

14. VZTAH MEZI OBVODOVOU A VNITŘNÍ PRACÍ STUPNĚ LOPATKOVÉHO STROJE

Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz

<hr/> <i>strana 1</i> <hr/> Úvod	<hr/> <i>strana 6</i> <hr/> Účinnost skupiny stupňů
<hr/> <i>strana 1</i> <hr/> Ventilační ztráta i-s diagram stupně s přihlédnutím k ventilační ztrátě	<hr/> <i>strana 7</i> <hr/> Odkazy
<hr/> <i>strana 4</i> <hr/> Celková energetická bilance stupně Účinnosti stupně	<hr/> <i>strana 8</i> <hr/> Přílohy

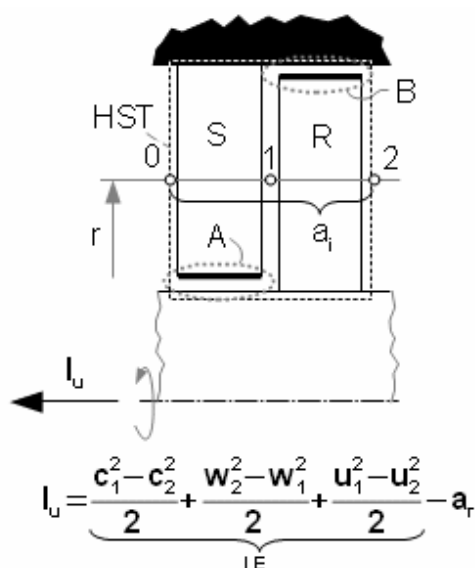
Úvod

Tento článek navazuje na článek 12. Základní rovnice lopatkových strojů a 13. Energetické bilance lopatkových strojů, ve kterých jsou definovány veličiny obvodová práce stupně l_u a měrná vnitřní práce stupně lopatkového stroje a_i .

Měrná vnitřní práce stupně odpovídá práci pracovní tekutiny ve stupni a počítá se z rozdílu celkových stavů mezi vstupem a výstupem ze stupně. Obvodová práce stupně je práce pracovní tekutiny přenesená na rotor stroje ve formě kroutícího momentu vypočítána z rychlostních trojúhelníků.

Ventilační ztráta

U reálných strojů ovlivňuje obvodovou práci i tření rotoru o pracovní tekutinu tzv. ventilační ztráta stupně:



© 2015 Jiří Škorpík

1.318 Rozdíl mezi obvodovou prací a vnitřní prací stupně

HST objem stupně; r [m] poloměr; l_u [$J \cdot kg^{-1}$] měrná obvodová práce stupně na poloměru $r^{(1)}$; c [$m \cdot s^{-1}$] absolutní rychlost; w [$m \cdot s^{-1}$] relativní rychlost; u [$m \cdot s^{-1}$] obvodová rychlost; a_r [$J \cdot kg^{-1}$] ventilační ztráta stupně⁽²⁾; I_E [$J \cdot kg^{-1}$] měrná obvodová práce pracovní tekutiny vykonaná při průtoku kanály rotoru bez ventilační ztráty; a_i [$J \cdot kg^{-1}$] měrná vnitřní práce stupně; **A**, **B** oblasti vzniku ventilační ztráty třením rotoru o pracovní tekutinu. **S** statorová řada lopatek; **R** rotorová řada lopatek.

⁽¹⁾Poznámka

Obvodová práce se může po výšce lopatky měnit. V místech, kde vzniká příčný gradient tlaku se mění po výšce lopatky i tlak.

⁽²⁾Ventilační ztráta stupně

Velikost třecích sil závisí na konstrukci stupně, největší je u stupňů s diskovými rotorem jako je například případ jednostupňové Lavalovy turbíny nebo radiálních stupňů, u bubnových rotorů je toto tření obvykle nevýznamné.

Ventilační ztráta stupně je spotřebovaná práce na překonání tření, tato práce se transformuje na teplo, které ohřívá tekutinu v okolí a části stroje:

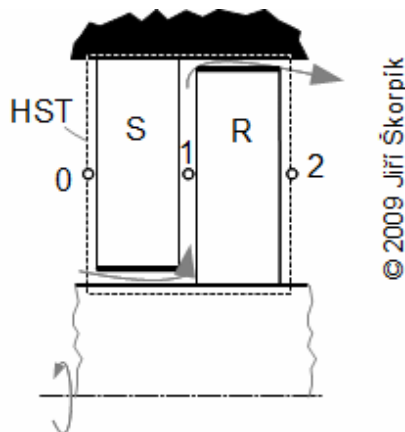
$$a_r = \delta \cdot a_r + (1 - \delta) a_r$$

2.934 Rozdělení tepelného toku z ventilační ztráty

δ [-] součinitel rozdělení tepelného toku z ventilační ztráty rotoru; $\delta \cdot a_r$ [$J \cdot kg^{-1}$] část tepla vzniklé ventilací odvedené do stěn stroje (teplo sdílené s okolím); $(1 - \delta) a_r$ [$J \cdot kg^{-1}$] část tepla vzniklé ventilací odvedené do pracovní tekutiny.

Z rozboru rovnic pro měrnou vnitřní práci lopatkového stroje je očividné, že teplo $\delta \cdot a_r$ zvyšuje teplo odvedené do okolí a teplo $(1 - \delta) a_r$ zvyšuje vnitřní tepelnou energii na výstupu ze stupně u_e , respektive entalpii i_e . To se přímo projeví na poklesu měrné vnitřní práce stejně jako na poklesu měrné obvodové práce, takže lze prozatím psát $l_u = a_i$.

Závěr předchozího odstavce byl formulován na základě předpokladu, že veškerá pracovní tekutina protéká lopatkovými mřížemi a jediné ztráty, které vznikají jsou profilové ztráty a ventilační ztráty, jedná se tedy o stavy pracovní tekutiny v jádru proudu stupněm. Ale stupeň lopatkového stroje je strojírenský produkt, který není dokonalý a ve stupních lopatkových strojů vznikají i další ztráty (tzv. **ostatní ztráty stupně**⁽³⁾) například únik pracovní tekutiny přes okraje lopatek mimo lopatkový kanál apod:



3.1089 Příklad proudění netěsnostmi stupně turbíny

⁽³⁾Poznámka

Ostatní ztráty závisí na typu konstrukce stupně a kvalitě jejího provedení (v jednom stupni může být i několik typů ostatních ztrát). Více v článku 17. Ztráty v lopatkových strojích.

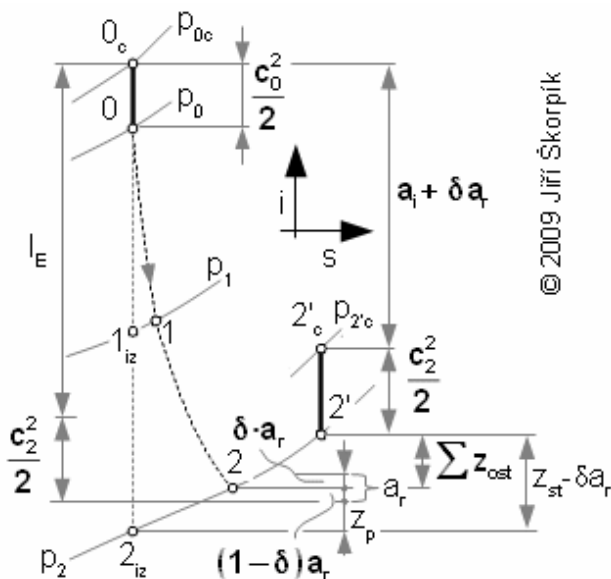
Ve výpočtářské praxi se pod pojmem obvodová práce l_u rozumí vnitřní práce stupně bez započítání vlivu ostatních ztrát (tedy dokonale těsného stupně a bez ztrát vznikající u pat a špic lopatek, také lze mluvit o stupni s nekonečně dlouhými lopatkami). Vnitřní měrná práce stupně a_i je pak skutečná měrná práce stupně se započítáním všech ztrát ($l_u > a_i$).

i-s diagram stupně s přihlédnutím k ventilační ztrátě

Pro případ turbínových stupňů lze sestavit i-s diagram stupně se započítáním sdíleného tepla z ventilačních ztrát za pomoci kapitol 13. Adiabatická expanze v tepelné turbíně, 13. Polytropická expanze v tepelné turbíně:

Celková energetická bilance stupně

Celková energetická bilance stupně zahrnuje veškeré ztráty stupně a i-s diagram zobrazuje stav a práci pracovní tekutiny jako by se na konci stupně dokonale promíchala:

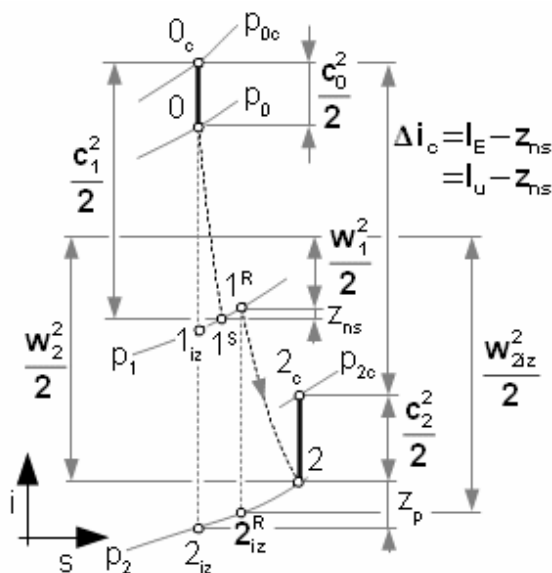


© 2009 Jiří Škorpík

6.319 Měrná vnitřní práce stupně na vyšetřovaném poloměru r

z_{st} [$J \cdot kg^{-1}$] celkové ztráty stupně. Kvůli ostatním ztrátám stupně je entalpie na konci stupně rovna stavu 2 a nikoliv 2'.

Jestliže jsou ostatní ztráty významné již za první lopatkovou řadou stupně, je nutné s nimi počítat i v i-s diagramu lopatkových mříží:



© 2015 Jiří Škorpík

7.947 Vliv ostatních ztrát na obvodovou práci stupně z_{ns} [$J \cdot kg^{-1}$] měrná ztráta netěsností na statoru. Jedná se o případ na Obrázku 5 ($a_r \approx 0 J \cdot kg^{-1}$), kdy hlavní proud je ovlivněn netěsnostmi statorové řady lopatek. Pracovní tekutina z ucpávek zvýší entalpii na vstupu do rotorové řady lopatek.

i-s diagram proudění v lopatkové mříži stupně závisí na konstrukci stupně. i-s diagramy axiálních a diagonálních stupňů jsou uvedeny v článcích 19. Návrh axiálních stupňů lopatkových strojů, 20. Návrh radiálních a diagonálních stupňů lopatkových strojů.

U lopatkových strojů bez skříně se do ztrát stupně zahrnují ztráty, které vznikají uvnitř objemu pracovní tekutiny, který je vymezen proudovou trubicí rotoru.

Účinnosti stupně

Podobně jako se rozlišují dvě práce stupně jsou definovány i dvě základní účinnosti stupně:

$$\eta_E = \frac{l_E}{e_0}; \quad e_0 = \underbrace{\kappa_0 \frac{c_0^2}{2}}_{(a)} + \Delta i_{iz} - \underbrace{\kappa_2 \frac{c_{2,iz}^2}{2}}_{(b)}; \quad \eta_i = \frac{a_i}{e_0}$$

8.876 *Obvodová a vnitřní účinnost turbínového stupně*

η_E [-] obvodová účinnost stupně bez ostatních ztrát stupně; e_0 [$J \cdot kg^{-1}$] měrná energie tekutiny přivedená do stupně; (a) [$J \cdot kg^{-1}$] část měrné kinetické energie vstupující pracovní látky, která je ve stupni využita⁽⁵⁾; (b) [$J \cdot kg^{-1}$] část měrné kinetické energie odpovídající výstupní rychlosti, která je využita v následujícím stupni⁽⁶⁾; η_{st} [-] **vnitřní (termodynamická) účinnost** stupně. Přibližně platí $c_{2,iz} = c_2$.

⁽⁵⁾*Poznámka*

Hodnota součinitele κ_0 je v intervalu 0 do 1. Obvykle je požadavek $\kappa_0 = 1$. Požadavek $\kappa_0 < 1$ je v případě, že se nezapočítávají ztráty mezi místem měření rychlosti c_0 (například konec předchozího stupně) a začátkem lopatkové mříže. Hodnota součinitele κ_0 tedy záleží na stanovení hranice stupně [1, s 182]. Například stupeň větrné turbíny přesněji jeho hranici může konstruktér definovat těsně před rotorem a ztráty vznikající vířením mezi vstupem do proudové trubice a vlastním rotorem eliminovat tím, že $\kappa_0 < 1$.

⁽⁶⁾*Poznámka*

Hodnota součinitele κ_2 je v intervalu 0 do 1. V případě vícestupňových lopatkových strojů je $\kappa_2 = 1$ (v těchto případech kinetická energie pracovní tekutiny na konci stupně není považována za ztrátu), přičemž pro poslední stupeň nebo jednostupňové stroje je požadavek $\kappa_2 = 0$.

U stupňů pracovních strojů se obvykle používá efektivní, respektive izoentropická účinnost stupně, které se vztahují ke statickému stavu pracovní tekutiny při izoentropickém ději:

$$\eta_E = \frac{\Delta i_{iz}}{l_E} = \eta_{ef}; \quad \eta_{iz} = \frac{\Delta i_{iz}}{a_i}; \quad \eta_{iz,c} = \frac{\Delta i_{iz,c}}{a_i}$$

9.356 *Efektivní účinnost stupně pracovního stroje a izoentropická účinnost stupně pracovního stroje*

η_{ef} [-] efektivní účinnost stupně (u kompresorových stupňů se místo výrazu obvodová používá výraz efektivní, do měrné obvodové práce se nazapočítávají ostatní ztráty); η_{iz} [-] izoentropická účinnost stupně; $\eta_{iz,c}$ [-] izoentropická účinnost stupně vzhledem k celkovým stavům za stupněm (obvykle není problém dodržet rovnost $c_2 = c_{2,iz}$, v tom případě $\eta_{iz,c} = \eta_{iz}$).

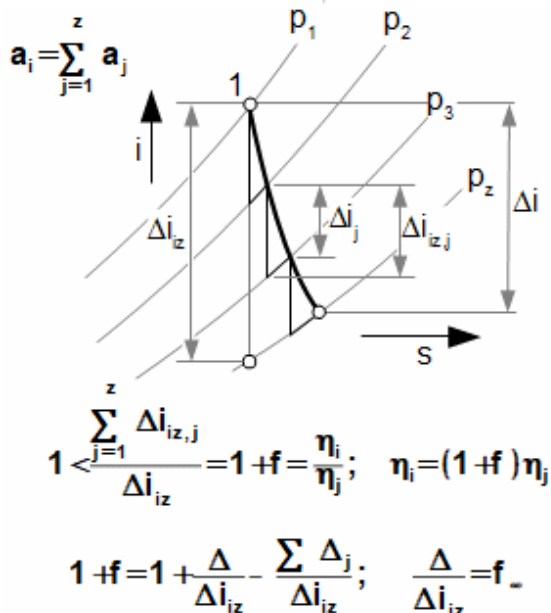
Izoentropický spád stupně parní turbíny je $21,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Rychlost páry na výstupu ze stupně je stejná jako rychlost páry na vstupu do tohoto stupně. Vypočítané profilové ztráty stupně jsou $3,3970 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (rotorová řada lopatek je geometrický stejná jako statorová řada lopatek). Vypočítaná vnitřní práce stupně je $16,0744 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Vypočítejte obvodovou účinnost stupně a vnitřní účinnost stupně. Jedná se o první stupeň vícestupňové parní turbíny. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 923.

Úloha 1.923

Účinnost skupiny stupňů

Výpočet účinností skupiny stupňů se vypočítá stejně jako jednoho stupně, s tím rozdílem, že se vychází ze stavů pracovní tekutiny před a za skupinou stupňů.

Typickou vlastností vnitřní účinnosti skupiny stupňů je, že je u turbín vyšší než průměrná vnitřní účinnost jednotlivých stupňů, u kompresorů je tomu naopak. Důvodem je teplo znovu využité u turbín, respektive přídavné ztráty u kompresorů:

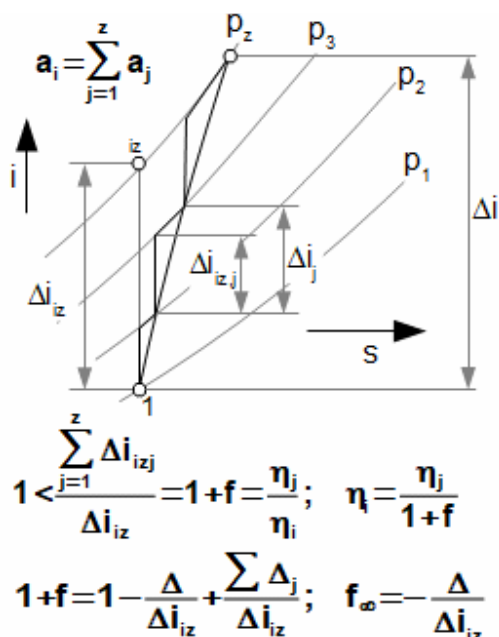


© 2009 Jiří Škorpič

10.116 *Vicestupňová adiabatická expanze v turbíně*
 η_j [-] střední vnitřní účinnost jednotlivých stupňů;
 $1+f$ [-] **součinitel zpětného využití ztrát** (tzv. reheat factor, 1,02 až 1,04 podle [3]); Δ [$J \cdot kg^{-1}$] teplo znovu využité turbíny; $1+f_\infty$ [-] reheat factor pro teoretický případ turbíny s nekonečně mnoha stupni;
 z [-] počet stupňů. Vnitřní účinnost stupňové části vícestupňových turbín například vicestupňových parních turbín η_i je vyšší, než je střední vnitřní účinnost jednotlivých stupňů η_j . Rovnice jsou odvozeny pro předpoklad, že všechny stupně zpracovávají stejný entalpický spád a pro adiabatickou expanzi. Pro lepší přehlednost není v obrázku zakreslena kinetická energie absolutní rychlosti c . Rovnice jsou odvozeny v *Příloze 116*.

Je tedy zřejmé, že část tepla ze ztrátových procesů v předchozím stupni se využije při expanzi v následujícím stupni. Teplo znovu využité se projeví i v rámci jednoho stupně, protože část ztrát statoru se využije v rotoru apod.

V případě vicestupňového turbokompresoru se výsledná komprese skládá z několika dílčích kompresí probíhajících jednotlivých stupních:



© 2009 Jiří Škorpič

11.121 *Vicestupňová adiabatická komprese v kompresoru*

$1+f$ [-] **součinitel přídavných ztrát** (preheat factor);
 Δ_j [-] přídavné ztráty jednoho stupně; $1+f_\infty$ [-] preheat factor pro teoretický případ turbokompresoru s nekonečně mnoha stupni. Vnitřní účinnost vícestupňového turbokompresoru je nižší, než je střední vnitřní účinnost jednotlivých stupňů. Rovnice jsou odvozeny pro předpoklad, že všechny stupně zpracovávají stejný entalpický spád a komprese je adiabatická. Pro přehlednost není v obrázku zakreslena kinetická energie absolutní rychlosti. Rovnice jsou odvozeny v *Příloze 121*.

- 14. Vztah mezi obvodovou a vnitřní prací stupně lopatkového stroje •

Je tedy zřejmé, že vnitřní ztráty ve stupni kompresoru zhoršují účinnost v následujícím stupni. Zdůrazňuji, že součinitel přídavných ztrát $I+f$ lze definovat pouze při adiabatické kompresi v rámci vyšetřované skupiny stupňů. Přídavné ztráty se projeví i v rámci jednoho stupně, protože ztráty rotoru zvyšují i ztráty statoru apod.

Turbokompresor nasává vzduch o teplotě $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $0,1013\text{ MPa}$, na výstupu z turbokompresoru má vzduch teplotu $293\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlak $0,802\text{ MPa}$. Určete práci a_i , a_{iz} , vnitřní účinnost η_i a přídavné ztráty.

Turbokompresor má 12 pracovních stupňů. Kompresi je nechlazená, respektive uvažujte adiabatickou kompresi. Řešení úlohy je uvedeno v Příloze 122.

Úloha 2.122

Úloha je převzata z [4].

Odkazy

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

Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Vztah mezi obvodovou a vnitřní prací stupně lopatkového stroje, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2018-02-26]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/14.html>. English version: Relation between shaft work and internal work of turbomachine stage. Web: http://www.transformacni-technologie.cz/en_14.html.