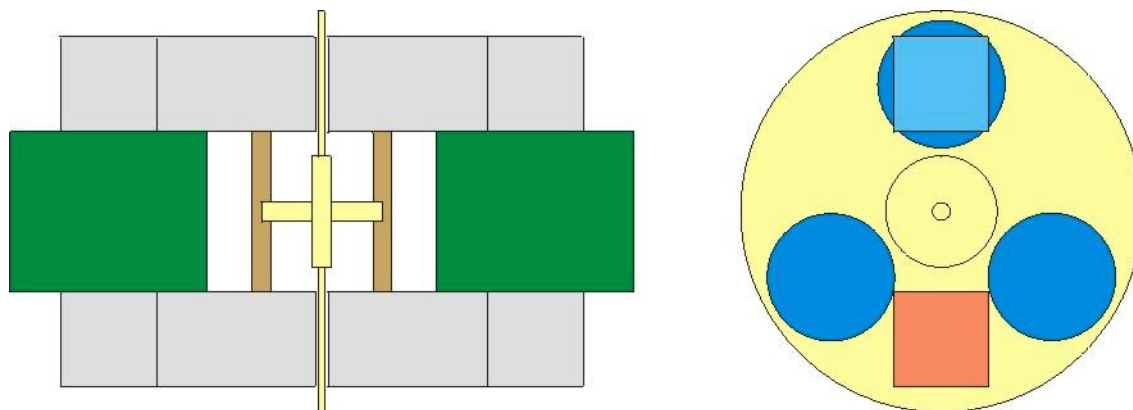


## Rezonanční elektromotor II

© Ing. Ladislav Kopecký, 2002

V tomto článku dále rozvineme a zpřesníme myšlenku rezonančního elektromotoru. Nejdříve se zamyslíme nad vhodnou konstrukcí elektromotoru. Z hlediska stálosti parametrů rezonančního motoru, tvořeného budicí cívkou statoru a vnějším kondenzátorem, bude vhodné, aby v rotoru byly použity permanentní magnety. Dále bude nutné, aby všechny konstrukční díly byly z neferomagnetického materiálu, neboť nekvalitní feromagnetika snižují činitel jakosti cívky. Zjednodušený náčrt takového motoru vidíte na obr. 1.



Obr. 1

Magnetický obvod tvoří dvě jádra ve tvaru "C". Na každém z nich je navinuta cívka. Cívky jsou zapojeny tak, aby výsledný magnetický tok byl součtem magnetických toků obou cívek. V mezeře mezi magnety se pohybuje kotouč z nemagnetického materiálu (například z mosazi, slitiny hliníku, apod.), do něhož jsou vsazeny tři permanentní magnety. Snahou je, aby mezera mezi jádry cívek, tvořícími magnetický obvod, byla co nejmenší mezera. Čím větší je totiž vzduchová mezera v magnetickém obvodu, tím větším proudem musíme budit cívky, abychom dosáhli požadovaného magnetického toku:

$$N \cdot I = U_m = R_m \cdot \Phi \quad (1)$$

kde  $N$  - počet závitů cívky,  
 $I$  - proud procházející cívkou,  
 $U_m$  - magnetomotorické napětí,  
 $R_m$  - magnetický odpor a  
 $\Phi$  - magnetický tok.

Připomeňme, že pro magnetický odpor obvodu se vzduchovou mezerou platí vztah:

$$R_m = \frac{d}{\mu_0 S_{Fe}} \quad (2)$$

kde  $d$  - vzduchová mezera,  
 $\mu_0$  - permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m),  
 $S_{Fe}$  - průřez magnetického obvodu.

Od materiálu magnetického obvodu požadujeme, aby měl co nejmenší měrné ztráty a co největší sycení. První požadavek je nejdůležitější a je na něm přímo závislá účinnost rezonančního motoru. Ztráty v železe se totiž přičítají k činným ztrátám a k dosažení požadovaného proudu je nutné zvýšit napájecí napětí. Z hlediska ztrát v železe je vhodným materiálem ferit, který však má tu nevýhodu,

že snese velmi nízké sycení (cca 0,4T). Křemíkové plechy jsou naprosto nevyhovující! Pokud málo sytíme mag. obvod, musí být o to větší jeho průřez  $S_{Fe}$  a nemůžeme použít kvalitní permanentní magnety s vysokou remanentní indukci  $B_r$ . Materiálem, který splňuje oba požadavky, je amorfní magnetická slitina, známá pod obchodním názvem metglas. Jádra z tohoto materiálu vyrábí firma Honeywell. Tato firma vyrábí několik druhů materiálů, z nichž pro naše účely nejlépe vyhovuje materiál s označením 2605SA1. Tento materiál má jedinečnou kombinaci nízkých měrných ztrát a vysoké saturační magnetické indukce a je vhodný pro výkonové aplikace. Od permanentních magnetů požadujeme, aby měly co největší remanentní indukci. Dále požadujeme, aby byly tenké (viz obr. 1). Těmto požadavkům dobře vyhovují permanentní magnety na bázi vzácných zemin, které dosahují  $B_r > 1T$ .

Funkce motoru je zřejmá z obr. 2. Předpokládejme, že se rotor točí ve směru hodinových ručiček. Všechny tři magnety jsou orientovány stejným směrem, takže když například horní pól statoru je orientován shodně s magnetem (1) rotoru, ten je jím odpuzován, zatímco spodní pól statoru magnet rotoru přitahuje. Jakmile magnet (2) dosáhne polohy spodního pólu, dojde v cívkách ke změně polarity a tento pól začne magnet (2) odpuzovat, kdežto horní pól začne přitahovat magnet (3). Jakmile se tento magnet dostane pod horní pól statoru, nastává začátek další periody sinusového průběhu budicího proudu statoru. Všimněte si, že rotor se přitom otočil o  $120^\circ$ , čili o  $1/3$  otáčky. V rotoru nemusí být pouze tři magnety, musí jich však vždy být lichý počet, například 5, 7 nebo 9, aby nemohlo dojít k tomu, že by se v jednom okamžiku pod každým pólem statoru nacházel jeden magnet rotoru. Pokud je tato podmínka dodržena, je moment rotoru stály a nepodléhá výchytkám jako v případě, kdyby byl počet magnetů rotoru sudý.

Pro otáčky motoru platí stejný vztah jako v předchozím článku:

$$n = 60f/p, \quad [\text{ot./min.}, \text{Hz}, -] \quad (3)$$

kde  $n$  jsou otáčky za minutu,

$f$  je frekvence a

$p$  je počet permanentních magnetů v rotoru.

Nyní si ukážeme podrobnější návrh elektromotoru konstrukce podle obr. 1.

## Návrh motoru

Jsou známy parametry magnetického obvodu, jeho rozměry a saturační magnetická indukce. Dále je dáno napájecí napětí a jeho kmitočet. Budeme postupovat takto:

1) Vypočteme magnetomotorické napětí:

$$U_m = \frac{B \cdot d}{\mu_0} \quad (4)$$

kde  $B$  je sycení jádra [T],

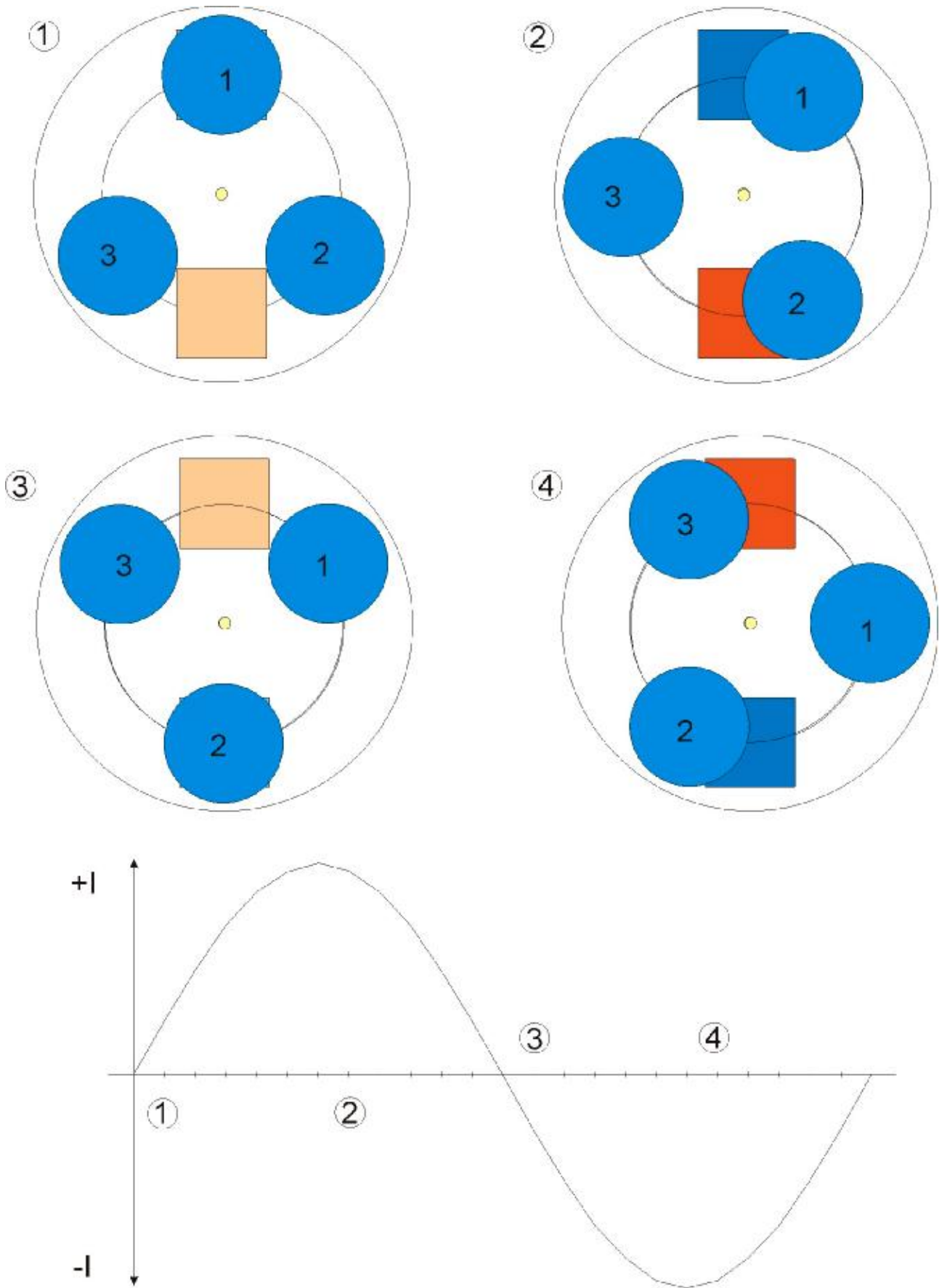
$d$  je vzduchová mezera [m] a

$\mu_0$  je permeabilita vakua [ $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m].

Poznámky:

a) Vztah (4) jsme odvodili následovně: Do známého vzorce (1) jsme dosadili za  $R_m$  podle (2) a dále jsme dosadili za magnetický tok  $\Phi = B \cdot S$ .

b) Nesmíme zapomenout počítat s dvojnásobnou vzduchovou mezerou, protože magnetický obvod je přerušen na dvou místech.



Obr. 2

2) Určíme maximální magnetický tok:

$$\Phi = B \cdot S_{Fe} \quad [\text{Wb, T, m}^2] \quad (5)$$

3) Vypočteme celkový počet závitů (obou cívek):

$$N = \frac{U_A}{\omega \cdot \Phi} \quad (6)$$

kde  $U_A$  je amplituda napájecího napětí,

$\omega = 2\pi f$  je úhlová frekvence a

$\Phi$  je magnetický tok.

4) Vypočteme, jak velký proud bude procházet statorovým vinutím:

$$I_A = \frac{U_m}{N} \quad (7)$$

**Poznámka:** Indexem "A" budeme dále označovat amplitudu dané veličiny, kdežto efektivní hodnotu budeme značit indexem "ef".

5) Určíme rozměry drátu vinutí:

$$\text{a) Průřez drátu: } S_{Cu} = \frac{I_A}{\sqrt{2} \cdot \sigma} = \frac{I_{ef}}{\sigma} \quad (8)$$

$\sigma$  je proudová hustota (pro měděný drát u menších zařízení volíme  $\sigma = 4$ ).

$$\text{b) Průměr drátu: } D = \sqrt{4S/\pi} \quad (9)$$

(pro kruhový průřez)

Zvolíme nejbližší vyšší normalizovaný průměr drátu (ČSN 34 73 25).

c) Vypočítáme výšku vinutí h:

$$\text{Spočítáme průřez vinutí: } S_v = w \cdot h = N \cdot S_{1z} = N \cdot S_{Cu} \cdot k_p, \quad (10)$$

kde  $w$  - šířka cívký [mm],

$N$  - počet závitů,

$S_{1z}$  - plocha, kterou zaujímá jeden závit [mm<sup>2</sup>],

$S_{Cu}$  - čistý průřez drátu (bez izolace) [mm<sup>2</sup>],

$k_p$  - konstanta plnění, která je závislá na tvaru průřezu drátu, způsobu vinutí, tloušťce izolace, apod.

Poznámka: V praxi se u drátu s kruhovým průřezem často volí  $S_{1z} = D^2$ . Protože pro kruhový průřez platí  $S_{Cu} = \pi \cdot D^2/4$ , vychází potom  $k_p = 4/\pi = 1,273$ .

$$\text{Výška vinutí je pak dána vztahem: } h = \frac{N \cdot S_{Cu} \cdot k_p}{w} \quad (11)$$

(Všechny rozměry jsou v milimetrech.)

$$\text{d) Délka drátu: } l_v = N \cdot l_{1z} \quad (12)$$

kde  $l_{1z}$  je střední délka jednoho závitů, kterou vypočítáme podle vzorce:

$$l_{1z} = 2 \cdot (a + b + 2h), \quad (\text{pro čtvercový průřez: } l_{1z} = 4(a + h)) \quad (13)$$

kde  $a, b$  jsou rozměry jádra a  $h$  je výška vinutí.

6) Vypočítáme odpor vinutí:

$$R_v = \rho \frac{l_v}{S_{Cu}} \quad (14)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ] (pro měď při  $20^\circ\text{C}$  platí  $\rho = 0,0175$ ),  
 $l_v$  je délka vinutí [m], kterou vypočítáme podle vzorce (12) a  
 $S_{Cu}$  je čistý průřez drátu [ $\text{mm}^2$ ] - viz (8).

7) Vypočítáme otáčky za minutu:  $n = 60f/p$   
 (viz (3)).

8) Vypočítáme magnetický odpor:

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} \quad (15)$$

9) Vypočítáme indukčnost vinutí statoru:

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (16)$$

10) Vypočítáme kapacitu kondenzátoru:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (17)$$

A nakonec si pro ilustraci spočítáme dva příklady.

Příklad 1:

Jádro:  $S_{Fe} = 3 \times 3 \text{ cm}$ , materiál metglas -  $B = 1,5 \text{ T}$ ,  $w = 50 \text{ mm}$ , vzduchová mezera  $2 \times 4 \text{ mm}$ .

Napájení:  $230\text{V}/50\text{Hz}$ .

Rotor: 3 neodýmové permanentní magnety o průměru  $40 \text{ mm}$  a tloušťce  $2 \text{ mm}$ .

1)

$$U_m = \frac{B \cdot d}{\mu_0} = \frac{1,5 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 9549,3 \text{ Az}$$

$$2) \Phi = B \cdot S_{Fe} = 1,5 \cdot (0,03)^2 = 0,00135 \text{ Wb}$$

3)

$$N = \frac{U_A}{\omega \cdot \Phi} = \frac{325}{(2\pi \cdot 50) \cdot 1,35 \cdot 10^{-3}} = 766z$$

4)

$$I_A = \frac{U_m}{N} = \frac{9549,3}{766} = 12,47\text{A}, \quad I_{ef} = 12,47/\sqrt{2} = 8,815\text{A}$$

5)

a)

$$S_{Cu} = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{8,815}{4} = 2,2 \text{ mm}^2$$

b)

$$D = \sqrt{4S/\pi} = 1,67 \text{ mm}$$

c)

$$h = \frac{N \cdot S_{Cu} \cdot k_p}{w} = \frac{766 \cdot 2,2 \cdot 1,3}{2 \cdot 50} = 22 \text{ mm}$$

d)

$$l_{1z} = 4(a + h) = 4 \cdot (3 + 2,2) = 20,8 \text{ cm}$$

$$l_v = N \cdot l_{1z} = 766 \cdot 0,208 = 159,33 \text{ m}$$

6)

$$R_v = \rho \frac{l_v}{S_{Cu}} = 0,0175 \cdot \frac{159,33}{2,2} = 1,2674 \Omega$$

7)

$$n = 60f/p = 60 \cdot 50/3 = 1000 \text{ ot./min.}$$

8)

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{9549,3}{0,00135} = 7.073.555,5$$

9)

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{766^2}{7.073.555,5} = 82,95 \text{ mH}$$

10)

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 82,95 \cdot 10^{-3}} = 122,147 \mu\text{F}$$

### Poznámky:

1) Tento rezonanční motor byl počítán pro napájení ze sítě. Zařadíme-li do obvodu statoru kondenzátor o hodnotě  $C = 122,147 \mu\text{F}$ , musíme zredukovat napájecí napětí na hodnotu:

$$U_{ef} = R \cdot I_{ef} = (1,2674 + R_o) \cdot 8,815 \text{ V,}$$

kde  $R_o$  představuje ostatní (vedle odporu vinutí  $R_v$ ) činné ztráty sériového rezonančního obvodu, mezi něž patří ztráty v železe, vnitřní odpor zdroje  $R_i$  a ztrátový sériový odpor kondenzátoru  $R_s$ , definovaný ztrátovým úhlem kondenzátoru  $\text{tg } \delta = \omega R_s \cdot C$ .

2) Pro zajímavost si ještě spočítáme, jak se změní napětí na vinutí statoru, otáčky a kapacita kondenzátoru pro desetinásobný rezonanční kmitočet:

Ze vzorce (6) vyjádříme amplitudu napětí a dostaneme:

$$U_{LA} = N \cdot \omega \cdot \Phi = 766 \cdot (2\pi \cdot 500) \cdot 0,00135 = 3248,7 \text{ V.}$$

(Správně mělo vyjít  $325 \times 10 = 3250 \text{ V}$ . Nepřesnost byla způsobena zaokrouhlováním.)

$$n = 60f/p = 60 \cdot 500/3 = 10.000 \text{ ot./min.}$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 500)^2 \cdot 82,95 \cdot 10^{-3}} = 1,2215 \mu\text{F}$$

Vidíme, že když použijeme kondenzátor se 100-krát menší kapacitou, zvýší se rezonanční kmitočet (resp. otáčky) desetinásobně a napětí na indukčnosti vzroste rovněž desetinásobně.

Příklad 2:

Jádro:  $S_{Fe} = 2 \times 2 \text{ cm}$ , materiál ferit -  $B = 0,4\text{T}$ ,  $w = 150 \text{ mm}$ , vzduchová mezera  $2 \times 8\text{mm}$ .

Napájení:  $12 \text{ V}/1\text{kHz}$  - obdélníkový průběh.

Rotor: 9 feritových permanentních magnetů o průměru  $27 \text{ mm}$  a tloušťce  $6 \text{ mm}$ .

1)

$$U_m = \frac{B \cdot d}{\mu_0} = \frac{0,4 \cdot 16 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 5093 \text{ Az}$$

$$2) \Phi = B \cdot S_{Fe} = 0,4 \cdot (0,02)^2 = 0,00016 \text{ Wb}$$

Dále použijeme poněkud odlišný postup:

3) Zvolíme průměr drátu:  $D = 1 \text{ mm}$ .

4) Vypočítáme jeho průřez:

$$S_{Cu} = \pi \cdot D^2/4 = \pi/4 = 0,7854.$$

5) Vypočítáme proudové zatížení a amplitudu proudu:

$$I_{ef} = S_{Cu} \cdot \sigma = 0,7854 \cdot 4 = 3,1416\text{A}, \quad I_A = 4,443\text{A}$$

6) Vypočítáme počet závitů:

$$N = \frac{U_m}{I_A} = \frac{5093}{4,443} = 1146\text{z.}$$

7) Vypočítáme amplitudu napětí na cívce:

$$U_{LA} = N \cdot \omega \cdot \Phi = 1146 \cdot (2\pi \cdot 1000) \cdot 0,00016 = 1152 \text{ V.}$$

8) Vypočítáme výšku vinutí:

$$h = \frac{N \cdot D^2}{w} = \frac{1146}{150} = 8 \text{ mm.}$$

9) Vypočítáme délku drátu:

Střední délka závitu:

$$l_{1z} = 4(a + h) = 4 \cdot (2 + 0,8) = 11,2 \text{ cm}$$

$$l_v = N \cdot l_{1z} = 1146 \cdot 0,112 = 128,35 \text{ m}$$

10)

$$R_v = \rho \frac{l_v}{S_{Cu}} = 0,0175 \cdot \frac{128,35}{0,7854} = 2,86 \Omega$$

11)

$$n = 60f/p = 60 \cdot 1000/9 = 6666,7 \text{ ot./min.}$$

12)

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{5093}{0,00016} = 31.831.250$$

13)

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{1146^2}{31.831.250} = 41,26 \text{ mH}$$

14)

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 1000)^2 \cdot 41,26 \cdot 10^{-3}} = 613 \text{ nF}$$

Použijeme-li více pólů (magnetů) v rotoru, můžeme zvýšit pracovní (rezonanční) kmitočet motoru, čímž se nám zvýší účinnost (která je přímo úměrná poměru napětí na cívice ku napájecímu napětí) a můžeme mít menší kondenzátor pro danou indukčnost statorového vinutí. Zároveň se zvýší kroutící moment motoru.