

Řešení Úlohy 173

Zadané parametry úlohy jsou:

$$p_i = 1,6 \text{ MPa}; t_i = 295 \text{ }^\circ\text{C}; p_e = 1,1 \text{ MPa}.$$

Jedná se o typickou úlohu, kdy je neznámá geometrie a tak v prvním kroku výpočtu se musíme spolehnout na odhady parametrů stupně pomocí podobnostních součinitelů podle vzorců [18.866], [18.342]:

$$\varphi = \frac{c_{2a}}{u}; \psi = \frac{\Delta i_c}{\frac{1}{2}u^2} \quad (\text{a}).$$

Další problém, který způsobuje neznalost geometrii stupně je určení skutečného entalpického spádu, který odpovídá rozdílu mezi izoentropickým celkovým spádem, profilovými ztrátami a kinetickou energií na výstupu ze stupně jak je patrné z i-s diagramu [19.351]:

$$\Delta i_c = h_0 - z_p - \frac{c_2^2}{2} \quad (\text{b}).$$

Z těchto důvodů je nutné v tomto bodě výpočtu profilové ztráty kvalifikovaně odhadnout. Velikost profilových ztrát lze přibližně odhadnout z rychlostního součinitele statorové a rotorové řady lopatek podle vzorce [17.178]:

$$z_p^S = \frac{c_{1iz}^2}{2}(1 - \varphi^2); z_p^R = \frac{w_{2iz}^2}{2}(1 - \psi^2) \quad (\text{c}).$$

Kinetické energie v této chvíli neznáme, ale lze je odhadnout podle i-s diagramu rovnotlakého stupně [19.351]

asi takto:

$$\frac{c_{1iz}^2}{2} \approx h_0; \frac{w_{2iz}^2}{2} \approx \frac{h_0}{2}.$$

Parametry páry na vstupu/výstupu do/ze stupně také přesně neznáme, protože neznáme parametry ventilů a kanálů před/za stupněm. Prozatím odhadneme ztráty tlaku na vstupu do turbíny na 4% na výstupu na 2,5%:

$$p_0 \approx (1 - 0,04)p_i = 1,5360 \text{ MPa}.$$

$$p_2 \approx (1 + 0,025)p_e = 1,1275 \text{ MPa}.$$

Ztráty mezi ventily a vstupem do stupně lze považovat za škrcení plynů a par, takže by měla platit rovnost entalpií $i_i = i_0$ [37.90], ze které lze odečíst i skutečnou teplotu před stupněm:

$$i_0 = 3024,19 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \\ t_0 = 294,188 \text{ }^\circ\text{C}; s_0 = 6,88471 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \\ \dots[2].$$

Rychlost v parním potrubí těchto parametrů se pohybuje kolem $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [1, s. 141]:

$$c_0 \approx 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Nyní můžeme začít s vlastním výpočtem a to veličin, pro které mám dostatečné množství údajů pro jejich přímý výpočet, které jsou uvedeny v předchozích vzorcích:

$$h_0 = i_{0c} - i_{2iz} \quad [19.351],$$

$$i_{0c} = i_0 + \frac{c_0^2}{2} = 3024,5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1},$$

$$i_{2iz} = 2949,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1},$$

$$h_0 = 75,32 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}.$$

Profilové ztráty podle vzorce:

$$z_p = z_p^S + z_p^R.$$

Jednotlivé profilové ztráty můžeme vypočítat podle *Vzorce (c)* přičemž v této fázi výpočtu odhadneme rychlostní součinitel statoru a rotoru podle grafu [17.178]:

$$\varphi \approx \psi \approx 0,97,$$

$$z_p^S = 4,4516 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}; z_p^R = 2,2258 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

$$z_p = 6,6773 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Rozdíl celkových entalpií je funkcí i výstupní rychlosti c_2 , o které nic nevíme, ale pro co nejnižší ztrátu požadujeme rovnost $c_2 = c_{2a}$. Dosadíme do *Vzorců (a)*:

$$\varphi = \frac{c_2}{u_2}; \quad \psi = \frac{h_0 - z_p - \frac{c_2^2}{2}}{\frac{1}{2}u^2},$$

$$\psi = \frac{h_0 - z_p - \varphi^2 \frac{1}{2}u^2}{\frac{1}{2}u^2}$$

(d).

Podle doporučené optimální hodnoty průtokového a tlakového součinitele rovnotlakého stupně pro vybraný stupeň reakce podle [3, s. 152] jsou:

$$\rho \approx 0,05 \rightarrow \varphi \approx 0,5; \quad \psi \approx \frac{7-4}{5} + 4 \approx 4,6.$$

Ve *Vzorci (d)* nyní zůstává jediná neznámá a tou je obvodová rychlost:

$$\psi \frac{1}{2}u^2 + \varphi^2 \frac{1}{2}u^2 = h_0 - z_p,$$

$$u^2 = \frac{2(h_0 - z_p)}{\psi + \varphi^2},$$

$$u = \sqrt{\frac{2(h_0 - z_p)}{\psi + \varphi^2}} = 177,6541 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$c_2 = \varphi \cdot u = 88,8271 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Všimněte si jak vysoká je výstupní rychlost, což je dáno velkým zpracovaným spádem stupně [nad 19.70].

U axiálních stupňů je vliv ventilační ztráty nepatrný a protože obvodová práce je stejná jako rozdíl celkových entalpií stupně $\Delta i_c = l_E$, lze pro výpočet rychlosti c_1 podle vzorce [18.344] pro stupeň reakce použít vztah:

$$\rho = 1 - \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \cdot \Delta i_c} \rightarrow c_1 = \sqrt{(1 - \rho) 2 \cdot \Delta i_c + c_2^2},$$

$$\Delta i_c = h_0 - z_p - \frac{c_2^2}{2} = 64,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$$

$$c_1 = 361,6909 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Nyní lze sestavit celý rychlostní trojúhelník a vypočítat požadované prohnutí proudu.

Složky rychlosti c_1 se vypočítají na základě úhlu absolutní rychlosti α_1 :

$$c_{1a} = c_1 \cdot \sin \alpha_1,$$

$$\alpha_1 = 15^\circ$$

[3, s. 152],

$$c_{1a} = 93,6125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$c_{1u} = c_1 \cdot \cos \alpha_1 = 349,3666 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Výpočet vstupní relativní rychlosti w_1 a její parametrů:

$$w_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + w_{1u}^2} = ? \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$w_{1u} = c_{1u} - u = 171,7125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$w_1 = 195,5722 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\beta_1 = \arcsin \frac{c_{1a}}{w_1} = 28,5979^\circ.$$

Výpočet vstupní relativní rychlosti w_2 a její parametrů:

$$w_2 = \sqrt{c_2^2 + u^2} = 198,6234 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\beta_2 = \arcsin \frac{u}{w_2} + 90^\circ = 153,4349^\circ.$$

Prohnutí proudu:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 124,8371^\circ.$$

Nyní by následoval výběr vhodných lopatkových mříží schopné zpracovat uvedené prohnutí proudu např. [4], [5]. Z aerodynamických dat těchto mříží se vypočítají skutečné ztráty, které se porovnají s odhady popřípadě se provede výpočet znova. Lze také upravit odklon rychlosti c_2 od axiálního směru zadáním úhlu a_2 , pokud to bude mít pozitivní vliv na ztráty a konstrukci stupně.

Odkazy

1. MIKULA, Julius, KOČKA, Jaroslav. ŠKRAMLÍK, Emanuel. ŠTAUBER, Zdeněk. VESELÝ Adolf. OBR, Jan. *Potrubí a armatury*, 1974. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974, 585 s.

2. MAREŠ, Radim, ŠIFNER, Oldřich, KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tabulky vlastností vody a páry, podle průmyslové formulace IAPWS-IF97*, 1999. Vydání první. Brno: VUTIUM. ISBN 80-2141316-6.

3. KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné turbíny a turbokompresory*, 2004. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., ISBN 80-7204-346-3.

4. FIEDLER, Jan. *Parní turbíny-Návrh a výpočet*, 2004. Vydání první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., ISBN 80-214-2777-9.

5. ŠKOPEK, Jan. *Parní turbína-tepelný a pevnostní výpočet*, 2007. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-80-7043-256-3.