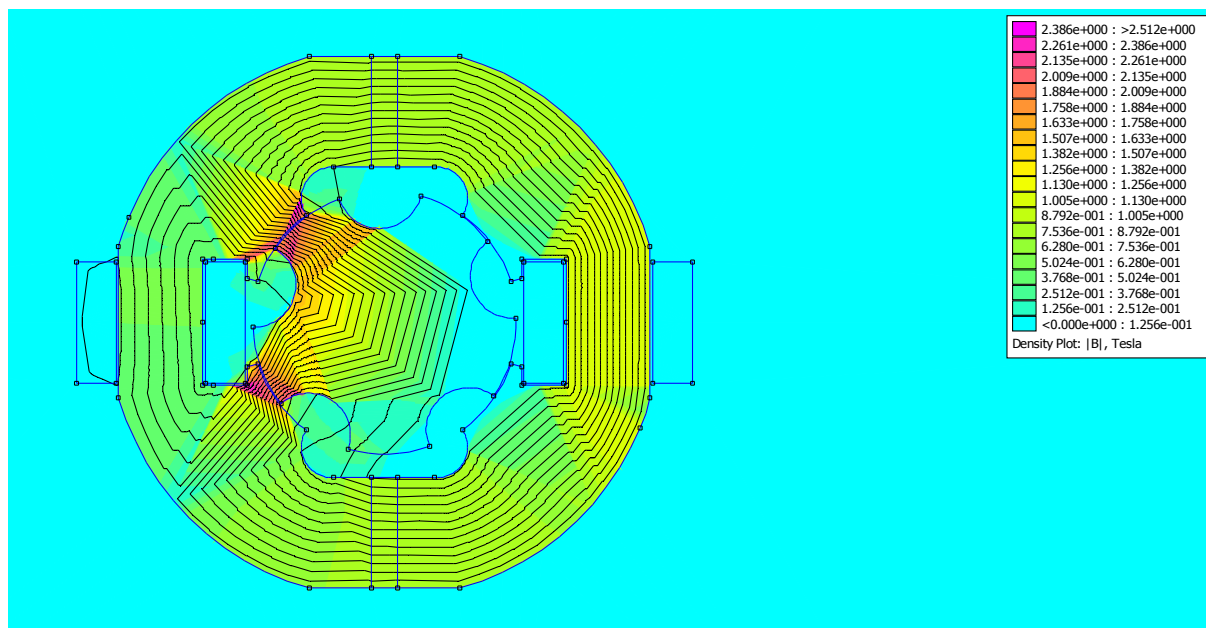


Regulace proudu reluktančního motoru

© Ing. Ladislav Kopecký, 13.11.09

V tomto článku se budeme zabývat zejména návrhem elektronického řízení spínaného reluktančního motoru (SRM) s důrazem na minimalizaci ztrát a optimální provoz, tj. provoz s maximální možnou účinností. Budeme řídit dvoufázový SRM, jehož statická simulace je zobrazena na obr. 1 níže.

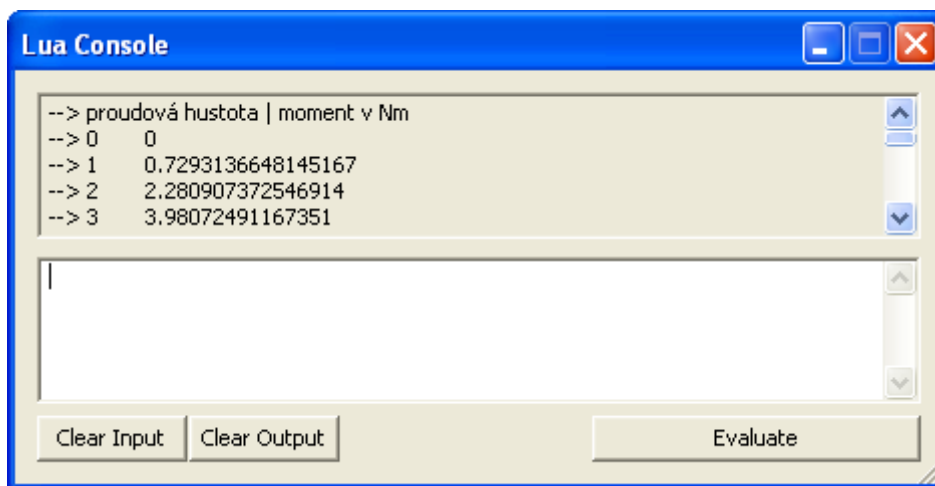


Obr. 1. Dvoufázový reluktanční motor – simulace

Pro optimální chod SRM je klíčové, aby ve všech pracovních polohách rotoru procházel příslušným vinutím statoru proud optimální velikosti, tj. takový proud, pro který bude maximální poměr kroutící moment / proud ve vinutí. Pro zjištění optimálního budícího proudu nám dobře poslouží simulační program Femm, který umožní tuto činnost automatizovat. Tento program je freeware, to znamená, že je volně stažitelný z internetu (<http://www.femm.info/>). Program Femm obsahuje vlastní programovací jazyk (Lua), který umožňuje většinu rutinních činností zautomatizovat. I my tento jazyk využijeme. Výpis programku, který nám pomůže najít optimální proud pro jednu polohu rotoru je zde:

```
showconsole()
clearconsole()
print("proudová hustota | moment v Nm")
open("srm-2f-opti.fem")
mi_saveas("temp.fem")
for i=0,26,1 do
    mi_modifymaterial("coil+",4,i)
    mi_modifymaterial("coil-",4,-i)
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_groupselectblock(1)
    m=mo_blockintegral(22)
    print(i,m)
    mo_close()
end
```

Nebudeme se zde zdržovat vysvětlováním, jak výše uvedený skript funguje. Zájemce si prostuduje uživatelskou příručku, kterou si stáhne zároveň s programem z výše uvedené webové adresy. Omezíme se pouze na konstatování, že program nastaví proud v budícím vinutí a pak vypočítá krouticí moment. Toto provede pro proudovou hustotu od 0 do 26 A/mm² s krokem 1. Výsledky se zobrazí v okně konzole:



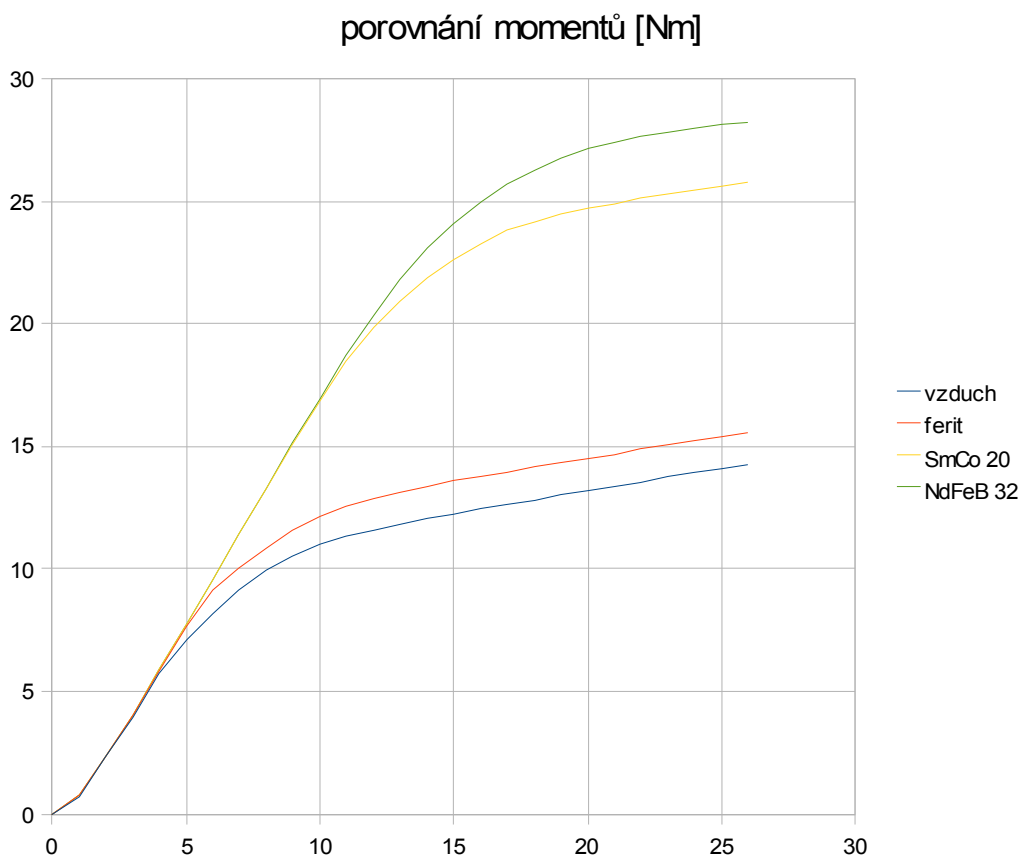
Obr. 2. Zobrazení výsledků výpočtu.

Vypočtená data potom přepíšeme do tabulky Excelu, provedeme příslušný výpočet a vytvoříme grafy. Dole vidíte tabulku závislostí momentů na velikosti proudu ve vinutí statoru. Jsou zde porovnány krouticí momenty podle druhu použitých (nebo nepoužitých) magnetů ve statoru.

Proudová hustota [A/mm ²]	porovnání momentů [Nm]				
	vzduch	ferit	SmCo 20	NdFeB 32	
0	0	0	0	0	0
1	0,73	0,74	0,76	0,76	0,76
2	2,28	2,3	2,32	2,32	2,32
3	3,98	4,01	4,03	4,03	4,04
4	5,69	5,84	5,85	5,85	5,87
5	7,08	7,71	7,72	7,72	7,73
6	8,2	9,14	9,57	9,57	9,57
7	9,14	10	11,4	11,4	11,41
8	9,93	10,82	13,25	13,25	13,27
9	10,56	11,57	15,09	15,09	15,12
10	11,03	12,17	16,88	16,88	16,95
11	11,35	12,59	18,5	18,5	18,71
12	11,61	12,9	19,84	19,84	20,35
13	11,85	13,16	20,93	20,93	21,83
14	12,06	13,38	21,85	21,85	23,09
15	12,26	13,59	22,64	22,64	24,11
16	12,46	13,78	23,29	23,29	24,97
17	12,65	13,97	23,81	23,81	25,69
18	12,83	14,15	24,19	24,19	26,29
19	13,02	14,34	24,48	24,48	26,78
20	13,2	14,51	24,72	24,72	27,14
21	13,38	14,69	24,93	24,93	27,41
22	13,56	14,87	25,12	25,12	27,63

23	13,73	15,04	25,3	27,81
24	13,9	15,21	25,47	27,97
25	14,07	15,38	25,63	28,12
26	14,24	15,54	25,79	28,26

Z tabulky je zřejmé, že čím je magnet silnější, tím výrazněji přispívá ke zvýšení krouticího momentu, zejména u vyšších proudů. Ještě lépe je to patrné z následujícího grafu.



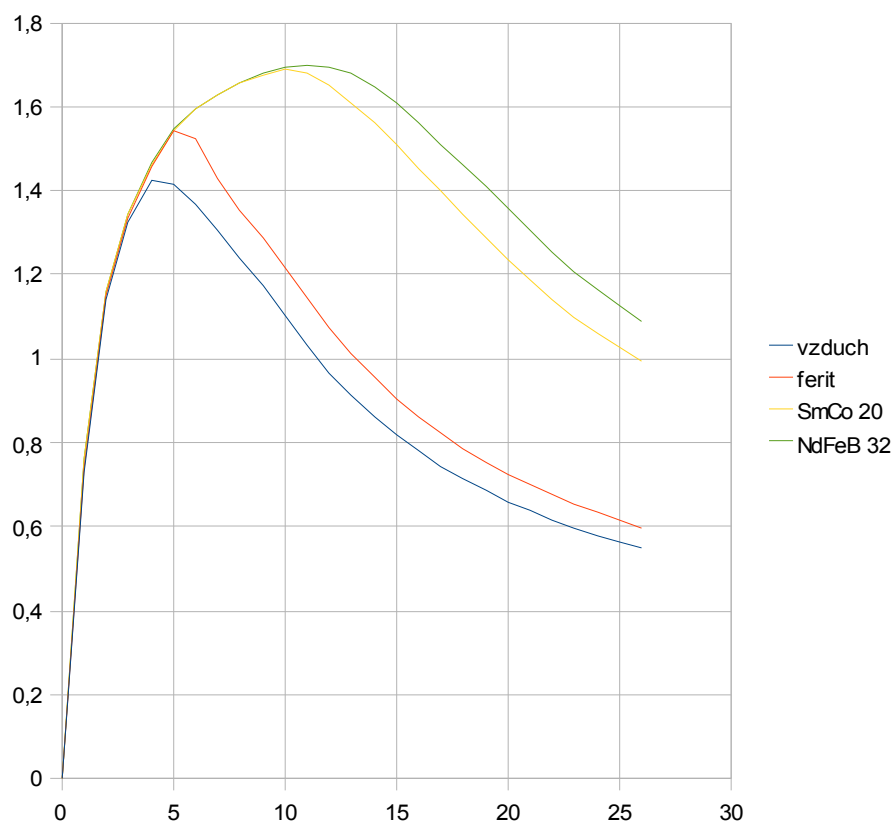
Obr. 3. Graf závislosti momentu na proudu pro různé druhy magnetů.

Nás však nejvíce zajímá, při jaké velikosti proudu je největší poměr moment / proud. V tabulce dole a v grafu pod ní vidíte tento poměr opět pro různé proudy a pro různé druhy magnetů ve statoru.

Proudová hustota A/mm ²	porovnání poměrů [Nm / A/mm ²]			
	vzduch	ferit	SmCo 20	NdFeB 32
0	0	0	0	0
1	0,73	0,74	0,76	0,76
2	1,14	1,15	1,16	1,16
3	1,33	1,34	1,34	1,35
4	1,42	1,46	1,46	1,47
5	1,42	1,54	1,54	1,55
6	1,37	1,52	1,6	1,6
7	1,31	1,43	1,63	1,63
8	1,24	1,35	1,66	1,66

9	1,17	1,29	1,68	1,68
10	1,1	1,22	1,69	1,7
11	1,03	1,14	1,68	1,7
12	0,97	1,08	1,65	1,7
13	0,91	1,01	1,61	1,68
14	0,86	0,96	1,56	1,65
15	0,82	0,91	1,51	1,61
16	0,78	0,86	1,46	1,56
17	0,74	0,82	1,4	1,51
18	0,71	0,79	1,34	1,46
19	0,69	0,75	1,29	1,41
20	0,66	0,73	1,24	1,36
21	0,64	0,7	1,19	1,31
22	0,62	0,68	1,14	1,26
23	0,6	0,65	1,1	1,21
24	0,58	0,63	1,06	1,17
25	0,56	0,62	1,03	1,12
26	0,55	0,6	0,99	1,09

porovnání poměrů [Nm / A/mm²]



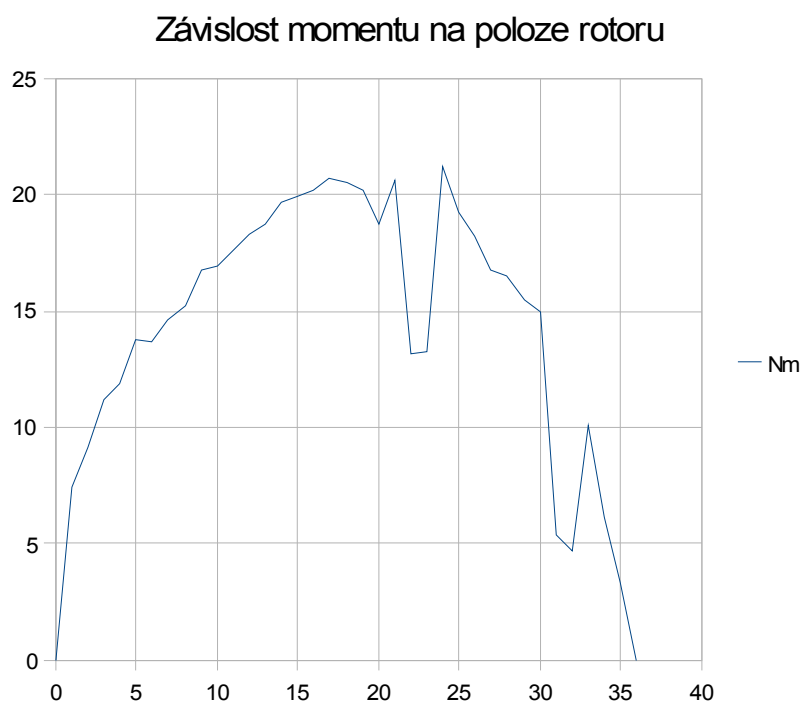
Obr. 4. Graf poměrů moment / proud pro různé druhy magnetů.

Z výše uvedených tabulek a grafů je zřejmé, že čím silnější magnet použijeme, tím pro daný proud dosáhneme vyššího kroutícího momentu a tím se zvýší optimální budící proud. My jsme však zjišťovali optimální proud pouze pro jednu polohu rotoru. Kdybychom chtěli být důslední, museli bychom výše uvedenou proceduru provést pro více poloh rotoru. My se však spokojíme s jednou polohou, protože abychom těchto informací dokázali využít, museli

bychom provádět regulaci proudu do buzení pomocí mikroprocesorové techniky, což není smyslem tohoto článku. My se zde budeme zabývat pouze jednoduchou analogovou regulací. Z druhé tabulky jsme zjistili, že pro magnet NdFeB 32 je optimální proudová hustota pro buzení motoru 10 – 12 A/mm². Zvolíme tedy střední hodnotu 11 A/mm² a zjistíme průběh kroutícího momentu v závislosti na poloze rotoru. Opět použijeme Lua skript:

```
showconsole()
clearconsole()
print("pozice ve stupních | moment v Nm")
open("srm-2f-5p.fem")
mi_saveas("temp.fem")
for n=0,36,1 do
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_groupselectblock(1)
    m=mo_blockintegral(22)
    print(n,m)
    mo_close()
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(1)
    mi_moverotate(0,0,1)
end
```

Na obr. 5 vidíte příslušný graf, který je výsledkem práce výše uvedeného skriptu.

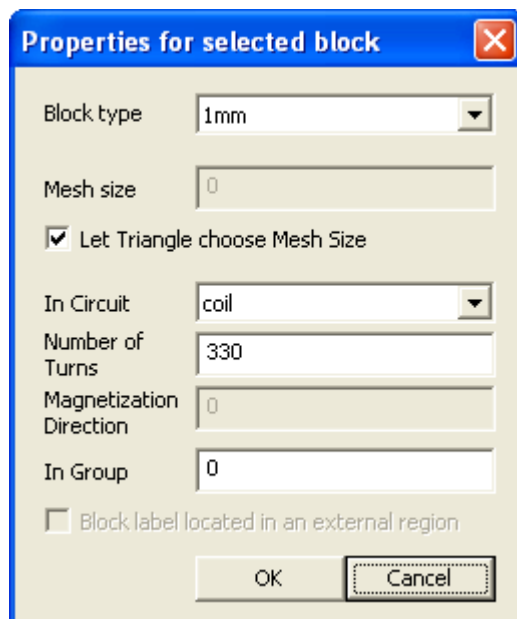


Obr. 5

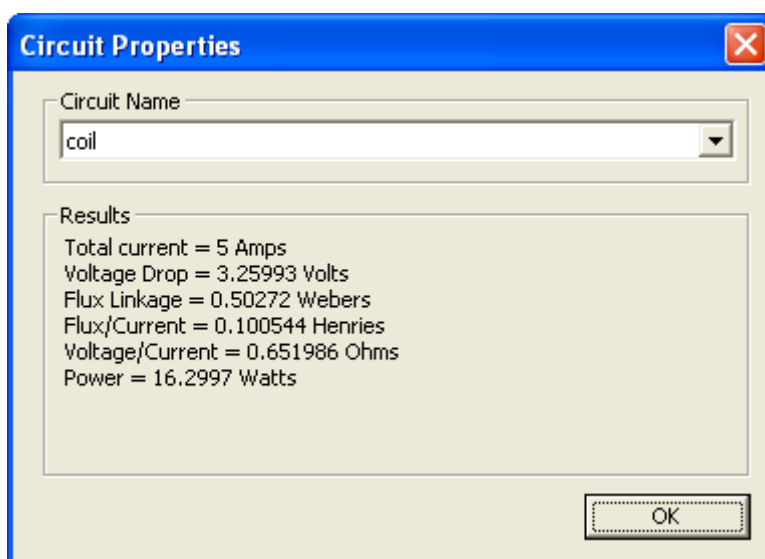
Z obr. 5 mimo jiné vyplývá, že v polohách blízkých okrajům kroutící moment strmě klesá. Nebude nám tedy příliš vadit, když náběžná a sestupná hrana proudového impulsu do vinutí statoru nebude ideálně kolmá. Tím jsme se dostali konečně k tomu, o čem má být tento článek, tedy k elektronické regulaci budícího proudu.

K demonstraci činnosti regulačního obvodu opět použijeme volně šířitelný simulační program, tentokrát LTSpiceIV, s jehož starší verzí SwitcherCADIII se mnozí čtenáři mých

stránek již setkali, neboť jsem jej často používal pro demonstraci rezonančního řízení střídavých motorů. Než se však pustíme do regulace proudu, musíme určit indukčnost a činný odpor budící cívky motoru. Pro tento účel musíme provést v simulačním modelu motoru drobnou změnu. Až dosud jsme se na vinutí cívky dívali jako na jeden závit obdélníkového profilu z mědi. Bylo to výhodné hlavně pro určení proudu pro maximální poměr moment/proud. Pro určení indukčnosti a odporu cívky však budeme potřebovat pracovat s reálnými měděnými vodiči. Proto vlastnosti (properties) coil+ a coil- bloků cívek nahradíme drátem o průměru 1mm a v menu programu *properties* → *circuits* definujeme obvod *coil*, kde zároveň určíme proud procházející cívkou, např. 5A. Dále ve vlastnostech zvoleného bloku určíme počet závitů cívky:

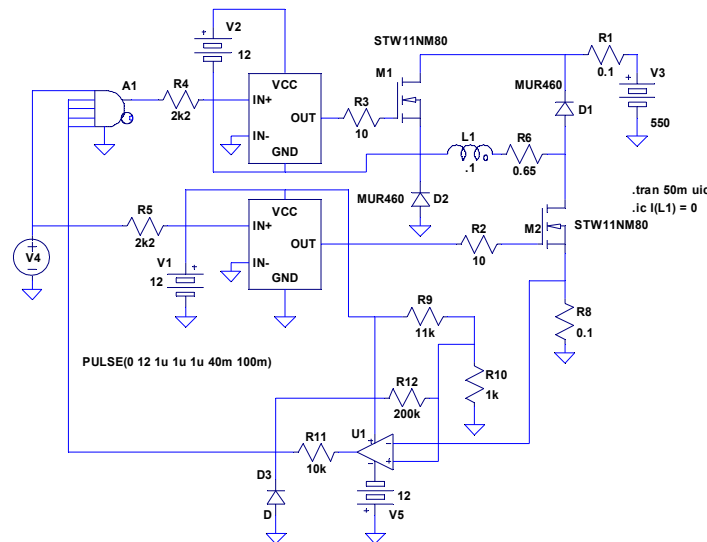


A nakonec musíme ještě bloky magnetů nahradit vlastností vzduch (air), protože kdybychom to neudělali, nebyli bychom schopni indukčnost z modelu zjistit. Indukčnost cívky ale není stálá, mění se nejen v závislosti na protékajícím proudu, ale i na poloze rotoru. Zvolíme proto vhodnou polohu rotoru, která není krajní z hlediska velikosti momentu. Potom již na jedno kliknutí myši dostaneme výsledky:



Z dialogu výše vidíme, že cívka má přibližně indukčnost $L = 0,1\text{H}$ a činný odpor $0,65\Omega$. Na tomto místě bych chtěl upozornit, že zjištěné hodnoty v žádném případě neodpovídají skutečnosti, ale jsou pouze velmi hrubým odhadem. Důvod je ten, že pracujeme s modelem dvourozměrným, nikoli reálnějším trojrozměrným. Výsledek bude proto přesnější pro větší hloubku modelu. V našem případě jsou rozměry jádra cívky $32 \times 45\text{mm}$, takže hloubka modelu je 45mm . Pro naše účely tento informativní údaj však stačí. Nyní se již můžeme věnovat elektronické regulaci proudu.

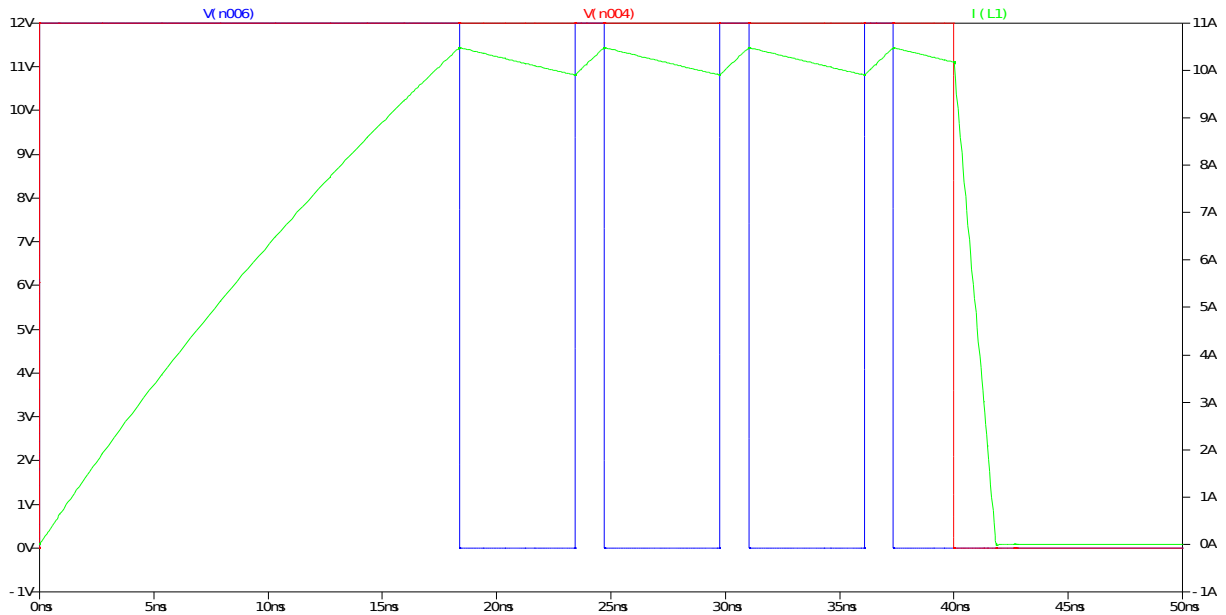
Na obr. 6 můžete vidět schéma zapojení elektronické regulace proudu pro jednu fázi.



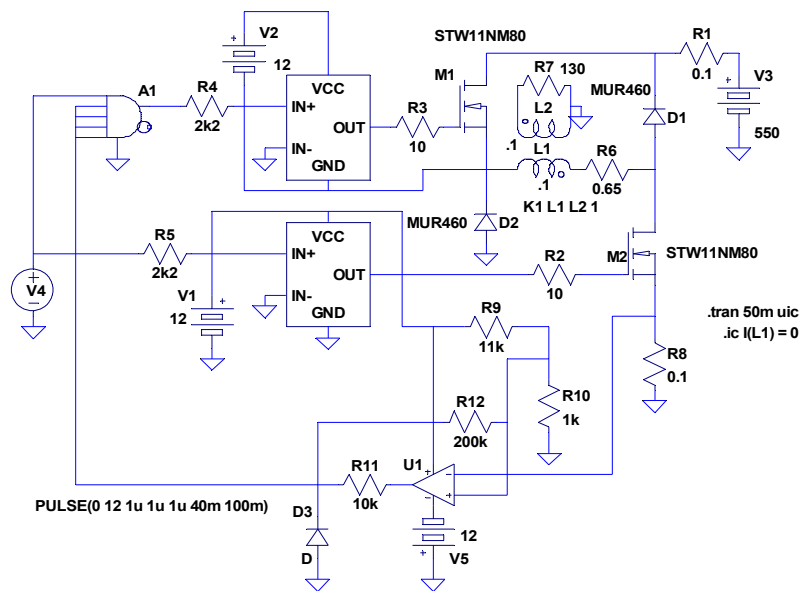
Obr. 6. Regulace proudu pro SRM

Model cívky buzení představuje indukčnost $L1$ a rezistor $R6$. Funkci čidla polohy zastává zdroj impulsů $V4$, u něhož je nastavena délka pulzu na 40ms a délka periody 100ms . Napájecí napětí silové části je 550V . (Předpokládá se použití usměrněného trojfázového napětí $3 \times 400\text{V AC}$.) Výběr tranzistorů v knihovně programu je omezený. Z tohoto důvodu byl zvolen výkonový tranzistor STW11NM80 , který je na hranici použitelnosti (max. proud je 11A). Vlastní regulátor proudu je tvořen součinným hradlem $A1$ a operačním zesilovačem $U1$ ve funkci komparátoru. Jedná se o komparátor s hysterezí, která je určena pomocí odporu $R12$. Buzení MOSFETů zajišťují dva blíže nespecifikované budiče. Zapojení regulace proudu je natolik jednoduché, že není třeba dalšího vysvětlování.

A nyní se již můžeme podívat na výsledek simulace. Na obr. 7 níže můžete vidět světle zelený průběh proudu cívkou, modrý průběh řídicích impulsů pro horní tranzistor a červeně zakreslený impuls pro řízení spodního tranzistoru. Jak je z obrázku patrné, žádaná hodnota proudu byla nastavena na 10A . Situace na obr. 7 bohužel neodpovídá realitě. Ve skutečnosti se uplatňují vířivé proudy, způsobené indukční napětí do elektricky vodivého magnetického obvodu. Abychom si nějak situaci přiblížili, upravíme náš simulační model tak, abychom vliv vířivých proudů alespoň přibližně nasimulovali. Z toho důvodu náš model regulace proudu upravíme podle obr. 8. Do schématu jsme přidali indukčnost $L2$, která je indukčně svázaná s $L1$, a odpor $R7$, paralelně spojený s $L2$. Aby „vířivé proudy“ byly zobrazeny ve stejném měřítku jako proud v cívce $L1$, zvolili jsme obě indukčnosti stejné, čímž jsme dostali jakýsi transformátor s převodem $1:1$. Velikost $R7$ jsem zvolil tak, aby v grafickém výstupu byl vliv vířivých proudů na první pohled patrný.

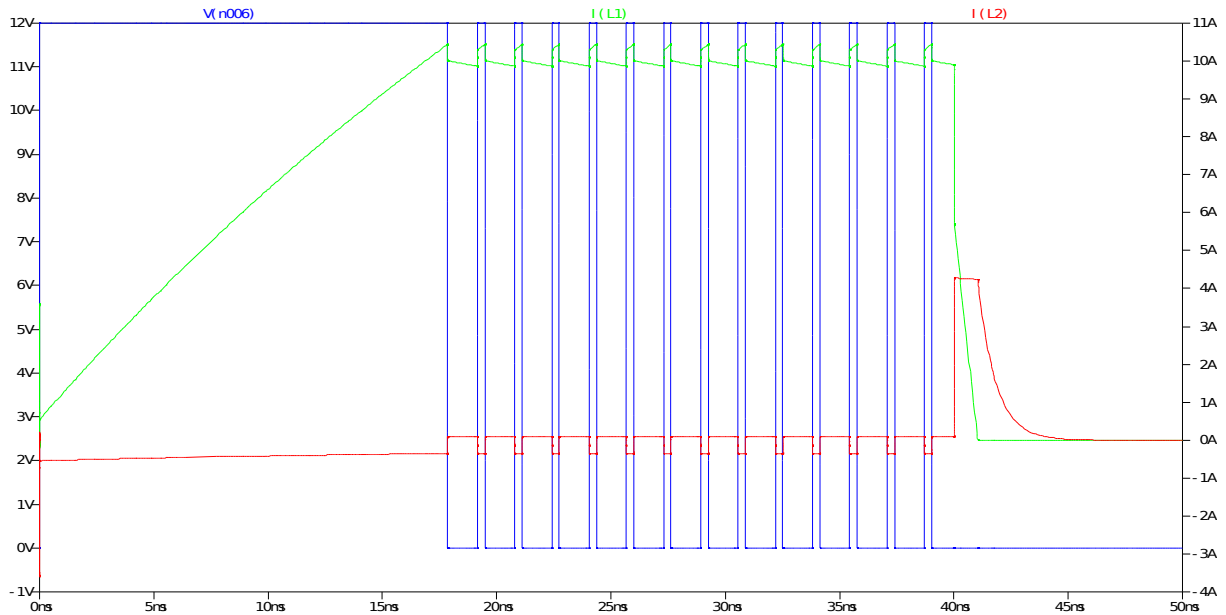


Obr. 7. Regulace proudu – grafický výstup simulace.



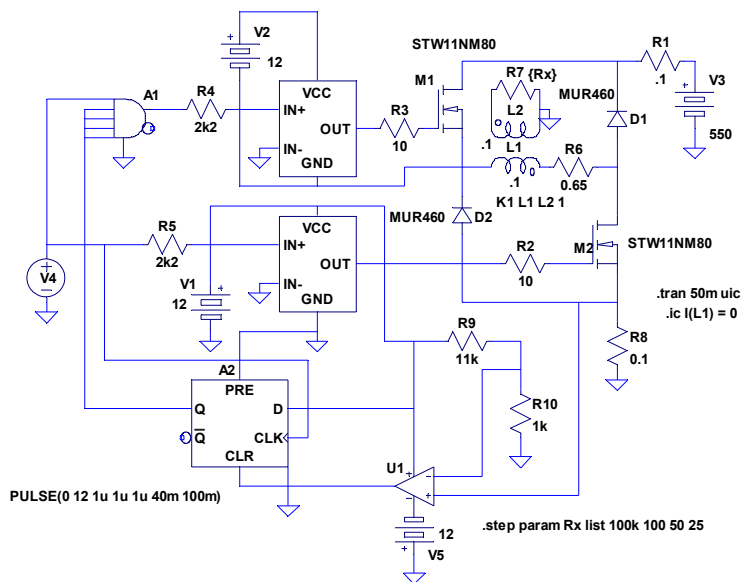
Obr. 8. Simulační model se zohledněním vířivých proudů.

Na grafický výstup simulace se můžete podívat dole na obr. 9. Průběh proudu cívkou je opět světle zelený a modře jsou zobrazeny řídicí pulzy pro horní tranzistor. Červenou barvou je tentokrát zobrazen průběh vířivých proudů. Vliv vířivých proudů (alespoň v našem modelu) není nijak dramatický, pokud jde o jeho magnetické účinky. Významnější vliv je patrný pouze během přechodového děje po vypnutí obou tranzistorů. Ten má však stejnou orientaci jako proud budící cívku, takže nám naopak pomáhá, ovšem za předpokladu, že nezasahuje do oblasti za neutrální polohou rotoru. Tomu se však dá snadno zabránit vhodným nastavení clonky čidla polohy. Závažnějším problémem je zvýšení frekvence spínání horního tranzistoru. I zde je však pomoc snadná: zvětšíme hysterezi komparátoru pomocí změny hodnoty odporu R12.

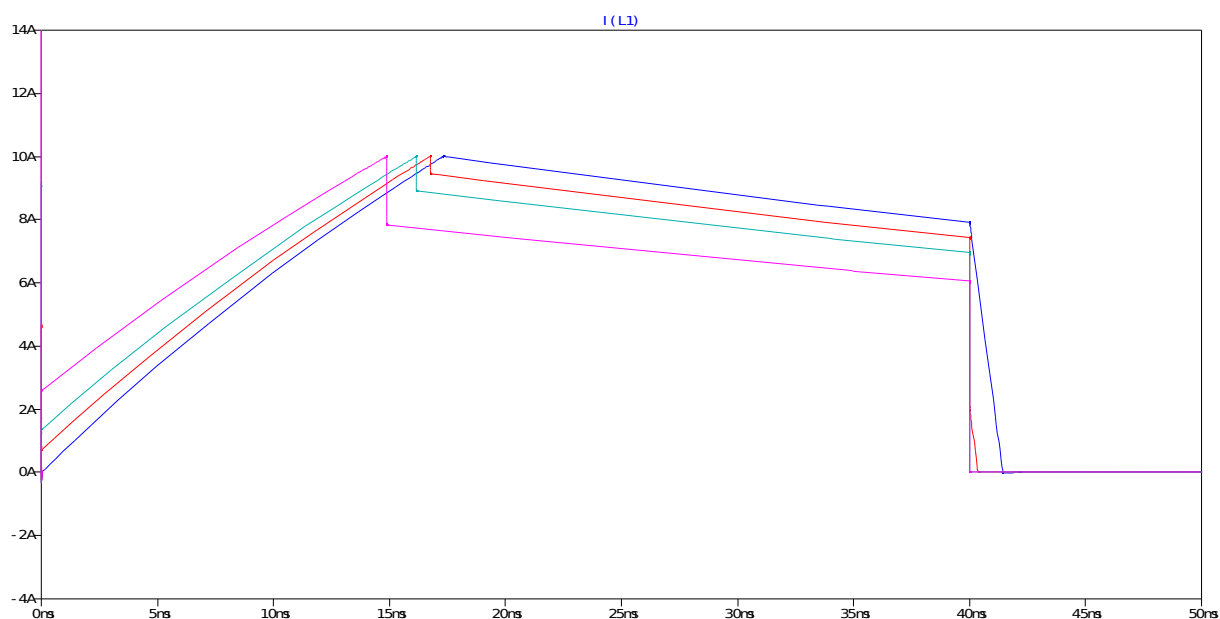


Obr. 9. Grafický výstup simulace s vířivými proudy.

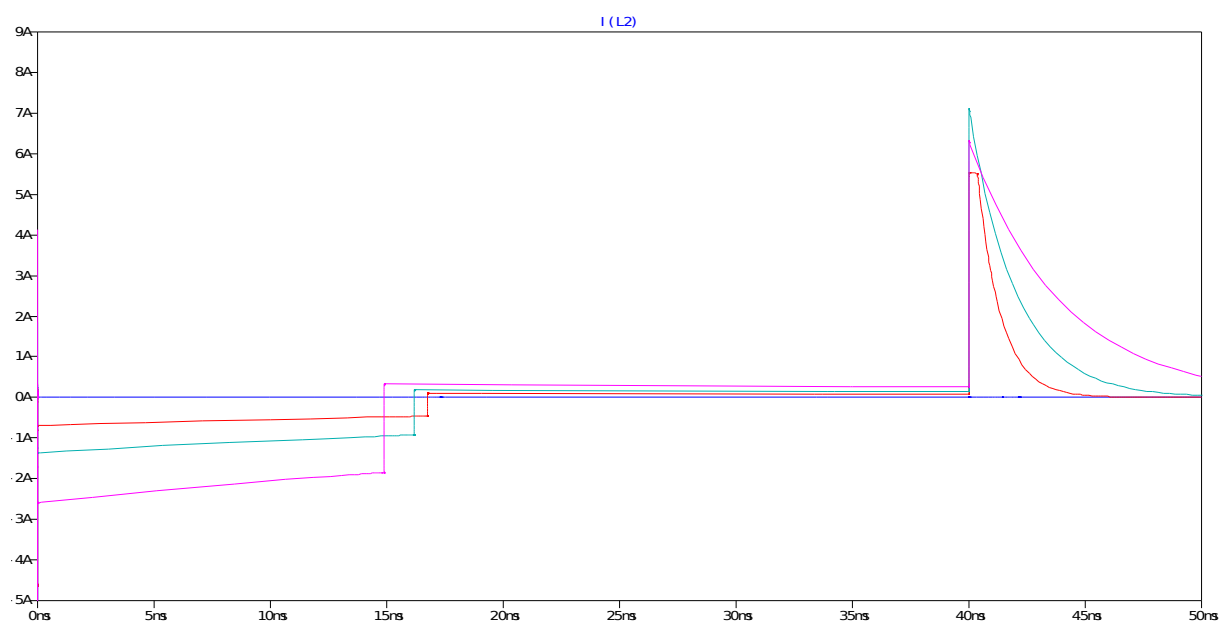
Nakonec si ukážeme ještě jeden typ regulace proudu, na němž nejlépe uvidíme vliv vířivých proudů. Schéma zapojení najdete na obr. 10. Proti předchozímu zapojení přibyl klopný obvod A2 typu D a ubyl zpětnovazební odpor R12 u komparátoru U1. Nejedná se zde o regulaci proudu v pravém slova smyslu, ale spíše o elektronickou nadproudovou pojistku, která při vzestupné hraně každého nového impulsu sepne a po dosažení nastaveného proudu vypne až do příchodu dalšího impulsu od generátoru V4. Další změnou je, že hodnota odporu R7 je nyní {Rx} a přibyla direktiva .step param Rx list 100k 100 50 25, která simulátoru říká, že má provést 4 simulace pro hodnoty odporu R7 = 100k, 100, 50 a 25Ω. Výsledky simulace si můžete prohlédnout na obr. 11 a 12.



Obr. 10. Simulace vířivých proudů.



Obr. 11. Proudy tekoucí cívkou



Obr. 12. Vířivé proudy

U obou obrázků výše jsou jednotlivým hodnotám odporu R7 přiřazeny stejné barvy:

- 100k ... modrá
- 100 ... červená
- 50 ... modrozelená
- 25 ... fialová

Všimněte si, že čím jsou vířivé proudy vyšší, tím je přechodový děj jejich zániku pomalejší a amplituda tohoto proudu větší. S tím musíme počítat při nastavování clonky čidla polohy, abychom zbytečně nesnižovali výkon motoru tím, že stator bude vyvíjet silové účinky za neutrální polohou rotoru. Na vlastní časovou konstantu budící cívky však podstatný vliv

nemají. Způsobují pouze skok proudu po vypnutí horního tranzistoru, což může působit problémy regulátoru proudu, jak jsme demonstrovali výše.

To by bylo k tomuto tématu zhruba vše. Jenom bych chtěl poznamenat, že parametry cívky nebyly zvoleny příliš šťastně, proto jsme byli nuceni zvýšit napájecí napětí a prodloužit délku a periodu impulsů. V praxi to znamená, že motor poběží příliš pomalu. Bylo by tedy vhodné použít pro vinutí silnější drát s méně závitů. Budeme sice muset použít větší proud, ale při menším napájecím napětí. Pokud napájecí napětí příliš nesnížíme, motor poběží mnohem rychleji, protože nárůst proudu ve vinutí statoru bude rychlejší. Rychlost růstu proudu je totiž dána poměrem U/L : $\Delta i = U/L * \Delta t$, pokud je časová konstanta L/R cívky dostatečně velká v porovnání s časovým intervalem Δt .