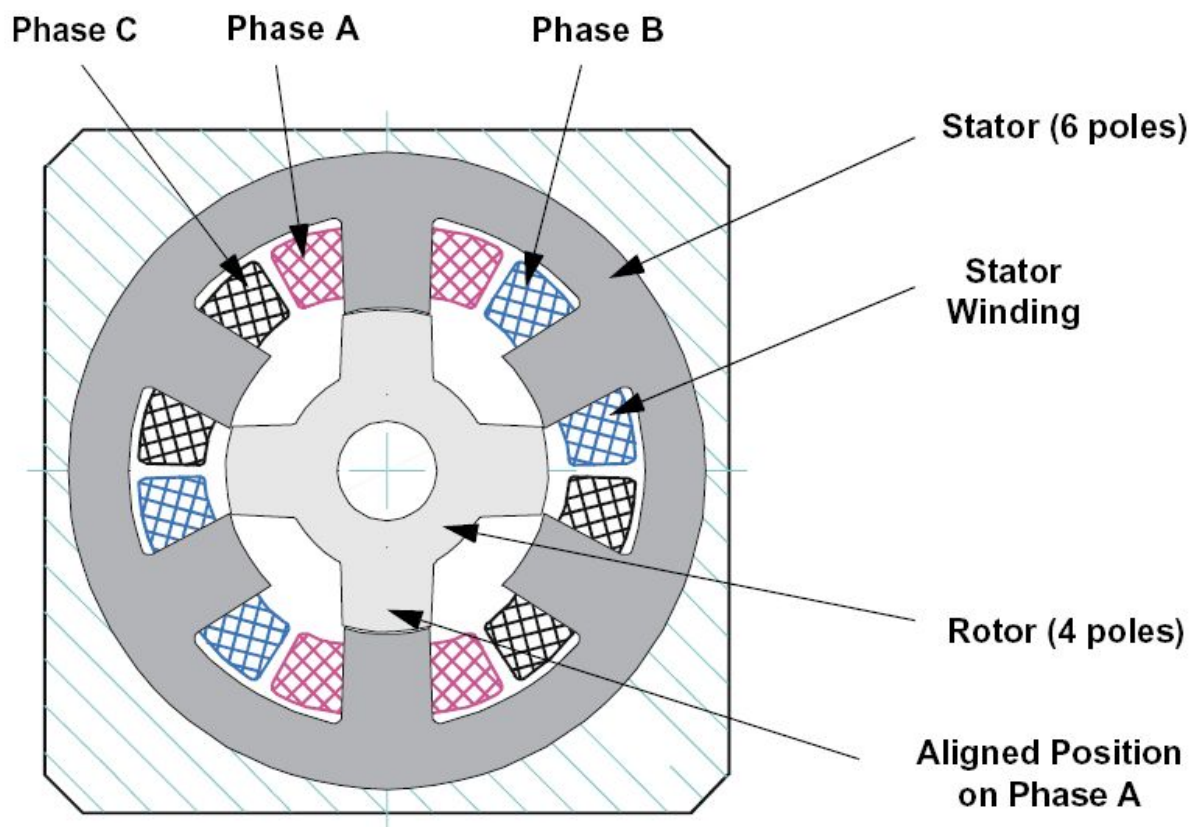


# Reluktanční motor a elektromobil

(c) Ing. Ladislav Kopecký, 2008

Pro pohon elektrických vozidel se nejčastěji používají stejnosměrné komutátorové motory, stejnosměrné motory s elektronickou komutací (BLDC) a střídavé synchronní nebo asynchronní motory, doplněné frekvenčním měničem. Reluktanční motory se dosud nepoužívají (alespoň o tom nemám zprávy, možná ve vojenské technice), přestože se v literatuře uvádí, že s reluktančními motory se pro elektrickou trakci počítá. Mají totiž vlastnosti, které je pro použití v elektrických vozidlech přímo předurčují: jednoduchou konstrukci, vysokou mechanickou odolnost, vysokou účinnost, vysoký výkon v poměru k hmotnosti a v neposlední řadě velký záběrový moment. Jediným, avšak řešitelným nedostatkem je jejich vyšší hlučnost. Princip reluktančního motoru je velmi jednoduchý a je zřejmý z následujícího obrázku, kde je nakreslena trojfázová verze motoru.



Obr. 1. Trojfázový spínaný reluktanční motor.

Pro přesný popis reluktančního motoru budeme citovat z Wikipedie:

Reluktanční motor je typ synchronního elektromotoru, který obsahuje vyniklé póly z feromagnetického materiálu, jež nevytvářejí vlastní magnetické pole pomocí vinutí nebo permanentních magnetů. Kroutící moment je vytvářen pomocí jevu zvaného magnetická reluktance (odpor). (Motor se snaží otočením rotoru minimalizovat reluktanci, pp)

Reluktanční motor ve svých různých podobách může být znám jako:

- synchronní reluktanční motor
- motor s proměnlivou reluktancí
- spínaný reluktanční motor (SRM)
- krokový motor s proměnlivou reluktancí

Reluktanční motory mohou mít velmi vysoký poměr výkon/hmotnost za nízkou cenu, což je činí ideálními pro mnoho aplikací. Nevýhodami jsou velké kolísání krouticího momentu, když pracují při nízkých otáčkách, a hluk, způsobený tímto kolísáním. Donedávna bylo jejich použití limitováno obtížností jejich návrhu a složitostí jejich řízení. Tyto výzvy byly překonány pokročilou teorií, použitím sofistikovaných počítačových konstrukčních nástrojů a použitím levných vestavných systémů pro řízení motoru. Tyto řídicí systémy jsou typicky založeny na mikrokontrolérech, používajících řídicí algoritmy a výpočty v reálném čase pro určení optimálního průběhu proudu v závislosti na poloze rotoru a proudu nebo napěťové zpětné vazbě.

### **Konstrukce a základy funkce**

Stator se skládá z několika vyniklých pólů, fungujících jako elektromagnety, podobných jako u stejnosměrných motorů s komutátorem. Rotor je vyroben z magneticky měkkého materiálu, jako je laminovaná křemíková ocel, z něhož jsou vyrobeny vyniklé póly. Počet pólů rotoru je typicky menší než počet pólů statoru, což minimalizuje cukání a zabraňuje vzniku mrtvé polohy (tj. polohy, při níž je kroutící moment nulový).

Když nějaký pól rotoru je stejně vzdálen od dvou přilehlých pólů statoru, této poloze se říká „úplně nevyrovnaná poloha“. Je to poloha maximální magnetické reluktance pólu rotoru. Ve „vyrovnané poloze“ jsou dva nebo více pólů rotoru úplně vyrovnané se dvěma nebo více statorovými póly a v této poloze je minimální reluktance.

Když je pól statoru zmagetován (tj. jeho cívkou protéká proud), kroutící moment rotoru působí ve směru, který sníží reluktanci. Nejbližší rotorový pól je tažen z nevyrovnané polohy magnetickým polem statoru do polohy s nejmenší reluktancí. (Je to stejný účinek jako u válcové cívky s jádrem nebo když magnet přitahuje feromagnetický kov.) Aby byla udržena rotace, pole statoru musí rotovat v předstihu před póly rotoru, aby neustále „táhlo“ rotor. Některé varianty motoru fungují na třífázový střídavý proud (viz níže synchronní reluktance). Většina moderních konstrukcí je však typu spínaných reluktančních motorů, protože elektronická komutace poskytuje významné výhody pro start, řízení rychlosti a hladký běh motoru.

Motory s dvojitým rotorem poskytují větší kroutící moment s nižší cenou za jednotku objemu nebo hmotnosti.

Indukčnost vinutí každé fáze motoru se bude měnit v závislosti na poloze rotoru, protože s jeho polohou se mění i reluktance. To představuje výzvu pro řídicí systém.

### **Typy reluktančních motorů**

#### **Synchronní reluktanční motor**

Tento typ motoru je hybridní indukční/reluktanční motor, který vyvíjí malý synchronní kroutící moment. Jedná se o starý typ, který předcházela moderní řídicí systémy.

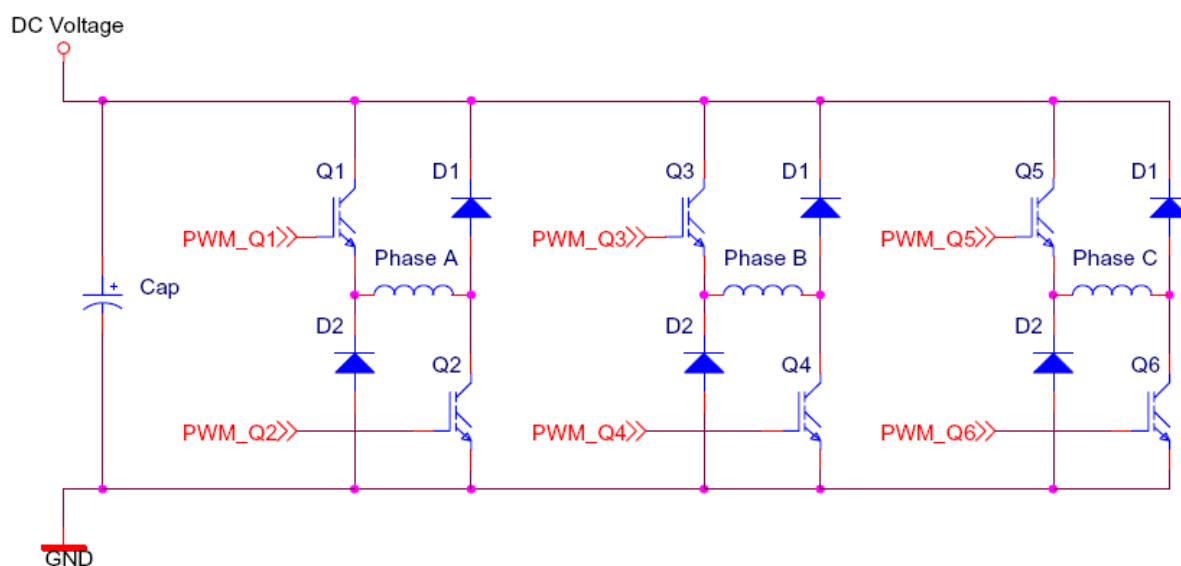
#### **Spínaný reluktanční motor**

Spínané reluktanční motory (SRM) jsou speciální formou krokového motoru, které se od těchto liší tím, že mají méně pólů. SRM mají nejmenší výrobní náklady ze všech

průmyslových elektromotorů, protože neobsahují magnety a mají jednoduchou strukturu. Nejběžnější použití SRM je v aplikacích, kde je třeba po dlouhou dobu rotor držet ve stejné poloze.

Vinutí fází v SRM jsou od sebe prostorově vzdálena, což má za následek větší odolnost proti poruchám v porovnání se střídavými motory, řízenými invertory. Optimální tvar křivky proudu není sinusoida z důvodu nelineární závislosti kroutícího momentu na poloze rotoru a vysoké závislosti indukčnosti vinutí fáze statoru na poloze rotoru.

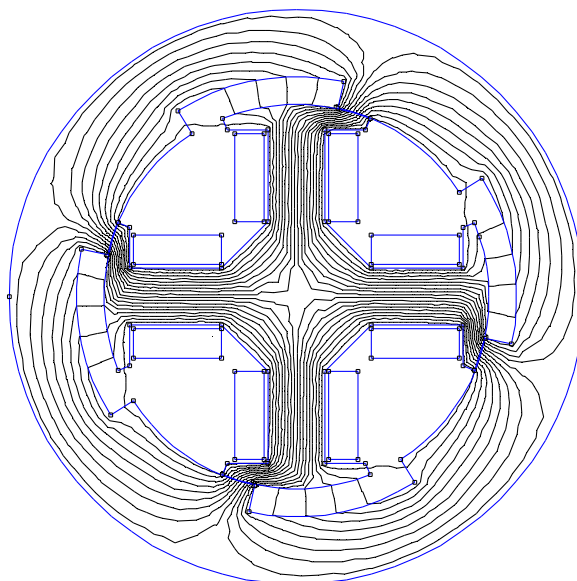
Dále se budeme věnovat pouze spínanému reluktančnímu motoru (SRM), který je pro naše účely nejvhodnější. U SRM je proud do jednotlivých cívek spínán pomocí polovodičových výkonových spínačů (IGBT) v závislosti na poloze rotoru, podobně jako u BLDC. Na obr. 2 jsou nakresleny spínače pro třífázové řízení např. motoru na obr. 1.



Obr. 2. Řízení trojfázového SRM.

Předmětem tohoto článku není elektronické řízení, proto se o něm zmíníme pouze stručně. Spínací prvky Q1 – Q6 jsou obvykle výkonové tranzistory MOSFET (pro nižší napětí) nebo IGBT (pro vyšší napětí). Jejich spínání je řízeno pomocí řídicí elektroniky v závislosti na poloze rotoru a požadovaném proudu v cívkách. Diody D1, D2 mohou sloužit pro vrácení elektrické energie zpět do zdroje (oba tranzistory vypnuty) nebo k regulaci proudu. V druhém případě je spodní tranzistor trvale sepnut a pomocí horního tranzistoru je regulován proud. Je-li Q1 vypnut, cívka se chová jako zdroj proudu, který teče přes Q2 a D2 a exponenciálně klesá. Jakmile proud klesne pod požadovanou minimální hodnotu, sepne opět Q1 a proud cívkou exponenciálně stoupá, dokud nepřekročí horní mez požadovaného proudu. Potom je Q1 opět vypnut a děj popsán výše se opakuje. Pro regulaci proudu lze s výhodou použít komparátor s hysterezí. Výkonové tranzistory často bývají galvanicky odděleny od řídicí elektroniky.

Nyní se zaměříme na návrh konstrukce SRM se statorem uvnitř a s rotorem vně. Jako základ vezmeme motor na obr. 1. Abychom dosáhli maximálního kroutícího momentu, motor z trojfázové verze změníme na jednofázový po čtyřech vyniklých pólech v rotoru i ve statoru. Na obrázku 3 vidíme statickou simulaci pomocí programu Femm, který je dostupný zdarma na internetu. Vnitřní poloměr rotoru je cca 100 mm, vzduchová mezera mezi póly rotoru a statoru je 0,5 mm a šířka pólů je 45 mm.



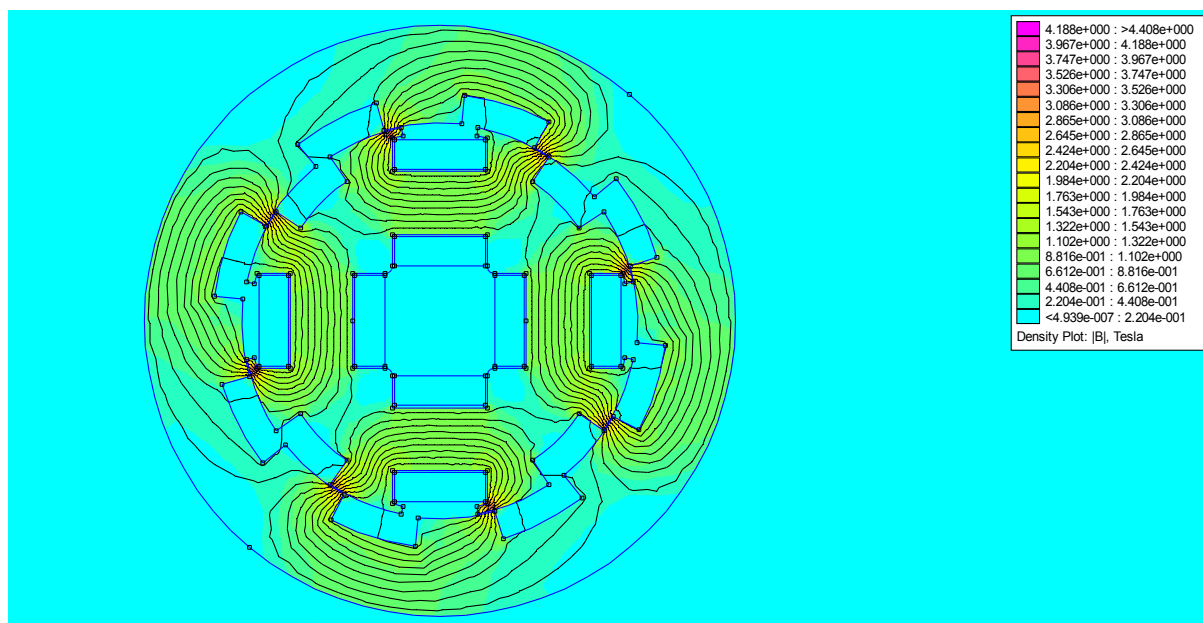
Obr. 3. Reluktanční motor 1f 4/4 – statická simulace.

Pro proudovou hustotu v cívkách  $4 \text{ A/mm}^2$  program vypočítal hodnotu kroutícího momentu  $32,78 \text{ Nm}$  pro polohu rotoru podle obr. 3, což je slušný výsledek. V následující tabulce je uvedena závislost kroutícího momentu na poloze rotoru. V poloze  $45^\circ$  stojí póly rotoru a statoru proti sobě. Z tabulky je zřejmé, že kroutící moment zdaleka není konstantní, ale je silně závislý na vzájemné poloze rotoru a statoru.

position in degrees	torque in Nm	[%]
5	38.15954301507492	100
10	32.77395193990333	85.9
15	32.83668223629678	86
20	28.29814011066988	74.2
25	19.21704236564564	50.4
30	10.31706133208334	27
35	5.340161161853466	14
40	3.423963658709863	9
45	-0.1572074000157621	0

Tabulka 1

Pokusme se nyní náš reluktanční motor zdokonalit. Abychom mohli obě řešení snadno porovnávat, zachováme průměr rotoru a počet, velikost a tvar cívek. Výsledek našeho snažení najdete na obr. 4. Všimněte si, že počet cívek zůstal zachován, stejně jako jejich velikost a tvar, ale ve statoru i v rotoru přibyly 4 póly, což by se mělo projevit zvýšením kroutícího momentu. To se skutečně také stalo, neboť pro polohu rotoru podle obr. 4 a proudovou hustotu  $4 \text{ A/mm}^2$  program spočítal kroutící moment  $60,5448 \text{ Nm}$ . To je vynikající výsledek, neboť pro tuto hodnotu kroutícího momentu bychom u předchozí konstrukce (obr. 3) potřebovali 8 cívek.



Obr. 3. Reluktanční motor 1f 8/8 – statická simulace.

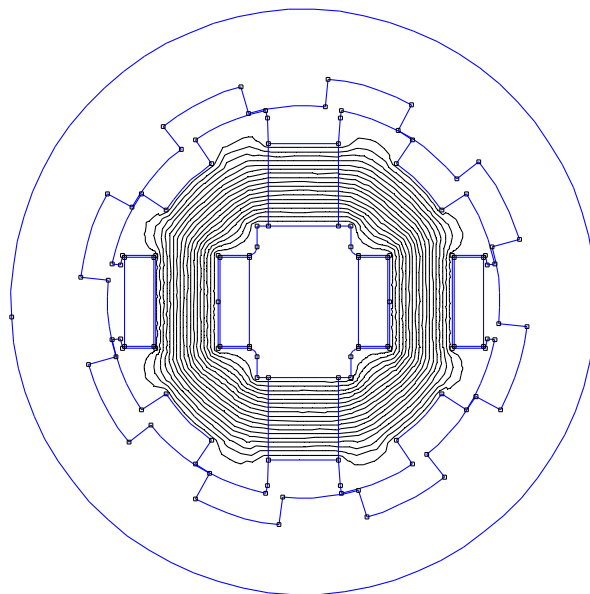
Nyní se podíváme, jaký je průběh kroutícího momentu v závislosti na poloze rotoru:

position in degrees	torque in Nm	[%]
2.5	61.29079434964982	100
5	60.54478432809684	98.8
7.5	56.19044476286995	91.7
10	61.21910634912909	99.9
12.5	47.44658466946687	77.4
15	34.82410028134633	56.8
17.5	28.80521932715382	47
20	16.32482453477812	26.6
22.5	-0.1051419820134974	0

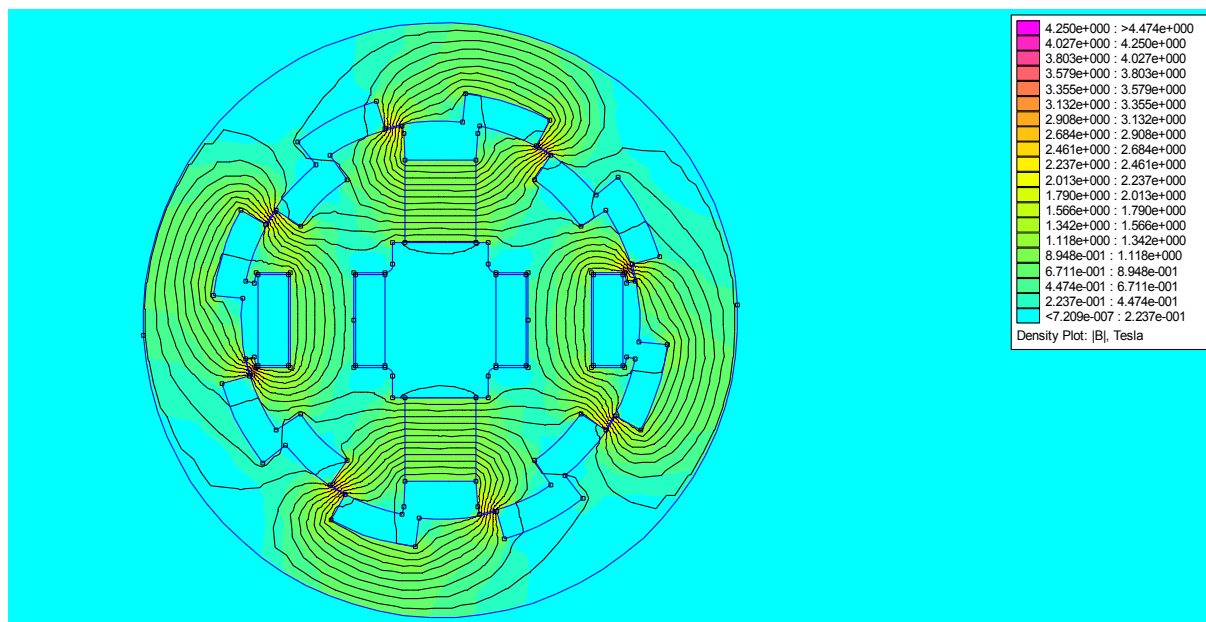
Tabulka 2

Z tabulky 2 vyplývá, že u motoru podle obr. 4 je průběh kroutícího momentu mnohem vyrovnanější. Nejlépe je to vidět v posledním sloupci tabulky, kde je hodnota kroutícího momentu vyjádřena v procentech.

Je možné náš SRM ještě více vylepšit? Ano, lze. Hned si ukážeme, jak. Nahradíme protilehlé cívky permanentními magnety tak, aby při nulovém proudu cívkami byl kroutící moment také nulový v jakékoli poloze rotoru vůči statoru. Tato situace je znázorněna na obr. 5. Vidíte, že magnetický tok se uzavírá pouze statorem a do rotoru nezasahuje. Když do cívek přivedeme proud takové polaroty, aby jimi vybuzený magnetický tok působil proti mag. toku permanentních magnetů, výsledný tok se bude uzavírat přes rotor, což vyvolá silové účinky.



Obr. 5. Reluktanční motor 1f s perm. magnety – bez proudu v cívkách.

Obr. 6. Reluktanční motor 1f s perm. magnety – proudová hustota cívek 4A/mm<sup>2</sup>

position in degrees	torque in Nm	[%]
2.5	66.92018672830363	100
5	63.81216911361425	95,4
7.5	57.76754445054854	86,3
10	62.87541784941023	94
12.5	43.69786227651541	65,3
15	28.29516623270457	42,3
17.5	24.15176031376457	36,1
20	13.81683537171441	20,7
22.5	-0.08371371064700675	0

Tabulka 3

Z tabulky 3 je patrné, že jsme schopni pomocí dvou cívek (obr. 6) dosáhnout téměř stejných výsledků jako použitím čtyř cívek (obr. 4). Jistě není třeba zdůrazňovat, že k vybuzení cívky je třeba vynaložit určitou energii a čas, takže čím méně cívek je třeba, tím ekonomičtějšího provozu motoru dosáhneme, což je právě u elektrických vozidel životně důležité. K mírným odlišnostem došlo zřejmě pouze díky tomu, že byl použit silnější magnet než bylo třeba.

Nyní vyšetříme, jaká je závislost kroutícího momentu na velikosti budícího proudu přiváděného do cívek a na materiálu použitém pro magnetický obvod. V tabulce 4 jsou porovnávány hodnoty kroutícího momentu pro různé magnetické materiály a jsou zde také srovnány konstrukce motoru se čtyřmi cívkami (obr. 4) vs. konstrukce se dvěma cívkami + dvěma magnety (obr. 6).

	motor s magnety	motor bez magnetů		
Materiál	křemíková ocel	křemíková ocel	supermalloy	železo
hustota I [A/mm <sup>2</sup> ]	Kroutící moment [Nm]			
0,5	1,41			
1	5,35	5,08	5,21	5,19
1,5	11,75			
2	20,08	19,04	19,55	19,22
2,5	29,46			
3	39,44	37,2	39,77	36,93
3,5	49,8			
4	60,51	57,17	63,81	55,34
4,5	71,48			
5	82,64	78,23	92,89	73,78
6	104,97	99,21	126,89	91,82

Tabulka 4

### Zásady návrhu SRM pro el. vozidlo

Hrubý návrh SRM pro pohon elektromobilu si nejlépe ukážeme na příkladu. Předpokládejme, že chceme pohánět elektromobil, jehož maximální rychlost je 120 km/h což je 33,3 m/s.

Celkový průměr kola tohoto automobilu nechť je 60 cm, takže jeho obvod bude  $0,6 * \pi = 1,885$  m. Maximální frekvenci otáčení kola vypočítáme, když maximální rychlost vozidla vydělíme obvodem kola:  $33,3/1,885 = 17,68$  Hz. Na jednu otáčku kola, resp. rotoru, potřebujeme osm impulsů, protože máme osmipólový motor. Maximální frekvence pulsů tedy bude  $17,68 * 8 = 141,4$  Hz. Této frekvenci odpovídá perioda cca 7 milisekund.

Připojíme-li cívku ke zdroji napětí, začne cívkou o indukčnosti L procházet proud, který se zvyšuje podle exponenciální funkce

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

Dá se dokázat, že pro čas t blízký nule platí přibližný vztah

$$\Delta i / \Delta t = U/L \quad (2)$$

Jelikož se indukčnost s pohybem rotoru mění, je nutné počítat se střední hodnotou indukčnosti L vinutí statoru. Ze vztahu (2) snadno vypočítáme střední indukčnost L:

$$L = U \cdot \Delta t / \Delta i \quad (3)$$

V našem případě zvolíme např.  $U = 150\text{V}$ ,  $\Delta i = I_{\max} = 100\text{A}$  a  $\Delta t = 7/4 = 1,75\text{ ms}$  a dostaneme

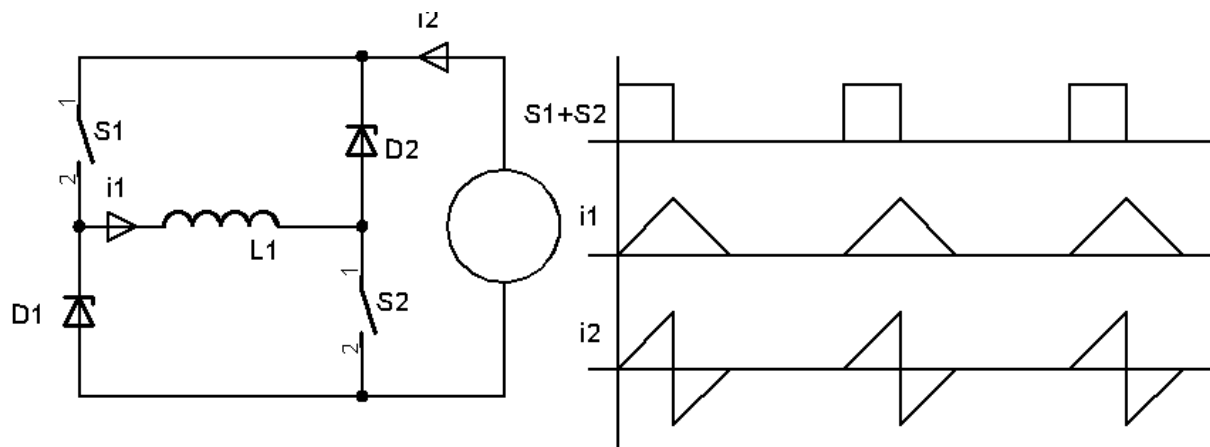
$$L = 150 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} / 100 = 2,625\text{ mH}$$

Dále je třeba určit okamžik, kdy má dojít k vypnutí elektronických spínačů S1, S2 (viz obr. 7). Vyjdeme opět ze vztahu (2) a dostaneme

$$\Delta t = L \cdot \Delta i / U \quad (4)$$

Musíme si však uvědomit, že střední indukčnost  $L$  je v tomto případě větší, protože poloha rotoru je nyní blíž k vyrovnané poloze.

Z tohoto rozboru je zřejmé, že pro optimální časování spínání a vypínání spínačů S1, S2 nevystačíme s klasickou analogovou elektronikou, ale bude nutné použít nějakého mikroprocesoru. Dále je třeba pravidelně určovat polohu rotoru vůči statoru. K tomu lze použít celou řadu snímačů polohy např. s optickou závorou. Existují však i metody, které se obejdou bez snímačů a poloha rotoru se určuje nepřímo z průběhu napětí a proudů ve statorových cívkách. Nejsem si však jist, jestli je tato metoda dostatečně spolehlivá a použitelná pro naše účely. Metoda určování polohy rotoru pomocí snímače je spolehlivá, průhledná a přesná, proto bych jí dal přednost.

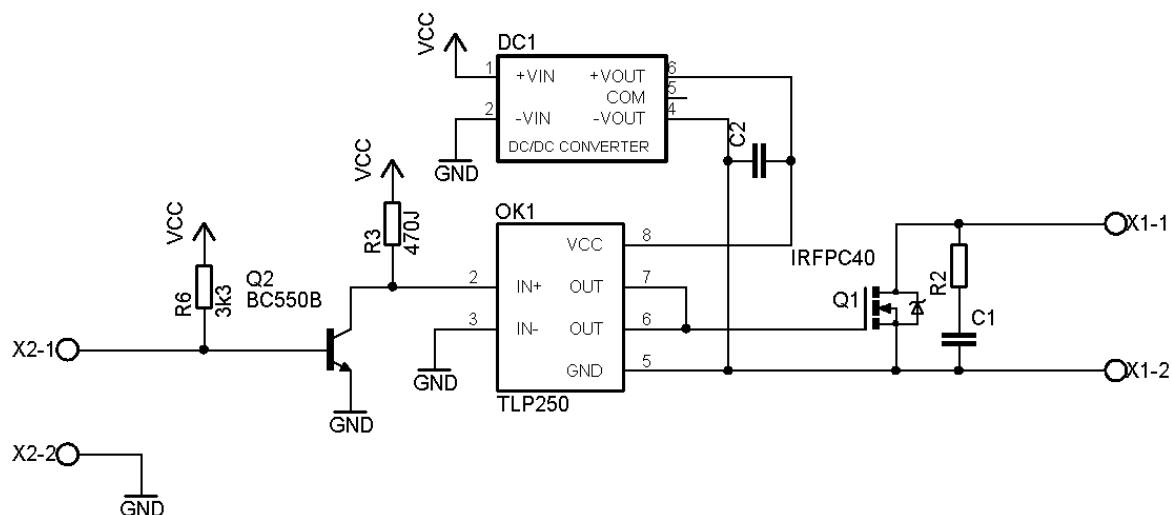


Obr. 7. Obvod pro spínání statorového vinutí - princip

### Prvky řídicí elektroniky SRM

Jak již bylo řečeno výše, je vhodné od sebe galvanicky oddělit silové a řídicí obvody, protože číslicová technika bývá citlivá na rušení. Na obr. 8 je nakresleno schéma elektronického spínače s galvanickým oddělením. DC1 je DC/DC měnič z 5V na 15V. OK1 je optočlen zkonstruovaný přímo pro buzení výkonových MOSFET a IGBT tranzistorů. Spínač sepne, když na vstup přivedeme logickou nulu. Obvod R2, C1 slouží jako ochranný prvek pro výkonový tranzistor Q1.

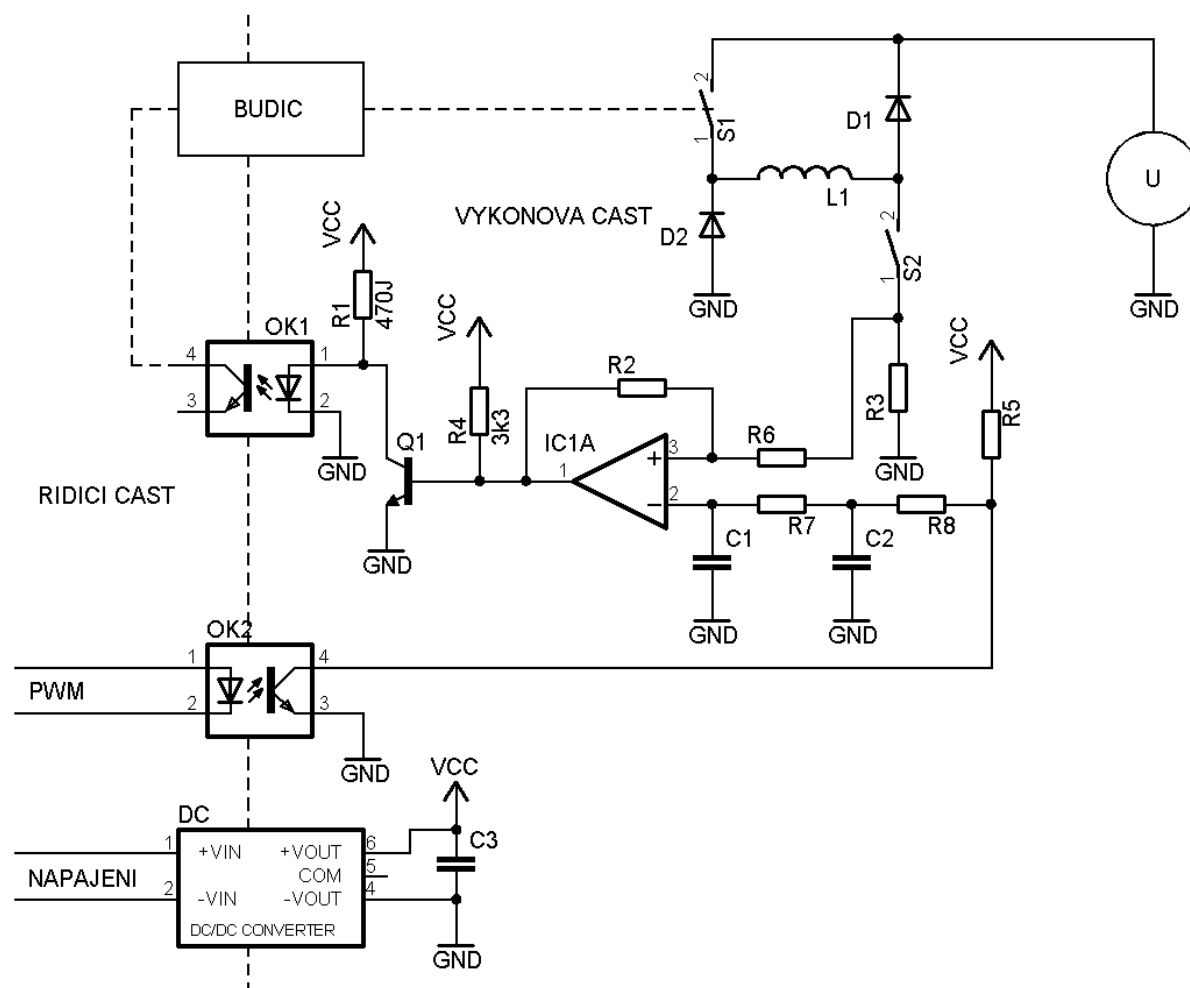




Obr. 8. Elektronický spínač s galvanickým oddělením

Dalším technickým problémem, který je třeba vyřešit, je regulace proudu do budícího vinutí statoru. Jestliže chceme mít galvanicky oddělený řídicí obvod od silové části, musíme řešit galvanicky oddělený přenos analogové hodnoty (proudu) do řídicí jednotky. Tento problém se dá snadno obejít tak, že regulaci proudu budeme provádět analogově pomocí komparátoru s hysterezí a žádanou hodnotu proudu (referenční napětí) dodáme pomocí šířkové modulace (PWM) a RC filtru z řídicí jednotky. Na obr. 9 je nakresleno schéma regulátoru proudu.

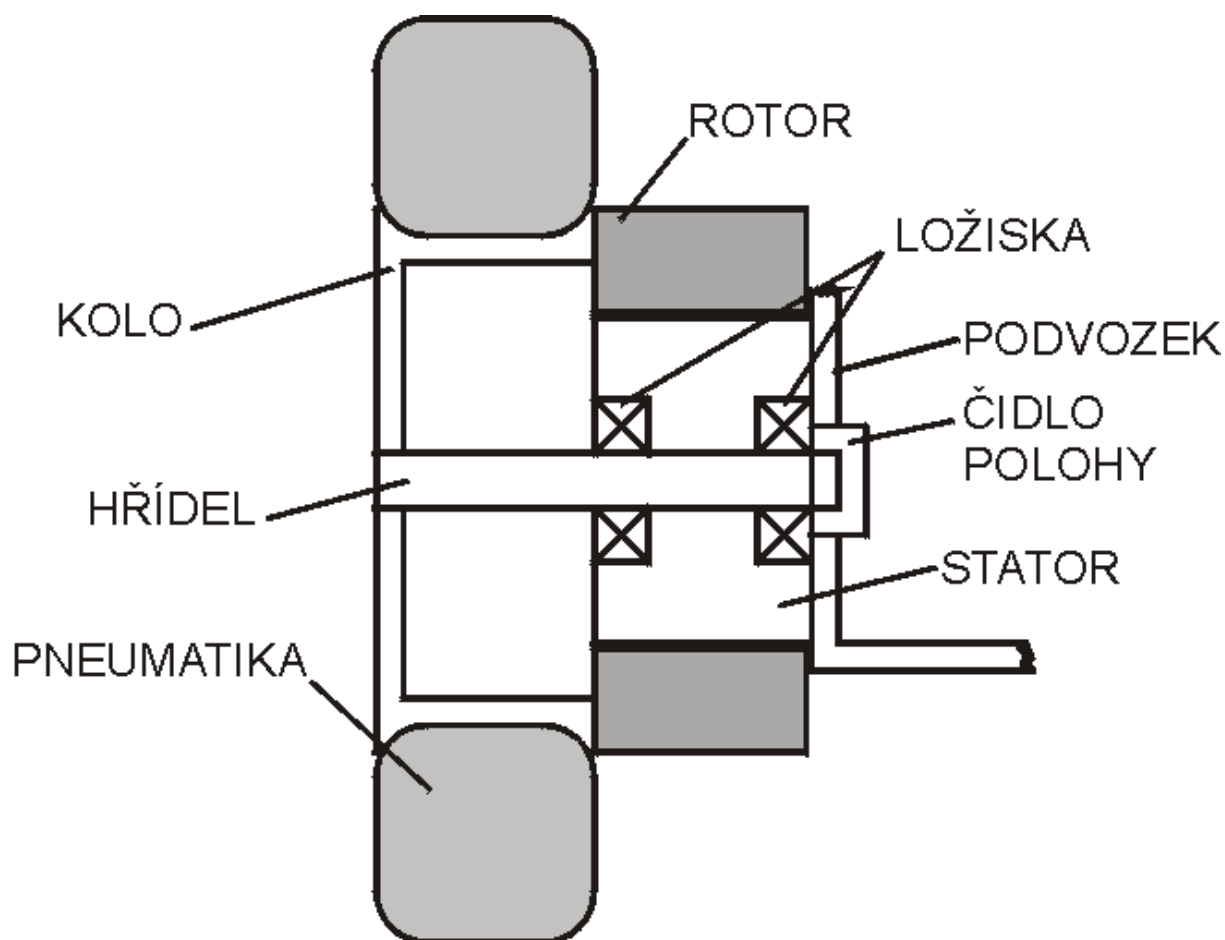
Řídicí část, nakreslená vlevo, je od silové části oddělena čárkovanou čarou. Vlastní regulátor je tvořen komparátorem IC1A a několika pasivními součástkami. Velikost proudu je snímána odporem R3. Žádaná hodnota proudu je nastavována procesorem pomocí digitálního šířkově modulovaného signálu, filtrována pomocí filtru tvořeného odpory R7, R8 a kondenzátory C1, C2 a přivedena na vstup 2 komparátoru. Jakmile úbytek napětí na odporu R3 překročí referenční napětí na vstupu 2, spínač S1 se rozeptne a proud tekoucí cívkou se začne uzavírat přes diodu D2 a bude klesat do té doby, dokud neklesne pod mez, danou hysterezí, která je nastavena pomocí odporů R2, R6. Regulátor je napájen pomocí měniče DC, čímž je dosaženo galvanického oddělení od řídicí části.



Obr. 9. Regulátor proudu.

## Konstrukce

Na obr. 10 je schématicky znázorněna konstrukce motoru, zabudovaného v kole vozidla. Stator s cívkami je připevněn k podvozku. Rotor je pevně spojen s kolem a obíhá kolem statoru. Uvnitř statoru je na ložiscích uložen hřídel, jehož levý konec je spojen s kolem, zatímco pravý nese clonku snímače polohy. Konstrukce nebrání tomu, aby motor byl vícefázový, nejlépe trojfázový. V tom případě jsou jednotlivé statorové cívky umístěny vedle sebe a vyniklé póly rotoru mohou být po obou stranách a na vnitřní straně rotoru. U našeho motoru, který je osmipólový, je v případě trojfázového motoru fázový posun mezi póly jednotlivých fází rotoru 15 stupňů.



Obr. 10. Elektromotor v kole – ideový návrh.

## Závěr

Cílem tohoto článku bylo ukázat, že při vývoji pohonných jednotek pro elektromobily lze kráčet i po nevyšlapaných cestách a že to může být velmi efektivní a výhodné. Věřím, že tohoto cíle bylo dosaženo.

V současné době, kdy cena ropy na světových trzích rychle roste, je zřejmé, že blízká budoucnost patří elektromobilům, které ropná lobby řadu let potlačovala (viz např. film *Who killed electric car?*). Toto sabotování technického pokroku již dlouho nebude možné a vědí to již přední automobilky (Mitsubishi, Toyota, Honda, GM, Ford a další), které usilovně vyvíjejí hybridní i čistě elektrické pohony pro svá vozidla. Vědí to i čelní političtí představitelé některých vlád, kteří předkládají ambiciózní programy masivní podpory výroby aut na elektrický nebo přinejmenším hybridní pohon (Velká Británie, Portugalsko, Dánsko, Izrael a další země). Přestože máme ve vládě „Zelené“, s podobným vývojem se u nás zřejmě nepočítá. Naši politici zřejmě mají jiné starosti. Situace není lepší ani v automobilovém průmyslu. 20. srpna 2008 se na serveru idnes.cz objevil článek s optimistickým názvem „Škodovky budou tankovat ze zásuvky“. Bohužel se v něm můžeme dočíst, že koncern Volkswagen sice vyvinul prototyp hybridního Golfa, avšak se zavedením do výroby si firma dává na čas: sériově se bude vyrábět až za sedm let, tj. v roce 2015. O elektromobilech však ani zmínka. Pevně věřím, že v té době již dávno zaplaví náš trh levná auta z Číny. Například čínská automobilka BYD (Build Your Dreams) se netají tím, že hodlá vyrábět levná hybridní auta a elektromobily a že s nimi chce uspět na evropském trhu.