

MEG jako blokující měnič s permanentním magnetem II.

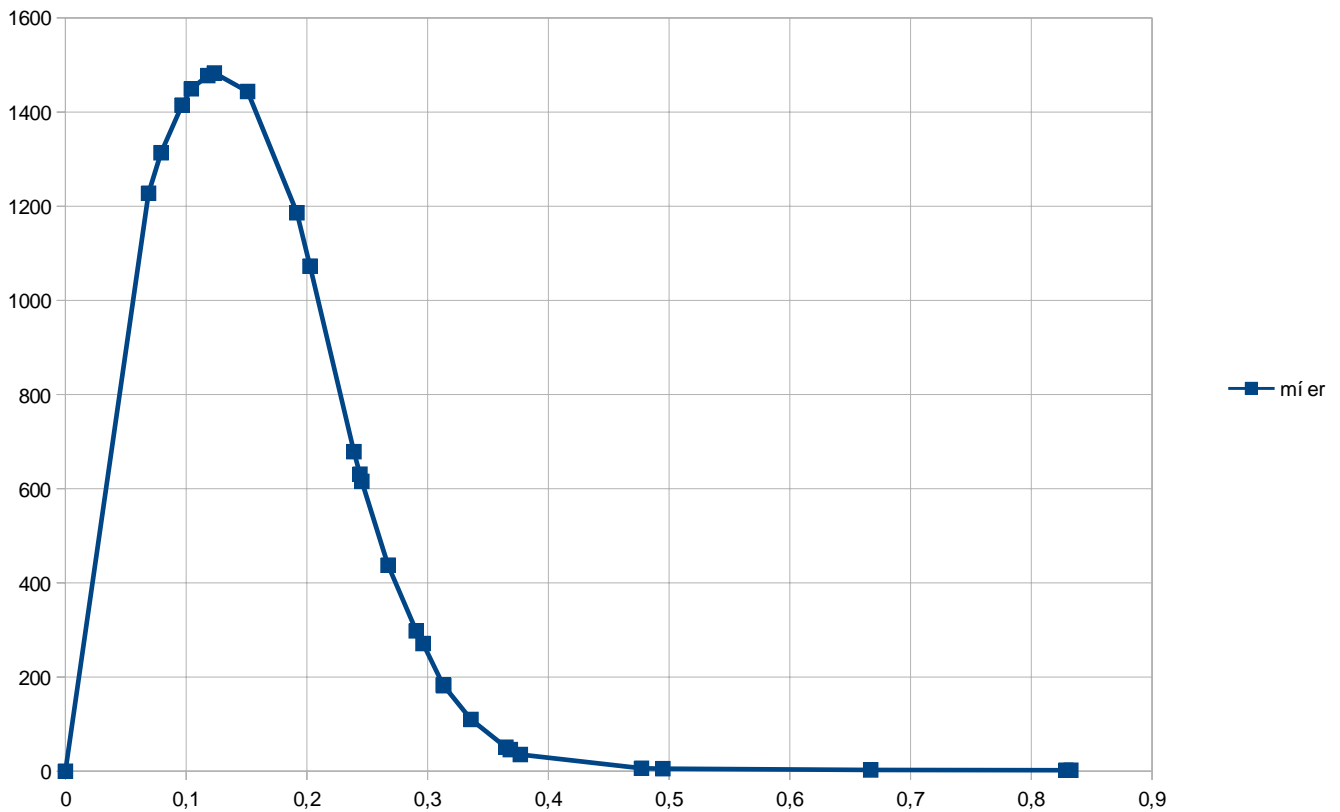
(c) Ing. Ladislav Kopecký, březen 2016

V tomto pokračování článku se zaměříme na magnetické vlastnosti magneticky měkkých materiálů, které připadají v úvahu pro použití pro magnetický obvod MEGu, provedeme energetickou bilanci MEGu na základě simulací a výpočtů a představíme jeho další možné konstrukce.

Uvádí se, že magneticky měkký ferit lze používat do sycení 0,3 až 0,4T. Nikde jsem se však nedočel, jak velká je při tomto sycení relativní permeabilita μ_r . Prodejci feritových materiálů tyto charakteristiky zpravidla neuvádějí (např. Semic Trade), proto jsem byl nucen použít data ze simulačního programu Femm 4.2 a μ_r pomocí tabulky hodnot B-H vypočítat. V databázi magnetických materiálů je uvedeno, že se jedná o ferit se složením Fe-Ni-Zn-V. Jiný ferit v databázi programu není, takže jej budeme považovat za reprezentativní vzorek.

B [T]	H [A/m]	μ_r [-]
0,000	0,0000000000	0,00
0,069	44,6351975309	1227,50
0,079	47,9969382716	1313,63
0,097	54,3604814815	1414,55
0,104	57,2541358025	1449,46
0,118	63,5139259259	1477,43
0,123	66,2054074074	1482,93
0,151	83,1840123457	1443,69
0,192	128,6386419753	1186,19
0,203	150,3218518519	1072,71
0,239	280,2956790123	678,60
0,244	307,7619753086	630,74
0,246	317,5014814815	615,45
0,267	486,0379012346	437,55
0,291	775,6082716049	298,12
0,296	869,4777777778	271,08
0,313	1359,0728395062	183,21
0,313	1373,2691358025	181,58
0,336	2431,4518518519	109,95
0,365	5699,1765432099	50,94
0,368	6389,1543209877	45,89
0,377	8458,0074074074	35,45
0,477	61532,6172839506	6,17
0,495	73419,6419753086	5,36
0,667	197003,7037037030	2,69
0,829	321027,9012345670	2,05
0,833	324350,0000000000	2,04

Tabulka 1: magnetizace feritu Fe-Ni-Zn-V



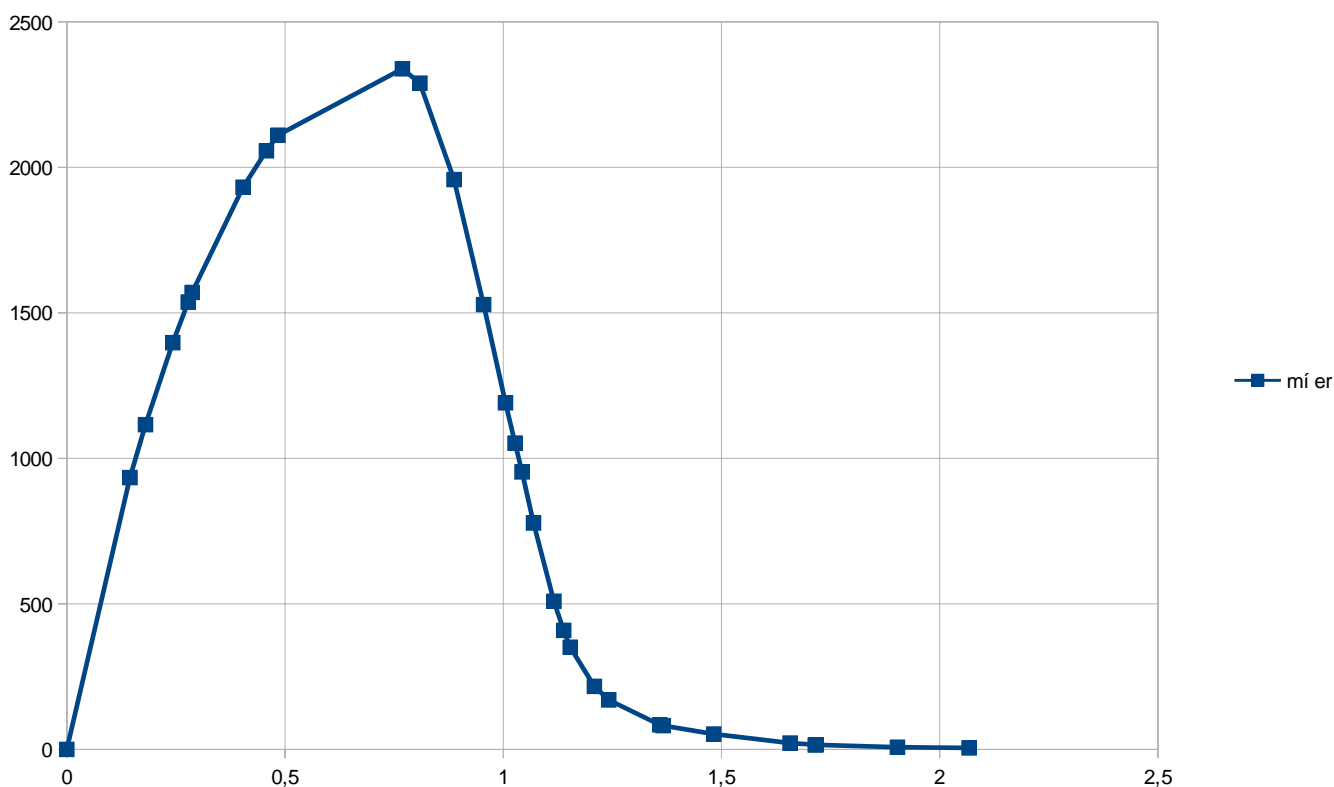
Obr. 1: Graf závislosti μ_r na magnetické indukci B [T] - ferit

Tabulka 1 ukazuje, že maximální hodnota $\mu_r = 1482,93$ je při $B = 0,123\text{T}$. Při sycení $B = 0,296\text{T}$ je $\mu_r = 271$ a při $B = 0,377\text{T}$ je relativní permeabilita pouze $35,45$. Dalším vhodným materiálem pro stavbu MEGu, pomineme-li drahý amorfní materiál Metglass, jsou železo-prachová jádra. V databázi programu Femm 4.2 jsem našel také pouze jednoho zástupce této třídy materiálů.

B [T]	H [A/m]	μ_r [-]
0,000	0,00	0,00
0,145	123,46	933,92
0,180	128,65	1115,64
0,243	138,25	1397,74
0,278	144,06	1537,25
0,287	145,55	1570,22
0,404	166,37	1931,67
0,457	176,96	2056,97
0,484	182,50	2110,31
0,769	261,67	2338,52
0,809	281,27	2289,14
0,887	360,61	1958,03
0,955	497,27	1528,34
1,005	671,77	1190,74
1,027	776,76	1052,26

1,043	870,66	953,40
1,069	1093,97	777,84
1,116	1745,23	508,89
1,139	2215,88	408,87
1,154	2616,26	350,87
1,209	4441,99	216,55
1,242	5817,74	169,85
1,359	12799,78	84,46
1,367	13341,78	81,51
1,482	22403,67	52,65
1,657	60662,78	21,74
1,715	86345,11	15,80
1,717	87246,22	15,66
1,903	200244,44	7,56
2,067	326300,00	5,04

Tabulka 2: magnetizace železo-prachového jádra

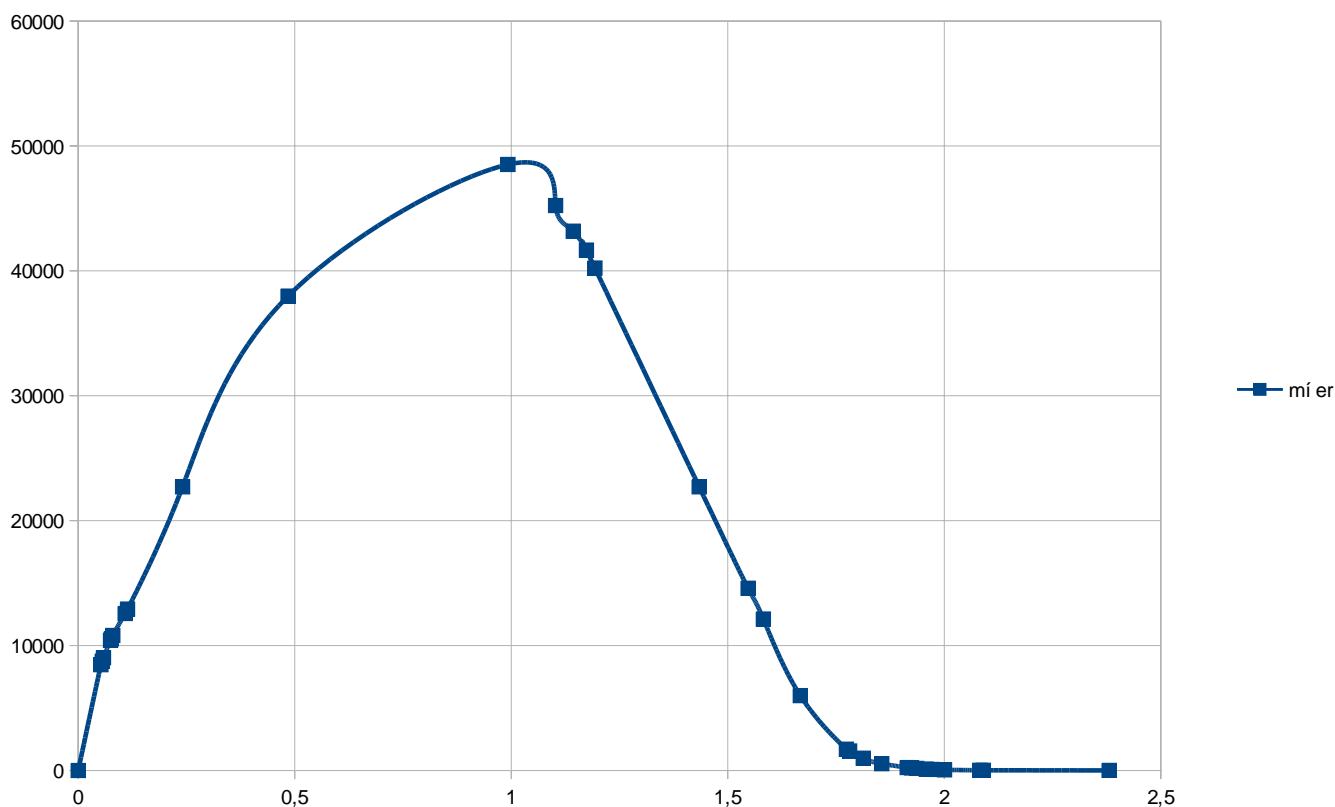
Obr. 2: Graf závislosti μ_r na magnetické indukci B [T] – železo-prachové jádro

Tento materiál se pro MEG hodí více, protože se dá použít v kombinaci s magnety na bázi vzácných zemin, např. Nd-Fe-B, které mají remanentní indukci $B_r \approx 1,1$ T.

Pro srovnání ještě uvedeme tabulku B-H a graf B- μ_r pro transformátorové plechy Fe s příměsí 3% křemíku.

B [T]	H [A/m]	μ_r [-]
0,000	0,00	0,00
0,052	4,93	8466,54
0,055	5,03	8755,22
0,058	5,14	9028,47
0,075	5,70	10419,58
0,076	5,76	10541,93
0,080	5,88	10809,85
0,109	6,87	12568,67
0,114	7,02	12922,27
0,241	8,45	22708,07
0,485	10,15	37978,61
0,992	16,28	48515,10
1,102	19,40	45226,02
1,143	21,07	43175,45
1,174	22,42	41660,99
1,193	23,61	40224,92
1,434	50,26	22704,82
1,547	84,39	14587,35
1,582	103,84	12125,17
1,668	221,51	5990,91
1,774	827,96	1705,06
1,781	909,05	1559,43
1,813	1465,68	984,30
1,856	2732,81	540,33
1,914	6470,20	235,44
1,925	7560,80	202,56
1,936	9210,20	167,30
1,958	13667,22	114,03
1,973	18665,00	84,10
2,001	33398,00	47,67
2,082	87776,59	18,87
2,090	94399,52	17,62
2,381	325080,00	5,83

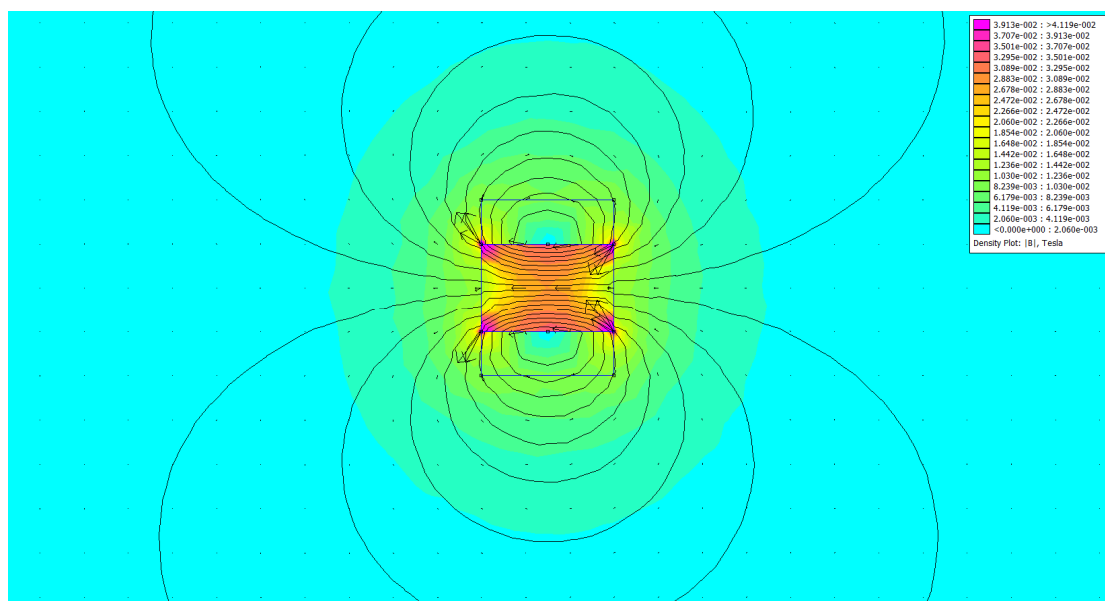
Tabulka 3: magnetizace transformátorových plechů Fe + 3% Si



Obr. 3: Graf závislosti μ_r na magnetické indukci B [T] – plechy Fe + 3% Si

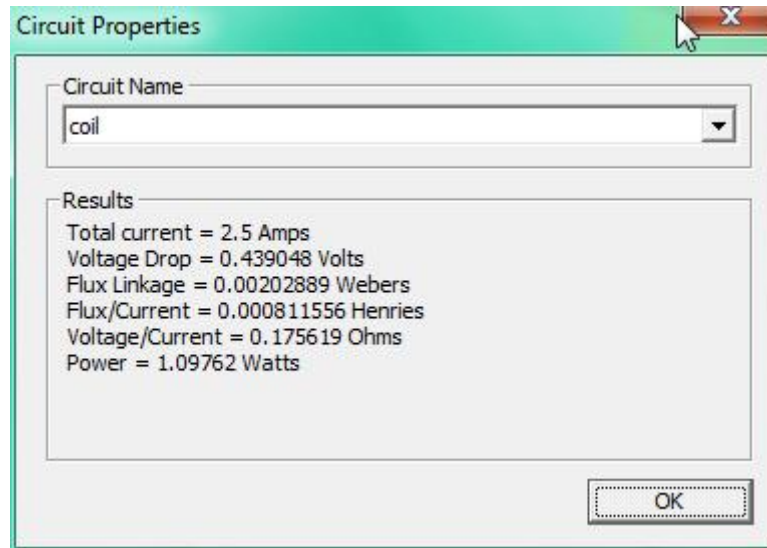
Pro nízké kmitočty mají transformátorové plechy vynikající magnetické vlastnosti. Bohužel se pro stavbu MEGu příliš nehodí. Daly by se však použít pro levné ověření principu.

V první části článku jsme odhadovali výkon měniče bez magnetu i s magnetem na základě energie uložené ve vzduchové mezeře. Nyní si pomocí simulace a výpočtu ukážeme, že to má smysl. Máme cívku s otevřeným feritovým jádrem s 200 závitů, kterou protéká stejnosměrný proud 2,5A.



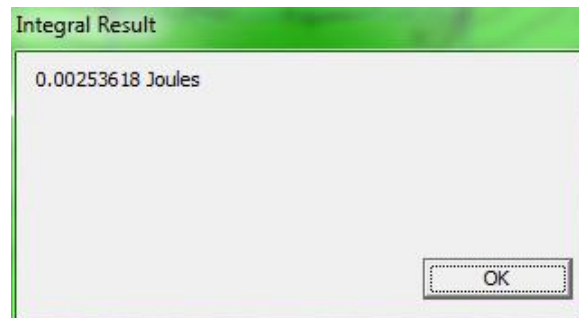
Obr. 4: Simulace cívky se otevřeným feritovým jádrem

Ve zkopírovaném okně z programu Femm (obr. 5) máme mj. vypočetnou indukčnost 0,000811556 H při proudu 2,5A. Na základě tohoto údaje vypočítáme energii cívky.



Obr. 5: Vypočtené parametry cívky programem Femm

$$W = 1/2 \cdot L \cdot I^2 = 0,5 \cdot 0,000811556 \cdot 2,5^2 = 0,0025361125 \text{ Joulů} \quad (1)$$



Obr. 6: Výsledek výpočtu energie magnetického pole programem Femm

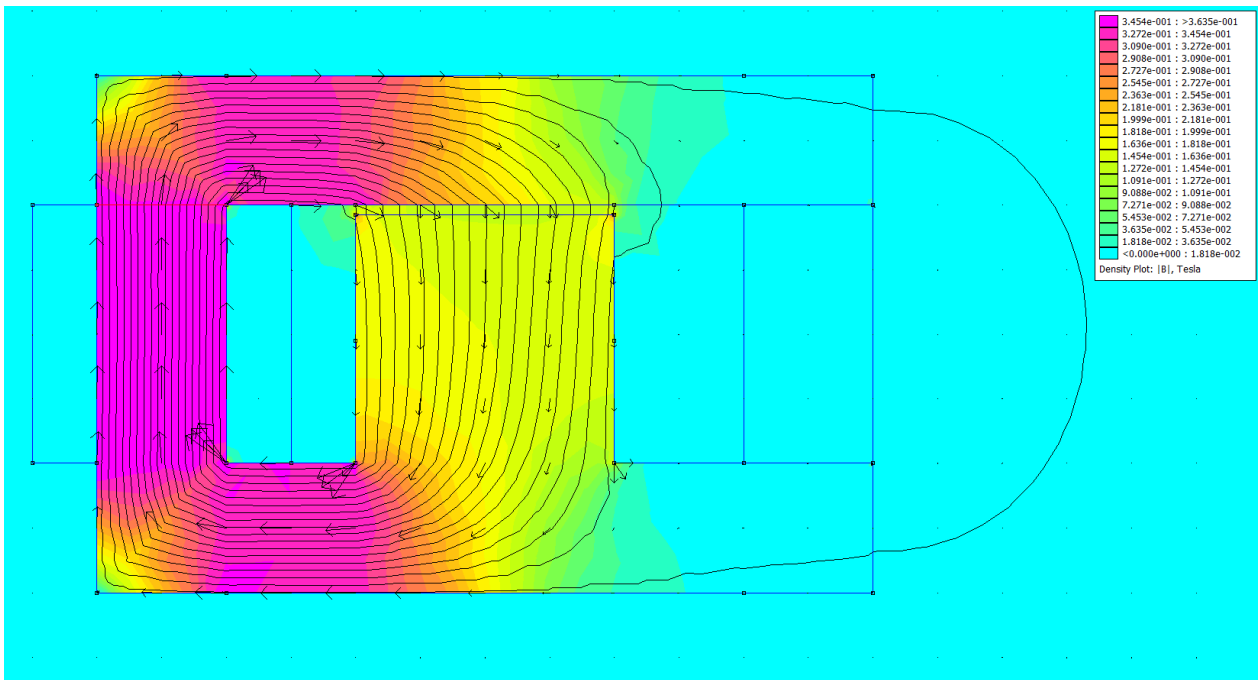
Vidíme (obr. 6), že vypočtená hodnota energie cívky na základě její indukčnosti a proudu, který jí prochází, se přibližně rovná energii magnetického pole, vypočtené programem Femm. Pokud chceme určit vliv magnetu na výkon MEGu, stačí určit energie magnetického pole při:

- 1) průchodu proudu cívkou s magnetem
- 2) nulovém proudu cívkou s magnetem
- 3) průchodu proudu cívkou bez magnetu
- 4) nulovém proudu cívkou bez magnetu

Je zřejmé, že poslední bod provádět nemusíme, protože teoreticky bude energie magnetického pole rovna nule.

Nyní se vrátíme k magnetizační křivce feritu. Z tabulky 1 vyplývá, že maximální permeabilita je při magnetické indukci $B = 0,123\text{T}$. Feritové magnety však mívají remanentní indukci $B_r \approx 0,37\text{T}$. Pro správnou funkci MEGu je třeba, aby cívka vyvinula sycení B minimálně $0,3\text{T}$, ale při tomto sycení je relativní permeabilita pouze kolem 270. Vrátime se proto k MEGu z první článku a provedeme energetickou bilanci

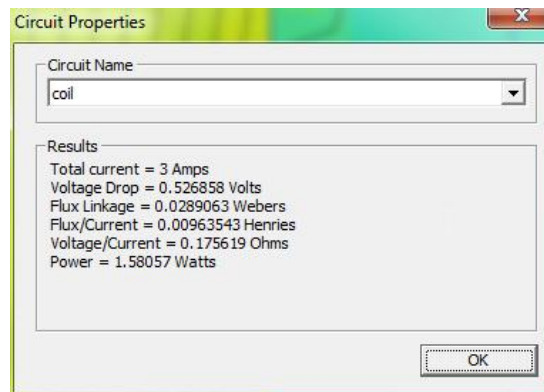
při vyjmutém magnetu pro různě velkou vzduchovou mezeru. Na obr. 7 máme simulaci při proudu 3A a vzduchové mezeře 1,5mm.



Obr. 7: Simulace MEGu bez magnetu

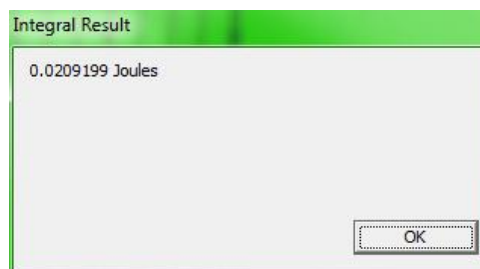
Simulační program spočítal indukčnost $L = 0,00963543$ H, takže při proudu 3A je energie cívky:

$$L = 1/2.L.I^2 = 0,5 \cdot 0,00963543 \cdot 3^2 = 0,043359435J$$



Obr. 8: Parametry cívky MEGu vypočítané programem Femm

Tuto vypočítanou hodnotu energie cívky porovnáme s celkovou energií magnetického pole:

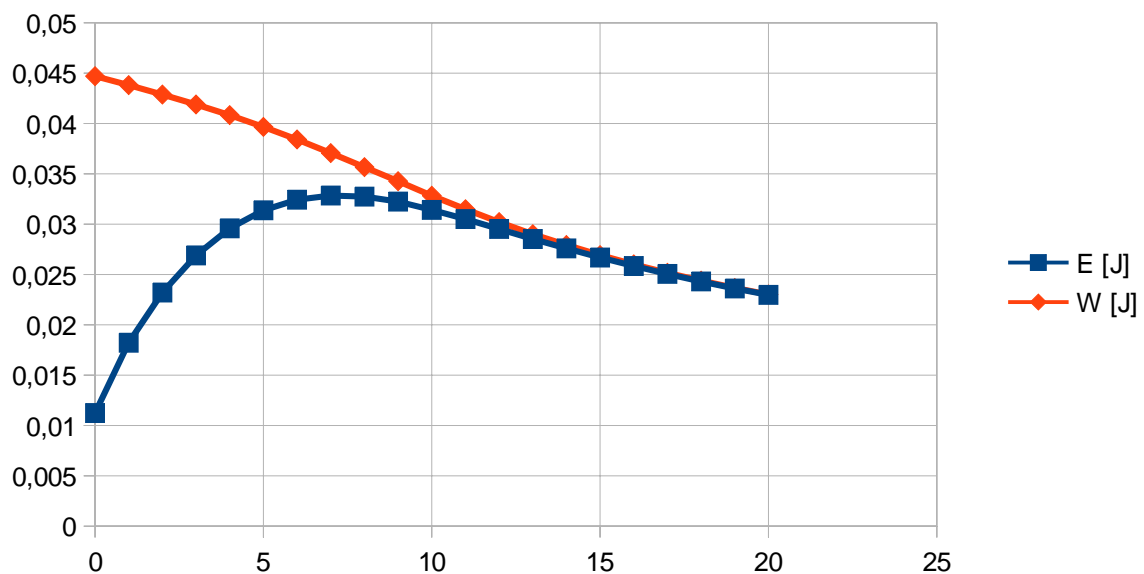


Obr. 9: Energie magnetického pole cívky z obr. 7 vypočítaná programem Femm

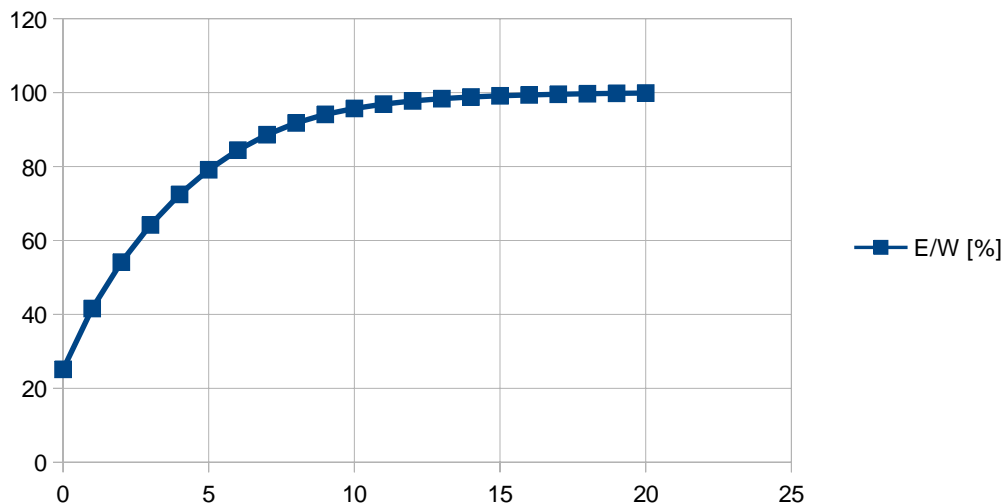
Vidíme, že energie magnetického pole vypočítaná programem Femm je oproti vypočítané hodnotě na základě proudu a indukčnosti zhruba poloviční. Tento rozpor je zřejmě způsoben tím, že feritové jádro je přesycené. Bude zajímavé sledovat, jak se bude tento poměr měnit v závislosti na šířce vzduchové mezery.

mezera [mm]	I [A]	B.n [T]	L [H]	E [J]	W [J]	E/W [%]
0	3	0,358	0,009933	0,01123	0,04470	25,13
1	3	0,351	0,009737	0,01822	0,04382	41,58
2	3	0,344	0,009529	0,02321	0,04288	54,12
3	3	0,335	0,009310	0,02690	0,04190	64,21
4	3	0,327	0,009074	0,02958	0,04083	72,45
5	3	0,317	0,008814	0,03138	0,03966	79,12
6	3	0,307	0,008537	0,03244	0,03842	84,43
7	3	0,296	0,008238	0,03284	0,03707	88,60
8	3	0,285	0,007926	0,03274	0,03567	91,80
9	3	0,273	0,007616	0,03225	0,03427	94,10
10	3	0,262	0,007296	0,03142	0,03283	95,70
11	3	0,251	0,006998	0,03051	0,03149	96,88
12	3	0,241	0,006714	0,02953	0,03021	97,73
13	3	0,231	0,006446	0,02853	0,02901	98,36
14	3	0,223	0,006207	0,02760	0,02793	98,80
15	3	0,215	0,005984	0,02669	0,02693	99,13
16	3	0,207	0,005780	0,02585	0,02601	99,37
17	3	0,201	0,005594	0,02506	0,02517	99,55
18	3	0,195	0,005420	0,02431	0,02439	99,68
19	3	0,189	0,005259	0,02361	0,02367	99,79
20	3	0,184	0,005113	0,02298	0,02301	99,86

Tabulka 4: Závislost parametrů mag. obvodu na velikosti vzduchové mezery - ferit



Obr. 10: Závislost energie cívky a mag. pole na šířce vzduchové mezery – ferit



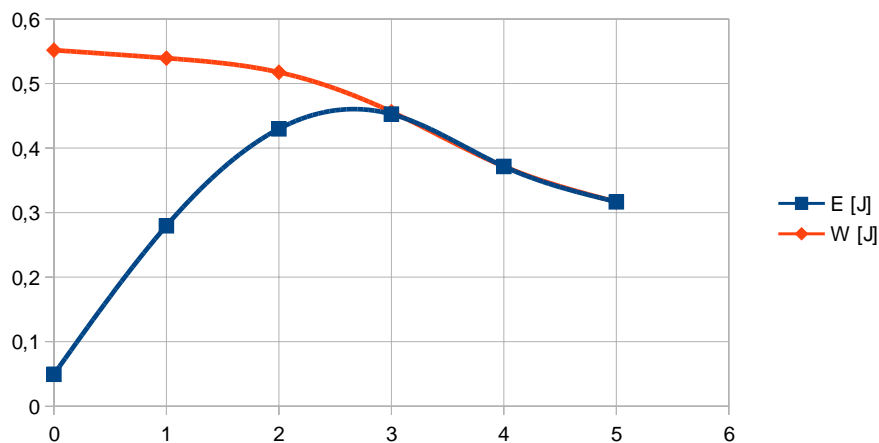
Obr. 11: Závislost poměru E/W na velikosti vzduchové mezery – ferit

V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty různých parametrů na velikosti vzduchové mezery. Parametr E je energie magnetického pole, W je vypočtená energie cívky. Žlutě zvýrazněný řádek označuje bod, kdy je největší energie magnetického pole. Z výše uvedené tabulky a grafů je zřejmé, že ferit se pro MEG moc nehodí. Pro srovnání vytvoříme podobnou tabulku pro transformátorové plechy (viz tabulka 3, obr. 3).

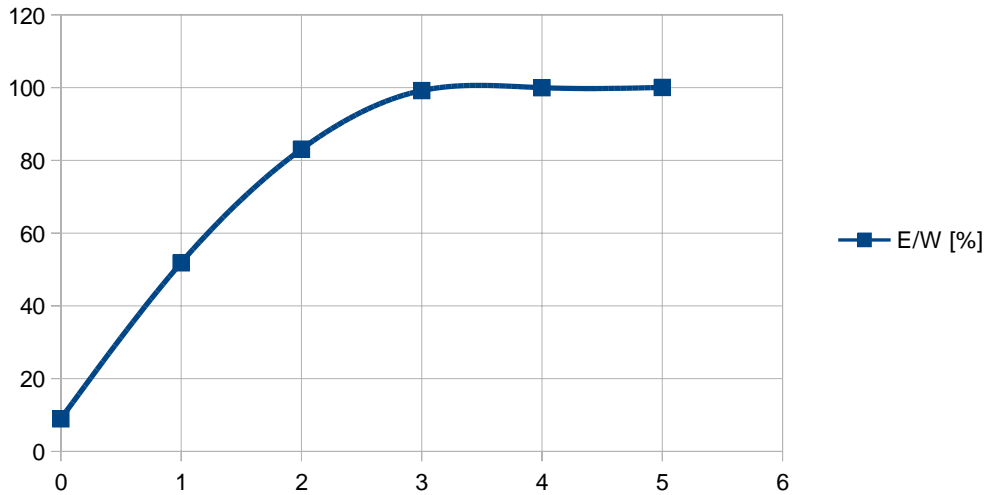
mezera [mm]	I [A]	B.n [T]	L [H]	E [J]	W [J]	E/W [%]
0	7	1,882	0,022520	0,04939	0,55174	8,95
1	7	1,849	0,022014	0,27959	0,53935	51,84
2	7	1,785	0,021121	0,42987	0,51747	83,07
3	7	1,578	0,018627	0,45263	0,45635	99,18
4	7	1,276	0,015169	0,37153	0,37164	99,97
5	7	0,993	0,012923	0,31674	0,31662	100,04

Tabulka 4: Závislost parametrů mag. obvodu na velikosti vzduchové mezery – Fe-Si 3%

Tabulka 4 je podstatně kratší, protože již při šířce mezery 5mm jsme u poměru E/W dosáhli 100%.

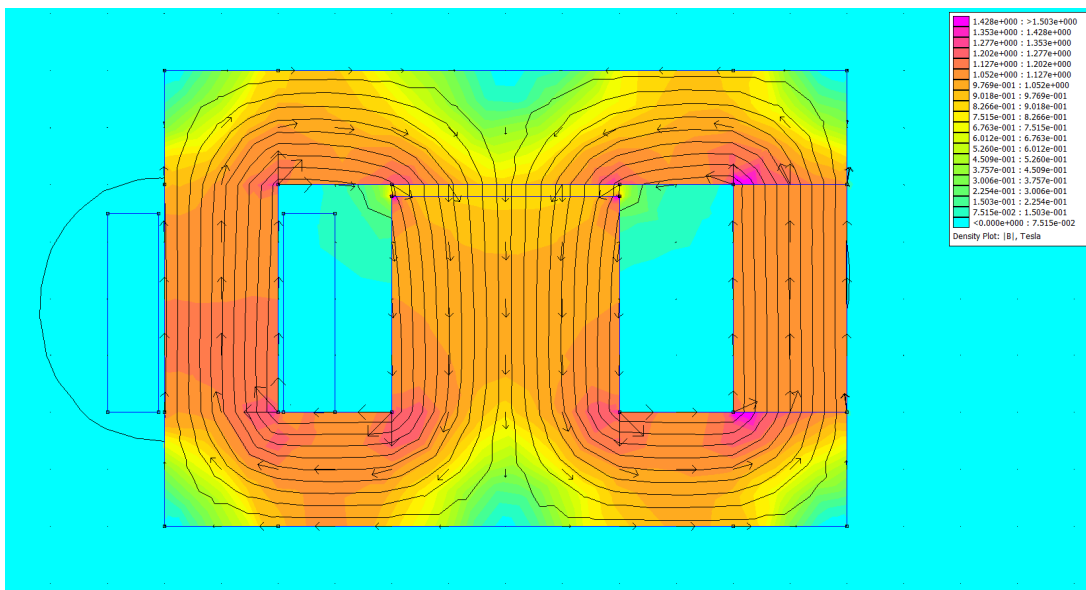


Obr. 12: Závislost energie cívky (W) a mag. pole (E) na šířce vzduchové mezery - Fe-Si 3%



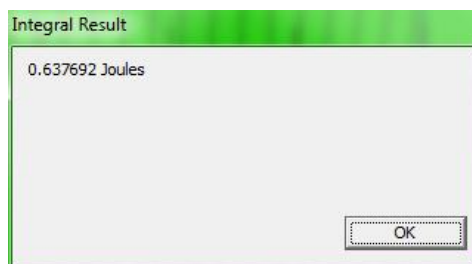
Obr. 13: Závislost poměru E/W na velikosti vzduchové mezery – Fe-Si 3%

Nyní do mag. obvodu (obr. 7) vložíme neodymový magnet a nastavíme vzduchovou mezeru 2mm:



Obr. 14: MEG složený z Fe-Si plechů s neodymovým magnetem

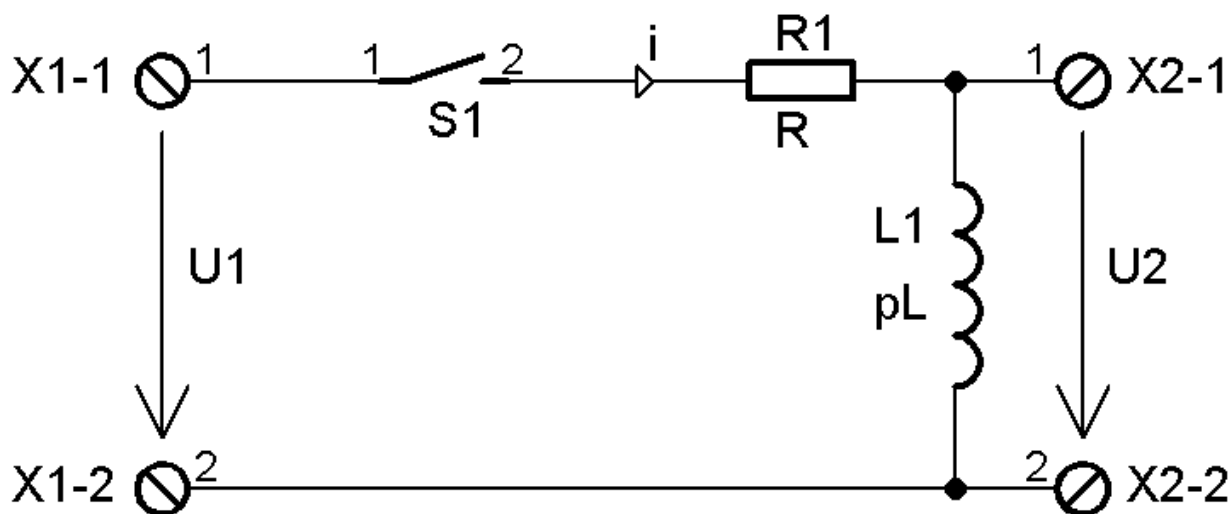
a změříme energii magnetického pole:



Obr. 15: Energie magnetického pole MEGu z obr. 14: $I = 7A$, $\delta = 2mm$.

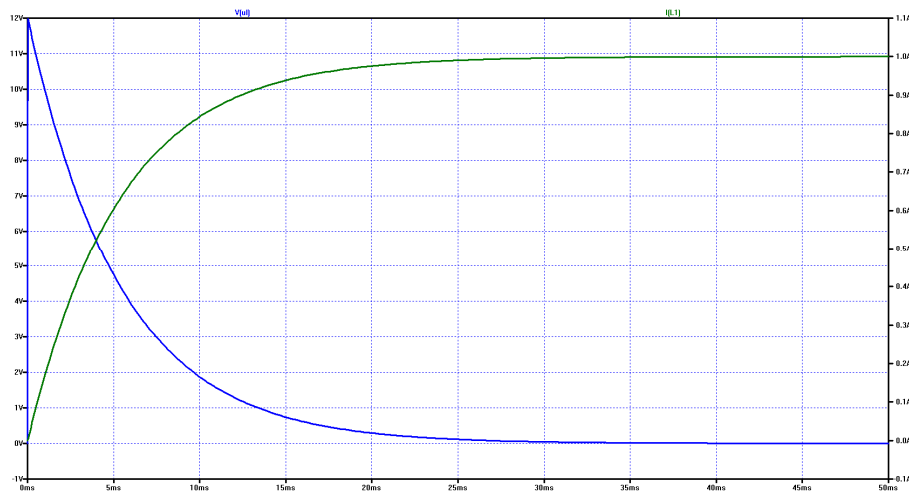
Abychom tento zdánlivý rozpor mezi „energií“ cívky W a energií magnetického pole E vyřešili, musíme si říci, jak vzorec pro energii cívky vlastně vzniknul.

Energie cívky



Obr. 16: RL obvod

Na obr. 16 máme jednoduchý obvod se vstupními svorkami, k nimž je připojen zdroj napětí U_1 , spínač S_1 , odpor R_1 a cívka L_1 . Když sepneme spínač S_1 , cívkou L_1 začne protékat proud. Nárůst proudu však nebude skokový, ale bude růst podle exponenciální křivky, jak jsme si ukázali v první části tohoto článku.



Obr. 17: Průběh proudu protékajícího cívkou L_1 po sepnutí S_1

Na obr. 17 máme zobrazen průběh proudu protékajícího cívkou L_1 (zelená) a průběh napětí (modrá) na této cívce po sepnutí spínače S_1 . Pro překonání reaktance cívky potřebujeme v čase t po sepnutí S_1 výkon

$$P(t) = u_L(t) \cdot i(t) = L \cdot \frac{di}{dt} \cdot i(t) \quad (2)$$

V čase T byla vykonána práce

$$A = \int_0^T P(t) \cdot dt \quad (3a)$$

Po dosazení (2) do (3) dostaneme:

$$A = \int_0^T u_L(t) \cdot i(t) \cdot dt = L \int_0^T \frac{di}{dt} \cdot i(t) \cdot dt = L \int_0^{i(T)} i(t) \cdot di = 1/2 \cdot L \cdot i^2(T) \quad (3b)$$

což je vlastně vztah (1). Tento vzorec platí pouze v případě, že $L = \text{konst.}$ Pokud cívka obsahuje feromagnetické jádro, vztah (1) neplatí, jak jsme se přesvědčili výše. Statická definice indukčnosti L je

$$L = N \cdot \Phi / I \quad (4)$$

kde N je počet závitů cívky, Φ je magnetický tok a I je proud procházející cívkou. Dynamická definice indukčnosti je podle literatury dána vztahem

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

Vztah (5), který uvádí velikost indukovaného napětí při změně proudu v cívce, se pro indukčnost $L = f(i)$, která je funkcí proudu, píše ve tvaru

$$u_L(t) = N \cdot d\Phi/dt \quad (6)$$

Pokud indukčnost budeme definovat jako

$$L = N \cdot d\Phi/di \quad (7)$$

po dosazení L podle (7) do (5) dostaneme

$$u_L(t) = L \cdot di/dt = N \cdot d\Phi/di \cdot di/dt = N \cdot d\Phi/dt$$

což je vztah (6).

Nyní do vztahu (3b) dosadíme za L podle (7):

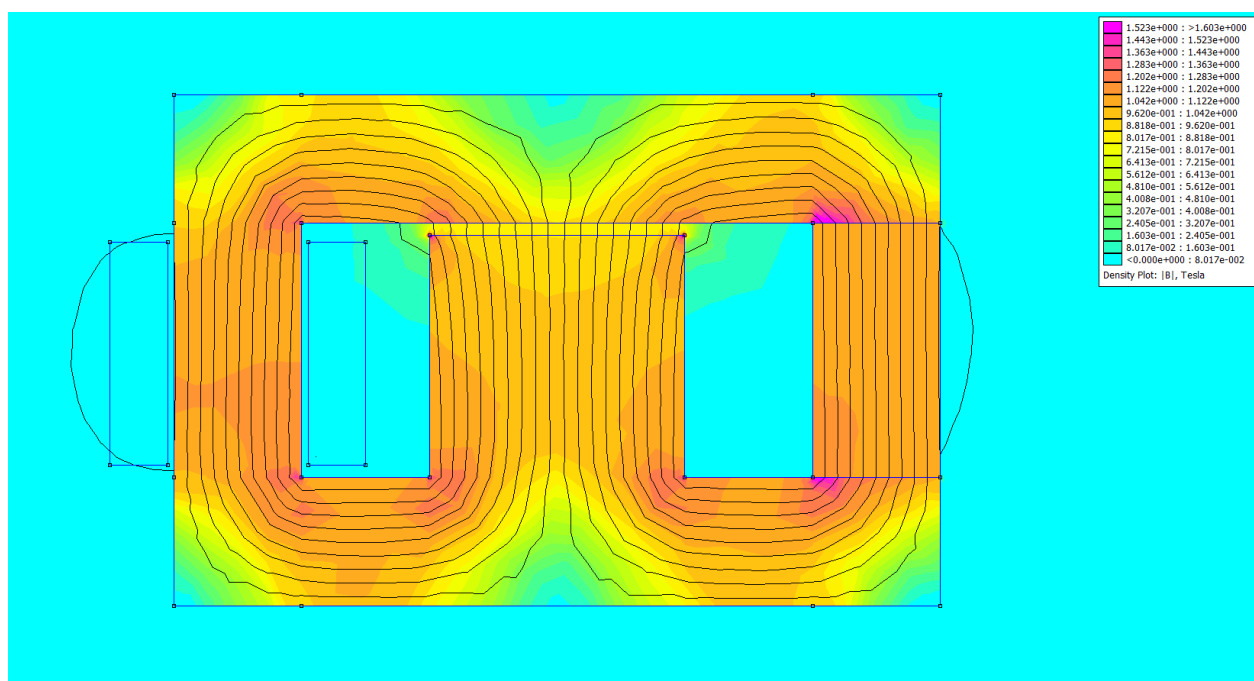
$$A = \int_0^T u_L(t) \cdot i(t) \cdot dt = L \int_0^T \frac{di}{dt} \cdot i(t) \cdot dt = L \int_0^{i(T)} i(t) \cdot di = N \int_0^{i(T)} d\Phi/di \cdot i(t) \cdot di$$

Takže dostaneme výsledný vztah pro energii W cívky na základě $\Phi = f(i)$ jako funkce proudu:

$$W = N \int_0^{\Phi} i(\Phi) \cdot d\Phi \quad (8)$$

Ve skutečnosti by funkce $i(\Phi)$ měla být spíše napsána ve formě $\Phi(i)$, ale to je detail. Podstatné je, že proud i a magnetický tok Φ jsou svázány funkčním vztahem na základě magnetizační křivky. Bylo by jistě možné magnetizační křivku, tj. funkční vztah $\Phi(i)$, resp. $i(\Phi)$, vyjádřit pomocí nějaké analytické funkce a integrál vypočítat. To by však nebylo příliš praktické. Pro nás z toho plyne to, že při ověřování vlivu magnetu na energetickou bilanci MEGu se budeme pohybovat v oblasti kolem nejvyšší permeability. Proto při následující simulaci MEGu pro magnetický obvod použijeme transformátorové plechy s 3% křemíku a neodymový magnet (obr. 18). Nyní provedeme energetickou bilanci tohoto MEGu. Protože je zde osazen permanentní magnet, není možné při výpočtech použít staticky definovanou indukčnost, ale musíme použít indukčnost definovanou vztahem (7). U MEGu na obr. 18 jsme proudem cívky o hodnotě 7A dosáhli magnetické indukce kolem 1T, což je pro energetickou bilanci ideální stav. Abychom mohli zjistit dynamickou indukčnost, musíme zjistit hodnoty sdruženého magnetického toku $N \cdot \Phi$ ve dvou bodech

magnetizační křivky. Na základě dynamické indukčnosti a proudu procházejícího cívkou potom vypočítáme množství energie, které jsme vložili do cívky. Tuto energii potom porovnáme s energií magnetického pole.



Obr. 18: simulace MEGu s jádrem z plechů Fe-Si a neodymovým magnetem

I [A]	N.Φ [Wb] Sdružený tok	N.Φ/I [H] Stat. indukčnost	E [J] Energie mag. pole	B.n [T]	
				Cívka	Magnet
7	0,0824578	0,0126368	0,634359	0,973091	1,09387
8	0,113944	0,014243	0,82545	1,25816	1,08457

Tabulka 5: Parametry magnetického obvodu pro určení dynamické indukčnosti – pro $B \approx 1T$

Pro určení přibližné hodnoty dynamické indukčnosti vztah (7) upravíme následovně:

$$L \approx N \cdot \Delta\Phi / \Delta i = N \cdot (\Phi_2 - \Phi_1) / (I_2 - I_1) \quad (9)$$

V našem případě:

$$L \approx (N \cdot \Phi_2 - N \cdot \Phi_1) / (I_2 - I_1) = (0,113944 - 0,0824578) / (8 - 7) = 0,0314862 \text{ H}$$

Energii cívky vypočítáme podle (1), kde za L dosadíme dynamickou indukčnost. V následující tabulce najdete vypočítanou energii cívky pro proudy 7 a 8A a porovnání s energií magnetického pole, kterou vypočítal simulační program Femm.

I [A]	W [J]	E [J]	E/W [%]
7	0,7714119	0,634359	82,23
8	1,0075584	0,82545	81,91

Tabulka 6: Vypočítaná energie cívky a energie mag. pole

Tabulka 6 ukazuje, že energie vypočítaná na základě dynamické indukčnosti je větší než energie magnetického pole. Co to znamená? Neznamená to, že jsme investovali do cívky více energie než je energie pole? To rozhodně ne. To znamená pouze to, že dynamická indukčnost v bodě 7,5A je vyšší než je průměrná

indukčnost od počátku magnetizační křivky, tj. od proudu 0A. Provedme nyní stejné výpočty pro proudy 0 a 1A.

I [A]	N.Φ [Wb] Sdružený tok	N.Φ/I [H] Stat. indukčnost	E [J] Energie mag. pole	B.n [T]	
				Cívka	Magnet
0	-0,0923732	-	0,00135396	-1,04972	1,15967
1	-0,0665939	-0,0665939	0,0142592	-0,761353	1,15029

Tabulka 7: Parametry magnetického obvodu pro určení dynamické indukčnosti – pro malé proudy

Dynamická indukčnost pro malé proudy:

$$L \approx (N \cdot \Phi_2 - N \cdot \Phi_1) / (I_2 - I_1) = (-0,0665939 + 0,0923732) / (1 - 0) = 0,0257793 \text{ H}$$

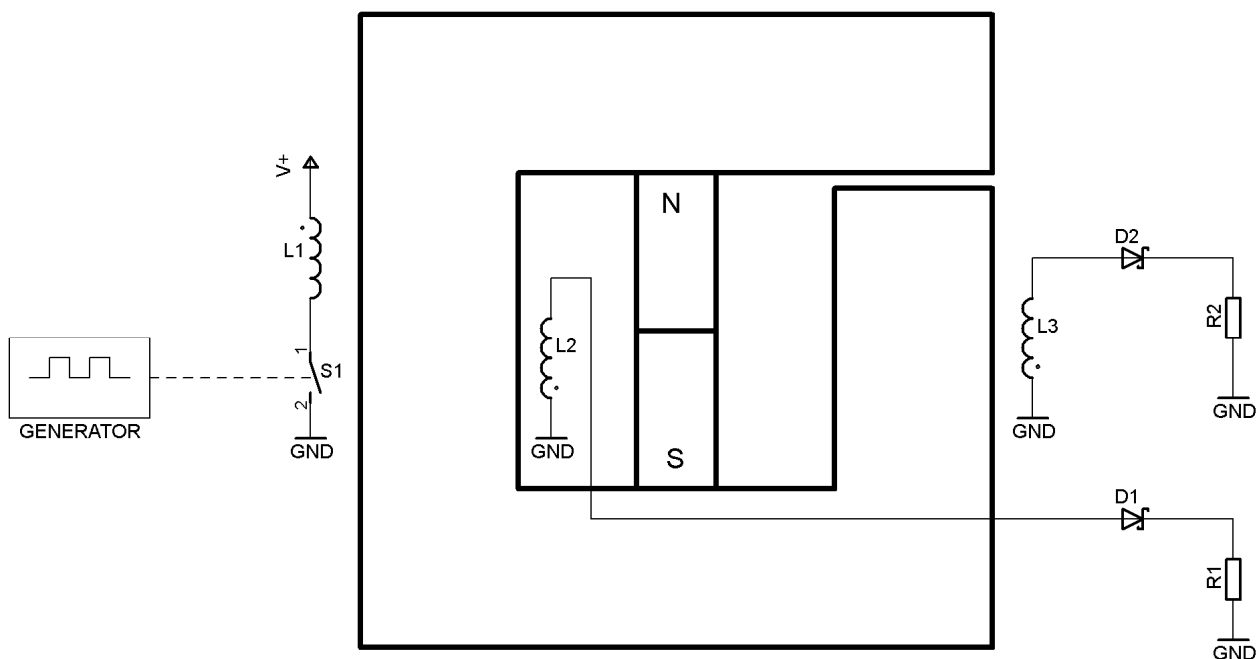
I [A]	W [J]	E[J]	E/W [%]
0	0	0,00135396	-
1	0,01288965	0,0142592	110,63

Tabulka 8: Vypočítaná energie cívky a energie mag. pole – pro malé proudy

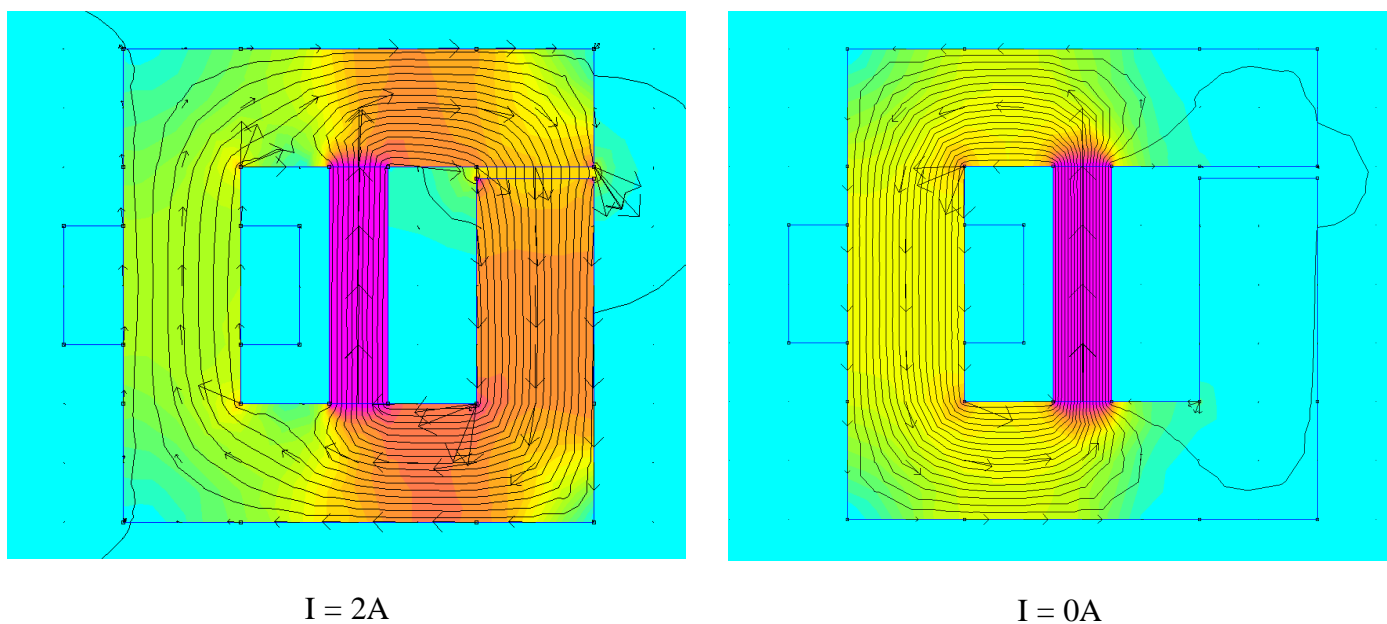
Z tabulky 8 je vidět, že na začátku magnetizační křivky je poměr E/W větší než 1. Opět to neznámá, že jsme nějakou energii ušetřili a pro vytvoření magnetického pole jsme spotřebovali méně energie než kolik jí je uloženo v tomto poli. Znamená to pouze to, že jsme podhodnotili velikost dynamické indukčnosti a že ve skutečnosti je průměrná indukčnost v rozmezí proudu 0 – 1A větší. Z výše uvedeného můžeme učinit následující závěr: Vložením permanentního magnetu do mag. obvodu jsme při stejném proudu sice získali větší energii magnetického pole, avšak zaplatili jsme za to vyšší dynamickou indukčností, takže pro vybudění tohoto pole spotřebujeme v ideálním případě stejné množství energie jako je jí obsaženo v magnetickém poli. Znamená to tedy, že z MEGu nelze čerpat více energie než je vloženo do cívky? Odpověď zní lze i nelze. Pokud v magnetickém obvodu na obr. 18 na levý sloupek umístíme budící cívku a na prostředním sloupku bude cívka, z níž budeme čerpat energii, tak dostaneme klasický blokující měnič s účinností pod 100%. Magnetické pole magnetu se však při zániku proudu v levé cívce pouze přemísťuje z prostředního sloupku na levý. Toto magnetické pole magnetu indukuje v cívce na levém sloupku napětí, které se projeví namáháním spínacího tranzistoru a může dojít k jeho zničení. Pokud však tuto energii vhodným způsobem odvedeme, nejen že zachráníme tranzistor, ale získáme energii navíc. Tím „vhodným způsobem“ může být další sekundární cívka s vhodně polarizovanou rychlou usměrňovací diodou a odporovou zátěží. Tím se již dostáváme ke kapitole o jiných konstrukcích MEGu.

Jiné konstrukce MEGu

Nyní se budeme věnovat novým konstrukcím MEGu. Jak bylo uvedeno výše, potřebujeme mít kromě sekundární cívky na jiném sloupku ještě jednu cívku pro sběr energie, která bude na stejném sloupku jako budící cívka a která bude využívat energii magnetu, jehož magnetický tok byl po zániku proudu v budící cívce přeměrován na sloupek, kde se nachází budící cívka. Jedno z možných uspořádání je na obr. 19, kde na levém sloupku jsou dvě cívky, uprostřed je permanentní magnet a na sloupku vpravo se vzduchovou mezerou je třetí cívka. Cívka L1 je budící a cívky L2 a L3 jsou sběrné. MEG funguje jako blokující měnič, to znamená, že sekundární cívky mají prohozené začátky a konce cívek. Cívky spolu s diodami D1 a D2 jsou zapojeny tak, aby diody vedly po vypnutí spínače S1. Jak tento MEG funguje si ukážeme pomocí simulace.



Obr. 19: MEG s magnetem uprostřed

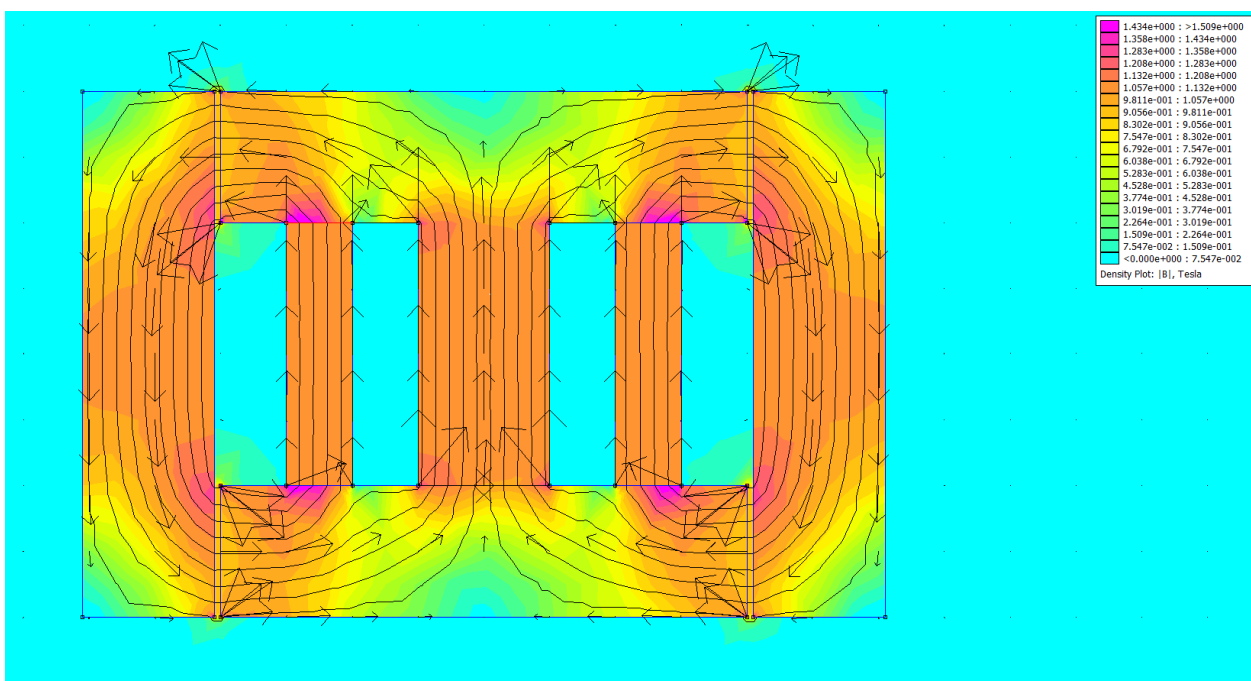


Obr. 20: Funkce MEGu podle obr. 19

Na obr. 20 vlevo máme situaci, kdy cívkou teče proud. Magnetický tok vybuzený cívkou L1 způsobí, že magnetický tok permanentního magnetu je přeměřován na pravý sloupek se vzduchovou mezerou. Pravým sloupkem tedy teče tok magnetu a budicí cívkou L1. Diody D1 a D2 (viz obr. 19) jsou spolu s cívkami L2 a L3 polarizovány tak, aby ve fázi, kdy cívkou L1 teče proud, byly zavřené. Jakmile dojde k vypnutí spínače S1, cívkou L1 přestane téct proud a magnetické pole vyvolané cívkou L1 začne rychle zanikat a magnetický tok magnetu se přesměruje na levý sloupek. V cívkách L2 a L3 se začne indukovat napětí opačné polarity a diody D1 a D2 se otevřou. Sekundární magnetické pole cívek L2 a L3 působí proti změně magnetického pole, jež sekundární proud vyvolalo. To znamená, že když bude odběr proudu například z cívky L3 příliš velký, zpomalí se nárůst magnetického toku v levém sloupku opačným směrem, takže se v cívce L2 bude indukovat menší napětí. Opačně (v případě velkého odběru proudu z L2) to působí obdobně. To znamená, že účinnost MEGu bude záviset na velikosti odběru proudu z obou cívek. Při určité hodnotě zatěžovacích odporů R1 a R2 bude účinnost maximální a domnívám se, že může být vyšší než 100%. Stejně jako u MEGu

bez vzduchové mezery vyšší účinnosti dosáhneme při nelineární zátěži. Tento názor je podpořen zkušenostmi dalších výzkumníků na poli MEGu, jako je například bulharský badatel Valeri Ivanov. Například můžeme MEG použít pro nabíjení baterií. Z principu však bychom měli z MEGu se vzduchovou mezerou získat víc energie, než kolik jí vložíme do cívky, i v případě, že použijeme čistě odporovou zátěž.

MEG na obr. 21 má budicí cívku navinutou na prostředním sloupku, vedle nějž jsou dva permanentní magnety o poloviční šířce. Na krajích jsou další dva sloupky vyrobené z magneticky měkkého materiálu, jež jsou odděleny mezerami. Pro simulaci jsme použili hranoly složené z plechů Fe-Si o rozměrech 20 x 20 x 80 mm a dva neodymové magnety o rozměrech 10 x 20 x 40 mm. Vzduchové mezery jsou nastaveny na 1mm. Na středním sloupku je navinuta jak primární, tak sekundární cívka. Na sloupky za vzduchovými mezerami lze umístit další dvě sběrné cívky.



Obr. 21: MEG se dvěma magnety – proud cívkou $I = 7.5A$

Při proudu 7,5A cívkou na středním sloupku je magnetická indukce jak v magnetech, tak v železe kolem 1,1 Tesla. Pokud proud do cívky bude nulový, většina magnetického toku z magnetů se bude uzavírat přes střední sloupek, jak ukazuje následující obrázek 22. Na obr. 23 najdete simulaci při proudu 7,5A primární cívkou bez magnetů.

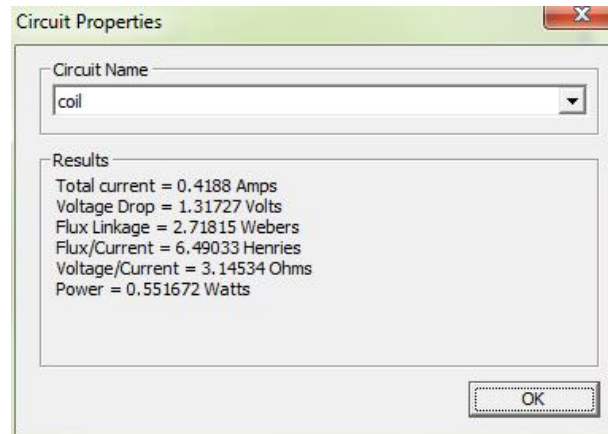
Použití plechů Fe-Si je pouze ilustrační a nemá velký praktický význam, protože je nelze použít pro vysoké kmitočty. Pokud bychom chtěli, aby výstupní výkon byl v řádu stovek wattů, museli bychom použít buď amorfni nebo nanokrystalický materiál. Jádra z tohoto materiálu jsou však dost drahá. Tato konfigurace by však mohla sloužit k ověření principu při napájení síťovým napětím. V tom případě bychom cívku na středním sloupku napájeli ze sítě přes usměrňovací diodu. Výstupní výkon by v tom případě byl v řádu desítek wattů. Také bychom museli použít cívku s více závitů a do cívky pouštět menší proud. Pro zajímavost spočítáme, jak velký proud by cívkou tekla a kolik by cívka měla závitů.

Při proudu 7,5A a 200 závitů primární cívky je energie magnetického pole $E = 0,681078$ Joulů. Pokud cívku budeme napájet pulzujícím stejnosměrným napětím ze sítě, bude příkon cívky – za předpokladu účinnosti 100% - $P = E \cdot f = 0,681078 \cdot 50 = 34W$. Při síťovém napětí 230VAC bude cívkou protékat proud $I = P/U = 34/230 = 148mA$ AC. Hodnota proudu je efektivní, proto pro získání maximální hodnoty musíme výsledný proud vynásobit druhou odmocninou ze dvou: $I_{max} = I_{ef} \cdot \sqrt{2} = 148 \cdot \sqrt{2} = 209,4mA$. Protože ze sítě odebíráme

každou druhou půlvlnu, musíme proud vynásobit ještě dvěma, takže maximální proud bude $209,4,2 = 418,8\text{mA}$. Magnetomotorické napětí $F_m = I \cdot N = 7,5\text{A} \cdot 200z = 1500\text{Az}$. Pro získání stejně velkého F_m budeme potřebovat $N = F_m/I = 1500/0,4188 = 3582$ závitů. Ještě provedeme kontrolu velikosti indukčnosti cívky. Impedance cívky je $Z = U/I = 230/(2,0,148) = 777\Omega$. Pokud zanedbáme činný odpor cívky, požadovanou indukčnost cívky vypočítáme z induktivní reaktance $Z \approx X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$, takže

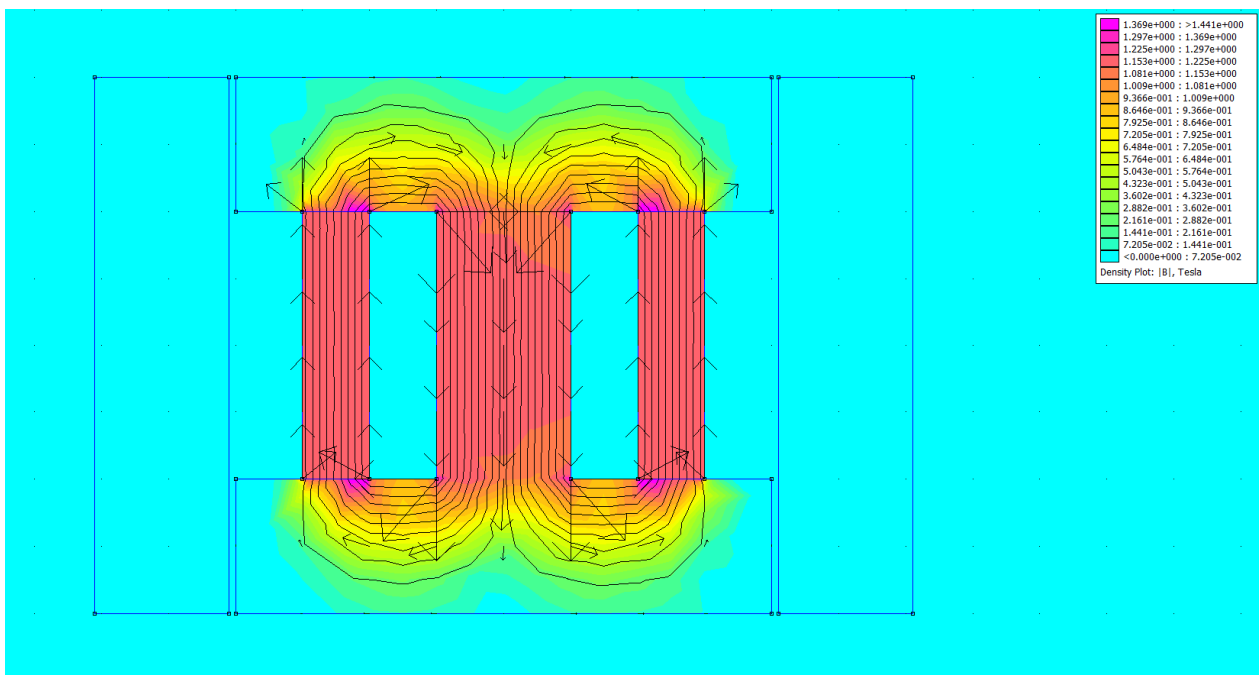
$$L \approx Z/2\pi \cdot f = 777/(100 \cdot \pi) = 2,47\text{H}$$

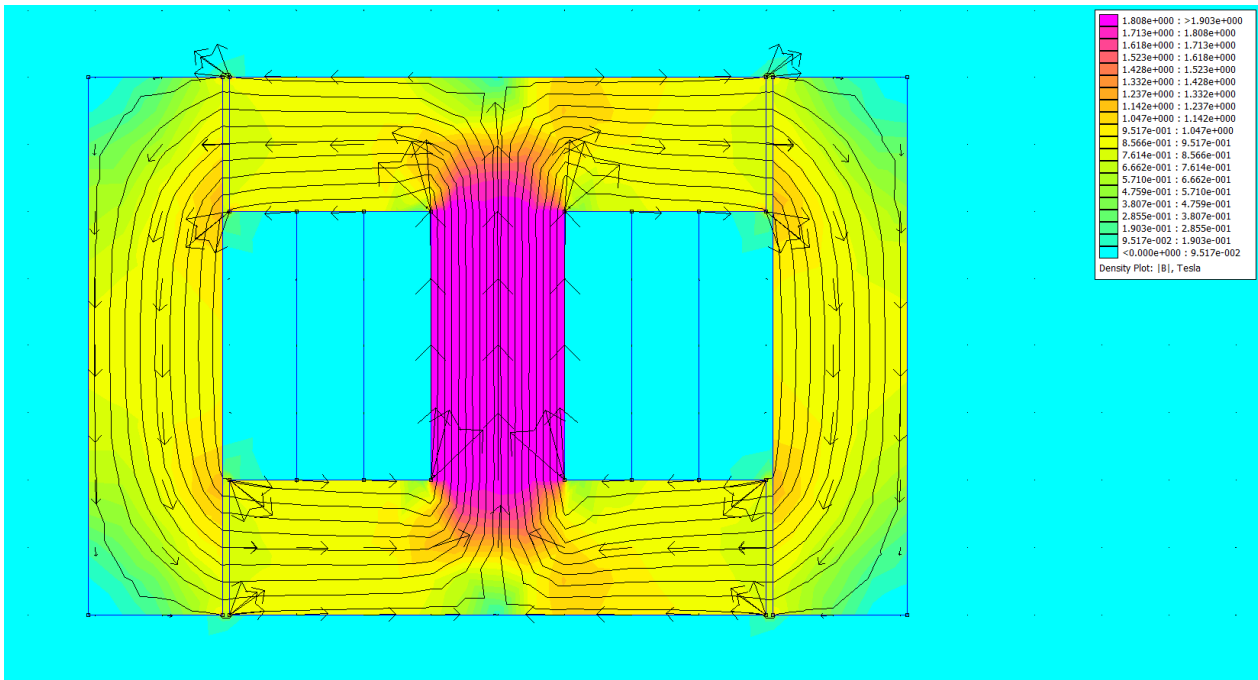
Nyní v simulačním modelu nastavíme 3582 závitů, proud 0,4188A a zjistíme statickou indukčnost bez magnetů:



Statická indukčnost je uvedena v řádce Flux/Current a má hodnotu 6,49H, což je víc než potřebujeme. Proto indukčnost upravíme zvětšením vzduchových mezer. Při zvětšení mezer na 5mm klesla statická indukčnost bez magnetů na cca 2,3H. Přesnou hodnotu proudu bychom doladili měřením proudu za současné změny vzduchových mezer. Další možností by bylo navinout méně závitů a mít větší proud. V tom případě bychom však potřebovali ještě autotransformátor, pomocí něhož bychom nastavili požadované napětí, abychom dosáhli požadovaného příkonu MEGu.

Poznámka: Ve skutečnosti bychom měli zjistit indukčnost dynamickou s magnety, která by byla o něco větší, ale pro orientaci stačí zjistit statickou indukčnost.



Obr. 22: MEG se dvěma magnety – proud cívkou $I = 0A$ Obr. 11: MEG bez magnetů – proud cívkou $I = 7,5A$

Závěr:

V článku se podařilo prokázat, že při splnění určitých podmínek a při určité konfiguraci magnetického obvodu, složeného z magneticky měkkého materiálu, permanentních magnetů a cívek, lze čerpat energii permanentních magnetů a tím zvýšit účinnost blokujícího měniče. Zvýšení účinnosti přesně spočítat nebo nasimulovat nelze, ale je nutné ji zjistit experimentálně, protože v magnetickém obvodu dochází ke složitým interakcím, jež jsou závislé mj. na velikosti zátěže.

Bylo zjištěno, že vložením permanentního magnetu, který působí proti magnetickému poli primární cívky se zvýší dynamická indukčnost, což na jedné straně zvětší nároky na energii potřebnou pro vybudování cívky. Na druhé straně však se zvýší celková energie magnetického pole. Můžeme tedy říci, že se potvrdila platnost zákona zachování energie. Pokud uvažujeme konfiguraci podle obr. 19 a 20, kde na levém sloupku je budicí cívka, uprostřed je permanentní magnet a na pravém sloupku se vzduchovou mezerou je sběrná (sekundární) cívka, tak pouze s těmito prvky zvýšení účinnosti nad 100% docílit nelze, protože zvýšení magnetického toku a tím i zvýšení energie magnetického pole bylo vykoupeno zvýšením dynamické indukčnosti primární cívky. Je zde však ve hře ještě jeden moment, a to ten, že při zániku magnetického pole primární cívky se magnetický tok permanentního magnetu z pravého sloupku se vzduchovou mezerou přeměruje do levého sloupku s primární cívkou. Tato změna magnetického toku je schopna konat další práci. Pokud tomuto toku postavíme do cesty další cívku (cívka L2 na obr. 19), získáme další energii zdarma. Je to energie magnetu, jejíž původ je zřejmě v éteru, který současná věda neuznává.