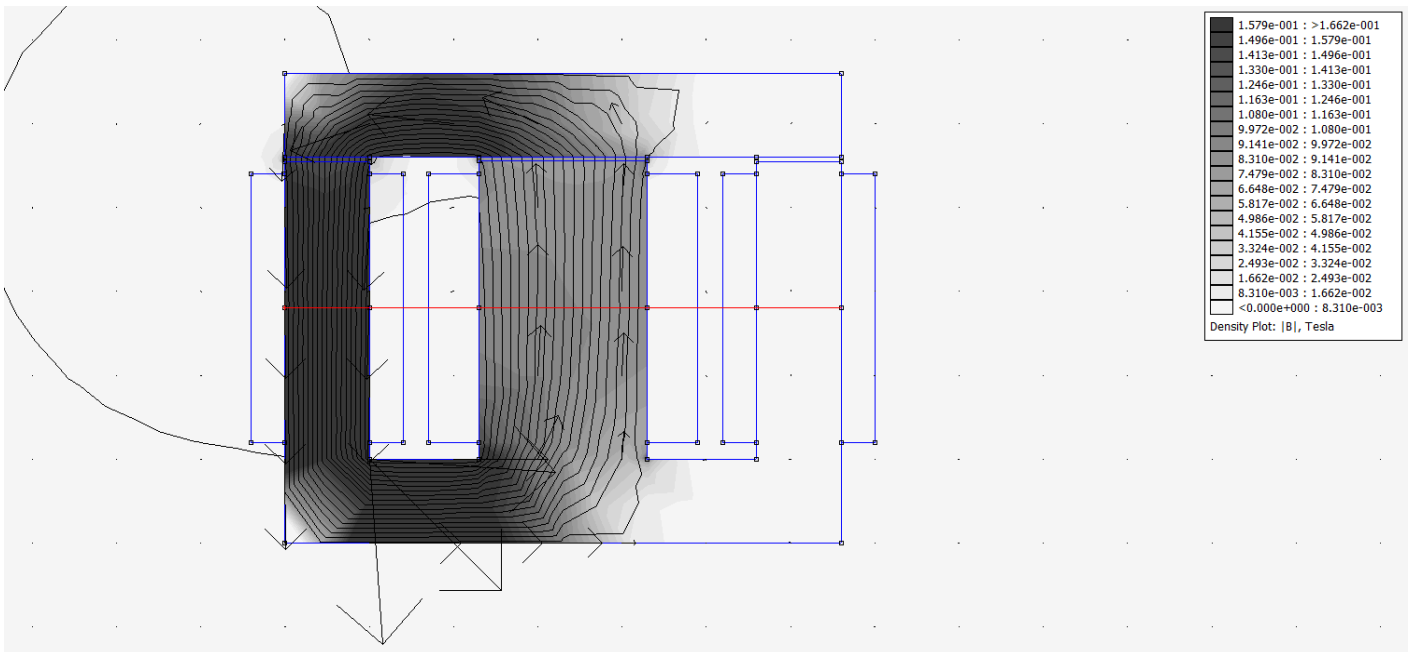


Obr. 9: Průběh B u trafo s jednou mezerou

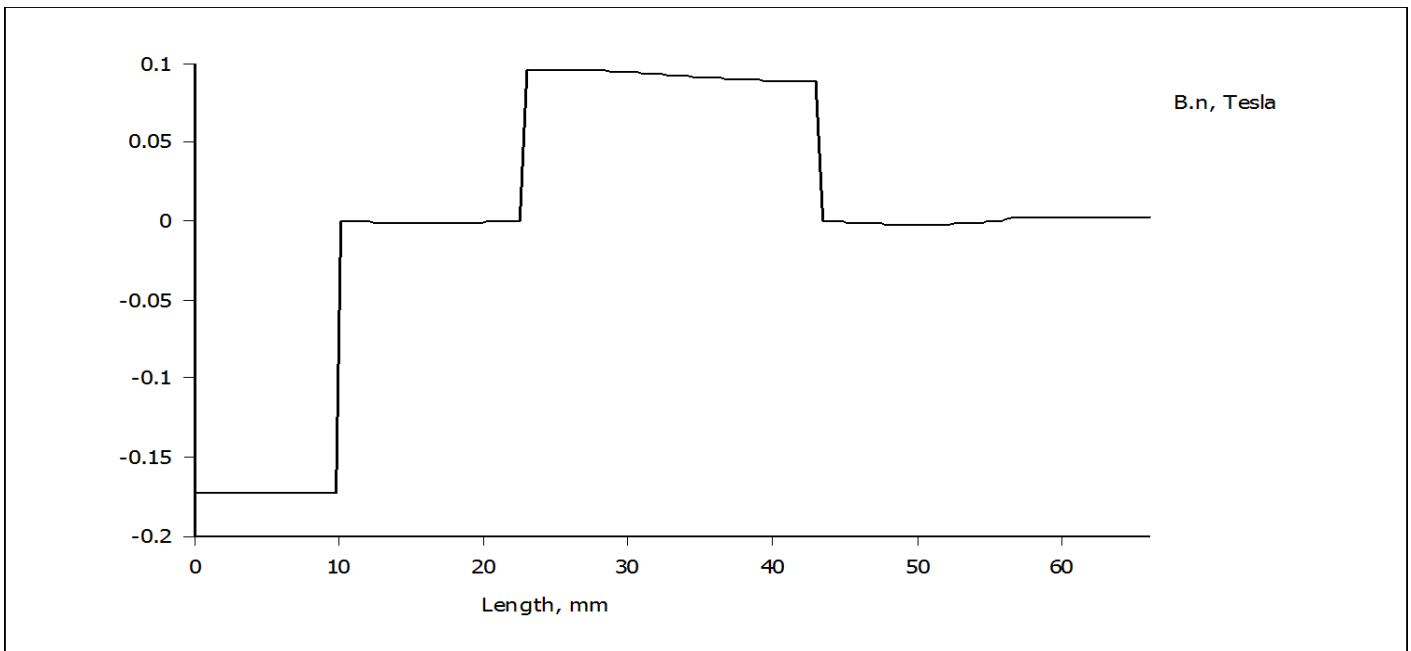


Obr. 10: Průběh B u trafo bez mezery

Nyní vyšetříme případ, kdy jsou mezery u všech tří sloupků. Opět nejdříve nastavíme proud primárem se sekundárem naprázdno. Při proudu 9,4A je střední hodnota indukce ve středním sloupcu $B = 0,142307T$. Nyní zopakujeme postup z předchozích případů a zobrazíme průběh indukce.



Obr. 11: Transformátor s mezerami na všech sloupcích



Obr. 12: Průběh B u trafo se třemi mezerami

Na obr. 12 máme zobrazený průběh B pro $I_1 = 9,4\text{A}$, $I_2 = 6,7\text{A}$. Střední hodnota indukce klesla na hodnotu $B = 0,0924878\text{T}$.

Závěr

V tomto článku jsme vytvořili transformátor s nesymetrickou zátěží pomocí feritového jádra EE a zkoumali tři případy: 1) bez vzduchové mezery, 2) s jednou mezerou uprostřed a 3) se třemi mezerami. Zkoumali jsme vliv nesymetrické zátěže na magnetickou indukci ve středním sloupcu. Ukázalo se, že nejmenší vliv byl ve 2. případě a největší byl v 1. případě. Ve 3. případě zase lze dosáhnout největšího výstupního výkonu, protože díky třem mezerám je nutné na sekundární cívky navinout nejvíc závitů. Tato vlastnost je rozhodující, proto se přikláním k preferování trafo se třemi mezerami. Důvod je zřejmý: Když zatížíme pravou sekundární cívku jako v případě 2, tj. $I_2 = 2\text{A}$, poklesne indukce ve středním sloupcu na $B = 0,127564\text{T}$, což je nejlepší výsledek ze všech tří variant.