

Teorie reluktančního motoru

© Ing. Ladislav Kopecký, 21.11.09

1. Základní pojmy

Mezi parametry, které nejvíce ovlivňují vlastnosti reluktančního motoru, patří indukčnost statorového vinutí. Podle Wikopedie je indukčnost fyzikální veličina, vyjadřující velikost magnetického indukčního toku kolem cívky při jednotkovém elektrickém proudu, který prochází cívkou. Jinými slovy, je to konstanta úměrnosti mezi magnetickým indukčním tokem a elektrickým proudem, který tento tok vyvolal. Podle výše uvedené definice můžeme indukčnost L vyjádřit matematickým zápisem takto:

$$L = \Phi/i \quad (1a)$$

kde Φ je magnetický tok a i je elektrický proud.

Poznámka: Vztah (1a) se týká indukčnosti jednoho závitu cívky a neříká nám nic o tom, jak velká bude indukčnost, bude-li na cívce navinuto n závitů. V praxi se proto používá jiný vztah

$$L = n \cdot \Phi/i \quad (1b)$$

Magnetický tok Φ , který protéká nějakým magnetickým obvodem, můžeme vypočítat řešením následující rovnice

$$R_m \cdot \Phi = n \cdot i \quad (2)$$

kde R_m je odpor magnetického obvodu, n je počet závitů cívky a i je proud protékající cívkou. Magnetický odpor, který se také nazývá reluktance, můžeme vypočítat podle následujícího vzorce

$$R_m = l/(\mu \cdot S) \quad (3)$$

kde l je délka magnetického obvodu, μ je permeabilita magnetického materiálu a S je plocha průřezu mag. obvodu.

Když ze vztahu (1b) vyjádříme Φ a dosadíme do rovnice (2), po úpravě dostaneme následující vyjádření indukčnosti:

$$L = n^2/R_m \quad (4)$$

A konečně když do vztahu (4) dosadíme za R_m podle (3) dostaneme

$$L = n^2 \cdot \mu \cdot S/l \quad (5)$$

Za předpokladu, že se veškerý magnetický tok uzavírá pouze feromagnetickým jádrem, potom platí vztah (5), který říká, že indukčnost je přímo úměrná druhé mocnině počtu závitů, velikosti permeability μ a ploše průřezu S a je nepřímo úměrná délce magnetického obvodu l . Ještě se musíme zastavit u materiálové konstanty μ . Ta je součinem dvou konstant: Relativní permeability μ_r a permeability vakua μ_0 . Permeabilita vakua má hodnotu

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (6)$$

Relativní permeabilita μ_r udává, kolikrát je celková permeabilita μ daného materiálu větší než permeabilita vakua:

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad (7)$$

Indukčnost dále můžeme definovat jako statickou nebo dynamickou. Statická definice je daná vztahem (1), kdežto dynamická definice indukčnosti je dána přírůstkou mag. toku a proudu:

$$L = \Delta\Phi/\Delta i \quad (8)$$

Při změně proudu v cívce s indukčností L se v ní indukuje napětí:

$$U_i = - L \cdot di/dt \quad (9)$$

Na začátku jsme říkali, že u reluktančního motoru je proměnná indukčnost. V tomto případě se vztahem (9) pro výpočet indukovaného napětí nevystačíme, proto musíme pro výpočet indukovaného napětí odvodit jiný vzorec. Vztah (9) přepíšeme s ohledem na (1a) následovně:

$$U_i = - d(L \cdot i)/dt = - d\Phi/dt$$

Magnetický tok Φ , který je funkcí času $\Phi(t)$, můžeme považovat za součin dvou funkcí času $i(t) \cdot L(t)$. Podle pravidla o derivaci součinu funkcí můžeme napsat:

$$U_i = - (L \cdot di/dt + dL/dt \cdot i) \quad (10)$$

Poslední vztah (10) je pro nás velmi důležitý, neboť má velký vliv na chování reluktančního motoru. V případě, že je indukčnost konstantní, dostaneme vztah (9) a v případě, že je konstantní proud i , potom platí

$$U_i = - i \cdot dL/dt \quad (11)$$

Případ, kdy v SRM platí vztah (9), u SRM prakticky nikdy nenastane, ale možnost, že platí vztah (11) je celkem reálná. Může k ní dojít například v případě, kdy pro napájení reluktančního motoru použijeme zdroj konstantního proudu.

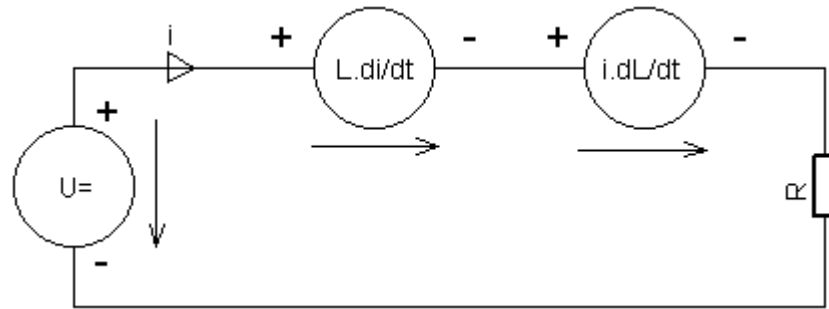
Nakonec ještě bez odvození uvedeme vztah pro energii E , kterou je potřeba dodat cívce o indukčnosti L , aby jí protékal proud i :

$$E = 1/2 \cdot L \cdot i^2 \quad (12)$$

2. Elektrický model

Elektrický model budícího vinutí SRM je velmi jednoduchý. Jedná se o indukční cívku s proměnnou indukčností, která je přes elektronický spínač připojena ke stejnosměrnému napájecímu zdroji napětí. To si každý umí představit, takže není nutné to kreslit. Nakreslíme

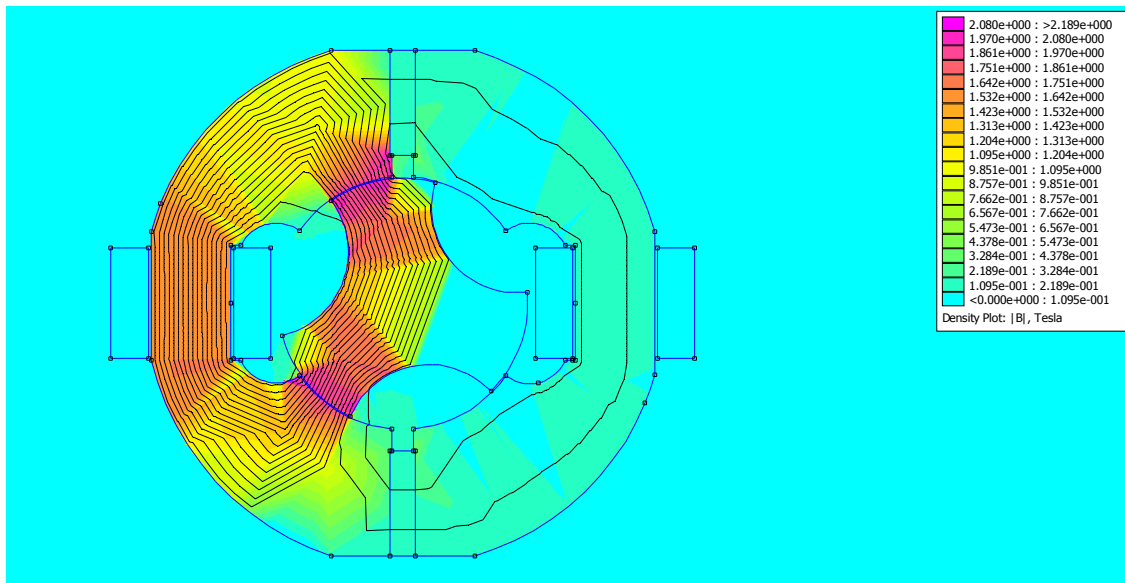
si ale náhradní lineární obvod pro diferenciální rovnici (10), popisující chování cívky SRM. Všimněte si na ve schématu na obr. 1 polaritu obou zdrojů napětí vpravo od stejnosměrného napájecího zdroje, označeného $U=$. Tato polarita je určena Lenzovým pravidlem (nebo zákonem), který říká, že směr indukovaného napětí (nebo proudu) je takový, že brání změně, která jej vyvolala. Na obr. 1 nárůst proudu indukuje v cívce napětí, které působí proti napětí napájecímu. Jak je to ale polaritou indukovaného napětí vzniklého časovou změnou indukčnosti?



Obr. 1. Náhradní schéma vinutí SRM.

Jestliže nárůst proudu vyvolá záporné napětí, potom nárůst indukčnosti musí vyvolat napětí stejné polarity jako kladná změna proudu, aby platil vztah (10).

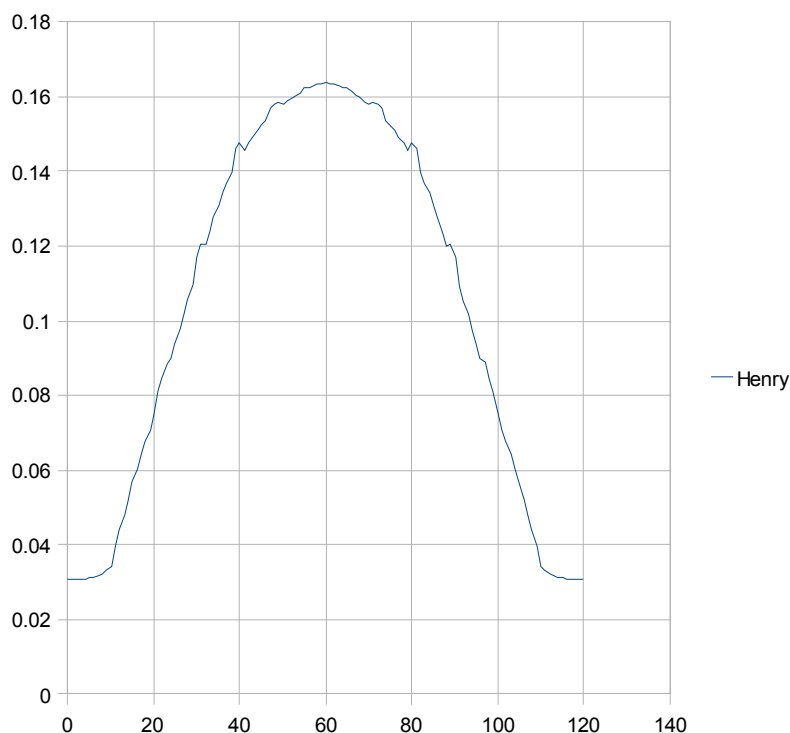
Nyní se pomocí simulace podíváme, jak souvisí poloha rotoru s indukčností buzení. Jako vhodný model použijeme model dvoufázového reluktančního motoru se třemi rotorovými póly, který najdete na obr. 2.



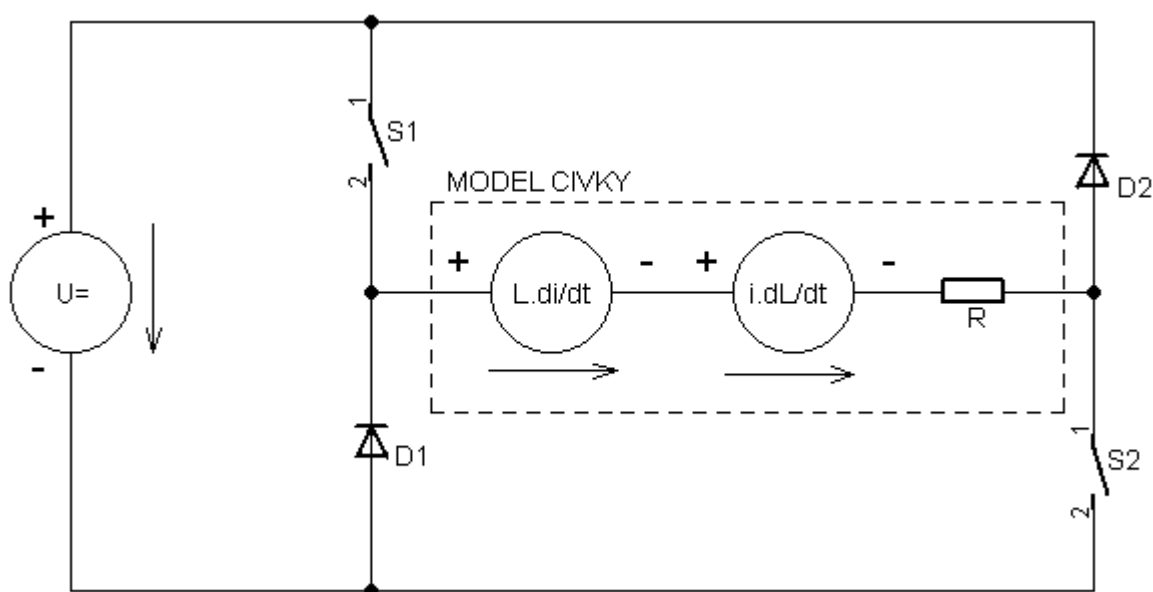
Obr. 2. Model dvoufázového SRM.

Na obr. 3 můžete vidět, jak se mění indukčnost statorové cívky v závislosti na poloze rotoru. Prvních 60° je motor v záběru a zároveň stoupá indukčnost. Po zbytek periody proud cívkou zpravidla neprotéká (existuje výjimka, a to při brždění) a indukčnost klesá. Můžeme tedy říci, že při záběru motoru se v cívce buzení indukuje vlivem otáčení rotoru napětí, které působí proti polaritě napájecího napětí. Existují čtyři kombinace polarit indukovaných napětí ve statorové cívce a všechny se také uplatňují. Dvě z nich při záběru a zbylé dvě při brždění.

Abychom si to snáze představili, nakreslíme schéma nesymetrického můstku, který se používá pro ovládání cívky při záběru a během rekuperace při brždění. Na obr. 4 vidíte ideové schéma zapojení nesymetrického můstku s modelem cívky reluktančního motoru. Spínače S1, S2 bývají většinou realizovány pomocí výkonových tranzistorů řízených el. polem. Pro nižší napětí se používají unipolární tranzistory MOSFET a pro vyšší napětí bipolární tranzistory s izolovaným hradlem (IGBT). Diody D1, D2 slouží k vracení energie nahromaděné v cívce zpět do zdroje.



Obr. 3. Závislost indukčnosti na poloze rotoru.



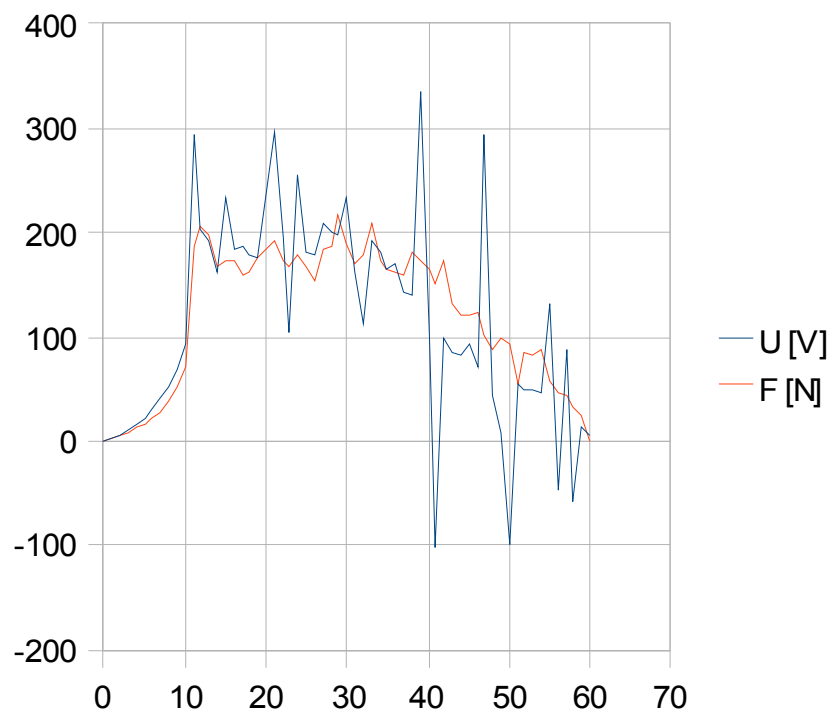
Obr. 4. Nesymetrický můstek s modelem cívky.

Nyní se na jednotlivé kombinace polarit obou napětí, která vznikají v cívce, podíváme blíže. V následující tabulce jsou všechny čtyři možné stavy přehledně popsány. Znaménko v políčku u indukovaného napětí je kladné, když odpovídá stavu na obr. 4. To znamená, že obě napětí mají polaritu, která působí proti napětí napájecímu ve stavu 1, kdy motor zabírá a oba spínače S1, S2 jsou sepnuty. Aktivní polohou je míněna poloha, kdy póly rotoru ještě nedosáhly vyrovnané polohy (tj. takové polohy, kdy se póly rotoru a statoru kryjí).

Číslo stavu	L.di/dt	i.dL/dt	Poloha rotoru	Stav S1, S2	Popis stavu
1	+	+	Aktivní	Sepnuty	Záběr motoru
2	+	-	Aktivní	Vypnuty	Vracení energie do zdroje
3	-	+	Pasivní	Sepnuty	Brždění
4	-	-	Pasivní	Vypnuty	Rekuperace

Myslím, že díky výše uvedené tabulce je kolem činnosti nesymetrického můstku vše jasné a že není třeba zdůrazňovat, že diody D1, D2 jsou v činnosti ve stavech 2 a 4, kdy jsou spínače S1, S2 vypnuty a energie nahromaděná v cívce se vrací zpátky do zdroje. Jen malou poznámku si zaslouží brždění a rekuperace. Při brždění se doporučuje používat krátké proudové pulzy, aby se v cívce mohlo naindukovat napětí, pro jehož velikost platí rovnice (10), které je ve stavu 4 vraceno do zdroje.

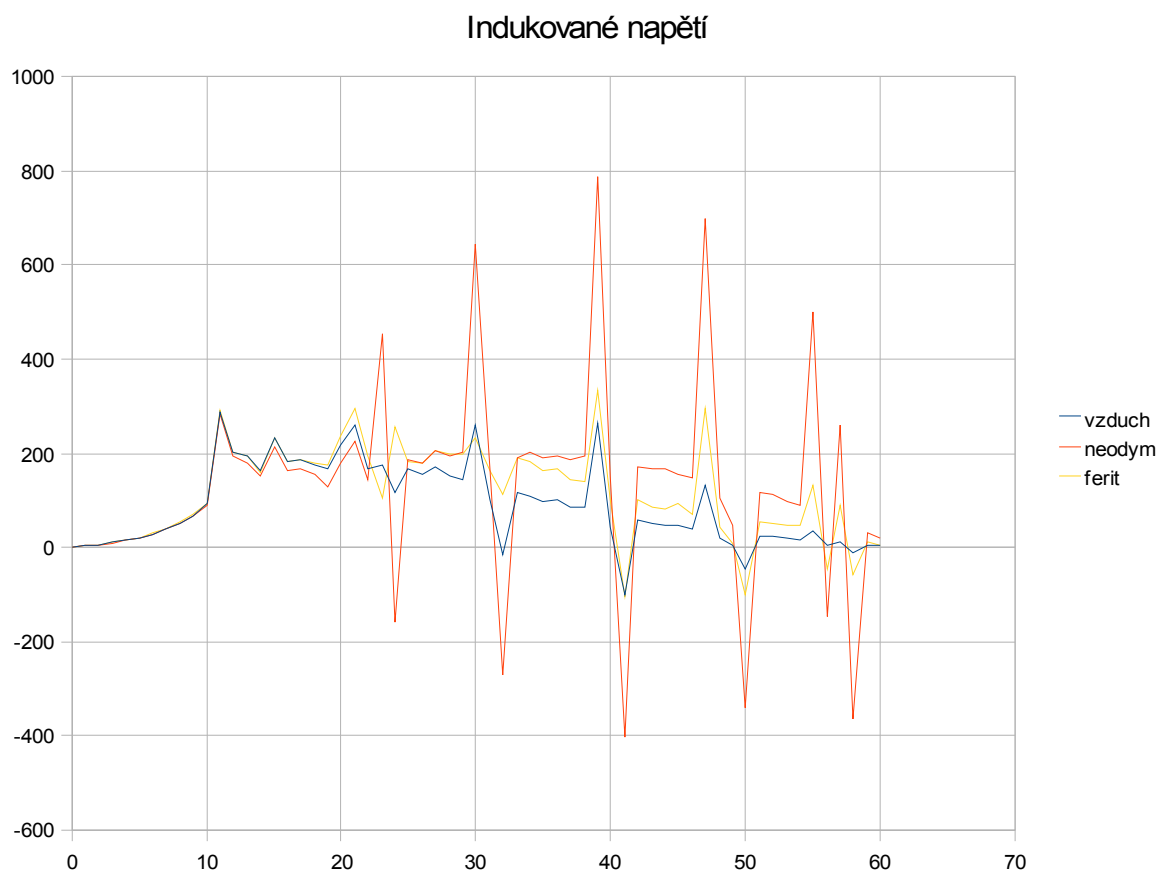
Abychom si udělali konkrétní představu, nasimulujeme si průběh indukovaného napětí pro náš model motoru. Na cívce s jádrem o rozměrech 32 x 45 mm je navinuto 330 závitů měděným lakovaným drátem o průměru 1 mm. Na následujícím obrázku (obr. 5) vidíte průběh indukovaného napětí v cívce a průběh síly, která působí po obvodu rotoru.



Obr. 5. Průběh indukovaného napětí a síly.

Napěťové špičky jsou způsobeny nerovnoměrným nárůstem indukčnosti během pohybu rotoru. Tyto špičky jsou nežádoucí, ale dají se vhodnou konstrukcí nebo nastavením určitých

parametrů omezit. Na dalším obrázku uvidíte, jak velikost napěťových špiček ovlivňuje druh použitého magnetu ve statoru. Na obr. 6 jsou zobrazeny tři průběhy napětí: s neodymovým magnetem, s feritovým magnetem a bez magnetu.

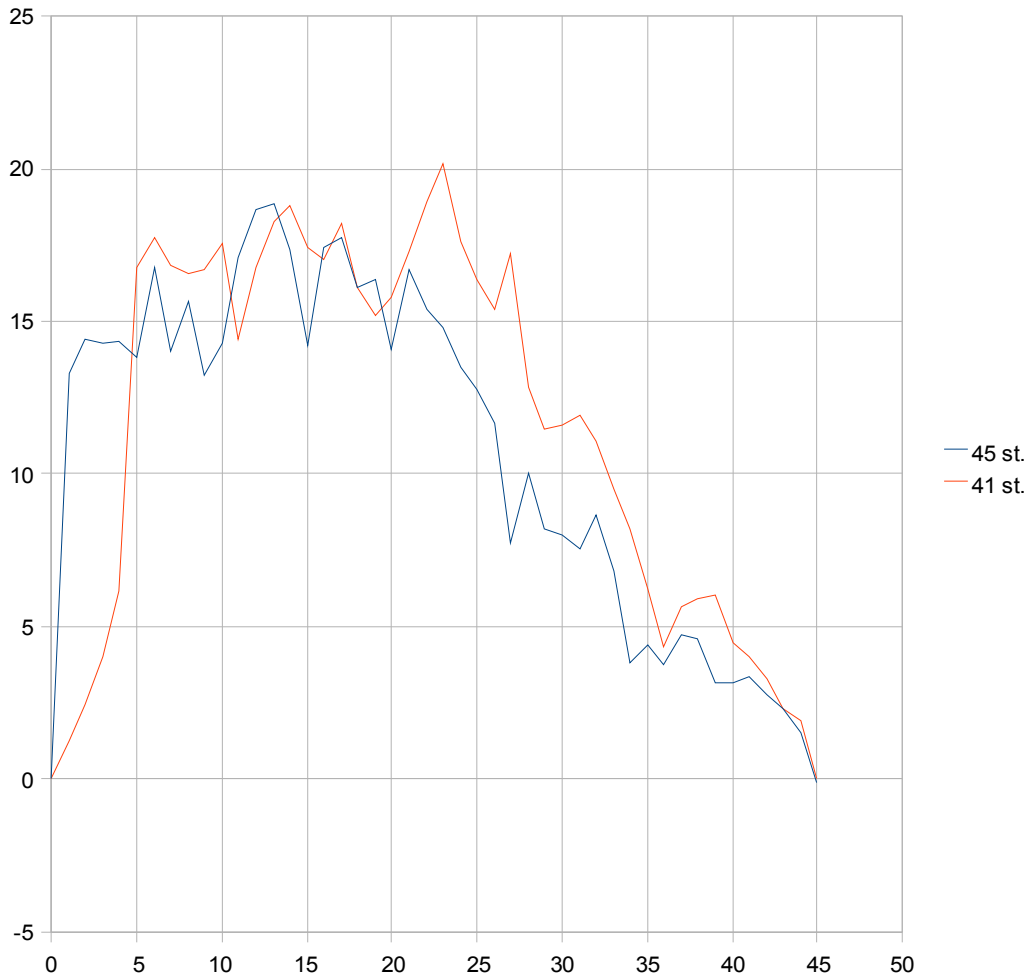


Obr. 6. Indukované napětí pro různé magnety

Nakonec se zmíníme o vhodné strategii řízení proudu buzení. Všimněte si na obr. 3, který zobrazuje průběh indukčnosti v závislosti na poloze rotoru, že prvních 10 stupňů od začátku průběhu indukčnost stoupá velmi zvolna. Tohoto průběhu indukčnosti bylo dosaženo záměrným zmenšením pracovního úhlu pólů. Důsledkem je to, že v této oblasti působí na rotor malá síla, což se může zdát jako nevýhoda, ale není tomu tak. Uvědomme si, že na začátku aktivní části periody nelze okamžitě dosáhnout maximálního proudu. Takže tuto část jakoby obětujeme a využijeme ji na nárůst proudu. Pozitivním důsledkem je mj. to, že moment, který jsme ubrali na začátku, kde bychom jej stejně nedokázali využít, se nám projeví tam, kde se využít dá. Na obr. 7 vidíte ilustraci tohoto faktu na příkladu čtyřpólového jednofázového reluktančního motoru s jednou cívkou a s magnetem. Zmenšení pracovního rozsahu pólu rotoru má ještě další dva důsledky, které mohou být ještě důležitější. Jedním z nich je relativně malá indukčnost, která navíc stoupá velmi zvolna, druhým důsledkem je nízké indukované napětí, jež s průběhem indukčnosti souvisí. Oba tyto faktory způsobují, že v této oblasti potřebujeme méně energie na to, aby proud v budící cívkě stoupl na požadovanou jmenovitou hodnotu. Jak s tím souvisí indukčnost a indukované napětí? Jednoduše. Výše uvedený vztah (12) říká, že energie potřebná k tomu, aby cívkou začal téct proud i , je přímo úměrná indukčnosti L a druhé mocnině proudu i . Indukované napětí působí proti vzrůstajícímu proudu, jak plyne z Lenzova zákona (viz obr. 4 a tabulka pod ním).

Z výše uvedených poznatků plyne, že nejuspěšnější řízení proudu do cívky buzení je takové, když se nám podaří dosáhnout jmenovitého proudu hned na začátku záběru rotoru (v našem případě do 10°), čehož docílíme vhodným poměrem indukčnosti budící cívky a napájecího napětí pro požadované maximální otáčky motoru.

Porovnání momentů



Obr. 7. Závislost průběhu momentu na šířce pólů.