



12 Cvičení 12 - Věta o změně toku hybnosti

12.1 Galileova transformace

Galileova transformace je limitním případem skládání malých rychlostí v Eukleidovském prostoru. Malé je myšleno vůči rychlosti světla $c = 299\,792\,458$ m/s (přesně), což jsou prakticky všechny inženýrsky zajímavé rychlosti. Máme-li rychlost $\vec{u}$ v nějaké *základní* („nečárkované“) vztažné soustavě a potřebujeme tuto rychlost vyjádřit v nějaké „čárkované“ soustavě pohybující se vůči první rychlostí $\vec{v}$, tak rychlosti odečteme:

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v} \quad (1)$$

Pohodlné je, že tato transformace mění *pouze* rychlost. *Nemění* délky, intervaly ani hmotnosti.

Lorentzova transformace pro velké rychlosti

Pro úplnost doplníme, že bližší popis skutečnosti je skládání rychlostí skrze Lorentzovu transformaci, která pro malé rychlosti dává stejné výsledky jako transformace Galileova, avšak pro rychlosti $u \gtrsim 10^{-2}c$ je třeba použít Lorentzův faktor γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

V „čárkované“ vztažné soustavě se potom vzdálenosti a časové intervaly transformují jako

$$\Delta x' = \frac{1}{\gamma} \Delta x$$

(pro směr rovnoběžný s vektorem vzájemné rychlosti vztažných soustav)

$$\Delta t' = \frac{1}{\gamma} \Delta t$$

Rychlosti se transformují jako

$$u'_{||} = \frac{u_{||} - v}{1 - u_{||}v/c^2}$$

$$u'_{\perp} = \frac{1}{\gamma} \frac{u_{\perp}}{1 - u_{||}v/c^2}$$

kde $u_{||}$ a $u_{\perp}$ jsou složky rychlosti rovnoběžné nebo kolmé ke vzájemné rychlosti vztažných soustav v .

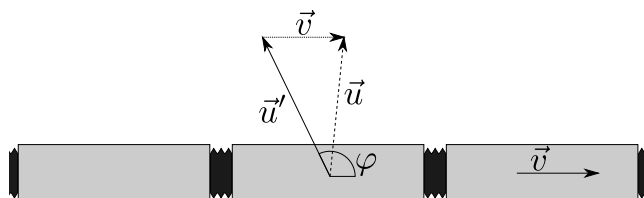
Bude-li $v \ll c$, tak $\gamma \rightarrow 1$ neboť $v^2/c^2 \rightarrow 0$ a obdobně i $u_{||}v/c^2 \rightarrow 0$, tak Lorentzova transformace konverguje ke Galileově:

$$u'_{||} = u_{||} - v \quad \text{a} \quad u'_{\perp} = u_{\perp}.$$

... Buďte rádi, že se turbíny pohybují celkem pomalu ...

12.1.1 (a) střelba z vlaku

Bandita stojí na střeše vlaku jedoucího rychlostí v a vystřelí na šerifa stojícího vedle kolejí. Banditův výstřel má velikost rychlosti u' a úhel φ vůči směru vlaku. Jakou rychlostí letí šíp v šerifově vztažné soustavě? Jaký je hraniční úhel výstřelu φ_c , pro který se rychlost vlivem pohybu vlaku zmenší/zvětší?



Obrázek 1: Výstřel ze střechy vlaku. Vztažná soustava vlaku je označena čárkou ($\cdot'$), vztažná soustava prerie je nečárkovaná.

12.1.2 Řešení (a)

Vektor výstřelu ve vztažné soustavě vlaku je

$$\vec{u}' = \begin{pmatrix} u' \cos \varphi \\ u' \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

Při transformaci do vztažné soustavy šerifa musíme *přičíst* rychlost vlaku. Případně bychom mohli uvažovat, že základní vztažná soustava je ta vlaková, a šerif spolu s celým nádražím, městečkem a prerií se pohybuje rychlostí $-\vec{v}$. Potom bychom tuto rychlost *odečítali* při transformaci do této vztažné soustavy. To, kterou soustavu si zvolíme jako výchozí, je věci preference, avšak výsledek na tom nezávisí

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v} = \begin{pmatrix} u \cos \varphi + v \\ u \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

Velikost v nečárkované vztažné soustavě je

$$|u| = \sqrt{(u \cos \varphi + v)^2 + u^2 \sin^2 \varphi} = \sqrt{u^2 \cos^2 \varphi + v^2 + 2uv \cos \varphi + u^2 \sin^2 \varphi} \quad (4)$$

využijeme vlastnosti, že $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$

$$\dots = \sqrt{u^2 + v^2 + 2uv \cos \varphi} \quad (5)$$

Všimněme si, že Galileova transformace *nezachovává* kinetickou energii – závisí na vztažné soustavě. Podívejme se na konkrétní zvláštní případy: je-li $\cos \varphi = \pm 1$ (výstřel po směru nebo proti směru jízdy), je

$$|u|_{\cos \varphi = \pm 1} = \sqrt{u^2 + v^2 \pm 2uv} = \sqrt{(u \pm v)^2} = u \pm v, \quad (6)$$

je-li $\cos \varphi = 0$, čili výstřel kolmo ke směru jízdy, velikost rychlosti se také zvětší

$$|u|_{\cos \varphi = 0} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

Úhel, pro který se velikost rychlosti nezmění, tedy musí ležet v oblasti výstřelu někde dozadu

$$|u| = \sqrt{u^2 + v^2 + 2uv \cos \varphi} = u \sqrt{1 + \left(\frac{v}{u}\right)^2 + 2\left(\frac{v}{u}\right) \cos \varphi} \quad (8)$$

$$1 + \left(\frac{v}{u}\right)^2 + 2\left(\frac{v}{u}\right) \cos \varphi_c = 1 \quad (9)$$

$$\cos \varphi_c = -\frac{1}{2} \frac{v}{u} \quad (10)$$

Všimněme si, že takový úhel neexistuje, je-li rychlost vlaku v větší než dvojnásobek rychlosti výstřelu $v > 2u$.



12.1.3 (b) výkop skrz tramvaj

Stojíte na zastávce s fotbalovým míčem a kolem Vás jede tramvaj KT8D5 rychlostí v se všemi dveřmi otevřenými a nehodlá zastavit (asi nějaká porucha, tak jede do vozovny). Jenže zrovna v tu chvíli si uvědomíte, že fotbalový míč musíte vrátit kamarádovi na druhé zastávce. Z předchozích pokusů na hřišti víte, že míč dokážete vykopnout rychlostí u . Otázka je, pod jakým úhlem, aby proletěl otevřenými dveřmi tramvaje bez zaškokbrnutí. Tramvaj má šířku T a dveře jsou od sebe v pravidelných vzdálenostech P po obou stranách.

12.1.4 Řešení (b)

Slabší povahy by počkaly, až tramvaj přejede, a pak by míč kamarádovi přinesly. To však nebude náš případ. Kdybychom vykopávali přímo z jedné otevřené dveří do nějakých protilehlých, stačilo by, aby poměr x -ové a y -ové rychlosti byl jako poměr šířky a celočíselného násobku vzdálenosti párů dveří:

$$\frac{u'_x}{u'_y} = \frac{nP}{T}, \quad (11)$$

kde n je celé číslo, přičemž $n = 0$ by znamenalo, že míříte přímo do protilehlých dveří, $n = +1$, že míříte do sousedních protilehlých dveří po směru jízdy, a $n = -1$, že míříte na sousední dveře proti směru jízdy. Jenže stojíte na zastávce a tramvaj jede rychlostí v , musíme to tedy řešit i s Galileovou transformací:

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v} \quad (12)$$

tedy

$$\frac{u_x - v}{u_y} = \frac{nP}{T}, \quad (13)$$

vyjádřeno pomocí velikosti u a směru α (vůči směru pohybu tramvaje x)

$$\frac{u \cos \alpha - v}{u \sin \alpha} = \frac{nP}{T} \quad (14)$$

Použití protilehlých dveří ($n = 0$), dává

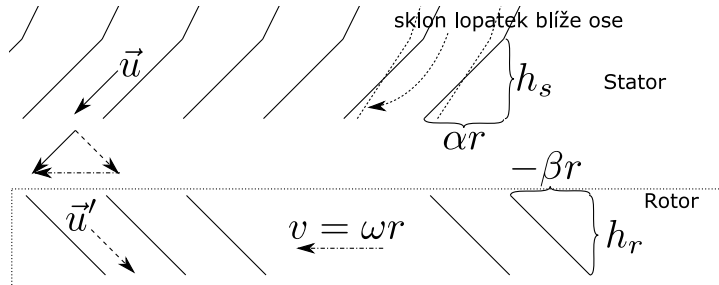
$$\frac{u \cos \alpha - v}{u \sin \alpha} = 0 \longrightarrow u \cos \alpha - v = 0 \longrightarrow \cos \alpha = \frac{v}{u} \quad (15)$$

Všimněme si, že řešení pro kop skrz protilehlé dveře neexistuje, pokud $v > u$. Zamyslete se, zda by řešení mohlo existovat, kdybychom vzali do úvahy i nějaké protilehlé dveře proti směru jízdy, $n \neq 0$.

12.1.5 (c) Průtoková rychlost ukázkového axiálního kompresoru bez zátěže

Na jednoduchém modelu kompresoru bez zátěže si můžete prohlédnout proudění při přechodu ze statorové vztažné soustavy to rotorové. Ostré zalomení je jen zdání, při použití Galileovy transformace se jedná o přímočarý pohyb.

Určete vztah mezi axiální rychlostí u_a (axiální = podél osy) a úhlovou rychlostí zařízení ω za předpokladu, že kapalina prochází pod ideálními úhly a beze ztrát. Lopatky jsou radiálně zkroucené desky, jejich stříh se škáluje se vzdáleností od osy stejně jako tečná rychlost $v = \omega r$. Zkroucení rozváděcího kola (statoru) označme α a oběžného kola (rotoru) β .



Obrázek 2: Schématické rozvinutí válcového řezu axiálním strojem.

12.1.6 Řešení (c)

Předpokládáme, že kapalina prochází státorem rovně podél lopatek (lopatky to nejsou, jen takové zkroucené desky), tedy poměr tečné složky rychlosti u_t a axiální (podél osy) složky rychlosti u_a musí být stejný jako podíl zkroucení rozváděcího kola (statoru) na příslušném poloměru αr a výšky statoru h_s

$$\frac{u_t}{u_a} = \frac{\alpha r}{h_s} \quad (16)$$

Alternativně bychom mohli pracovat s úhly; tento zlomek je tangentem úhlu rychlosti (myšleno vůči tečnému směru). Obdobně předpokládáme ideální průchod oběžným kolem:

$$\frac{u'_t}{u'_a} = \frac{-\beta r}{h_r} \quad (17)$$

Galileova transformace:

$$\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v} = \begin{pmatrix} u'_a = u_a \\ u'_t = u_t - \omega r \end{pmatrix} \quad (18)$$

Dosadíme do rovnice (17)

$$\frac{u_t - \omega r}{u_a} = \frac{-\beta r}{h_r} \quad (19)$$

Přičemž za první část zlomku (u_t/u_a) dosadíme z rovnice (16)

$$\frac{r\alpha}{h_s} - \frac{\omega r}{u_a} = -\frac{\beta r}{h_r} \quad (20)$$

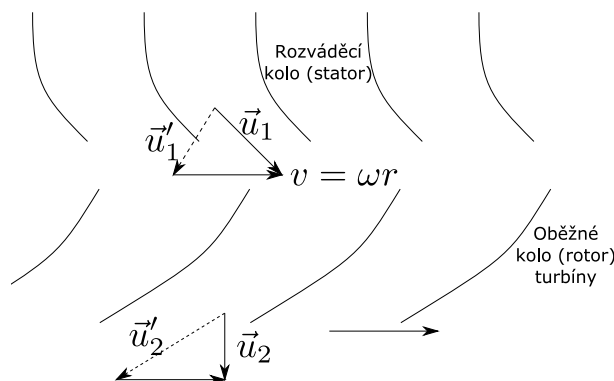
Zkrátíme r a vyjádříme u_a

$$u_a = \omega \frac{1}{\frac{\alpha}{h_s} + \frac{\beta}{h_r}} \quad (21)$$

Uvedené zařízení nekoná žádnou práci, neboť oběžné kolo nemění vektor rychlosti, tedy i změna toku hybnosti je nulová. V následujícím se podíváme na trochu realističtější případ.

12.2 Axiální turbína

Prohlédneme si obrázek 3 znázorňující válcový řez axiálním strojem. Proud přichází shora v ryze axiálním směru (dolů v obrázku), v rozváděcím kole je ohnut



Obrázek 3: Axiální turbína. Schématický náčrtek rozvinutého válcového řezu. Osa válce je svislá.

do směru otáčení (z leva doprava v obrázku). Rychlost v otáčející se vztažné soustavě je naznačena čárkovaně, $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$. Směru $\vec{u}'$ odpovídá sklon desek oběžného kola na vstupu. V oběžném kole se tekutina stočí proti otáčení (doleva v obrázku). Z principu Newtonova zákona síly to znamená, že opačným směrem (doprava) působí síla na lopatky tj. ve směru jejich pohybu (proto je to turbína: z pohybu tekutiny vyrábí pohyb stroje). Po transformaci nazpět do nerotující vztažné soustavy získáme rychlost $\vec{u}_2 = \vec{u}'_2 + \vec{v}$, která vychází v axiálním směru (čistě dolů). Takto je to ideální v jednostupňovém stroji – zbytková obvodová složka by nesla energii, která by mohla být využita.

Z Galileovy transformace vidíme, že axiální složka rychlosti se transformací nemění: $u'_{1a} = u_{1a}$ a $u'_{2a} = u_{2a}$. Jak je to s její velikostí během průchodu rotorem? $u_{1a} \stackrel{?}{=} u_{2a}$? To záleží na stlačitelnosti a na tom, zda tekutina prochází opravdu po válcové ploše (v reálném stroji to bývá spíš kužel). Tak či tak platí, že hmotnostní tok se zachovává $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$. Jako kontrolní objem zvolme jeden mezilopátkový kanál, skrz lopatky nic neteče (i když existují výzkumy na částečně propustných lopatkách), vstupní plocha je kolmá k ose, výstupní také.

$$\dot{m} = \rho \vec{u} \cdot \vec{S} = \rho u_a S_a \quad (22)$$

Je-li $\rho_1 = \rho_2$ (nestlačitelné), plocha $S_1 = 2\pi r \cdot dr$, čili, je-li proud ryze axiální, nemění se r a tedy ani S , potom $S_1 = S_2$. Z těchto úvah vyplývá, že $u_{1a} = u_{2a}$. Zároveň si všimněme, že kvůli zákonu zachování hmoty nemůžeme přeměnit *všechnu* kinetickou energii na práci stroje.

V případě stlačitelné tekutiny bude záviset na změně hustoty ρ ; obecně by měla klesat, neboť klesá tlak. Pokles statického tlaku je uhádnutelný z toho, že velikost čárkované rychlosti $|u'_2| < |u'_1|$ roste po proudě. Zajímá nás čárkovaná proto, že to je ta rychlost, o které ví tekutina. Ve stlačitelné tekutině lze tedy očekávat *nárůst* axiální složky rychlosti.

Teď bychom tušili, co se v turbíně v prvním přiblížení děje, zkusme tedy odhadnout výkon. Výkon elementární válcové slupky (té, jejíž řez je načrtnut na obrázku 3) o radiální tloušťce dr je

$$d\dot{W} = \omega r dF_t \quad (23)$$



kde (ωr) je obvodová rychlost na poloměru r a dF_t je element tečné složky síly

$$dF_t = N \cdot d\dot{m}_{\text{kanal}} \cdot (u_{1t} - u_{2t}) \quad (24)$$

kde N je počet lopatek a $d\dot{m}_{\text{kanal}}$ je

$$d\dot{m}_{\text{kanal}} = \rho_1 u_{1a} \frac{2\pi r}{N} dr \quad (25)$$

kde jsme zvolili hodnotu na vstupu (ale mohla by být i na výstupu, jsou stejné), $2\pi r$ je obvod kola a $2\pi r/N$ je úsek na jeden kanál. Už vidíme, že počet lopatek N se vykrátí

$$d\dot{W} = \omega r \rho_1 u_{1a} 2\pi r (u_{1t} - u_{2t}) dr \quad (26)$$

Pokud je *výška lopatky* $h = R_{\text{špička}} - R_{\text{pata}}$ výrazně menší než špičkový poloměr, můžeme integraci přeskočit a dr nahradit výškou lopatek h . Výraz můžeme zpřehlednit tak, že $\rho_1 u_{1a} (2\pi r) h = \dot{m}$ a obvodovou rychlostí ωr můžeme roznásobit závorku, čímž se výraz zobecní, neboť například v radiálním stroji bychom neměli jedno r ale různá r na vstupu a na výstupu. Zobecněný tvar tedy vypadá takto

$$\dot{W} = \dot{m} (v_1 u_{1||} - v_2 u_{2||}) = -\dot{m} \Delta (v u_{||}) \quad (27)$$

což je **Elerova turbínová věta**, $u_{||}$ značí, že se jedná složku rychlosti tekutiny rovnoběžnou s místní rychlostí v pohybu stroje.

Podívejme se, jaký tlakový spád turbína zpracovává. Použijeme Bernoulliovu rovnici, ale musíme si uvědomit, že při Galileově transformaci se nám proudnice „roztrhne“, musíme tedy vyšetřit spád na rozváděcím a oběžném kole zvlášť. Na rozváděcím:

$$\frac{1}{2} u_0^2 + \frac{p_0}{\rho} = \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} \quad (28)$$

$$(p_0 - p_1) = \frac{\rho}{2} (u_1^2 - u_0^2) = \frac{\rho}{2} (u_{1a}^2 + u_{1t}^2 - u_0^2) = \frac{\rho}{2} (u_0^2 + u_0^2 \cos^2 \alpha_1 - u_0^2) \quad (29)$$

Na oběžném kole nás zajímá ta velikost rychlosti, o které ví tekutina, tj. „čárkovaná“

$$(p_1 - p_2) = \frac{\rho}{2} (u_2'^2 - u_1'^2) = \frac{\rho}{2} (u_{2a}'^2 + u_{2t}'^2 - u_{1a}'^2 - u_{1t}'^2) \quad (30)$$

V čistě axiální stroji opět můžeme využít toho, že axiální složka rychlosti se nemění (necítí Galileovu transformaci & rovnice kontinuity) a tečnou můžeme vyjádřit jako velikost vstupní krát kosinus čárkovaného úhlu

$$\dots = \frac{\rho}{2} u_0^2 (\cos^2 \alpha_2' - \cos^2 \alpha_1') \quad (31)$$

Celkem s rovnicí (30)

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_r = \frac{\rho}{2} u_0^2 (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2' - \cos^2 \alpha_1') \quad (32)$$

Kosiny úhlů jsou vzájemně svázány skrze Galileovu transformaci:

$$\cos \alpha_1' = \cos \alpha_1 - \frac{\omega r}{u_0} \quad \text{a} \quad \cos \alpha_2' = \cos \alpha_2 - \frac{\omega r}{u} = -\frac{\omega r}{u_0} \quad (33)$$

Tudíž (32) přejde na

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} u_0^2 \left(\cos^2 \alpha_1 + \left(\frac{\omega r}{u_0} \right)^2 - \left(\cos \alpha_1 - \frac{\omega r}{u_0} \right)^2 \right) = \rho \omega r u_0 \cos \alpha_1 \quad (34)$$

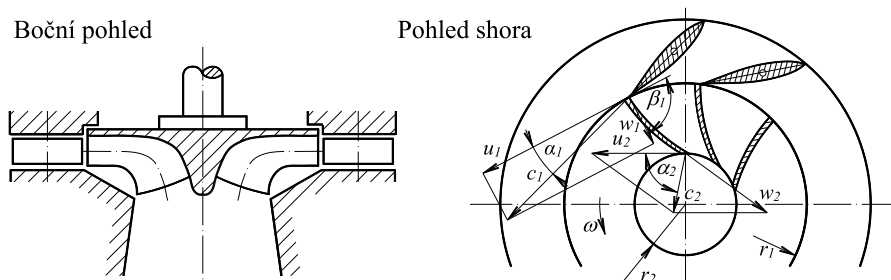


Úloha je většinou koncipována obráceně: máte k dipozici nějaký tlakový spád Δp , hmotnostní tok $\dot{m}$, máme zamčenou ω (kvůli síťové frekvenci nebo nějakému jinému stroji, který máme pohánět) a máme vymyslet průměr kola r , výšku lopatek h a úhly α_1 , α'_1 a α'_2 (vlastně jen jeden úhel, ostatní se dopočítají).

Navíc, pokud by výška lopatek byla větší než malá vůči poloměru kola, museli bychom rovnici (26) integrovat i s tím, že všechyn úhly by byly funkcí poloměru.

12.3 Výkon radiální turbíny (Francisovy)

Tento příklad je kompletně zkopírován ze skript pana profesora Jiřího Linharta, strana 105. Schválně ponechávám jeho značení, se kterým se lze setkat ve veškeré literatuře inspirované panem profesorem. Tj. rychlost v nepohybující se vztažné soustavě je značena $\vec{c}$, rychlost v pohybující se vztažné soustavě $\vec{w}$ a oběžná rychlost stroje u .



Obrázek 4: Nárys Francisovy vodní turbíny dle profesora Linharta, strana 105.

[začátek citace] Radiální turbína je rotační lopatkový stroj, který podle pracovního média je parní, vzduchový nebo vodní, např. Francisova vodní turbína zobrazená na obrázku 4. Voda prochází od obvodu ke středu. Proudí nejprve nehybným rozváděcím kolem, v němž je lopatkami usměrněna tak, aby ostříkovala oběžné kolo pod určitým úhlem α_1 . Absolutní vstupní rychlost c_1 se zde vektorově rozloží do obvodové rychlosti rotoru u_1 a do relativní rychlosti w_1 . U správně navržené turbíny a za poměrů uvažovaných ve výpočtu je rychlost w_1 tečnou ke vstupní části rotorové lopatky a má s ní tedy shodný úhel β_1 . Vlivem zužování mezilopatkového kanálu rotoru se proud uvnitř urychluje z w_1 na w_2 , když relativní rychlost w_2 je tečnou k výstupní části lopatky. Na výstupu z rotoru se w_2 vektorově sečte s u_2 na absolutní výstupní rychlost c_2 svírající s obvodovým směrem úhel α_2 .

Tekutina působí na lopatky rotoru silou, jejíž moment M lze vyjádřit dle věty o změně toku hybnosti jako rozdíl obvodové složky momentu toku hybnosti na vstupu a výstupu. Při průtočném množství $\dot{V}$ turbinou platí pro moment M

$$M = \rho \dot{V} c_1 \cos \alpha_1 r_1 - \rho \dot{V} c_2 \cos \alpha_2 r_2 = \rho \dot{V} (c_1 r_1 - c_2 r_2 \cos \alpha_2) \quad (35)$$

Pro teoretický výkon (tj. beze ztrát) na 1 kg/s protékající tekutiny P_{1t} platí

$$P_{1t} = \frac{M\omega}{\rho \dot{V}} = c_1 r_1 \omega \cos \alpha_1 - c_2 r_2 \omega \cos \alpha_2 = c_1 u_1 \cos \alpha_1 - c_2 u_2 \cos \alpha_2 \quad (36)$$

Rovnici pro P_{1t} lze upravit použitím kosinové věty na Eulerovu turbínovou větu

$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 c_1 \cos \alpha_1 \longrightarrow u_1 c_1 \cos \alpha_1 = \frac{1}{2} (u_1^2 + c_1^2 - w_1^2) \quad (37)$$



$$u_1 c_1 \cos \alpha_1 = \frac{1}{2} (u_1^2 + c_1^2 - w_1^2) \quad (38)$$

Dosazením (37) a (38) do (36) získáme

$$P_{1t} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \quad (39)$$

Podle Eulerovy turbínové věty je výkon turbíny pro 1 kg/s protékající tekutiny dán:

- poklesem kinetické energie rotující tekutiny
- poklesem absolutní kinetické energie proudu
- zvýšením relativní kinetické energie v mezilopatkových kanálech rotoru

Ztráty u rotačních strojů se respektují účinností $\eta = P/P_t < 1$, kde P je skutečný a P_t teoretický výkon turbíny. Tedy u řešené vodní turbíny bude při použití hydraulické účinnosti η_H skutečný jednotkový výkon

$$P_1 = \eta_H P_{1t} = \eta_H (c_1 u_1 \cos \alpha_1 - c_2 u_2 \cos \alpha_2). \quad (40)$$

12.4 Plynová turbína

Plynová ukázková turbína ET 792 pracuje dle Ericson-Braytonova cyklu: vzduch je stlačen kompresorem, zahřán ve spalovací komoře, pak částečně expanduje v turbíně, která pohání kompresor. Druhá část expanse je buď v trysce (režim proudového motoru letadla) nebo v další turbíně pohánějící generátor, což je režim, který nám laskavě ukáže Ing. Marek Klimko, Ph.D. Obrázek 5 ukazuje kontrolní panel a vysvětlivky jednotlivých indikátorů.

Úkoly: z ovládacího panelu si opište následující veličiny v důležitých bodech cyklu; neznámé dopočítejte (pozor na jednotky)

$$p_1 =$$

$$T_1 =$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{r T_1} =$$

Za výstupem z kompresoru a před spalovací komorou

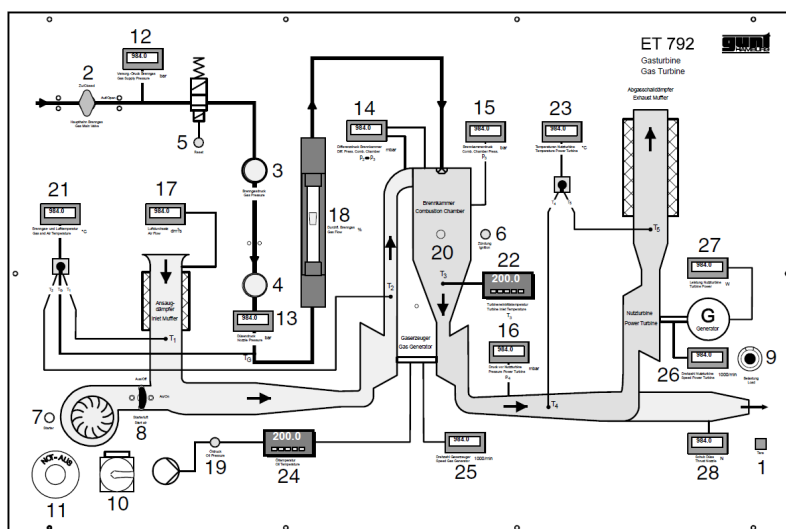
$$p_2 = p_3 - \Delta p_{23} =$$

$$T_2 =$$

$$\rho_2 =$$

Za spalovací komorou a před první turbínou

$$p_3 =$$



1	Tah proudového TKM	15	Tlak před turbínou
2	Hlavní palivový ventil	16	Tlak před výkonovou turbínou
3	Regulátor tlaku paliva	17	Vstupní průtok vzduchu
4	Regulátor průtoku paliva	18	Průtok paliva
5	Rychlouzavírací ventil	19	Indikátor tlaku oleje
6	Tlačítko zapalování	20	Indikátor zapalovacího systému
7	Tlačítko spuštění ventilátoru	21	Vstupní teplota vzduchu, paliva a vzduchu před kompresorem
8	Přepínač klapky nasávaného vzduchu	22	Teplota na vstupu do turbíny
9	Potenciometr zátěže	23	Teplota na vstupu a výstupu z výkonové turbíny
10	Hlavní vypínač	24	Teplota oleje
11	Tlačítko nouzového zastavení	25	Otáčky turbokompresoru
12	Tlak přivedeného paliva	26	Otáčky výkonové turbíny
13	Tlak paliva palivové trysky	27	Výkon generátoru
14	Diferenční snímač teploty spalovací komory	28	Indikátor tahu

Obrázek 5: Ovládací panel plynové turbíny ET 792. Ukradnuto Marku Klimkovi home.zcu.cz/~klimko/.



$$T_3 =$$

$$\rho_3 =$$

Za první turbínou a před druhou turbínou

$$p_4 =$$

$$T_4 =$$

$$\rho_4 =$$

Výfuk

$$p_5 =$$

$$T_5 =$$

$$\rho_5 =$$

Vypočítejte změnu entalpie na kompresoru a na první turbíně

$$h_{12} = c_p \Delta T_{12} = \frac{\kappa r \Delta T_{12}}{\kappa - 1} =$$

$$h_{34} =$$

Jsou stejné nebo je některá větší? Šla by z toho vypočítat účinnost páru turbína-kompresor?

$$\eta_{TK} \approx$$

Přístroj ukazuje i absolutní výkon druhé turbíny. Použijte ho spolu s informací o objemovém průtoku k výpočtu měrné práce druhé turbíny a porovnejte se změnou entalpie. Opět zkuste odhadnout účinnost páru turbína-generátor.

$$\dot{W} =$$

$$\dot{V}_1 =$$

$$a_t = \frac{\dot{W}}{\dot{V}_1} \rho_1 =$$

$$h_{45} =$$

$$\eta_{TG} \approx$$



12.5 Úkoly na Vánoce

- Podívejte se na video s ukázkovým axiálním kompresorem bez zátěže: <https://youtu.be/DHj101R265M> Video má necelých 5 minut.
- Velmi inspirativní je video https://youtu.be/yCsgoLc_fzI. Je anglicky a trochu delší. Ukazuje zařízení poháněné větrem, které je rychlejší než vítr, který ho pohání. A jako bonus ukazuje kolegu vědce, který se spletl. A musím přiznat, že já bych se v této otázce také spletl.

12.6 Otázky k zamyšlení

- Bylo by lepší otáčet s turbínami vyšší rychlostí? Co bychom získali a co by bylo komplikovanější?
- Podívejte se na obrázek 3. Jak se mění průřez mezilopatkového kanálu? Co to udělá s průtočnou rychlostí?
- Je výhodnější průřez mezilopatkového kanálu zvětšovat nebo zmenšovat? V jaké situaci se to překlápí?
- Zavzpomínejte, jaký je postup výpočtu Ericson-Braytonova cyklu.

Přeji úspěšné zdolání všech zkoušek a zápočtů a krásné Vánoce!

12.7 Poděkování

Děkuji za podporu při vytváření těchto podkladů projektu ESF II číslo CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239.