

LOSSES AND HEAT IN HIGH-SPEED MACHINES

Martin Světlík

Bachelor Power Electrical and Electronic Engineering (3), FEEC BUT

E-mail: xsvetl06@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Marek Toman

E-mail: Marek.Toman@vutbr.cz

Abstract: This paper deals with thermal calculations of high-speed machines. The first part of the paper is focused to determination of mechanical losses that are dominant in high-speed machines. Based on the presented procedures, a calculation of mechanical losses of the specific high-speed machine was performed. The second part of the paper deals with a description of a thermal network for modeling of temperatures in the motor.

Keywords: High-speed machine, thermal network, mechanical frictions

1 ÚVOD

Vysokootáčkové stroje patří k nově se rozvíjejícímu odvětví elektrických točivých strojů. Tyto stroje vynikají specifickou konstrukcí, jako např. rotory vyrobenými z jednoho kusu kovu. Rozvoj tohoto odvětví umožnil zejména rozmach výkonové elektroniky. V důsledku markantního zvýšení otáček dochází u tohoto typu strojů ke zvýšení mechanických ztrát a výkonové hustoty. To vede ke zvyšování oteplení stroje, proto je zapotřebí věnovat větší pozornost právě tepelným výpočtům.

2 ZTRÁTY VE VYSOKOOTÁČKOVÝCH STROJÍCH

V točivých strojích lze ztráty obecně rozdělit na ztráty Jouleovy, elektromagnetické a mechanické. Jouleovy ztráty jsou způsobeny průchodem proudu. Elektromagnetické ztráty jsou způsobeny zejména vířivými proudy a s nimi souvisejícími vyššími harmonickými. Mechanické ztráty jsou způsobeny zejména třením rotoru o okolní tekutinu. Toto tření má poté vliv na proudění této tekutiny přes vzduchovou mezeru, což v konečném důsledku ovlivňuje množství odvedeného tepla nejen ze vzduchové mezery, ale i z kruhů rotoru a čel statoru. Na odvod tepla z povrchu statoru a rotoru má, mimo jiné, vliv i drsnost povrchu materiálu a případné drážkování. V případě hrubých nebo drážkovaných povrchů materiálů sice roste plocha, přes kterou se teplo odvádí do vzduchové mezery a následně do dalších částí stroje, odkud je dále odváděno. Na druhou stranu, čím hrubší je povrch, tím větší klade okolní tekutina odpor rotoru, což vede ke zvýšení mechanických ztrát a většímu oteplení stroje. Proto je, při konstrukci těchto strojů, velice důležité věnovat zvýšenou pozornost tepelným výpočtům s ohledem na otáčky, typ chladicí tekutiny a povrchovou úpravu jednotlivých částí stroje (zejména rotoru). [1]

3 VÝPOČET MECHANICKÝCH ZTRÁT

Mechanické ztráty lze dále, pro usnadnění jejich výpočtu, rozdělit na ztráty ve vzduchové mezeře a na kruzích rotoru.

3.1 ZTRÁTY VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE

Tento typ ztrát je způsoben třením rotoru o okolní tekutinu. V případě, že se na rotoru vyskytuje radiální, případně axiální drážkování, uvažujeme zvýšení ztrát 2 -4 krát oproti hladkému rotoru. Tento

typ ztrát lze vypočíst prostřednictvím následujícího vztahu

$$P_{mech,vm} = k_1 C_{T,\delta} \pi \rho \omega^3 r_{rot}^4 l_{rot}, \quad (1)$$

kde k_1 je koeficient drsnosti povrchu, který nabývá hodnot 1 - 4, r_{rot} je poloměr rotoru a l_{rot} je délka aktivní části rotoru. [2]

3.2 ZTRÁTY NA KRUIČÍCH ROTORU

Tyto ztráty jsou způsobeny třením kruhů o okolní tekutinu. Kruhy poté fungují jako centrifuga, která tlačí tekutinu ke vnější části vzduchové mezery. Tyto ztráty jsou definovány následujícím vztahem

$$P_{mech,kruh} = \frac{1}{2} C_{T,kruh} \rho \omega^3 (r_2^5 - r_1^5), \quad (2)$$

kde C_T je koeficient třecích mechanických ztrát, ρ je hustota tekutiny, která obklopuje rotor, ω je úhlová rychlost rotoru, r_1 je vnitřní poloměr vzduchové mezery, r_2 je vnější poloměr vzduchové mezery. [3] Prostřednictvím zmíněných vzorců byly vypočteny ztráty ve vzduchové mezeře a na kružích rotoru. Vstupní veličiny a výpočtové koeficienty jsou společně s výslednými ztrátami uvedeny v tabulce 1.

Vstupní veličiny						
otáčky [ot/min]	r_1 [mm]	δ [mm]	l [mm]	μ [Pa·s]	ρ [kg/m ³]	k_1 [-]
200 000	15	2	40	$1,983 \cdot 10^{-5}$	1,165	2
Výpočtové koeficienty				Výstupní veličiny		
$C_{T,kruh}$ [-]	Re_r [-]	$C_{T,\delta}$ [-]	Re_δ [-]	$P_{mech,kruh}$ [W]	$P_{mech,vm}$ [W]	
0,0079	$2,376 \cdot 10^5$	0,0022	$3,1685 \cdot 10^4$	16,906	253,793	

Tabulka 1: Tabulka vypočtených ztrát.

Z tabulky 1 je patrné, že celkové mechanické ztráty dosahují hodnoty 287,605 W. Snížení mechanických ztrát se dá dosáhnout například změnou velikosti vzduchové mezery nebo změnou poloměru rotoru. Zmíněné parametry přímo ovlivňují výpočtové koeficienty jako Reynoldsovo číslo, případně koeficient třecích mechanických ztrát. Podle [3] je Reynoldsovo číslo ve vzduchové mezeře definováno jako

$$Re_\delta = \frac{\rho u_1 \delta}{\mu}, \quad (3)$$

kde ρ je hustota tekutiny, u_1 je obvodová rychlost rotoru, δ je šířka vzduchové mezery a μ je dynamická viskozita tekutiny. Reynoldsovo číslo při kružích rotoru je podle [3] dáno vztahem

$$Re_r = \frac{\rho u_1 r_{rot}}{\mu}, \quad (4)$$

kde r_{rot} je poloměr rotoru. Koeficienty třecích ztrát jsou definovány pro různé meze Reynoldsova čísla. V tomto konkrétním stroji je využíván koeficient třecích mechanických ztrát pro vzduchovou mezeru, který je podle [4] definován rovnicí

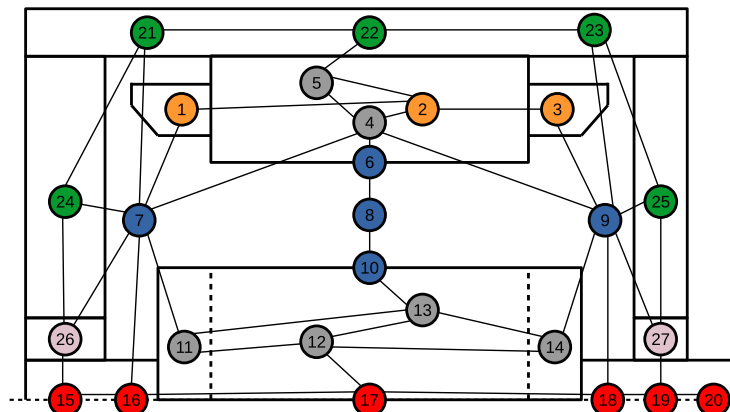
$$C_{T,\delta} = 0,0325 \frac{\left(\frac{\delta}{r_{rot}}\right)^{0,3}}{Re_\delta^{0,2}}. \quad (5)$$

Koeficient třecích mechanických ztrát pro kruhy rotoru lze podle [4] spočítat jako

$$C_{T,kruh} = \frac{3,87}{Re_r^{0,5}}. \quad (6)$$

4 METODA TEPELNÉ SÍTĚ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, je nutné věnovat zvýšenou pozornost tepelným výpočtům. Pro tento typ výpočtů je používána metoda ekvivalentních tepelných odporů, nebo-li metoda tepelné sítě. Tento způsob výpočtu spočívá ve vytvoření tepelné sítě, která svým uspořádáním vystihuje skutečné chování reálné tepelné soustavy. Každá síť je tvořena třemi základními prvky (uzel, větev, nor). [5]



Obrázek 1: Tepelná síť daného asynchronního stroje.

Význam jednotlivých uzlů sítě:

1 – Čelo vinutí statoru (V)	10 – Vnitřní vzduch (R- δ)	19 – Hřídel (H-Lož.)
2 – Vinutí v drážkách statoru	11 – Kruh rotoru (V)	20 – Hřídel (Vzduch)
3 – Čelo vinutí statoru (H)	12 – Jho rotoru	21 – Kostra (V)
4 – Zuby statoru	13 – Zuby rotoru	22 – Kostra
5 – Jho statoru	14 – Kruh rotoru (H)	23 – Kostra (H)
6 – Vnitřní vzduch (S- δ)	15 – Hřídel (V-Lož.)	24 – Ložiskový štít (V)
7 – Vnitřní vzduch (V)	16 – Hřídel (V)	25 – Ložiskový štít (H)
8 – Vnitřní vzduch	17 – Hřídel (Střed)	26 – Ložisko (V)
9 – Vnitřní vzduch (H)	18 – Hřídel (H)	27 – Ložisko (H)

4.1 VÝPOČET TEPELNÉ SÍTĚ

Již zmíněná metoda tepelné sítě vychází z analogie mezi elektrickými a tepelnými obvody. Ekvivalentní veličinou k elektrickému napětí U je rozdíl teplot $\Delta\vartheta$, k elektrickému proudu I Tepelný tok P a k elektrickému R odporu tepelný odpor R_{ϑ} . Řešení obvykle probíhá v ustáleném stavu, ale v případě potřeby je možné doplnit schéma o kapacity a tím model přizpůsobit pro přechodový stav. [5] Díky podobnosti elektrických a tepelných veličin můžeme využít princip Ohmova zákona v podobě

$$P = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}}, \quad (7)$$

kde tepelný odpor R_{ϑ} je odlišný pro přenos tepla kondukcí a konvekcí, kdy pro kondukcí nabývá tvaru

$$R_{\vartheta,v} = \frac{L}{6\lambda S}, \quad (8)$$

kde L je délka ve směru přenosu tepla, λ je tepelná vodivost materiálu a S je průřez oteplovaného profilu. Pro konvekci je tepelný odpor vyjádřen prostřednictvím vztahu

$$R_{\vartheta,p} = \frac{1}{\alpha S}, \quad (9)$$

kde α je koeficient přestupu tepla. Obdobně, jako v oblasti elektrických veličin, můžeme nahradit tepelné odpory tepelnými vodivostmi, což podle [5] provedeme prostým převrácením jejich hodnot takto

$$g_{\vartheta} = \frac{1}{R_{\vartheta}}. \quad (10)$$

Tato operace je nezbytná možnost využití metody tepelných odporů. Následný výpočet tepelné sítě spočívá v řešení soustavy n lineárních rovnic, kde n je počet uzlů tepelné sítě [5]. Soustavu rovnic je možné zapsat ve tvaru

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & \dots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & \dots & -g_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \dots & G_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{01} + g_{u1}\vartheta_{u1} \\ P_{02} + g_{u2}\vartheta_{u2} \\ \vdots \\ P_{0n} + g_{un}\vartheta_{un} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Hlavní diagonála matice tepelných vodivostí je tvořena členy G_i . Hodnota členů G_i je dána součtem vodivostí, které vstupují do i -tého uzlu. [5] Nyní lze z dané soustavy určit výsledné střední teploty v jednotlivých uzlech, po vyjádření teplotní matice získáme vztah

$$\vartheta = \mathbf{G}^{-1} \times \mathbf{P}. \quad (12)$$

5 ZÁVĚR

V uvedeném článku byl proveden výpočet mechanických ztrát, které pro vzduchovou mezeru vyšly 253,8 W a pro oba kruhy rotoru 16,9 W. Dále zde byla popsána tepelná síť, která dále slouží pro výpočet teplot v jednotlivých částech stroje.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu: Speciální elektromotory malého výkonu pro turbokompresory (TK02020168), který je řešen s finanční podporou TAČR.

REFERENCE

- [1] BÁRTA, Jan. *Návrh elektrického stroje 6kW, 120 000 ot/min*. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [2] NERG, Janne. *Thermal Modeling of a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor*. Lappeenranta University of Technology, 2006.
- [3] SAARI, Juha. *Thermal analysis of high-speed induction machines*. Acta Polytechnica Scandinavica, 1998.
- [4] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd Edition. New Delhi, India: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2013. ISBN ISBN: 978-1-118-58157-5.
- [5] TOMAN, Marek. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou fyzikálního modelování*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, 2015.