FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

STUDENTSKÁ VĚDECKÁ KONFERENCE 2015

Teplotní namáhání rotoru v parních turbínách

Antonín Bouberle[1]

1 Úvod

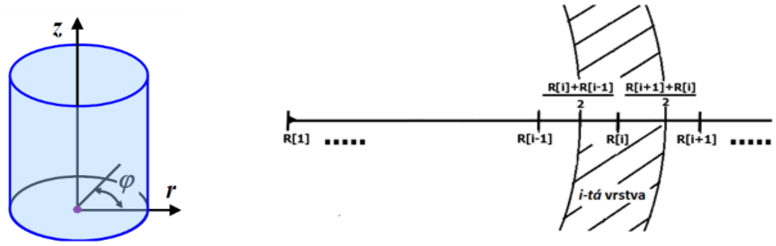
V současné době se v energetickém průmyslu rozvíjejí především dva hlavní směry. První z nich představuje problematika ubývání neobnovitelných zdrojů spojená s postupným nahrazováním zdroji obnovitelnými. Druhým trendem je dosahování stále vyšší účinnosti, životnosti a spolehlivosti u zařízení pro výrobu elektrické energie. Právě druhý směr je mimo jiné spojen s monitorováním a diagnostikou těchto zařízení, neboť včasná detekce počínající závady může ušetřit nemalé finanční prostředky. Velmi častý problém v parních turbínách představuje ohyb rotoru, který je primárně spojen buď se vznikem kontaktu rotor/stator (tzv. rubbing), nebo spíše častěji vzniká v důsledku nestejnoměrného teplotního pole - teplotní namáhání. Obecně k největšímu teplotnímu namáhání dochází při najíždění turbíny ze studeného stavu – tedy při najíždění na provozní otáčky a především pak na příslušný nominální výkon turbíny. Toho je potřeba docílit za co nejkratší dobu, ovšem bez ohrožení provozu stroje. Pochopitelně, že čím rychleji bude rotor zahříván, tím větší bude výsledné teplotní namáhání. Cílem tohoto výzkumu, řešený ve spolupráci s průmyslovým partnerem **Doosan Škoda Power**, je vytvoření teplotního modulu – algoritmu, který by na základě měření dokázal počítat resp. odhadovat teplotní namáhání rotoru a který by mohl být dále využit pro výpočet optimálního trendu zatěžování stroje či pro výpočet zbytkové životnosti apod. Tento příspěvek je věnován výpočtu šíření teploty v průřezu rotoru a výpočtu jeho teplotního namáhání.

2 Řešení a návrh algoritmu

Jak bylo zmíněno, rozložení jednotlivých teplot spolu s teplotním namáháním jsou počítány pro příčný průřez rotoru. Navržený algoritmus lze rozdělit na dvě části. V první fázi je na základě měření a metody konečných objemů (popř. diferencí) určováno teplotní pole (pro daný časový okamžik). Ve druhé části je pak počítána samotná veličina teplotní namáhání. Teplota je měřena pomocí termočlánku, který je umístěn v určité hloubce pod povrchem kovu. Šíření tepla v rotoru (ve válci) popisuje následující diferenciální rovnice:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (1)$$

kde T je teplota, a je tepelná difuzivita, r je poloměr od středu válce (rotoru), φ je úhel natočení a souřadnice z koresponduje s délkou rotoru, viz následující obr 1.



obr.1: Cylindrický souřadnicový systém a i-tá vrstva rotoru

[1] student doktorského studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Kybernetika, e-mail: bouban@ntis.zcu.cz

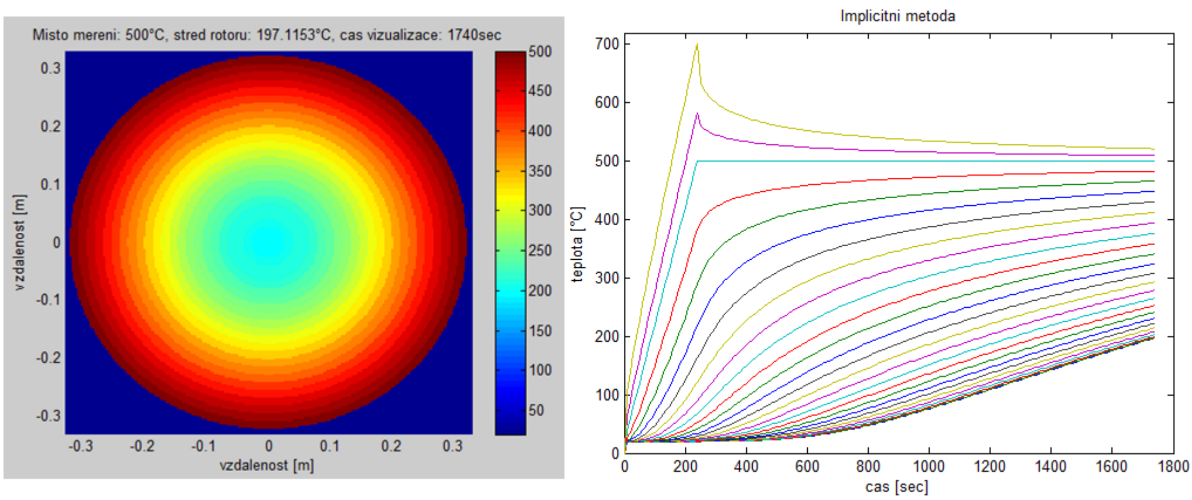
Jelikož je v našem případě předmětem zájmu pouze rozložení teplot v příčném průřezu rotoru je člen $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ v rovnici *(1)* roven nule a dále předpokládáme, že teplota T je nezávislá na úhlu φ (pro dané r a jakékoliv φ je teplota T konstantní – rotace rotoru), tedy $\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0$. Potom rovnice *(1)* přejde na následující tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{2}$$

Jedná se o diferenciální rovnici vedení tepla pro cylindrický souřadnicový systém (pro tuhé homogenní látky bez vnitřních zdrojů tepla) popisující rozložení teplot v prostoru a v čase. Exaktního řešení diferenciální rovnice vedení tepla lze dosáhnout pouze pro jednoduché úlohy, a proto bylo získáno její numerické řešení. Diskretizací prostoru – průřezu rotoru na jednotlivé vrstvy (tj. mezikruží, viz obr. 1, i-tá vrstva) a času byla aplikací metodou konečných objemů (popř. diferencí) získána soustava algebraických rovnic pro výpočet teplot v jednotlivých vrstvách v daném čase. Pro úplnost uveďme okrajové podmínky. Jednou z nich je měřená teplota termočlánku v n-té vrstvě, druhá okrajová podmínka souvisí se samotným středem rotoru, pro který platí $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Ze získaného teplotního pole (pro daný časový okamžik) lze určit hodnotu teplotního namáhání rotoru. Tato veličina představuje teplotní rozdíl mezi nejvyšší teplotou vyskytující se v průřezu rotoru a tzv. teplotou středně integrální. Středně integrální teplota je dána jako průměr teplot v jednotlivých vrstvách rotoru. Poznamenejme, že se jedná o vážený průměr, neboť každá vrstva (mezikruží) má jiný obsah plochy resp. jiný objem (tzv. kontrolní objemy – viz metoda konečných objemů).

Při odvozování algebraických vztahů pro výpočet teplot v jednotlivých vrstvách byly vyzkoušeny obě verze metody konečných objemů (resp. diferencí) – tzv. explicitní a implicitní. Explicitní verzí dostáváme výsledné vztahy v rekurentním tvaru, kdežto v případě implicitní verze je potřeba řešit soustavu rovnic. Na druhou stranu stabilita explicitní verze nemusí být vždy zajištěna, naopak implicitní verze je vždy stabilní. Na závěr poznamenejme, že získané výsledky šíření tepla rotorem se naprosto shodovali s výsledky získanými ze simulace v programu Ansys, což dokazuje správnost navrženého algoritmu.



obr.2: Vizualizace rozložení teplot v průřezu rotoru, časový průběh teplot v jednotlivých vrstvách

Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen grantovým projektem SGS-2013-041.