

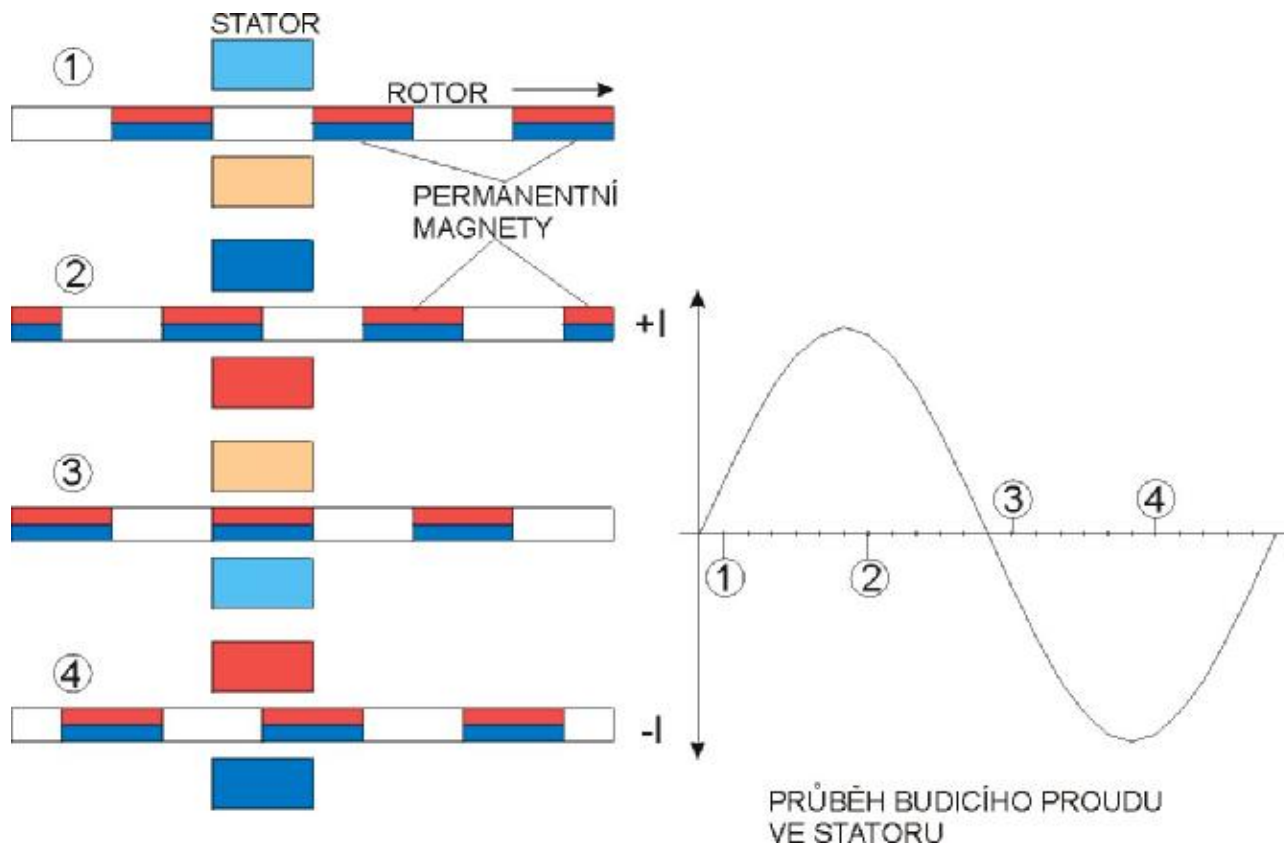
Rezonanční elektromotor

© Ing. Ladislav Kopecký, 2002

Použití elektromechanického oscilátoru pro převod energie cívky v rezonanci na mechanickou práci má dvě velké nevýhody:

- 1) Kmitavý pohyb má menší uplatnění v praxi než pohyb rotační.
- 2) Rozsah kmitání je omezen šířkou vzduchové mezery. Čím však je vzduchová mezera širší, tím je energeticky náročnější vybudit magnetický tok Φ požadované velikosti.

Oba tyto nedostatky odstraníme, nahradíme-li vertikální pohyb permanentního magnetu ve vzduchové mezeře pohybem horizontálním. Jestliže těchto magnetů bude více a budou-li připevněny na otočném kotouči, získáme elektromotor s permanentními magnety. Principiální schéma takového elektromotoru je nakresleno na obr. 1. Rotor je nakreslen jako rozvinutý do roviny, polarita magnetů je vyznačena barevně. U statoru si můžete všimnout, že jsou použity dva barevné odstíny každé z obou barev, aby se odlišila velikost magnetického toku. Na jednotlivých obrázcích jsou vyznačeny různé polohy rotoru vzhledem ke statoru a budicímu proudu, jehož průběh je nakreslen vpravo s čísly označenými polohami rotoru.



Obr. 1.

Z obrázku vyplývá, že za polovinu periody střídavého budicího proudu statoru se rotor otočí o úhel 60° . To znamená, že za celou periodu rotor vykoná třetinu otáčky, takže na jednu otáčku jsou v tomto případě (se třemi magnety rotoru) třeba tři periody budicího proudu. Obecně platí mezi frekvencí napájení a otáčkami následující vztah:

$$n = 60f/p, \quad [\text{ot./min., Hz, -}] \quad (1)$$

kde a jsou otáčky za minutu,
 f je frekvence a
 p je počet permanentních magnetů v rotoru.

Z obrázku je patrné, že dochází k určitému posunu polohy rotoru vůči střídavému proudu. V ideálním případě (tj. naprázdno) by totiž rotor měl být v poloze (1) v okamžiku $t = 0$, v poloze (2) v okamžiku $t = T/4$, atd. (T je délka periody, jak vyplývá z matematického popisu průběhu střídavého budicího proudu: $i(t) = I \cdot \sin(2\pi \cdot t/T)$). Je zřejmé, že s rostoucím mechanickým zatížením rotoru se fázový posun bude zvětšovat.

Jak již bylo výše naznačeno, konstrukce tohoto motoru vychází z koncepce "elektromechanického oscilátoru". Zapojení buzení statoru bude stejné: to znamená v sérii s kondenzátorem a napájené pulzním napětím tak, aby obvod LC obvod, tvořený cívku statoru a kondenzátorem, byl uveden do rezonance. Co se však stane, když motor navrhne klasickým způsobem (tj. bez kondenzátoru) tak, aby mohl být napájen například z běžné sítě 220V/50Hz? Motor, pokud bude správně navržen, bude samozřejmě fungovat, ale s nižší účinností.

Nejprve tedy navrhne tento motor konvenčním způsobem pro síťové napájení 220V/50Hz.

Návrh konvenčního elektromotoru

Budeme postupovat obdobně jako při návrhu magnetického obvodu pro "elektromechanický oscilátor". První čtyři body jsou zcela shodné. Stručně je zopakujeme:

1. Zvolíme magnetickou indukci B .
2. Vypočítáme magnetický tok:

$$\Phi = B S, \quad [\text{Wb, T, m}^2] \quad (2)$$

kde S je průřez feromagnetického jádra.

3. Vypočítáme magnetický odpor obvodu:

$$R_m = \frac{d}{\mu_0 S} \quad (3)$$

4. Vypočítáme magnetomotorické napětí:

$$U_m = N \cdot I = \Phi \cdot R_m, \quad [\text{Az, Wb, Az/Wb}] \quad (4)$$

kde N je počet závitů cívky,
 I je elektrický proud protékající cívku.

5. Určíme počet závitů cívky. Nyní odvodíme vzorec pro výpočet počtu závitů. Toto odvození je poměrně komplikované:

Pro výpočet indukčnosti platí vztah

$$L = \frac{N^2}{R_m}, \quad (5)$$

Máme-li cívku připojenou ke zdroji harmonického napětí, je závislost fázoru proudu I na fázoru napětí U určena vztahem

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{Z}}, \quad (6)$$

kde \mathbf{Z} je komplexní číslo, které udává impedanci cívky, pro jejíž absolutní hodnotu platí

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R_v^2 + (\omega L)^2}, \quad (7)$$

kde R_v je odpor vinutí a výraz ωL značí induktivní reaktanci.

Pro cívky na větší proudy je možné odpor vinutí zanedbat a to učiníme i my, takže rovnici (6) můžeme přepsat na tvar

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}}{\omega L}, \quad (8)$$

kde I je amplituda proudu procházejícího cívkou,

U je amplituda napájecího napětí a

ω je úhlová frekvence.

Ve vzorci (4) dosadíme za proud I podle (8) a dostaneme:

$$U_m = N \frac{U}{\omega L},$$

odkud vyjádříme indukčnost L a dosadíme do (5):

$$L = \frac{U N}{U_m \omega} = \frac{N^2}{R_m},$$

odkud

$$N = \frac{U R_m}{U_m \omega}$$

Dosadíme za U_m podle (4) a pro počet závitů dostaneme výsledný vztah:

$$N = \frac{U}{\omega \Phi}, \quad (9)$$

kde U je amplituda napájecího napětí,

ω je úhlová frekvence a

Φ je magnetický tok.

Poznámka:

Ve vzorci (9) vidíme, že počet závitů není závislý na velikosti magnetického odporu. Když se zvětší vzduchová mezera, magnetický tok zůstane stejný, ale zvětší se elektrický proud protékající cívkou.

6. Vypočítáme amplitudu proudu procházejícího cívkou

$$I = U_m / N \quad (10)$$

Návrh rezonančního motoru

Jak z konvenčního motoru uděláme motor rezonanční? Jednoduše tak, že do série s cívkou vinutí zařadíme kondenzátor vhodné velikosti. Jinými slovy, zařadíme kondenzátor takové velikosti, aby pro daný kmitočet byla splněna podmínka rezonance.

Pro rezonanční kmitočet platí známá rovnice:

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Její úpravou postupně dostaneme

$$\omega^2 = j\omega(-j\omega) = \frac{1}{LC}$$

$$j\omega L = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

Z rovnice (11) vyplývá, že v rezonanci se induktivní reaktance rovná kapacitní reaktanci. Důsledkem je, že na obou prvcích je stejně velké napětí opačné polarity, jak naznačuje mínus před imaginární jednotkou na pravé straně rovnice. Obě napětí se tedy navzájem ruší a zbývá pouze napětí na činném odporu. A v tom je celý vtíp!

Z rovnice (11) také vyplývá vzorec pro výpočet kapacity kondenzátoru:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (12)$$

Indukčnost L vypočítáme podle vzorce (5). Pokud to tímto způsobem není možné, nebo je to obtížné (například proto, že použijeme běžný jednofázový elektromotor), můžeme indukčnost určit následujícím postupem:

- 1) Změřením proudu I a napětí U a výpočtem podle (6) určíme impedanci Z.
- 2) Změříme činný odpor vinutí R_v .
- 3) Ze vzorce (7) vyjádříme L:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R_v^2} \quad (13)$$

Nyní ještě zbývá určit velikost napájecího napětí. To vypočítáme velmi jednoduše pomocí Ohmova zákona:

$$U = I R \quad (14)$$

kde U je amplituda napájecího napětí (pokud použijeme napětí jedné polarity, je $U = U_{\text{nap}}/2$).

I je amplituda proudu cívkou.

R jsou celkové činné ztráty obvodu, včetně vnitřního napětí zdroje, R_v , atd.

K buzení LC obvodu použijeme impulsní oscilátor, jehož různé varianty byly popsány v předchozích článcích.

Jednoduchý experiment

Výše uvedenou teorii velmi snadno ověříme prakticky. Co k tomu potřebujeme? Není toho mnoho: Autotransformátor, střídavý voltmetr, střídavý ampérmetr, ohmmetr, motorek z ventilátoru (asynchronní), sadu kondenzátorů a kalkulačku. Postupujeme následovně:

- 1) Ventilátor zapojíme v sérii s ampérmetrem do sítě a změříme střídavý proud protékající cívkou ventilátoru: $I = 185\text{mA}$.

- 2) Změříme činný odpor vinutí: $R_v = 79\Omega$.
- 3) Změříme napětí v síti: $U = 238V$.
- 4) Vypočítáme impedanci podle Ohmova zákona: $Z = U/I = 238/0,185 = 1286,5\Omega$.
- 5) Vypočítáme indukčnost podle vzorce (13):

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R_v^2} = 1/314 \cdot \sqrt{1286,5^2 - 79^2} = 4,09H$$

- 6) Podle vzorce (12) vypočítáme kapacitu kondenzátoru:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{314^2 \cdot 4,09} = 2,48\mu F$$

- 7) Složíme kondenzátory na požadovanou velikost (paralelně) a sériovou kombinaci ampérmetr, ventilátor a složený kondenzátor připojíme k autotransformátoru.
- 8) Pomalu zvyšujeme napětí, dokud ampérmetr nebude ukazovat proud, který jsme změřili v bodě 1 (185mA).
- 9) Odečteme napětí: $U = 103V$!

Co z toho vyplývá? Při zapojení ventilátoru do sítě bez kondenzátoru byl příkon (zdánlivý výkon) $P = 238 \cdot 0,185 = 44,03VA$, zatímco v druhém případě, kdy byl do série s ventilátorem zapojen kondenzátor, byl příkon $P = 103 \cdot 0,185 = 19,06W$. V tomto případě se však jedná o činný výkon. Abychom tedy mohli posoudit účinnost, museli bychom v prvním případě (bez kondenzátoru) měřit výkon wattmetrem. Při odhadu indukčnosti satorové cívky jsme zanedbali ztráty v železe a vycházeli jsme pouze z činného odporu. Nyní provedeme zpětnou kontrolu, jak velké chyby jsme se přitom dopustili. Celkový činný odpor můžeme odhadnout následovně $R = U_R/I = 103V/0,185A = 557\Omega$.

$L = 1/\omega \sqrt{Z^2 - R^2} = 3,69H$. Účinník $\cos \varphi = R/Z = 557/1286,5 = 0,43277$ a fázový posun mezi proudem a napětím je $\varphi = 64^\circ 21'$.

Výkon odebíraný ze zdroje potom je

$$P = UI \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + (2/\pi)^2} = 44,03 \cdot 0,77 = 33,9W.$$

Účinnost motoru v rezonanci se tedy zvýšila $33,9/19,06 = 1,7786$ -krát, tj. téměř o 78%. Vzhledem k tomu, že jsme špatně odhadli velikost činných ztrát a tím i indukčnost, nedosáhli jsme úplné rezonance. Chyba však nebyla příliš velká, protože při tak velkých ztrátách je rezonanční křivka hodně plochá.

Dále z experimentu plyne to, že většinu ztrát motoru tvoří ztráty v železe. Kdyby totiž ztráty tvořil pouze činný odpor vinutí, stačilo by k napájení motoru napětí pouze $79\Omega \cdot 0,185A = 14,6V$. (Tomu by odpovídal příkon $P = 14,6V \cdot 0,185A = 2,7W$) Proto bude vhodné pro konstrukci rezonančního motoru používat materiál s nízkými ztrátami v železe, například ferit (který má však nevýhodu v tom, že ho lze sytit 3-krát nižší mag. indukci než běžné trafoplechy).

Závěr

Na základě tohoto a dalších mých článků o elektrické rezonanci a "volné energii" lze poměrně jednoduše sestavit funkční energetické zařízení s účinností značně převyšující 100%, které je všestranně použitelné, např. jako pohonná jednotka v různých dopravních prostředcích nebo k pohonu generátorů pro výrobu elektrické energie, atd.

Dodatek

Vliv permanentních magnetů rotoru na funkci rezonančního motoru

Napětí indukované v statorové cívce má dvě složky:

1) Napětí indukované průchodem elektrického proudu cívkou:

$$u_{i1} = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Phi_1}{dt}$$

2) Napětí indukované změnou magnetického toku vyvolanou rotací magnetů:

$$u_{i2} = \frac{d\Phi_2}{dt}$$

Tyto dva magnetické toky působí proti sobě a odčítají se. Celkové napětí indukované v cívce je tedy dáno rozdílem těchto dvou napětí:

$$u_i = u_{i1} - u_{i2} = \frac{d(\Phi_1 - \Phi_2)}{dt}$$

Pro jednoduchost nyní předpokládejme, že (1) indukčnost L cívky je konstantní, tj. magnetický tok Φ_1 je lineární funkcí proudu (to znamená, že má sinusový průběh jako proud i) a (2) magnetický tok Φ_2 má stejný průběh je s tokem Φ_1 ve fázi. Potom můžeme psát:

$$u_i = u_{i1} - u_{i2} = \frac{d(\Phi_1 - \Phi_2)}{dt} = L\dot{\epsilon} \frac{di}{dt}$$

Je zřejmé, že indukčnost $L\dot{\epsilon}$ je menší než indukčnost L .

Jaké jsou důsledky? Především menší výsledná indukčnost způsobí, že se zvýší rezonanční kmitočet, a tudíž se zvýší otáčky motoru. Pokud se nezvýší činné ztráty v rezonančním obvodu vlivem vyšší frekvence, proud zůstane stejný. Příkon zůstane tedy stejný (v případě zvýšení činných ztrát by příkon dokonce klesl). Naopak, použitím magnetů s vyšší remanentní indukcí dojde k zvýšení výkonu, neboť dojde ke zvýšení točivého momentu a zároveň ke zvýšení otáček: $P = M\omega$.

Jinak tomu bude u klasického motoru. Velikost proudu procházejícího cívkou je zde závislá na induktivní reaktanci cívky ωL . Jestliže se tedy zvýší magnetický tok vyvolaný permanentními magnety, sníží se reaktance cívky a stoupne proud procházející cívkou, tj. úměrně se zvýší příkon.

Literatura

- [1] Ladislav Kopecký - Rezonanční motor - úvod do problematiky
- [2] Ladislav Kopecký - Elektromechanický oscilátor
- [3] Vladimír Jager a kol. - Elektrotechnika pro střední průmyslové školy