

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojírenství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Konstrukční řešení kinematiky mechanismu natáčení lopatek rotoru  
ventilátoru

Autor: **Pavel KORTÁN**

Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav ŠTĚCH**

Akademický rok 2013/2014

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 27.6.2014

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Jaroslavu Štechovi, konzultantu Ing. Karlovi Horskému a společnosti ZVVZ a.s. za poskytnuté materiály, vstřícný přístup, odborné rady a konzultace, bez nichž by tato práce nemohla být dokončena.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

|                      |  |                   |  |                         |
|----------------------|--|-------------------|--|-------------------------|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Kortán   | Jméno<br>Pavel    |  |                         |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | B2301 „Stavba energetických strojů a zařízení“                               |                   |  |                         |
| <b>VEDOUCÍ PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>Ing. Štěch                                       | Jméno<br>Jaroslav |  |                         |
| <b>PRACOVISŤE</b>    | ZČU - FST - KKE  |                   |  |                         |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>   | <b>BAKALÁŘSKÁ</b> |  | Nehodící se<br>škrtněte |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Konstrukční řešení kinematiky mechanismu natáčení lopatek rotoru ventilátoru |                   |  |                         |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KKE | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2014 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

|               |    |                     |    |                      |   |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| <b>CELKEM</b> | 37 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 29 | <b>GRAFICKÁ ČÁST</b> | 9 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

|   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS<br/>(MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br/>POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>                                       | <p>Bakalářská práce obsahuje přehled způsobů regulace ventilátorů za chodu. Jsou zde porovnány různé druhy mechanismů pro natáčení lopatek ventilátoru. V další části práce jsou uvedeny čtyři návrhy mechanismů, z nichž jeden je vybrán a zkonstruován. V poslední části práce je provedena pevnostní analýza jedné z komponent mechanismu.</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA<br/>JEDNOSLOVNÉ POJMY,<br/>KTERÉ VYSTIHUJÍ<br/>PODSTATU PRÁCE</b></p> | <p>Ventilátor, regulace, natáčení lopatek, Ansys</p>  |

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

|                          |   |                  |                            |
|--------------------------|---|------------------|----------------------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Kortán   | Name<br>Pavel    |                            |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | B2301 “Design of Power Machines and Equipment“  |                  |                            |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Ing. Štěch  | Name<br>Jaroslav |                            |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU - FST - KKE   |                  |                            |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>DIPLOMA</b>  | <b>BACHELOR</b>  | Delete when not applicable |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Construction solution of kinematics mechanism of variable pitch rotor blades of the fan |                  |                            |

|                |                        |                   |                          |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | Power System Engineering | <b>SUBMITTED IN</b> | 2014 |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |    |                  |    |                       |   |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| <b>TOTALLY</b> | 37 | <b>TEXT PART</b> | 29 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 9 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

|   |   |
|---|---|
| <b>BRIEF DESCRIPTION<br/>TOPIC, GOAL, RESULTS<br/>AND CONTRIBUTIONS</b> | This bachelor thesis contains overview of how to control the fan. There are comparing different types of mechanisms for variable pitch fan blades. The next section describes four designs mechanisms, one of which is selected and constructed. In the last part is the strength analysis of one of the components of the mechanism. |
| <b>KEY WORDS</b>  | Fan, control, variable pitch blades, Ansys  |

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Přehled použitých zkratk a symbolů.....  | 9  |
| 1 Úvod.....  | 10 |
| 2 Ventilátory.....   | 11 |
| 2.1 Rozdělení ventilátorů .....  | 11 |
| 2.1.1 Podle směru průtoku vzduchu .....  | 11 |
| 2.1.2 Další hlediska rozdělení ventilátorů .....                                   | 11 |
| 2.2 Vlastnosti ventilátorů .....   | 12 |
| 2.2.1 Objemový průtok vzduchu $V$ [ $m^3/s$ ] .....                                | 12 |
| 2.2.2 Celkový dopravní tlak $\Delta p$ [Pa].....                                   | 12 |
| 2.2.3 Výkon a příkon ventilátoru .....   | 12 |
| 2.3 Charakteristiky ventilátorů .....  | 12 |
| 2.4 Regulace ventilátorů.....  | 13 |
| 2.4.1 Regulace škrcením .....  | 13 |
| 2.4.2 Regulace změnou otáček .....   | 14 |
| 2.4.3 Regulace natáčením lopatek .....   | 14 |
| 2.4.3.1 Regulace natáčením statorových lopatek .....                               | 15 |
| 2.4.3.2 Regulace natáčením oběžných lopatek.....                                   | 15 |
| 3. Mechanismy pro natáčení lopatek oběžného kola ventilátoru .....                 | 16 |
| 3.1 Historie .....   | 17 |
| 3.2 Současnost.....  | 17 |
| 3.2.1 Mechanismy natáčení oběžných lopatek za klidu .....                          | 18 |
| 3.2.2 Mechanismy natáčení oběžných lopatek za chodu bez vyrovnávacích závaží ..... | 18 |
| 3.2.3 Mechanismy natáčení oběžných lopatek za chodu s vyrovnávacím závažím.....    | 19 |
| 3.3 Konstrukční uspořádání mechanismu .....  | 19 |
| 3.4 Porovnání mechanismů .....   | 19 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4.1 Mechanismus ZVVZ Machinery.....            | 20 |
| 3.4.2 Mechanismus HOWDEN.....                    | 21 |
| 4 Návrh mechanismů.....                          | 23 |
| 4.1 První varianta .....                         | 23 |
| 4.2 Druhá varianta – s ozubeným převodem.....    | 24 |
| 4.3 Třetí varianta .....                         | 24 |
| 5 Výběr nejvhodnější varianty .....              | 25 |
| 5.1 Volba hledisek.....                          | 25 |
| 5.2 Hodnocení a výběr nejvhodnější varianty..... | 25 |
| 6 Konstrukce vybrané varianty .....              | 26 |
| 6.1 Zadání.....                                  | 26 |
| 6.2 Konstrukce mechanismu .....                  | 27 |
| 6.3 Výsledný rotor ventilátoru.....              | 28 |
| 7 Pevnostní výpočet vybrané komponenty.....      | 30 |
| 7.1 Zadání.....                                  | 30 |
| 7.2 Výsledné hodnoty.....                        | 30 |
| Závěr.....                                       | 34 |
| Seznam použité literatury.....                   | 35 |

## Přehled použitých zkratk a symbolů

| <b>veličina</b> | <b>rozměr</b>     | <b>název</b>            |
|-----------------|-------------------|-------------------------|
| p               | Pa                | Tlak                    |
| V               | m <sup>3</sup> /s | Objemový průtok vzduchu |
| $\Delta p$      | Pa                | Celkový dopravní tlak   |
| $\eta$          | -                 | Účinnost                |
| $\rho$          | kg/m <sup>3</sup> | Hustota                 |
| P <sub>p</sub>  | W                 | Příkon                  |
| f               | Hz                | Frekvence               |
| p               | -                 | Počet pólů              |
| s               | %                 | Skluz                   |



## 1 Úvod

V dnešní době jsou na regulaci ventilátorů, stejně jako u jiných proudových strojů, kladeny stále větší nároky. Hlavně z hlediska ekonomiky, ale v dnešní době i z hlediska hlučnosti a energetické náročnosti. Z toho důvodu se většina světových firem soustřeďuje na výzkum a vývoj nových druhů regulace.

Předkládaná bakalářská práce je zadána přední českou firmou ZVVZ Machinery v Milevsku. Skládá ze čtyř částí: v té první je uvedení do problematiky ventilátorů, jejich rozdělení, použití a regulace, na kterou je kladen největší důraz.

Druhá část porovnává mechanismy pro natáčení rotorových lopatek za chodu vyráběné firmami ZVVZ Machinery a HOWDEN, převážně pak na uložení hřídele oběžné lopatky.

V další části je proveden návrh tří různých mechanismů sloužících k regulaci ventilátoru natáčením rotorových lopatek za chodu. Z těchto tří variant je vybrána ta nejvhodnější (z hlediska konstrukce, ekonomiky, výroby hlučnosti atd.), která je následně detailně zkonstruována. V této části je i obrázek kompletního rotoru ventilátoru s navrženou variantou mechanismu. Ze zkonstruovaného mechanismu je pak v poslední části práce vybrána jedna součást, která je podrobena pevnostní analýze v programu ANSYS.

## 2 Ventilátory

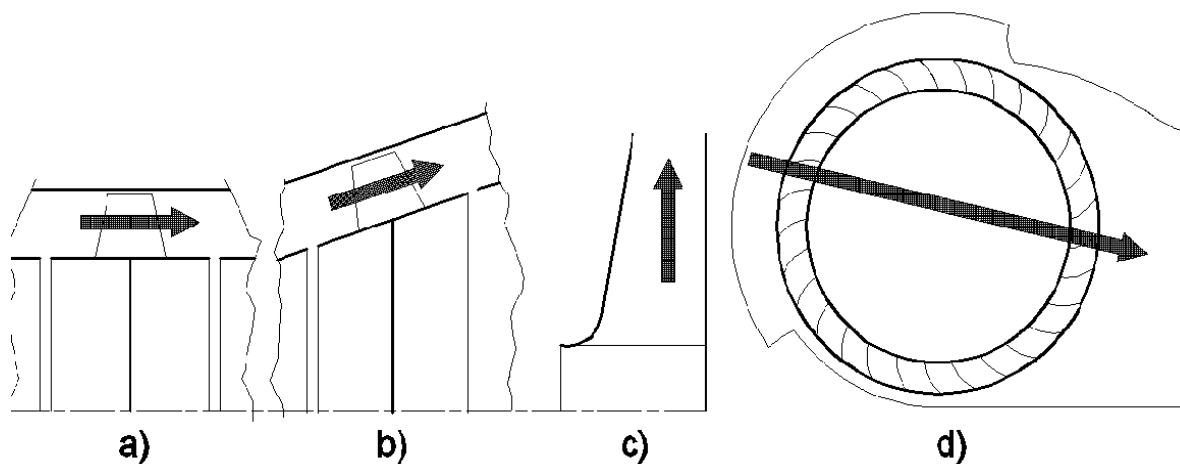
Ventilátor je součástí téměř každého větracího a klimatizačního systému. Jedná se o rotační lopatkový stroj pro dopravu a stlačování plynů a par do tlaku 10 000 Pa. Ventilátory mají široké uplatnění ve všech oborech lidské činnosti. V průmyslu je lze nalézt v elektrárnách, teplárnách (dmýchání vzduchu do spalovacích komor, odsávání kouřových plynů), ale i v tunelech, metrech a dolech k jejich odvětrání. Hlavními parametry ventilátorů jsou celkový dopravní tlak, objemové množství vzduchu a příkon.

### 2.1 Rozdělení ventilátorů

Hlavním kritériem pro rozdělení ventilátorů je směr průtoku vzduchu oběžným kolem. Dalšími kritérii jsou pak dopravní tlak, tvar lopatek oběžného kola, počet stupňů ventilátoru, způsob přenosu energie a druh pohonu.

#### 2.1.1 Podle směru průtoku vzduchu

Směr průtoku vzduchu je základním hlediskem pro rozdělení ventilátorů. Podle toho lze ventilátory rozdělit do čtyř skupin na: axiální, radiální, diagonální a diametrální.



Obrázek 2- 1 Rozdělení ventilátorů dle směru průtoku vzduchu

Jak je možno vidět z obrázku 2-1a u axiálních ventilátorů je směr průtoku vzdušiny na vstupu i na výstupu rovnoběžný s osou otáčení ventilátoru. U radiálních ventilátorů (obr. 2-1c) je směr na výstupu kolmý (odtud název radiální). Diagonální ventilátory (obr. 2-1b) mají výtlač z ventilátoru pod úhlem menším než  $90^\circ$ . Posledním případem je diametrální ventilátor, u kterého prochází vzdušina oběžným kolem přibližně ve směru kolmém (diametrálním)

#### 2.1.2 Další hlediska rozdělení ventilátorů

Jinou možností jak dělit ventilátory je počet stupňů, a to sice na jednostupňové a vícestupňové. Jeden stupeň axiálního ventilátoru se skládá z oběžného kola s rotorovými lopatkami a statoru se statorovými lopatkami. Někdy se také užívá rozdělení ventilátorů podle celkového dopravního tlaku na nízkotlaké (do 1 kPa), středotlaké (1 kPa – 3,5 kPa) a vysokotlaké (více než 3,5 kPa). Podle druhu pohonu rozeznáváme ventilátory poháněné

elektromotorem, pneumatickým pohonem a ručním pohonem. V drtivé většině se k pohonu používá asynchronních elektromotorů. Dalším hlediskem je způsob přenosu energie, kde se vyskytují způsoby napřímo, na spojku a s převodovým ústrojím.

## 2.2 Vlastnosti ventilátorů

### 2.2.1 Objemový průtok vzduchu $V$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Jedná se o množství vzduchu, které je ventilátor schopen přepravit. Většinou se udává pro hustotu vzduchu  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ . Pohybuje se v rozmezí  $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$  až po cca  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , a to podle druhu ventilátoru.

### 2.2.2 Celkový dopravní tlak $\Delta p$ [Pa]

Zajišťuje průtok vzduchu sítí. Pro překonání tlakové ztráty potrubního systému a vřazených elementů (odporů) slouží statická složka tlaku. Navíc je třeba počítat se stlačitelností vzduchu. Ta se zohledňuje především u vysokotlakých ventilátorů, u nízkotlakých a středotlakých se zanedbává.

### 2.2.3 Výkon a příkon ventilátoru

Výkon ventilátoru je dán součinem průtoku a celkového dopravního tlaku

$$P = V \Delta p \quad [\text{W}]$$

Příkon se stanoví z výkonu ventilátoru  $P$  a celkové účinnosti  $\eta_c$ , která je definována jako poměr mezi výkonem a příkonem ventilátoru.

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

## 2.3 Charakteristiky ventilátorů

Na obrázku 2-2 jsou znázorněny obecné charakteristiky ventilátoru, mezi něž patří:

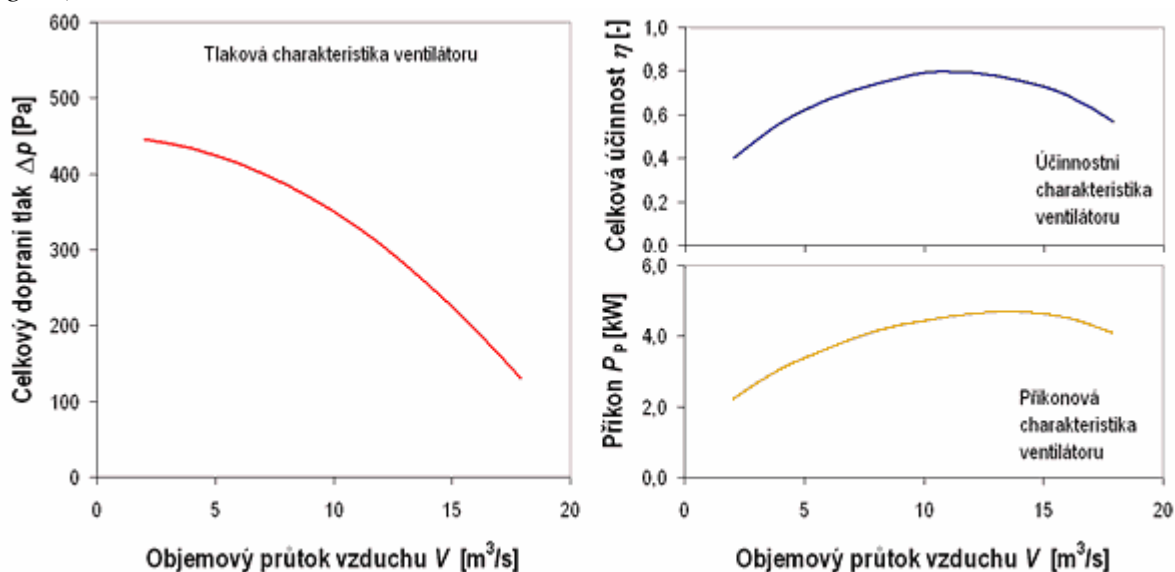
tlaková charakteristika -  $\Delta p = f(V)$

příkonová charakteristika -  $P_p = f(V)$

účinnostní charakteristika -  $\eta_c = f(V)$

Charakteristické křivky jsou určeny měřením a výrobce je udává v katalogovém listu ventilátoru. Obvykle jsou vlastnosti ventilátorů udávány pro určitý stav vzduchu ( $\rho=1,2$

$kg/m^3$ ).



Obrázek 2- 2 Charakteristiky ventilátoru [2]

## 2.4 Regulace ventilátorů

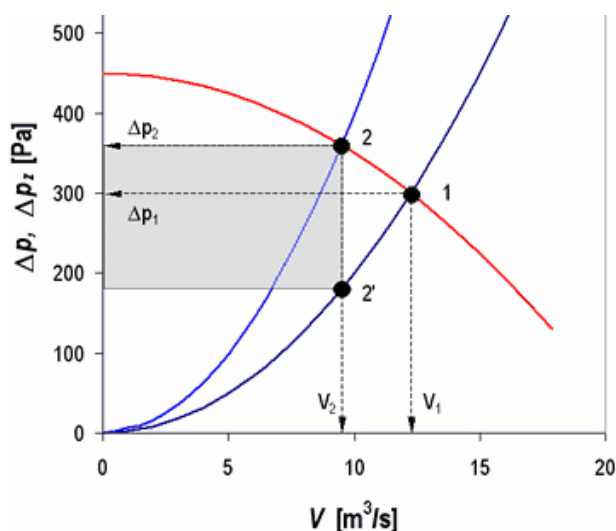
Nutnost regulovat ventilátory vyplývá z toho, že většina ventilátorů se vyrábí v určitých velikostech. Ovšem i ventilátory velkých rozměrů, které byly navrženy pro zvláštní použití je nutno regulovat vzhledem k tomu, že se mohou měnit provozní režimy, v nichž ventilátor pracuje. Regulační zařízení musí ovlivnit aerodynamické parametry ventilátoru tak, aby v určitý časový okamžik byla dosažena požadovaná změna průtoku a celkového tlaku.

### 2.4.1 Regulace škrcením

Tato regulace zajišťuje pouze snížení aerodynamických parametrů. Provádí se nejčastěji pomocí klapek, které se umísťují buď před, nebo za ventilátor, čímž dojde ke změně místního odporu a tím i charakteristiky potrubní sítě, což má za následek změnu pracovního bodu ventilátoru (obrázek 2-3). Z hlediska energetické náročnosti se jedná o regulaci ztrátovou, neboť škrcením dojde ke ztrátě výkonu. Tento výkon se nazývá zmařený výkon a je možno ho vyjádřit ze vztahu

$$\Delta P = V_2(\Delta p_2 - \Delta p_2') \quad [\text{Pa}]$$

Vzhledem k velké nehospodárnosti, se tento způsob používá hlavně tam, kde jde o krátkodobý provoz, nebo kde požadujeme malý výkon.



Obrázek 2- 3 Regulace škrcením [2]

## 2.4.2 Regulace změnou otáček

Jedná se o nejhospodárnější regulaci. Při změně otáček dojde ke změně charakteristiky ventilátoru, ale je zachována charakteristika potrubní sítě (obrázek 2-4). Při změně pracovního bodu z 1 na 2 však dojde ke změně účinnosti ventilátoru (zpravidla k horšímu, pokud bod 1 je optimální pracovním bodem ventilátoru). Existuje několik možností, jak měnit otáčky motoru.

Základní možností je použití víceotáčkových motorů (dvou-, nebo tří-otáčkových). Změna otáček je uskutečňována skokově, přepínáním počtu pólů u asynchronních motorů. Otáčky rotoru lze stanovit ze vztahu

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

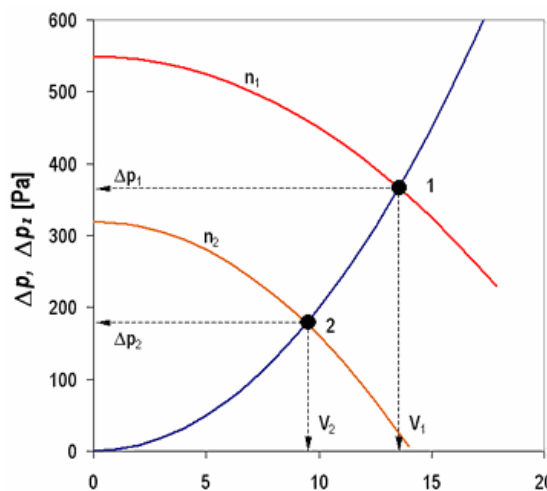
f frekvence [Hz]

p počet pólů [-]

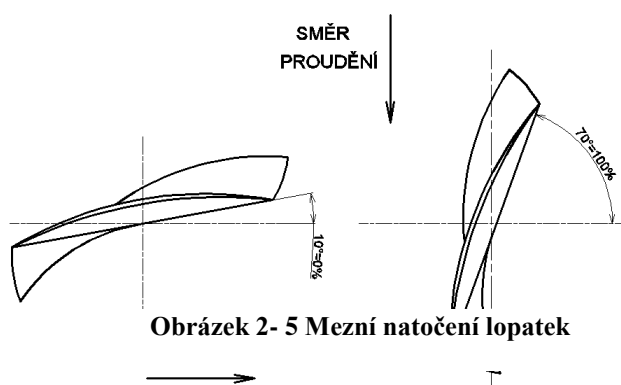
s skluz (po rozběhu bývá skluz od 2 do 5 %)

Další možností regulace ventilátorů pomocí změnou otáček je napěťová regulace. Ta je založena na změně napětí, které je uskutečňována zařazením odporu do obvodu rotoru. Regulace výkonu ventilátoru může probíhat např. v 5-ti stupních s krokem cca 20 %, čemuž odpovídá 5 pracovních charakteristik ventilátoru. Tento způsob regulace je vhodný pro nízkotlaké ventilátory, neboť část příkonu elektromotoru se přeměňuje na teplo.

Optimální regulací z hlediska energetické náročnosti je kmitočtová regulace. Jedná se o plynulou regulaci výkonu, která umožňuje regulovat průtok vzduchu v plném rozsahu od 0 do 100 %. Pro tento typ regulace se používají frekvenční měniče a lze ji použít pro všechny typy ventilátorů. Zejména je tato regulace vhodná pro vyšší výkony ventilátorů. Otáčky elektromotoru při změně frekvence, lze spočítat podle rovnice.



Obrázek 2- 4 Regulace změnou otáček [2]



Obrázek 2- 5 Mezní natočení lopatek

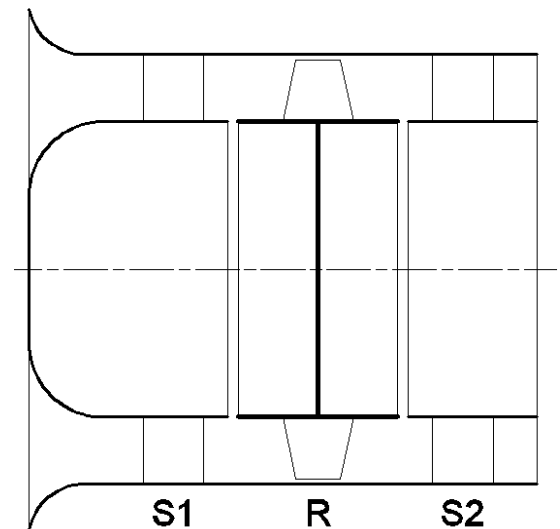
## 2.4.3 Regulace natáčením lopatek

V mnoha případech, kdy by teoreticky bylo možné použít regulaci změnou otáček, ale její použití je v případě plynulé regulace náročné z hlediska vysokých nákladů na převodové ústrojí, při skokové regulaci je zase problém, že se jedná o příliš hrubou regulaci. Vzhledem k výše uvedeným

problémům je příznivější použití regulace změnou úhlů natočení statorových nebo rotorových lopatek. Tento způsob regulace se používá pouze u axiálních ventilátorů. Na obrázku 2-5 je vidět natočení lopatek při minimálním a maximálním průtoku vzduchu.

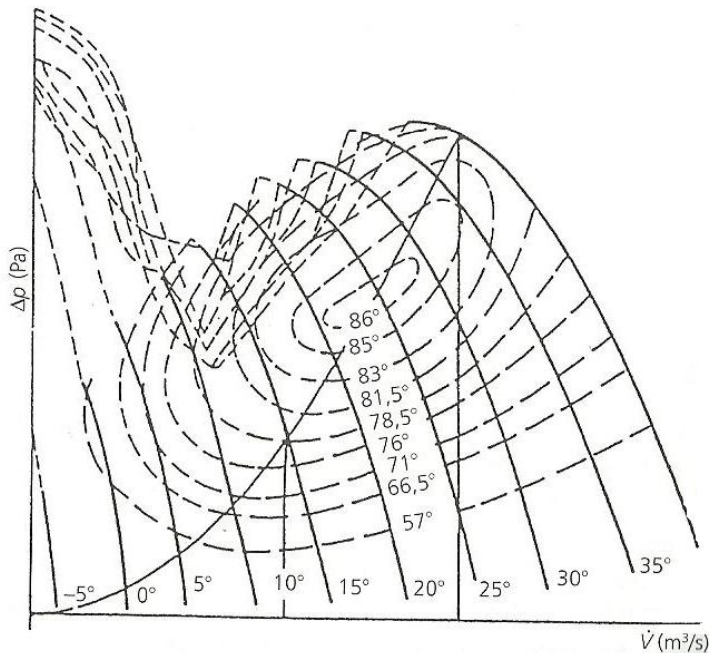
#### 2.4.3.1 Regulace natáčením statorových lopatek

Ventilátory s touto regulací mají obvykle uspořádání S1 + R + S2 (obr. 2-6)(vstupní statorové lopatky S1, rotor R, výstupní statorové lopatky S2) a v průběhu regulace se mění úhel natočení lopatkové mříže S1. Toto uspořádání má výhodu v tom, že díky mechanismu jenž je spojen pevnou lopatkovou mříží lze dosáhnout dobrých regulačních vlastností i za provozu (bez nutnosti ventilátor zastavit). V určitém rozsahu ( $\pm 10^\circ$  ze základního postavení lopatek) se účinnost mění jen velmi málo a lze dosáhnout změny průtoku ( $\pm 10\%$ ). Na druhé straně při větší změně úhlu natočení lopatek k nižším hodnotám účinnost poměrně razantně klesá.



Obrázek 2- 6 Uspořádání ventilátoru s natáčením statorových lopatek

#### 2.4.3.2 Regulace natáčením oběžných lopatek

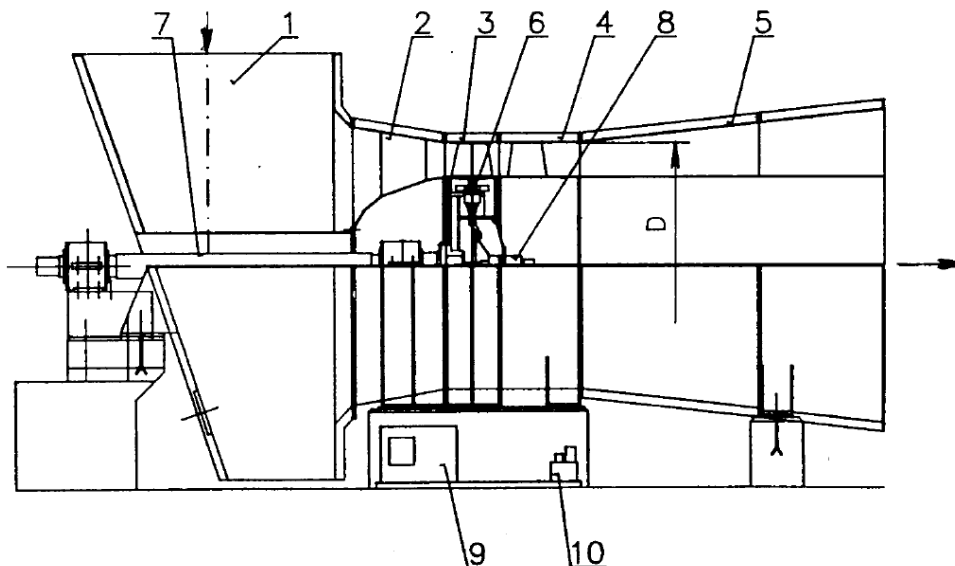


Obrázek 2- 7 Charakteristika ventilátoru s regulací natáčením oběžných lopatek [3]

Z ekonomického hlediska se jedná o nejhospodárnější druh regulace ventilátorů. Je zde možno dosáhnout rozsáhlé regulace průtoku při vysoké účinnosti ventilátoru. Charakteristika přetlakového ventilátoru s touto regulací je na obrázku 2-7. Nevýhodou je, že při natáčení lopatek za klidu (při zastavení rotoru) se musí ventilátor na určitou dobu zastavit, provést natočení lopatek a znovu uvést ventilátor do provozu. Tuto nevýhodu je možno odstranit použitím mechanismu, který umožňuje natáčení lopatek za chodu ventilátoru. Tento mechanismus je ovšem konstrukčně poměrně složitý a drahý. Umístění mechanismu ve ventilátoru je znázorněno na obrázku 2-8. Je zde

uveden ventilátor APJB vyráběný v ZVVZ a.s. Milevsko, který se reguluje natáčením oběžných lopatek. Vstupní skříň, skříň oběžného kola a rozváděcí skříň jsou děleny ve vodorovné rovině. Po sejmutí vrchních polovin je přístup k vnitřnímu ložisku, oběžnému kolu

a k mechanismu ovládání. Difuzor a sací komora jsou opatřeny průlezy umožňujícími přístup dovnitř ventilátoru. Tímto průřezem je umožněn přístup k mechanismu hydraulického ovládání natáčení lopatek oběžného kola. Průřez do sací komory je v její čelní stěně a umožňuje přístup k lopatkám oběžného kola.



Obrázek 2- 8 Ventilátor APJB [4]

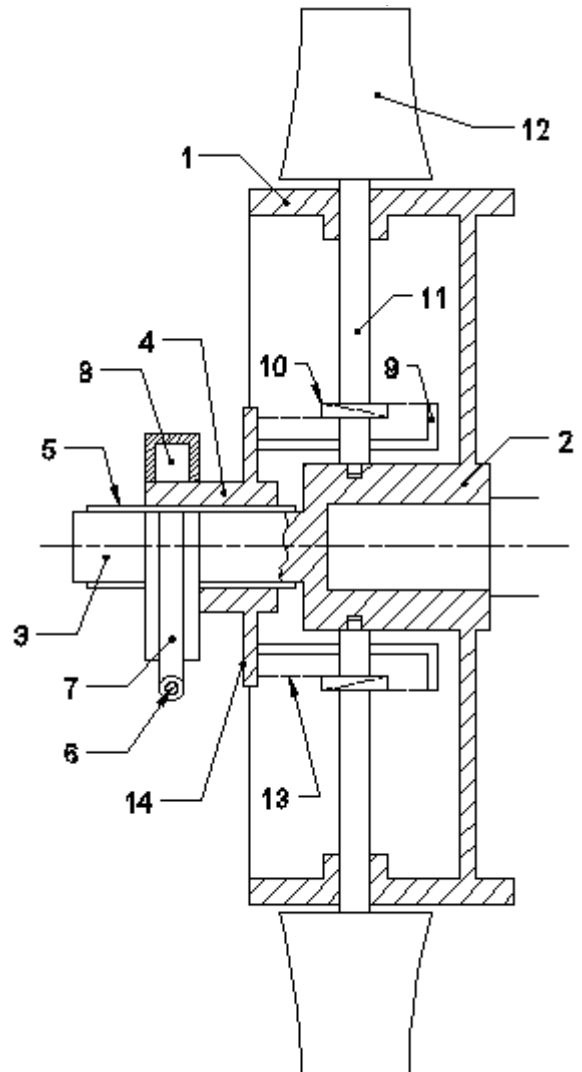
|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| 1. Sací komora               | 6. oběžné kolo          |
| 2. Vstupní skříň             | 7. hřídel s ložisky     |
| 3. Skříň oběžného kola       | 8. Mechanismus ovládání |
| 4. Skříň statorových lopatek | 9. mazací stanice       |
| 5. difuzor                   | 10. hydraulický agregát |

### 3. Mechanismy pro natáčení lopatek oběžného kola ventilátoru

Jak již bylo uvedeno, regulace ventilátoru natáčením oběžných lopatek se nejčastěji používá u axiálních ventilátorů velkých průměrů (např. pro odvod spalin, nebo ke „krmení“ spalovacích komor vzduchem). U těchto ventilátorů nevyhovuje regulace natáčivými vstupními lopatkami pro malý regulační rozsah a pokles účinnosti. Např. při transportu spalovacího vzduchu do spalovacích komor elektráren, musí ventilátor reagovat na aktuální vlhkost a výhřevnost paliva. V tomto případě se mohou lopatky ventilátoru otočit až 5 000 krát za den (ventilátor je v provozu 24 hodin denně).

### 3.1 Historie

V minulosti byla většina mechanismů založena především na pákových a lankových převodech. Tyto převody ale měli nevhodnou kinematiku a malý regulační rozsah, protože lopatky se daly otáčet pouze o malý úhel. Na obrázku 3-1 je mechanismus vyvinutý v roce 1960. Podstata tohoto mechanismu spočívá v tom, že otočné čepy (11) oběžných lopatek (12) jsou opatřeny ovinitými lankami (13). Lanky jsou napnuta mezi držáky smykadla (4), jenž se posouvá v osové směru hřídele ventilátoru.



Obrázek 3- 1 Historický mechanismus natáčení lopatek

|                |                   |
|----------------|-------------------|
| 1. Oběžné kolo | 8. Valivé ložisko |
| 2. Náboj       | 9. Držáky         |
| 3. Vedení      | 10. Kolo kladky   |
| 4. Smykadlo    | 11. Čep lopatky   |
| 5. Pero        | 12. Lopatka       |
| 6. Hřídel      | 13. Lanko         |
| 7. Páka        | 14. Kotouč        |

### 3.2 Současnost

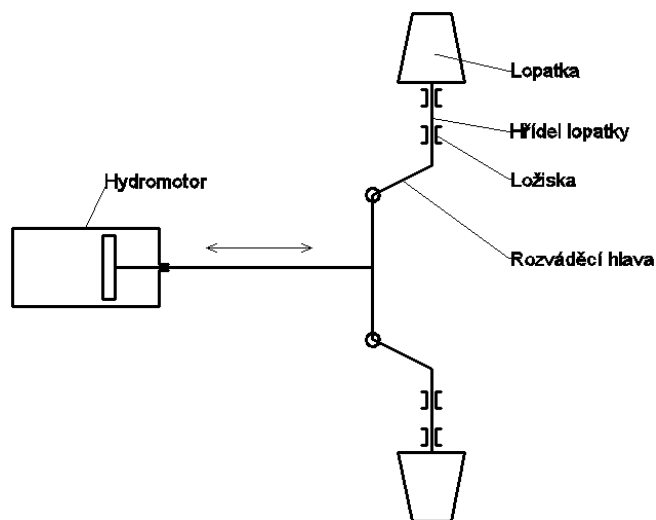
Dnešní mechanismy pracují pomocí hydromotoru, jehož posuvný pohyb je pomocí rotačních převaděčů (např. rozváděcí páky) převeden na rotační pohyb lopatky (viz Obr. 3-2). Řízení výkonu se provádí řízením třicestného (nebo proporcionálního) ventilu hydraulického agregátu. Regulační rozsah ventilátoru je dán zdvihem hydraulického válce a není jej možno v provozu měnit. Poloha přestavení lopatek je snímána elektrickým snímačem polohy (inklinometrem), jehož výstupní signál 4-20 mA je předáván do řídicího systému. Nastavení lopatek je také vizualizováno mechanickým ukazatelem umístěným na vnějším plášti ventilátoru (pod dělicí rovinou rozváděcí skříně).

Princip převodu posuvného pohybu hydromotoru na rotační pohyb lopatky je patrný z obrázku 3-2. Lopatky jsou přišroubovány k hřídelům uloženým uvnitř náboje oběžného kola a utěsněny proti vnikání nečistot do vnitřních prostorů náboje. Každá lopatka má tedy svůj hřídel, což zajišťuje snadnou opravitelnost při její poškození, nebo při poškození ložisek apod. Tato hřídel je spojena pomocí rozváděcí hlavy s nábojem.



### 3.2.1 Mechanismy natáčení oběžných lopatek za klidu

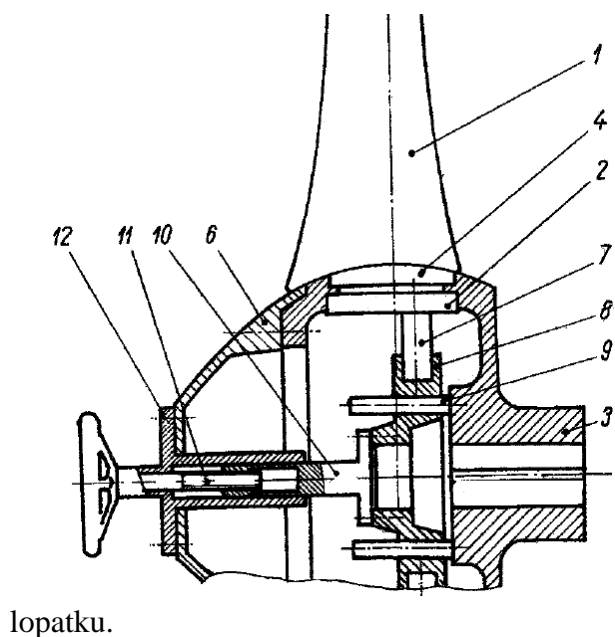
Používají se tam, kde požadujeme občasnou regulaci při minimálním odstavování ventilátoru z provozu. Na obr. 3-3 je oběžné kolo ventilátoru s natáčením oběžných lopatek za klidu. V náboji 3 je uložena lopatka 1 s přírubou 4 a v kluzných ložiskách protipříruba 2, na které je excentricky umístěný čep 7. Lopatka a protipříruba jsou spolu přišroubovány. Čepy zapadají do drážky unášecí desky 8, která se axiálně posouvá vose oběžného kola. Vodící čepy 9 slouží k ustředění unášecí desky. K unášecí desce je připojen ovládací mechanismus, který se skládá z táhla 10 na jehož konci je matice, jíž prochází pohybový šroub 11 s ovládacím kolem. Tento ovládací mechanismus tvoří s nábojem oběžného kola jeden celek. Díky tomu se ovládací síly nepřenáší do hlavních ložisek ventilátoru.



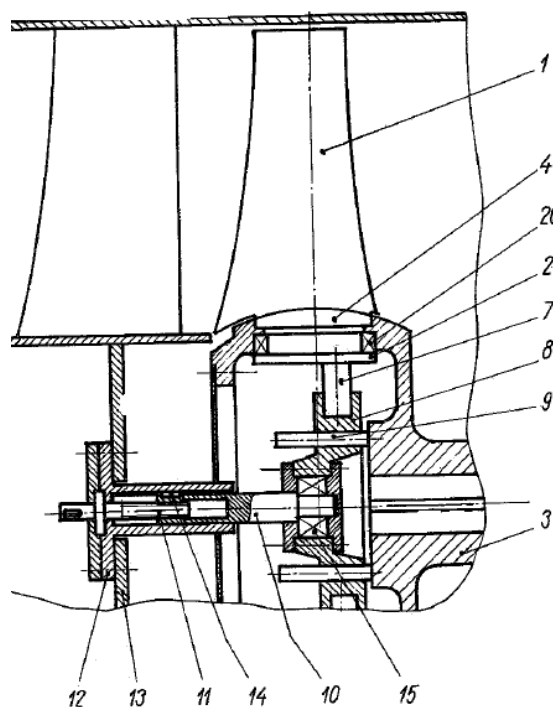
Obrázek 3- 2 Přeměna posuvného pohybu hydromotoru na rotační pohyb lopatky

### 3.2.2 Mechanismy natáčení oběžných lopatek za chodu bez vyrovnávacích závaží

Tento mechanismus je znázorněn na obr. 3-4. Jedná se o prakticky stejné uspořádání jako u předchozího případu, s tím rozdílem, že pohybový šroub 11 je axiálně zachycen v konstrukci 13. Tato konstrukce je pevně spojena se statorem ventilátoru. Táhlo 10 se neotáčí, neboť je zajištěno perem 14 proti otáčení a unášecí deska je s táhlem spojena pomocí ložiska 15. K uložení lopatek oběžného kola jsou použita valivá ložiska 26. Tím se sníží tření při natáčení lopatek za chodu. V tomto momentě jsou ložiska zatížena odstředivou silou, která působí na



lopatku.

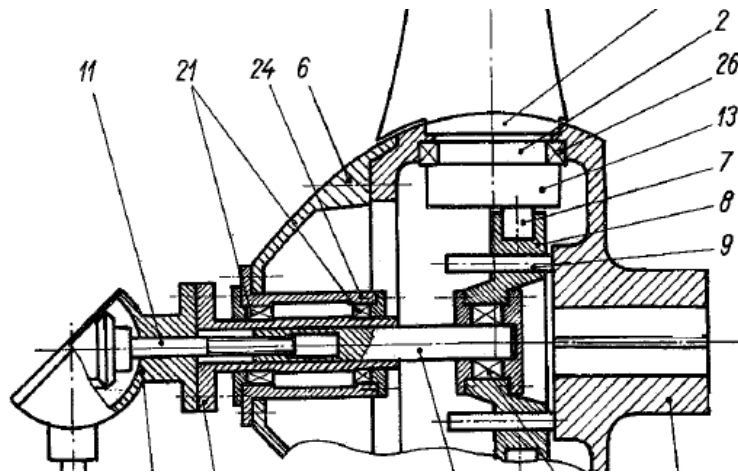


Obrázek 3- 4 Natáčení oběžných lopatek za chodu bez kompenzace momentu odstředivých sil [1]

Obrázek 3- 3 Natáčení oběžných lopatek za klidu [1]

### 3.2.3 Mechanismy natáčení oběžných lopatek za chodu s vyrovnávacím závažím

Pokud se u oběžných lopatek neprovede vyrovnání momentů odstředivých sil pomocnými závažími, tak je ložisko 15 namáháno silou, která je v rovnováze s momentem odstředivých sil lopatek. Vzhledem k tomu, že se jedná o velké síly, je vhodné doplnit lopatky oběžného



Obrázek 3- 5 Natáčení oběžných lopatek za chodu s kompenzací momentu odstředivých sil [1]

kola o vyrovnávací závaží, čímž se odlehčí ložisku ventilátoru a sníží se ovládací síly mechanismu. Naproti tomu při stoprocentním vyrovnání momentů odstředivých sil dochází ke kmitání lopatek kolem jejich os otáčení, a s tím souvisejícím vyšším opotřebením jednotlivých částí mechanismu. Proto se moment odstředivých sil vyrovnává pouze na 85 – 90%. Díky tomu působí výslednice sil na lopatku stále stejným směrem a ke kmitání lopatek tak nedojde. Jak je vidět z obr. 3-5 vyrovnávací závaží 13 je umístěno na

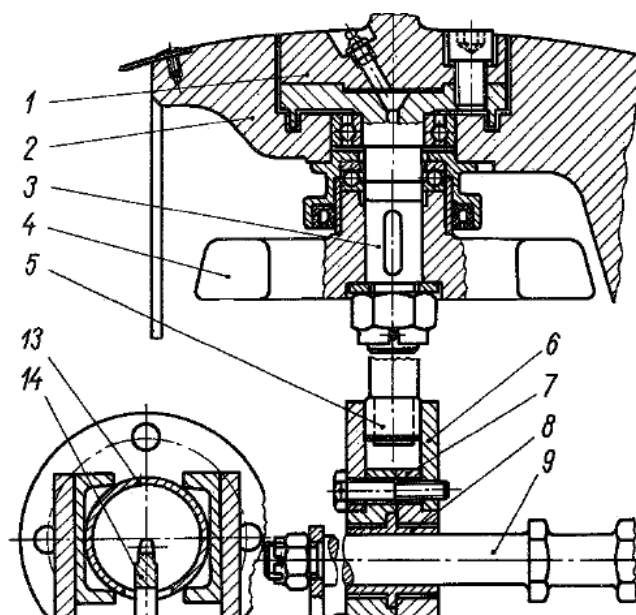
protipřírubě 2.

### 3.3 Konstrukční uspořádání mechanismu

Jedna z možností konstrukčního uspořádání mechanismu pro natáčení oběžných lopatek ventilátoru za chodu je uvedeno na obr. 3-6 oběžná lopatka 1 je pomocí příruby přišroubována k čepu 3. Ten je v ložiskách uložen v náboji oběžného kola 2. Na tomto čepu je zároveň usazeno závaží 4 pro vyrovnání momentu setrvačných sil oběžné lopatky. Spolu se závažím je na čepu ovládací páka 5. Páka je zakončena kaleným kamenem, který je šrouby spojen v drážce ovládací desky 7. Ta se skládá ze dvou souměrných součástí. Drážka je vytvořena disky 6. ovládací deska je vedena na vodících tyčích 9. Ty jsou přišroubovány k náboji oběžného kola.

### 3.4 Porovnání mechanismů

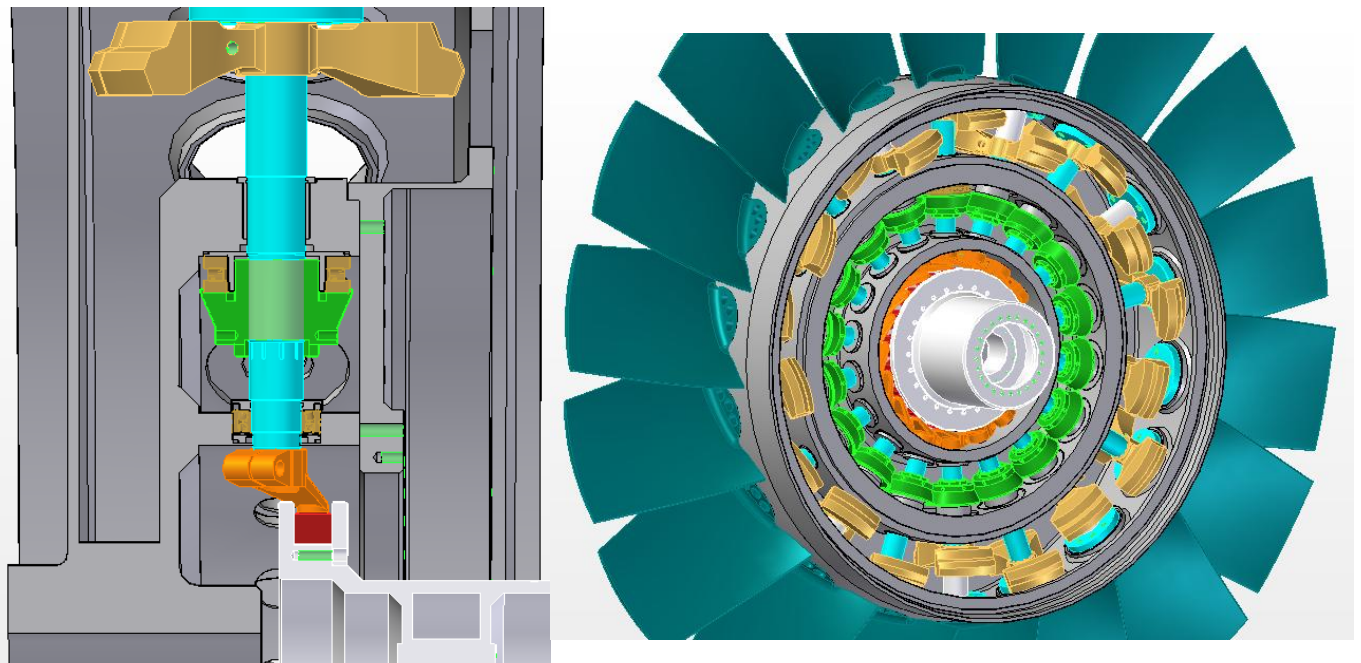
V této části práce budou porovnány dva mechanismy pro natáčení oběžných lopatek od tří různých firem. Jedná se o českou firmu ZVVZ Milevsko a.s. a dánskou HOWDEN. Všechny tři výše zmíněné podniky nabízejí ventilátory s možností regulace výkonu za chodu pomocí natáčení oběžných lopatek.



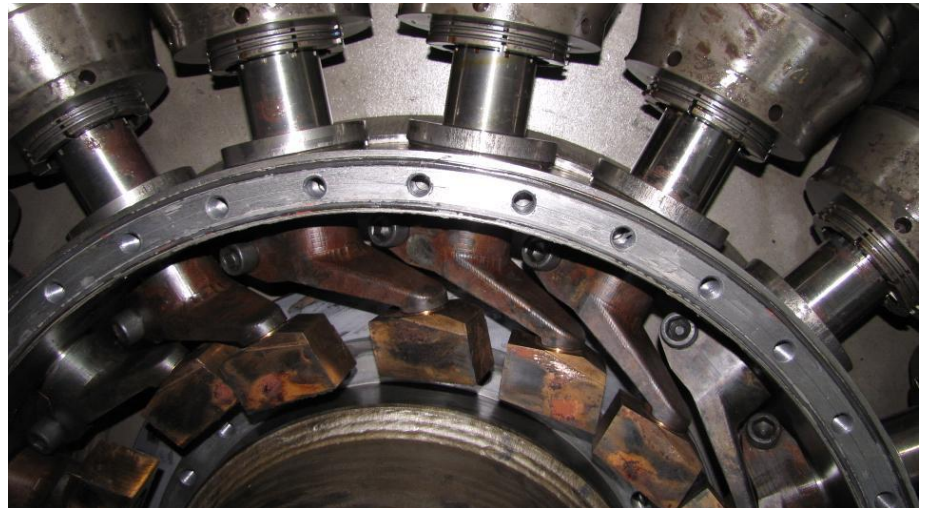
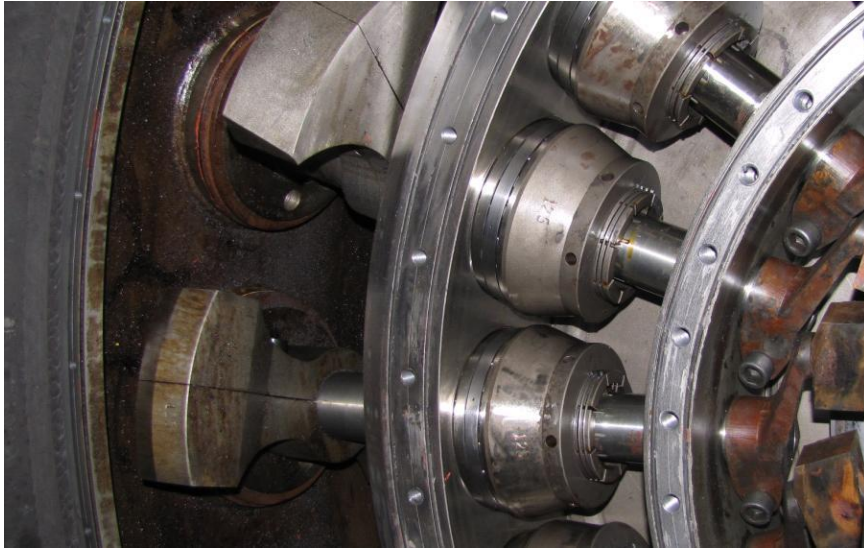
Obrázek 3- 6 Mechanismus natáčení oběžných lopatek za chodu [1]

### 3.4.1 Mechanismus ZVVZ Machinery

Princip činnosti mechanismu všech tří firem pracuje na stejném principu, který byl již zmíněn v předešlé kapitole. Největší rozdíl je v konstrukčním řešení uložení hřídele lopatek. Na obrázku 3-7 a 3-8 je naznačeno uložení hřídele lopatek firmy ZVVZ Machinery a.s. Hřídel oběžné lopatky je uložena ve dvou valivých ložiskách. Jedno valivé ložisko je axiální (válečkové) a druhé je radiálněaxiální (dvouřadé soudečkové). Váleškové ložisko je nasazeno na hřídel a je ručně dotaženo maticí ložiska. Rozváděcí páka je s hřídelí lopatky spojena pomocí svěrného spoje, čímž je zajištěn přenos krouťacího momentu. Kalený kámen (vyznačen červeně) je uložen mezi dvěma vodícími deskami. Ty jsou napojeny na hydromotor, jenž koná posuvný pohyb.



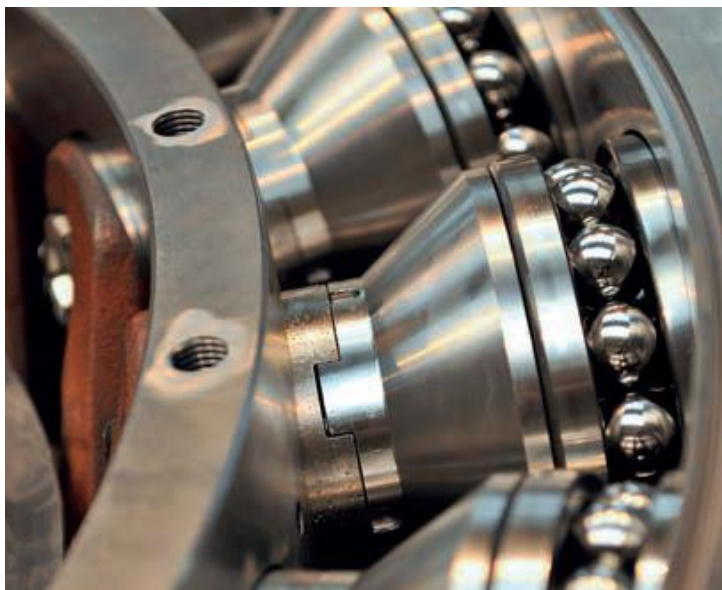
Obrázek 3- 7 Oběžné kolo ventilátoru APJB 2650 ZVVZ Machinery ( vlevo detail uložení hřídele lopatek [4])



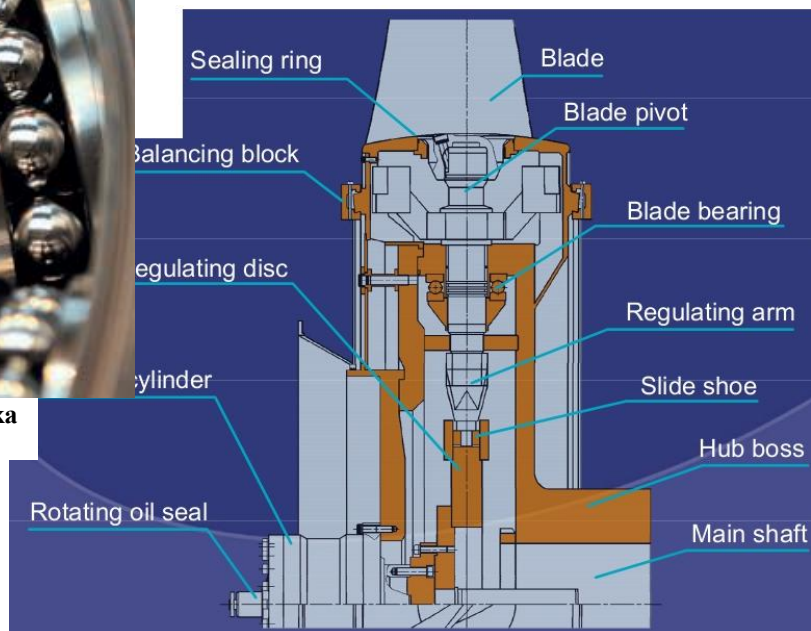
Obrázek 3- 8 Reálné uložení hřídele mechanismu ZVVZ [5]

### 3.4.2 Mechanismus HOWDEN

Naproti tomu uložení hřídele firmy HOWDEN (obrázek 3-10) je zcela odlišné, a to z toho důvodu, že hřídel lopatky je uložena pouze v jednom valivém ložisku (axiální kuličkové). Na obrázku 3-9 je vidět, že vzhledem k menšímu prostoru ložiskové části je ovládací páka spojena tvarovým stykem přímo s maticí ložiska. Ta je našroubována na hřídeli až k ložisku a jistí ho tak v axiálním směru. Přenos krouťícího momentu mezi ovládací pákou a hřídelí lopatky je zajištěn pomocí pera.

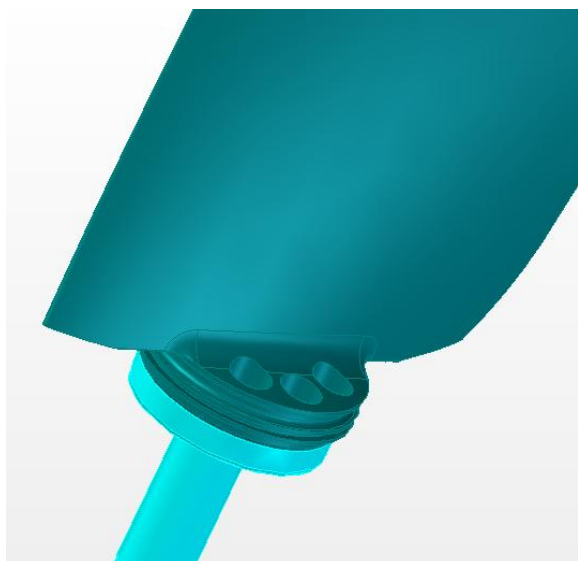


Obrázek 3- 9 Spojení ovládací páky s maticí ložiska



Obrázek 3- 10 uložení hřídele lopatky firmy HOWDEN

Další odlišností tohoto mechanismu je vyrovnávací závaží, které je usazené na každé hřídeli ve stejné pozici. Kdežto v mechanismu ZVVZ jsou uloženy „na střídačku“, jak je naznačeno na obrázku 3-7. Velký rozdíl je také v napojení oběžné lopatky ke hřídeli. V mechanismu ZVVZ je lopatka přišroubována šrouby (obrázek 3-11). Naopak u firmy HOWDEN je lopatka opatřena závitem a našroubovaná na hřídel. Jak je vidět na obrázku 3-12 lopatka je opatřena otvorem pro šroub, který je našroubován do drážky zhotovené na konci hřídele.



Obrázek 3- 11 Uložení lopatky ZVVZ



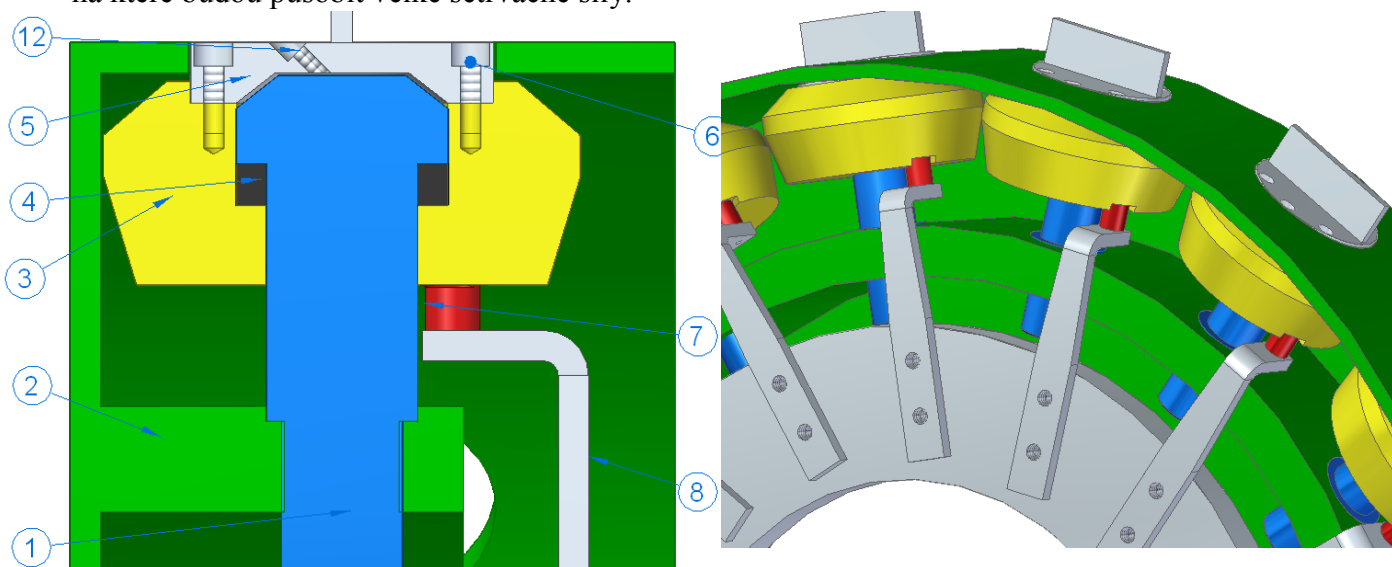
Obrázek 3- 12 Uložení lopatky HOWDEN

## 4 Návrh mechanismů

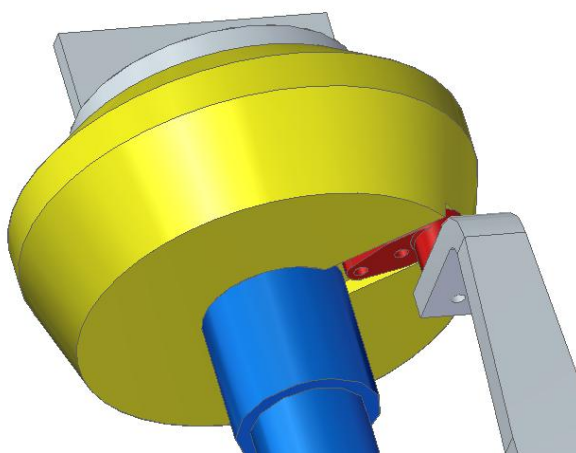
V této části práce jsou navrženy a popsány 4 různé mechanismy pro natáčení lopatek oběžného kola axiálních ventilátorů. Návrhy jsou realizovány v softwaru Solid EDGE ST4 od firmy SIEMENS. Navržené varianty jsou vymodelovány velmi zjednodušeně, aby byl pochopen princip těchto mechanismů, neboť detailní model vybrané varianty je uveden v následující kapitole.

### 4.1 První varianta

Čep 1 mechanismu, který je znázorněn na obrázku 4-1 má na svém konci zhotoven závit. Celý čep je našroubován do náboje oběžného kola 2. Oběžná lopatka 5 je šrouby se zápusťnou hlavou přišroubována k vyrovnávacímu závaží. Pohyb lopatky je zajištěn pouze jedním valivým ložiskem 4 uloženým ve vyrovnávacím závaží a kluzným ložiskem. V oběžné lopatce je navrtán otvor 12 pro mazání ložisek. Na vodící desce 9 jsou přišroubovány páky 8, které jsou dále spojeny pomocí čepu 7 s otočným šroubem 11 (viz. Detail mechanismu na obrázku 4-2). Mechanismus má velkou nevýhodu v tom, že je uložen pouze v jednom valivém ložisku, na které budou působit velké setrvačné síly.



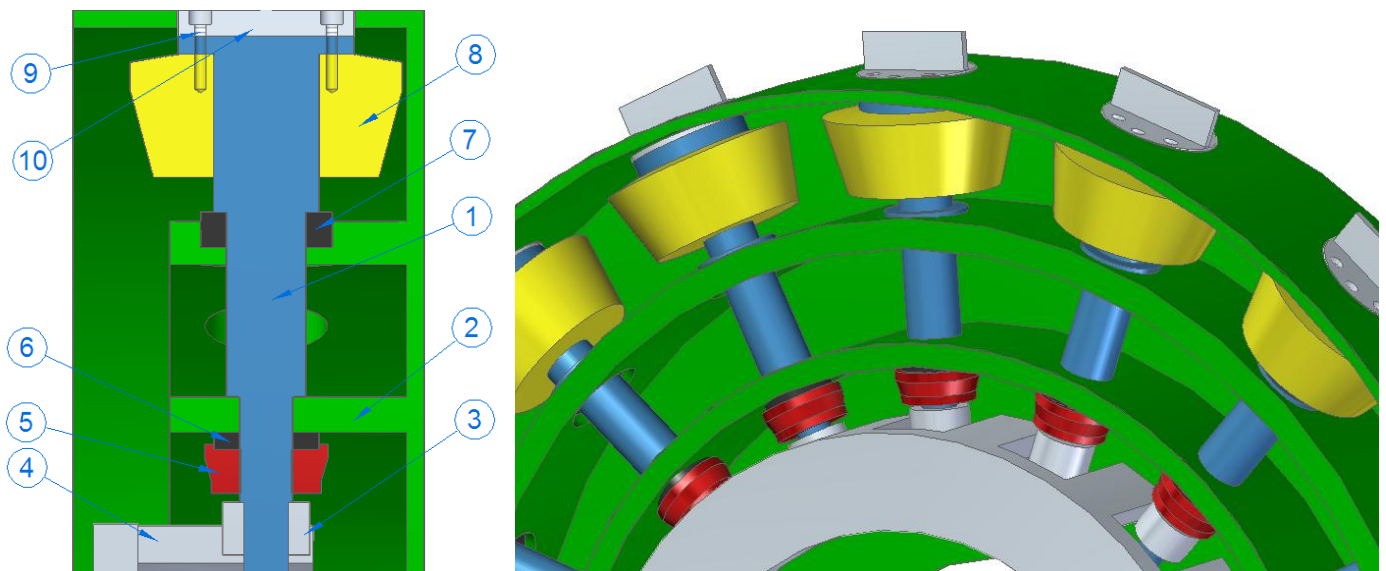
Obrázek 4- 1 Uložení hřídele lopatek a pohled na oběžné kolo první varianty mechanismu



Obrázek 4- 2 Detail spojení páky a vyrovnávacího závaží

## 4.2 Druhá varianta – s ozubeným převodem

Tento mechanismus (obrázek 4-3) je založen na principu ozubeného převodu. Na hřídeli 1 je pomocí pera a pojistných kroužků usazeno ozubené kolo 3. Hřídel s ozubeným kolem se dostane do pohybu vodící deskou s hřebenem 4. Hřídel je uložena v náboji 2 oběžného kola na dvou valivých ložiskách 6 a 7. Ložisko 6 je pojištěno maticí ložiska 5. Vyrovňovací závaží 8 je přišroubováno k oběžné lopatce šrouby se zápustnou hlavou.

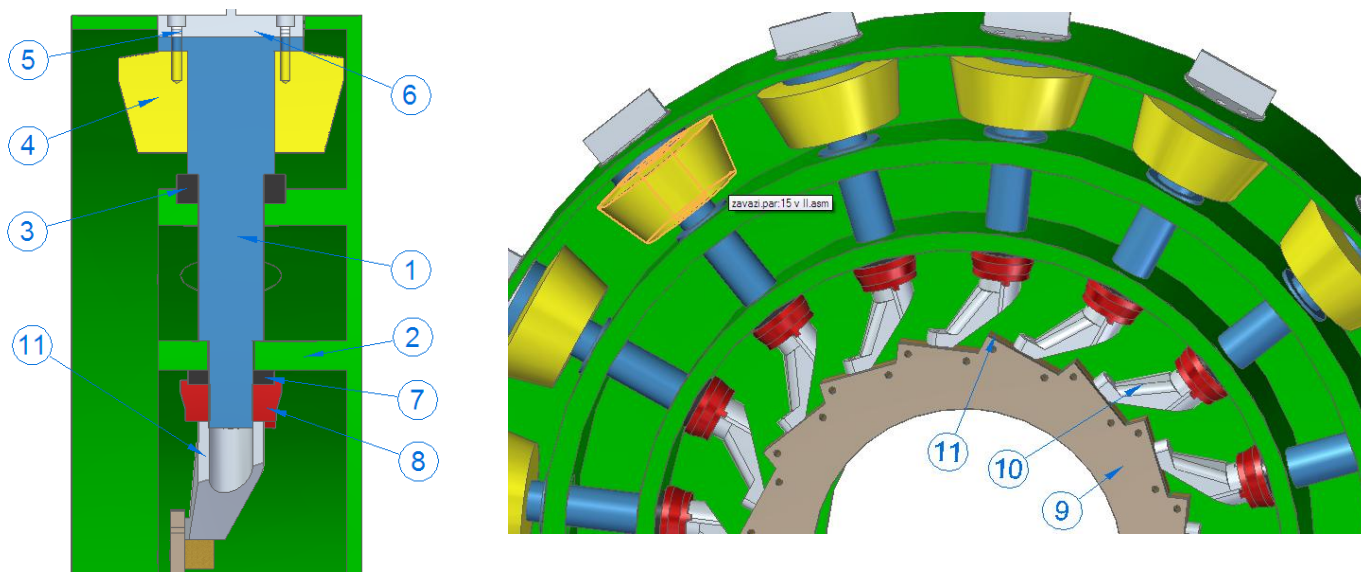


Obrázek 4- 3 řez mechanismem a pohled na celý mechanismus

Výše uvedený mechanismus má značnou nevýhodu hlavně v náročnosti výroby ovládací desky s hřebenem. Další nevýhodou může být poměrně velká hlučnost mechanismu vzhledem k umístění ozubeného převodu. Tato nevýhoda lze ovšem odstranit použitím vhodných protihlukových opatření (např. tlumiče hluku umístěné za ventilátorem), což ale výrazně prodraží výrobu mechanismu.

## 4.3 Třetí varianta

Na obrázku 4-4 je mechanismus, jehož princip vychází z mechanismu popsaného v kapitole 3.3. Hlavní rozdíl je v tom, že kalený kamen (11), jenž je spojen s ovládací pákou (10) není uložen mezi dvěma sešroubovanými deskami, ale pouze na jedné, ke které je přišroubován. Jak je patrné z obrázku 4-4 vpravo ovládací deska (9) je z pohledu výroby poměrně složitá. Hřídel (1) je v tomto případě uložena v náboji (2) ve dvou valivých ložiskách, v axiálním kuličkovém (3) a jednořadém kuželíkovém (7). Axiální kuličkové ložisko je pojištěno maticí ložiska (8). Na hřídel je jako v předchozích případech přišroubována lopatka (6) a vyrovnávací závaží (4).



Obrázek 4- 4 řez mechanismem a pohled na celý mechanismus

## 5 Výběr nejvhodnější varianty

Ze tří výše uvedených mechanismů pro natáčení oběžných lopatek ventilátoru vybereme tu nejvhodnější variantu. Ta bude vybrána na základě managerského rozhodování.

### 5.1 Volba hledisek

Nejprve provedeme volbu několika hledisek, podle kterých budeme následně jednotlivé varianty posuzovat podle jejich náročnosti. Zvolme tedy následující hlediska,:

hledisko výroby

hledisko montáže

hledisko finančních nákladů

hledisko hlučnosti

hledisko technologické náročnosti

### 5.2 Hodnocení a výběr nejvhodnější varianty

V níže uvedené tabulce je ohodnocení jednotlivých variant dle výše uvedených hledisek. Hodnocení bylo provedeno na stupnici od 1 do 5 jako ve škole, kde 1 je nízká náročnost a 5 vysoká náročnost. Po sečtení všech variant je patrné, že nejméně vhodná je variant č. 2, tedy mechanismus s ozubeným převodem. Zbylé dvě varianty dopadly takřka stejně. Nejlepší hodnocení má však varianta č. 3.

Tuto variantu mechanismu je v další části práce konstrukčně rozpracována a ve výpočetním programu ANSYS Workbench 14.5 je provedena deformační analýza některého jednoho dílu mechanismu.



|             | 1.varianta | 2.Varianta | 3.Varianta |
|-------------|------------|------------|------------|
| Výroba      | 2          | 5          | 2          |
| Montáž      | 4          | 2          | 2          |
| Náklady     | 2          | 3          | 2          |
| Hlučnost    | 2          | 4          | 2          |
| Technologie | 2          | 2          | 2          |
| $\Sigma$    | 12         | 16         | 10         |

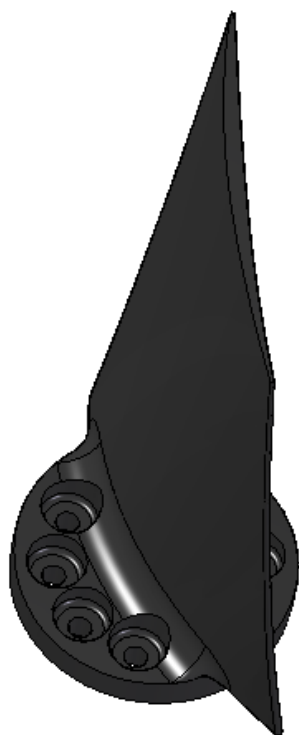
## 6 Konstrukce vybrané varianty

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, jako nejvhodnější byla vybrána třetí varianta. Tato varianta v sobě kombinuje prvky vyskytující se v mechanismech od společností ZVVZ Machinery a HOWDEN. Výkres sestavy rotoru ventilátoru je přiložen k této práci.

### 6.1 Zadání

Jelikož je tato práce zpracována ve spolupráci se společností ZVVZ Machinery, bylo nutné respektovat zadání této společnosti.

Úkolem bylo zkonstruovat oběžné kolo ventilátoru APJC o velikosti oběžného kola 4500 mm. Jedná se o průměr přes oběžné lopatky. Dále byla poskytnuta lopatka oběžného kola (viz obrázek 6-1. Dle velikosti lopatky a zadaná velikosti oběžného kola byl nejprve zkonstruován náboj oběžného kola (obrázek 6-2).



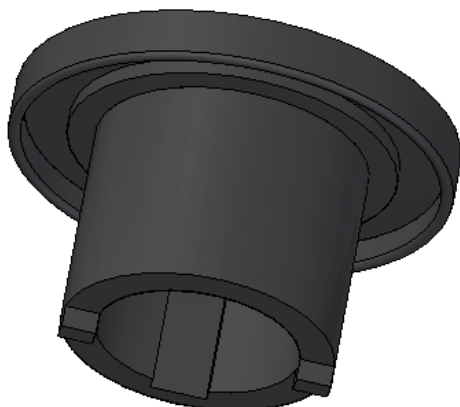
Obrázek 6- 2 Zadaná lopatka OK



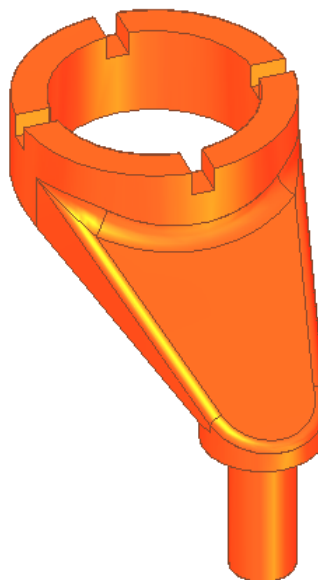
Obrázek 6- 1 Náboj oběžného kola

## 6.2 Konstrukce mechanismu

Největší problém byl v uložení „spodního“ kuželíkového ložiska, jenž byl vyřešen následovně. Kuželíkové ložisko je nalisováno na víko, které je nasazeno na hřídeli lopatky a přenos momentu je vyřešen pomocí pera (viz. obrázek 6-3). Na spodní části víka jsou zhotoveny výstupky (podobně jako u firmy HOWDEN), jenž zapadají do zářezů zhotovených na ovládací páce ( obrázek 6-4). Díky tomu je zajištěn přenos momentu mezi ovládací deskou a hřídelí lopatky.



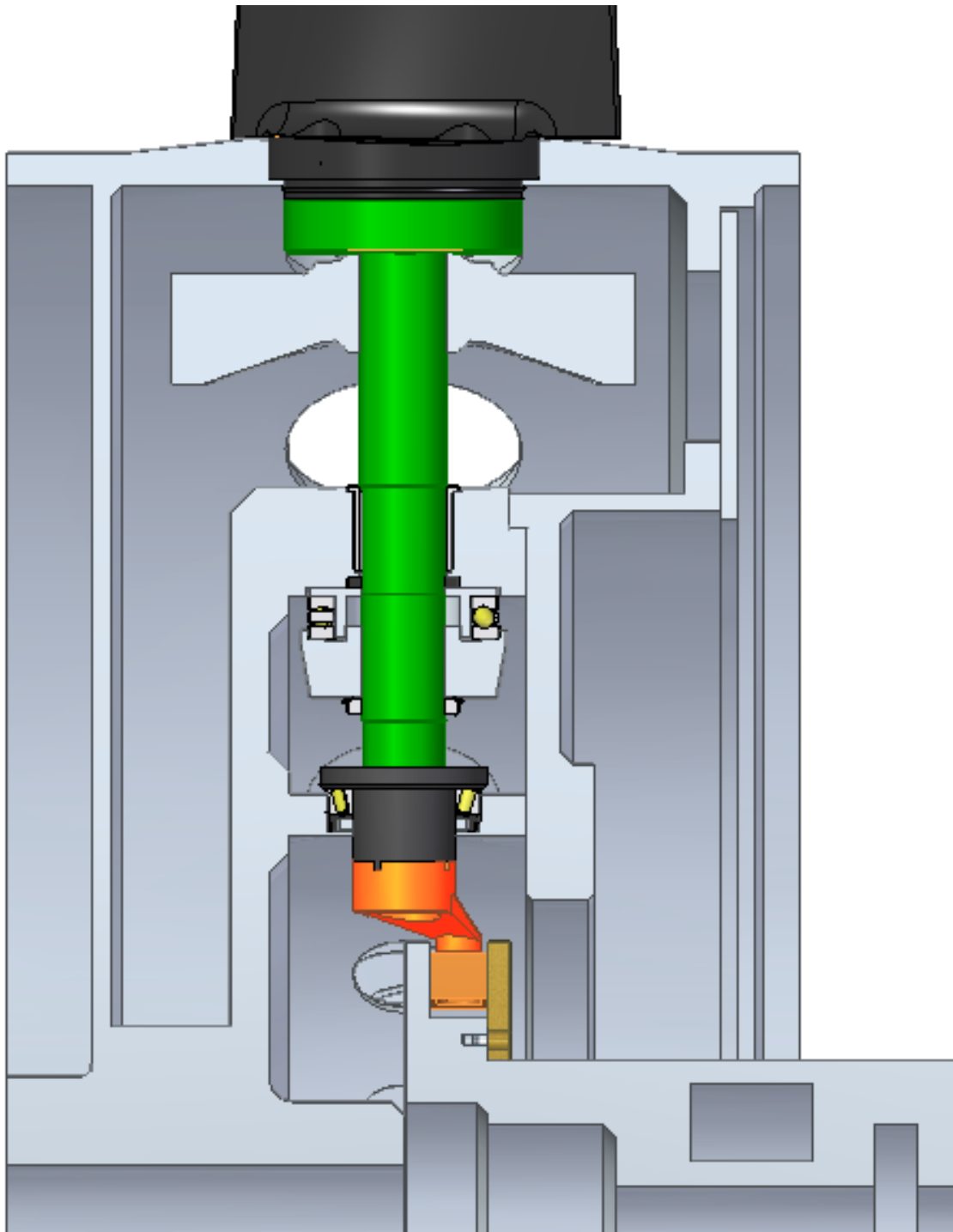
Obrázek 6- 3 Víko Ložiska



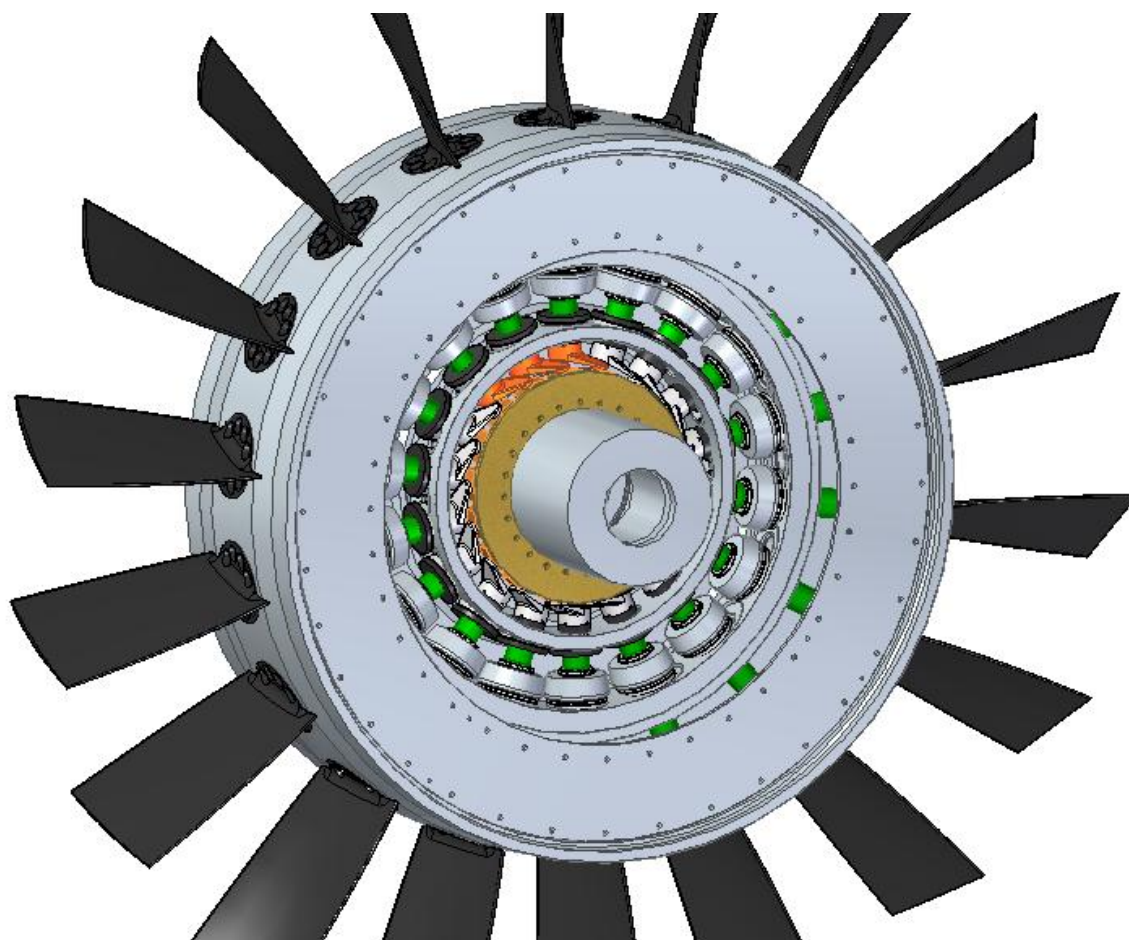
Obrázek 6- 4 Páka mechanismu

### 6.3 Výsledný rotor ventilátoru

Na níže uvedených obrázcích je uveden výsledný rotor ventilátoru. Na obrázku 6-5 v řezu a na obrázku 6-6 kompletní rotor. V návrhu, uvedeném v kapitole 4 je kámen přišroubován pouze k vodící desce. Z důvodu velkého namáhání kamene jsem se rozhodl pro uložení kamene mezi dvěma dakami stejně jako tomu je u mechanismu ZVVZ a HOWDEN.



Obrázek 6- 5 Výsledný rotor ventilátoru v řezu



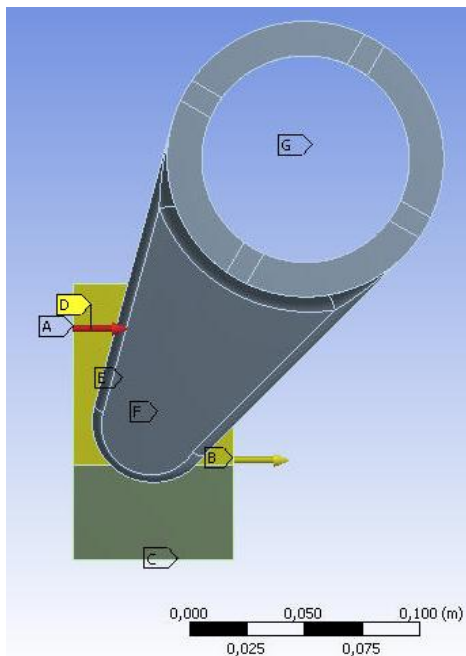
Obrázek 6- 6 Výsledný rotor ventilátoru

## 7 Pevnostní výpočet vybrané komponenty

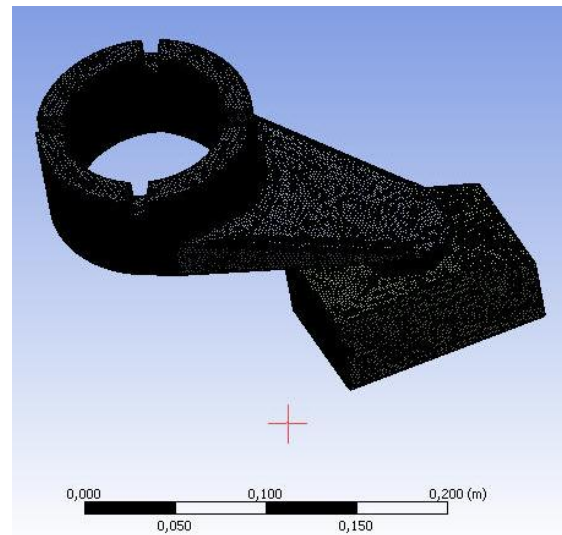
Pevnostní výpočet je realizován pro jednu z komponent mechanismu, a to pro páku společně s kamenem. Výpočet je proveden v programu ANSYS 14.5.

### 7.1 Zadání

Okrajové podmínky byly zadány zadavatelem, tedy firmou ZVVZ Machinery. Zadána byla síla zatěžující jednu páku, a to 12,7 kN. V okrajových podmínkách by dále nastaven posuvný pohyb kamene funkcí „support – displacement“, otočné uložení na páce v místě spojení s hřídelem a v uložení páky a kamene. Tato uložení byla provedena pomocí spojení dvou komponent rotační vazbou „connections – revoluce“. Takto nastavená úloha je vidět na obrázku 7-1. Červenou šipkou je znázorněna zatěžující síla a žlutou šipkou směr pohybu kamene. Na obrázku 7-2 je model nasítovaný pomocí téměř jednoho milionu buněk.



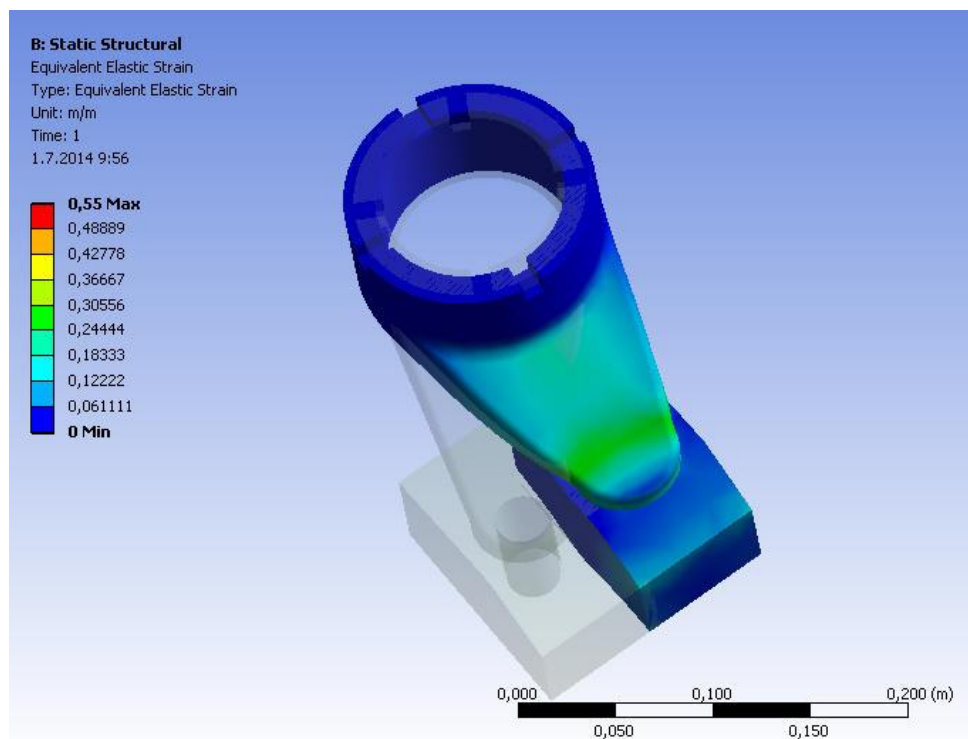
Obrázek 7- 1 Model s okrajovými podmínkami



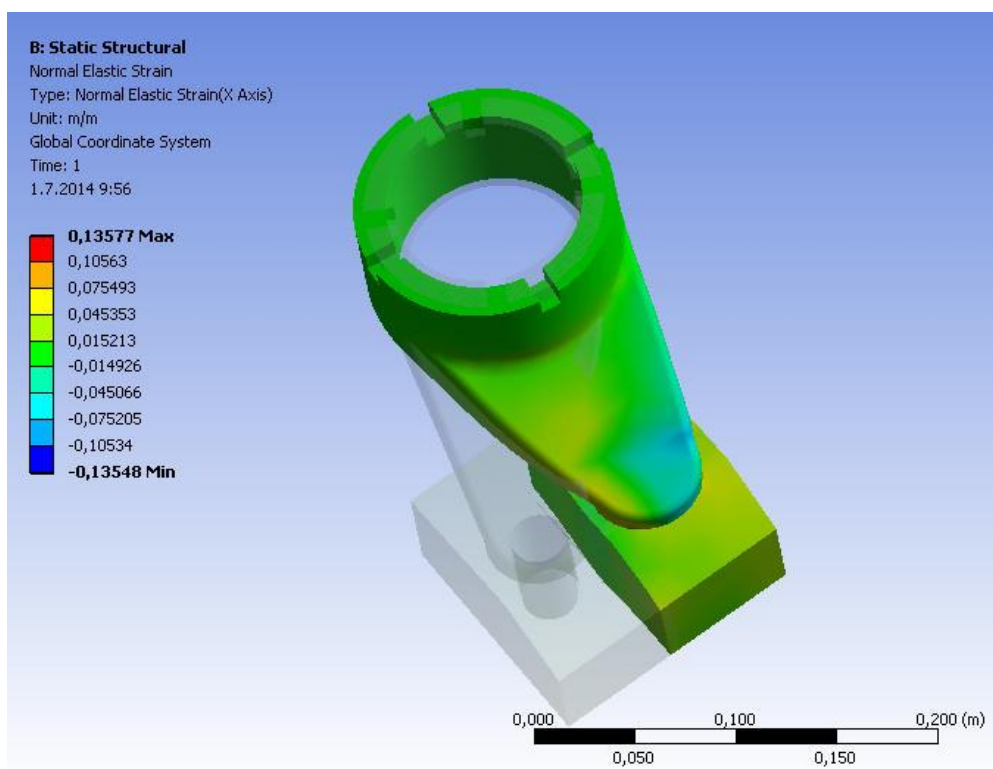
Obrázek 7- 2 Nasítovaný model

### 7.2 Výsledné hodnoty

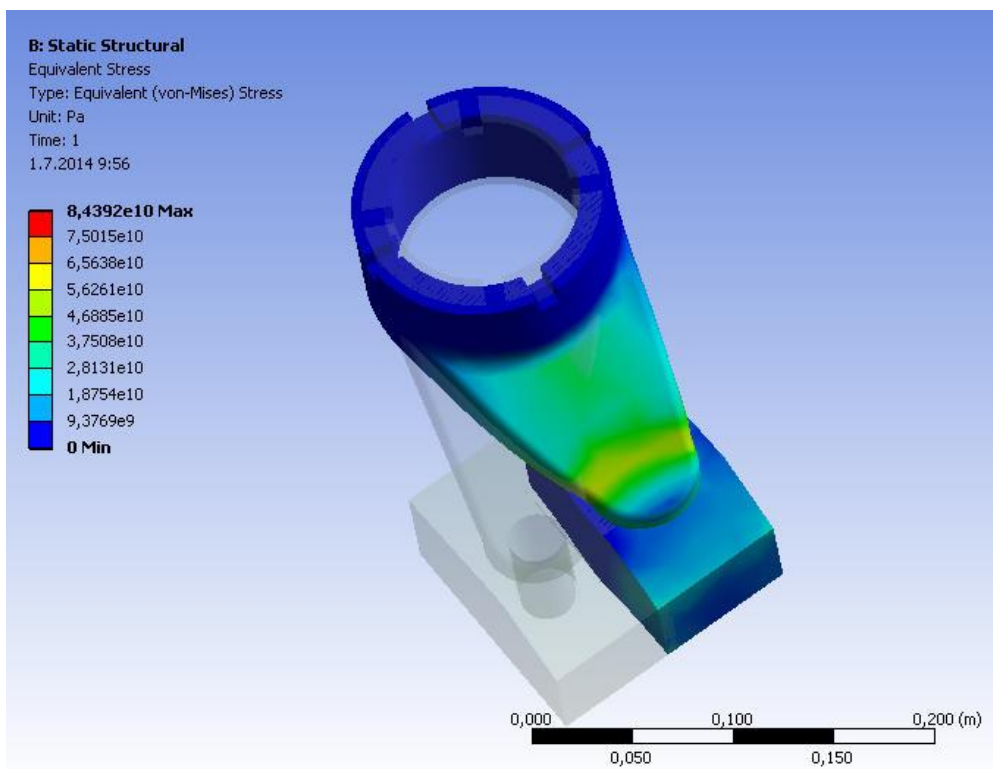
Na následujících obrázcích jsou znázorněny výsledky pevnostního výpočtu páky. Jedná se o normálové a ekvivalentní napětí (obrázky 7-3 a 7-4), ekvivalentní a normálový tlak (obrázky 7-5 a 7-6) a celkovou deformaci ( obrázek 7-7).



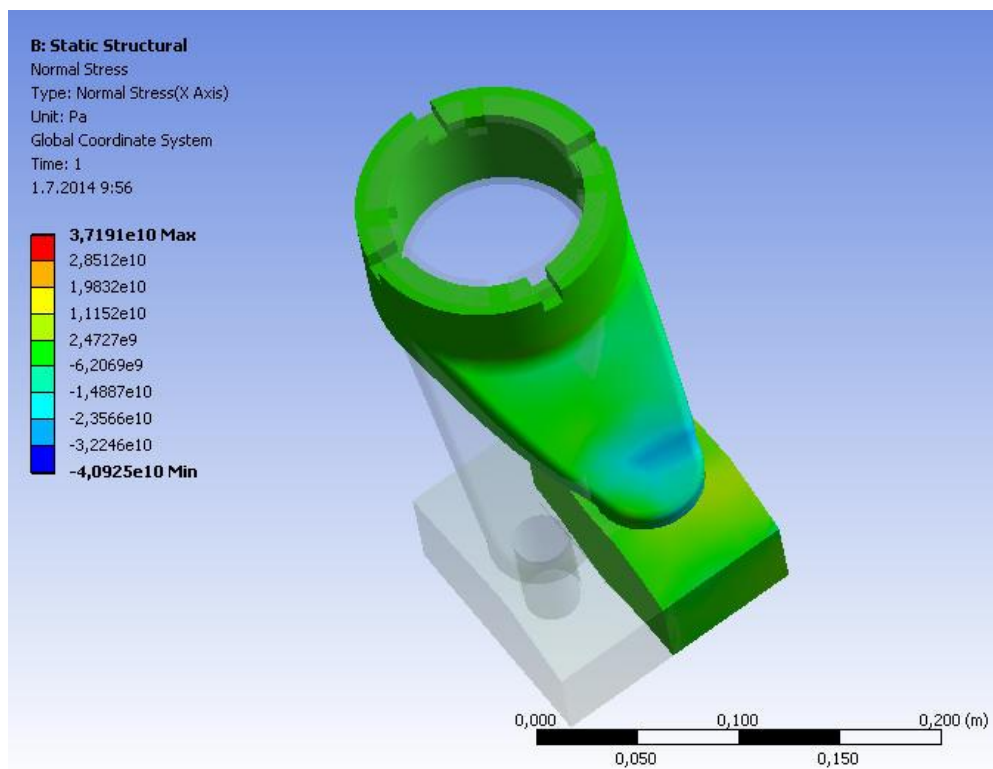
Obrázek 7- 3 Ekvivalentní napětí



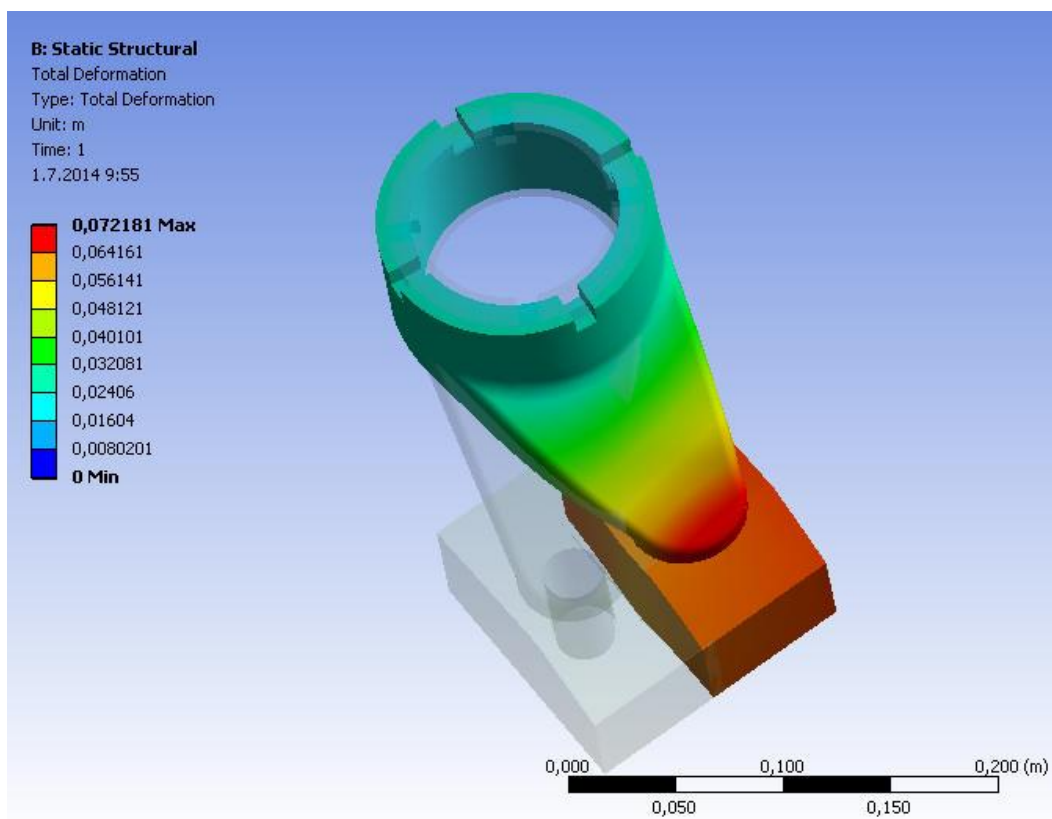
Obrázek 7- 4 Normálové napětí



Obrázek 7- 5 Ekvivalentní tlak



Obrázek 7- 6 Normálový tlak



Obrázek 7- 7 Celková deformace



## **Závěr**

Výsledkem bakalářské práce je ventilátor APJC 4500 s regulací natáčením oběžných lopatek za chodu. Natáčecí mechanismus byl vybrán ze tří variant. Otázkou u tohoto mechanismu zůstává, zda pro přenos momentu použít páku se svěrným spojem (viz. ZVVZ), nebo s perem (viz. HOWDEN). Obě možnosti jsou zcela funkční a použitelné. Problém může nastat v případě, že dojde k selhání pera. V tomto případě je nutné demontovat celou hřídel lopatky. Kdežto při poruše páky se svěrným spojem stačí vyměnit páku a problém je vyřešen. Z tohoto pohledu se zdá mechanismus firmy ZVVZ Machinery jako vhodnější k použití.

Díky první části této práce jsem měl možnost se seznámit s teorií ventilátorů a jejich regulace, což ještě zesílilo můj zájem o tuto problematiku. Bohužel množství informací o regulaci ventilátorů natáčením oběžných lopatek není příliš velké (pominu-li firemní podklady), neboť každá firma si střeží své know-how.

## Seznam použité literatury

- [1] Jan Čermák a kol: Ventilátory, SNTL., 1974
- [2] [www.tzb-info.cz](http://www.tzb-info.cz)
- [3] Székyová, Ferstl, Nový: Větrání a klimatizace, JAGA Bratislava, 2006
- [4] [www.zvvz.cz](http://www.zvvz.cz), podnikové podklady
- [5] <http://aistovo.blog.cz/>
- [6] [www.howden.com](http://www.howden.com), podnikové podklady