

## Obsah

1. Úvod	5
2. Ventilátory, Stanovování P-Q charakteristik	6
2.1. Ventilátory	6
2.1.1. Důležité zákony, vztahy a pojmy	6
2.1.1.1. Zákon pohybu vzduchu	7
2.1.2. Rozdělení ventilátorů	8
2.1.2.1. Podle směru průtoku vzduchu	9
2.1.2.2. Podle velikosti celkového tlaku	12
2.1.2.3. Podle pohonu	12
2.1.2.4. Podle Použití	12
2.2. P-Q charakteristiky ventilátorů	12
2.2.1. Charakteristika	14
2.2.1.1. Charakteristika ventilátoru	14
2.2.1.2. Charakteristika sítě vzduchovodů	17
2.2.1.3. Řazení ventilátorů a jejich charakteristika	19
2.2.2. Regulace ventilátorů	20
2.2.2.1. Metoda regulace škrcením	20
2.2.2.2. Metoda regulace natáčením lopatek	21
2.2.2.3. Metoda změnou otáček	21
2.2.3. Návrh ventilátoru	22
3. Konstrukční návrh tratě	23
3.1. Požadavky na trať dle normy ČSN 12 3061	23
3.1.1. Měřením zjistíme	23
3.1.2. Měřené veličiny	23
3.1.3. Přesnost měření veličin	24
3.1.4. Zjištění základních veličin – měřicí přístroje a zařízení	24
3.1.4.1. Měření otáček ventilátoru	24
3.1.4.2. Statický tlak vzdušiny	24
3.1.4.3. Měření objemového průtoku	25
3.1.4.4. Měření příkonu elektromotoru	25
3.1.5. Zjišťování vzduchotechnických veličin určující ventilátor	25
3.1.5.1. Objemový průtok vzdušiny ventilátoru	25
3.1.5.2. Přímé stanovení střední rychlosti proudění vzdušiny	26
3.1.5.3. Střední celkový tlak při osovém proudění	26
3.1.5.4. Celkový tlak ventilátoru	26
3.1.5.5. Pohon elektromotorem	27
3.1.5.6. Příkon elektromotoru	27
3.1.5.7. Výkon elektromotoru	28
3.1.5.8. Křivky účinnosti	28
3.1.5.9. Účinnost ventilátoru	28
3.1.5.10. Charakteristické křivky ventilátoru	29
3.1.5.11. Výkonové charakteristiky	30
3.1.5.12. Bezrozměrné charakteristiky	30
3.1.5.13. Požadované přesnosti měření na zkušebně	31

3.1.5.14. Měřicí trať na výtlaku ventilátoru	31
3.1.5.15. Zpráva o měření	31
3.2. Konstrukční návrh dle volby ventilátoru	33
3.2.1. Výběr axiálních a radiálních ventilátorů z katalogu výrobce	33
3.2.2. Potrubí vzduchovodů	34
3.2.3. Výběr kruhového nebo čtyřhranného potrubí	35
3.2.4. Výběr materiálu potrubí	36
3.2.5. Konstrukční výpočet vzduchotechnické trati	40
3.2.5.1. Dimenzování potrubí tratě	42
3.2.5.2. Výpočet tlakových ztrát potrubí	44
3.2.5.3. Průřezová měřidla	47
3.2.5.4. Základní rozměry trati	50
3.2.5.5. Součásti trati	52
4. Výběr vhodných snímačů	53
4.1. Měření teploty	53
4.2. Měření vlhkosti	53
4.3. Měření otáček	53
4.4. Měření barometrického tlaku	53
4.5. Měření příkonu	53
4.6. Měření objemového průtoku	53
4.7. Měření statického tlaku	53
4.8. Měřicí přístroje	54
4.9. Výsledná trať s měřicími přístroji	54
5. Závěr	56

## Důležité fyzikální veličiny a jejich jednotky

Značka	Název	Jednotka
P	tlak	Pa
$P_d$	dynamický tlak	Pa
$P_{cv}, \Delta P$	celkový dopravní tlak	Pa
$P_s$	statický tlak	Pa
b	barometrický tlak	Pa
$\Delta P_z$	tlaková ztráta	Pa
$\varphi$	průtokové číslo	-
$\Psi$	tlakové číslo	-
V, Q	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
w, $c_s$	střední rychlost vzdušiny	$m \cdot s^{-1}$
A, S	průřez	$m^2$
t	celsiova teplota	$^{\circ}C$
T	termodynamická teplota	K
$\rho$	hustota vzdušiny	$kg \cdot m^{-3}$
$\nu$	kinetická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\mu$	viskozita	Pa $\cdot$ s
e	energie proudící tekutiny	$m \cdot s^{-2}$
q	gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
h	výška	mm
l	délka	mm
e	tloušťka otvoru stěny clony	mm
E	tloušťka clonkového kotouče	mm
$\alpha$	úhel zkosení	$^{\circ}$
$\beta$	poměr průměrů	-
d	průměr potrubí	mm
$Q_v$	tepelný tok	w
$P_p$	příkon ventilátoru	w
P	výkon ventilátoru	w
$\eta_{cv}$	celková účinnost ventilátoru	-
$\eta_{evh}$	celková účinnost na hřídeli	-
$\eta_{cvs}$	celková účinnost ventilátorového soustrojí	-
$\Delta t$	ohřátí vzduchu	w
n	otáčky	$ot \cdot min^{-1}$
m	hmotnost	kg
Re	reynoldskovo číslo	-
$\varepsilon$	drsnot potrubí	mm
$\lambda$	součinitel tření	-

<b>Výraz</b>	<b>Zkratka</b>	<b>Český ekvivalent</b> (význam latinského výrazu)
ab ovo	-	od počátku
ad absurdum	-	dovést a. a. = dokázat nesmysl něčeho
ad hoc	-	pro tento případ, jen k tomuto účelu
ad oculos	-	názorně, zjevně
ad rem	-	k věci
a priori	-	předem
a posteriori	-	ze (po, následkem) zkušenosti
confer	cf	srovnej (tiskový odkaz)
ceteris paribus	-	za stejných ostatních podmínek
conditio sine qua nom	-	nutná podmínka, nezbytný předpoklad
et cetera	etc.	a tak dále, atd.
et sequentes	et seq.	následující
eximpli gratia	e. g.	například, jako
eximpli causa	e. c.	příklad
ibidem	ib.	tamtéž
idem	id.	totéž
notabene	-	mimo to, a to, dokonce, kromě toho, ještě navíc
nota bene	N. B.	označení pro poznámku, (všimni si dobře)
passim	pass.	široce a dlouze i celkem často
sic!	-	tak, skutečně, tak je to doslovně (k označení důležité části textu)
vice versa	v. v.	obráceně, naopak

## 1. Úvod

V současné době se setkáváme se vzduchovody v hojně míře všude kolem nás. Ať už ve školách, v nemocnicích a dalších veřejných budovách nebo i doma například u odvětrání digestoře, ale také hlavně v průmyslu strojním, zemědělském, stavebním, potravinářském, zpracovatelském, těžebním, chemickém, elektrotechnickém, oděvním a dalších jiných odvětvích.

Vzduchovody slouží pro přivádění vzduchu k větrání nebo klimatizaci prostorů a odvodu vzduchu z těchto prostorů nebo od technických zařízení. Aby toto mohly vzduchovody plnit, záleží na správném návrhu a provedení sítí vzduchovodů a funkci celého zařízení. Součástí potrubí (vzduchovodů) jsou další součásti rozvodu (regulační, uzavírací, protipožární klapky, spoje, závěsy, izolace, otvory, žaluzie nebo regulátory průtoku či měřicí sondy. Celý vzduchovod jako celek tvoří dopravník vzduchu, což je jeden velký odpor (tlakových ztrát) vzduchu, na který je potřeba k překonání odporu (tlakových ztrát) potřebná energie (výkon ventilátoru), čemuž odpovídá významná položka provozních nákladů. Proto je potřeba věnovat projekčnímu návrhu, konstrukci, výrobě i provozu dostatečnou pozornost.

V první části této práce jsou informace o základních pojmech z oboru vzduchotechniky, dále pak se základními zákony, které se týkají fyzikální podstaty vzduchotechniky. Navazovat budou druhy tratí a materiály potrubí. Práce pokračuje o vlastnostech ventilátorů a jejich charakteristikách, výkonech, druzích, rozměrech a měření. Ve druhé polovině mé práce se nachází výběr materiálů a samotný konstrukční návrh variabilní tratě pro více ventilátorů a snímačů.

## 2. Ventilátory, Stanovování P-Q charakteristik

### 2.1. Ventilátory

Podle definice ventilátorů jsou ventilátory rotační lopátkové stroje určené ke kontinuální dopravě vzdušiny (páry, plynu, směsi). Slouží k přeměně elektrické energie na energii mechanickou a z ní na tepelnou energii předanou vzdušině. Při jednom stupni je maximální poměr tlaků ve výtlaku a v sání 1,1. Kompresní poměry se v provozu pohybují v rozmezí hodnot 1,01-1,10 výjimečně u víceúrovňových ventilátorů v hodnotách 1,3 a 1,5. Ventilátory dělíme podle směru a způsobu průtoku vzduchu oběžným kolem na axiální, radiální, diagonální a diametrální (příčný nebo dvojitý průtok), dále pak podle celkové velikosti tlaku na ventilátory nízkotlaké (1kPa), středotlaké (do 3kPa) a vysokotlaké (přes 3kPa).[1],[2],[6]

#### 2.1.1. Důležité zákony, vztahy a pojmy

Při konstrukci či návrhu vzduchovodů je důležité znát základní pojmy a zákony termomechaniky a zákony mechaniky tekutin.

- vzdušina – souhrnný název plynů a par, látka, která vyplní maximální objem
- kompresní poměr – je poměr mezi celkovým objemem a objemem komprese (stlačujícího) prostoru

„Při projektování vzduchotechnických zařízení je pro aplikaci zákonů mechaniky tekutin považován vzduch za nestlačitelnou tekutinu, jejíž hustota se mění s teplotou, případně s obsahem vodní páry podle stavové rovnice“ [1],[2]

#### Stavová rovnice

$$P = \frac{p - 0,378 \text{ pd}}{287,1(t + 273,15)} \quad (2.1)$$

#### Viskozita

Viskózní látky se vyznačují i malou trvalou deformací vyvolanou účinkem vnějších sil, tudíž tyto látky „tečou“.

Jen ojediněle lze viskozitu vzduchu zanedbat. Například při řešeních rychlostních polí při odsávání z prostoru lze považovat vzduch za dokonalou (neviskózní) kapalinu (nestlačitelnou tekutinu) a tím použití metody řešení potenciálního proudění. Viskozita se vyskytuje v rozmezí teplot -20 až + 80 °C. [1]

$$\mu = (17,2 + 0,047 t) \cdot 10^{-6} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2.2)$$

Kinetická viskozita  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ .

Pro standartní vzduch ( $p = 101,3 \text{ kPa}$ ,  $t = 20 \text{ °C}$ ,  $\varphi = 0,5$ )

je  $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;  $\mu = 18,14 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\nu = 15,07 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

### 2.1.1.1. Zákon pohybu vzduchu

Při řešení úloh proudění tekutin a vzdušiny se vychází z diferenciálního nebo integrálního vyjádření zákona zachování hmoty, zákona zachování energie, respektive druhého Newtonova pohybového zákona.

Zákon zachování hmoty vyjadřuje rovnice kontinuity, kde pro prostorový pohyb musí být splněna podmínka. [1]

#### Rovnice kontinua

$$\bar{v} \cdot w = \operatorname{div} w = 0 \quad (2.3)$$

v kartézských souřadnicích

$$\frac{dw_x}{dx} + \frac{dw_y}{dy} + \frac{dw_z}{dz} = 0$$

Která platí pro vzduch jako viskózní a neviskózní nestlačitelnou kapalinu.[1]

Je důležité vědět, že průtokem vzduchovodu se hmotnostní průtok vzduchu nemění.

$$\dot{m} = \rho \cdot w \cdot A = \text{konst.}$$

w – rychlost vzdušiny [ $\frac{m}{s}$ ]

A – průřez [ $m^2$ ]

$\rho$  – hustota [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

$$\rho_1 \cdot w_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot w_2 \cdot A_2$$

U netěsných stěn vzduchovodů je nutno počítat se ztrátou průtoku netěsnostmi[1].

#### Energetická rovnice

Energie proudící tekutiny na výstupu z měřené oblasti je rovna energii vstupující tekutiny zvětšené o přivedené teplo a mechanickou energii tekutiny. [1],[2]

$$e_2 = e_1 + q_{1/2} + l_{1/2} \quad (2.4)$$

e [ $\frac{J}{kg} = (m/s^2)$ ] je dána součtem energie potenciální, tlakové, kinetické a tepelné

#### Bernoulliova rovnice

$$\frac{p_1}{\rho} + h_1 \cdot g + \frac{w_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + h_2 \cdot g + \frac{w_2^2}{2} + l_{1/2} \quad (2.5)$$

kde g-gravitační zrychlení [ $\frac{m}{s^2}$ ], p – tlak [Pa], w – rychlost vzdušiny [ $\frac{m}{s}$ ],  $\rho$  – hustota [ $\frac{kg}{m^3}$ ], h – výška sloupce [m],  $l_{1/2}$  ( $Y_{1/2}$ ) – ztráty v potrubí (mechanická energie) [1][2].

Zobecněná Bernoulliova rovnice (není uvažován ventilátor).

Energie proudícího vzduchu je vyjádřena součtem tlaků statického, polohového, dynamického. V průřezu 2 je tento součet ovlivněn tlakovými ztrátami, ke kterým dochází mezi průřezy 1 a 2. [1],[2]

### Průtoková hybnost

$$H = \dot{m} \cdot w = \rho \cdot w \cdot V \quad (2.6)$$

„Při průtoku vzduchu kontrolní oblastí je rozdíl průtokových hybností vystupujícího vzduchu  $H_2$  a vstupujícího vzduchu  $H_1$  roven výslednici vnějších sil  $\sum F$  působící na kapalinu v kontrolní oblasti“. [1]

$$H_1 - H_2 = \sum F \quad (2.7)$$

Mezi vnější síly patří výsledný tlak prostředí vzduchu, výsledný tlak na stěny a hmotová síla (tíha vzduchu, odstředivá síla, Coriolisova).

Toto lze použít i pro viskózní tekutiny se stacionárním prouděním.

### Moment hybnosti

Použití momentu sil je výhodné při průtoku tekutiny rotujícími kanály.

Moment vnějších sil je roven změně momentu hybnosti. Krouticí moment  $M_k$  je součin ramena a síly. Př. (krouticí moment u radiálního ventilátoru). [1]

$$M_k = \dot{m} \cdot (r_2 \cdot C_{2u} - r_1 \cdot C_{1u}) \quad (2.8)$$

(Index 1) – výstup, (Index 2) – vstup,  $C_u$  – obvodová rychlost

#### 2.1.2. Rozdělení ventilátorů

Ventilátor obsahuje motor, který je složen ze statoru a rotoru. Rotor je osazen lopatkami. Způsobem přívodu (nasávání) vzduchu na lopatky, točení rotoru a natočení lopatek vychází vzdušina pod úhlem do určitého směru, podle něhož rozeznáváme ventilátory:

#### Podle směru průtoku vzduchu

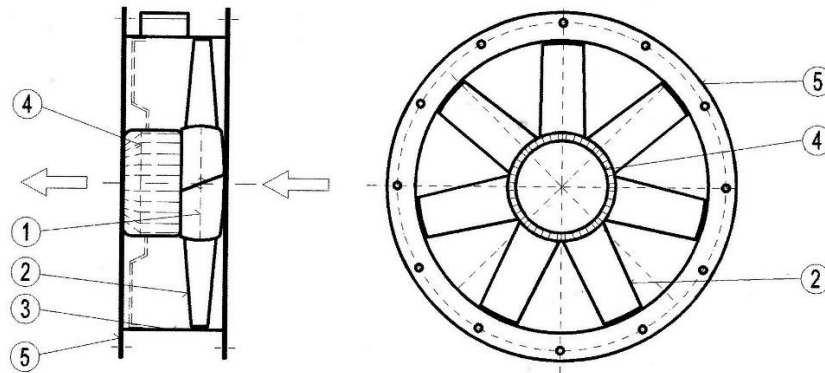
Axiální  
Radiální  
Diagonální  
Diametrální  
Tangenciální



### 2.1.2.1. Podle směru průtoku vzduchu

#### Axiální ventilátory

U axiálních ventilátorů proudí vzdušina ve směru osy rotujícího oběžného kola. Použití je zejména tam, kde je potřeba velkého průtoku vzduchu bez vysokých dopravních tlaků. Skládají se z oběžného kola (1), sacího hrdla (2), výtlačného hrdla (3), válcové skříně (5) a elektromotoru (4).



Obr. 2.1.1. Schéma axiálního ventilátoru [2]

Dále dělíme axiální ventilátory na přetlakové, rovnotlaké jedno či více stupňové dle počtu rotorů, jednosměrné a tzv. reverzní, kde měníme směr proudění vzduchu přímo motorem. [2],[6]

#### Přetlakové axiální ventilátory

U těchto axiálních ventilátorů je tlak statický za oběžným kolem vyšší, než před oběžným kolem. Objemový průtok je v širokém spektru hodnot. S celkovou účinností se u těchto přetlakových ventilátorů pohybujeme kolem účinnosti 0,85. Používají se zejména pro větrací a klimatizační účely a větrací věže. [2],[6]

#### Rovnotlaké axiální ventilátory

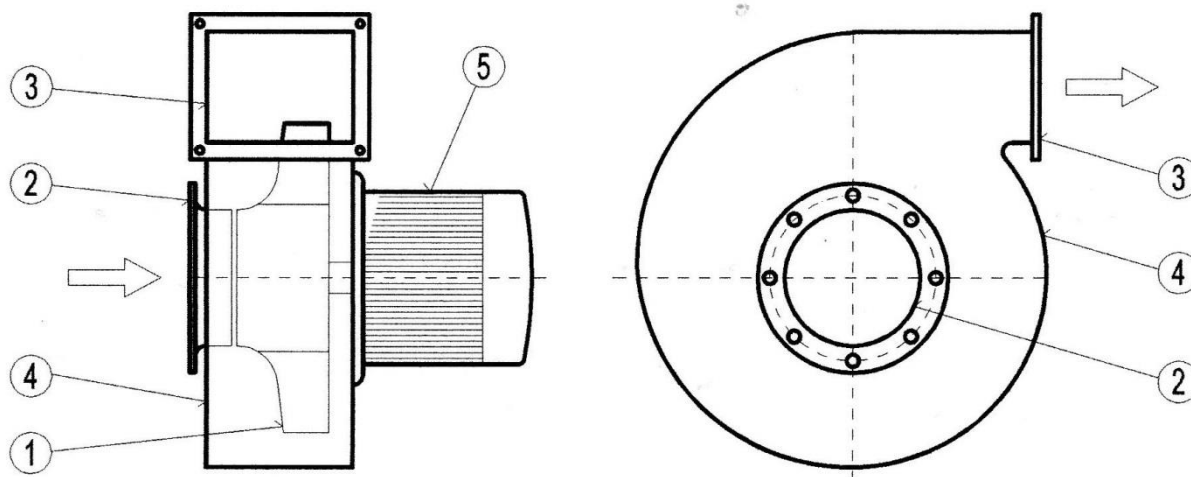
Hlavní použití těchto ventilátorů najdeme v průmyslu. Rovnotlaké podle toho, že před a za oběžným kolem je statický tlak stejný. Za oběžným kolem je umístěn difuzor, ve kterém při poklesu dynamického tlaku roste statický tlak. Dosahujeme velkých hodnot objemového průtoku vzduchu (až 300 m<sup>3</sup>/h) a celkové účinnosti cca 0,8.[2],[6]

#### Radiální ventilátory

U radiálních ventilátorů probíhá nasávání vzduchu ve směru axiálním a výtlač ve směru kolmém na osu (proto radiální).

Díky spirální skříně se přeměňuje kinetická (pohybová) energie na energii tlakovou. Stejně jako je tomu u difuzoru. Provedení bývá jako jednosměrné a obousměrné sací.

Radiální ventilátor se skládá z: oběžného kola (1), sacího hrdla (2), výtlačného hrdla (3), spirální skříně (4), elektromotoru (5).[2],[6]



Obr. 2.1.2. Schéma radiálního ventilátoru [2]

Dále rozlišujeme radiální ventilátory podle točivého kola na:

Dozadu zahnutými lopatkami  
Dopředu zahnutými lopatkami

### **Radiální ventilátory s dozadu zahnutými lopatkami**

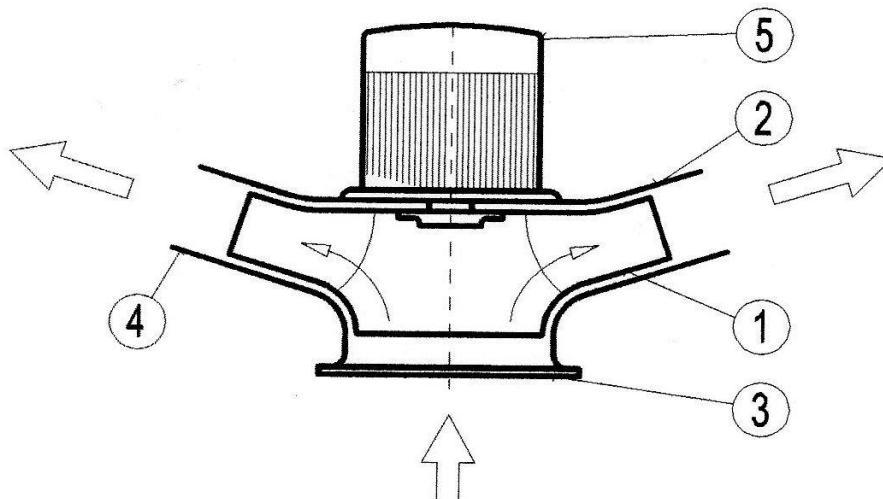
Nejčastější bývají tyto ventilátory středotlaké a vysokotlaké. Patří mezi nejúčinnější radiální ventilátory, kde se pohybuje účinnost 0,80 až 0,85. Oběžná kola mívají menší počet lopatek (6 až 15) a oběžná kola bývají většinou svařovaná.[2],[6]

### **Radiální ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami**

Tyto ventilátory jsou nejčastěji používané v klimatizační a větrací technice. Jsou používány jako nízkotlaké s větším počtem lopatek (40 až 50) a s konstantním oběžným kolem. Materiálem je v mnoha případech pozinkovaný plech, který se používá v hojně míře v celé vzduchotechnice. Dosahovaná účinnost je 0,55 až 0,65.[2],[6]

### **Diagonální ventilátory**

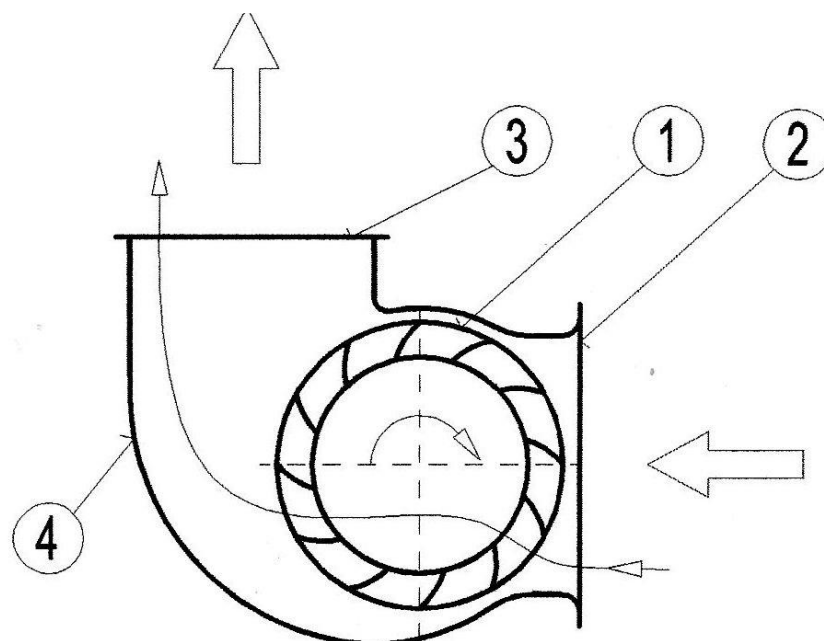
Konstrukcí oběžného kola vypadá jako radiální ventilátor, ale je to hybrid mezi axiálním a radiálním ventilátorem. Vzduch je vháněn v axiálním směru rotace oběžného kola, ale výtlač ze skříně ventilátoru je pod úhlem menším než 90°. Mají vysokou účinnost a s provedením se stavitelnými lopatkami i dobrou regulaci výkonu. Součástmi diagonálního ventilátoru je: oběžné kolo (1), skříň ventilátoru (2), sací hrdlo (3), výtlačné hrdlo (4) a elektromotor (5).[2],[6]



Obr. 2.1.3. Schéma diagonálního ventilátoru [2]

### Diametrální ventilátory

Zde ventilátor nasává vzduch na obvodu oběžného kola ze sacího hrdla. Vzduch proudí příčně oběžným kolem a vystupuje opět na obvodu oběžného kola a proudí do výtlačného hrdla. Dá se tedy říct, že vzdušina na vstupu a výstupu oběžného kola má směr přibližně kolmý k ose jeho rotace. Lopatky oběžného kola jsou zahnuty dopředu a šířka oběžného kola bývá 1 až 5-ti násobek vnějšího průměru oběžného kola. Je někdy označován za *ventilátor tangenciální*. Charakteristika tohoto ventilátoru je stabilní. Výhodou je, že dokážou nasávat v širokém podélném směru vzduch. Používá se u některých typech ventilátorových konvektorů. Dosahovaná účinnost je 0,45 až 0,55.[2],[6]



Obr. 2.1.4. Schéma diametrálního ventilátoru [2]

### 2.1.2.2. Podle velikosti celkového tlaku

Nízkotlaké (do 1000 Pa)  
Středotlaké (do 3000 Pa)  
Vysokotlaké (nad 3000 Pa)

### 2.1.2.3. Podle pohonu

Na přímo  
Na řemen  
Na spojku

### 2.1.2.4. Podle použití

Bytové ventilátory  
Střešní ventilátory  
Potrubní ventilátory  
Nevýbušné ventilátory  
Ventilátory na odvod tepla a kouře  
Kyselinovzdorné ventilátory  
atd.

## 2.2. P-Q charakteristiky ventilátorů

Charakteristiky ventilátorů jsou ovlivněny množstvím kritérií. Mezi základní P-Q charakteristiku se udává provozní bod, kterým je průsečík tlakové charakteristiky ventilátoru a charakteristiky potrubí (sítě) vzduchovodu. Charakteristika tlaku je dána závislostí dopravního tlaku  $\Delta p_{cv}$  při konstantních otáčkách  $n$  a hustotě vzduchu  $\rho$ . Charakteristika potrubí (sítě) vzduchovodu je složena z potrubí a jednotlivých částí potrubí vzduchovodu a dalších jiných odporů. Tato charakteristika tvoří parabolickou závislost přetlaku  $\Delta p$  k docílení průtoku vzduchu (vzdušiny) v potrubí vzduchovodu. [1],[2],[6]

$$\Delta p = C \cdot V^2 \quad (2.9)$$

Kde  $C$  (K) je konstanta potrubí vzduchovodu (sítě).

Mezi další charakteristiky patří aerodynamické parametry ventilátorů, které předepisuje výrobce měřením ventilátorů. Tyto parametry lze použít pro návrh tzv. pracovních diagramů. [2],[6]

### Objemový průtok vzdušiny ventilátorem $V$

Je množství vzduchu, které je možno dopravit ventilátorem do potrubí nebo jiných zařízení za jednotku času  $V$  [ $m^3/h$ ]. Hustotu vzduchu uvažujeme zpravidla  $\rho=1,2$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ]. [2],[6]

### Celkový dopravní tlak $\Delta p_{cv}$

Je vlastnost, kterou zajišťujeme celkovým dopravním tlakem ventilátoru  $\Delta p_{cv}$  [Pa] na překonání tlakových ztrát a odporů sítě potrubí vzduchovodu. Důležité je vědět, že u

vysokotlakých ventilátorů se musí navíc počítat se stlačitelností vzduchu, což se u nízkotlakých a středotlakých ventilátorů zanedbává. [2][6]

### Výkon a příkon ventilátoru

Je součin průtoku a celkového dopravního tlaku ventilátoru. [2]

$$P = V \cdot \Delta p \text{ [W]} \quad (2.10)$$

Příkon ventilátoru  $P_p$  je dán výkonem ventilátoru  $P$  a celkovou účinností. Samotná účinnost je poměr mezi výkonem a příkonem ventilátoru. [2]

$$P_p = \frac{P}{\eta_c} = \frac{V \cdot \Delta p}{\eta_c} \text{ [W]} \quad (2.11)$$

### Ohřátí vzdušiny ve ventilátoru

Ohřátí vzdušiny ve ventilátoru se značí  $\Delta t$  (rozdíl teplot na sání a výtlačku ventilátoru). Stanoví se z bilance

$$P_p = P \cdot Q_v \text{ [W]} \quad (2.12)$$

odkud lze vyjádřit tepelný tok  $Q_v$

$$Q_v = \frac{P}{\eta_c} - P = \frac{V \cdot \Delta p}{\eta_c} - V \cdot \Delta p = V \cdot \rho c \Delta t \text{ [W]} \quad (2.13)$$

odkud plyne

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\rho c \eta_c} (1 - \eta_c) \text{ [K]} \quad (2.14)$$

Je však důležité počítat s energií, kterou ventilátor ve vzduchovodech předá proudícímu vzduchu (vzdušině). V síti potrubí vzduchovodu se přemění na teplo. Je-li v proudu vzduchu elektromotor ventilátoru, pak i celý příkon. [2]

Ohřátí vzduchu je pak dáno:

$$\Delta t_c = \frac{\Delta p}{\rho c \eta_c} \text{ [W]} \quad (2.15)$$

Z tohoto aspektu je zřejmé, že pro nízkotlaké ventilátory ohřátí vzduchu nehraje výraznou roli. S vyšším dopravním tlakem rozdíl teplot lineárně roste.[2]

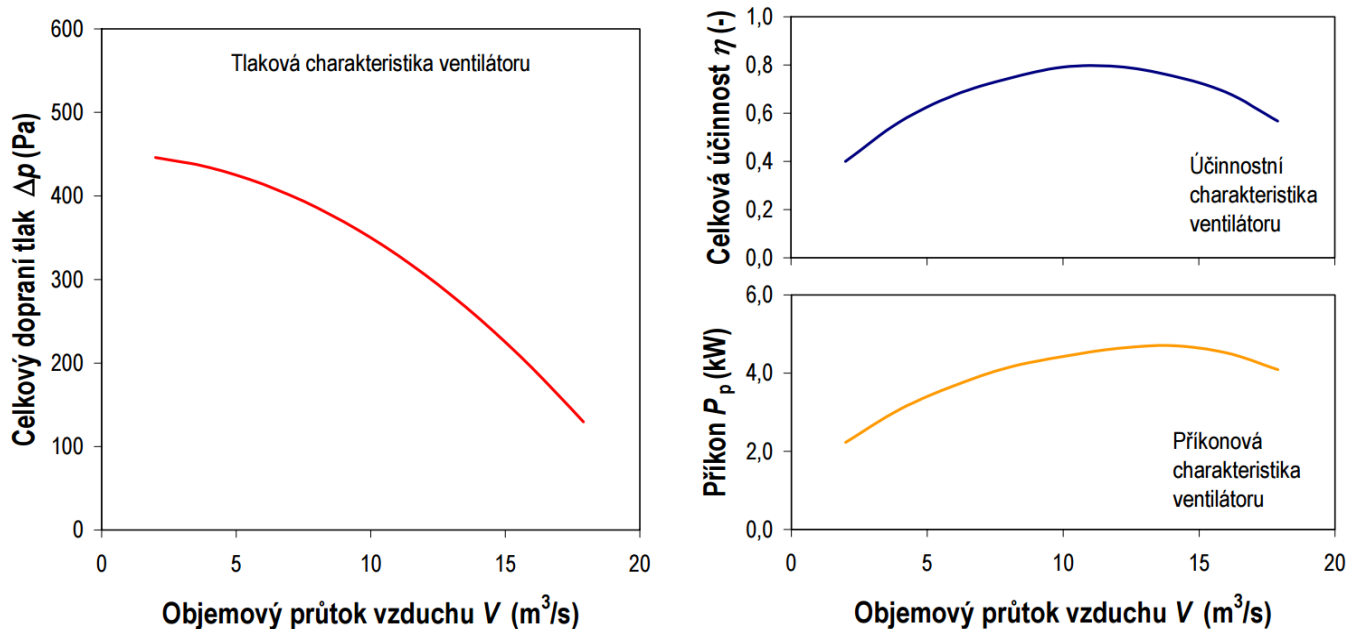
## 2.2.1. Charakteristika

### 2.2.1.1. Charakteristika ventilátoru

Z diagramů lze odečíst závislost tlakové charakteristiky na objemovém průtoku vzduchu (vzdušiny) a otáčkách. Dále lze z diagramů odečíst účinnost ventilátorů a příkon elektromotoru.[2],[3],[4],[5]

Charakteristiky ventilátorů pro stav  $\rho=1,2 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ :

- tlaková charakteristika  $\Delta P = f(V)$
- příkonová charakteristika  $P_p = f(V)$
- účinnostní charakteristika  $\eta_c = f(V)$

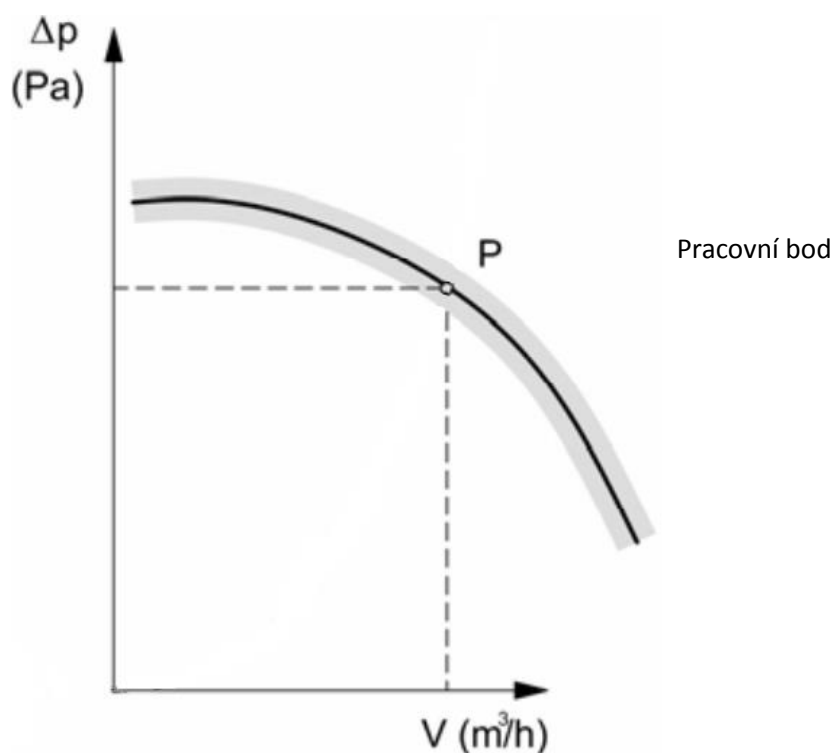


Obr. 2.2.1. Schéma charakteristik ventilátorů [2]

Jednotlivé charakteristiky lze pohodlně přepočítat, pokud hustota vzduchu  $\rho$  je konstantní. Změny parametrů lze přepočítat při změně otáček dle tabulky 2.2.1. Objemový průtok vzduchu se mění úměrně s otáčkami. Celkový tlak se pak mění s druhou a třetí mocninou otáček. [2]

Parametr	a) změna otáček při $\rho = \text{konst.}$	b) změna hustoty při $n = \text{konst.}$
Objemový průtok vzduchu $V$ (m <sup>3</sup> /s)	$V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1}$	$V_2 = V_1$
Celkový dopravní tlak $\Delta p$ (Pa)	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$
Výkon ventilátoru $P$ (W)	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$	$P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$

Tab. 2.2.1. Přepočet charakteristik ventilátorů [2]



Obr. 2.2.2. Charakteristika vhodně navrženého ventilátoru [4]

### Výpočet celkového potrubního tlaku a celkového dopravního tlaku ventilátoru

Je důležité vědět, že celkový potrubní tlak v síti vzduchovodů  $P_c$  je roven součtu tlaku statického  $P_s$  a dynamického  $P_d$ . Celkový dopravní tlak z ventilátoru je dán rozdílem celkových tlaků na výtlaku  $P_{c1}$  a sání  $P_{c2}$  ventilátorů nebo je roven součtu tlakových ztrát (odporů) potrubní sítě vzduchovodů  $\Delta P_z$  (sání a výtlak) a dynamického tlaku na výtlaku z potrubí sítě vzduchovodů  $P_{d2}$ . [2],[4]

### Výpočet tlakového rozdílu

$$\Delta P = \rho \cdot \Delta h \cdot g$$

(2.16)

$\rho$  – hustota náplně v mikromanometru  $v$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

$\Delta h$  – rozdíl hladiny [m]

$g$  – gravitační zrychlení [ $\frac{m}{s^2}$ ]

### Stavová rovnice

viz. rovnice (2.1)

### Výpočet dynamického tlaku

$$P_d = \frac{w^2}{2} \rho \text{ [Pa]} \quad (2.17)$$

$w$  – rychlost proudění vzdušiny [m/s]

$\rho$  – hustota vzduchu [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

### Celkový tlak

$$P_c = P_s + P_d \quad (2.18)$$

$P_s$  – statický tlak [Pa]

$P_d$  – dynamický tlak [Pa]

### Výpočet ztrát (odporů)

$$\Delta P = P_{c2} - P_{c1} = \Delta P_{z1} + \Delta P_{z2} + P_{d2} \text{ [Pa]} \quad (2.19)$$

#### 2.2.1.2. Charakteristika sítě vzduchovodů

Potrubní síť vzduchovodů slouží k odvodu a k dopravě vzduchu (vzdušiny) od ventilátoru. V síti potrubí vzduchovodů je potřeba počítat se ztrátami (odpory) třením a místními odpory. Tato ztráta je dána součtem jednotlivých odporů.[2]

$$\Delta P_z = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \rho + \sum \xi \frac{w^2}{2} \rho = \left( \lambda \frac{l}{d} \sum \xi \right) \frac{w^2}{2} \rho = KV^2 \text{ [Pa]} \quad (2.20)$$



$w$  – rychlost proudění [m/s],  $l$  – délka potrubního úseku [m],  $d$  – rozměr potrubí (průměr)[m],  
 $K$  – konstanta potrubí sítě vzduchovodu [ $\text{Pa}\cdot\text{s}^2/\text{m}^6$ ],  $\lambda$  – součinitel tření [-],  $\xi$  – součinitel  
místních ztrát [-],  $V$  – objemový průtok vzduchu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. [2]

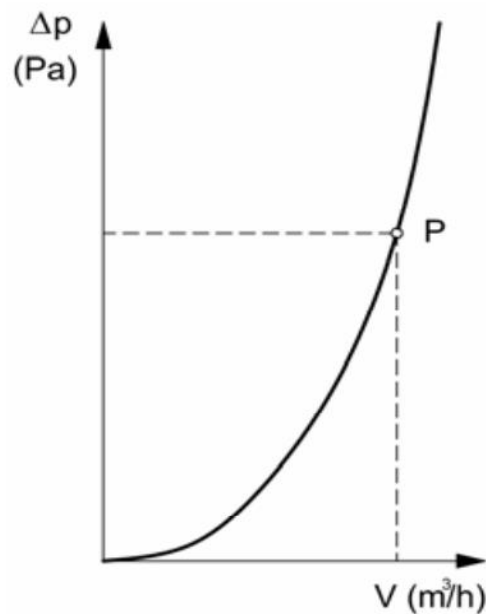
Pokud dosadíme do vztahu (2.20) za rychlost,

$$w = \frac{V}{S} = \frac{4V}{\pi d^2} \quad (2.21)$$

úpravou získáme vztah pro konstantu potrubí sítě vzduchovodu  $K$

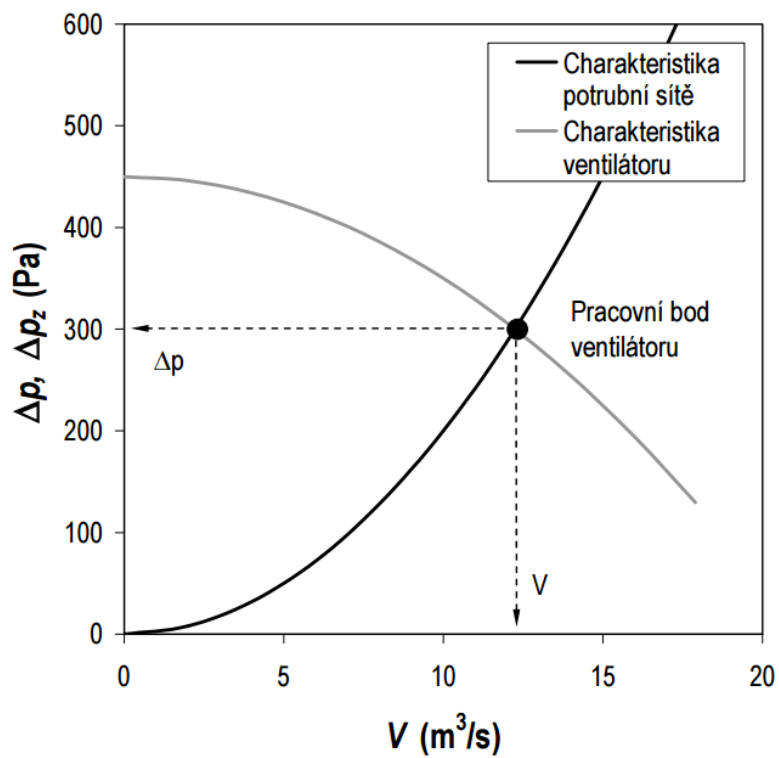
$$K = \left( \frac{\lambda l}{d} + \sum \xi \right) \frac{8\rho}{\pi^2 d^4} \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}^2/\text{m}^6]$$

(2.22) Charakteristika potrubí sítě vzduchovodu je dána parabolou, která vyplývá z rovnice (2.20). Tato charakteristika se protne v pracovním bodě P s charakteristikou vhodného ventilátoru dle obr. 2.2.2.

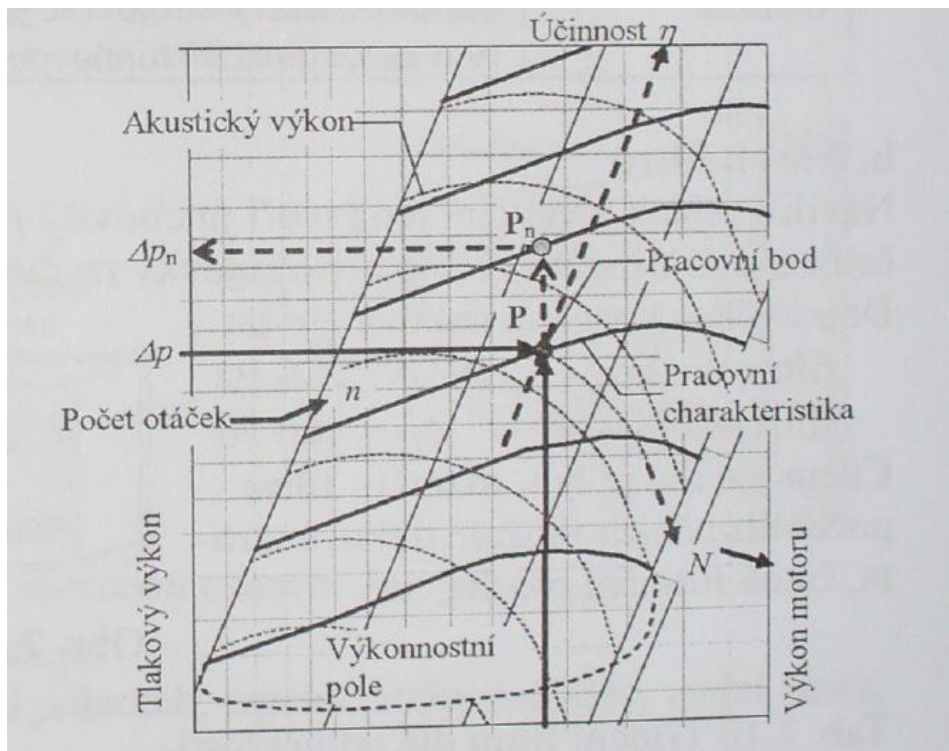


Obr. 2.2.3. Charakteristika potrubí vzduchovodu [4]

Protnutím charakteristiky vhodného ventilátoru a potrubí vzduchovodu získáme pracovní charakteristiku.



Obr. 2.2.4. Charakteristika ventilátoru a potrubí (pracovní diagram) [2]



Obr. 2.2.5. Ukázka pracovního diagramu [6]

### 2.2.1.3. Řazení ventilátorů a jejich charakteristika

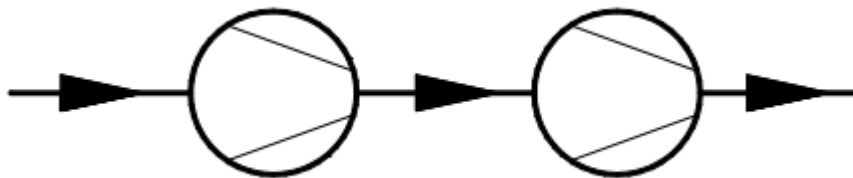
Řazení ventilátorů se provádí ve velice specifických situacích, kde není jiná možnost regulace. Můžeme ho také použít k navýšení objemového průtoku vzduchu (vzdušiny) nebo k dosažení větších dopravních tlaků.[2],[6]

Řazení ventilátorů dělíme na dvě možnosti:

- sériově řazené ventilátory
- paralelně řazené ventilátory

#### Sériové řazení ventilátorů

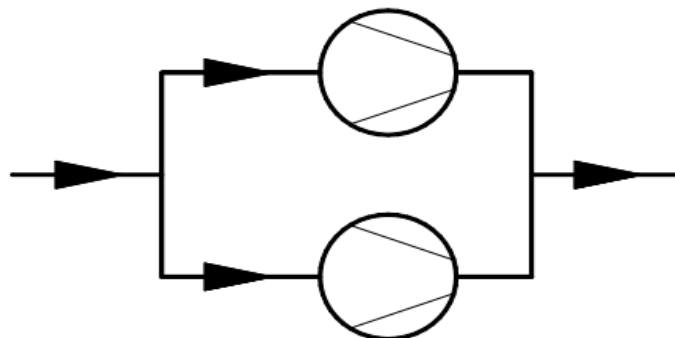
Řazení ventilátorů za sebou, tzv. v sérii. Používají se jen velmi málo. Jsou používána hlavně kvůli dosažení vyšších dopravních tlaků. Sériovým řazením ventilátorů dostaneme součet celkových dopravních tlaků při stejných objemových průtocích. Teoreticky má dosáhnout toto sériové řazení dvojnásobného celkového dopravního tlaku. V praxi ovšem tohoto výsledku nedosáhne, neboť první ventilátor narušuje proudění před druhým ventilátorem a tím je výsledný dopravní tlak nižší ( $\Delta P_2 < 2\Delta P_1$ ).[2],[6]



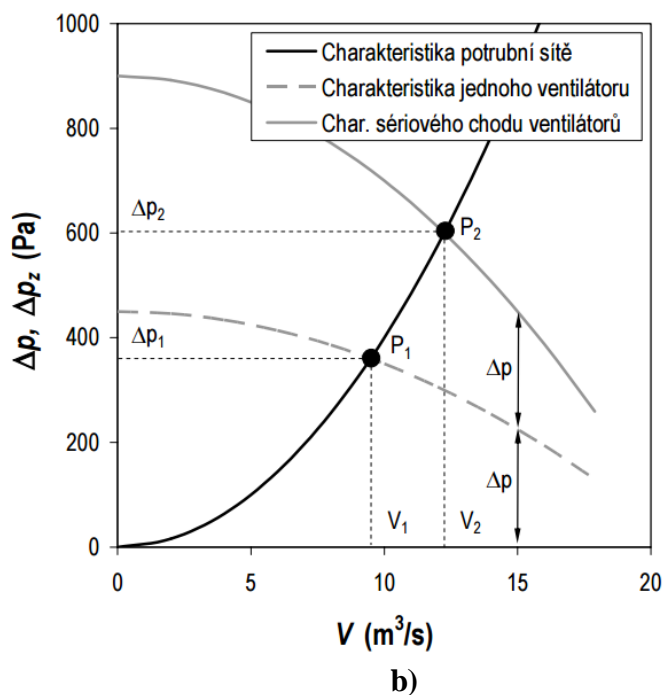
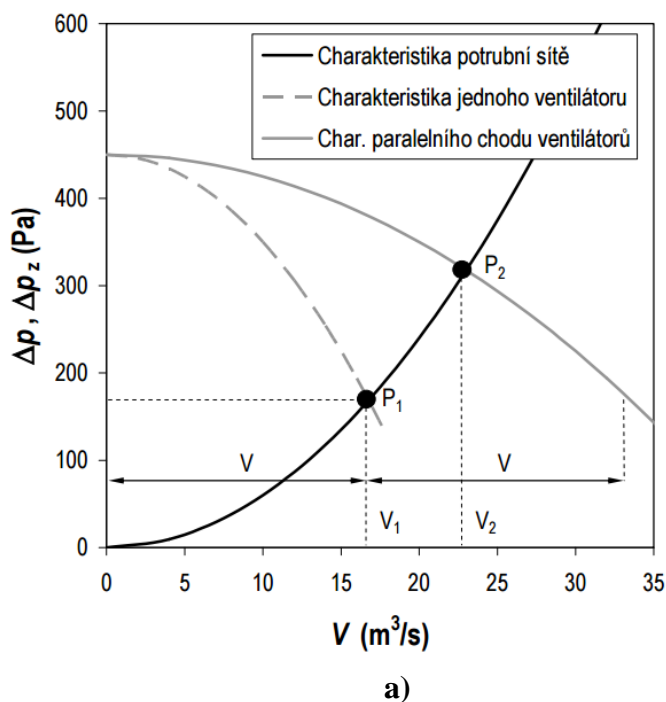
Obr. 2.2.6. Schéma sériového řazení ventilátorů[2]

#### Paralelní řazení ventilátorů

Takzvané řazení vedle sebe se používá na navýšení objemového průtoku vzduchu (vzdušiny) nebo na regulační účely. Řazením znázorníme charakteristiku, která se získá součtem objemových průtoků při stejném dopravním tlaku. Teoreticky lze paralelním řazením dosáhnout dvojnásobného objemového průtoku vzduchu. V praxi při paralelním řazení se ovšem nedosáhne dvojnásobku, ale trochu menšího výsledku. Ten je ovlivněn zařazením dvěma odlišnými (nestejnými) ventilátory (např. jiný výrobce a jiné parametry atd.), kde může dojít ke zpětnému proudění ve ventilátoru s nižším dopravním tlakem. [2],[6]



Obr. 2.2.7. Schéma paralelního řazení ventilátorů [2]



Obr. 2.2.8. Tlaková charakteristika a) dvou stejných paralelně řazených ventilátorů, b) dvou stejných sériově řazených ventilátorů [2]

### 2.2.2. Regulace ventilátorů

Možnosti regulace ventilátorů jsou:

- škrcením
- natáčením lopatek
- změnou otáček (nejčastější řešení)

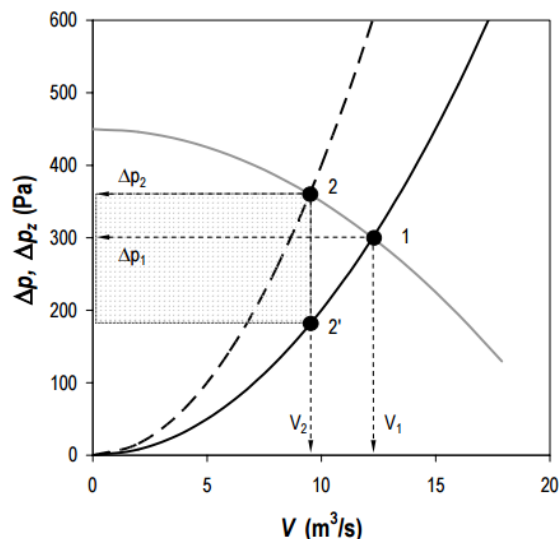
Další možností je, jak už bylo zmíněno, řazení ventilátorů:

- sériové řazení ventilátorů
- paralelní řazení ventilátorů

Tato možnost je využívána ve velmi specifických podmínkách. Metoda je jen velmi málo účinná a neekonomická – je potřeba více jak jeden ventilátor.[2],[6]

#### 2.2.2.1. Metoda regulace škrcením

Provádí se nejčastěji klapkami, které jsou řazené před nebo za ventilátor. Tímto způsobem dojde ke změně charakteristiky (místního odporu) sítě potrubí ventilátorů a tím i ke změně pracovního bodu P. Z energetického hlediska je tato metoda regulace ztrátová.[2]



Obr. 2.2.9. Regulace škrcením [2]

### 2.2.2.2. Metoda regulace natáčení lopatek

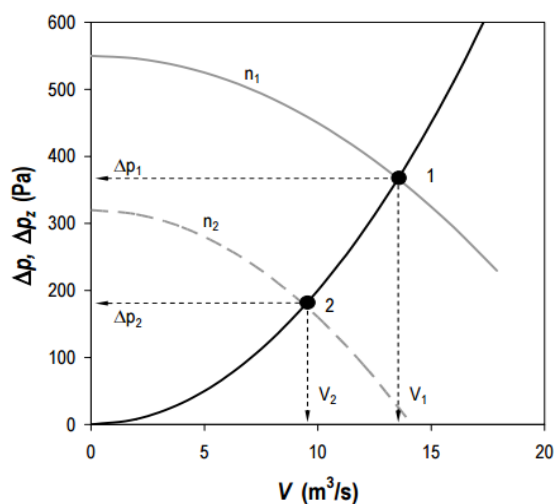
Natáčení lopatek se provádí v sání radiálních ventilátorů s dozadu zahnutými lopatkami. Dojde ke změně charakteristiky ventilátoru a tím se sníží dopravní tlak a změní poloha pracovního bodu ventilátoru P.

U axiálních ventilátorů se natáčí lopatky oběžného kola. Regulace je v širokém rozsahu a konstrukce je složitá a drahá.

U nízkotlakých ventilátorů je tato regulace podobná škrcením. [2],[6]

### 2.2.2.3. Metoda změnou otáček

Metoda změnou otáček je nejčastěji používaná v praxi. Je jednou z nejhospodárnějších metod regulace. Řešení změny otáček je prováděno elektronickými regulátory pro změnu elektrických veličin (napětí, frekvence). [2],[6]



Obr. 2.2.10. Regulace změnou otáček ventilátoru [2]

Dva způsoby změny otáček:

- s plynulou regulací
- stupňovitou (skokovou regulací)

### **S plynulou regulací otáček**

- kmitočtová regulace otáček
- napěťová regulace otáček

### **Kmitočtová regulace otáček**

Z hlediska energetické náročnosti je optimální. Lze ji použít pro všechny typy ventilátorů. Je prováděna plynulou regulací kmitočtu frekvenčními měniči. Regulace umožňuje regulovat průtok v plném rozsahu od 0 do 100%. Regulace je vhodná pro vyšší výkony ventilátorů. [2],[6]

### **Napěťová regulace otáček**

Je založena na řazení odporu do obvodu rotoru (např. motory s kroužkovou kotvou) a tím na změně napětí. Regulace výkonu motoru může probíhat např. v 5-ti stupních, čemuž odpovídá 5 pracovních charakteristik ventilátoru. Napěťová regulace je vhodná pro ventilátory nižších výkonů, protože napěťová regulace je ztrátová.[2],[6]

### **Stupňovitou (skokovou) regulací**

Je prováděno u víceotáčkových (dvou- nebo tří-otáčkových) motorů přepínáním počtu pólů u asynchronních motorů.[2],[6]

Otáčky rotoru lze stanovit ze vztahu

$$n = \frac{120 f}{p} (1 - s) \text{ [1/min]} \quad (2.23)$$

kde  $f$  – je frekvence [Hz],  $p$  – počet pólů [-],  $s$  – skluz (po rozběhu bývá 2 – 5 %).

### **2.2.3. Návrh ventilátoru**

U návrhu ventilátoru je důležité uvést, kde daný systém vzduchotechniky bude používán. Zda se bude jednat o vnitřní, či venkovní prostory, nebo se bude nacházet v tzv. prostorech špinavých, nebo čistých. Podle tohoto kritéria se pak určí metody výběru vzduchotechnické tratě a její další technické uspořádání.

Volba typu ventilátoru je dána technickými požadavky a použitím vhodné koncepce systému vzduchotechniky. Podle technických požadavků se určí parametry ventilátorů, které budou vyhovovat.[6]

### **Návrh tratě tvoří**

- objem průtoku vzdušiny  $V$
- tlaková ztráta potrubí  $\Delta P$  odpovídající měrné energii  $e$

Pro tyto hodnoty se z pracovního diagramu určí pracovní bod P, odečtou se otáčky  $n$ , účinnost  $\eta$  a výkon el. motoru N.

Pokud pracovní bod P neleží na pracovní charakteristice, zvolí se:

- nejbližší odpovídající bod  $P_n$  a zjistí nový pracovní tlak  $\Delta p_n$ , tímto novým tlakem se upraví tlaková ztráta potrubí sítě vzduchovodu a navrhne se nejvhodnější regulace
- jiný typ z rozměrové škály ventilátorů

[2],[6]

### 3. Konstrukční návrh tratě

Konstrukční návrh tratě je uzpůsoben pro daný typ ventilátoru, na kterém se budou měřit charakteristiky ventilátoru. Trať musí být uzpůsobena velikostnímu průřezu a výstupu z ventilátoru. Dále pak aby bylo možné tuto trať velice snadno přestavět na jiný typ ventilátoru (z axiálního na radiální). Návrh obnáší výpočty škrticích elementů, potrubí, vzdáleností od měřicích prvků, ztráty v potrubí, návrh umístění snímačů. Výběr materiálu a průřezu dle výpočtů a doporučení od výrobce.

#### 3.1. Požadavky na trať dle normy ČSN 12 3061

„Tato norma stanovuje předpisy pro měření vzduchotechnických veličin všech druhů ventilátorů s průměrem oběžného kola větším než 100mm. Netýká se ventilátorů bez skříně.“[7]

Účelem normy je sjednocení způsobů měření ventilátorů na zkušebně i v provozu. Dále pak vyhodnocení výsledků zkoušek jednotným způsobem.

##### 3.1.1. Měřením zjistíme:

- a) Charakteristické vlastnosti ventilátoru
- b) Splnění hodnot zaručených podle hospodářské smlouvy
- c) Hospodárnost provozu již delší dobu pracujícího ventilátoru
- d) Činnost opraveného nebo konstruovaného ventilátoru

##### 3.1.2. Měřené veličiny

Zkoušky ventilátorů obsahují dle potřeby tyto veličiny:

- a) Teplota, tlak a vlhkost vzdušiny, případně její chemické složení
- b) Hustota vzdušiny
- c) Objemový průtok vzdušiny
- d) Celkový tlak ventilátoru
- e) Příkon ventilátoru
- f) Účinnost ventilátoru

[7]

### 3.1.3. Přesnost měření veličin

„Přesnost měření závisí na použitém měřicím přístroji a zařízení. Některé hodnoty přesnosti měření přístrojů jsou uvedeny v odstavcích v této normě.“ [7]

### 3.1.4. Zjištění základních veličin – měřicí přístroje a zařízení

#### 3.1.4.1. Měření otáček ventilátoru

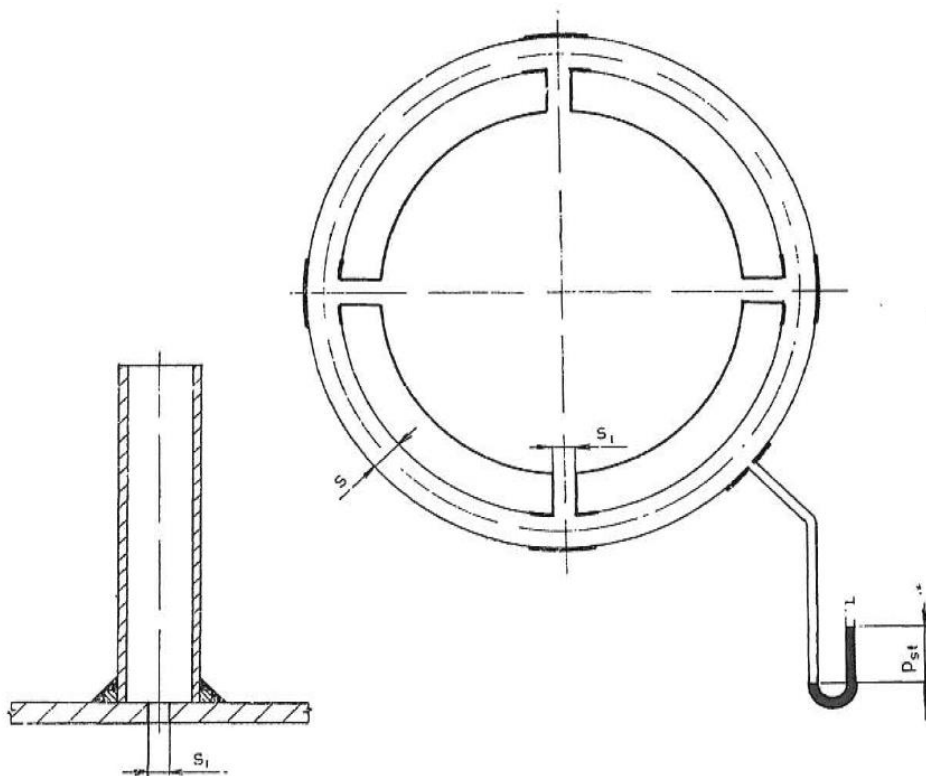
Měření otáček můžeme měřit dvěma způsoby:

- mechanickými otáčkoměry a čítači otáček – třídy přesnosti nutno zahrnout do výpočtu
- stroboskopy a dalšími číslicovými přístroji udávající okamžitou otáčkovou frekvenci

#### 3.1.4.2. Statický tlak vzdušiny

Statický tlak proudící vzdušiny se snímá proudovou sondou. Měření se provádí tak, že se k otvoru vyvrtaného kolmo do stěny potrubí připájí trubička, od níž vede hadice manometru, kterým se měří tlak. „Otvor musí být kolmý (tolerance  $\pm 5^\circ$ ) bez otřepů a průměr trubičky nesmí být větší než 1 až 3 mm, podle provozních a výrobních možností.“ Umožňuje-li to situace, tak pokud možno musí být co nejmenší. [7]

K zajištění co nejpřesnějších hodnot středního statického tlaku je vhodné umístit po obvodu potrubí více odběrových míst, které lze spojit kruhovým prstencem (obvykle hadičkou), v němž se jednotlivé tlaky vyrovnají (viz obr. 3.1.4.1.).



Obr. 3.1.4.1. a) Ukázka otvoru vyvrtaného do trubky a připojené trubičky, b) kruhový prstavec k odběru z více míst



„Průřez prstence  $S$  musí být větší než součet průřezů všech odběrových otvorů  $S_i$  ve stěně. Místo kruhového prstence lze použít vyrovnávací nádobky.“

Pak platí, že

$$S > \sum S_i \quad (3.1)$$

Správné zjištění statického tlaku se docílí nastavením sondy proti proudu vzdušiny tak, že naměřená hodnota na manometru dosáhne extrémní hodnoty (při přetlaku maximum, při podtlaku minimum). [7]

### 3.1.4.3. Měření objemového průtoku

Měříme pomocí metody škrticích elementů. Tato metoda je nejstarší a nejpoužívanější. Léta prověřená praxí měřeními a normami a zkušenostmi má za sebou mnoho úspěšných aplikací. Tyto škrticí elementy lze snadno získat podle normy od výrobců nebo konstrukční realizací vlastních specifických škrticích elementů podle normy.

Norma, která udává specifikaci škrticích elementů ČSN EN ISO 5167. [21]

Principem metody škrticích elementů (clony, dýza...), je škrcení pomocí zabudovaných prvků v potrubí, nejčastěji přírub, které způsobují rozdíl v tlacích před a za škrticím elementem.

Průřezová měřidla mohou být umístěna buď v měřicí trati, v měřicím kotli nebo někdy i v provozním zařízení. Výpočet škrticího ústrojí a jeho konstrukční řešení, délka měřicí tratě, vyhodnocení průtoku a tolerance se zjistí podle ČSN 257710. [7]

### 3.1.4.4. Měření příkonu elektromotoru

Celkový příkon elektromotoru se měří wattmetry, a to dvěma nebo třemi.

## 3.1.5. Zjišťování vzduchotechnických veličin určující ventilátor

### 3.1.5.1. Objemový průtok vzdušiny ventilátoru

Je to průtok na výtlaku ventilátoru vztažený na stav v sacím hrdle ventilátoru.

$$Q_1 = Q_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3.2)$$

Při měření průtoku na sání se připočte průtok vzduchu přísátého do ventilátoru (netěsnosti, chlazení apod.) [7]

Průtok zjišťujeme způsoby: Průřezovými měřidly – podle ČSN 257710

Tímto způsobem stanovíme střední rychlost vzdušiny a dynamický tlak a následně tlak celkový.

V potrubí je zaručeno osově proudění, když před sondovaným průřezem je délka rovného potrubí konstantního průřezu větší než osminásobek k průměru potrubí (u kruhového potrubí), nebo větší než čtyřnásobek součtu šířky a výšky (u obdélníkového průřezu), tak potom

$$l > 8D \text{ resp. } l < 4(A + B)$$

[7] (3.3)

### 3.1.5.2. Přímé stanovení střední rychlosti proudění vzdušiny

Přímé stanovení střední rychlosti proudění se provádí anemometry. Použijeme je tehdy, jde-li o měření malých rychlostí proudění, nebo když je nutné měřit na výstupu. Je nutný předpoklad osově proudění. Rozdělení průřezu a výpočtu se provede jako u sondáže proudovou sondou.

„Průměr lopatkového anemometru nemá být větší než 1/6 průměru měřeného průřezu. Zato u hranatého potrubí má být větší než 1/6 jeho kratší strany. Lopatkovým anemometrem se měří nejméně 30 sekund v každém bodě.“[7]

### 3.1.5.3. Střední celkový tlak při osovém proudění

Osově proudění platí, pokud je před sací přírubou ventilátoru rovný úsek nejméně 10 D nebo za výtlačnou přírubou 8 D potrubí konstantního průřezu.

Jsou-li asi 4 D před sací přírubou nebo asi 7 D za výtlačnou přírubou ventilátoru zabudovány odběry statického tlaku, tak vyhovují dle obr. 3.1.8.8., nebo lze také upravit při dodržení těchto požadavků, měří se při stanovení středního celkového tlaku před ventilátorem statický tlak vzdušiny  $p_{st1}$  a dynamický tlak se vypočte ze střední rychlosti  $c_s$  [7]

$$c_s = \frac{Q_1}{S} \quad (3.4)$$

kde S je průřez v místě odběru statického tlaku.

Dynamický tlak se vypočte dle vztahu

$$p_d = \frac{1}{2} \rho c_s^2 \quad (3.5)$$

Střední celkový tlak před ventilátorem je pak dán vztahem

$$p_{cis} = p_{st1} + p_{d1} \quad (3.6)$$

### 3.1.5.4. Celkový tlak ventilátoru

Celkový tlak ventilátoru  $\Delta p_{cv}$  je dán rozdílem celkových tlaků na výtlačku  $p_{c2}$  a na sání ventilátoru  $p_{c1}$  vztahem

$$\Delta p_{cv} = p_{c2} - b \quad (3.7)$$

kde  $b$  je barometrický tlak

Jelikož měření celkových tlaků se provádí v určité vzdálenosti od některé příruby ventilátoru, tak jsou tyto tlaky o příslušnou ztrátu rozdílné od tlaků na přírubách. Proto se celkový tlak ventilátoru stanoví ze vztahu

$$\Delta p_{cv} = p'_{c2} - p'_{c1} + p_{z1} + p_{z2} \quad (3.8)$$

kde  $p'_{c1}$  je celkový tlak v měřeném místě před ventilátorem,  $p'_{c2}$  - celkový tlak v měřeném místě za ventilátorem,  $p_{z1}$  - ztráta celkového tlaku od měřeného průřezu k sací přírubě ventilátoru,  $p_{z2}$  - ztráta celkového tlaku od měřeného průřezu k výtlačné přírubě ventilátoru.

Velikost ztráty pro rovné potrubí se bere přibližně ze vztahu

$$p_z = \lambda \cdot \frac{l}{2} \cdot p_d \quad (3.9)$$

kde  $l$  je délka potrubí od příruby ventilátoru k měřenému průřezu

„Součinitel  $\lambda$  v uvedeném vztahu je nutné při přesných měřeních stanovit odměřením pro jednotlivé případy.“ Ve většině případů lze použít hodnoty  $\lambda = 0,02$  [7]

### 3.1.5.5. Pohon elektromotorem

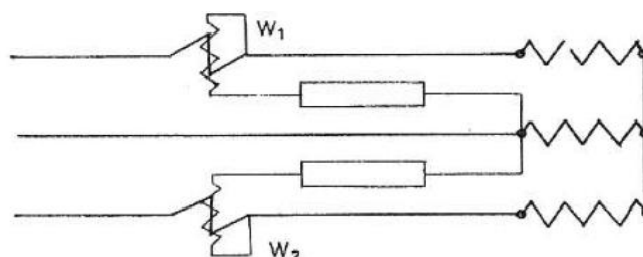
Jestliže je ventilátor spojen přímo s elektromotorem, zjistí se příkon ventilátoru změřením příkonu elektromotoru. Při známé účinnosti elektromotoru se stanoví příkon ventilátoru  $P$  ze vztahu:

$$P = P_2 = P_1 \cdot \eta_{c1} \quad (3.10)$$

Použijí se křivky účinnosti dodané výrobcem elektromotoru.[7]

### 3.1.5.6. Příkon elektromotoru

Jako pohon ventilátoru se nejčastěji používá asynchronní elektromotor. Základním způsobem měření příkonu třífázového elektromotoru vyhovuje metoda měření celkového příkonu elektromotoru dvěma wattmetry. Cívky musí být zapojeny na sdružené napětí. (obr. 3.1.5.1.)



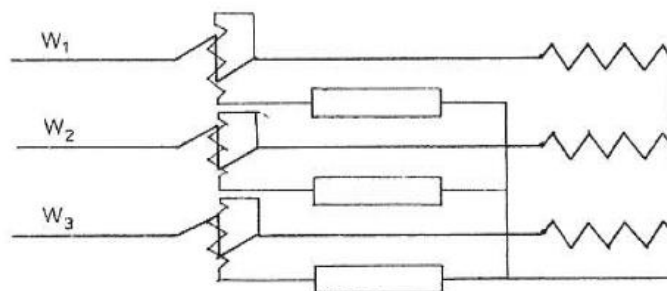
Obr. 3.1.5.1. Měření dvěma wattmetry [7]

### Příkon elektromotoru

$$P_1 = W_1 + W_2 \quad (3.11)$$

U třífázové metody se zapojí wattmetr do každé fáze. Příkon elektromotoru je dán součtem elektrických příkonů v každé fázi (obr. 3.1.8.4.)

$$P_1 = W_1 + W_2 + W_3 \quad (3.12)$$



Obr. 3.1.5.2. Měření třemi wattmetry [7]

K měření příkonu elektromotoru se používají tzv. wattmetrické soustavy (např. METRA QW II nebo QW III). Čte se pouze jediný údaj wattmetru, který po vynásobení konstantou, dá celkový příkon elektromotoru. Těmito soupravami se dá měřit zároveň proud i napětí ve všech třech fázích.[7]

### 3.1.5.7. Výkon elektromotoru

Stanoví se z naměřeného příkonu a křivky účinnosti elektromotoru.

### 3.1.5.8. Křivky účinnosti

„Není-li možnost použít přímého měření výkonu elektromotoru, stanoví se použitím křivky účinnosti, dodané výrobcem elektromotoru. Křivky platí pro jmenovité napětí, provozní napětí smí kolísat o  $\pm 5\%$  proti jmenovitému napětí. Změřený výkon se vynásobí účinností příslušnou statorovému proudu ze vztahu“ [7]

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{c1} \quad (3.13)$$

### 3.1.5.9. Účinnost ventilátoru

Celková účinnost ventilátoru  $\eta_{cv}$  je poměr vzduchového výkonu ventilátoru  $P_{vv}$  k výkonu pohonu  $P_{mv}$  přivedenému na oběžné kolo ventilátoru

$$\eta_{cv} = \frac{P_{vv}}{P_{mv}} \quad (3.14)$$

Dále celková účinnost na hřídeli ventilátoru  $\eta_{cvk}$  je poměr vzduchového výkonu ventilátoru  $P_{vv}$  k výkonu pohonu  $P_{mvh}$  přiváděnému na hřídel ventilátoru.

$$\eta_{cvk} = \frac{P_{vv}}{P_{mvh}} \quad (3.15)$$

A celková účinnost ventilátorového soustrojí  $\eta_{cvs}$  je poměr vzduchového výkonu ventilátoru  $P_{vv}$  k příkonu pohonu  $P_{mp}$ .

$$\eta_{cvs} = \frac{P_{vv}}{P_{mp}} \quad (3.16)$$

Pak pro celkový tlak ventilátoru  $\Delta P_{cv} > 3$  kPa je nutné respektovat vliv stlačitelnosti vzduchu. Výkon  $P_{vv}$  je pak dán vztahem

$$P_{vv} = Q_1 \frac{\kappa}{\kappa - 1} (b + p_{c1}) \left[ \left( \frac{b + p_{c2}}{b + p_{c1}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

Pro vzduch  $\kappa = 1,4$

[7] (3.17)

### 3.1.5.10. Charakteristické křivky ventilátoru

Jedná se o grafické znázornění závislosti celkového tlaku na průtoku. Toto se nazývá charakteristika ventilátoru.

Všechny body charakteristiky jsou vztaženy na stejnou hustotu vzdušiny a stejné otáčky podle příslušných vztahů:

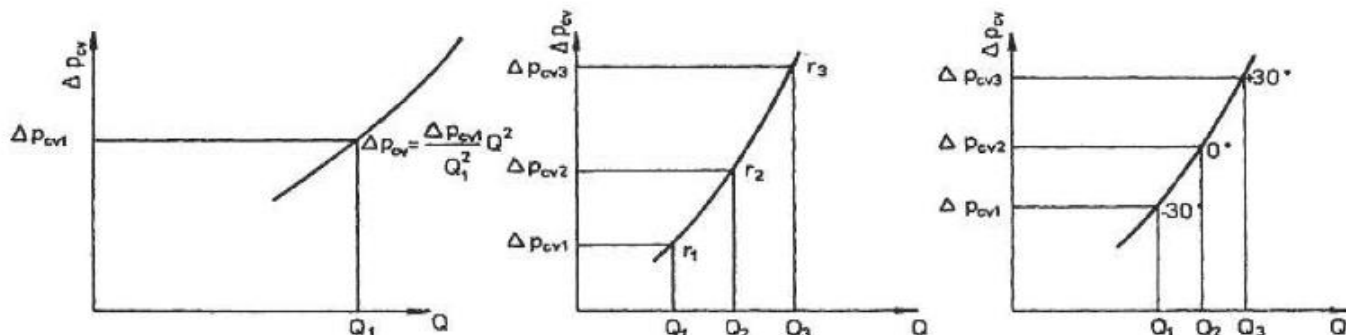
$$p_{cv} = p_{cv} \cdot \frac{\rho'}{\rho} \cdot \left( \frac{n'}{n} \right)^2$$
$$Q' = Q \cdot \frac{n'}{n} \quad (3.18)$$

Charakteristika se pak získá proložením křivky jednotlivými body, které jsou výsledkem měření při záměrném odporu sítě. Osy grafu tvoří osa x, kde se vynáší průtok Q, a osa y, kde se vynáší celkový tlak ventilátoru  $\Delta P_{cv}$ .

Měřením v provozu se získá jen část charakteristiky v pracovní oblasti ventilátoru, a to jen tehdy, je-li možnost měnit jakýmkoliv způsobem odporovou charakteristiku, která se získá:

- a) proložením kvadratické paraboly naměřeným bodem (obr. 3.1.8.5)
- b) změnou otáček ventilátoru při změně odporu sítě (obr. 3.1.8.6)

c) natáčením vstupních regulačních lopatek při nezměněném odporu sítě vzduchovodu



(obr. 3.1.8.7)

Obr. 3.1.5.3. [7]

Obr. 3.1.5.4. [7]

Obr. 3.1.5.5. [7]

### 3.1.5.11. Výkonové charakteristiky

Křivka v závislosti příkonu ventilátoru  $P$  na průtoku  $Q$ . Takto změřené body charakteristiky je nutné přepočítat před vnesením do grafu na zvolenou hustotu (obvykle  $\rho=1,200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a na otáčky  $n$  podle vztahu

$$P' = P \cdot \frac{\rho'}{\rho} \cdot \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3.19)$$

Charakteristiky účinnosti  $\eta_c = f(Q)$  je závislost celkové účinnosti ventilátoru na průtoku.[7]

### 3.1.5.12. Bezrozměrné charakteristiky

Používají se k porovnání ventilátorů různých typů a velikostí. Zde se použije bezrozměrné charakteristické křivky. To je závislost bezrozměrných čísel  $Q$ ,  $\Delta p_{cv}$ ,  $P$ .

Bezrozměrná charakteristika ventilátoru  $\psi = f(\varphi)$  je závislost tlakového čísla  $\psi$  na průtoku (objemovém) čísle  $\varphi$

Průtokové číslo je definováno vztahem

$$\varphi = \frac{24,3 Q}{d_2^3 \cdot n} \quad (3.20)$$

Tlakové číslo  $\psi$  je poměr celkového tlaku ventilátoru  $\Delta p_{cv}$  k dynamickému tlaku obvodové rychlosti  $u_2$

$$\psi = \frac{\Delta p_{cv}}{\frac{1}{2} \rho u_2^2} \quad (3.21)$$

kde  $u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$  je obvodová rychlost oběžného kola.

Bezrozměrná charakteristika  $\eta_{cv} = f(\varphi)$  je závislost celkové účinnosti ventilátoru  $\eta_{cv}$  na průtokovém čísle.[7]

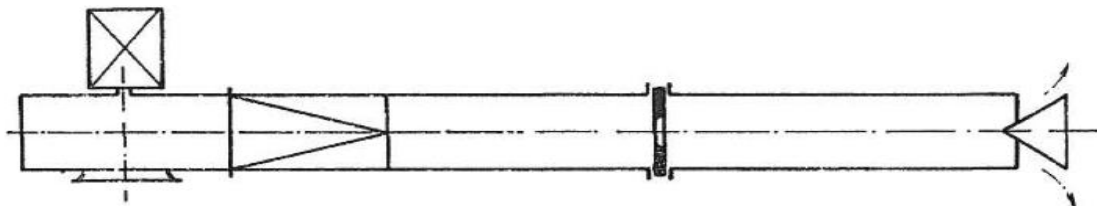
### 3.1.5.13. Požadované přesnosti měření na zkušebně

Veličina	Způsob měření	Přesnost
Objemový průtok	sondáž měřicí komora clonová trať	$f_0 = \pm 2\%$ $f_0 = \pm 3\%$ $f_0 = \pm 1,5\%$
tlak		$f_0 = \pm 1\%$
příkon	Dynamometr Dva wattmetry	$f_0 = \pm 2\%$ $f_0 = \pm 1\%$
otáčky		$f_n = \pm 0,5\%$
hustota		$f_q = \pm 1\%$

Tab. 3.1.5.1. Přesnosti měření [7]

### 3.1.5.14. Měřicí trať na výtlaku ventilátoru

Měřicí trať i škrťací ústrojí k regulaci průtoku (tedy celý odpor sítě) jsou připojeny na výtlak ventilátoru.



Obr. 3.1.8.8. Schéma měřicí tratě na výtlaku [7]

### 3.1.5.15. Zpráva o měření

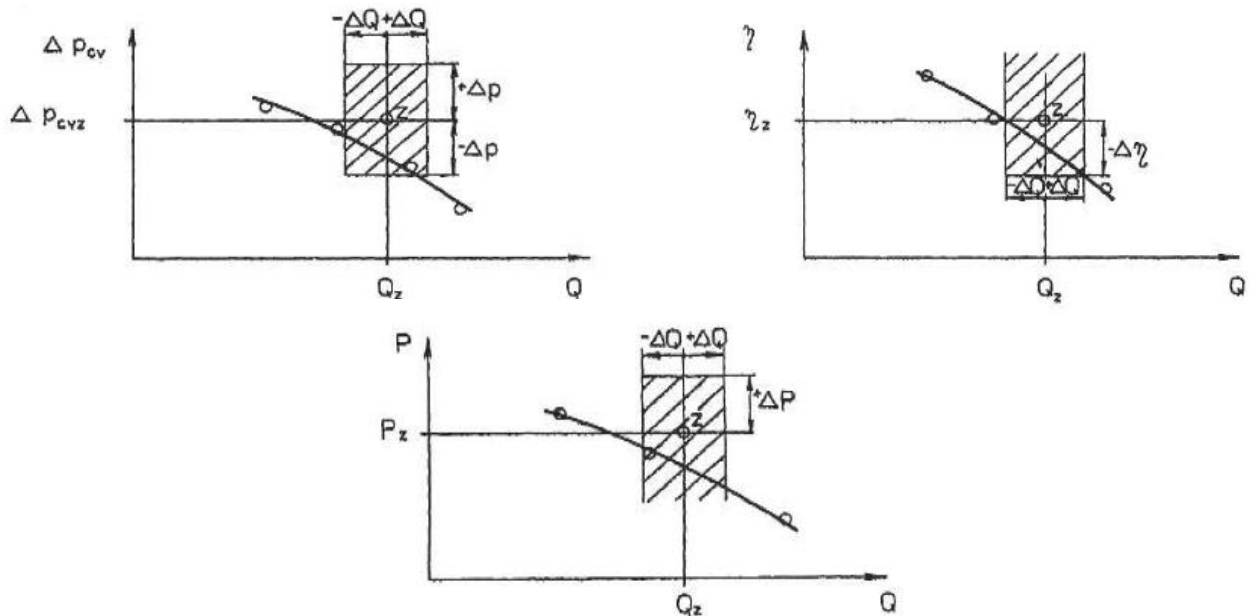
Zpráva musí obsahovat:

1. Popis umístění zařízení, jakou plní funkci, kdy, kde a kdo měření prováděl.
2. Všeobecný popis zkoušeného zařízení obsahující tyto přílohy:
  - a) popis ventilátoru (náčrtek a hlavní rozměry) včetně popisu regulace
  - b) popis pohonu a převodu
  - c) popis ostatního příslušenství
3. Všeobecný popis zkoušek – přílohy
  - a) popis metodiky zkoušek
  - b) zjištěné hodnoty
  - c) vypočítané hodnoty
  - d) srovnání zkouškou získaných hodnot s hodnotami záručními

- e) zjištění závady
- f) zjištění, zda ventilátor vyhovuje záručním hodnotám a s jakými úchytkami.

„Zpráva musí být podepsána osobou, která byla za měření odpovědna nebo jinou odpovědnou osobou.“

Ventilátor splňuje záruční výkonové hodnoty, jestliže jeho charakteristiky tlaku a účinnosti



popř. výkonu procházejí nebo se dotýkají tolerančního pole znázorněného na obr. 3.1.8.9. [7]

Obr. 3.1.8.9. Záruční výkonové hodnoty [7]

kde  $Q_z$  je záruční objemový průtok,  $\Delta p_{cvz}$  záruční celkový tlak ventilátoru,  $\eta_z$  záruční účinnost ventilátoru,  $P_z$  záruční příkon ventilátoru příp. pohonu ventilátoru,  $Z$  záruční bod. [7]



## 3.2. Konstrukční návrh dle volby ventilátoru

### 3.2.1. Výběr axiálních a radiálních ventilátorů z katalogu výrobce:

Ventilátor	Axiální nízkotlaký ventilátor	Diagonální nízkotlaký ventilátor	Radiální nízkotlaký ventilátor	Radiální středotlaký – vysokotlaký ventilátor
Obrázek				
	Obr. 3.2.1.1 [8]	Obr.3.2.1.2. [8]	Obr. 3.2.1.3. [8]	Obr. 3.2.1.4. [9]
Označení	Ventilátor do potrubí Vents VKOM z 200	Potravní ventilátor Vents TT 200 PRO	Ventilátor do potrubí Vents VKS 200	RD 72
Průměry potrubí	200mm 150mm	200mm 150mm 125mm 100mm	200mm 150mm 125mm 100mm	200mm 150mm
Celkový tlak max. $\Delta p_{cv}$ [Pa]	75 50	340 320 300 130	500 300 320 370	3500 3100
Průtok vzduchu [m <sup>3</sup> /h]	405 200	830/1040 405/520 220/280 145/175	930 460 355 250	2100/2550 2100/2550
Otáčky [min.]	1300 1300	1915/2380 1670/2450 1680/2460 2180/2358	2125 2725 2800 2820	2870 2870
Příkon [W]	43 36	76/108 30/60 30/60 21/23	173 80 79 80	1500 1500
Akustický tlak [dB/1m]	40 32	52 33 33 35	51 46 46 46	75/85 70/80
Teplota max [°C]	40 40	60 60 60 60	55 55 55 55	80 80
Hmotnost [kg]	1,80 2,40	6,40 2,20	4,30 2,60	62 62

		2,10 1,51	2,20 2,15	
<b>Provedení</b>	Kovové	Kovové plastové	Kovové plastové	kovové

Tab. 3.2.1.1. Výběr ventilátorů [8],[9]

Dle rozhodovací metody bude zjištěno, jaký materiál bude nejvíce vyhovovat pro konstrukci trati, dále pak o jaký typ potrubí z hlediska průřezu bude rozhodnuto. Na metodu bude mít největší vliv, které spojovací prvky budou používány. A na posledním místě, kde toto zkušební potrubí bude umístěno. Tato prostředí jednoznačně určuje norma ČSN 123061, která udává, jestli se bude jednat o zkušebnu v praxi, nebo o laboratorní podmínky. [7]

### 3.2.2. Potrubí vzduchovodů

Potrubí vzduchovodů je vyráběno z tenkého žárově pozinkovaného plechu tzn. (SPIRO potrubí). Tloušťka plechu je odstupňována podle skupiny a rozměrů potrubí, které jsou charakteristické pro různé provozní podmínky. V dnešní době ho však čím dál častěji nahrazuje potrubí plastové z materiálu (ABS, PVC aj.). Toto potrubí nese jisté výhody na rychlost montáže, manipulaci (nízká hmotnost) a jeho variabilitu (mnoho tvarovek). Je zde snadná možnost izolace samolepicích rohoží. Nevýhodou oproti pozinkovanému plechu je, že se plastové potrubí vyrábí pouze do průměru 150 mm a u hranatého (plochého) potrubí do rozměru 90x220 mm. Velkou nevýhodou u hranatého tenkostěnného potrubí je, že netěsní v hrdlech a má velkou náchylnost k deformacím. [1]

Jmenovité rozměry potrubí vzduchovodů z ocelového plechu (mm) podle českých norem v tab. 3.2.1.2.

Průměr		70	80	90	100	110	125	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450	
Tloušťka	I	∅	0,5											0,6					
		∅	-			0,6						0,8							
	II	∅	0,8			1,0						1,3			1,5				
		∅	-			1,0						1,3			1,5				
	SPIRO		-	0,5			0,7						0,9			-			
	VTK		-	0,8			1,0						-						
Průměr		500	560	630	710	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2240	2500			
Tloušťka	I	∅	0,8				1,0				1,3		-						
		∅	0,8			1,0			1,3		1,5	-							
	II	∅	1,5				2,0				2,5		-						
		∅	1,5			2,0			-		-								
	SPIRO		0,9			-				-									
	Podtržené rozměry nejsou doporučeny pro čtyřhranné potrubí. Potrubí SPIRO se vyrábí v délkách podle potřeby až do 4 m.																		

Tab. 3.2.1.2. Jmenovité rozměry potrubí z ocelového plechu [1]

Průřez potrubí	m	obvod %	poměr stran	hmotnost %	tlaková ztráta %	cena montáže %
kruhový	d = 0,4	89	-	66	90	66
čtvercový	0,355 x 0,355	100	1,0	100	100	100
obdelníkový	0,25 x 0,5	106	2,0	116	107	114
	0,16 x 0,8	135	5,0	158	143	174
	0,1 x 1,25	190	12,5	231	222	350

Tab. 3.2.1.3. Porovnání čtyřhranného potrubí s kruhovým pro stejný průtok 2600 m<sup>3</sup>/h a stejný průřez 0,12 m<sup>2</sup> [1]

### 3.2.3. Výběr kruhového nebo čtyřhranného potrubí

Z tabulky 3.1.1.3. je vidět, že kruhové potrubí vzduchovodu má výhodné parametry oproti čtyřhrannému potrubí. Mimo tyto přednosti se kruhové potrubí méně zanáší prachem a je menším zdrojem aerodynamického hluku. Proto se používají pro dopravu vzdušiny s vyššími rychlostmi. Výroba čtyřhranných tvarovek není náročná, a proto se jich vyrábí na světě ¾. Ale ve vyspělých státech tvoří kruhové potrubí až 70% všech vzduchovodů. Čtyřhranné se používá z důvodů, že dobře kopíruje stěny stavby. Dále se používají novodurové vzduchovody (a ventilátory), slouží k odsávání vysoce korozivního vzduchu a plynu z prostor. Teplota plynu nebo vzduchu či okolí nesmí přestoupit 60°C. Při překročení této teploty se novodur deformuje.[1]

#### Dosavadní výběr a omezení:





- axiální a radiální ventilátory
- průřez potrubí (kruhové potrubí)
- maximální průměr 150mm

#### Dle rozhodovací metody se rozhodnu pro:

- materiál potrubí
- spojky potrubí
- tloušťka potrubí
- výběr tvarovek
- výběr škrticích elementů (škrticí klapky, clony)

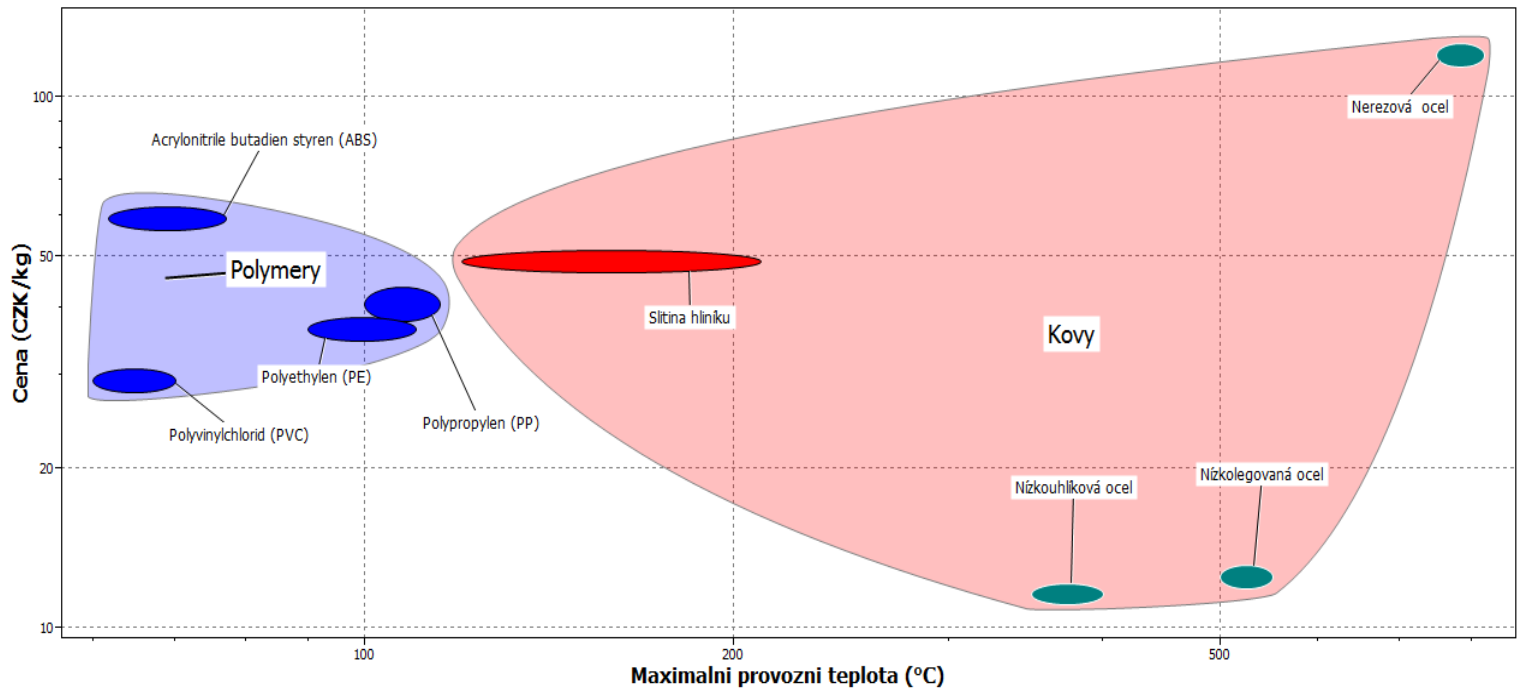
### 3.2.4. Výběr materiálu potrubí

Materiál potrubí musí vyhovovat snadné montáži potrubí tzn., že u tohoto materiálu je nutné mít nízkou hmotnost pro snadnou a rychlou montáž a demontáž (stavebnice) potrubí. Také je nutno počítat s tím, že se bude jednat o vysokotlaké ventilátory, což obnáší, že daný materiál musí odolávat tlakům nad 3kPa. Neboť se bude jednat o prostředí mimo laboratoř, je žádoucí, aby vybraný materiál odolával nízkým, ale i vysokým teplotám, které se mohou objevit v pracovních podmínkách v hale.

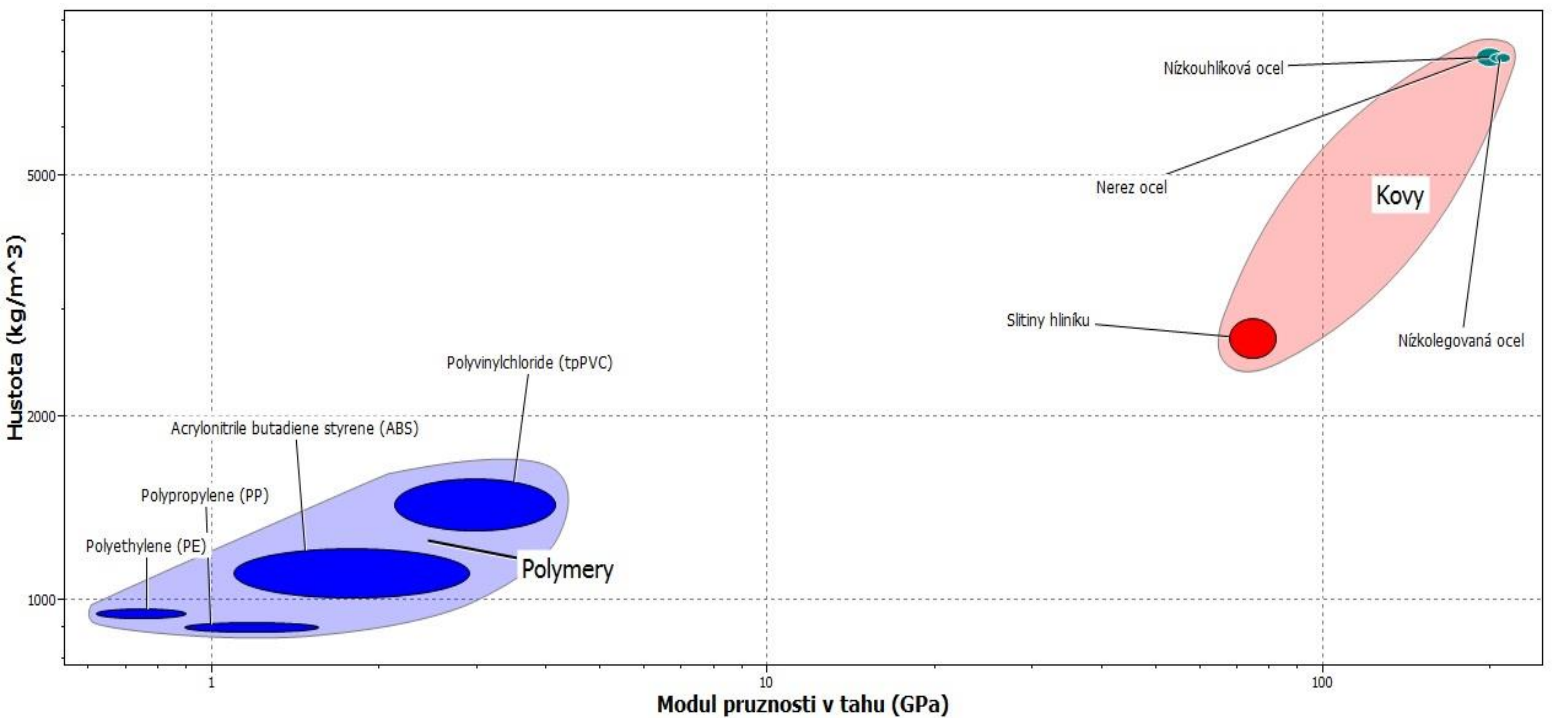
Název potrubí	SPIRO POTRUBÍ	PLASTOVÉ POTRUBÍ	PLASTOVÉ POTRUBÍ	FLEXI POTRUBÍ	Jednotky
<b>Materiál potrubí</b>	Žárově pozinkovaný plech -chem. označení (DX51D+Z275-MAC) (W.Nr.1.0917) (ČSN EN 10346) - dobrá odolnost proti korozivnímu prostředí	Plast – ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) - houževnatý plast, který odolává tlakovým rázům - má velký útlumový součinitel hluku	Plast – PVC (Polyvinylchlorid) - výborná odolnost proti většině kyselin - výborná odolnost proti agresivním a korozivním prostředím	-Slitina hliníku EN AW 6060 -chem. označení (AlMgSi0,5) (ČSN 424401) - výborná ohebnost a manipulace	[-]
<b>Obrázek</b>	 Obr. 3.1.3.1.[10]	 Obr. 3.1.3.2.[10]	 Obr. 3.1.3.3.[8]	 Obr. 3.1.3.4.[8]	[-]
<b>Vlastnosti</b>	-Průměr 150mm -Vhodný do průmyslových hal	-Průměr 150mm	.Průměr 150mm	- Průměr 150mm -Tažený hliník -Ohebný materiál	[-]
<b>Teplotní odolnost</b>	-50 až +100	-40 až +65	-10 až +60	-30 až +250	[°C]
<b>Max. přetlak</b>	6300	1000-1600	1000-1600	2000	[Pa]
<b>Max podtlak</b>	2500	-	-	-	[Pa]
<b>Hmotnost</b>	1,4	0,32	0,41	0,37	[kg/m]
<b>Tlaková ztráta</b>	20-30	-	-	-	[Pa/m]
<b>Montáž</b>	SNADNÁ	SNADNÁ	SNADNÁ	SNADNÁ	[-]
<b>Chemická odolnost</b>	STŘEDNÍ	MALÁ	VYSOKÁ	MALÁ	[-]
<b>Třecí ztráty</b>	$1,33 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$	[-]
<b>Mechanická odolnost</b>	VYSOKÁ	STŘEDNÍ	STŘEDNÍ	STŘEDNÍ	[-]
<b>Spojovací prvky</b>	RYCHLOSPOJKY	RYCHLOSPOJKY	RYCHLOSPOJKY	SPOJKY	[-]
<b>cena</b>	185	220	184	125	[Kč/m]

Tab. 3.2.4.1. Orientační srovnání materiálů [8],[10],[11],[12],[13]

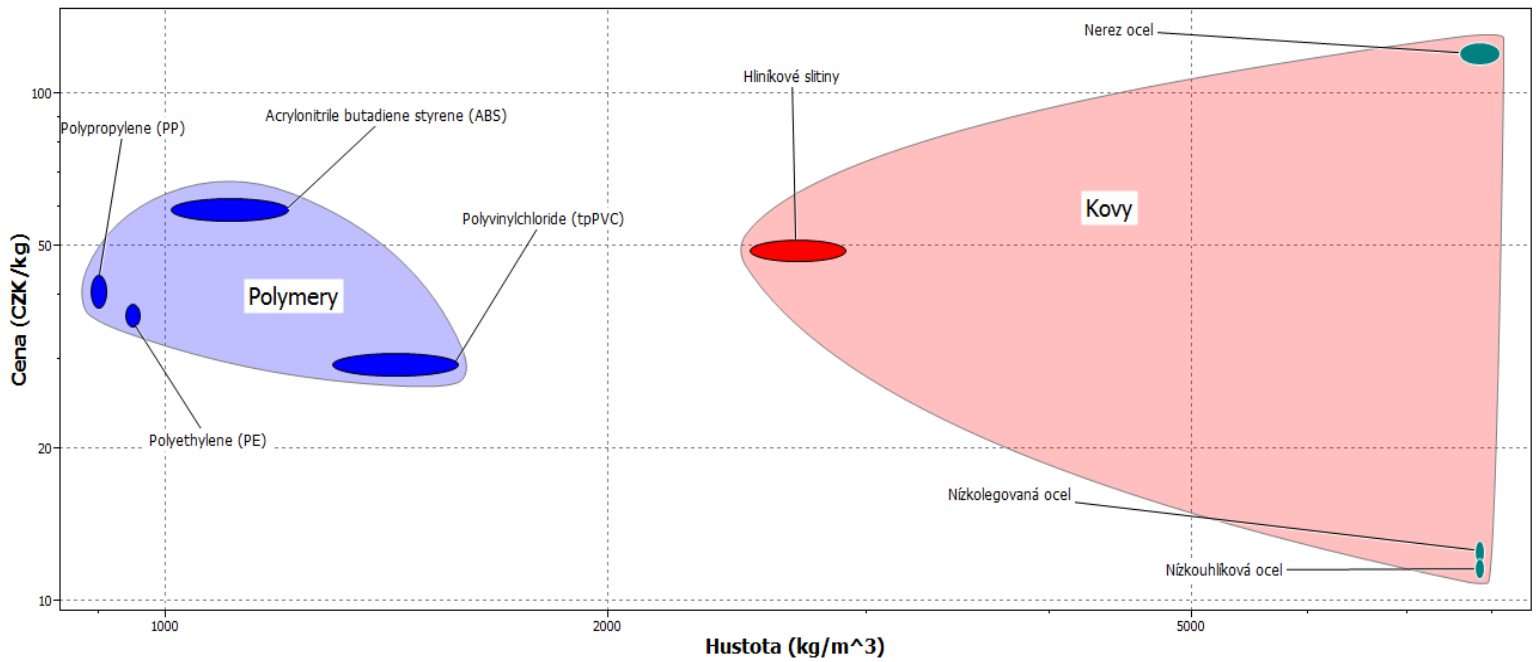
### Mapa materiálů



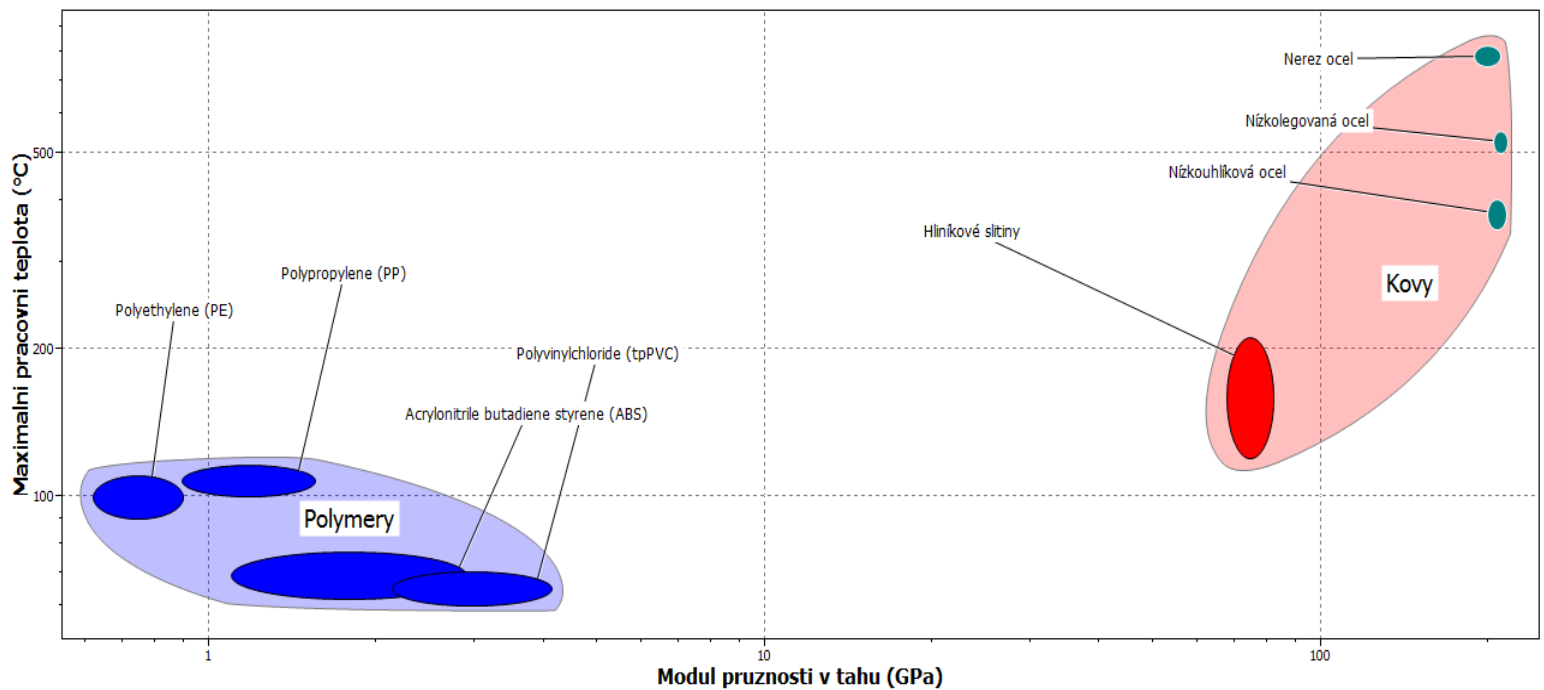
Obr. 3.2.4.1. Porovnání ceny a maximální teploty materiálu [12]



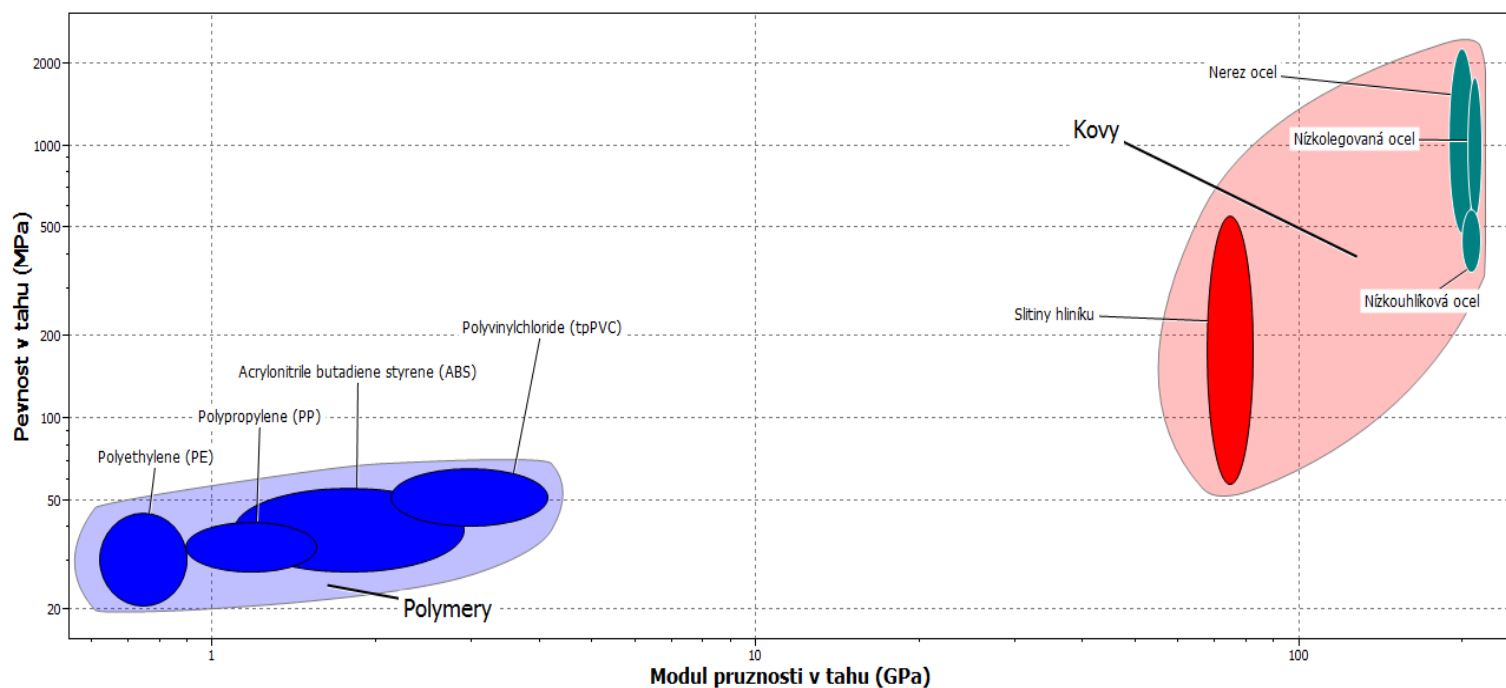
Obr. 3.2.4.2. Porovnání hustoty a modulu pružnosti v tahu [12]



Obr. 3.2.4.3. Porovnání ceny a hustoty [12]



Obr. 3.2.4.4. Porovnání maximální pracovní teploty a modulu pružnosti v tahu [12]



Obr. 3.2.4.5. Porovnání pevnosti v tahu s modulem pružnosti v tahu

### Rozhodovací bodová tabulka

V hodnotící tabulce budou hodnoceny materiály od 1-4 bodů z předchozí tabulky hodnot, kde 1 – je nejhorší a 4 – je nejlepší. Dalším bodem bude důležitost výběru kritéria pro měřicí trať a body budou násobeny podle důležitosti. Zase jako v předchozím případě od (1 – 5) bodů. Nejdůležitějším kritériem pro variabilitu tratě bude (5) hmotnost, (4) spoje, (3) třecí ztráty, (2) max. přetlak, (1) ostatní.

Materiál	SPIRO POTRUBÍ	ABS POTRUBÍ	PVC POTRUBÍ	FLEXI POTRUBÍ
<b>VLASTNOSTI</b>	(1)x2	(1)x2	(1)x4	(1)x1
<b>TEPLOTNÍ ODOLNOST</b>	(1)x3	(1)x2	(1)x1	(1)x4
<b>MAX. PŘETLAK</b>	(2)x4	(2)x2	(2)x2	(2)x3
<b>HMOTNOST</b>	(5)x2	(5)x4	(5)x3	(5)x4
<b>CHEMICKÁ ODOLNOST</b>	(1)x3	(1)x2	(1)x4	(1)x2
<b>TŘECÍ ZTRÁTY</b>	(3)x3	(3)x4	(3)x4	(3)x2
<b>MECHANICKÁ ODOLNOST</b>	(1)x4	(1)x3	(1)x3	(1)x3
<b>SPOJE</b>	(4)x4	(4)x4	(4)x4	(4)x3
<b>CENA</b>	(1)x3	(1)x1	(1)x3	(1)x4
<b>Σ (SUMA)</b>	58	62	63	58

Tab. 3.2.4.2. Bodovací tabulka

Z výsledné tabulky jsme zjistili, že obecně jsou pro konstrukci variabilní tratě vhodné materiály z plastu. Nejenže mají nízkou hmotnost, ale jejich součinitel tření je nejmenší. Také dosahují i výborných mechanických a chemických vlastností ohledně odolnosti materiálu. Malou nevýhodou je, že plastové vzduchovody se vyrábějí do průměru 150 mm, kterým jsme tedy omezení.

### 3.2.5. Konstrukční výpočet vzduchotechnické trati

Jelikož je výběrem plastové potrubí, tak to s sebou nese jisté výhody v součiniteli tření  $\lambda$ , ale také jisté nevýhody, kde jsme v konstrukčním návrhu omezení průměrem potrubí do 150 mm, což ponese jisté tlakové ztráty  $\Delta p_z$ .

Součinitel tření  $\lambda$  závisí na Reynoldsově čísle  $Re$  a drsnosti potrubí  $\varepsilon$  [mm], kde  $Re$  je ze vztahu:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} [-] \quad (3.29)$$

Kritické Reynoldsovo číslo pro kruhové potrubí  $Re_{krit} = 2300$ .

Pokud  $Re < 2300$  jedná se o laminární proudění – dochází ke směšování

Pokud  $Re > 2300$  jedná se o turbulentní proudění, kde molekuly se shlukují do velkého počtu molekulových částic – makročástic a v důsledku větší hmotnosti vytváří větší účinek třecích sil.

$w$  (c) – střední rychlost proudění vzdušiny [m/s]

$d$  – průměr potrubí [m]

$\nu$  – kinematická viskozita [ $m^2/s$ ]

$\nu = 15,07 \cdot 10^{-6}$  [ $m^2/s$ ] – kinematická viskozita pro standartní vzduch

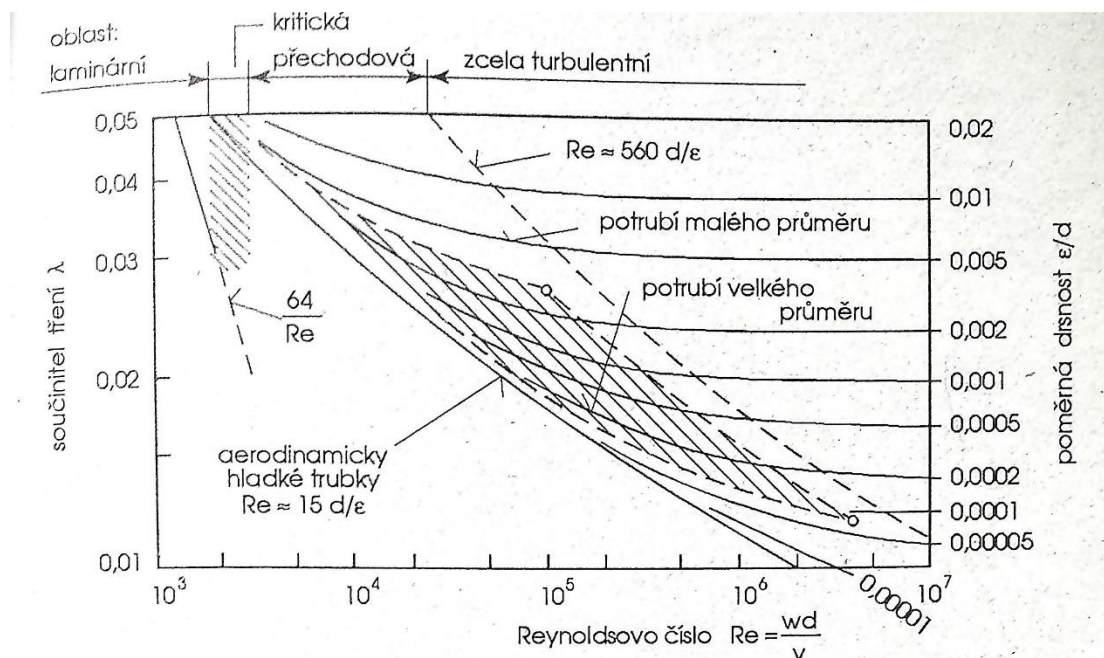
[1]

#### Poměrná drsnost

$$\frac{\varepsilon}{d} [-] \quad (3.30)$$

Je poměr  $\varepsilon$  [mm] k průměru potrubí  $d$  [mm]. [1]





Obr. 3.2.5.1. Závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle  $Re$  a poměrné drsnosti  $\epsilon/d$  při proudění potrubím kruhového průřezu [1]

Součinitel tření  $\lambda$  je funkcí  $Re$  a průměrné drsnosti  $\epsilon/d$  [-].

$$\lambda = f(Re, \epsilon/d) [-]$$

(3.31)

Provedení	$\epsilon$ (mm)
Pozinkovaný ocelový plech, 12 přírubových spojů na 10 m délky	0,15
Betonový kanál:	
kovové bednění, pečlivě hlazená cementová omítka	0,2 - 0,3
bednění z hoblovaných prken, hlazená omítka	0,3 - 0,8
nehoblované prkenné bednění	0,8 - 2
hrubý povrch, vystupující štěrky, prohlubně, přesazení bednění	2 - 10
Azbestocement	0,2 - 0,6
Omítnuté rabicové pletivo	10 - 15
Asfaltovaná litina	0,12
Keramika s glazurou	1,40
Překližka	0,6
Sklo, vinidur, fólie z plastů	0,0015 - 0,01
Tažené trubky z mědi, mosazi, hliníku	0,01 - 0,06

Tab. 3.2.5.2. Drsnosti potrubí

### 3.2.5.1. Dimenzování potrubí tratě

Z tabulky 3.2.5.2. jsme našli drsnost plastového potrubí  $\varepsilon = 0,01[\text{mm}]$

Dle výpočtu  $\chi = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,01}{150}$  jsou hodnoty pro kruhové potrubí do 150mm a dalších průměrů dle tab. 3.2.5.2.[1]

Průměr potrubí [mm]	$\chi$
150	$6.666667 \cdot 10^{-5}$
125	0,000080
100	0,000100

Tab. 3.2.5.2. Poměr drsnosti plastového potrubí k průměru potrubí

Jako první je nutno vypočítat přibližnou střední rychlost pro jednotlivé ventilátory ( $c_s$ ) w [m/s] To bude provedeno dle průměru potrubí a garantovaného průtoku vzduchu ventilátorem od výrobce. Ze vztahu (3.11) určíme w ( $c_s$ ). [7]

Ventilátor		Průměr potrubí [m]	Průtok vzduchu Q [m <sup>3</sup> /h]	Střední rychlost vzdušiny potrubí w ( $c_s$ ) [m/s]
1	3.2.1.1.	0,150	200	3,1438
2	3.2.1.2.	0,150	520	8,1738
		0,125	280	6,3379
		0,100	175	6,1893
3	3.2.1.3.	0,150	460	7,2307
		0,125	355	8,0355
		0,100	250	8,8419
4	3.2.1.4.	0,150	2100	33,0080

Tab. 3.2.5.3. K průměrům potrubí jsou přiřazeny průtoky vzduchu od výrobce ventilátorů a vypočítaná střední rychlost w ( $c_s$ )

Pro výpočet Re použijeme vypočítanou rychlost w a dle vzorce (3.2.1)

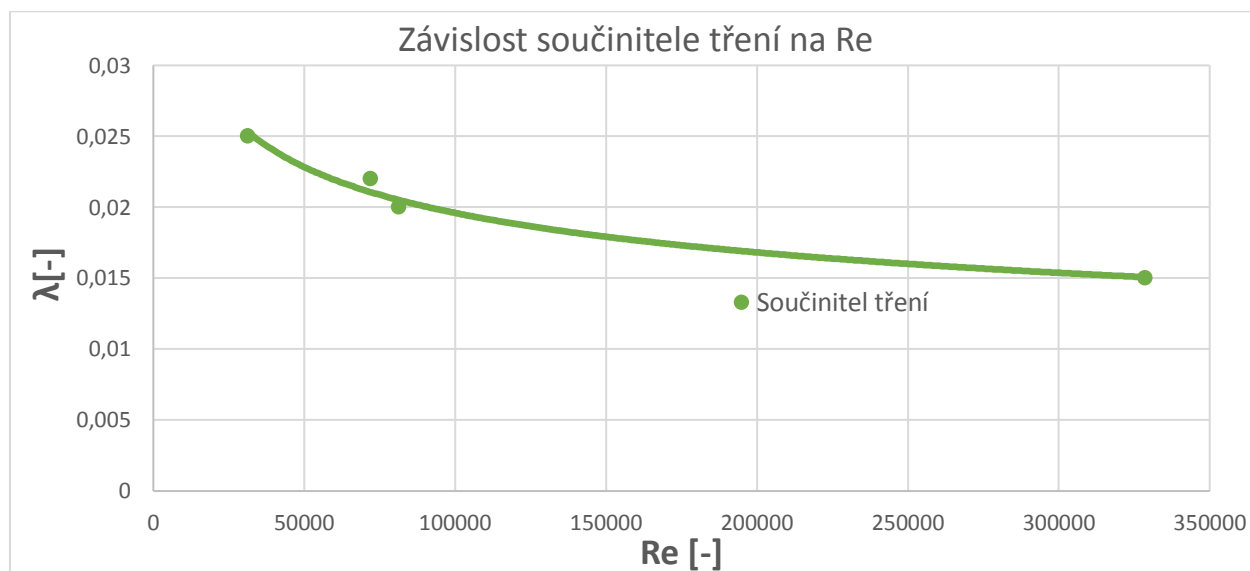
Průměr potrubí [m]	Ventilátor	Střední rychlost vzdušiny potrubí w ( $c_s$ ) [m/s]	Průřez S [m <sup>2</sup> ]	Re [-]
0,150	1	3,1438	0,017671	31291,9
	2	8,1738		81354,1
	3	7,2307		71971,1
	4	33,0080		328546,8
0,125	2	6,3379	0,012271	52570,5
	3	8,0355		66651,4
0,100	2	6,1893	0,007853	41070,3
	3	8,8419		58672,2

Tab. 3.2.5.4. Výpočet Re

Z hodnot poměrné drsnosti  $\varepsilon/d$  a Re se dle grafu určí  $\lambda$ , kde tyto hodnoty odměříme.

Průměr potrubí [mm]	Ventilátor	Q [m <sup>3</sup> /h]	$\varepsilon/d$ [-]	Re [-]	$\lambda$ [-]	Proudění
150	1	200	$6.666667 \cdot 10^{-5}$	31291,9	0,025	krit. přechod.
	2	520		81354,1	0,020	krit. přechod
	3	460		71971,1	0,022	přechodová
	4	2100		328546,8	0,015	krit. přechod.
125	2	280	0,000080	52570,5	0,024	ktit. přechod.
	3	355		66651,4	0,023	krit. přechod.
100	2	175	0,000100	41070,3	0,025	přechodová
	3	250		58672,2	0,0245	přechodová

Tab. 3.2.5.5. Souhrnná tabulka přibližných hodnot součinitele tření  $\lambda$  potrubí zjištěné z grafu 3.2.5.1. na průtoku Q



Graf 3.2.5.1. Závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle

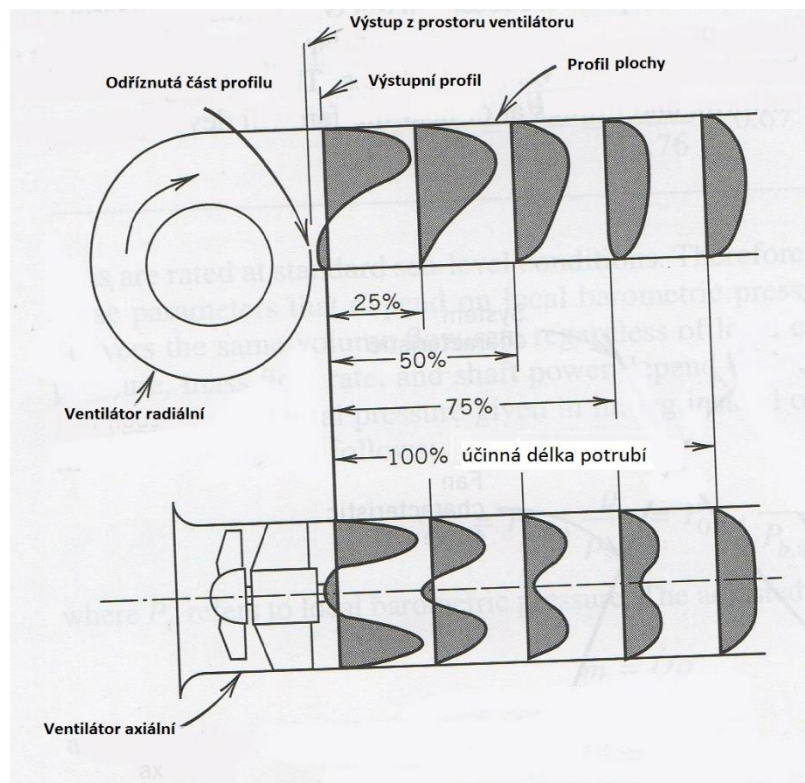
Z tohoto výpočtu zjistíme, že nejpříjemnější pro zkušební trať je průměr plastového potrubí 150 mm. Z této tabulky vidíme, že použitím větších průměrů se potrubí blíží ustálenému stavu, ale laminárního stavu nedosáhne, součinitel tření se zmenšuje za předpokladu, že průtok Q se nemění.

### Výběr potrubí 150 mm.

Výběrem potrubí o průměru 150 mm je nutné ještě znát délku tohoto potrubí za ventilátorem, kde se přiblížíme k ustálenému stavu dosažením alespoň kritické přechodové oblasti nebo oblasti přechodové. Z normy ČSN 123061 a odborné literatury je známo, že ustáleného

profilu, a tedy potřebné délky rovného potrubí, dosáhneme více jak osminásobku průměru potrubí.

Tedy dle obrázku se přibližně pohybovat alespoň mezi 85% - 100% potrubí se sklonem



přechodových elementů do max. 15% a sbíhajících elementů max. 7%.

Obr. 3.2.5.2 Profil proudění v potrubí za ventilátorem [19]

$$l > 8D$$

$$l > 8 \cdot 150$$

$$l > 1200 \text{ mm}$$

volíme

$$l = 1500 \text{ mm}$$

Dále z těchto výsledků můžeme vypočítat tlakovou ztrátu na metr potrubí a následně na celou délku tratě bez odporů (clonek, škrticích orgánů).

### 3.2.5.2. Výpočet tlakových ztrát potrubí

Výpočet tlakových ztrát (ve smyslu Bernoulliovy rovnice (2.5)) se projeví poklesem statického tlaku. Díky tření se část mechanické energie přemění na teplo. [1]

Tlakové ztráty potrubí vypočteme ze vztahu

$$\Delta p_z = \lambda \left( \frac{U}{4A} \right) l \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (3.32)$$

kde  $l$  - délka potrubí tratě [m],  $A$  – průřez potrubí [m<sup>2</sup>],  $U$  – obvod potrubí [m],  $\rho$  – standardní hustota vzduchu 1,2 [kg/m<sup>3</sup>]

Ukázkový výpočet pro jeden metr potrubí bez odporů.

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= \lambda \left( \frac{U}{4A} \right) l \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \lambda \left( \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \right) l \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = \lambda \left( \frac{1}{d} \right) l \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \\ &= 0,025 \left( \frac{1}{0,150} \right) 1 \cdot 1,2 \cdot \frac{3,1438^2}{2} = 0,98834 \text{ Pa} \end{aligned}$$

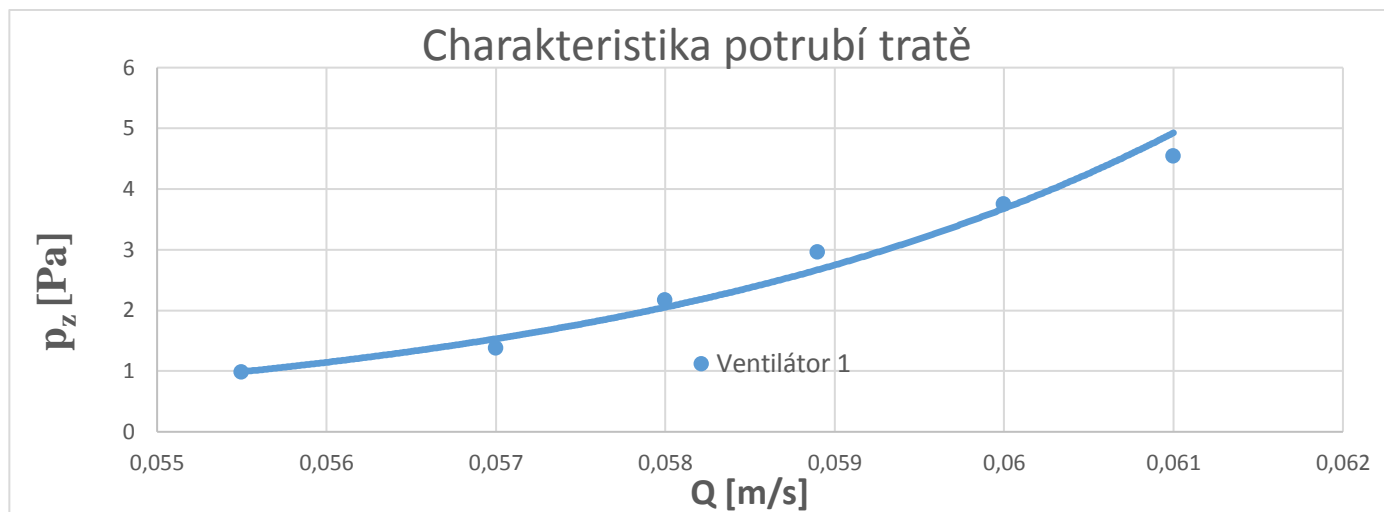
Z výpočtu jsme zjistili ztrátu pro jeden metr potrubí pro ventilátor 1.

Ventilátor	$\lambda$ [-]	$w$ (cs) [m/s]	$l$ [m]	$\Delta p_z$ [Pa]
1	0,025	3,1438	1	0,98834
2	0,020	8,1738	1	5,34488
3	0,022	7,2307	1	4,60090
4	0,015	33,0080	1	65,3716

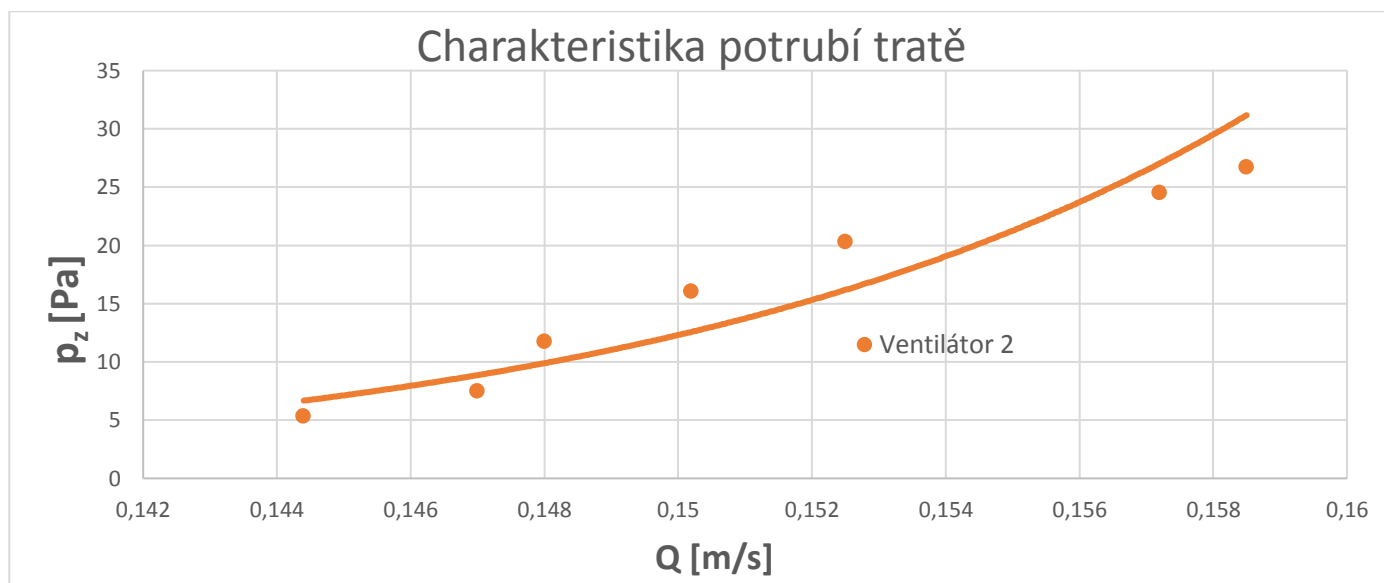
Tab. 3.2.5.6. Výpočet tlakových ztrát  $\Delta p_z$  na 1 m potrubí

Ventilátor	$l$ [m]	$\Delta p_z$ [Pa]	Ventilátor	$l$ [m]	$\Delta p_z$ [Pa]
1	1,4	1,3836	2	1,4	7,4828
	1,8	1,7790		1,8	9,6207
	2,2	2,1743		2,2	11,7587
	2,6	2,5697		2,6	13,8966
	3,0	2,9650		3,0	16,0346
	3,4	3,3603		3,4	18,1725
	3,8	3,7557		3,8	20,3105
	4,2	4,1510		4,2	22,4484
	4,6	4,5464		4,6	24,5864
	5,0	4,9417		5,0	26,7244
3	1,4	6,6026	4	1,4	91,520
	1,8	8,4890		1,8	117,669
	2,2	10,375		2,2	143,817
	2,6	12,261		2,6	169,966
	3,0	14,148		3,0	193,115
	3,4	16,034		3,4	222,263
	3,8	17,921		3,8	248,412
	4,2	19,807		4,2	274,561
	4,6	21,694		4,6	300,709
	5,0	23,580		5,0	326,858

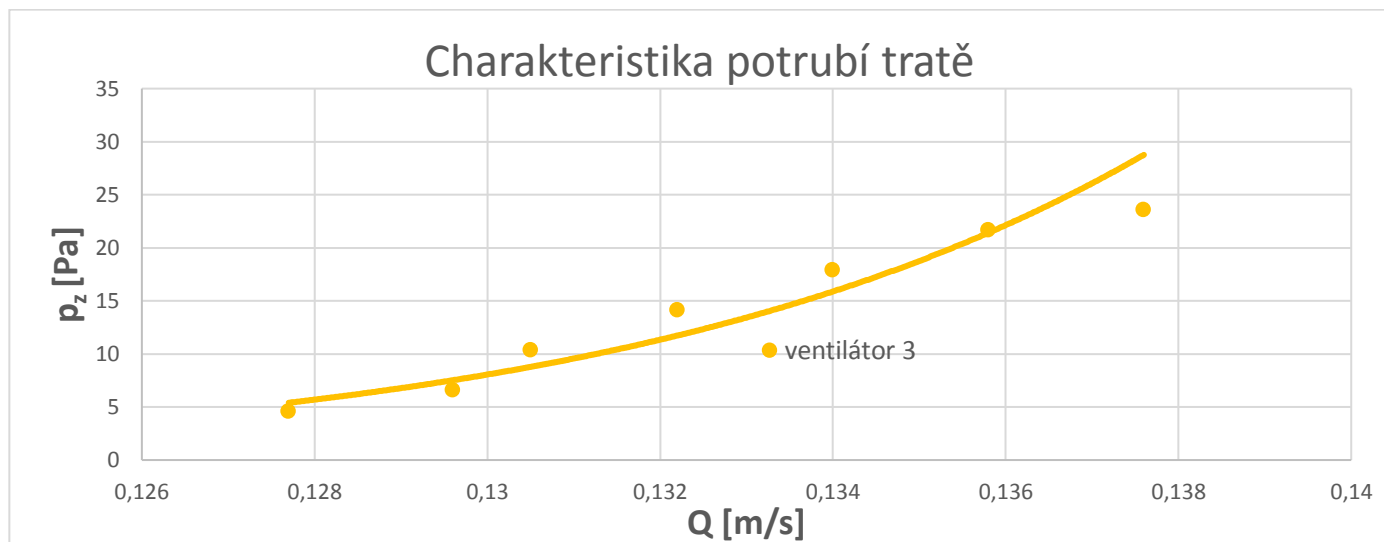
Tab. 3.2.5.7. Výpočet tlakových ztrát po 0,4 m potrubí



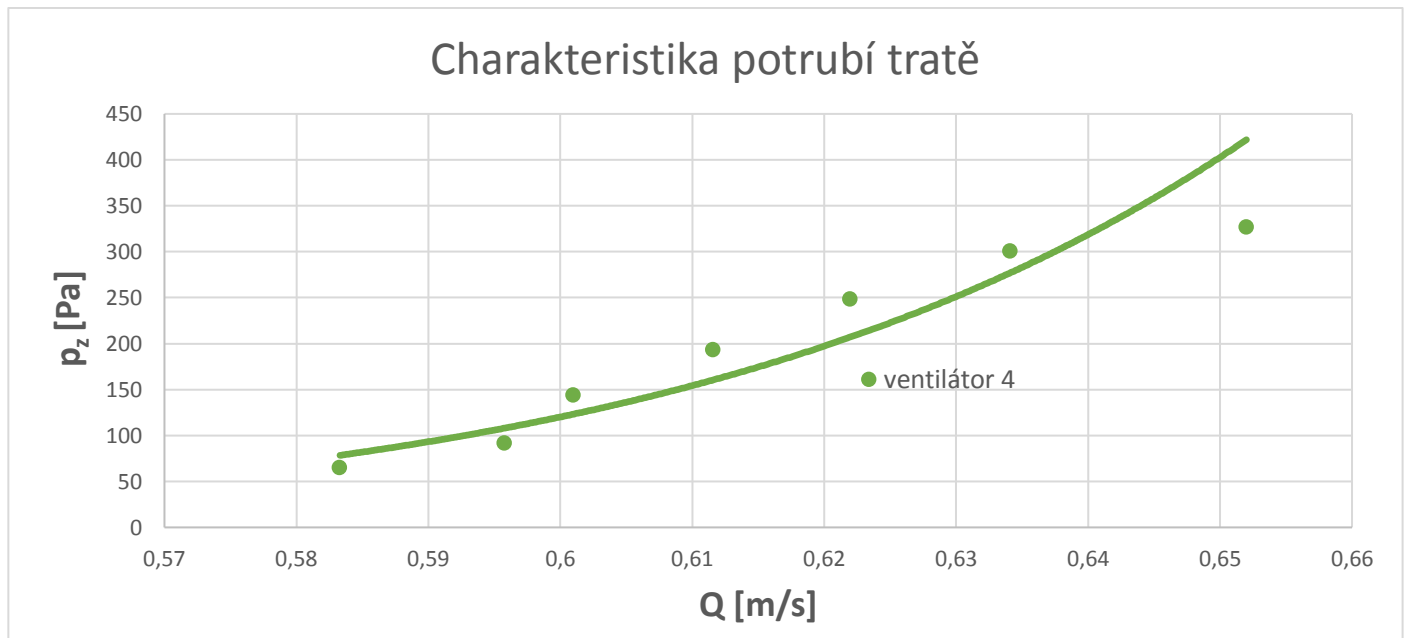
Graf 3.1.5.2. Závislost tlakové ztráty na průtoku vzdušiny



Graf 3.1.5.3. Závislost tlakové ztráty na průtoku vzdušiny



Graf 3.1.5.4. Závislost tlakové ztráty na průtoku vzdušiny



Graf 3.1.5.5. Závislost tlakové ztráty na průtoku vzdušiny

### 3.2.5.3. Průřezová měřidla

K měření průtoku se používají dva typy prvků. Prvek clony a prvek dýzy. Jelikož chceme zabezpečit co nejlepší variabilitu clonové tratě, je výhodné použití prvku clony. Dýzy lze už v prvopočátku vyřadit, neboť dýzy se do potrubí zabudovávají. Jejich výměna je složitá a celá armatura i její konstrukce je určená na pevné a stálé aplikace. Proto zde bude využito vlastností konstrukce a aplikace clony.

U clonové trati je možnost využití dvojí konstrukce. Budeme-li uvažovat o měření celé škály všech ventilátorů (nizkotlakých, středotlakých, vysokotlakých) a jejich průtočných množství.

Typy provedení dle normy ČSN EN ISO 5167-2.:

1. Clony s koutovými odběry – měníme clonu, měříme pomocí sady clon
2. Clony s bodovými odběry – měníme obrubu s clonou

[20]

Přikloníme se tedy k prvnímu případu.

Kotouč clony bude tedy sevřen mezi dvěma obrubami a těsnění bude provedeno na straně menšího tlaku.

#### Výpočet průřezového měřidla (clony)

Provedeno dle normy ČSN EN ISO 5167-2.

Pomocí clony budeme měřit objemový průtok vzdušiny za ventilátorem.

Průměr tratě 150 mm už máme vypočítaný.

Jako první se určí tloušťky  $E$  a  $e$  clony



Obr. 3.2.5.3 Ukázka clony s koutovými odběry od firmy JSP [20]

kde:

*Tloušťka otvoru stěny  $e$  musí být mezi  $0,005D$  a  $0,02D$*

$$e = 0,01 \cdot 150 = 1,5 \text{ mm}$$

*Tloušťka  $E$  clonkového kotouče musí být mezi  $e$  a  $0,05D$*

$$e > E < 0,05D$$

$$1,5 > E < 7,5$$

$$E = 5 \text{ mm}$$

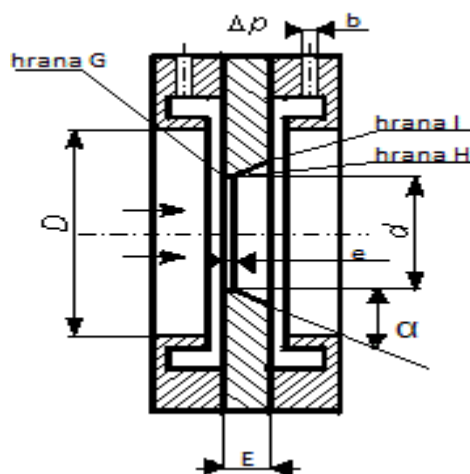
Jestliže je  $D < 200$  mm, rozdíl mezi hodnotami  $E$  měřenými v libovolném bodě clonového kotouče nesmí být větší než 0,2 mm.[14]

### Úhel zkosení $\alpha$

Jestliže je tloušťka  $E$  clonového kotouče větší než tloušťka  $e$ , pak musí být kotouč na zadní straně zkosen.

*Úhel zkosení  $\alpha$  musí být  $45^\circ \pm 15^\circ$*

$$\alpha = 30^\circ$$



Obr. 3.2.5.4 Návrh clony s koutovými odběry



## Hrany G, H a I

Přední hrana G musí být ostrá, tzn. pokud poloměr zaoblení hrany není větší než  $0,0004D$ .

Je-li  $D \geq 25$  mm, je tento požadavek pokládán za splněný, jestliže se nejeví po vizuální stránce na hraně světelný odraz.

Dále přední strana musí být pravoúhlá, podmínka je splněna, jestliže úhel mezi otvorem clony a čelní stranou clonového kotouče je  $90^\circ \pm 0,3^\circ$ , kde otvor clony je část clonového kotouče mezi hranami G a H.[14]

Hrany H a I se nacházejí v oblasti odtrhávajícího se proudu, proto není na ně kladen takový důraz jako na zaoblení na hranu G. Hodnoty hrany H a I volíme sami v rámci vizuální kvality.

## Průměr clony d

Průměr clony musí být větší nebo roven 12,5 mm. Poměr průměrů  $\beta = d/D$  musí být větší nebo roven 0,10 a menší nebo roven 0,75.[14]

$$d > 12,5$$

volím

$$60 > 12,5$$

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{60}{150} = 0,4$$

vyhovuje

Velikost průměru clony je nutné brát jako střední hodnotu nejméně čtyř průměrů.

Materiál clony je možno vyrobit z libovolného materiálu, tak aby byl v souladu s měřením průtoku podle této normy. Zde je možnost použití výrobků od výrobců nebo vlastní specifické konstrukce.

## Odběry tlaků

Pro odběr tlaku musí být zabudován před a za clonou alespoň jeden odběr tlaku v některém z normalizovaných míst ve vzdálenostech  $D$  a  $D/2$ , přírubový a koutový odběr.

Použijeme jednu clonu pro několik párů odběrů tlaku, kde odběry na téže straně jsou pootočený o  $30^\circ$ . Vzdálenost jednoho odběru tlaku je vzdálenost mezi osou odběrů tlaků a rovinou příslušné strany.[14]

Pro clony s odběrem tlaku je  $D$  a  $D/2$  vzdálenost  $l_1 = D$  a smí být v mezích  $0,9D - 1,1D$ , aniž by se změnil součinitel průtoku. Vzdálenost  $l_2$  zadního odběru se rovná  $0,5D$ , ale smí být v rozmezí:

$$0,48D - 0,52D, \text{ pokud } \beta \leq 0,6$$

$$0,49D - 0,51D, \text{ pokud } \beta > 0,6$$

dle normy vyhovuje

$$l_1 = 150 \text{ mm}$$

$$l_2 = 75 \text{ mm}$$

Osa odběrů tlaků musí protínat 90°osu průřezu potrubí zkušební tratě v maximální odchylce  $\pm 3^\circ$ .

### Otvor pro měření tlaků

Musí být kruhový a musí lícovat s vnitřní stěnou potrubí, ke které má být co nejostřejší. Je povoleno zaoblení jen za předpokladu, že jeho poloměr jde změřit a musí být menší než desetina průměru odběru.

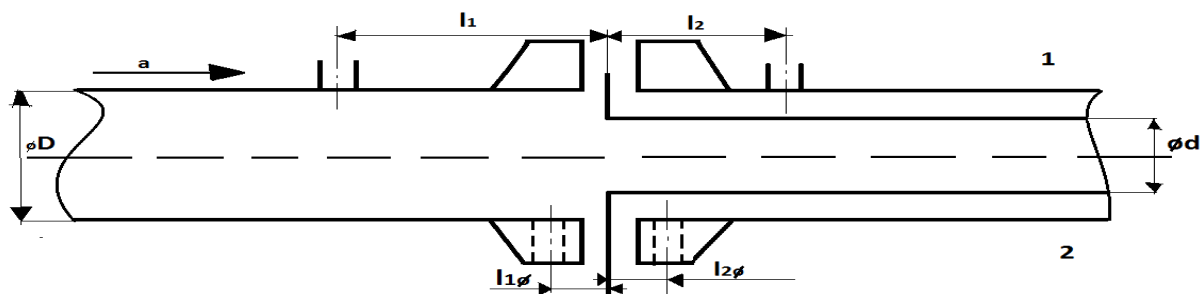
Průměr oděrů tlaků musí být menší než 0,13D a menší než 13 mm. [14]

Zde nejsme omezeni minimálním průměrem, a proto je dobré volit co největší průměr pro kvalitní provoz zařízení, mít kvalitní dynamické vlastnosti a předejití ucpání.

volíme průměr otvorů  $b = 10 \text{ mm}$

Odběry tlaků musí být kruhové a válcové v délce 2,5 násobku vnitřního průměru odběru.

Osy odběrů jde umístit v kterékoliv axiální rovině potrubí.[14]



Obr. 3.2.5.5 1. Vzdálenost odběrů tlaků u clon s odběry ve vzdálenosti D a D/2 nebo 2. s přírubovými odběry [14]

Popis:

1 – odběry tlaků ve vzdálenostech D a D/2, 2 – přírubové odběry, a – směr proudění,  $l_1 = D \pm 0,1D$ ,  $l_2 = 0,5D \pm 0,02D$  pro  $\beta \leq 0,6$ ,  $0,5D \pm 0,01D$  pro  $\beta > 0,6$

### 3.2.5.4. Základní rozměry trati

Z předešlých výpočtů jsme zjistili průměr potrubí, který je 150 mm.

Rozměr potrubí a následnou délku potrubí před průřezovým měřidlem, kde je zaručeno osové proudění, vypočítáme ze vztahu (3.9)

Je nutné mít na paměti, že před i za škrticími a proudění narušujícími elementy vzniká proudění neustálené až turbulentní.

Délka rovného potrubí tratě mezi měřicími elementy musí být větší než osminásobek průměru potrubí. To samé platí za měřicím ústrojí.

$$l > 8D$$

$$l > 8 \cdot 150$$

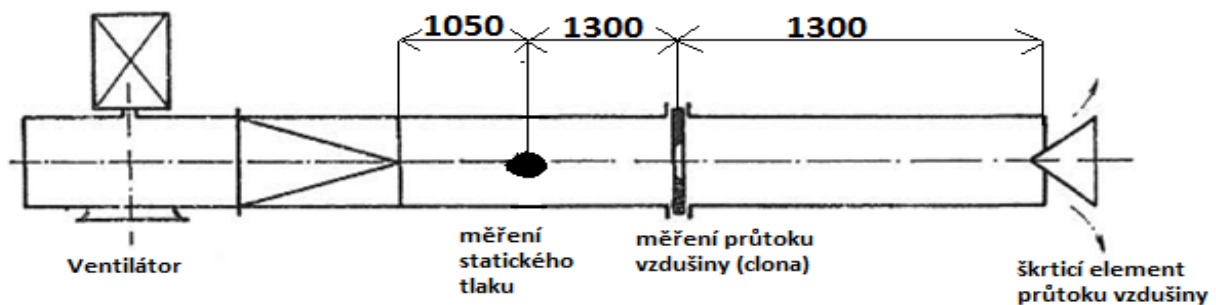
$$l > 1200$$

Zde je nutné počítat s rozměry průřezového měřidla a od něj vzdálenosti odběru tlaku

$$l = 1300 \text{ mm}$$

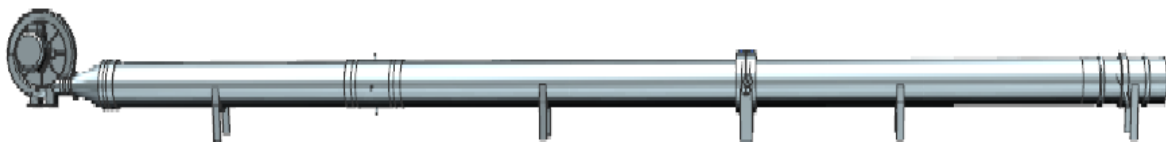
Před měřením statického tlaku stačí dodržet délku  $7D$  dle normy ČSN 123061 a článku 3.1.5.3

$$l = 7D \Rightarrow 7 \cdot 150 = 1050 \text{ mm}$$



### Rozměry tratě

Obr. 3.2.5.5. Vypočítání a zvolené hodnoty s ohledem na uklidněný proud vzduchu

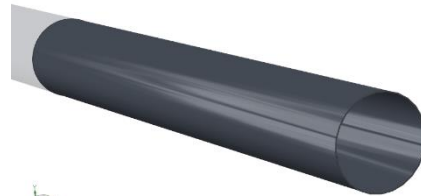


Obr. 3.2.5.6. Ukázka modelu tratě

### 3.2.5.5. Součásti tratě

#### Plastové (PVC) potrubí

– rozměry: průměr 150mm, tloušťka 3mm



#### Měření statického tlaku (prstenec)

- průměr děr pro odběr statického tlaku 3mm

- drážky pro stažení manžetami



#### Měření průtoku vzdušiny na cloně (umístění clony)

- rozměry děr 10mm

-  $d = 12,5 \text{ mm}$

- ve vzdálenostech  $l_1 = 150\text{mm}$  a  $l_2 = 75\text{mm}$

- drážky pro manžety nebo provedení se závitem



#### Škrčení provedeno škrťací klapkou

- Možností je provedení i škrťacím kuželem



#### Manžeta pro stažení potrubí (s těsněním)

#### Redukce potrubí [14], [8]

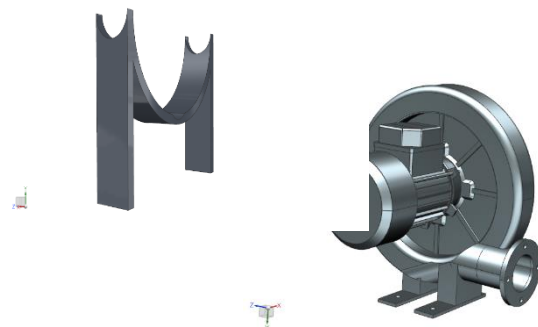
- redukce je provedena se závitem nebo přídatnou přírubou



#### Podpěry tratě

4 kusy

#### Ventilátor (radiální vysokotlaký průmyslový)



Obr. 3.2.5.7. Modely částí tratě

## **4. Výběr vhodných snímačů**

Snímače jsou vybrány dle normy ČSN 123061, která umožňuje výběr snímačů dle předepsaných přesností snímačů (viz. tab. 3.1.5.1.)

### **4.1. Měření teploty**

Teploměr RH511 – měření je určeno na měření v prostoru místnosti

### **4.2. Měření vlhkosti**

Vlhkoměr RH511 – měření je určeno na měření v prostoru místnosti

### **4.3. Měření otáček**

Otáčkoměr HHT41 – měření čítači otáček na elektromotoru ventilátoru

### **4.4. Měření barometrického tlaku**

Barometr HHP91 – měření je určeno na měření v prostoru místnosti

### **4.5. Měření příkonu**

2x wattmetr DW6092 – měření je určeno přímo na elektromotoru ventilátoru








### **4.6. Měření objemového průtoku**

Manometr HHP-103 – měření je určeno na škrticí element (clonu) pomocí difference tlaků

### **4.7. Měření statického tlaku**

Manometr HHP91 – měření je určeno na odběr z potrubí na místě jím určeném

#### 4.8. Měřicí přístroje

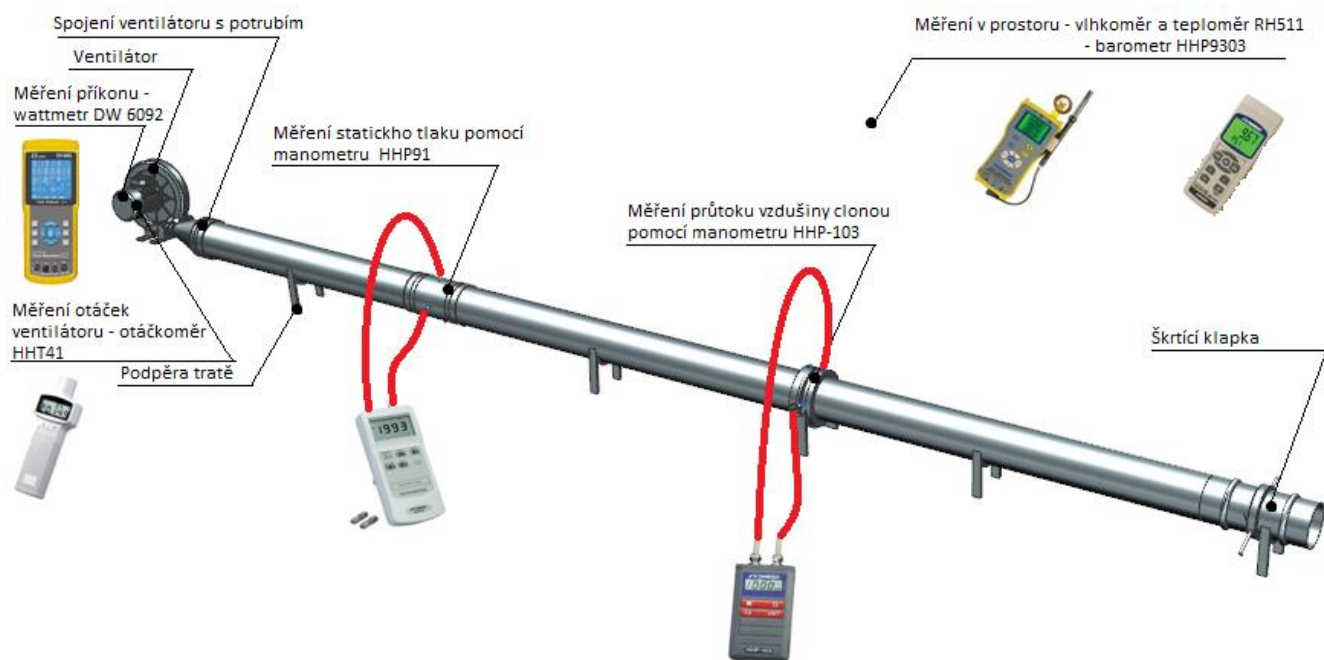
Přístroj	Obrázek	Označení	Výrobce	Měřená veličina	Jednotka	Měřicí rozsah	Přesnost
Teploměr		RH511	OMEGA	Teplota vzduchu	[°C, °F]	-20 ÷ 510	2% z °F
Vlhkoměr		RH511	OMEGA	Relativní vlhkost vzduchu	[%]	2 ÷ 98%	2,5% z mr
Otáčkoměr		HHT41	OMEGA	Otáčky ventilátoru	[-]	10 ÷ 99999	0,5%
Manometr		HHP91	OMEGA	Tlak vzdušiny	[Pa]	- 200000 ÷ 2000 00	1% z mr
Barometr		HHP9303	OMEGA	Tlak vzduchu	[Pa]	0 ÷ 100000	0,5% z mr
Manometr		HHP-103	OMEGA	Měření průtoku	[Pa]	0 ÷ 24000	0,2% z mr
Wattmetr		DW6092	LUTRON	Měření příkonu	[w]	0,2 ÷ 1200	1% z mr A

Tab. 4.8.1. Výběr vhodných snímačů podle přesností dle normy ČSN 123061 [15],[16]

#### 4.9. Výsledná trať s měřicími přístroji

Měřicí zařízení umožňují přes spojení USB s pamětí přístroje přenést data do PC.

Toto je možné provést přes software a převodníku např. od firmy JSP



Obr. 4.8.1. Model trati a schéma zapojení jednotlivých přístrojů

## 5. Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh variabilní tratě pro měření P-Q charakteristik ventilátorů, kde měřicí trať bude schopná měřit charakteristiky pro různé druhy a velikosti ventilátorů. Zde jsme vybrali širokou škálu ventilátorů s rozdílnými průtoky vzdušiny a tlakových rozdílů. Výběr byl od nízkotlakých ventilátorů až po vysokotlaké ventilátory. Prostudováním katalogů od výrobců a pomocí bodovací metody dle vlastností materiálu jsme se rozhodli pro plastovou trať z materiálu PVC (polyvinylchlorid), který je dle chemických, mechanických a třecích vlastností na velmi dobré úrovni. Plastové potrubí je v dnešní době velmi rozšířené a často díky těmto vlastnostem nahrazuje kovové potrubí. Pomocí orientačních a hrubých výpočtů třecích a tlakových ztrát zkušební tratě jsme zjistili, že námi vybraných průměrů od výrobců vyhovuje průměr 150 mm. Nutno dodat sebekriticky, že třecí a tlakové ztráty by byly menší na větších průměrech, a tedy čím je průměr potrubí větší za konstantního průtoku, tím tlakové a třecí ztráty klesají, čehož se v obecné vzduchotechnice využívá při návrhu ventilace.

Dále jsme provedli návrh rozměrů zkušební tratě, škrticích a odběrných orgánů. Návrh škrticí clony a výběr snímačů dle předepsaných přesností podle normy ČSN 123061. Samotné spojování potrubí mezi ventilátorem a měřicí tratí bylo řešeno s důrazem na variabilitu měřicí tratě tak, že byly použity spojky potrubí a staženy manžetami s těsnicí rohoží. Jelikož středotlaké a vysokotlaké ventilátory jsou většinou řešeny přírubou, bylo použito řešení spojem převlečeným potrubím (redukce + manžeta) pro variabilitu tratě na všechny typy ventilátorů.



## Zdroje

- [1] J. Chyský, K. Hemzal a kol. *Větrání a klimatizace*. Vydání třetí. Praha: ČESKÁ MATICE TECHNICKÁ, 1993. ISBN 80-901574-0-8
- [2] F. Drkal, M. Lain, J. Schwarzer, V. Zmrhal. *Vzduchotechnika*. [https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/VZT/Vzduchotechnika.pdf](https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/VZT/Vzduchotechnika.pdf)  
Praha: ČVUT, 2009
- [3] F. Drkal, M. Lain, J. Schwarzer, V. Zmrhal. *Klimatizace a průmyslová vzduchotechnika*. [https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/KPV/Klim\\_a\\_prum\\_vzd.pdf](https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/KPV/Klim_a_prum_vzd.pdf)  
Praha: ČVUT, 2009
- [4] J. Schwarzer. *Experimentální cvičení: Charakteristika ventilátorů*. [http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/EXM/IB\\_EXM\\_char\\_ventilatoru\\_FINALL.pdf](http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/EXM/IB_EXM_char_ventilatoru_FINALL.pdf) Praha: ČVUT, 2011
- [5] J. Kadrnožka. *Lopátkové stroje*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM
- [6] J. Hirš, G. Gebauer. *Vzduchotechnika v příkladech 1*. Brno: VÚT, 2006
- [7] ČSN 12 3061. *Ventilátory: předpisy pro měření*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro technickou normalizaci a měření, 1987.
- [8] Vzduchotechnika-ventilatory.cz. *Ventilátory* [online].2016 [cit.2.5.2016]  
Dostupné z: <http://www.vzduchotechnika-ventilatory.cz/0,83,ventilatory-tt.html>
- [9] Energoekonom. *Ventilátory* [online]. 2016 [cit. 2.5.2016]  
Dostupné z: <http://www.energoekonom.cz/produkty-d-060-e-060-detail-29>
- [10] Přednášky z předmětu SMA. *oceli, značení ocelí, polymery*. Doc. Ing. Antonín Kříž
- [11] Tribon plastové potrubní systémy. *Materiál* [online]. 2012 [cit. 17.5.2016]
- [12] CES EduPack 2013 Version 12.2.13.[DVD] Cambridge : Granta Desing Limited, Granda Desing Limited, 2013. 12, 2, 13, 0.
- [13] Přednášky z předmětu Nekovové materiály pro bakaláře. Polymery. Ing.Tomáš Křenek Ph.D.
- [14] Elektordesing ventilátory s.r.o. *manžety* [online]. 2016 [cit.17.5.2016]  
Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/uplny-sortiment/produktycs/uplny-sortiment/produkty/prislusenstvi-potrubni-elementy>
- [15] Omeganeg.cz. *měřicí přístroje*. [online]. 2016 [cit. 17.5.2016]  
Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/shop/tsc.html>

- [16] J. Jeníček, J. Volf a kolektiv. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02138-6
- [17] V. Beran, J. Girg, O. Tůmová. *Měření neelektrických veličin*. Plzeň: Vydavatelství ZČU, 1994. ISBN 80-7082-158-2
- [18] K. Zehnulka. *Snímače neelektrických veličin*. Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1983
- [19] F. C. McQuiston, J. D. Parker, J. D. Spiltler. *Heating, Ventilating, and Air Conditioning Analysis and Design*. Sixth Edition. Oklahoma State University: John Wiley a Sons, Inc., 2005. ISBN 978-0-471-47015-1
- [20] Kadlec K. Plováčkové průtokoměry – průtokoměry s proměnlivým průřezem. *Automa*. Děčín Automa – časopis pro automatizační techniku, s. r. o. ročník 22 číslo 10. počet stran 64. ISSN 1210-9592
- [21] ČSN EN ISO 5167-2. *Škrťací prvky: předpisy pro rozměry a konstrukci škrťacích prvků*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro technickou normalizaci a měření, 1987.
- [22] Staněk J., Němejc J. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Vydání první. Plzeň: Vydavatelství ZČU, 2005  
ISBN 80-7043-363-9
- [23] JSP měření a regulace. *Software a převodníky* [online]. [cit. 4.6.2016]  
Dostupné z:  
[http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorii/komunikacni\\_prostredky\\_a\\_software/](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/komunikacni_prostredky_a_software/)