VENTILÁTORY

– strana 3 – **Základní vlastnosti ventilátorů**

• **Úloha 262:** Výpočet rozměrů rotoru radiálního ventilátoru pomocí teorie podobnosti • **Úloha 1030:** Výpočet stupně reakce ventilátoru • **Úloha 275:** Optimalizace tvaru respiračního ventilátoru podle zadaných požadavků

– strana 4 – **Axiální ventilátory**

• **Úloha 330:** Výpočet profilových ztrát profilové mříže ventilátoru • **Úloha 388:** Výpočet rozměrů lopatkové mříže rotoru axiálního ventilátoru

– strana 6 – **Radiální ventilátory**

• **Úloha 584:** Výpočet síly působící na lopatku radiálního ventilátoru • **Úloha 282:** Výpočet rozměrů spirálního hrdla ventilátoru s radiálními dopředu zahnutými lopatkami • **Úloha 264:** Výpočet rozměrů spirálního hrdla rovnotlakového radiálního ventilátoru • **Úloha 274:** Výpočet souřadnic střední čáry radiální dozadu zahnuté lopatky • **Úloha 755:** Výpočet souřadnic střední čáry radiální dopředu zahnuté lopatky

– strana 7 – **Energetická rovnováha ventilátoru**

– strana 8 – **Provozní charakteristiky ventilátorů**

• **Úloha 721:** Výpočet provozní charakteristiky ventilátoru

– strana 8 – **Regulace ventilátorů**

– strana 10 – **Odkazy**

– strany 11-14 – **Přílohy**

– **autor:** – ŠKORPÍK, Jiří (LinkedIn.com/in/jiri-skorpik)

– **datum vydání:** – Září 2022

– **název:** – Ventilátory

– **sborník:** – *transformacni-technologie.cz/index.html#**lopatkove-stroje***

– **provenience:** – Brno (Česká republika)

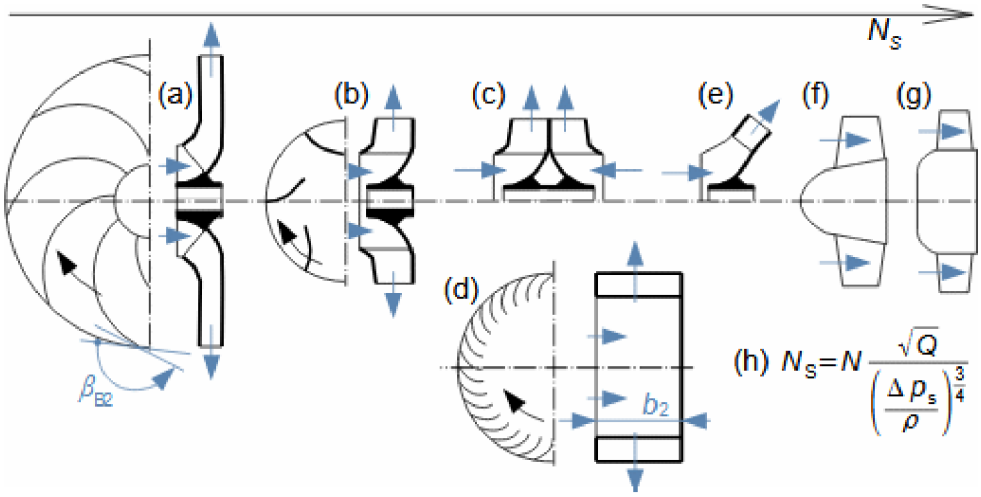
– **email:** – skorpik.jiri@email.cz

Copyright©Jiří Škorpík, 2022
Všechna práva vyhrazena.

Základní vlastnosti ventilátorů

*Ventilátory se vyrábí v širokém spektru provedení, viz rozdělení ventilátorů podle měrných otáček na **Obrázku 375**. To je dáno různorodostí aplikací a požadavků od jednoduchých větráků až po složité průmyslové ventilátory s natáčivými lopatkami. Obecně ventilátory zabezpečují proudění pracovního plynu, nejčastěji vzduchu, v prostředí bez požadavku na jeho stlačení, takže ve ventilátorech dochází jen k malému zvýšení celkových tlaků.*

– **375:** –



(a) radiální vysokotlaký (dozadu zahnuté lopatky); (b) radiální středotlaký; (c) radiální středotlaký oboustranně sací; (d) rotor radiálního nízkotlaký ventilátoru s dopředu zahnutými lopatkami; (e) diagonální; (f) axiální rovnotlaký; (g) axiální přetlakový; (h) obvyklý tvar vzorce pro stanovení měrných otáček ventilátorů. b_2 [m] šířka rotoru na výstupu; β_{B2} [°] úhel střední čáry profilu na výstupu; N_S [min^{-1}] měrné otáčky; Q [m^3·s^{-1}] průtok stupněm/celým ventilátorem; Δp_s [Pa] změna celkového tlaku pracovního plynu při průtoku stupněm/celým ventilátorem (protože ventilátory bývají jednostupňové vztahují se často měrné otáčky na zvýšení celkového tlaku v celém ventilátoru); ρ [kg·m^{-3}] hustota pracovního plynu. Rozsah obvyklých hodnot měrných otáček pro jednotlivé tvary rotorů jsou uvedeny např. [Nový, 2007, s. 18]. Odvození vzorce je uvedeno v **Příloze 375**.

Příklad aplikací ventilátorů

Na druhou stranu pracovní prostředí může být velmi různorodé, od ventilátorů zajišťujících výměnu vzduchu v místnostech či oděvech (respirační ventilátory) po spalinové ventilátory odsávající spaliny o teplotách přesahujících 100 °C z kotlů. Speciální skupinou jsou tunelové ventilátory, které zajišťují přirozenou výměnu vzduchu v daném prostoru při standardní teplotě a při požáru musí zajistit i odsávání velmi horkých spalin z tohoto prostoru (například při haváriích v tunelech, kde teplota odsávaných spalin je i více jak 400 °C). Některé typy ventilátorů jsou určeny do agresivních prostředí s častým poškozením lopatek abrazí, korozí a nánosy.

Chlazení motoru ventilátoru

U větších ventilátorů bývá ve výtlaku odběr vzduchu pro chlazení elektromotoru ventilátoru.

Axiální ventilátory

*Axiální typy ventilátorů (viz **Obrázek 375**f-g (s. 3)) bývají v provedení se statorovými lopatkami i bez statorových lopatek – v takovém případě je nutné počítat na výtoku z ventilátoru s vírem, tj. jedná se o vírový stroj, viz **Obrázek 646**vlevo. Axiální ventilátory se statorovými lopatkami se používájí v případech požadavku na větší zvýšení statického tlaku. Statický tlak lze zvašovat i u ventilátorů bez statoru pomocí difuzoru připojeného na výtoku. Výkonější ventilátory bez natáčivých rorotorvých lopatek mohou být vybaveny i regulačními předřazenými lopatkami.*

– **646:** – *Příklady axiálních ventilátorů*

vlevo-malý axiální ventilátor (průměr 200 mm) ve skříni vyrobené ze slitiny hliníku, výrobce ebm-papst group; vpravo-axiální ventilátor s radiálním vstupem, s natáčivými rotorovými lopatkami (zkroucené lopatky) výrobce ZVVZ MACHINERY, a.s..

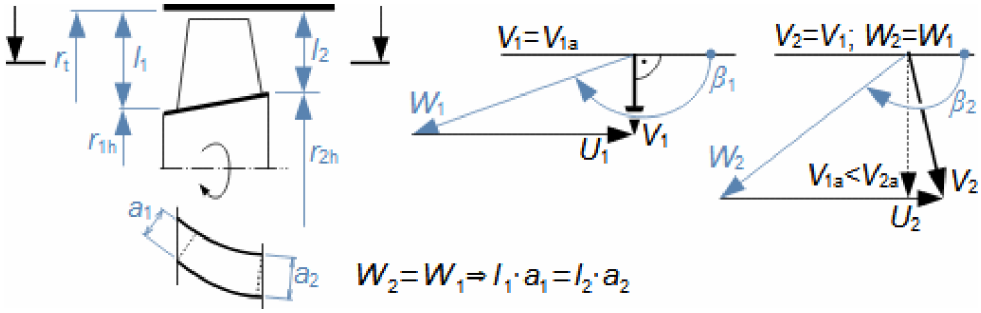
Optimální hodnoty podobnostních součinitelů axiálních ventilátorů

Optimální hodnoty tlakového a průtokového součinitele axiálních stupňů jsou ψ_{opt}=0,4 a ϕ_{opt}=0,35 (podle definičního Vzorce 4a v článku Využití podobností lopatkových strojů při návrhu lopatkového stroje) při poměru r_h/r_t=0,6 (v případě rovnotlakového ventilátoru se jedná o poloměr r_{h2}) – údaje podle [Čermák et al., 1974, s. 75]. Aerodynamický výpočet lopatkové mříže ventilátoru je proveden v článku Aerodynamika profilových mříží.

Princip rovnotlakových axiálních ventilátorů

Ventilátory s velmi malým stupněm reakce se používájí v případech, kdy jde o to zvýšit kinetickou energie plynu a nikoliv jeho tlak – v podstatě se jedná o rovnotlakové ventilátory. Rovnotlakové ventilátory mívají kratší lopatky v poměru k průměru rotor, aby byl rozdíl ve stupni reakce mezi patou a špicí co nejmenší. Často jsou lopatky přímé. Na **Obrázku 645** (s. 5) je typická konstrukce rovnotlakového ventilátoru ovšem s difuzorovou profilovou mříží. Tím se snižuje prohnutí střední čáry profilu lopatek a tedy i náchylnost na ztrátu odtržením mezní vrstvy od profilu. Zvyšující se průtočný průřez difuzorové lopatkové mříže je v tomto případě kompenzován větším patním poloměrem lopatky r_2, než je patní poloměr r_1 tak, aby na vstupu a výstupu byl průtočný průřez stále stejný.

– **645:** –

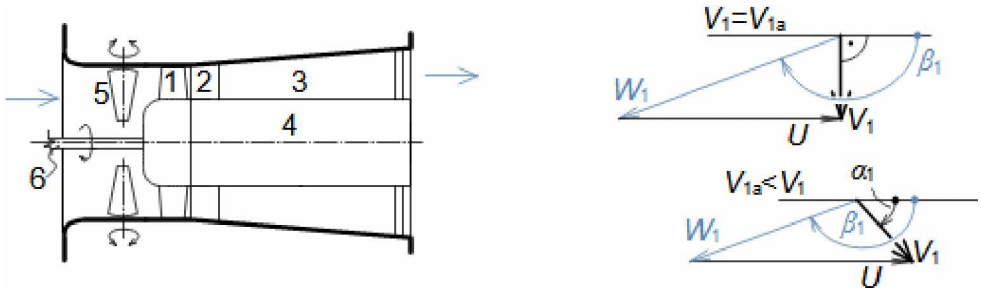


a [m] šířka lopatkového kanálu; *l* [m] délka lopatky; *r* [m] poloměr. Index $_h$ označuje patu lopatky (hub), index $_t$ označuje špici lopatky (tip).

Princip předřazených lopatek pro regulaci nátokových úhlů

Pokud ventilátor obsahuje předřazené lopatky, pak se jedná o lopatky se symetrickým nezakřiveným profilem (tzv. základní profil) pro zajištění optimálního nátokového úhlu a tedy účinnosti, viz **Obrázek 644**. Ovládání předřazených lopatek je nejčastěji po obvodu ventilátoru, ale existují i možnosti umístit ovládaní v ose ventilátoru.

– **644:** –



(a) rychlostní trojúhelník při jmenovitém průtoku, kdy jsou předřazené lopatky natočeny do axiálního směru; (b) rychlostní trojúhelník při sníženém průtoku a natočení lopatek tak, aby byl dodržen optimální nátokový úhel a ztráta nesprávným nátokovým úhlem co nejmenší – úhel β_1 zůstává přibližně konstantní. 1-rotorové lopatky; 2-statorové lopatky; 3-bezlopatkový difuzor; 4-jádro difuzoru; 5-předřazené lopatky; 6-hnací hřídel. *U* [m·s^{-1}] obvodová rychlost; *V* [m·s^{-1}] absolutní rychlost; *W* [m·s^{-1}] realtivní rychlost; α_1 [°] úhel absolutní rychlosti na vstupu do rotoru; β_1 [°] úhel relativní rychlosti na vstupu do rotoru při nátáčení rotorových lopatek; Index $_1$ označuje stav před rotorem, index $_2$ za rotorem, index a axiální směr.

Konstrukce lopatek

Nejednoduší lopatky axiálních ventilátorů jsou z plechu se zaoblenými hranami, ty složitější mají klasický obvykle málo prohnutý profil, takže lze vycházet ze základních profilů. Lopatky se k rotoru, který bývá prstencové konstrukce v jehož středu je pohon, přivařují, nýtují nebo šroubují.

Radiální ventilátory

Radiální ventilátory se podle požadavku vyrábí s dozadu zahnutými, radiálními a s lopatkami dopředu zahnutými obvykle bez starových lopatek. Ventilátory s dozadu zahnutými lopatkami dosahují nejvyšších hydraulických účinností, rotory s radiálními lopatkami mají nejvyšší poměr zvýšení statického tlaku v rotoru ku celkovému tlaku a rotory s dopředu zahnutými lopatkami jsou rovnotlakové ale i s nejnižšší hydraulickou účinností.

Optimální hodnoty podobnostních součinitelů radiálních ventilátorů

Přetlakové radiální ventilátory mývají stupně reakce nad 0,5. Pouze nízkotlaké s dopředu zahnutými lopatkami (**Obrázek 375**d (s. 3)) jsou konstruovány s velmi nízkým stupněm reakce, viz úloha na výpočet stupně reakce v článku Základní rovnice lopatkových strojů. Optimální hodnoty tlakových a průtokových součinitelů jednotlivých typů radiálních stupňů ventilátorů lze vyčíst z Obrázku 1056 v článku Využití podobností lopatkových strojů při návrhu lopatkového stroje, ve kterém je i výpočet rotoru s dopředu zahnutými lopatkami.

Radiální ventilátory se spirálním hrdlem i bez něj

Radiální ventilátory bývají obvykle opatřeny spirálním hrdlem a bezlopatkovým statorem pro lepší regulaci, radiální statorové lopatky se používají pouze zřídka a v odůvodněných případech. Radiální ventilátory bez spirálního hrdla se používají v provedení čistě radiálního výstupu $\beta_{B2}=90°$ a to proto, že takové lopatkování má nejmenší podíl mezi kinetickou energií obvodové složky rychlosti k práci ventilátoru. To znamená, že i podíl zmařené energie v obvodvém směru bude nejmenší. Takové ventilátory se například používají k chlazení elektromotorů.

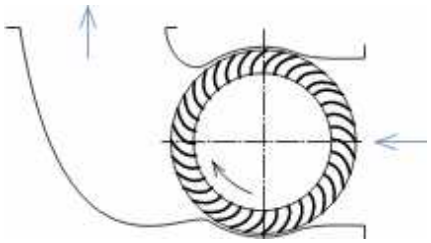
Lopatky radiálních ventilátorů

Lopatky radiálních ventilátorů jsou obvykle stálé tloušťky, pouze mají zaoblenou nátokovou i odtokovou hranu. Kapkovitý tvar lopatek by měl v těchto případech jen malé přínosy. Lopatky jsou k disku připevněny lemem, připájené nebo přivařené, případně je celý rotor jako odlitek.

Diametrální ventilátor s dopředu zahnutými lopatkami

Rotory s dopředu zahnutými lopatkami jsou také používané u diametrálních ventilátorů, viz **Obrázek 287** (s. 7). Pro diametrální ventilátory je typický velmi vysoký poměr šířky kola b_2 k jeho průměru a saním na protilehlé straně skříně. Tedy sání není středem kola. Aby vzniklo na jedené straně kola dostředivé a druhé odstředivé proudění je nutné, aby na straně sání byl vyšší tlak než na straně výstupu. Toho lze dosáhnou speciálním tvarem skříně s kolenem, kde na straně sání je větší průtočný průřez než na straně výstupu, jak je nakresleno na přiloženém obrázku. Nerovnovážné tlakové pole po obvodu rotoru lze také dosáhnout vhodně vloženým vnitřním tělesem, viz [Čermák, 1974, s. 134].

– **287:** –



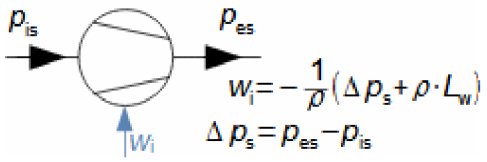
Energetická rovnováha ventilátoru

Ventilátory jsou stroje, které zajišťují nucené proudění plynů (překonání tlakových ztrát) s malým zvýšením tlaku. Při výpočtu vnitřní práce ventilátorů se často zavádí předpoklad nestlačitelného proudění ρ≈konst. s konstatní teplotou t≈konst. bez významné změny potenciální energie, takže k odvození potřebných rovnic postačí Bernoulliho rovnice.

Vnitřní práce jako funkce zvýšení celkového tlaku

Práce dodávaná proudícímu plynu se transformuje na tlakovou a kinetickou energii. Hlavním parametrem ventilátoru je zvyšení celkového tlaku pracovního plynu Δp_s, což je veličina, která zohledňuje zvýšení tlaku i rychlosti, proto se vzorec pro vnitřní práci ventilátoru uvadí ve tvaru, kde jedna z proměnných je zvýšení celkového tlaku, viz **Vzorec 309** pro vnitřní práci ventilátoru.

– **309:** –



L_w [J·kg^{-1}] vnitřní ztráty při průchodu ventilátorem; w_i [J·kg^{-1}] vnitřní práce ventilátoru. Index $_i$ označuje vstup, index $_e$ označuje výstup. Rovnice je odvozena pro nevýznamný vliv změn potenciální energie a hustoty v **Příloze 309**.

Vnitřní účinnost a vnitřní příkon ventilátoru

Při výpočtu vnitřní (hydraulické) účinnosti η_i se vychází z toho, že ideální vnitřní práce ventilátoru w_{id} je rovna zvýšení celkové tlakové energie ve ventilátoru, protože vliv gravitačního zrychlení je nevýznamný. Odtud lze získat praktický vzorec pro stanovení potřebného vnitřního příkonu ventilátoru jako funkce objemového průtoku a vnitřní účinnosti, viz **Vzorec 581**.

– **581:** –

$$\eta_i = \frac{\Delta p_s}{\Delta p_s + \rho \cdot L_w}; \quad P_i = \underbrace{\frac{1}{\rho}\frac{\Delta p_s}{\eta_i}}_{w_i}\underbrace{\rho \cdot Q}_{\dot{m}} = Q\frac{\Delta p_s}{\eta_i}$$

η_i [1] vnitřní účinnost ventilátoru; m [kg·s^{-1}] hmotnostní průtok ventilátorem; P_i [W] vnitřní příkon ventilátoru; Q [m^3·s^{-1}] průtok ventilátorem.

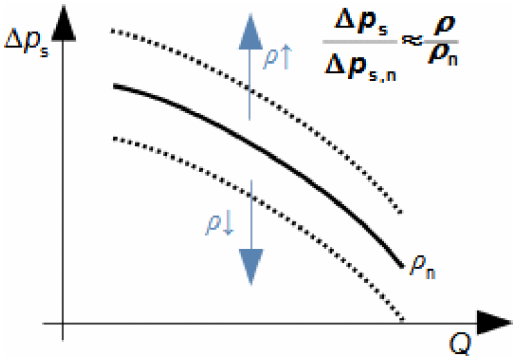
Provozní charakteristiky ventilátorů

Ventilátory jsou hydraulické pracovní stroje jako turbočerpadla a proto jejich charakteristiky jsou založeny na stejných principech, viz článek Turbočerpadla. Hlavní rozdíl je v tom, že až na výjimky se provozní charakteristiky ventilátorů uvádí jako závislost zvýšení celkového tlaku na průtoku Δp_s-Q

Vliv změny hustoty na provozní charakteristiku

Charakteristika ventilátoru se počítá nebo měří pro konkrétní pracovní plyn a jeho teplotu. Při změně teploty se ale významně změní hustota a tedy i provozní charakteristika ventilátoru, a to tak, že při snížené hustotě pracovního plynu a při stejném průtoku je zvýšení celkového tlaku Δp_s menší a naopak. Toto snížení je dáno tím, že při stejném objemovém toku Q a stejných otáčkách zůstává zachován i rychlostní trojúhelník a tedy i Eulerova práce ventilátoru w_E, respektive vnitřní práce ventilátoru w_i. Provozní charakteristiku ventilátorů a čerpadel lze přepočítat pro změnu hustoty podle jednoduchého **Vzorce 926**.

– **926:** –



$$\frac{\Delta p_s}{\Delta p_{s,n}} \approx \frac{\rho}{\rho_n}$$

Index $_n$ označuje parametry při jmenovitém stavu. Rovnice je odvozena při vynechání vlivu změny velikosti ztrát a pro konstantní otáčky v **Příloze 926**.

Změny teplot u tunelových ventilátorů

K velkým změnám hustot dochází především u spalinových a tunelových ventilátorů, kde může být rozdíl teplot při práci za studena a za tepla i několik set stupňů celsia, což odpovídá změnám hustoty vzduchu o několik desítek procent.

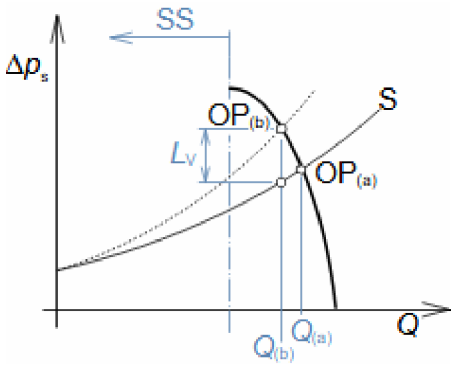
Regulace ventilátorů

*Možnosti jak regulovat ventilátory jsou také velmi podobné možnostem regulací turbočerpadel. Parametry ventilátorů lze regulovat **škrcením** na sání nebo výtlaku, **otáčkami** nebo pomocí **nátačení lopatek**.*

Při regulaci ventilátoru škrcením se mění charakteristika potrubního systému

Regulace škrcením je nejjednoduší a nejrozšířenější způsob regulace ventilátorů. Škrtící orgán může být na výtlaku i sání – je nutné přihlédnout k vlivu netěsnosti škrtící klapky, protože na saní hrozí nasátí okolního vzduchu přes netěsnosti, a na výtlaku naopak únik pracovního plynu do okolí ventilátoru. Nevýhodou regulace škrcením je, že charakteristika ventilátoru je stejná a mění se charakteristika potrubního systému, respektive se škrcením maří část celkového tlaku, viz **Obrázek 365** (s. 9).

– **365:** –

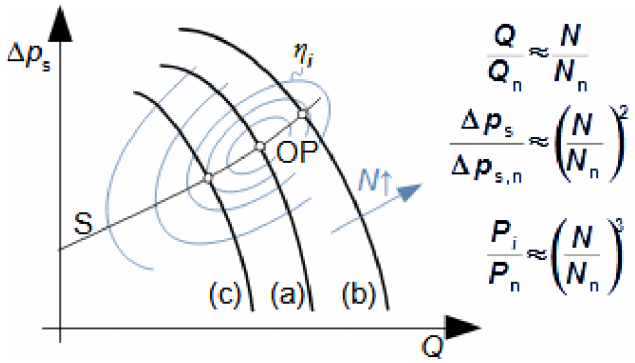


(a) pracovní bod při plně otevřené škrtící klapce; (b) částečně zavřená škrtící klapka. OP-pracovní bod ventilátoru (operating point); SS-labilní oblast ventilátoru (system surge); S-charakteristika potrubního systému. L_V [Pa] tlaková ztráta způsobená šktící klapkou.

Při regulaci ventilátoru změnou otáček se mění jeho provozní charakteristika

Regulace ventilátorů změnou otáček se velmi rozšiřuje díky snižovaní ceny frekvenčních měničů elektromotorů. Používá se v širokém výkonovém rozmezí podle potřeb dané aplikace. Změnu otáček lze docílit i použitím několika průměrů řemenic na hřídeli rotoru, které se mohou například sezóně přepojovat ručně. V obou případech je ale nutné, počítat s výraznými změnami příkonu motoru podle **Rovnic 1017** – tyto rovnice se v angličtině označují jako Affinity laws. Nicméně výkonové změny motoru mohou mít negatvní vliv na jeho životnost a zahřívání během provozu.

– **1017:** –

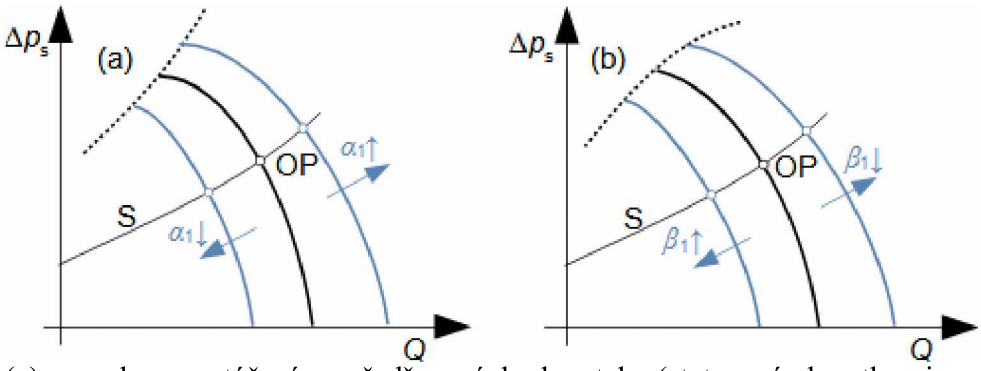


Rovnice pro přibližný přepočet charakteristiky ventilátoru nebo čerpadla při změně otáček: (a), (b), (c) změna charakteristiky při změně otáček, přičemž (a) je charakteritika při jmenovitých otáčkách, charakteristika (b) je při otáčkách vyšších než jmenovitých a charakteristika (c) při otáčkách nižších než jmenovitých. Rovnice jsou odvozeny při vynechání vlivu změn velikosti ztrát a pro konstantní hustotu pracovního plynu v **Příloze 1017**.

Při regulaci ventilátoru natáčením lopatek se mění jeho provozní charakteristika

Regulace natáčením lopatek se provádí u ventilátorů s vysokým příkonem, u kterých je problematická změna frekvence pohonu. Regulace se provádí natáčením předřazených statorových (**Obrázek 366**a (s. 10)), nebo v případě axiálních strojů i rotorových lopatek (**Obrázek 366**b (s. 10)). Mechanismus nátáčení lopatek je velký zásah do konstrukce stroje, který zvyšuje náklady na pořízení. Nákladnější je i řídící systém.

– **366:** –



(a) regulace natáčením předřazených lopatek (statorové lopatky jsou předřazeny v sání ventilátoru, viz také **Obrázek 644**b (s. 5)); (b) regulace natáčením rotorových lopatek.

Odkazy

ŠKORPÍK, Jiří, 2024, Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny a její výpočet, *Transformační technologie*, Brno, transformacni-technologie.cz/vznik-tlakove-ztraty-pri-proudeni-tekutiny-a-jeji-vypocet.html.

BLEIER, Frank, 1997, *Fan handbook, selection, aplication, and design*, The McGraw Hill companies, ISBN 0-07-005933-0.

ČERMÁK, Jan, HELLER, Václav, NOVOTNÝ, Slavomil, PITTER, Jaroslav, SEDLÁČEK, František, ŠAVRDA, Miloš, 1974, *Ventilátory*, SNTL-Nakladatelství technické literatury, n.p., Praha.

NOVÝ, Richard, 2007, *Ventilátory*, České vysoké učení technické v Praze, Praha, ISBN 978-80-01-03758-4.