

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

EGOR SOROKIN

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV LETADLOVÉ A KOSMICKÉ
TECHNIKY

**PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH
TURBOHŘÍDELOVÉHO MOTORU PRO
DEMONSTRÁTOR HYBRIDNÍHO
POHONNÉHO SYSTÉMU LETOUNU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

EGOR SOROKIN

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....
Egor Sorokin

Děkuji tímto Ing. Janu Klesovi, Ph.D. za cenné rady a odborné konzultace při vypracování této práce.

Anotační list

Jméno autora: Egor

Příjmení autora: Sorokin

Název práce česky: Předběžný návrh turbohřídelového motoru pro demonstrátor hybridního pohonného systému letounu

Název práce anglicky: Preliminary Design of Turboshaft Engine for the Demonstrator of Hybrid Propulsion System

Rozsah práce: počet stran: 62
počet obrázků: 23
počet tabulek: 37
počet příloh: 2

Akademický rok: 2018/2019

Jazyk práce: čeština

Ústav: Ústav letadlové a kosmické techniky

Studijní program: Letadlová a kosmická technika

Vedoucí práce: Ing. Jan Klesa, Ph.D.

Oponent: doc. Ing. Svatomír Slavík CSc.

Konzultant práce: Ing. Jan Klesa, Ph.D.

Anotace česky: Diplomová práce se zabývá problematikou hybridních letadlových motorů. Na začátku je představen současný stav problematiky s uvedením výběru existujících projektů letadel s hybridními nebo elektrickými pohonnými jednotkami. Dále je proveden návrh optimálního pracovního cyklu motoru, pak návrh jednotlivých částí motoru: kompresoru, turbín, převodovky. Nakonec jsou popsány jednotlivé díly motoru z konstrukčního hlediska.

Anotace anglicky: This diploma thesis focuses on hybrid aircraft engines. The current state of problem with a list of existing hybrid or electric aircraft engine projects is described at the beginning. After that, a calculation of optimal working cycle of motor is made, followed by calculation of main parts of the motor, such as a compressor, turbines and a gearbox. The description from the design point of view of single motor parts can be found at the end.

Klíčová slova: Hybridní letadlový motor, alternativní pohon letadel, návrh proudového motoru, radiální kompresor.

Key words: Hybrid aircraft engine, alternative aircraft engine, construction of jet engine, radial compressor.

Obsah

Použité symboly	3
1 Úvod	11
2 Příklady letadel s pohony na alternativní zdroje energie	12
2.1 <i>Pipistrel Hypstair</i>	12
2.2 <i>Diamond DA-36 E-Star.....</i>	13
2.3 <i>E-Fan X.....</i>	14
2.4 <i>Zunum Aero</i>	15
2.5 <i>STARC-ABL</i>	15
2.6 <i>Eviation Alice</i>	16
2.7 <i>Pipistrel Taurus Electro.....</i>	17
3 Koncepce vlastního návrhu	18
4 Návrh tepelného oběhu	19
5 Návrh kompresoru	24
5.1 <i>Plán návrhu</i>	24
5.2 <i>Vstupní data - 1. stupeň</i>	24
5.3 <i>Vstup na kolo kompresoru.....</i>	24
5.4 <i>Výstup z kola kompresoru</i>	25
5.5 <i>Bezlopatkový difuzor</i>	27
5.6 <i>Lopátkový difuzor</i>	28
5.7 <i>Výstupní kanál kompresoru.....</i>	29
5.8 <i>1. stupeň – výstupní data</i>	29
5.9 <i>2. stupeň.....</i>	33
6 Návrh turbíny.....	36
6.1 <i>Předběžný návrh.....</i>	36
6.2 <i>Detailní návrh</i>	37
7 Návrh převodovky.....	44
7.1 <i>Skutečný výkon motoru</i>	44
7.2 <i>Převodový poměr.....</i>	44
7.3 <i>Počty zubů. Výpočet modulů</i>	44
7.4 <i>Korekce</i>	45
7.5 <i>Kontrola převodu:.....</i>	47
7.6 <i>Skutečné otáčky.....</i>	47
7.7 <i>Návrh hřídelí.....</i>	47

8	Kontroly	48
8.1	<i>Výpočet ložisek</i>	48
8.2	<i>Statická kontrola hřídelí</i>	53
8.3	<i>Výpočet spojení náboj-hřídel</i>	54
9	Konstrukční návrh	55
9.1	<i>Řez motorem</i>	55
9.2	<i>Kryty kol kompresorů</i>	56
9.3	<i>Kryt spalovací komory</i>	56
9.4	<i>Vnitřní stěny difuzorů, lopatky difuzoru</i>	56
9.5	<i>Spalovací komora</i>	57
9.6	<i>Statory turbíny</i>	57
9.7	<i>Lopatky</i>	58
9.8	<i>Kola turbín</i>	58
9.9	<i>Kola kompresoru</i>	59
9.10	<i>Distanční trubky a jiné</i>	59
10	Závěr	60
11	Zdroje	61

Použité symboly

a_{11}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
a_{12}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za kolem 1. stupně kompresoru
a_{13}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
a_{14}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
a_{15}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za lopatkovým difuzorem 1. stupně
a_{21}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
a_{22}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za kolem 2. stupně kompresoru
a_{23}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
a_{24}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
a_{25}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku za lopatkovým difuzorem 2. stupně
A_{10}	$[mm^2]$	Plocha kanálu v řezu 0-0 1. stupně
A_{15}	$[mm^2]$	Plocha kanálu v řezu 5-5 1. stupně
A_{20}	$[mm^2]$	Plocha kanálu v řezu 0-0 2. stupně
A_{25}	$[mm^2]$	Plocha kanálu v řezu 5-5 2. stupně
b_{12}	$[mm]$	Šířka kanálu na výstupu z kola 1. stupně
b'_{12}	$[mm]$	Šířka kanálu bezlopatkového difuzoru na výstupu z kola 1. stupně
b_{13}	$[mm]$	Šířka kanálu lopatkového difuzoru 1. stupně
b_{22}	$[mm]$	Šířka kanálu na výstupu z kola 2. stupně
b'_{22}	$[mm]$	Šířka kanálu bezlopatkového difuzoru na výstupu z kola 2. stupně
b_{23}	$[mm]$	Šířka kanálu lopatkového difuzoru 2. stupně
c_{10}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost před motorem
c_{11}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
c_{12}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za kolem 1. stupně kompresoru
c_{13}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
c_{14}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
c_{15}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za lopatkovým difuzorem 1. stupně
c_{10r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost před motorem
c_{11r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
$c_{12\theta}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Tangenciální rychlost za kolem 1. stupně kompresoru
c_{12r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost za kolem 1. stupně kompresoru
c'_{12r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost na vstupu do difuzoru 1. stupně kompresoru
c_{13r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru 1. stupně kompresoru
c_{13u}	$[m \cdot s^{-1}]$	Obvodová rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru 1. stupně kompresoru
c_{20}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost před motorem
c_{21}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
c_{22}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za kolem 1. stupně kompresoru
c_{23}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
c_{24}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
c_{25}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za lopatkovým difuzorem 1. stupně
c_{20r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost před motorem
c_{21r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost na vstupu do kola 1. stupně kompresoru

$c_{22\theta}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Tangenciální rychlost za kolem 1. stupně kompresoru
c_{22r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost za kolem 1. stupně kompresoru
c'_{22r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost na vstupu do difuzoru 1. stupně kompresoru
c_{23r}	$[m \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru 1. stupně kompresoru
c_{23u}	$[m \cdot s^{-1}]$	Obvodová rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru 1. stupně kompresoru
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku
c_{pt}	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita spalin při konstantním tlaku
D_{10}	$[mm]$	Průměr hřídele kola 1. stupně
D_{11}	$[mm]$	Průměr vstupu na kolo 1. stupně
D_{11pr}	$[mm]$	Střžení průměr vstupu 1. stupně
D_{12}	$[mm]$	Výstupní průměr 1. stupně
D_{13}	$[mm]$	Průměr vstupu do lopatkového difuzoru 1. stupně
D_{14}	$[mm]$	Průměr výstupu z lopatkového difuzoru 1. stupně
D_{20}	$[mm]$	Průměr hřídele kola 2. stupně
D_{21}	$[mm]$	Průměr vstupu na kolo 2. stupně
D_{21pr}	$[mm]$	Střžení průměr vstupu 2. stupně
D_{22}	$[mm]$	Výstupní průměr 2. stupně
D_{23}	$[mm]$	Průměr vstupu do lopatkového difuzoru 2. stupně
D_{24}	$[mm]$	Průměr výstupu z lopatkového difuzoru 2. stupně
$D_{1š}$	$[mm]$	Průměr špičky 1. stupně turbíny
D_{1h}	$[mm]$	Patní průměr 1. stupně turbíny
$D_{t1stř}$	$[mm]$	Střední průměr 1. stupně turbíny
$D_{2š}$	$[mm]$	Průměr špičky 2. stupně turbíny
D_{2h}	$[mm]$	Patní průměr 2. stupně turbíny
$D_{t2stř}$	$[mm]$	Střední průměr 2. stupně turbíny
e_{c1}	$[-]$	Polytropická účinnost 1. stupně kompresoru
e_{c2}	$[-]$	Polytropická účinnost 2. stupně kompresoru
H	$[m]$	Výška nad hladinou moře
H_u	$[J \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost paliva
i	$[-]$	Převodový poměr
κ	$[-]$	Polytropický koeficient vzduchu
κ_t	$[-]$	Polytropický koeficient spalin
m_{nF}	$[mm]$	Návrhový modul zubů vypočítaný z ohybu
\dot{m}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok vzduchu
\dot{m}_p	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok paliva
M_{11}	$[-]$	Machovo číslo na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
M_{12}	$[-]$	Machovo číslo za kolem 1. stupně kompresoru
M_{13}	$[-]$	Machovo číslo za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
M_{14}	$[-]$	Machovo číslo za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
M_{15}	$[-]$	Machovo číslo za lopatkovým difuzorem 1. stupně
M_{21}	$[-]$	Machovo číslo na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
M_{22}	$[-]$	Machovo číslo za kolem 2. stupně kompresoru
M_{23}	$[-]$	Machovo číslo za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
M_{24}	$[-]$	Machovo číslo za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
M_{25}	$[-]$	Machovo číslo za lopatkovým difuzorem 2. stupně
M'_1	$[-]$	Relativní Machovo číslo před rotorem 1. stupně turbíny

M'_2	[–]	Relativní Machovo číslo za rotorem 1. stupně turbíny
$M_{11\sim}$	[–]	Relativní Machovo číslo na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
M_{12T}	[–]	Machovo číslo lopatky za kolem 1. stupně kompresoru
$M_{12\theta}$	[–]	Tečné Machovo číslo za kolem 1. stupně kompresoru
M_{12r}	[–]	Relativní Machovo číslo za kolem 1. stupně kompresoru
$M_{21\sim}$	[–]	Relativní Machovo číslo na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
M_{22T}	[–]	Machovo číslo lopatky za kolem 2. stupně kompresoru
$M_{22\theta}$	[–]	Tečné Machovo číslo za kolem 2. stupně kompresoru
M_{22r}	[–]	Relativní Machovo číslo za kolem 2. stupně kompresoru
M_{kI}	[N. mm ⁻²]	Kroutící moment na hnacím hřídeli
M_{kII}	[N. mm ⁻²]	Kroutící moment na hnaném hřídeli
n	[ot. min ⁻¹]	Otáčky motoru
n_2	[–]	Polytropický koeficient přechodu na bezlopatkový difuzor
n_3	[–]	Polytropický koeficient bezlopatkového difuzoru
n_4	[–]	Polytropický koeficient lopatkového difuzoru
n_{el}	[ot. s ⁻¹]	Otáčky elektromotoru
n_I	[ot. s ⁻¹]	Otáčky hnací hřídele
n_{II}	[ot. s ⁻¹]	Otáčky hnané hřídele
p_0	[Pa]	Statický tlak před motorem
p_5	[Pa]	Statický tlak na výstupu z 2. turbíny
p_{0c}	[Pa]	Celkový tlak před motorem
p_{1c}	[Pa]	Celkový tlak na vstupu do kompresoru
p_{2c}	[Pa]	Celkový tlak za kompresorem
p_{3c}	[Pa]	Celkový tlak na výstupu ze spalovací komory
p_{4c}	[Pa]	Celkový tlak na 1. turbíně
p_{11}	[Pa]	Statický tlak na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
p_{12}	[Pa]	Statický tlak za kolem 1. stupně kompresoru
p_{13}	[Pa]	Statický tlak za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
p_{14}	[Pa]	Statický tlak za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
p_{15}	[Pa]	Statický tlak za lopatkovým difuzorem 1. stupně
p_{11c}	[Pa]	Celkový tlak na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
p_{12c}	[Pa]	Celkový tlak za kolem 1. stupně kompresoru
p_{13c}	[Pa]	Celkový tlak za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
p_{14c}	[Pa]	Celkový tlak za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
p_{15c}	[Pa]	Celkový tlak za lopatkovým difuzorem 1. stupně
p_{21}	[Pa]	Statický tlak na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
p_{22}	[Pa]	Statický tlak za kolem 2. stupně kompresoru
p_{23}	[Pa]	Statický tlak za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
p_{24}	[Pa]	Statický tlak za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
p_{25}	[Pa]	Statický tlak za lopatkovým difuzorem 2. stupně
p_{21c}	[Pa]	Celkový tlak na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
p_{22c}	[Pa]	Celkový tlak za kolem 2. stupně kompresoru
p_{23c}	[Pa]	Celkový tlak za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
p_{24c}	[Pa]	Celkový tlak za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
p_{25c}	[Pa]	Celkový tlak za lopatkovým difuzorem 2. stupně

Δp_{01}	[Pa]	Změna tlaku na vstupu
Δp_{23}	[Pa]	Změna tlaku ve spalovací komoře
Δp_{56}	[Pa]	Změna tlaku na výstupu z motoru
p_{t10}	[Pa]	Statický tlak před statorem 1. stupně turbíny
p_{t11}	[Pa]	Statický tlak před rotorem 1. stupně turbíny
p_{t12}	[Pa]	Statický tlak za rotorem 1. stupně turbíny
p_{t10c}	[Pa]	Celkový tlak před statorem 1. stupně turbíny
p_{t11c}	[Pa]	Celkový tlak před rotorem 1. stupně turbíny
p_{t12c}	[Pa]	Celkový tlak za rotorem 1. stupně turbíny
p'_{t11c}	[Pa]	Relativní celkový tlak před rotorem 1. stupně turbíny
p'_{t12c}	[Pa]	Relativní celkový tlak za rotorem 1. stupně turbíny
p_{t20}	[Pa]	Statický tlak před statorem 2. stupně turbíny
p_{t21}	[Pa]	Statický tlak před rotorem 2. stupně turbíny
p_{t22}	[Pa]	Statický tlak za rotorem 2. stupně turbíny
p_{t20c}	[Pa]	Celkový tlak před statorem 2. stupně turbíny
p_{t21c}	[Pa]	Celkový tlak před rotorem 2. stupně turbíny
p_{t22c}	[Pa]	Celkový tlak za rotorem 2. stupně turbíny
p'_{t21c}	[Pa]	Relativní celkový tlak před rotorem 2. stupně turbíny
p'_{t22c}	[Pa]	Relativní celkový tlak za rotorem 2. stupně turbíny
P	[W]	Výkon motoru
q	[–]	Směšovací poměr
r	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Plynová konstanta vzduchu
r_2	[mm]	Výstupní poloměr kola kompresoru
R	[–]	Reakce stupně turbíny
R_1	[–]	Reakce 1. stupně turbíny
R_2	[–]	Reakce 2. stupně turbíny
t_1	[°C]	Celková teplota na vstupu do kompresoru
t_3	[°C]	Celková teplota na výstupu ze spalovací komory
t	[mm]	Tloušťka konce lopatky
T_0	[K]	Statická teplota před motorem
T_{0c}	[K]	Celková teplota před motorem
T_{1c}	[K]	Celková teplota na vstupu do kompresoru
T_{2c}	[K]	Celková teplota na výstupu z kompresoru
T_{3c}	[K]	Celková teplota za spalovací komorou
T_{4c}	[K]	Celková teplota na výstupu z 1. turbíny
T_{5c}	[K]	Celková teplota na výstupu z 2. turbíny
T_{11}	[K]	Statická teplota na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
T_{12}	[K]	Statická teplota za kolem 1. stupně kompresoru
T_{13}	[K]	Statická teplota za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
T_{14}	[K]	Statická teplota za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
T_{15}	[K]	Statická teplota za lopatkovým difuzorem 1. stupně
T_{11c}	[K]	Celková teplota na vstupu do kola 1. stupně kompresoru
T_{12c}	[K]	Celková teplota za kolem 1. stupně kompresoru
T_{13c}	[K]	Celková teplota za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
T_{14c}	[K]	Celková teplota za bezlopatkovým difuzorem 1. stupně
T_{15c}	[K]	Celková teplota za lopatkovým difuzorem 1. stupně
T_{21}	[K]	Statická teplota na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
T_{22}	[K]	Statická teplota za kolem 2. stupně kompresoru

T_{23}	[K]	Statická teplota za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
T_{24}	[K]	Statická teplota za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
T_{25}	[K]	Statická teplota za lopatkovým difuzorem 2. stupně
T_{21_c}	[K]	Celková teplota na vstupu do kola 2. stupně kompresoru
T_{22_c}	[K]	Celková teplota za kolem 2. stupně kompresoru
T_{23_c}	[K]	Celková teplota za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
T_{24_c}	[K]	Celková teplota za bezlopatkovým difuzorem 2. stupně
T_{25_c}	[K]	Celková teplota za lopatkovým difuzorem 2. stupně
T_{t10}	[K]	Celková teplota před statorem 1. stupně
T_{t11}	[K]	Celková teplota před rotorem 1. stupně
T_{t12}	[K]	Celková teplota za rotorem 1. stupně
$T_{t12c_{ize}}$	[K]	Celková izoentropická teplota za rotorem 1. stupně
T_{t20}	[K]	Celková teplota před statorem 2. stupně
T_{t21}	[K]	Celková teplota před rotorem 2. stupně
T_{t22}	[K]	Celková teplota za rotorem 2. stupně
$T_{t22c_{ize}}$	[K]	Celková izoentropická teplota za rotorem 2. stupně
u_t	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na středním průměru turbíny
u_{t1}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na středním průměru 1. stupně turbíny
u_{t2}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na středním průměru 2. stupně turbíny
u_{10}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na malém průměru vstupu 1. stupně kompresoru
u_{11}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na velkém průměru vstupu 1. stupně kompresoru
u_{11pr}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na středním průměru vstupu 1. stupně kompresoru
u_{12}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na velkém průměru vstupu 1. stupně kompresoru
u_{20}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na malém průměru vstupu 2. stupně kompresoru
u_{21}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na velkém průměru vstupu 2. stupně kompresoru
u_{21pr}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na středním průměru vstupu 2. stupně kompresoru
u_{22}	[m. s ⁻¹]	Obvodová rychlost na velkém průměru vstupu 2. stupně kompresoru
w_{tz}	[m. s ⁻¹]	Osová rychlost na stupni turbíny
w_{t0}	[m. s ⁻¹]	Absolutní rychlost před statorem stupně turbíny
w_{t1}	[m. s ⁻¹]	Absolutní rychlost před rotorem stupně turbíny
w_{t2}	[m. s ⁻¹]	Absolutní rychlost za rotorem 1. stupně turbíny
w_e	[J. kg ⁻¹ . s]	Energie 1. stupně turbíny
w_{t2z}	[m. s ⁻¹]	Osová rychlost na 2. stupni turbíny
w_{t20}	[m. s ⁻¹]	Absolutní rychlost před statorem 2. stupně turbíny
w_{t21}	[m. s ⁻¹]	Absolutní rychlost před rotorem 2. stupně turbíny
w_{t22}	[m. s ⁻¹]	Absolutní rychlost za rotorem 2. stupně turbíny
w_{e2}	[J. kg ⁻¹ . s]	Energie 2. stupně turbíny

w_{2z}	$[m \cdot s^{-1}]$	Osová rychlost na 2. stupni turbíny
w_{t20}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost před statorem 2. stupně turbíny
w_{t21}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost před rotorem 2. stupně turbíny
w_{t22}	$[m \cdot s^{-1}]$	Absolutní rychlost za rotorem 2. stupně turbíny
w_{e2}	$[J \cdot kg^{-1} \cdot s]$	Energie 2. stupně turbíny
w_1	$[m \cdot s^{-1}]$	Relativní rychlost na koncovém průměru vstupu kola 1. stupně
w_{1pr}	$[m \cdot s^{-1}]$	Relativní rychlost na středním průměru vstupu do kola 1. stupně
w_k	$[J \cdot kg^{-1} \cdot s]$	Měrná energie kompresoru
w_t	$[J \cdot kg^{-1} \cdot s]$	Měrná energie turbíny
z_{k1}	$[-]$	Počet lopatek 1. kola kompresoru
z_{k2}	$[-]$	Počet lopatek 2. kola kompresoru
Π_{opt}	$[-]$	Optimální stlačení kompresoru
Π'_1	$[-]$	Stlačení v oběžném kole 1. stupně kompresoru
Π'_2	$[-]$	Stlačení v oběžném kole 2. stupně kompresoru
Π	$[-]$	Celkové stlačení kompresoru
Π_1	$[-]$	Stlačení 1. stupně kompresoru
Π_2	$[-]$	Stlačení 2. stupně kompresoru
a_{tw}	$[mm]$	Návrhová osová vzdálenost ozubených kol
a_t	$[mm]$	Osová vzdálenost ozubených kol
α_t	$[rad]$	Úhel záběru v čelní rovině
α_{tw}	$[rad]$	Úhel záběru v čelní rovině valivý
α_n	$[rad]$	Úhel záběru nástroje
α'_2	$[^\circ]$	Úhel proudu na vstupu do bezlopatkového difuzoru
α_3	$[^\circ]$	Úhel proudu v bezlopatkovém difuzoru
α_4	$[^\circ]$	Úhel proudu v lopatkovém difuzoru
β	$[^\circ]$	Úhel sklonu zubů
β_{11}	$[^\circ]$	Úhel náběhu na koncovém průměru 1. stupně kompresoru
β_{11pr}	$[^\circ]$	Úhel náběhu na středním průměru 1. stupně kompresoru
β_{12}	$[^\circ]$	Úhel proudu na výstupu z kola kompresoru 1. stupně kompresoru
β_{21}	$[^\circ]$	Úhel náběhu na koncovém průměru 2. stupně kompresoru
β_{21pr}	$[^\circ]$	Úhel náběhu na středním průměru 2. stupně kompresoru
β_{22}	$[^\circ]$	Úhel proudu na výstupu z kola kompresoru 2. stupně kompresoru
β_{t10}	$[^\circ]$	Úhel vstupu proudu na stator 1. turbíny
β_{t11}	$[^\circ]$	Úhel vstupu proudu na rotor 1. turbíny
β_{t12}	$[^\circ]$	Úhel výstupu proudu z rotoru 1. turbíny
β_{t20}	$[^\circ]$	Úhel vstupu proudu na stator 2. turbíny
β_{t21}	$[^\circ]$	Úhel vstupu proudu na rotor 2. turbíny
β_{t22}	$[^\circ]$	Úhel výstupu proudu z rotoru 2. turbíny
λ_1	$[-]$	Výkonový součinitel 1. stupně turbíny
λ_2	$[-]$	Výkonový součinitel 2. stupně turbíny
μ_1	$[-]$	Součinitel skluzu 1. stupně kompresoru
μ_2	$[-]$	Součinitel skluzu 2. stupně kompresoru

η_k	[-]	Izoentropická účinnost kompresoru
η_{pr}	[-]	Účinnost převodovky
η_t	[-]	Izoentropická účinnost turbíny
η_{t1ize}	[-]	Izoentropická účinnost 1. stupně turbíny
η_{t1pol}	[-]	Polytropická účinnost 1. stupně turbíny
η_{t2ize}	[-]	Izoentropická účinnost 2. stupně turbíny
η_{t2pol}	[-]	Polytropická účinnost 1. stupně turbíny
η_{term}	[-]	Termodynamická účinnost oběhu
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu v okolí
ρ_{t10}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota spalin před statorem 1. stupně turbíny
ρ_{t20}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota spalin před statorem 2. stupně turbíny
ρ_{k11}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu na vstupu do kola 1. stupně
ρ_{k21}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu na vstupu do kola 2. stupně
ρ_{k12}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu na výstupu do kola 1. stupně
ρ_{k22}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu na výstupu do kola 2. stupně
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost kompresoru
ξ_t	[-]	Součinitel tření v bezlopatkovém difuzoru
ζ_s	[-]	Součinitel ztrát ve statoru turbíny
ζ_r	[-]	Součinitel ztrát v rotoru turbíny
θ_{ekv1}	[°]	Ekvivalentní rozšíření difuzoru 1. stupně kompresoru
θ_{ekv2}	[°]	Ekvivalentní rozšíření difuzoru 2. stupně kompresoru
φ_1	[-]	Průtokový součinitel 1. stupně turbíny
φ_2	[-]	Průtokový součinitel 2. stupně turbíny
ε_{ch}	[-]	Koeficient ztrát chlazením
ε_{mech}	[-]	Koeficient mechanických ztrát
v_∞	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost vzduchu před motorem
σ_{Hlim}	$[MPa]$	Mez únavy v dotyku
f_{Hs}	[-]	Návrhový součinitel v dotyku
σ_{FP}	$[MPa]$	Mez únavy kola v ohybu
σ_{Flimb}	$[MPa]$	Mez únavy materiálu v ohybu
K_α	[-]	Koeficient stability chodu
$K_{H\beta}$	[-]	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubu po šířce
f_p	[-]	Návrhový součinitel v ohybu
σ_{HP}	$[MPa]$	Mez únavy kola v dotyku
m_n	$[mm]$	Zvolený modul zubů
m_{nF}	$[mm]$	Modul zubů z ohybu
m'_{nF}	$[mm]$	Návrhový modul zubů z ohybu
m_{nH}	$[mm]$	Modul zubů z dotyku
m'_{nH}	$[mm]$	Návrhový modul zubů z dotyku
b_1	$[mm]$	Šířka pastorku zvolená
b_2	$[mm]$	Šířka kola zvolená
b_{1F}	$[mm]$	Šířka pastorku z ohybu
b_{2F}	$[mm]$	Šířka kola z ohybu
b_{1H}	$[mm]$	Šířka pastorku z dotyku
b_{2H}	$[mm]$	Šířka kola z dotyku
z_1	[-]	Počet zubů pastorku
z_2	[-]	Počet zubů kola

d_I	[mm]	Průměr hřídele pastorku
d'_I	[mm]	Průměr hřídele pastorku návrhový
d_{II}	[mm]	Průměr hřídele kola
d'_{II}	[mm]	Průměr hřídele kola návrhový
x_1	[-]	Korekce pastorku
x_2	[-]	Korekce kola
d_{1H}	[mm]	Průměr roztečné kružnice pastorku z dotyku
d'_{1H}	[mm]	Průměr roztečné kružnice kola z dotyku návrhový
d_1	[mm]	Průměr roztečné kružnice pastorku
d_2	[mm]	Průměr roztečné kružnice kola
d_{w1}	[mm]	Průměr valivé kružnice pastorku
d_{w2}	[mm]	Průměr valivé kružnice kola
d_{a1}	[mm]	Průměr hlavové kružnice pastorku
d_{a2}	[mm]	Průměr hlavové kružnice kola
d_{f1}	[mm]	Průměr patní kružnice pastorku
d_{f2}	[mm]	Průměr patní kružnice pastorku
c^*	[-]	Součinitel přechodu mezi zuby
h_a^*	[-]	Součinitel výšky zubu
R_{c1}	[N]	Reakce v ložisku 1
R_{x1}	[N]	Reakce v ložisku 1 ve směru osy x
R_{y1}	[N]	Reakce v ložisku 1 ve směru osy y
R_{z1}	[N]	Reakce v ložisku 1 ve směru osy z
σ_o	[MPa]	Napětí v ohybu
τ	[MPa]	Napětí v krutu
σ_D	[MPa]	Dovolené napětí
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
k	[-]	Koeficient bezpečnosti
$M_{o_{max}}$	[N.mm]	Maximální ohybový moment
$M_{o_{y_{max}}}$	[N.mm]	Maximální ohybový moment
$M_{o_{xy_{max}}}$	[N.mm]	Maximální ohybový moment v rovině xy
$M_{o_{xz_{max}}}$	[N.mm]	Maximální ohybový moment v rovině xz
C	[N]	Dynamické zatížení ložiska
C_{tab}	[N]	Dynamická únosnost ložiska
Y_2	[-]	Součinitel ekvivalentního zatížení
F_a	[N]	Axiální síla
F_r	[N]	Radiální síla
F_t	[N]	Tečná síla
L_h	[h]	Životnost
F_{ekv}	[N]	Ekvivalentní síla v ložisku
M_k	[N.mm]	Krouticí moment
W_k	[mm ³]	Průřezový modul v krutu
W_o	[mm ⁴]	Průřezový modul v ohybu
p_D	[MPa]	Dovolený tlak
l_a	[mm]	Návrhová délka pera
l	[mm]	Zvolená délka pera

1 Úvod

Vývoj letecké dopravy na konci 20. a počátku 21. století vyústil ve zvětšení intenzity letecké dopravy. Nárůst objemu letecké dopravy přitom pokračuje a podle předpovědi ICAO bude růst ročně o 4,5 % pro dopravu osob a o 4,2 % pro dopravu nákladu [1]. Toto má za následek zvětšení emisí spalinových plynů a následné zhoršení ekologické situace. Podle předpovědi ICAO z roku 2016, publikované v ICAO Environmental Report [2], za zachování současných trendů objem spalovaného paliva k roku 2050 vzroste o skoro 650 Mt (přibližně 325 %).

Existuje několik způsobů snížit produkci spalin. První možnost je optimalizace provozu letadel. Toto obsahuje optimalizaci cestovních rychlostí/výšek, udržování dobrého technického stavu pohonných jednotek atd. Jako druhá možnost je vylepšení současné konstrukce pohonných jednotek. Tyto dvě varianty můžou přispět ke snížení emisí od letadel o přibližně 250 Mt k roku 2050, což ale stejně nepokryje nárůst letecké dopravy. [2].

Další možnost je použití alternativních zdrojů energie pro pohon letadel. Jako alternativní pohonná jednotka se v letadlech velice často používá elektromotor. Zatím se však hustota energie v elektrických zdrojích je značně nižší než u fosilních paliv, jež se používají v klasických pohonných jednotkách.

Tato skutečnost vedla k zahájení vývoje hybridních pohonných jednotek. Této pohonné jednotky umožňují kombinovat výhody elektromotorů a klasických pohonných jednotek. Existuje dvě možnosti uspořádání hybridní pohonné jednotky:

1. Paralelní uspořádání – letadlo je poháněno jak elektromotory, tak klasickými pohony (buď proudovými, nebo pístovými);
2. Sériové uspořádání – pohonná jednotka se skládá ze spalovacího motoru, který pohání generátor. Od generátoru a baterií je napájen elektromotor, který pohání vlastní letadlo.

2 Příklady letadel s pohony na alternativní zdroje energie

2.1 Pipistrel Hypstair



Obr. 1 - Pipistrel Hypstair 2.2016 - prototyp na výstavě AERO 2016 ve Friedrichshafenu [3]

Pipistrel Hypstair je hybridní lehké letadlo slovinské společnosti Pipistrel. Pohonná jednotka byla vyřešena sériově, skládá se z elektromotoru o výkonu 200kW, elektrického generátoru 100 kW a spalovacího motoru Rotax 914. Generátor je napojený také na elektrickou baterii, kterou lze použít buď jako hlavní zdroj energie pro pohon letadla anebo jako doplňkový zdroj spolu s generátorem.

Bateriový systém byl vyvinut společností Pipistrel a se skládá ze dvou identických částí, které budou umístěny v křídlech letadla. Váha baterií je přibližně 110 kg, kapacita 13 kWh. Baterie jsou schopny dodávat konstantní výkon 200 kW.

Elektromotor Siemens je určen speciálně pro elektrická letadla. Motor je schopen dodávat 260 kW výkonu při váze 50 kg. Motor je vybaven dvojitým vinutím pro zvýšení spolehlivosti.

Použitý elektromotor společnosti Siemens je osazen vrtulí, která vytváří v cestovním režimu propulzní výkon 150 kW a ve vzletovém režimu 200 kW. [3], [4], [5]

Výkon pístového motoru	73 kW
Výkon generátoru	100 kW
Výkon elektromotoru	200 kW
Baterie	13 kWh Li-Ion
Dostup	4000 m (13120 ft)
Cestovní rychlost	263 km/h (142 uzlů)
Nepřekročitelná rychlost	405 km/h (219 uzlů)
Dolet	658 námořních mil
MTOW	1200 kg

Tab. 1 - Parametry letounu Pipistrel Hypstair

2.2 Diamond DA-36 E-Star



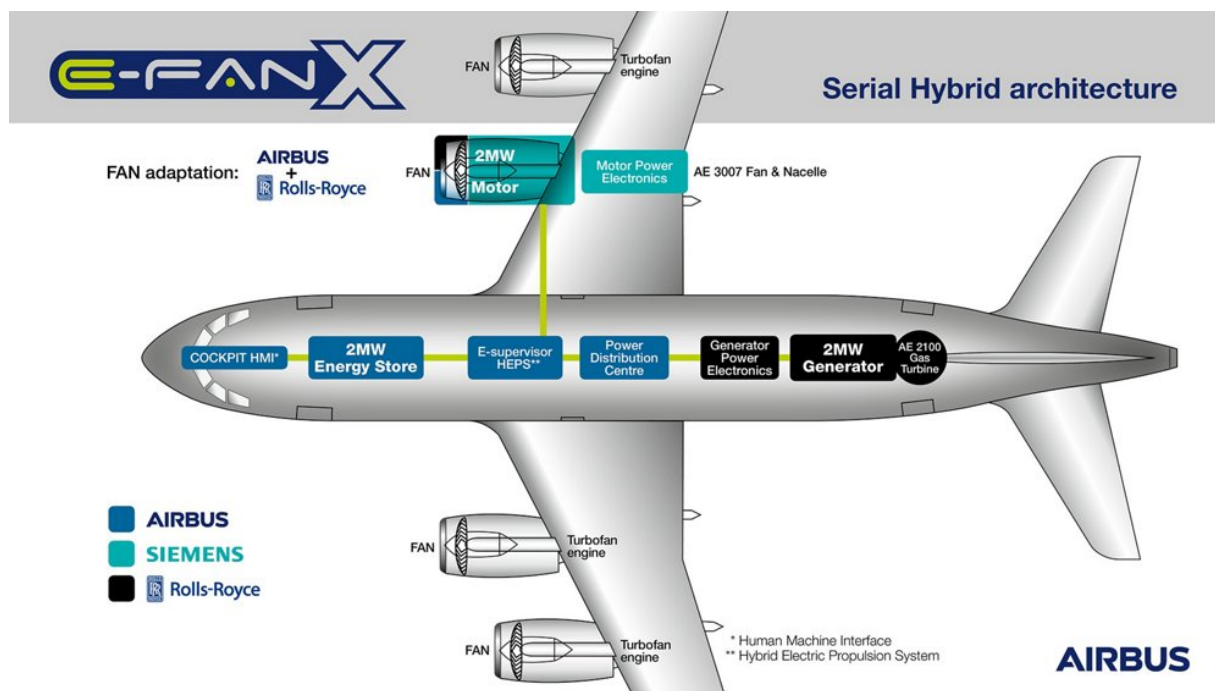
Obr. 2 – Diamond DA-36 E-Star [6]

Pohon je vyřešen pomocí elektromotoru Siemens o výkonu 70kW. Motor je napájen od generátoru, poháněného Wanklovým motorem od firmy Austro Engines o výkonu 30 kW. Uložení energie je pomocí baterií. [6]

2.3 E-Fan X



Obr. 3 – Koncept Airbus E-Fan X [7]

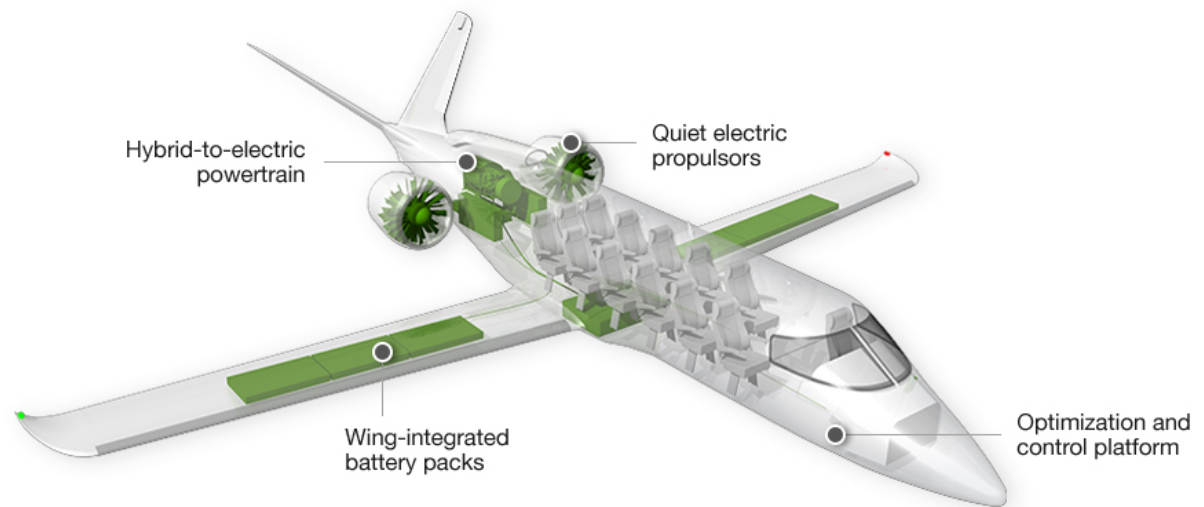


Obr. 4 - Popis konceptu Airbus E-Fan X [7]

Létající demonstrátor, vyvíjený společnostmi Airbus, Rolls-Royce a Siemens. Plánovaný zálet je v roce 2020. Je poháněn dvěma hybridními pohonnými jednotkami.

Jedná se o sériové hybridní zapojení. Pohonná jednotka se skládá z elektromotoru Siemens o výkonu 2 MW, DC/DC konvertoru, 2 MW generátoru Rolls-Royce, turbohřídelového motoru Rolls-Royce a baterií. Integrace systému do letadla bude provedena firmy Airbus a Rolls-Royce. [7]

2.4 Zunum Aero



Obr. 5 - Zunum Aero [8]

Projekt hybridního letounu sběrné dopravy pro lety na krátké tratě se sériovou hybridní pohonnou jednotkou. Firmu Zunum Aero plánuje koupit Boeing pro posílení vývoje vlastního hybridního letounu, zatím je podporována v rámci programu Boeing HorizonX a JetBlue Technology Ventures. Projekt je v počáteční fázi, plánovaný zálet v roce 2022.

Předpokládá se, že pohonná jednotka bude mít výkon 1 MW. Generátor bude poháněn turbohřídelovým motorem a dodá elektromotoru 500 kW výkonu. Ostatní energii bude motor čerpat z baterií. [8], [9]

Výkon 1 generátoru	500 kW
Výkon elektromotoru	1 MW

Tab. 2 - Parametry letounu Zunum Aero

2.5 STARC-ABL



Obr. 6 - Boeing STARC-ABL [10]

Projekt firmy Boeing. Letoun je poháněn dvěma dvouproudými jednotkami. Tyto pohonné jednotky se také používají pro náhon generátoru o výkonu 1,4 MW.

Elektrina vyprodukovaná generátorem je pak použita pro pohon elektromotoru v zadní části trupu. Elektromotor o výkonu 2,6 MW urychluje mezní vrstvu na konci trupu a umožňuje zmenšení výkonu dvouproudých motorů. [10]

Výkon 1 generátoru	1,4 MW
Výkon elektromotoru	2,6 MW

Tab. 3 - Parametry Boeing STARC-ABL

2.6 Eviation Alice



Obr. 7 - Eviation Alice [11]

Vyvíjený v Izraeli Business Jet pro 9 osob, používající elektromotory pro pohon letadla. Letoun je čistě elektrický, má nepřetlakovaný trup a je schopen převážet 9 cestujících a 2 členy posádky. Je plánované testování prototypu v roce 2019. [11]

Výkon elektromotoru	260 kW
Baterie	900 kWh Li-Ion
Dostup	3657 m (12000 ft)
Cestovní rychlost	444 km/h (240 uzlů)
Nepřekročitelná rychlost	535 km/h (289 uzlů)
Dolet	1046 km (564 námořních mil)
MTOW	6350 kg

Tab. 4 - Parametry Eviation Alice

2.7 Pipistrel Taurus Electro



Obr. 8 - Pipistrel Taurus Electro [12]

Dvoumístný kluzák, vyvinutý slovinskou společností Pipistrel. Kluzák je vybaven zasouvateľnou elektrickou pohonnou jednotkou o výkonu 40 kW. Jedná se o sériově vyráběný elektrický letoun. [12]

Výkon elektromotoru	40 kW
Dostup	3 657,6 m (12000 ft)
Cestovní rychlost	163 km/h (88 uzlů)
Nepřekročitelná rychlost	225 km/h (121 uzlů) /160 km/h (99 uzlů) - s vysunutým pohonem
Dolet	1 044,5 km (564 námořních mil)
MTOW	550 kg

Tab. 5 - Parametry Pipistrel Taurus Electro

3 Koncepce vlastního návrhu

Cílem této práce je návrh demonstrátoru hybridního leteckého motoru. Byla zvolena koncepce sériového uspořádání pohonné jednotky. Jako vlastní pohonná jednotka a generátor budou použity modelářské elektromotory od německé společnosti Lehner-Motoren-Technik [13]. Jelikož se jedná o demonstrátor, navrhovaný motor bude mít malý výkon a z toho vyplývající malé rozměry. To vede na vysoké otáčky hřídele nutné k dosažení potřebných obvodových rychlostí. Výstupní výkon je stanoven na 20 kW. Takového výkonu lze dosáhnout například pomocí motoru LMT 3080, jehož maximální výkon je 30kW při otáčkách 50000 ot.min⁻¹. Základní koncepce turbohřídelového motoru (rozvody, koncepce dílů apod.) je převzata z modelového turbohřídelového motoru, navrženého K. Schrecklingem [14].

Základními funkčními díly motoru jsou kompresor, spalovací komora a turbína. Pro jejich návrh bude proveden nejdříve výpočet tepelného oběhu motoru se stanovením optimální účinnosti tepelného procesu. Pak se na to naváže návrh jednotlivých kol kompresoru a kol turbín. Spalovací komora bude koncepčně převzata z [14] a dimenzována na parametry motoru.

4 Návrh tepelného oběhu

Uvažujeme motor v standardních podmínkách: parametry dle MSA, výška 0 m nad hladinou moře.

H [m]	Výška nad hladinou moře	0
t_1 [°C]	Teplota okolí	15
p_{0c} [Pa]	Celkový tlak okolí	101325
ρ [kg.m ⁻³]	Hustota vzduchu	1,225
κ [-]	Poissonova konstanta	1,4
r [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrná plynová konstanta vzduchu	287
c_p [J.kg ⁻¹ . K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	1004,5

Tab. 6 - počáteční podmínky návrhu

Jelikož uvažujeme model motoru, rychlost vzduchu před motorem

$$v_\infty = 0 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

Pro počáteční přibližný výpočet termodynamických parametrů motoru byly použity hodnoty ztrát při jednotlivých procesech podle [15]. Protože v našem případě turbína není chlazená, ztráty na její chlazení jsou nulové.

Δp_{01} [Pa]	Změna tlaku na vstupu	1960
Δp_{23} [Pa]	Změna tlaku ve spalovací komoře	7850
Δp_{56} [Pa]	Změna tlaku na výstupu z motoru	1940
ε_{ch} [-]	Koeficient ztrát na chlazení turbíny	0
ε_{mech} [-]	Koeficient mechanických ztrát	0,02
η_k [-]	Účinnost kompresoru	0,85
η_t [-]	Účinnost turbíny	0,85

Tab. 7 – ztráty v tepelném oběhu

Jako materiál turbíny použijeme slitinu IN 713LC, jež je žáruvzdorná do teploty 950°C. Ovšem pro snížení tepelného namáhání motoru zvolíme nižší teplotu plynů před turbínou:

$$t_3 = 900^\circ\text{C} \rightarrow T_3 = 1173,15\text{K}$$

Pro stanovení optimálního stlačení provedeme výpočet oběhu motoru pro různé stlačení kompresoru (2-30). Budeme na začátku pro jednoduchost uvažovat 2 turbíny: 1. turbína slouží pro pohon kompresoru, 2. turbína je turbínou užitečného výkonu.

Hodnoty celkového tlaku a celkové teploty na vstupu na motor se rovnají statickým hodnotám ($v_\infty = 0$)

$$p_{0c} = p_0 \quad (1)$$

$$T_{0c} = T_0 \quad (2)$$

Celkový tlak na vstupu kompresoru:

$$p_{1c} = p_{0c} - \Delta p_{01} \quad (3)$$

Teplota na vstupu do kompresoru je stejná, jako T_{0c}

$$T_{1c} = T_{0c} \quad (4)$$

Celkový tlak na výstupu z kompresoru:

$$p_{2c} = \Pi p_{1c} \quad (5)$$

Celková teplota na výstupu z kompresoru:

$$T_{2c} = T_{1c} \left(1 + \frac{\Pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_k} \right) \quad (6)$$

Celkový tlak na výstupu ze spalovací komory:

$$p_{3c} = p_{2c} - \Delta p_{23} \quad (7)$$

Směšovací poměr paliva:

$$q = c_p (T_{3c} - T_{2c}) \frac{1 - \varepsilon_{chem}}{H_u - c_p (T_{3c} - T_{2c})} \quad (8)$$

Celková teplota na 1. turbíně:

$$T_{4c} = T_{3c} - \frac{T_{2c} - T_{1c}}{(1 - \varepsilon_{ch} + q)(1 - \varepsilon_{mech})} \quad (9)$$

Celkový tlak na 1. turbíně:

$$p_{4c} = p_{3c} \left(1 - \frac{T_{4c} - T_{3c}}{T_{3c}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (10)$$

Statický tlak na výstupu z 2. turbíny:

$$p_5 = p_{0c} + \Delta p_{56} \quad (11)$$

Celková teplota na výstupu z 2. turbíny:

$$T_{5c} = T_{4c} \left(1 - \left(1 - \frac{p_5}{p_{4c}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \eta_t \right) \quad (12)$$

Termodynamická účinnost:

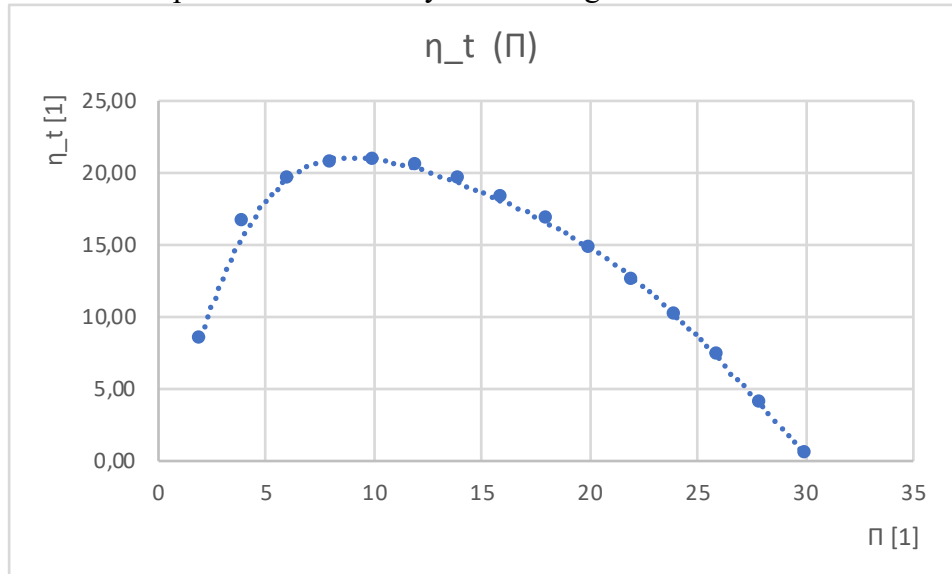
$$\eta_{term} = \frac{T_{4c} - T_{5c}}{T_{3c} - T_{2c}} \frac{1 - \varepsilon_{ch} + q}{1 + q} \quad (13)$$

Výsledky výpočtů pro různé stlačení jsou uvedeny v následující tabulce.

Π [-]	2		3		4		5		
	p_{2c} [Pa]	T_{2c} [K]	p_{3c} [Pa]	q [-]	p_{4c} [Pa]	T_{4c} [K]	p_5 [Pa]	T_{5c} [K]	η_{term} [%]
2	198730	2	190880	0,02240	139850	1099,1	103265	1031,4	8,35
4	397460	4	389610	0,01985	188146	1008,4	103265	889,8	16,46
6	596190	6	588340	0,01812	207683	946,1	103265	818,1	19,44
8	794920	8	787070	0,01676	213271	897,2	103265	771,6	20,59
10	993650	10	985800	0,01563	211108	856,3	103265	738,0	20,78
12	1192380	12	1184530	0,01466	204405	820,8	103265	712,1	20,34
14	1391110	14	1383260	0,01379	195021	789,3	103265	691,4	19,45
16	1589840	16	1581990	0,01302	184104	760,8	103265	674,3	18,18
18	1788570	18	1780720	0,01231	172395	734,6	103265	660,1	16,58
20	1987300	20	1979450	0,01165	160385	710,5	103265	648,0	14,67
22	2186030	22	2178180	0,01104	148404	688,0	103265	637,7	12,45
24	2384760	24	2376910	0,01047	136674	666,9	103265	628,8	9,93
26	2583490	26	2575640	0,00994	125345	647,0	103265	621,2	7,09
28	2782220	28	2774370	0,00943	114515	628,1	103265	614,6	3,91
30	2980950	30	2973100	0,00895	104245	610,2	103265	609,0	0,37

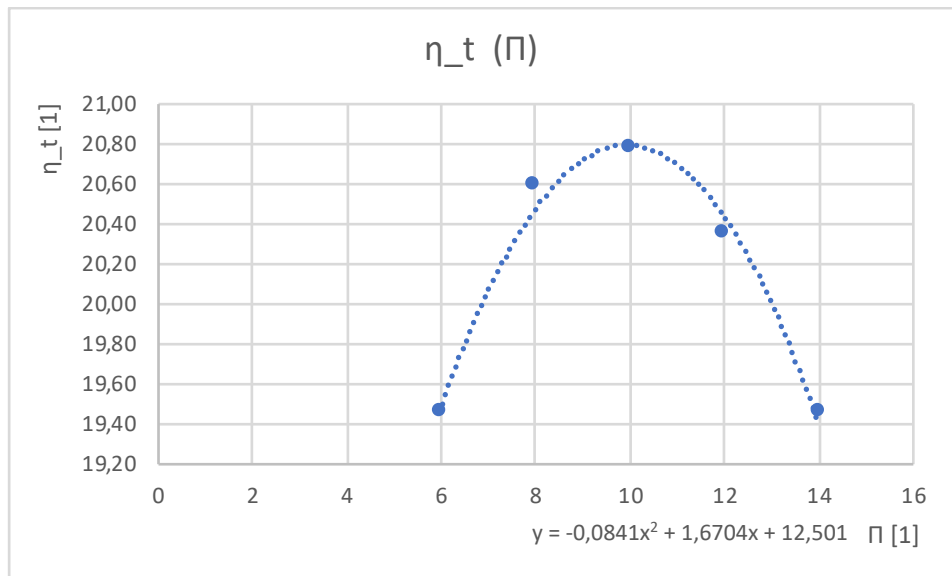
Tab. 8 – Termodynamické parametry cyklu pro různé stlačení

Účinnost oběhu pro různé stlačení vyneseme do grafu:



Graf 1 – Účinnost tepelného oběhu

Pro zjištění optimální účinnosti provedeme spojnici trendu pro maximální body křivky:



Graf 2 – Hledání maximální účinnosti

Optimální stlačení kompresoru:

$$\Pi_{opt} = \frac{1,6704}{2 \cdot 0,0841} = 9,93 \quad (14)$$

Měrná energie kompresoru:

$$w_k = c_p(T_{2c} - T_{1c}) = 1004,5(601,8 - 288,15) = 315041 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \quad (15)$$

Měrná energie na turbíně pro pohon kompresoru:

$$w_t = c_p(T_{3c} - T_{4c}) = 1156,7(1173,15 - 858,2) = 364316 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \quad (16)$$

Měrná energie turbíny užitečného výkonu:

$$\begin{aligned} w_t &= c_{pt}(T_{4c} - T_{5c}) = 1156,7(858,2 - 739,4) = \\ &= 137370 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \end{aligned} \quad (17)$$

Energie spalování paliva byla využita na ohřev vzduchu ve spalovací komoře:

$$\dot{m}_p H_u = \dot{m} c_p (T_3 - T_2) \quad (18)$$

Z této rovnice odvodíme hmotnostní průtok paliva:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m} c_p (T_3 - T_2)}{H_u} \quad (19)$$

Výkon motoru:

$$P = \frac{w_t (\dot{m} + \dot{m}_p) - w_k \dot{m}}{\eta_{pr}} \quad (20)$$

Dosadíme (18) do (19):

$$\begin{aligned} P &= \frac{w_t \dot{m} \left(1 + \frac{c_p (T_3 - T_2)}{H_u}\right) - w_k \dot{m}}{\eta_{pr}} \rightarrow \dot{m} \\ &= \frac{P \eta_{pr}}{w_t \left(1 + \frac{c_p (T_3 - T_2)}{H_u}\right) - w_k} \end{aligned} \quad (21)$$

Průtok paliva:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m} c_p (T_3 - T_2)}{H_u} \quad (22)$$

Optimální parametry oběhu jsou následující:

$\Pi_{opt} [-]$	$p_{2c} [Pa]$	$T_{2c} [K]$	$p_{3c} [Pa]$	$q [-]$	$\dot{m} [kg \cdot s^{-1}]$
9,9	1192380	638,7	1184530	0,01321	0,106
$p_{4c} [Pa]$	$T_{4c} [K]$	$p_5 [Pa]$	$T_{5c} [K]$	$\eta_t [\%]$	$\dot{m}_p [kg \cdot s^{-1}]$
252312	851,8	101305	685,7	27,03	0,0014

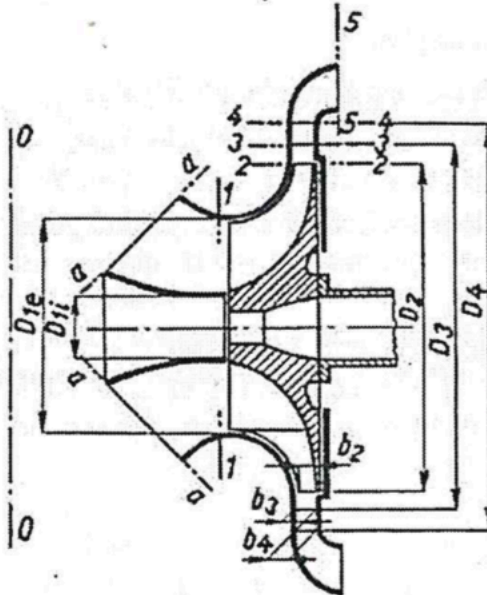
Tab. 9 - Optimální parametry pracovního cyklu

Jelikož jeden odstředivý stupeň kompresoru může dodat maximální stlačení kolem 6-7 [16], je potřeba dvou kompresorových stupňů.

5 Návrh kompresoru

5.1 Plán návrhu

Kompresor se skládá ze 4 základních částí: vstup, kolo kompresoru, bezlopatkový difuzor a lopatkový difuzor. Obrázek č. 9 znázorňuje geometrii stupně a polohu jednotlivých výpočtových řezů.



Obr. 9 - Odstředivý kompresor [16]

Zvýšení celkového tlaku plynu se odehrává na kolu kompresoru, ostatní části slouží pouze ke ztrátám celkového tlaku a zvýšení statického tlaku.

5.2 Vstupní data - 1. stupeň

Vstupní data obdržíme z návrhu tepelného oběhu. Průměry se volí iteračním přístupem. Při volbě průměru byl také brán zřetel na konstrukční požadavky.

Hmotnostní průtok vzduchu	\dot{m} [$kg \cdot s^{-1}$]	0,106
Počet lopatek 1. stupně	z_{k_1} [-]	20
Otáčky	n [$ot. min^{-1}$]	102000
Vnitřní vstupní průměr 1. kola	D_{10} [mm]	11
Vnější vstupní průměr 1. kola	D_{11} [mm]	34
Výstupní průměr 1. kola	D_{12} [mm]	80

Tab. 10 – Vstupní data na 1. stupni

5.3 Vstup na kolo kompresoru

Na začátku spočítáme obvodové rychlosti na jednotlivých průměrech. Obvodová rychlost na kořenovém průměru

$$u_{10} = \frac{\pi D_{10} n}{60} \quad (23)$$

Obvodová rychlost na koncovém průměru

$$u_{11} = \frac{\pi D_{11} n}{60} \quad (24)$$

Střední průměr kola kompresoru na vstupu

$$D_{11pr} = \sqrt{D_{10}^2 + D_{11}^2} \quad (25)$$

Obvodová rychlost na kořenovém průměru

$$u_{11pr} = \frac{\pi D_{11pr} n}{60} \quad (26)$$

Dále byla využita iterační metoda určení absolutní rychlosti c_1 podle [17].

Výpočet provedeme v intervalu 0–500 m.s⁻¹. Jako počáteční hodnotu zvolíme $c_1 = 250 \text{ m. s}^{-1}$. Pak vypočítáme statickou teplotu na vstupu na kolo:

$$T_{11} = T_{11c} - c_{11}^2 \frac{\kappa - 1}{2\kappa r} \quad (27)$$

Statický tlak na vstupu do oběžného kola:

$$p_{11} = p_{11c} \left(\frac{T_{11}}{T_{11c}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (28)$$

Hustota vzduchu na vstupu do oběžného kola:

$$\rho_{11} = \frac{p_{11}}{rT_{11}} \quad (29)$$

Z těchto výsledků vypočítáme zpětně rychlost c_1 :

$$c_{11} = \frac{4\dot{m}}{\pi \rho_{11} (D_{11}^2 - D_{10}^2)} \quad (30)$$

Pro další výpočtu budou použity hodnoty z iteračního výpočtu.

Rychlost zvuku na vstupu do kompresoru:

$$a_{11} = \sqrt{\kappa r T_{11}} \quad (31)$$

Machovo číslo na vstupu do kompresoru:

$$M_{11} = \frac{c_{11}}{a_{11}} \quad (32)$$

Relativní rychlost proudu na koncovém průměru vstupu do oběžného kola:

$$w_{11} = \sqrt{u_{11}^2 + c_{11}^2} \quad (33)$$

Relativní Machovo číslo na vstupu do kompresoru:

$$M_{11\sim} = \frac{w_{11}}{a_{11}} \quad (34)$$

Relativní rychlost proudu na středním průměru vstupu do oběžného kola:

$$w_{11pr} = \sqrt{u_{11pr}^2 + c_{11}^2} \quad (35)$$

Úhel náběhu na koncovém průměru:

$$\beta_{11} = \arctg \left(\frac{c_{11}}{u_{11}} \right) \quad (36)$$

Úhel náběhu na středním průměru:

$$\beta_{11pr} = \arctg \left(\frac{c_{11}}{u_{11pr}} \right) \quad (37)$$

5.4 Výstup z kola kompresoru

Zvolíme výstupní průměr $D_2 = 90 \text{ mm}$, výstupní úhel lopatek $\beta'_2 = 18^\circ$.

Součinitel skluzu dle [18]:

$$\mu_1 = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{\pi}{z_{k1}} \frac{1}{1 - \left(\frac{D_{11pr}}{D_{12}} \right)^2}} \quad (38)$$

Radiální rychlost na výstupu z kola je stejná, jako na vstupu:

$$c_{12r} = c_{10r} \quad (39)$$

Obvodová rychlost na koncovém průměru oběžného kola:

$$u_{12} = \frac{\pi D_{12} n}{60} \quad (40)$$

Úhel proudu na výstupu z kola kompresoru:

$$\beta_{12} = \arctg \left(\frac{u_{12}}{c_{12r}} (1 - \mu_1) + \operatorname{tg}(\beta'_{12}) \right) \quad (41)$$

Tangenciální rychlost na výstupu z kola:

$$c_{12\theta} = u_{12} - c_{12r} \cdot \operatorname{tg}(\beta_{12}) \quad (42)$$

Absolutní rychlost vzduchu na konci lopatky kompresoru:

$$c_{12} = \sqrt{c_{12\theta}^2 + c_{12r}^2} \quad (43)$$

Machovo číslo konce lopatky:

$$M_{12T} = \frac{u_{12}}{a_{11}} \quad (44)$$

Přibližný poměr rychlosti zvuku na vstupu a na výstupu z oběžného kola:

$$\frac{a_{12}}{a_{11}} \approx \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{\kappa-1}{2}\right) M_{12T}^2}{1 + \left(\frac{\kappa-1}{2}\right) M_{11}^2}} \quad (45)$$

Rychlost zvuku na výstupu z kola:

$$a_{12} = \frac{a_{12}}{a_{11}} a_{11} \quad (46)$$

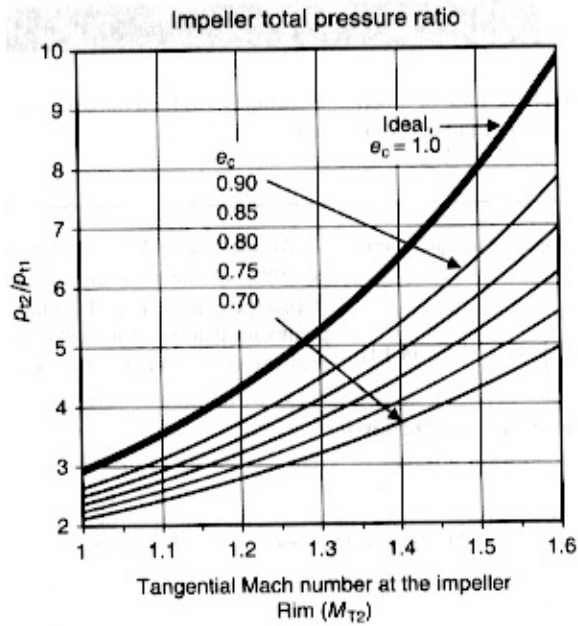
Machovo číslo proudu na výstupu z kola:

$$M_{12} = \frac{c_{12}}{a_{12}} \quad (47)$$

Celková teplota na výstupu z kola z Eulerovy turbínové rovnice:

$$T_{12c} \cong T_{11c} \left(1 + \frac{\omega r_{12} c_{12\theta}}{c_p T_{11c}} \right) = T_{11c} \left(1 + \frac{u_{21}^2}{c_p T_{11c}} \left(\frac{c_{12\theta}}{u_{12}} \right) \right) \quad (48)$$

Jelikož izoentropická účinnost stupně není známá, pro výpočet byla použita polytropická účinnost. Ta se určí dle následujícího grafu z [15]:



Graf 3 - určení adiabatické účinnosti

Je vidět, že polytropická účinnost je závislá na stlačení. Proto pro její získání byl použit iterační postup.

Stlačení v oběžném kole 1. stupně kompresoru:

$$\Pi'_1 = (1 + (\kappa - 1)\mu_1 M_{12T}^2)^{\frac{\kappa e_{c1}}{\kappa - 1}} \quad (49)$$

Celkový tlak na výstupu z kola kompresoru:

$$p_{12c} = p_{11c} \Pi'_1 \quad (50)$$

Statický tlak na výstupu z kola kompresoru:

$$p_{12} = \frac{p_{12c}}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{12}^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} \quad (51)$$

Hustota proudu na výstupu z kola kompresoru:

$$\rho_{12} = \frac{\kappa p_{12}}{a_{12}^2} \quad (52)$$

Návrhová šířka výstupního kanálu:

$$b_{12} \approx \frac{\dot{m}}{\pi D_{12} \rho_{12} c_{12r}} \quad (53)$$

5.5 Bezlopatkový difuzor

Nejdřív zvolíme šířku kanálu b'_{12} na vstupu do difuzoru a tloušťku plechu lopatek t [mm]. Šířka kanálu bezlopatkového difuzoru má být co nejmenší pro snížení tlakových ztrát.

Součinitel τ_1 :

$$\tau_{11} = 1 - \frac{tz_{k1}}{\pi D_{12}} \quad (54)$$

Radiální rychlost na vstupu do difuzoru:

$$c'_{12r} = \frac{\tau_{11} c_{12r} b_{12}}{b'_{12}} \quad (55)$$

Dále byl vypočítán úhel vstupu proudu do difuzoru:

$$\alpha'_{12} = \arctg\left(\frac{c'_{12r}}{c_{12\theta}}\right) \quad (56)$$

Součinitel tření v bezlopatkovém difuzoru leží v rozmezí $0,012 \leq \xi_t \leq 0,014$ (dle [16]). Zvolíme $\xi_t = 0,013$.

Úhel výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$\alpha_{13} = \arctg \left(tg \alpha'_{12} + \frac{\xi_t}{b'_{12}} \left(\frac{D_{13}}{2} - \frac{D_{12}}{2} \right) \right) \quad (57)$$

Radiální rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$c_{13r} = c'_{12r} \frac{D_{13}}{D_{12}} \quad (58)$$

Obvodová rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$c_{13u} = c_{12\theta} \frac{D_{12}}{D_{13}} \quad (59)$$

Absolutní rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$c_{13} = \sqrt{c_{13u}^2 + c_{13r}^2} \quad (60)$$

Celková teplota na výstupu z bezlopatkového a lopatkového difuzoru a ve výstupním kanálu stupně je stejná jako na výstupu z oběžného kola:

$$T_{15c} = T_{14c} = T_{13c} = T_{12c} \quad (61)$$

Statická teplota:

$$T_{13} = T_{13c} - \frac{c_{13}^2}{2c_p} \quad (62)$$

Rychlost zvuku:

$$a_{13} = \sqrt{\kappa r T_{13}} \quad (63)$$

Machovo číslo na výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$M_{13} = \frac{c_{13}}{a_{13}} \quad (64)$$

Statický tlak lze vypočítat podle [16] pomocí polytropického koeficientu $n_2 = 1,65$:

$$p_{13} = p_{12} \left(\frac{T_{13}}{T_{12}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (65)$$

Celkový tlak:

$$p_{13c} = p_{13} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{13}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (66)$$

5.6 Lopatkový difuzor

Zvolíme parametry na lopatkovém difuzoru. Dle [16] úhel výstupu z difuzoru je o $12-18^\circ$ větší než α_3 . Zvolíme

$$\alpha_{14} = \alpha_{13} + 15 \quad (67)$$

Rozšíření ekvivalentního difuzoru zvolíme $\theta_{ekv1} = 6^\circ$ dle doporučení z [16].

Rychlost v difuzoru:

$$c_{14} = c_{13} \frac{D_{13}}{D_{14}} \quad (68)$$

Statická teplota:

$$T_{14} = T_{14c} - \frac{c_{14}^2}{2c_p} \quad (69)$$

Rychlost zvuku:

$$a_{14} = \sqrt{\kappa r T_{14}} \quad (70)$$

Machovo číslo na výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$M_{14} = \frac{c_{14}}{a_{14}} \quad (71)$$

Statický tlak vypočítáme podle [16] pomocí polytropického koeficientu $n_3 = 1,6$:

$$p_{14} = p_{13} \left(\frac{T_{14}}{T_{13}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (72)$$

Celkový tlak:

$$p_{14c} = p_{14} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{14}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (73)$$

5.7 Výstupní kanál kompresoru

Zvolíme výstupní rychlost c_5 .

Statická teplota:

$$T_{15} = T_{15c} - \frac{c_{15}^2}{2c_p} \quad (74)$$

Rychlost zvuku:

$$a_{15} = \sqrt{\kappa r T_{15}} \quad (75)$$

Machovo číslo na výstupu z bezlopatkového difuzoru:

$$M_{15} = \frac{c_{15}}{a_{15}} \quad (76)$$

Statický tlak vypočítáme podle [16] pomocí polytropického koeficientu $n_4 = 1,8$:

$$p_{15} = p_{14} \left(\frac{T_{15}}{T_{14}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (77)$$

Celkový tlak:

$$p_{15c} = p_{15} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{15}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (78)$$

Celkové stlačení pro 1. stupeň kompresoru je:

$$\Pi_1 = \frac{p_{15c}}{p_{11c}} \quad (79)$$

Měrná energie potřebná pro pohon 1. stupně kompresoru je:

$$w_{k1} = c_p (T_{12c} - T_{11c}) \quad (80)$$

5.8 1. stupeň – výstupní data

Výsledky výpočtu uvedeny v následujících tabulkách.

Geometrické parametry 1. stupně:

D_{10} [mm]	11
D_{11} [mm]	34
D_{12} [mm]	80
D_{13} [mm]	86
D_{14} [mm]	116
b_{12} [mm]	3
b'_{12} [mm]	4
θ_{ekv1} [°]	6
β_{11} [°]	32,21
β'_{12} [°]	20
α'_{12} [°]	13,58
α_{13} [°]	14,11
α_{14} [°]	29,11

Tab. 11 - Geometrické parametry 1. stupně kompresoru

Průběžné hodnoty výpočtu:

D_{11pr} [mm]	25,27
u_{10} [m. s ⁻¹]	58,7
u_{11} [m. s ⁻¹]	181,6
u_{11pr} [m. s ⁻¹]	135,0
ρ_{k11} [kg. m ⁻³]	1,135
w_{11} [m. s ⁻¹]	214,6
w_{11pr} [m. s ⁻¹]	176,9
$M_{11\sim}$ [-]	0,64

Tab. 12 - Průběžné hodnoty na vstupu do 1. kola

$\mu_1 [-]$	0,8958
$c_{12r} [m. s^{-1}]$	114,4
$u_{12} [m. s^{-1}]$	427,3
$c_{12\theta} [m. s^{-1}]$	341,1
$\frac{a_{12}}{a_{11}} [-]$	1,147
$\tau_{11} [-]$	0,96
$c'_{12r} [m. s^{-1}]$	82,4
$c_{13r} [m. s^{-1}]$	76,6
$c_{13u} [m. s^{-1}]$	317,3
$M_{12T} [-]$	1,27
$M_{2\theta} [-]$	0,88
$M_{2r} [-]$	0,30

Tab. 13 – Ostatní průběžné hodnoty výpočtu 1. stupně

Vstup do kola kompresoru (rovina 1)		Výstup z kola kompresoru (rovina 2)		Vstup do bezlopatkového difuzoru (rovina 3)		Vstup do lopatkového difuzoru (rovina 4)		Výstup z kompresoru (rovina 5)	
T_{11}	281,63	T_{12}	368,80	T_{13}	380,19	T_{14}	404,1	T_{15}	428,25
T_{11c}	288,15	T_{12c}	433,23	T_{13c}	433,23	T_{14c}	433,2	T_{15c}	433,23
c_{11}	114,4	c_{12}	359,8	c_{13}	326,4	c_{14}	242,0	c_{15}	100
a_{11}	336,4	a_{12}	385,8	a_{13}	390,8	a_{14}	402,9	a_{15}	414,8
M_{11}	0,34	M_{12}	0,93	M_{13}	0,84	M_{14}	0,60	M_{15}	0,24
p_{11}	91720	p_{12}	250246	p_{13}	270334	p_{14}	318028	p_{15}	362444
p_{11c}	99365	p_{12c}	438632	p_{13c}	426972	p_{14c}	405834	p_{15c}	377404

Tab. 14 - Termodynamické parametry na 1. stupni kompresoru

Celkové stlačení 1. stupně kompresoru je:

$$\Pi_1 = \frac{p_{15c}}{p_{11c}} = \frac{377404}{99365} = 3,80$$

Energie potřebná pro pohon 1. stupně:

$$w_{k1} = c_p(T_{12c} - T_{11c}) = 1004,5(433,23 - 288,15) = 145733 \text{ J.kg}^{-1}\text{s}$$

5.9 2. stupeň

Analogicky byly vypočítány parametry 2. stupně. Jako vstupní hodnoty byly použity parametry výstupního kanálu kompresoru. Byly zvoleny následující rozměrové parametry:

D_{20} [mm]	13
D_{21} [mm]	25
D_{22} [mm]	80
D_{23} [mm]	86
D_{24} [mm]	116
b_{22} [mm]	0,002
b'_{22} [mm]	0,003
θ_{ekv2} [°]	6
β_{21} [°]	36,81
β_{21pr} [°]	34,39
β'_{22} [°]	3
α'_{22} [°]	9,45
α_{23} [°]	10,17
α_{24} [°]	25,17

Tab. 15 - Geometrie 2. stupně kompresoru

Průběžné hodnoty výpočtu:

D_{21pr} [mm]	19,92
u_{20} [m. s ⁻¹]	69,4
u_{21} [m. s ⁻¹]	133,5
u_{21pr} [m. s ⁻¹]	106,4
ρ_{12} [kg. m ⁻³]	2,949
w_{21} [m. s ⁻¹]	166,8
w_{21pr} [m. s ⁻¹]	146,0
$M_{21\sim}$ [-]	0,40

Tab. 16 - Průběžné hodnoty na vstupu do 2. kola

$\mu_2 [-]$	0,9079
$c_{22r} [m \cdot s^{-1}]$	99,9
$u_{22} [m \cdot s^{-1}]$	427,3
$c_{22\theta} [m \cdot s^{-1}]$	382,7
$\frac{a_{22}}{a_{21}} [-]$	1,100
$\tau_{21} [-]$	0,96
$c'_{22r} [m \cdot s^{-1}]$	63,7
$c_{3r} [m \cdot s^{-1}]$	59,3
$c_{3u} [m \cdot s^{-1}]$	356,0
$M_{22r} [-]$	1,03
$M_{22\theta} [-]$	0,84
$M_{22r} [-]$	0,22

Tab. 17 – Ostatní průběžné hodnoty výpočtu 2. stupně

Rychlost na výstupu z 2. stupně byla zvolena $c_{25} = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
 Termodynamické parametry na 2. stupni kompresoru jsou uvedeny na následující stránce.

Vstup do kola kompresoru (rovina 1)		Výstup z kola kompresoru (rovina 2)		Vstup do bezlopatkového difuzoru (rovina 3)		Vstup do lopatkového difuzoru (rovina 4)		Výstup z kompresoru (rovina 5)	
T_{21}	428,3	T_{22}	518,1	T_{23}	531,2	T_{24}	560,4	T_{25}	588,8
T_{21c}	433,2	T_{22c}	596,0	T_{23c}	596,0	T_{24c}	596,0	T_{25c}	596,0
c_{21}	99,9	c_{22}	395,5	c_{23}	360,9	c_{24}	267,5	c_{25}	120
a_{21}	414,8	a_{22}	456,3	a_{23}	462,0	a_{24}	474,5	a_{25}	486,4
M_{21}	0,24	M_{22}	0,87	M_{23}	0,78	M_{24}	0,56	M_{25}	0,25
p_{21}	362466	p_{22}	683252	p_{23}	727742	p_{24}	839332	p_{25}	938295
p_{21c}	377404	p_{22c}	1115275	p_{23c}	1088892	p_{24c}	1041414	p_{25c}	978884

Tab. 18 - Termodynamické parametry na 2. stupni kompresoru

Celkové stlačení 2. stupně:

$$\Pi_2 = \frac{p_{5c}}{p_{1c}} = \frac{978884}{377404} = 2,96$$

Energie potřebná pro pohon 1. stupně:

$$w_{k2} = c_p(T_{22c} - T_{21c}) = 1004,5(433,23 - 288,15) = 145733 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Kontrola celkového stlačení kompresoru:

$$\Pi = \Pi_1 \Pi_2 = 3,8 \cdot 2,96 = 9,85$$

6 Návrh turbíny

Provedeme návrh turbíny ve 2 etapách. Na začátku budeme předpokládat identické stupně pro zjištění potřebného počtu stupňů turbíny, pak bude proveden detailní výpočet jednotlivých stupňů. Pro dosažení potřebného výkonu je třeba provést iterační výpočet. Dále budou uvedeny hodnoty finálních iterací.

6.1 Předběžný návrh

Pro začátek uvažujeme turbínu s reakcí R. Výkonový součinitel stupně:

$$R = 1 - \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = 4(1 - R) \quad (81)$$

Nejdřív zvolíme průměry stupně turbíny D_s, D_h . Pak vypočítáme střední průměr hrdla turbíny.

$$D_{stř} = \sqrt{\frac{D_s^2 + D_h^2}{2}} \quad (82)$$

Plocha mezikruží:

$$A_0 = \frac{\pi}{4}(D_s^2 - D_h^2) \quad (83)$$

Obvodová rychlost:

$$u = \frac{\pi D_{stř} n}{60} \quad (84)$$

Axiální rychlost v stupni turbíny vypočítáme z rovnice kontinuity z výstupu z kompresoru:

$$c_5 A_5 = w_z A_0 \rightarrow w_z = \frac{c_5 A_5}{A_0} = \frac{c_5 \pi (D_5^2 - D_{50}^2)}{4 A_0} \quad (85)$$

Průtokový součinitel stupně:

$$\varphi = \frac{w_z}{u} \quad (86)$$

Úhel náběhu na lopatku statoru:

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{w_{1\theta}}{w_z}\right) = \arctg\left(\frac{\lambda}{2\varphi}\right) \quad (87)$$

Úhel relativní rychlosti na vstupu na stator:

$$\beta'_1 = \arctg\left(\frac{\lambda - 2}{2\varphi}\right) \quad (88)$$

Rychlost na vstupu na stator:

$$w_1 = \frac{w_z}{\cos \beta_1} \quad (89)$$

Axiální rychlost na statoru:

$$w_{1\theta} = w_z \operatorname{tg} \beta_1 \quad (90)$$

Relativní axiální rychlost na statoru:

$$w'_{1\theta} = w_{1\theta} - u \quad (91)$$

Úhel výstupu z lopatek rotoru:

$$\beta_2 = 0^\circ \quad (92)$$

Úhel relativní rychlosti na výstupu z rotoru:

$$\beta'_2 = \arctg\left(\frac{1}{\varphi}\right) \quad (93)$$

Rychlost na vstupu na rotor:

$$w_2 = w_z \quad (94)$$

Relativní rychlost na rotoru:

$$w'_2 = \frac{w_z}{\cos \beta'_2} \quad (95)$$

Relativní axiální rychlost na rotoru:

$$w'_{2\theta} = 0 + u \quad (96)$$

Práce na 1 stupni turbíny:

$$w_{e1} = u(w'_{1\theta} + w'_{2\theta}) \quad (97)$$

Výkon potřebný pro pohon kompresoru a užitečného výkonu:

$$W_t = w_t(\dot{m} + \dot{m}_p) \quad (98)$$

Počet stupňů pro dosažení potřebného výkonu:

$$n = \frac{W_t}{W_{e1}} \quad (99)$$

Po výpočtu obdržíme následující hodnoty:

$R, [-]$	0,207
$\lambda, [-]$	3,172
$D_{\xi}, [\text{mm}]$	76
$D_h, [\text{mm}]$	72
$D_{stř}, [\text{mm}]$	74,03
$A_0, [\text{m}^2]$	0,000464956
$u, [\text{m.s-1}]$	395,4
$w_z, [\text{m.s-1}]$	406,8
$\varphi, [\text{m.s-1}]$	1,03
$\beta_0, [^\circ]$	0
$\beta_1, [^\circ]$	57,02
$\beta'_1, [^\circ]$	32,63
$w_1, [\text{m.s-1}]$	747,4
$w_{1\theta}, [\text{m.s-1}]$	627,0
$w'_1, [\text{m.s-1}]$	483,1
$w'_{1\theta}, [\text{m.s-1}]$	231,7
$\beta_2, [^\circ]$	0,0
$\beta'_2, [^\circ]$	44,18
$w_2, [\text{m.s-1}]$	406,8
$w'_2, [\text{m.s-1}]$	567,3
$w'_{2\theta}, [\text{m.s-1}]$	395,4
$w_{e1}, [\text{m.s-1}]$	247903
Počet stupňů $n, [1]$	2

Tab. 19 - Výsledky předběžného výpočtu turbíny

Z tohoto návrhu plyne, že pro pohon kompresorů a elektro generátoru bude stačit 2 stupně turbíny.

6.2 Detailní návrh

Dále analogicky vypočítáme parametry na prvním stupni. Zvolíme průměry

$$D_{1\xi} = 75 \text{ mm}; D_{1h} = 70 \text{ mm}$$

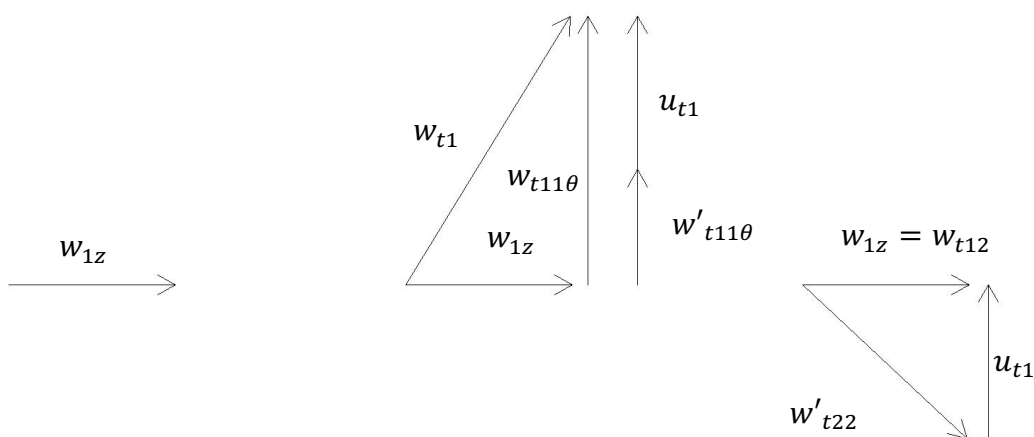
Reakce 1. stupně turbíny $R_1=0,125$

Rychlosti:

w_{t10} [m. s ⁻¹]	434,5
w_{t11} [m. s ⁻¹]	805,3
$w_{t11\theta}$ [m. s ⁻¹]	678,0
w'_{t11} [m. s ⁻¹]	522,7
$w'_{t11\theta}$ [m. s ⁻¹]	290,6
w_{t12} [m. s ⁻¹]	434,5
w'_{t12} [m. s ⁻¹]	582,1
$w'_{t12\theta}$ [m. s ⁻¹]	387,4

Tab. 20 - Rychlosti na 1. stupni turbíny

Rychlostní trojúhelníky na 1. stupni turbíny:



Energie stupně:

$$w_{e1} = u_{t1}(w'_{t11\theta} + w'_{t12\theta}) \quad (100)$$

Termodynamické parametry na stupni turbíny:

Vstupní parametry:

$$T_{t01} = 1173,15 \text{ K}, \quad p_{t10c} = 975864 \text{ Pa},$$

$$\kappa = 1,33, \quad r = 287 \text{ J. kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku:

$$c_p = \frac{\kappa r}{\kappa - 1} \quad (101)$$

Dále provedeme termodynamický výpočet parametrů stupně turbíny.

Parametry před rotorem:

Statická teplota:

$$T_{t10} = T_{t10c} - \frac{w_{1z}^2}{2c_p} \quad (102)$$

Rychlost zvuku:

$$a_{t10} = \sqrt{\kappa r T_{t10}} \quad (103)$$

Machovo číslo:

$$M_{t10} = \frac{w_{1z}}{a_{t10}} \quad (104)$$

Statický tlak:

$$p_{t10} = p_{t10c} \left(\frac{T_{t10}}{T_{t10c}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (105)$$

Hustota směsi v 1. stupni:

$$\rho_{t10} = \frac{p_{t10}}{rT_{t10}} \quad (106)$$

Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tabulce:

$T_{t10} [K]$	1091,55
$T_{t10c} [K]$	1173,15
$a_{t10} [m \cdot s^{-1}]$	645,5
$M_{t10} [-]$	0,67
$p_{t10} [Pa]$	729792
$p_{t10c} [Pa]$	975864

Tab. 21 - Termodynamické parametry před statorem

Analogicky byly vypočítány parametry mezi statorem a rotorem. Navíc bylo vypočítáno relativní Machovo číslo proudu ve stupni:

$$M'_{t11} = \frac{w'_{t11}}{a_{t11}} \quad (107)$$

$T_{t11} [K]$	892,84
$T_{t11c} [K]$	1173,15
$a_{t11} [m \cdot s^{-1}]$	583,79
$M_{t11} [-]$	1,38
$p_{t11c} [Pa]$	956712
$M'_{t11} [-]$	0,90

Tab. 22 - Termodynamické parametry mezi statorem a rotorem

Dále byly vypočítány tlakové poměry. Ztráty ve statoru $\zeta_s = 0,03$ byly použity z [15].

$$\frac{p_{t11c}}{p_{t10c}} = \frac{1}{1 + \zeta_s \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{t11}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right]} \quad (108)$$

$$\frac{p_{t11}}{p_{t11c}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{t11}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (109)$$

$$\frac{p_{t11}}{p'_{t11c}} = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{t11}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (110)$$

Statický tlak:

$$p_{t11} = p_{t10c} \frac{p_{t11c}}{p_{t10c}} \frac{p_{t11}}{p_{t11c}} \quad (111)$$

Celkový tlak vypočítaný z relativní rychlosti:

$$p'_{t11c} = \frac{p_{t11}}{\frac{p_{t11}}{p'_{t11c}}} \quad (112)$$

Ze vzorců 107–111 obdržíme následující hodnoty:

$p_{t11c}/p_{t10c}, [-]$	0,98037
$p_{t11}/p_{t11c}, [-]$	0,33273
$p_{t11}/p'_{t11c}, [-]$	0,60612
$p_{t11}, [Pa]$	318324
$p'_{t11c}, [Pa]$	525180

Tab. 23 - Poměry v řezu 1 a vypočtené z nich tlaky

Parametry za rotorem:

$T_{t12} [K]$	864,45
$T_{t12c} [K]$	946,05
$a_{t12} [m \cdot s^{-1}]$	574,43
$M_{t12} [-]$	0,76
$p_{t12c} [Pa]$	396412
$M'_{t12} [-]$	1,01

Tab. 24 - Termodynamické parametry za rotorem

Poměry (Ztráty v rotoru $\zeta_r = 0,03$ dle [15]):

$$\frac{p_{t12}}{p_{t12c}} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{t12}^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (113)$$

$$\frac{p_{t12}}{p'_{t12c}} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M'_{t12}{}^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (114)$$

$$\frac{p'_{t12c}}{p'_{t11c}} = \frac{1}{1 + \zeta_r \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M_{t12}^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}\right]} \quad (115)$$

Statický tlak:

$$p_{t12} = p_{t11} \frac{p'_{t11c}}{p_{t11}} \frac{p'_{t12c}}{p'_{t11c}} \frac{p_{t12}}{p'_{t12c}} \quad (116)$$

Celkový tlak vypočítaný z relativní rychlosti:

$$p'_{t12c} = \frac{p_{t12}}{\frac{p_{t12}}{p'_{t12c}}} \quad (117)$$

$$T_{t12c_{ize}} = T_{t10c} \left(\frac{p_{t10c}}{p_{t12c}}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \quad (118)$$

$$\eta_{t1ize} = \frac{T_{t10c} - T_{t12c}}{T_{t10c} - T_{t12c_{ize}}} \quad (119)$$

$$\eta_{t1pol} = \frac{\log T_{t12c} - \log T_{t10c}}{\log T_{t12c_{ize}} - \log T_{t10c}} \quad (120)$$

Hodnoty pro vzduch za rotorem:

$p_{t12}/p_{t12c}, [-]$	0,69521
$p_{t12}/p'_{t12c}, [-]$	0,53212
$p'_{t12c}/p'_{t11c}, [-]$	0,98616
$p_{t12}, [Pa]$	275589
$p'_{t12c}, [Pa]$	396412
$T_{t12c_{ize}}, [^{\circ}C]$	938,16
$\eta_{t1ize}, [-]$	0,9664
$\eta_{t1pol}, [-]$	0,9625

Tab. 25 - Poměry v řezu 1 a vypočtené z nich tlaky a účinnosti

Vstupní rychlost pro 2. stupeň kvůli rozšíření kanálu se změní na:

$$w_{2z} = w_{1z} \frac{A_{12}}{A_{20}} = w_{1z} \frac{A_{10}}{A_{20}} \quad (121)$$

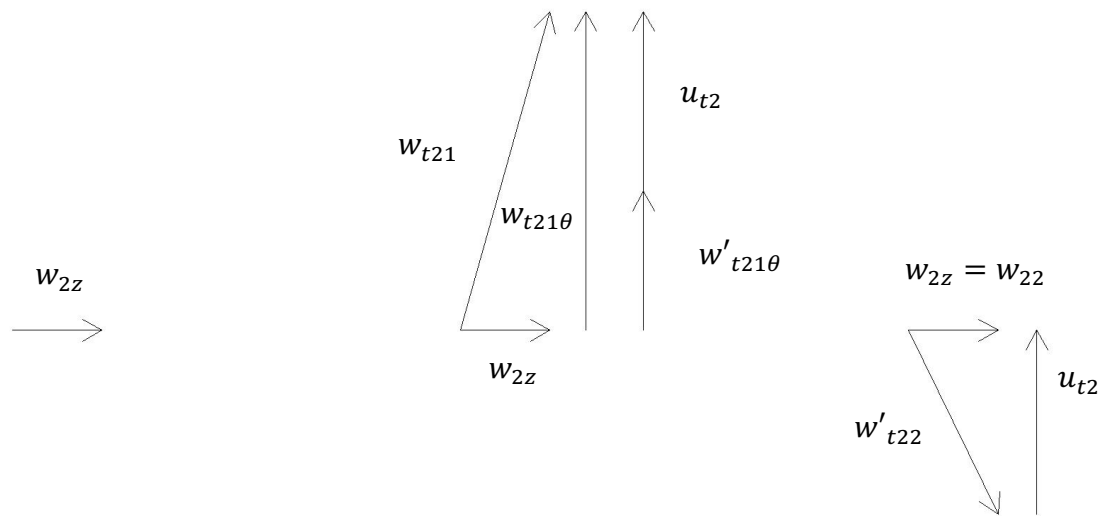
$$w_{2z} = 434,5 \frac{0,000569}{0,001178} = 210 \text{ m. s}^{-1}$$

Výsledky výpočtu 2. stupně:

Bezrozměrné veličiny, průměry		Rychlosti		Úhly	
$R_2 [-]$	0,48	$u_{t2} [m \cdot s^{-1}]$	412,9	$\beta_{t20} [^\circ]$	0
$\lambda_2 [-]$	2,08	$w_{t20} [m \cdot s^{-1}]$	342,4	$\beta_{t21} [^\circ]$	51,44
$\varphi_2 [-]$	0,8291	$w_{t21} [m \cdot s^{-1}]$	549,2	$\beta'_{t21} [^\circ]$	2,76
$D_{2s} [mm]$	79	$w'_{t21} [m \cdot s^{-1}]$	342,8	$\beta_{t22} [^\circ]$	0
$D_{2h} [mm]$	71	$w_{t21\theta} [m \cdot s^{-1}]$	429,4	$\beta'_{t22} [^\circ]$	50,34
$D_{2stř} [mm]$	75,1	$w'_{t21\theta} [m \cdot s^{-1}]$	16,5		

Tab. 26 - Parametry 2. stupně turbíny

Rychlostní trojúhelníky na 2. stupni:



Parametry před statorem		Parametry mezi rotorem a statorem	
$T_{t20} [K]$	1025,5	$p_{t21c} [Pa]$	692775
$T_{t20c} [K]$	1076,2	$M'_{t21} [-]$	0,5705
$a_{t20} [m \cdot s^{-1}]$	600,8	$p'_{t21c} [Pa]$	508266

Tab. 27 - Parametry 2. stupně turbíny (pokračování)

Parametry za rotorem	
T_{t22} [K]	872,2
T_{t22c} [K]	922,9
a_{t22} [m. s ⁻¹]	577
M_{t22} [-]	0,5934
p_{t22} [Pa]	293350
p_{t22c} [Pa]	368319
M'_{t22} [-]	0,9296
p'_{t22c} [Pa]	502006
T_{t22ize} [K]	917,3

Tab. 28 - Parametry 2. stupně turbíny (pokračování)

Výstupní parametry	
η_{t2ize} [-]	0,9648
η_{t2pol} [-]	0,9620
w_{e2} [J]	177323,1

Tab. 29 - Parametry 2. stupně turbíny (pokračování)

7 Návrh převodovky

7.1 Skutečný výkon motoru

$$P = (\dot{m} + \dot{m}_p)(w_{e1} + w_{e2}) - \dot{m}(w_{k1} + w_{k2}) \quad (122)$$

$$P = (0,106 + 0,0014)(262680 + 282023) - 0,106(145734 + 163490) = 24852 \text{ W} = 24,852 \text{ kW}$$

7.2 Převodový poměr

$$i = \frac{n}{n_{el}} \quad (123)$$

7.3 Počty zubů. Výpočet modulů

Krouticí momenty na jednotlivých hřídelích:

$$M_{kI} = 9950 \frac{P}{n\eta_p} \quad (124)$$

$$M_{kII} = M_{kI}i\eta_p \quad (125)$$

Otáčky na jednotlivých hřídelích:

$$n_I = n \quad (126)$$

$$n_{II} = \frac{n_I}{i} \quad (127)$$

$i, [-]$	2,267
$M_{kI}, [-]$	2,424
$M_{kII}, [-]$	5,385
$n_I, [\text{Pa}]$	102000
$n_{II}, [\text{Pa}]$	45000

Tab. 30 - Momenty a otáčky na jednotlivých hřídelích

Volíme materiál 14 220.

Volíme potřebné pro návrh konstanty:

Pro převodovku hnanou turbohřídelovým motorem – stabilita chodu: $K_A=1$

Z diagramu v [19] (str. 24 Obr. II-10) $K_{H\beta}=1,06$

Tvrдость z [19] (str. 26 Tab. IV) je 650-720HV>350HV pro ocel 14 420.

Pro oba kola povrchově tvrzená z [19] $b_{WF}/m_n=18$

(str. 25 Tab. II) $b_{WH}/d_1=0,9$

Počet zubů pastorku podle [19] (str. 25 Tab. III) $z_1=18$

Návrh z ohybu

Mez únavy v ohybu $\sigma_{Flimb}=500 \text{ MPa}$
 $f_p=18$

$$\sigma_{FP} = 0,6\sigma_{Flimb} = 0,6 \cdot 500 = 300 \text{ MPa}$$

Návrh modulu z ohybu:

$$m'_{nF} = f_p^3 \sqrt{\frac{K_\alpha K_{H\beta} M_{kI}}{(b_{WF1}/m_n) z_1 \sigma_{FP}}} \quad (128)$$

Volíme podle [19] z řady moduly m_{nF} .

Šířka ozubených kol:

$$b_{2F} = \frac{b_{WF}}{m_n} m_n \quad (129)$$

$$b_{1F} = b_{2F} + 2m_n \quad (130)$$

Volíme úhel sklonu zubů $\beta=12^\circ$.

Návrh z dotyku

Mez únavy v dotyku

$$\sigma_{Hlim}=1210 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{HP} = 0,8\sigma_{Hlim} = 0,8 \cdot 1210 = 968 \text{ MPa}$$

$f_H=690$

Roztečný průměr pastorků 1:

$$d'_{1H} = f_H^3 \sqrt{\frac{K_A K_{H\beta} M_{kl}}{\left(\frac{b_{WH1}}{d_1}\right) \sigma_{HP}^2} \frac{i+1}{i}} \quad (131)$$

Návrh modulů z dotyku:

$$m'_{nH} = \frac{d'_{1H} \cos \beta}{z_1} \quad (132)$$

Volíme podle řady moduly m_{nH} .

Šířka kol z dotyku:

$$b_{1H} = \left(\frac{b_{WH}}{d_1}\right) d_1 \quad (133)$$

$$b_{2H} = b_{1H} - 2m_{nH} \quad (134)$$

Konečný návrh soukolí (podle kontrol):

$$d_1 = \frac{m_n z_1}{\cos \beta} \quad (135)$$

$$d_2 = \frac{m_n z_2}{\cos \beta} \quad (136)$$

m'_{nF} , [mm]	0,5
m_{nF} , [mm]	1,5
b_{2F} , [mm]	27
b_{1F} , [mm]	30
d'_{1H} , [mm]	11,30
m'_{nH} , [mm]	0,6
m_{nH} , [mm]	1,5
b_{1H} , [mm]	10,2
b_{2H} , [mm]	7,2
m_n , [mm]	1,5
b_1 , [mm]	30
b_2 , [mm]	27
z_1 , [-]	20
z_2 , [-]	45
d_1 , [mm]	30,67
d_2 , [mm]	69,01

Tab. 31 - Návrhové parametry soukolí

7.4 Korekce

Osová vzdálenost:

$$a_{tw} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{27,6 + 72,08}{2} = 45,24 \text{ mm} \quad (137)$$

Volíme normovanou osovou vzdálenost $a_t=50$ mm (podle [19] str. 32).

$$\alpha_t = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{\cos \beta} \quad (138)$$

$$\alpha_{tw} = \arccos \left(\frac{a_t}{a_{tw}} \cos \alpha_t \right) \quad (139)$$

Involuty:

$$\operatorname{inv} \alpha = \operatorname{tg} \alpha - \hat{\alpha} \quad (140)$$

$$\operatorname{inv} \alpha_{tw} = \operatorname{tg} \alpha_{tw} - \hat{\alpha}_{tw} \quad (141)$$

$$x_1 + x_2 = \frac{z_1 + z_2}{2 \operatorname{tg} \alpha_n} (\operatorname{inv} \alpha_{tw} - \operatorname{inv} \alpha_t) \quad (142)$$

Rozdělení korekcí mezi jednotlivými koly:

$$x_1 = (x_1 + x_2) \frac{i}{i + 1} \quad (143)$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1 \quad (144)$$

Stanovení hlavových a patních průměrů:

Pastorek 1:

$$\Delta y = \frac{1}{m_n} (a + (x_1 + x_2)m_n - a_w) \quad (145)$$

$$d_{a1} = d_1 + 2m(h_a^* + x_1 - \Delta y) \quad (146)$$

$$d_{f1} = d_1 - 2m(h_a^* + c^* - x_1) \quad (147)$$

Kolo 2:

$$d_{a2} = d_2 + 2m(h_a^* + x_2 - \Delta y) \quad (148)$$

$$d_{f2} = d_2 - 2m(h_a^* + c^* - x_2) \quad (149)$$

Valivé průměry:

$$d_{w1} = d_1 \frac{\cos \alpha_n}{\cos \alpha_{tw}} \quad (150)$$

$$d_{w2} = d_2 \frac{\cos \alpha_n}{\cos \alpha_{tw}} \quad (151)$$

Výsledky výpočtů návrhových parametrů:

α_t , [rad]	0,356227135
α_{tw} , [rad]	0,364776978
$\operatorname{inv} \alpha$, [rad]	0,015874403
$\operatorname{inv} \alpha_{tw}$, [rad]	0,017089515
$x_1 + x_2$, [-]	0,109
Δy , [-]	0,00123697

Tab. 32 - Návrhové parametry soukolí

Shrnutí návrhu:

	z [-]	β [°]	m_n [mm]	d [mm]	d_a [mm]	d_f [mm]	d_w [mm]	x [-]
Pastorek 1	20	12	1,5	30,67	33,74	27,15	28,83	0,075
Kolo 2	45	12	1,5	69,01	72,10	65,36	64,86	0,033

Tab. 33 - Průměry kol a výsledná korekce

7.5 Kontrola převodu:

$$i = \frac{z_2}{z_1} \quad (152)$$

$$i = \frac{45}{19} = 2,25$$

7.6 Skutečné otáčky

$$n_{el} = \frac{n}{i} \quad (153)$$

$$n_{el} = \frac{102000}{2,25} = 45333 \text{ ot. min}^{-1}$$

7.7 Návrh hřídelí

Předběžný průměr hřídelí:

$$d'_I = 125 \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (154)$$

$$d'_{II} = 115 \sqrt[3]{\frac{P}{n_{el}}} \quad (155)$$

Volíme:

$$d_I = 8 \text{ mm}, \quad d_{II} = 10 \text{ mm}$$

8 Kontroly

8.1 Výpočet ložisek

Budeme uvažovat životnost ložisek 500 hodin.

Síly v ozubených kolech:

$$F_{t12} = F_{t21} = \frac{2M_{kl}}{d_{w1}} \quad (156)$$

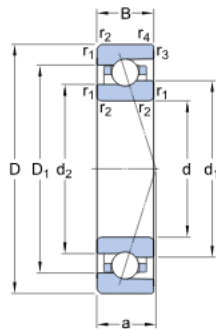
$$F_{r12} = F_{r21} = \frac{F_{t12} \operatorname{tg} \alpha_{tw}}{\cos \beta} \quad (157)$$

$$F_{a12} = F_{a21} = F_{t12} \operatorname{tg} \beta \quad (158)$$

Hřídel I

Na hřídeli č. 1 jsou 2 typy ložisek: pro průměr 8 mm a pro průměr 12 mm.

Volíme ložisko o průměru 8 mm 708 ACE/HCP4A [20]. Parametry ložiska:



d	8	mm
D	22	mm
B	7	mm
d ₁	12.1	mm
d ₂	11.5	mm
D ₁	17.9	mm
r _{1,2}	min. 0.3	mm
r _{3,4}	min. 0.15	mm
a	7.1	mm

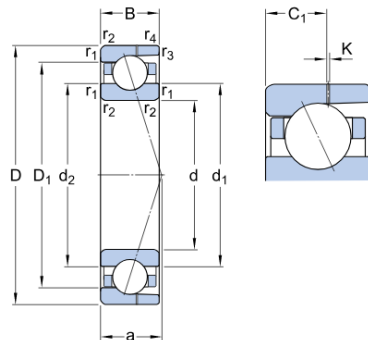
Výpočtové součinitele pro ekvivalentní zatížení ložisek

Výpočtový součinitel	e	0.68
Výpočtový součinitel (jednotlivé, v tandemu)	Y ₂	0.87

Data výpočtu

Základní dynamická únosnost	C	2.29	kN
Základní statická únosnost	C ₀	0.765	kN

Pro průměr 12 volíme ložisko 7001 ACD/HCP4AH.



d	12	mm
D	28	mm
B	8	mm
d ₁	17.1	mm
d ₂	17.1	mm
D ₁	22.9	mm
K	0.5	mm
C ₁	4.9	mm
r _{1,2}	min. 0.3	mm
r _{3,4}	min. 0.2	mm
a	8.7	mm

Data výpočtu

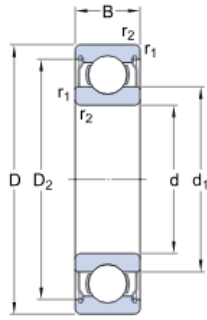
Základní dynamická únosnost	C	4.36	kN
Základní statická únosnost	C ₀	1.83	kN

Výpočtové součinitele pro ekvivalentní zatížení ložisek

Výpočtový součinitel	e	0.68
Výpočtový součinitel (jednotlivé, v tandemu)	Y ₂	0.87

Hřídel II:

Volíme ložisko SKF W 61700 X-2ZS [20]. Parametry ložiska:

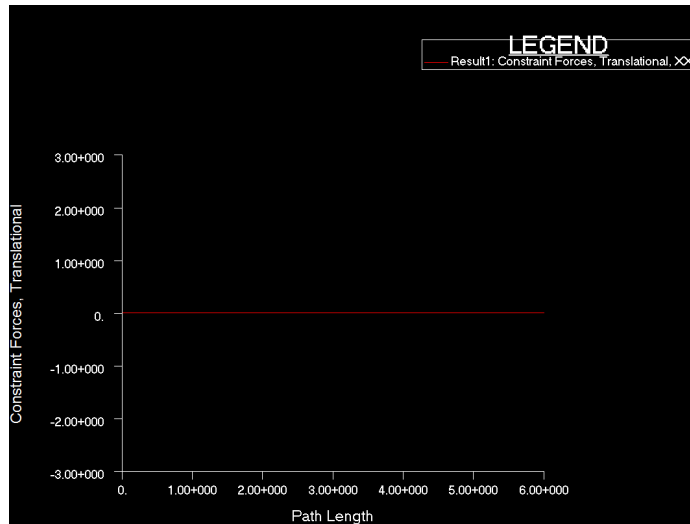


d	10	mm
D	15	mm
B	4	mm
d ₁	≈ 11.21	mm
D ₂	≈ 14.03	mm
r _{1,2}	min. 0.15	mm

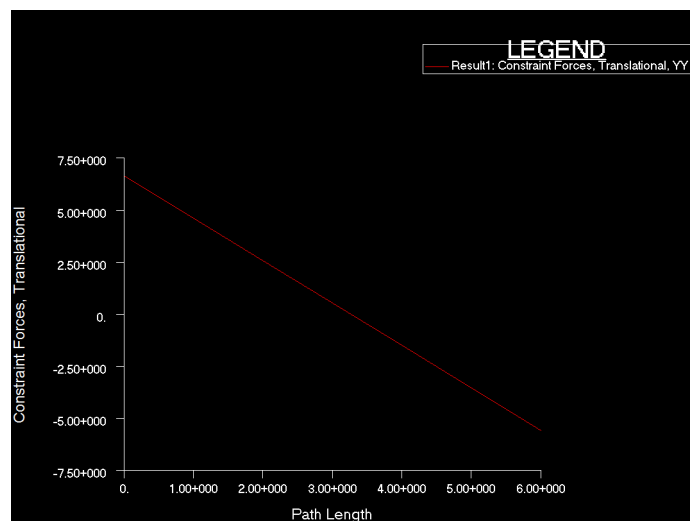
Data výpočtu

Základní dynamická únosnost	C	0.488	kN
Základní statická únosnost	C ₀	0.22	kN

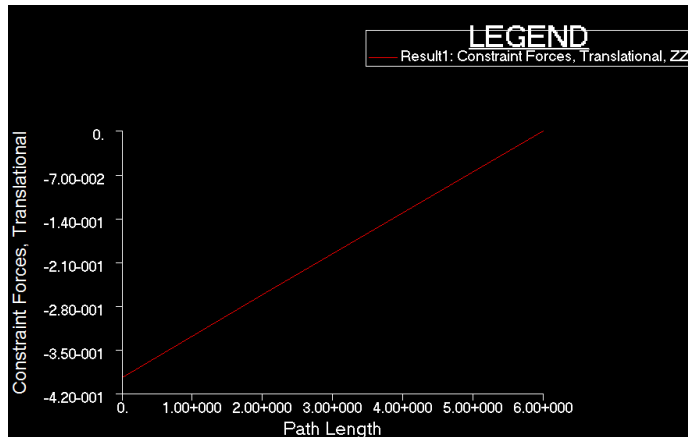
Výpočet sil vzniklých v hřídeli byl proveden v MKP softwaru MSC Nastran/Patran kvůli složitosti analytického řešení pro zvolený tvar hřídele. Bylo zjištěno, že reakce v ložiskách 3 a 4 je téměř nulová. Proto vyhodnocení životnosti provedeme pouze pro ložiska 1 a 2 a také pro ložiska na 2. hřídeli.



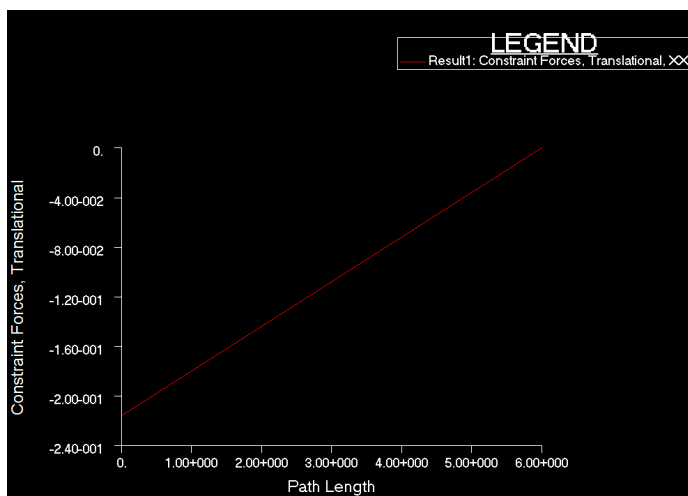
Obr. 10 - Axiální síla v ložisku 1



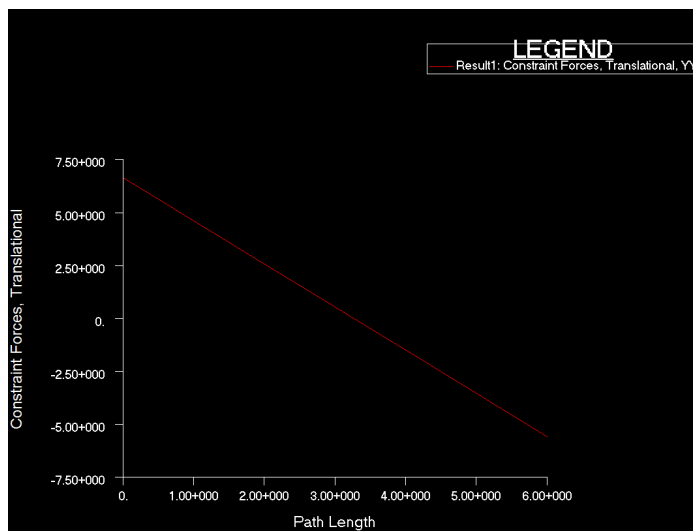
Obr. 11 - Radiální síla v ložisku 1



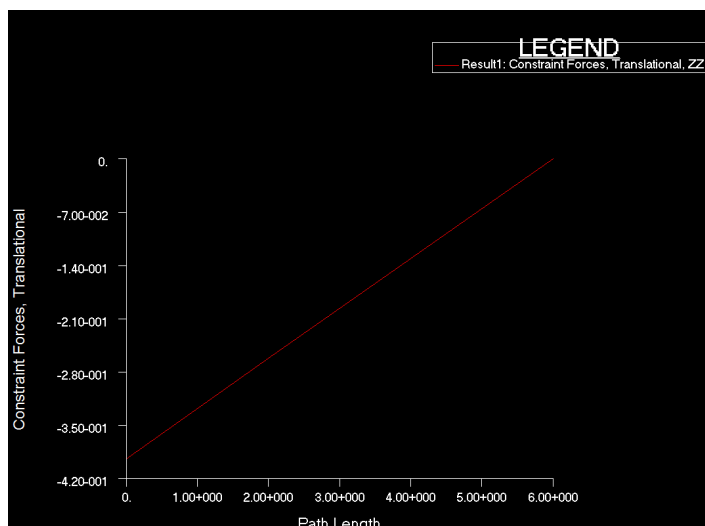
Obr. 12 - Tečná síla v ložisku 2



Obr. 13 - Axiální síla v ložisku 2



Obr. 14 - Radiální síla v ložisku 2



Obr. 15 - Tečná síla v ložisku 2

Pro hřídel č. 2 vypočítáme síly analyticky:

$$R_{Cx} = F_a \quad (159)$$

$$R_{Cy} = F_r \frac{c}{c + d} \quad (160)$$

$$R_{Cz} = F_t \frac{c}{c + d} \quad (161)$$

$$R_{Dx} = 0 \quad (162)$$

$$R_{Dy} = F_r - R_{Cy} \quad (163)$$

$$R_{Dz} = F_t - R_{Cz} \quad (164)$$

	Ložisko 1 hřídel I	Ložisko 2 hřídel I	Ložisko 1 hřídel II	Ložisko 2 hřídel II
$ R_x $, [N]	0	0,0215	0,0358	0
$ R_y $ [N]	6,67	0,227	0,0385	0,0272
$ R_z $ [N]	3,97	3,97	0,0986	0,0696

Tab. 34 - Reakce v ložiskách bez uvažování axiální síly od kompresorů

Síly od kompresorů vypočítáme z Eulerovy turbínové rovnice:

$$F_{k1a} = \dot{m}(c_{11} - c_{12a}) = \dot{m}c_{11} \quad (165)$$

$$F_{k1a} = 0,106 \cdot 114,4 = 12,1 \text{ N}$$

$$F_{k2a} = \dot{m}(c_{21} - c_{22a}) = \dot{m}c_{21} \quad (166)$$

$$F_{k2a} = 0,106 \cdot 99,9 = 10,5 \text{ N}$$

Po odečtení sil od kompresorů působících proti síly od soukolí dostaneme:

	Ložisko 1 hřídel I	Ložisko 2 hřídel I	Ložisko 1 hřídel II	Ložisko 1 hřídel II
$ R_x $, [N]	0	22,5785	0,0358	0
$ R_y $ [N]	6,67	0,227	0,0385	0,0272
$ R_z $ [N]	3,97	3,97	0,0986	0,0696

Tab. 35 - Reakce v ložiskách s uvažováním axiální síly od kompresorů

$$R_y = \sqrt{R_x^2 + R_z^2}$$

Ekvivalentní síla v ložisku dle [20]:

$$F_{ekv} = R + Y_2 R_y \quad (167)$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{60 L_h n_1}{10^6} F_{ekv}} \quad (168)$$

Pro ložiska na 2. hřídeli je dostupná ložisková kalkulačka od SKF, pro stanovíme ekvivalentní zatížení pomocí ní.

	Typ	R_y [kN]	R_{ay} [kN]	Y_2 [-]	F_{ekv} [kN]	C [N]	C_T [N]
Hřídel I-1	708 ACE/HCP4A	0,008	0	0,87	0,008	113	765
Hřídel I-2	S7001 ACD/P4A	0,004	0,02	0,87	0,024	343	1060
Hřídel II-1	719/9 CE/P4A	0,11	0,04	0,87	0,137	1517	1830
Hřídel II-2	719/9 CE/P4A	0,07	0	0,87	0,075	828	1830

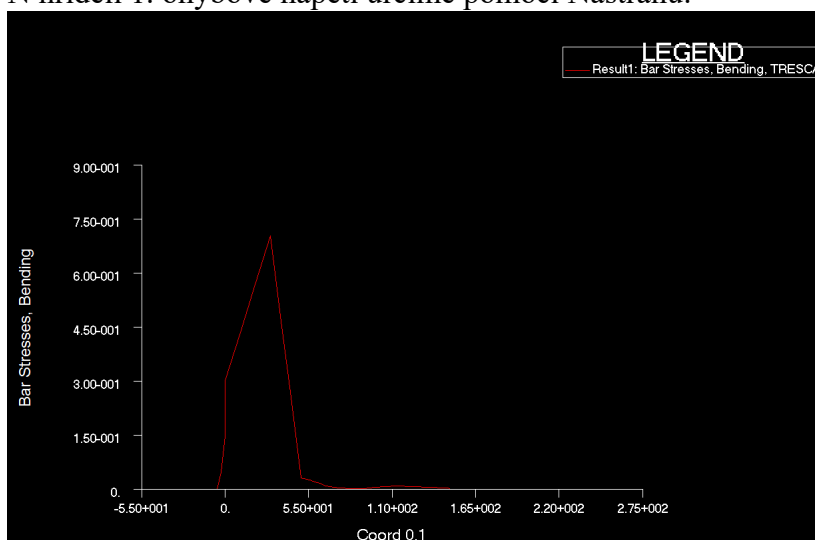
Tab. 36 - Zvolená ložiska

8.2 Statická kontrola hřídelí

Ohyb

Hřídel I

N hřídeli 1. ohybové napětí určíme pomocí Nastranu:



Obr. 16 - Ohybový moment na hnacím hřídeli

Maximální napětí je $\sigma_{max} = 0,75 \text{ MPa}$

Hřídel II

$$W_o = \frac{\pi d_{II}^3}{32} \quad (169)$$

$$M_{oxy_{max}} = |R_{dy}d| \quad (170)$$

$$M_{oxz_{max}} = |R_{dz}d| \quad (171)$$

$$M_{oy_{max}} = \sqrt{M_{oxy_{max}}^2 + M_{oxz_{max}}^2} \quad (172)$$

$$\sigma_o = \frac{M_{oy_{max}}}{W_o} \quad (173)$$

Výsledky výpočtu pro 2. hřídel:

$W_o \text{ [mm}^3\text{]}$	98,17
$M_{oxy_{max}} \text{ [Nm]}$	0,0010
$M_{oxz_{max}} \text{ [Nm]}$	0,0026
$M_{oy_{max}} \text{ [Nm]}$	0,0028
$\sigma_o \text{ [MPa]}$	0,029

Krut

Krut sledujeme na menších průměrech hřídele.

Hřídel I

$$W_k = \frac{\pi d_I^3}{16} \quad (174)$$

$$\tau = \frac{M_{kl}}{W_k} \quad (175)$$

Výsledky výpočtu

Hřídel	W_k [mm ³]	τ [MPa]
Hřídel I	100,53	24,11
Hřídel II	196,35	27,43

Redukované napětí

Koeficient bezpečnosti volíme $k=3,5$

Dovolená napětí pro ocel 14 220:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_k}{k} \quad (176)$$

$$\sigma_D = \frac{600}{3,5} = 171,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4\tau^2} \quad (177)$$

Hřídel I

$$\sigma_{red} = \sqrt{(0,75)^2 + 4(24,11)^2} = 48,24 \text{ MPa} < 171,4 \text{ MPa}$$

Hřídel II

$$\sigma_{red} = \sqrt{(0,029)^2 + 4(27,43)^2} = 54,85 \text{ MPa} < 171,4 \text{ MPa}$$

8.3 Výpočet spojení náboj-hřídel

Kontrola spojení pery kompresorů a turbín

Dovolený tlak spojení hliník – ocel $p_D = 90 \text{ MPa}$, ocel-ocel $p_D = 120 \text{ MPa}$.

$$M_k = \frac{9950W_k}{n} \quad (178)$$

Síla na pero:

$$F = \frac{2M_k}{d - t} \quad (179)$$

Potřebná délka pera:

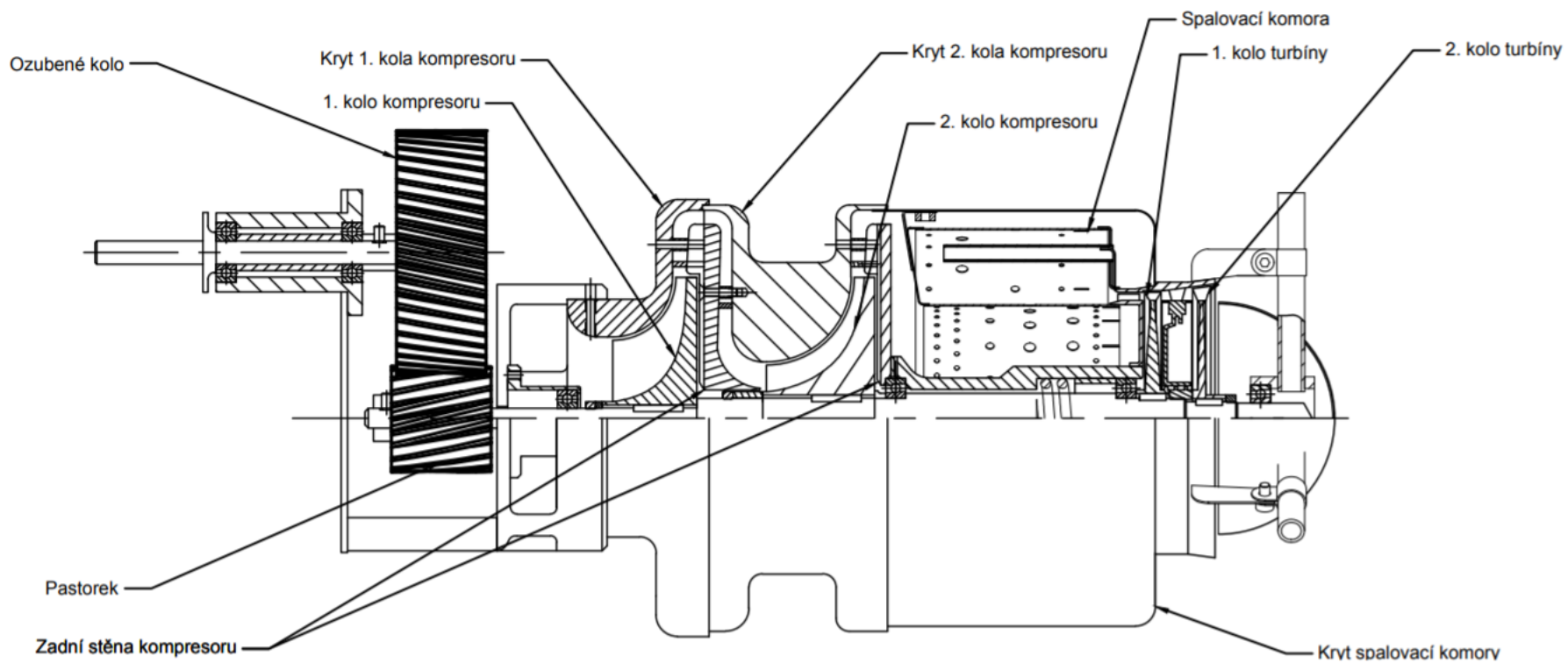
$$l_a = \frac{F}{n \frac{t}{2} p_D} \quad (180)$$

	Kompresor 1. kolo	Kompresor 2. kolo	Turbína 1. kolo	Turbína 2. kolo
M_k [N.m]	5,35	6,68	16,11	16,8
d [mm]	6	7	7	6
t [mm]	2	2	2	2
F [N]	2,68	2,67	6,44	8,4
p_D [MPa]	90	90	120	120
l_a [mm]	0,0297	0,0297	0,0537	0,07
l [mm]	15	15	15	15

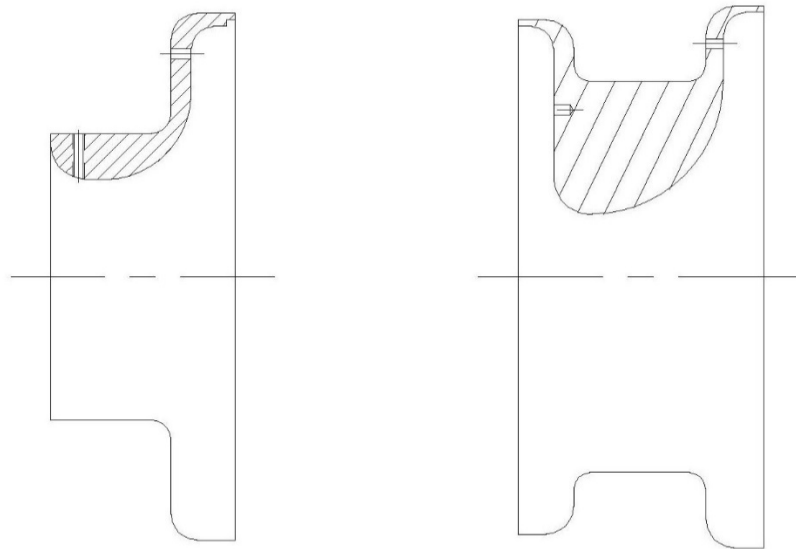
Tab. 37 - Návrh per

9 Konstrukční návrh

9.1 Řez motorem



9.2 Kryty kol kompresorů



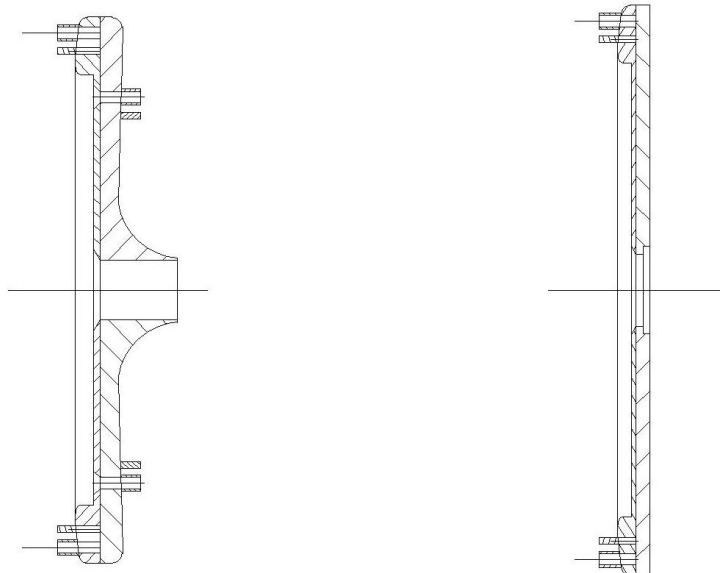
Obr. 17 - Kryty kompresoru

Teplota vzduchu v 1. kompresoru je $T_5 = 433 \text{ K} = 160 \text{ °C}$, 2. kompresoru $T_5 = 596 \text{ K} = 323 \text{ °C}$. Pro snížení hmotnosti konstrukce kryty kol budou vysoustruženy z duralových tyčí o průměru 128 mm a 123 mm a délkou 44 a 58 mm respektive. Materiál polotvarů EN AW-2007 T4 dle ČSN EN 755-1.

9.3 Kryt spalovací komory

Kryt spalovací komory je vyroben z korozivzdorné oceli 1.4301. Použitý polotvar pro soustružení je kruhová tyč o průměru 120 mm o délce 86 mm dle normy EN 10060.

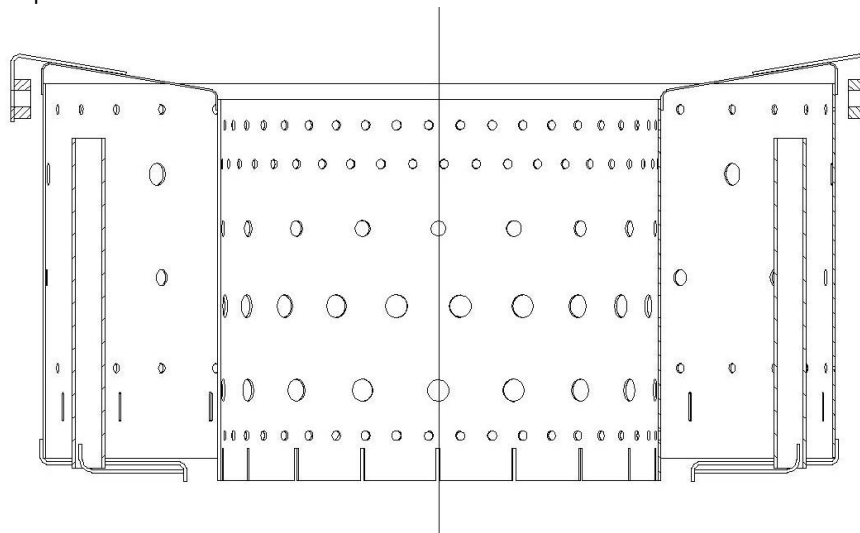
9.4 Vnitřní stěny difuzorů, lopatky difuzoru



Obr. 18 - Stěny difuzoru a lopatky

Zadní stěny difuzorů jsou složeny ze dvou dílů vysoustružených z kruhových o průměru 120 mm výstřížků z duralových plechů EN AW 2024 dle EN 573-3 o tloušťce 3 mm. Díly jsou sešroubované mezi sebou. Pak k nim jsou přišroubované lopatky vyfrézované ze stejného plechu. Vnitřní stěna difuzoru 1. kola je přešroubovaná ke krytu 2. kola, stěna 2. kola je pomocí držáků připevněna ke krytu spalovací komory.

9.5 Spalovací komora

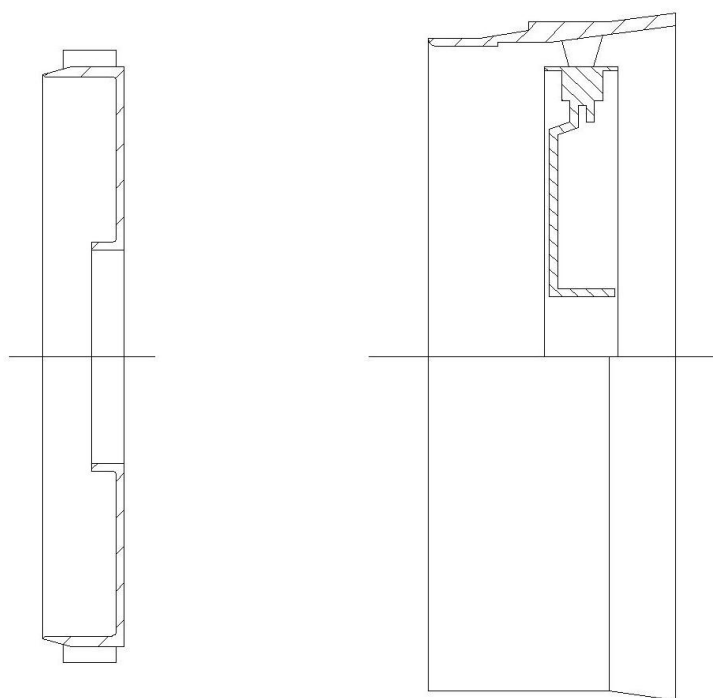


Obr. 19 - Spalovací komora

Spalovací komora je tvořena plechy ze žáruvzdorné chrom – molybdenové oceli o tloušťky 0,5 mm. Vnější a vnitřní plechy jsou zakružené do průměrů 122 mm, respektive 68 mm. Přední a zadní stěny je tvářena z kruhového plechu. Odpařovací trubice je taktéž z chrom – molybdenové oceli, stejně tak rozprašovací kolečko.

Na přední stěnu jsou navařeny držáky s maticemi, pomocí kterých spalovací komora je připevněna ke krytu spalovací komory.

9.6 Statory turbíny

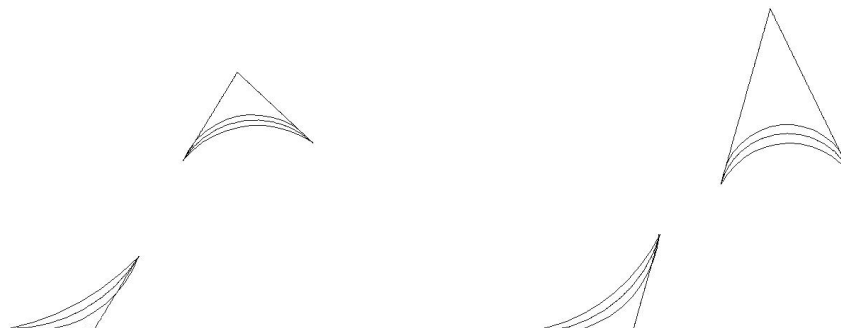


Obr. 20 – Statory turbíny

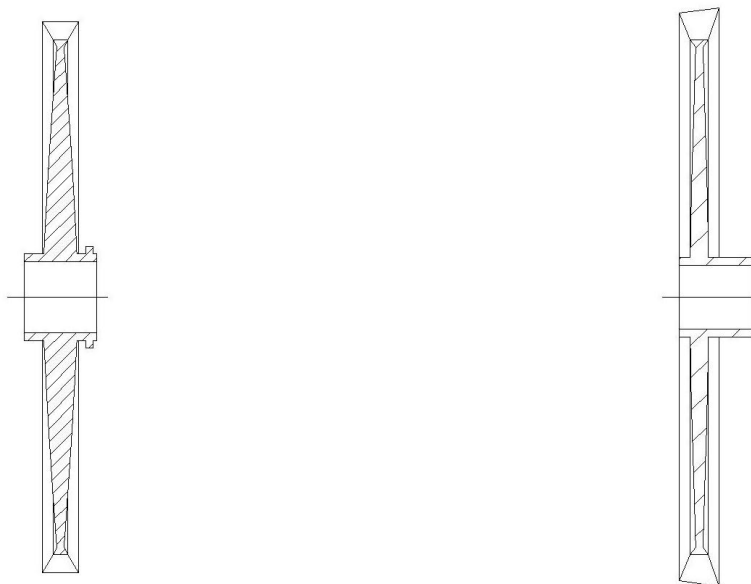
Skříňe statorů turbín jsou odlity z chromniklové oceli IN 713LC s přípustnou teplotou 950 °C. Takové odlitky je schopná vyrobit například firma PBS Velká Bíteš [21]. V odliticích jsou elektroerozivním způsobem vyřezány otvory pod lopatky.

9.7 Lopatky

Samotné lopatky jsou tvarovány pomocí kotoučů z žáruvzdorných chrom-molybdenových plechů. Montáž lopatek do skříní se provádí pomocí svařování TIG. Tvar lopatek je tvořen pro jednoduchost dvěma kruhovými oblouky stejně vzdálenými od středové čáry, která je tečná k vektoru rychlosti.



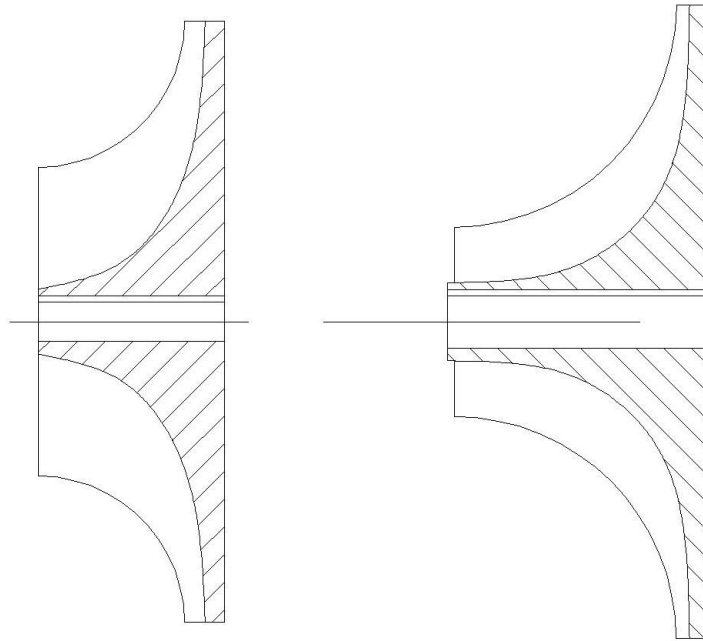
9.8 Kola turbín



Obr. 21 - Kola turbín

Kola turbín odlita ze slitiny IN 713LC. Následujícím krokem jsou vyfrézovány drážky pro péra. Na prvním stupni turbíny je umístěna část labyrintového těsnění.

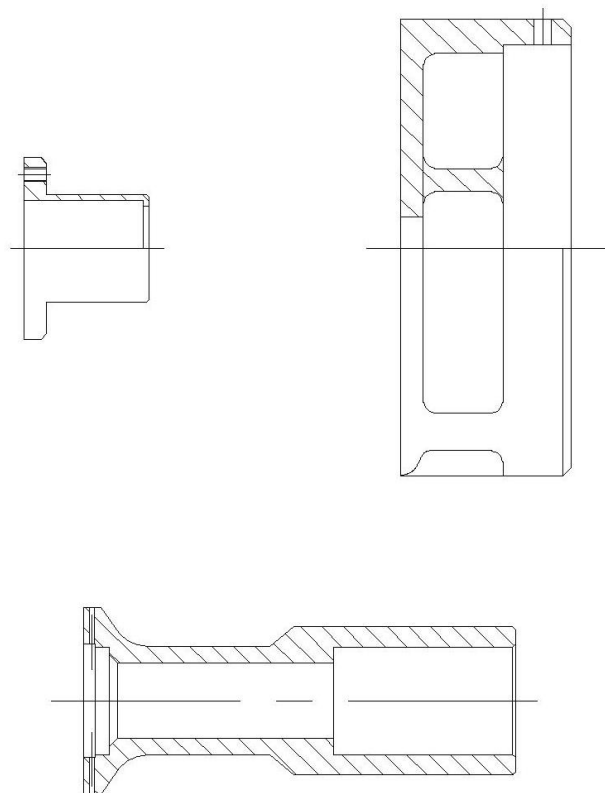
9.9 Kola kompresoru



Obr. 22 - Kola kompresoru

Kola kompresoru vyfrézována z duralových tyčí o průměru 80 mm. V kolech jsou také vyfrézovány drážky pro pera.

9.10 Distanční trubky a jiné



Obr. 23 - Ostatní díly

Distanční trubky, rozvody, konzoly a t. p. jsou převzaty z [14]. Všechny díly jsou vysoustruženy nebo vyfrézovány z duralových polotvarů pro snížení hmotnosti.

10 Závěr

V první části práce byly uvedeny důvody ke zkoumání tématu hybridních letadlových motorů. Toto téma je v současnosti v popředí zájmu mezinárodních výzkumných institucí. Jsou zde popsány příklady existujících typů hybridních pohonů letadel.

Ve druhé části byly sepsány některé současné příklady letadel poháněných buď hybridními, nebo elektrickými pohony, včetně projektů. Pro každý letoun byly uvedeny jeho charakteristiky, pro projekty pak očekávané charakteristiky.

Následující část práce se zabývala samotným návrhem hybridního motoru. Nejdříve byl vypočítán tepelný oběh pro různé stlačení. Na základě výsledků výpočtu tepelného oběhu bylo zvoleno optimální stlačení kompresoru. Následovně byl proveden výpočet jednotlivých stupňů kompresoru. Nakonec byly navrženy stupně turbín a převodovky, provedena kontrola ložisek a per pro spojení kol s hřídelí. Poslední část práce obsahuje popis jednotlivých dílů z konstrukčního hlediska s uvedením materiálů a způsobu výroby základních dílů.

Demonstrátor hybridního motoru navržený v této práci může být využit pro výukové účely. Pohonná jednotka má kompaktní rozměry, což umožňuje její přenos nebo laboratorní použití. Text práce znázorňuje postup termodynamického a konstrukčního návrhu takové pohonné jednotky. Navíc v této práci byl rozebrán nečastý případ dvoustupňového radiálního kompresoru. Jeho výpočet lze obtížně najít v odborné literatuře, a proto táto práce může sloužit jako podklad pro výpočet podobných strojů.

Účinnost motoru je celkem nízká, dosahuje pouhých 20,79%. Je to dané především nízkou teplotou ve spalovací komoře, která byla zvolena na základě dostupných materiálů pro turbínové lopatky bez chlazení.

Demonstrátor motoru se točí s rychlostí 102000 ot.min⁻¹. Tak vysoké otáčky umožňují motoru při jeho malé velikosti dosáhnout termodynamických parametrů srovnatelných s reálnými motory. Celkové stlačení kompresoru bylo stanoveno na 9,85, což se nevýznamně liší od optimálních parametrů motoru. Toto ovšem neovlivní výrazně jeho účinnost, neboť v bezprostřední blízkosti optimálního bodu je křivka účinnosti plochá.

Generování výkonu se v turbohřídelovém motoru demonstrátoru odehrává ve dvou stupních turbíny. Většina výkonu turbín je odebíraná pro náhon kompresoru, i tak ale bylo dosaženo relativně vysokých výkonů na motoru.

Výkon turbohřídelového motoru je využit pro pohon elektromotoru Lehner Motorentchnik, přiváděný výkon byl vypočítán na 24,35 kW, otáčky elektromotoru jsou upraveny pomocí jednostupňové převodovky s šikmým ozubením na 45333 ot.min⁻¹.

Cím dál tím větší důraz kladený evropskými zeměmi na ochranu životního prostředí dělá z hybridních leteckých motorů atraktivní cestu vývoje oboru. Současná situace napomáhá projektům snižování emisí spalinových plynů a použití alternativních zdrojů energie. Velcí letečtí výrobci investují do programů vývoje tohoto druhu motorů a letadel takovými pohony. To vše nasvědčuje tomu, že v budoucnu podobné jednotky budou populární, a vyvolává potřebu k seznámení lidí se základními principy fungování hybridního pohonu už dnes. Právě pro této účely lze využít navržený demonstrátor.

11 Zdroje

1. ICAO *Long-Term Traffic Forecasts*. [Online] [Citace: 5. 5 2018.] <https://www.icao.int/Meetings/aviationdataseminar/Documents/ICAO-Long-Term-Traffic-Forecasts-July-2016.pdf>.
2. ICAO *Inveronmental Report 2016*. [Online] [Citace: 5. 5 2018.] <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>.
3. *Hypstair project*. [Online] [Citace: 4. 5 2018.] <http://www.hypstair.eu>.
4. *Siemens website*. [Online] [Citace: 4. 5 2018.] <https://w5.siemens.com>.
5. *AviationPros*. [Online] [Citace: 4. 5 2018.] <http://www.aviationpros.com/article/12184824/hypstair-most-powerful-hybrid-electric-powertrain-powers-up>.
6. *Skybrary*. [Online] [Citace: 4. 5 2018.] <https://www.skybrary.aero/index.php/DA36>.
7. *Airbus*. [Online] [Citace: 5. 5 2018.] <http://www.airbus.com>.
8. *Zunum Aero*. [Online] [Citace: 5. 5 2018.] <http://zunum.aero>.
9. *Reuters*. [Online] [Citace: 5. 5 2018.] <https://www.reuters.com/article/us-aerospace-hybrid/boeing-backed-hybrid-electric-commuter-plane-to-hit-market-in-2022-idUSKBN1CA16A>.
10. NASA. *Building Blocks for Transport-Class Hybrid and Turboelectric Vehicles*. [Online] [Citace: 5. 5 2018.] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170006238.pdf>.
11. *Eviation*. [Online] [Citace: 8. 5 2018.] <https://www.eviation.co/alice/>.
12. *Pipistrel*. [Online] [Citace: 8. 5 2018.] <https://www.pipistrel.si>.
13. *Lehner-Motoren-Technik*. [Online] <http://www.lehner-motoren.com/>.
14. Schreckling, Kurt. *Das Turboproptriebwerk für Modelle im Selbstbau*. Baden-Baden : Verl. für Technik und Handwerk, 2000. ISBN 3-88180-127-8.
15. JERIE, Jan. *Teorie motorů*. Praha : České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01460-6.
16. KMOCH, Petr. *Teorie leteckých motorů. Část 1*. Brno : VAAZ, 2002.
17. *Методика расчёта и моделирования центробежных компрессоров*. АХМЕДЗЯНОВ, Д.А., КОЗЛОВСКАЯ, А.Б. а ПРОСКУРИНА, Н.А. Уфа : УГАТУ, 2014. УДК 621.431.75.
18. FAROKHI, Saeed. *Aircraft propulsion. 2nd ed*. Chichester : Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-80677-7.
19. KUGL, Otmar, HOUKAL, Jiří, TOMEK, Pavel, ZÝMA, Jiří. *Projekt - III. ročník*. Praha : České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-01638-2.
20. *SKF*. [Online] <http://www.skf.com/>.
21. *PBS Velká Bíteš*. [Online] [Citace: 4. 1 2019.] https://www.pbs.cz/getmedia/c51d197c-ff61-4c00-909b-a485bedf0607/PBS_Presneliti_CZ.pdf.aspx?ext=.pdf.