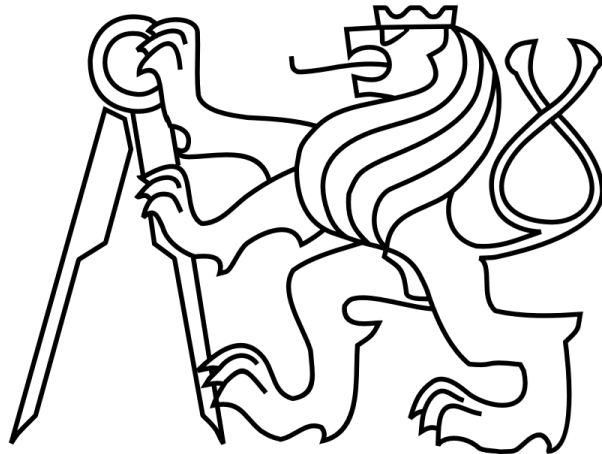


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Návrh chlazení ložisek testovacího zařízení

2019

Stanislav Procházka

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 21. 7. 2019

.....

podpis

## **Poděkování**

Úvodem bych rád poděkoval především svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Josefu Kekulovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Peteru Kohútovi, Ph.D. za vedení, odborné konzultace, trpělivost a podnětné připomínky při jejím vypracování. Chtěl bych také poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali při mém studiu.

# Anotace

Autor:	Stanislav Procházka
Název BP:	Návrh chlazení ložisek testovacího zařízení
Rozsah práce:	63 stránek, 35 obrázků, 11 tabulek
Školní rok vyhotovení:	2019
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Josef Kekula Ph.D.
Konzultant BP:	Ing. Peter Kohút, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Návrh chladicího kanálu a výpočet ztrát v ložisku.
Klíčová slova:	Chlazení, chlazení ložisek, chlazení vřeten, chladicí plášť, chladicí média, součinitel přestupu tepla, tlakové ztráty, ztráty ložisek
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukční úpravy testovacího zařízení za účelem sledování vlivu chlazení ložisek na velikosti pasivních odporů a jejich provozní předpětí. Na základě provedené rešerše jsou navrženy varianty chlazení. Po zhodnocení všech variant, je pro vybranou variantu vypočten chladicí výkon.

# Annotation

Author:	Stanislav Procházka
Title:	Ball Bearing Test Rig Cooling Design
Extent:	63 pages, 35 figures, 11 tables
Academic year:	2019
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Josef Kekula, Ph.D.
Consultant:	Ing. Peter Kohút, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Design of cooling channel and calculation of bearing losses
Key words:	Cooling, bearing cooling, spindle cooling, cooling sleeve, heat transfer coefficient, pressure loss, bearing loss
Annotation:	The bachelor thesis deals with the design of the testing equipment for the purpose of monitoring the effect of bearing cooling on the size of passive resistors and their operating preload. Based on the research conducted, cooling variants are proposed. After evaluating all variants, the cooling performance is calculated for the selected variant.



# OBSAH

<b>1. ÚVOD</b>	<b>12</b>
1.1. <i>Cíl práce</i>	13
1.1.1. Zkušební zařízení:	13
<b>2. STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</b>	<b>16</b>
2.1. <i>Chlazení statoru</i>	16
2.1.1. Nicolas Correa	16
2.1.2. GMN	17
2.1.3. NTN	18
2.1.4. Kessler	19
2.1.5. Ibag	19
2.2. <i>Chlazení rotoru</i>	20
2.2.1. Fischer	21
2.2.2. NTN	22
2.3. <i>Chladicí média</i>	22
2.3.1. Voda	23
2.3.2. Deionizovaná voda	23
2.3.3. Chladicí média na bázi vody	23
2.3.4. Oleje	24
2.4. <i>Chlazení v dalších aplikacích</i>	24
2.4.1. Chlazení pro vysokorychlostní kuličkové šrouby	24
2.4.2. Chlazení ložisek v leteckém průmyslu	25
2.4.3. Experimentální studie chlazení pomocí dvojitého pláště	27
2.4.4. Heat pipe	27
2.5. <i>Shrnutí rešerše</i>	28
<b>3. VARIANTY ŘEŠENÍ</b>	<b>30</b>
3.1. <i>Chlazení pomocí chladicího kanálu přímo ve statoru</i>	31



3.2.	<i>Chlazení pomocí chladicího pláště s chladicí šroubovicí umístěnou mezi tryskami pro mazání ložisek</i>	32
3.3.	<i>Chlazení pomocí distanční trubky</i>	33
3.4.	<i>Chlazení pomocí distanční trubky s odvodem tepla z hřídele</i>	34
3.5.	<i>Shrnutí a výběr variant</i>	36
<b>4.</b>	<b>POSTUP PRO VÝPOČET CHLADÍCÍHO VÝKONU</b>	<b>37</b>
4.1.	<i>Součinitel přestupu tepla</i>	37
4.1.1.	<i>Nusseltovo číslo</i>	37
4.2.	<i>Ztráty v ložisku podle SKF</i>	40
4.3.	<i>Ztráty v ložisku podle Harrisova (Palmgrenova) modelu</i>	43
4.3.1.	<i>Viskózní složka:</i>	43
4.3.2.	<i>Valivá složka:</i>	43
4.4.	<i>Ztráty při proudění v chladicím kanálu</i>	44
4.4.1.	<i>Tlakové ztráty</i>	44
4.4.2.	<i>Místní tlakové ztráty</i>	45
4.5.	<i>Shrnutí postupu pro výpočet součinitele přestupu tepla, tlakových ztrát a ztrátového výkonu ložisek</i>	46
<b>5.</b>	<b>VYPOČÍTANÉ HODNOTY</b>	<b>47</b>
5.1.	<i>Vstupní parametry chladicích kapalin</i>	47
5.2.	<i>Součinitel přestupu tepla</i>	48
5.3.	<i>Tlakové ztráty</i>	50
5.3.1.	<i>Varianta 3</i>	50
5.3.2.	<i>Varianta 1</i>	53
5.4.	<i>Výpočet velikosti pasivních odporů ložisek</i>	55
5.5.	<i>Ztráty v ložiskách-chladicí výkon</i>	55
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAMY</b>	<b>59</b>



<i>Seznam použité literatury</i>	59
<i>Seznam obrázků</i>	61
<i>Seznam tabulek</i>	62
<i>Seznam grafů</i>	63
<i>Seznam příloh</i>	63





## PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN

Symbol	Veličina	Jednotka
$a$	Teplotní vodivost	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$b$	Šířka drážky	$[m]$
$C_s$	Statická únosnost ložiska	$[N]$
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$D$	Střední průměr šroubovice	$[m]$
$D_w$	Průměr šroubovice	$[m]$
$d$	Hydraulický průměr	$[m]$
$d_s$	Průměr těsnicí plochy	$[m]$
$F_a$	Axiální síla	$[N]$
$F_r$	Radiální síla	$[N]$
$f_t$	Faktor tření	$[-]$
$f_1$	Faktor zohledňující typ ložiska	$[-]$
$h$	Výška drážky	$[m]$
$k$	Stoupání šroubovice	$[m]$
$K_{ball}$	Konstanta pro ložiska s bodovým stykem	$[-]$
$K_{s1}$	Konstanta závislá na typu ložiska	$[-]$
$K_{s2}$	Konstanta závislá na typu těsnění	$[-]$
$K_{rs}$	Konstanta následného nezalítí stopy	$[-]$
$K_z$	Geometrická konstanta závislá na typu ložiska	$[-]$
$l$	Délka potrubí	$[m]$
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok	$[kg \cdot s^{-1}]$
$M$	Celkový třecí moment	$[N \cdot mm]$
$M_{rr}$	Moment valivého tření	$[N \cdot mm]$
$M_{sl}$	Moment smykového tření	$[N \cdot mm]$
$M_{seal}$	Třecí moment těsnění	$[N \cdot mm]$



$M_{drag}$	Třecí moment způsobený odporem brodění	$[N \cdot mm]$
$M_v$	Viskózní složka	$[N \cdot mm]$
$M_l$	Valivá složka	$[N \cdot mm]$
$Nu$	Nusseltovo číslo	$[-]$
$n$	Otáčky	$[min^{-1}]$
$P_{loss}$	Ztrátový výkon	$[W]$
$Pr$	Prandtlovo číslo	$[-]$
$\dot{Q}$	Tepelný tok	$[W]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	$[-]$
$Re_{crit}$	Kritické Reynoldsovo číslo	$[-]$
$\gamma$	Součinitel typu ložiska	$[-]$
$U$	Obvod průtočného průřezu	$[m]$
$V$	Rychlost proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
$V_m$	Proměnná jako funkce hladiny oleje	$[-]$
$w$	Střední rychlost proudění	$[m \cdot s^{-1}]$
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\beta$	Exponent závislý na typu ložiska a těsnění	$[-]$
$\zeta$	Ztrátový součinitel	$[-]$
$\eta$	Dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\lambda$	Tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\mu_{sl}$	Součinitel smykového tření	$[-]$
$\nu$	Kinematická viskozita kapaliny	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\rho$	Hustota	$[kg \cdot m^3]$
$\varphi$	Faktor laminárního proudění	$[-]$
$\phi_{rs}$	Redukční součinitel následného nezalítí stopy	$[-]$
$\phi_{ish}$	Redukční součinitel vířivého ohřevu	$[-]$
$\omega$	Úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$



# 1. ÚVOD

Požadavky na růst produktivity výroby a snižování cen výrobků se samozřejmě promítají do stavby obráběcích strojů (OS). Současně vývoj na poli moderních řezných materiálů, motivují výrobce OS ke zvyšování základních parametrů strojů, jako jsou zejména otáčky vřeten. Se vzrůstajícími otáčkami rostou však také nároky na jejich uložení, resp. použitá ložiska. Vřetena OS se nejčastěji ukládají do valivých ložisek, z nichž nejpoužívanějším typem jsou kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Tento typ ložisek přináší nejvíce benefitů pro vřetena OS. Hlavní výhody spočívají v dobré přesnosti chodu a uspokojivé tuhosti při masové produkci těchto komponent, která zajišťuje jejich dostupnost. Taková ložiska vřeten či frézovacích hlav však jako každá jiná mechanická zařízení doprovázejí mechanické ztráty, které se projevují jejich ohřevem. Právě ztrátová energie (teplo) je negativním jevem, který podstatnou měrou ovlivňuje přesnost práce OS, neboť vzniká v nejcitlivějším místě tj. ve vřetení. Tepelná dilatace tak způsobuje změnu programované dráhy nástroje.

Tento typ ložisek vyžaduje díky své nelineární charakteristice síla-deformace ke správné funkci předpětí k dosažení optimální tuhosti a přesnosti chodu. Teplo produkované ložisky působí na samotná ložiska. Teplo způsobí dilataci okolních součástí (stator, rotor), které ovlivňují předpětí ložisek a to tak, že může dojít k jejich přetížení, razantnímu snížení životnosti či v extrémním případě destrukci. Tento jev často označovaný jako tepelně indukované předpětí je tak další příčinou snah eliminovat produkci tepla v uložení vřeten.

Velmi významným faktorem ovlivňujícím množství generovaného tepla je způsob mazání ložisek, resp. množství a typ použitého maziva. V dnešní době je používáno k tomuto účelu jak pevných maziv (vazelín), tak olejů. Moderní vysokootáčková vřetena jsou velmi často mazána systémem olej-vzduch, kdy je olej unášen v malém množství kanály proudícím vzduchem a dopravován přímo do ložisek pod valivé elementy. Tato metoda mazání přináší možnost odstranění vlivu přemazání ložiska a zajištění dodávky optimálního množství maziva do ložiska. Nevýhodou je obtížné nastavení tohoto systému z hlediska velikosti dávek pro danou konstrukci a velikost ložiska. Za tímto účelem vzniká na ústavu výrobních strojů a zařízení testovací zařízení, jehož účelem je zmapovat chování ložisek při mazání systémem



olej-vzduch, tj. sledování vlivu množství a typu použitého maziva na pasivní odpory těchto ložisek.

Další možností jak tepelné účinky snížit je nasazení nuceného chlazení ložisek přímo do konstrukce vřeten. Tento prvek resp. jeho implementace do testovacího zařízení je také předmětem předkládané bakalářské práce. Sledování vlivu chlazení na množství generovaného tepla a vliv změny předpětí ložisek, tak bude dalším rozšířením možností výzkumu mazání ložisek pomocí daného testovacího zařízení. Nucené chlazení je nutno správně dimenzovat pro dostatečný odvod tepla, pro rychlý návrh je nutno stanovit potenciální chladicí výkon takového prvku.

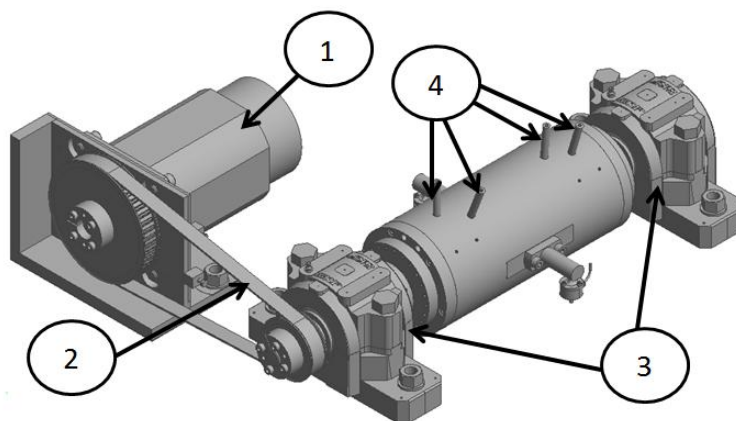
## 1.1. Cíl práce

Cílem práce je navrhnout konstrukční úpravu testovacího zařízení, za účelem sledování vlivu chlazení ložisek na velikost pasivních odporů a jejich provozní předpětí při mazání systémem olej-vzduch. V této práci je řešeno chlazení dvou párů testovaných ložisek (SKF 7212 CD P4 A). Bude vytvořeno několik variant, z kterých dle požadavků bude vybrána nejvhodnější varianta řešení.

Ložiska jsou na hřídeli namontovaná s určitým předpětím v konfiguraci do „O“ a jsou pevně předepnuta. Pokud je zkušební zařízení uvedeno do chodu, začnou se v ložiskách generovat ztráty způsobené třením, které způsobuje zahřívání. Následkem toho dochází vlivem teplotní roztažnosti k nárůstu předpětí v ložiskách, která jsou na hřídeli uložena napevno a nemají se kam posunout.

### 1.1.1. Zkušební zařízení:

Sestava zkušebního zařízení (Obr. 1) se skládá z motoru (1), který řemenem (2) pohání hřídel testovacího zařízení.

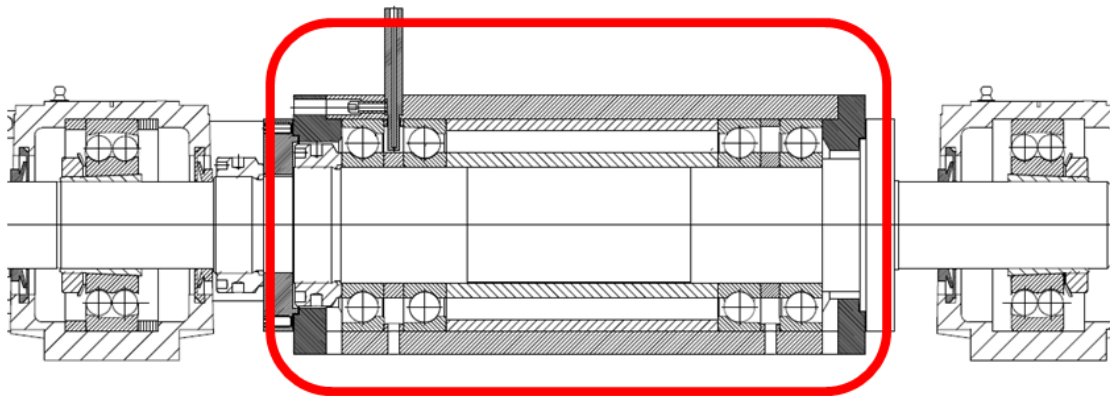


Obr. 1: Sestava zkušebního zařízení s motorem

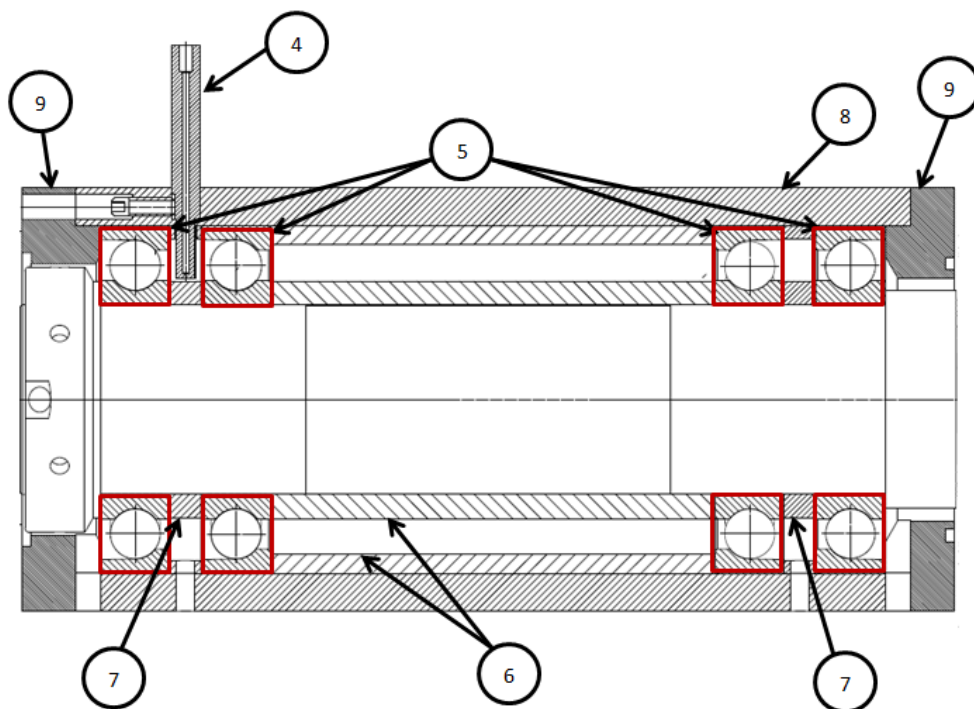


Hřídel je na obou koncích uložena v naklápěcích kuličkových ložiskách uložených v ložiskových domcích (3). Ložiskové domky jsou přišroubovány k základu, kterým je litinová upínací kostka. Na hřídeli je uložen stator s testovanými ložisky, který se může volně otáčet a je opřen ramenem o snímač síly. Takto je měřen pasivní odpor testovaných ložisek. Uvnitř statoru jsou na hřídeli umístěny 2 páry testovaných ložisek, která jsou mazána pomocí mazacích trysek. Zkušební zařízení testuje vliv přímého mazání olej-vzduch na vznik třecích ztrát v ložisku (jeho ohřev) a následný vznik tepelně indukovaného předpětí.

Na obr. 2 je znázorněn celkový řez hřídelí, včetně uložení hřídele v ložiskových domcích. Červeně zvýrazněný je stator, jehož detail je zobrazen na obr. 3.



Obr. 2: Celkový řez hřídelí



Obr. 3: Řez statorem



Uvnitř statoru (Obr. 3) jsou vidět 2 páry testovaných ložisek s kosoúhlým stykem (5), která jsou od sebe oddělena distančními trubkami (6) a distančními kroužky (7), celé zařízení je umístěno v tubusu (8). Ložiska jsou mazána pomocí mazacích trysek (4) a tubus je uzavřen pomocí víček (9).

Červeně zvýrazněná jsou testovaná ložiska, pro která bude proveden návrh chlazení. Při návrhu konstrukčních variant chlazení byla zohledněna problematika stávající konstrukce zkušebního zařízení, např. mazání ložisek, celkové rozměry, případně nutné úpravy dalších součástí. Hlavní požadavky na úpravu testovacího zařízení jsou např. zástavba v dané konstrukci s minimem změn, jednoduchá výroba a nízké výrobní náklady.



## 2. STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

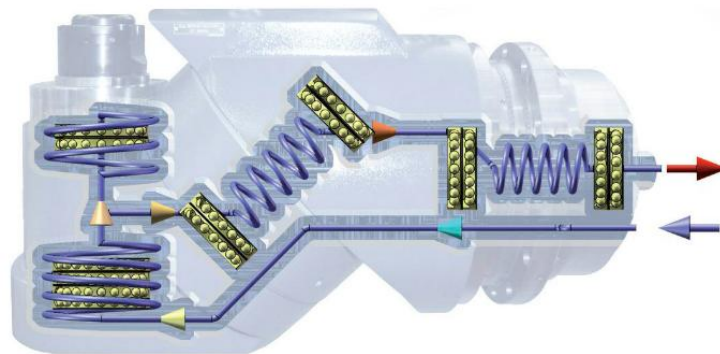
Výrobci frézovacích hlav, vřeten nebo ložisek řeší problematiku odvodu ztrátového tepla různými způsoby. Některá zařízení jsou chlazena pouze pasivně vzduchem, toto řešení se vyskytuje hlavně u zařízení, která se pohybují v nízkých otáčkách. Při vyšších otáčkách je nutné přejít k chlazení aktivnímu. Toto chlazení je uskutečněno pomocí nuceného oběhu kapaliny nebo plynu. Nucený oběh chladícího média může být realizován ve statoru nebo rotoru.

### 2.1. Chlazení statoru

Chlazení probíhá ve statorové části zařízení, při tomto způsobu chlazení se chladí hlavně ložiska a statorové části elektromotorů.

#### 2.1.1. *Nicolas Correa*

Jedním z výrobců frézovacích hlav je fa. Nicolas Correa. Některé frézovací hlavy od této firmy jsou chlazeny dle následujícího schématu obr. 4:



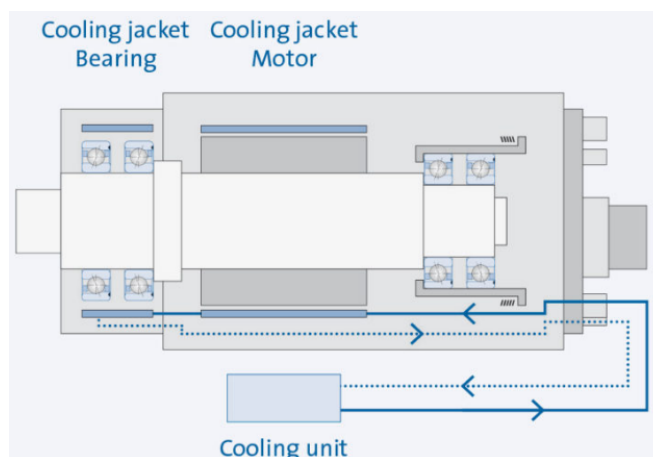
Obr. 4: Chlazení frézovací hlavy od firmy Correa [1]

Frézovací hlava je chlazena nuceným oběhem chladiva. Chladící médium proudí kanály ve statoru k ložiskům, kde chladí ložiska hřídele a vřetene, čímž minimalizuje teplotní deformaci pracovního bodu na čele nástroje (Tool Center Point). Vřetenová ložiska jsou chlazena pomocí kanálů ve statoru. Chlazení dalších hřídelí je realizováno pravděpodobně díky chlazení distančních trubek, jak je vidět na obr. 4. Ohřáté chladící médium je odváděno do chladiče mimo obráběcí stroj, odkud je po ochlazení čerpáno zpět do oběhu. Z uvedeného schématu není zřejmé, jak je přesně konstrukčně provedeno vedení chladícího média. Jedná se pravděpodobně o kanály vytvořené přímo ve skříni frézovací hlavy.



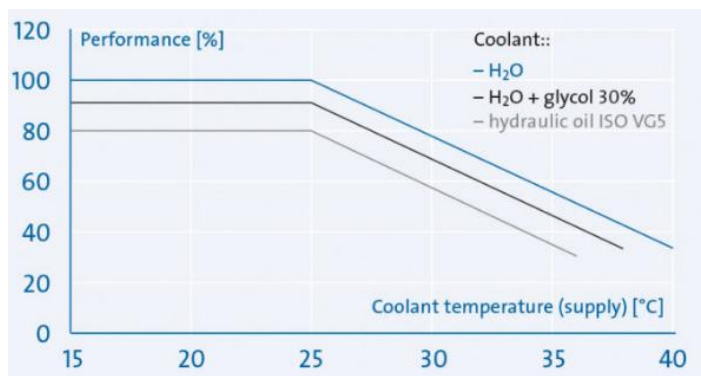
## 2.1.2. GMN

Firma GMN se zabývá chlazením elektrovřeten. Elektrovřetena jsou vybavena motory s vysokým výkonem, které mají patřičné ztráty. Proto ve většině aplikací protéká skříň vřetene kapalina. Chlazení se nachází jak v oblasti statorového vinutí elektromotoru, tak někdy i v oblasti hřídelových ložisek a zajišťuje tak teplotní stabilizaci vřetene. Je zde využito chlazení pomocí kanálů pro chladicí médium jak na ložiscích, tak na motoru. [2]



Obr. 5: Schéma chlazení elektrovřetene [2]

Výkon vřetene je závislý na teplotě chladicího média a použitým typem chladicího média. Maximální výkon vřetene je dosažen při specifické teplotě chladiva, která se pohybuje v rozmezí od 20°C do 25°C. Na obr. 5 je vidět porovnání dosahovaného okamžitého výkonu při použití tří různých chladicích médií v závislosti na vstupní teplotě. Chladicí média jsou voda, voda smíchaná s glykolem a hydraulický olej. [2]

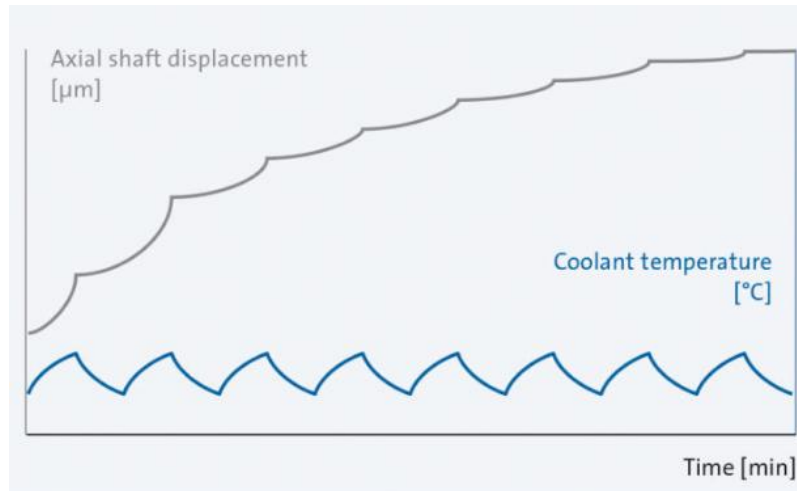


Obr. 6: Graf závislosti výkonu vřetene na teplotě a typu použitého chladicího média [2]





Teplotní stálost chladicího média snižuje osové posunutí hřídele a zlepšuje přesnost obrábění. Čím stálější je teplota vřetene, tím menší je osové posunutí viz obr. 6. [2]

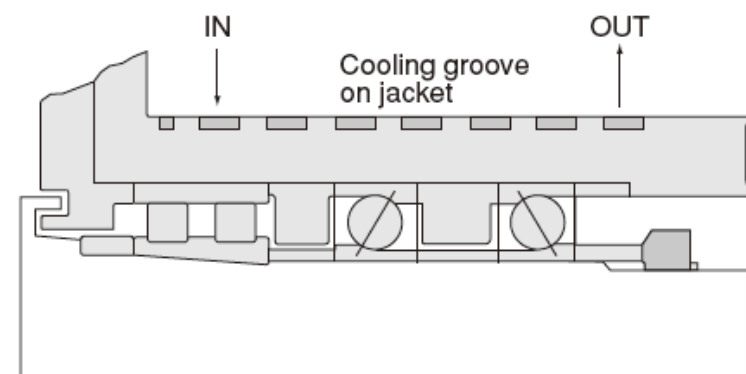


**Obr. 7: Ilustrativní graf závislosti osového posunutí TCP v čase, při použití nuceného chlazení [2]**

Z obrázku 7 je zřejmá závislost deformací na průběhu teploty chladicího média. Kolísání teploty chladicího média se přímo promítá do axiální deformace TCP, je vidět jak teplotní deformace přímo ovlivňuje přesnost obráběcího stroje.

### 2.1.3. NTN

Uložení vřetene se chladí pomocí chladicího pláště se šroubovitou drážkou, která umožňuje chladicímu médiu protékat kolem všech ložisek. Konstrukcí chladicího pláště je zabráněno tomu, aby teplo generované motorem ovlivňovalo ložisko nebo docházelo k přehřátí. Schéma chlazení je znázorněné na obr. 8. [3]



**Obr. 8: Schéma chlazení uložení ložisek pomocí chladicího pláště [3]**

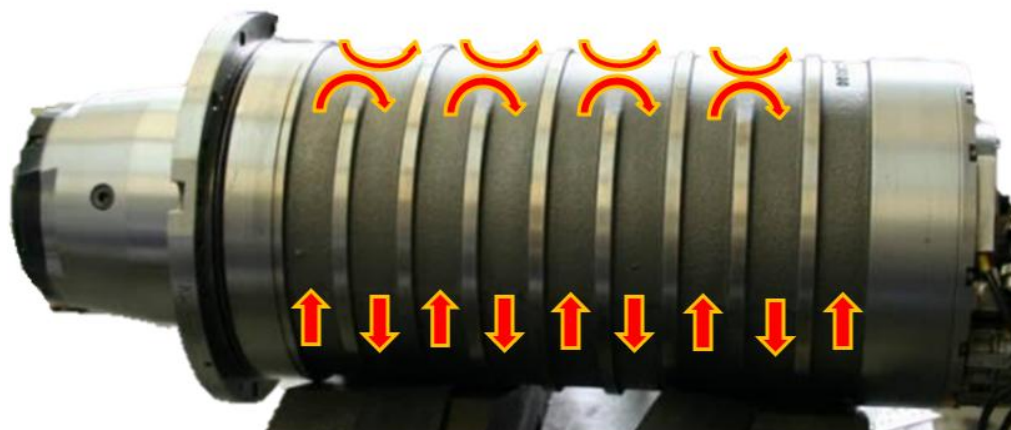


#### 2.1.4. Kessler

Elektrovřetena od firmy Kessler jsou poháněna motory s marketingovým označením Coolmotion, které dosahují vysokých otáček a točivých momentů. Jsou vybaveny speciálním způsobem chlazení, který je znázorněn na obr. 9-10. Vřeteno je chlazeno pomocí chladicího labyrintu ve statoru, kterým protéká chladicí médium. Způsob, jakým chladicí médium protéká labyrintem, je znázorněný na obr. 10.



Obr. 9: Vřeteno Kessler [14]



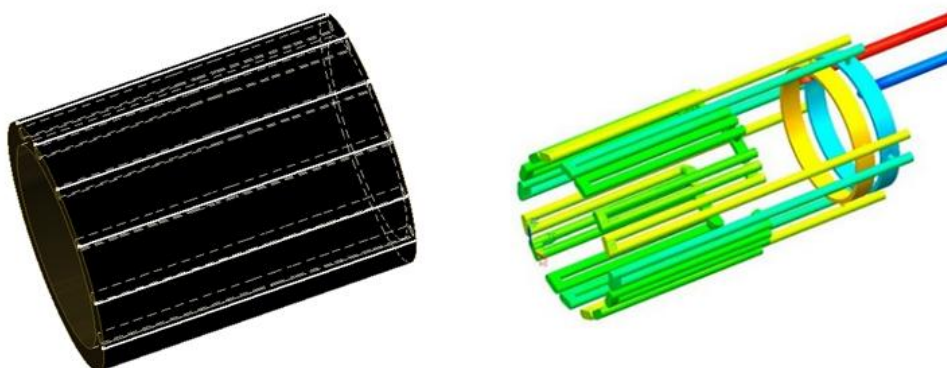
Obr. 10: Další pohled na vřeteno Kessler chlazené pomocí labyrintu

#### 2.1.5. Ibag

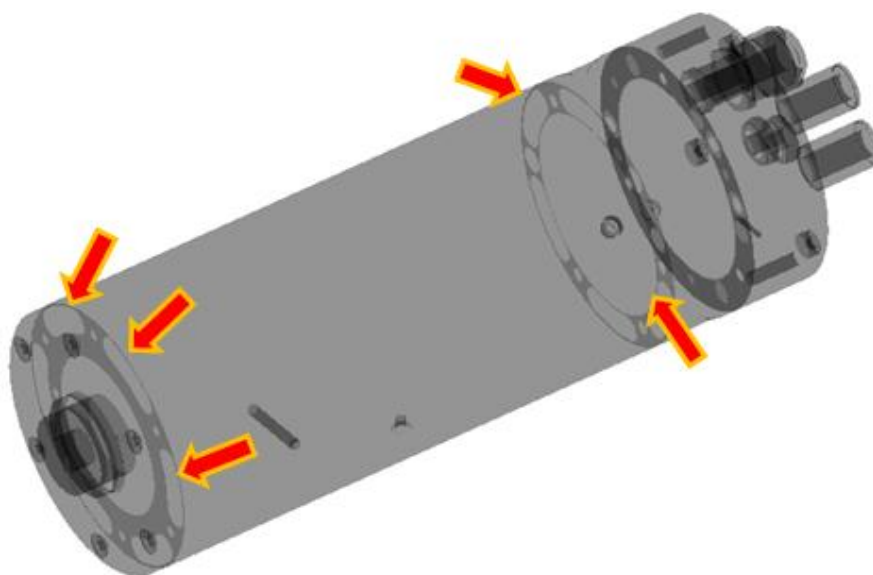
Firma Ibag vyrábí vysokorychlostní elektrovřetena, která jsou chlazena pomocí vyvrtaných otvorů ve statoru podél osy rotace. Tyto vyvrtané otvory jsou propojeny pomocí víček na začátku a konci tubusu.



Zjednodušené schéma a proudění chladicího média je znázorněno na obr. 11. Na obr. 12 je pohled na celé vřeteno Ibag i s propojením kanálu pro chlazení ve víčkách viz šipky.



Obr. 11: Chlazení vřetene od firmy Ibag se znázorněným prouděním chladicího média



Obr. 12: Vřeteno Ibag se znázorněnými otvory pro propojení kanálů [15]

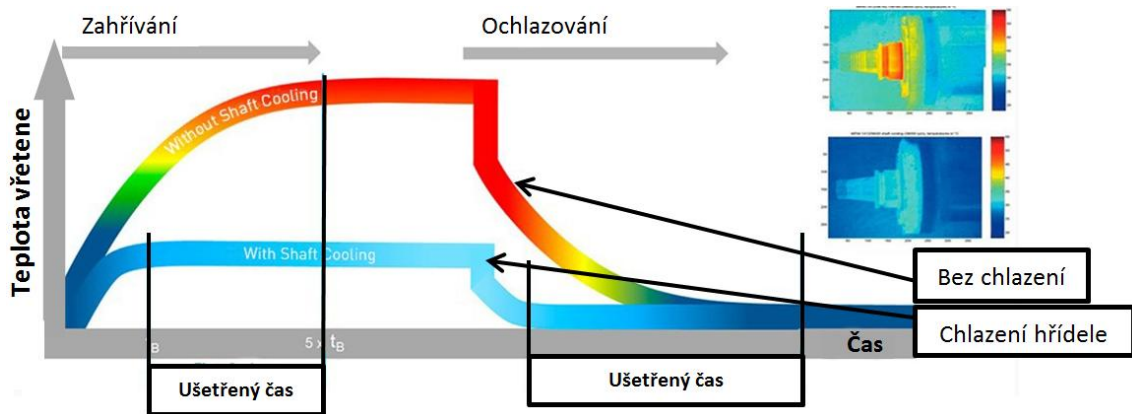
## 2.2. Chlazení rotoru

Při chlazení rotoru se jedná převážně o chlazení hřídele nebo v některých případech o chlazení vnitřních kroužků ložisek.



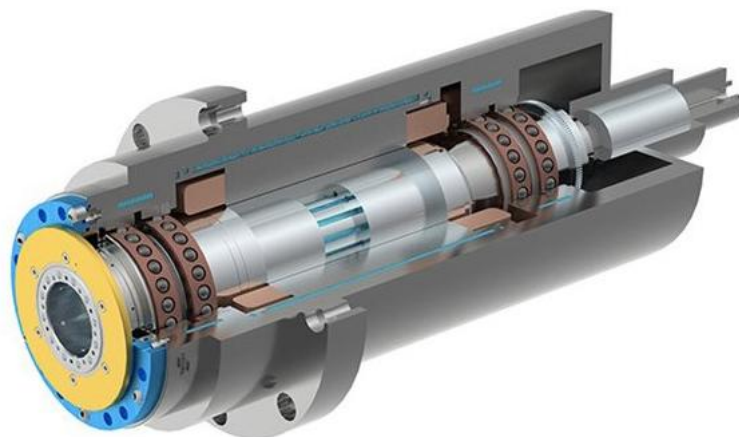
### 2.2.1. Fischer

Firma Fischer řeší problém přehřívání vřeten pomocí chlazení statoru i rotoru. Pro chlazení rotoru je použito chlazení hřídele, které přináší mnoho výhod. Mezi největší výhody patří až o 70% menší tepelná deformace TCP a až 5x kratší čas potřebný k ohřevu vřetene na pracovní teplotu. Díky tomuto způsobu chlazení snese motor vyšší zatížení, protože generované teplo je odvedeno přímo z vřetene. Výsledkem je stálá přesnost obrábění díky teplotní stabilitě vřetene. [5]



Obr. 13: Graf popisuje závislost teploty vřetene na čase [5]

Obr. 13 ukazuje, kolik času může být ušetřeno při chlazení hřídele, než dojde k dosažení stabilní pracovní teploty, která je mnohem nižší oproti teplotě bez chlazení. U grafu je uveden termosnímek, který ilustruje rozdíl teploty nástroje při použitém chlazení nebo bez něj. Teplota nástroje v uvedených případech bez chlazení dosahuje až 45°C s chlazením 25°C. [5]



Obr. 14: Vřeteno s chlazenou hřídelí [3]

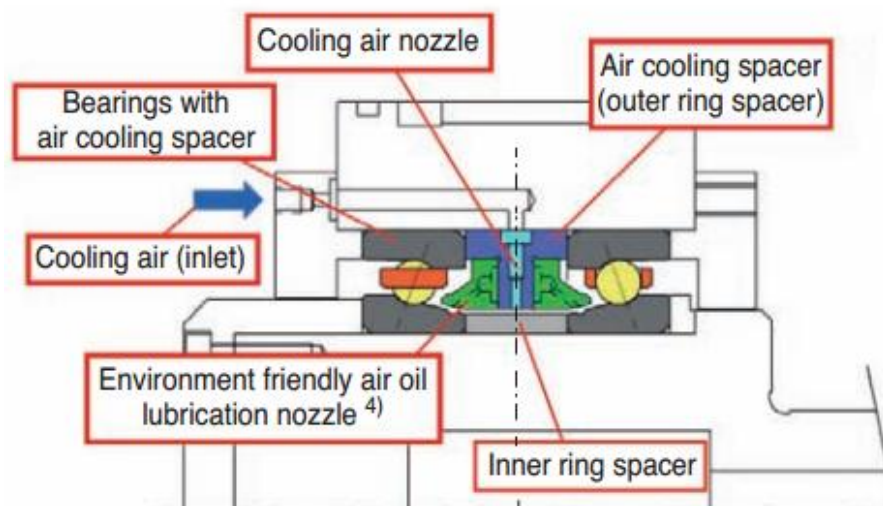


### 2.2.2. NTN

Ložiska jsou chlazena pomocí distančního kroužku, který je chlazen přívodem vzduchu. Distanční kroužek odvádí nahromaděné teplo z povrchu vnitřního kroužku ložiska. Čím vyšší je rychlost proudění vzduchu, tím vyšší je množství tepla odebíraného z povrchu vnitřního kroužku ložiska za jednotku času. S rostoucí rychlostí proudění roste chladicí výkon. Na obr. 15 je znázorněn tento způsob chlazení a následně na obr. 16 je řez tímto zařízením. [4]



Obr. 15: Chlazení pomocí distančního kroužku [4]



Obr. 16: Schéma chlazení ložisek pomocí chlazení distančního kroužku [4]

### 2.3. Chladicí média

Při výběru chladicího média je nutné stanovit požadavky, které jsou od daného chladicího média vyžadovány. Mezi tyto požadavky patří tepelná vodivost, nízká viskozita, nízká toxicita, tepelná stabilita a korozní odolnost. Na základě těchto kritérií jsou dnes nejčastěji používány tyto kapaliny:



### **2.3.1. Voda**

Je nejpoužívanější a jedno z nejlepších chladících médií. Má vysokou tepelnou kapacitu a výbornou tepelnou vodivost. Velkou výhodou je, že je snadno dostupná a levná. Proto je doporučeno používat vodu, s co nejmenším množstvím nečistot. Schopnost vody korodovat kovy se může značně lišit v závislosti na jejím chemickém složení. [6]

### **2.3.2. Deionizovaná voda**

Deionizační proces odstraňuje škodlivé minerály, soli a jiné nečistoty, které mohou způsobit korozi. Ve srovnání s obyčejnou vodou má deionizovaná voda vyšší odpor. Deionizovaná voda má pH přibližně 7, ale pokud jí vystavíme působení vzduchu, reaguje s oxidem uhličitým a to způsobí, že získá kyselé pH cca 5. Proto při používání deionizované vody je potřeba speciální potrubí s vysokou čistotou. Při použití v chladících deskách nebo tepelných výměnících se doporučují trubky z nerezové oceli. [5]

### **2.3.3. Chladící média na bázi vody**

#### ***Roztoky glykolu a vody***

Rozlišujeme 2 typy roztoků, které se nejčastěji používají při chlazení. Je to roztok ethylenglykolu a vody (EGW) a propylenglykolu a vody (PGW). Ethylenglykol má požadované tepelné vlastnosti jako je vysoký bod varu, nízká teplota tuhnutí, stabilita v širokém rozmezí teplot a vysoká tepelná vodivost. Ačkoliv má EGW lepší fyzikální vlastnosti než PGW, PGW se používá častěji a to zejména v oblastech, kde by mohl být problém s toxicitou EGW. PGW se obecně používá nejčastěji v potravinářských aplikacích a uzavřených prostorách. [6]

Se zvyšující se koncentrací glykolu v roztoku klesá tepelná vodivost. Proto je nejlepší použít co nejnižší možnou koncentraci glykolu, která je nezbytně nutná pro splnění požadavků na ochranu proti korozi a mrazu. Doporučená minimální koncentrace je 25-30 %. U recirkulačních chladičů bude roztok 30% etylenglykolu vést pouze k 3 % poklesu tepelné účinnosti oproti samotné vodě, ale bude poskytovat ochranu proti korozi a i ochranu proti zamrznutí. [6]



## **MOTOREX COOL-X**

Speciální typ chladicí kapaliny od firmy Fischer. Jedná se o chladicí médium s korozní odolností, které je určené pro vysoce výkonná vřetena. Je to velice efektivní chladivo, které má tepelnou kapacitu  $4,1 \text{ J/K}\cdot\text{kg}$  což je téměř stejná hodnota jako má voda ( $4,187 \text{ J/K}\cdot\text{kg}$ ), hustota této kapaliny je  $1,010 \text{ g/ml}$  při teplotě  $20^\circ\text{C}$ .

COOL-X je chladicí médium, které je připraveno k okamžitému použití bez nutnosti přidávat vodu. Průměrná provozní teplota je  $20\text{-}25^\circ\text{C}$ . Pokud je kapalina používaná za optimálních provozních podmínek s pravidelnou údržbou, je životnost chladicí kapaliny deklarovaná výrobcem až 2 roky. [7]

### **2.3.4. Oleje**

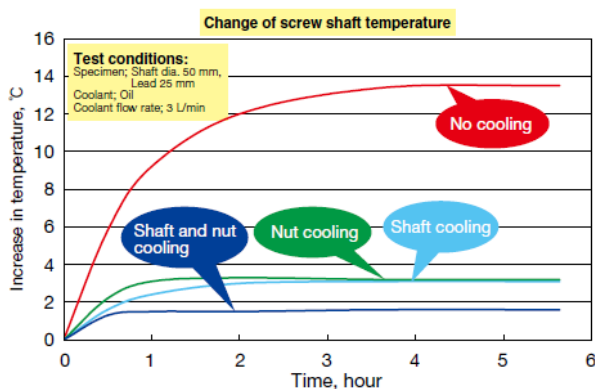
Mají menší měrnou tepelnou kapacitu než voda, ale používají se v případech, kdy použití vody není výhodné. Oleje mají vyšší teplotu varu, proto se mohou používat i v aplikacích, kde je nutné chladit z vyšších teplot. Oleje často plní i mazací a ochrannou funkci. Pro chlazení se většinou používají oleje s nízkou viskozitou, pouze ve výjimečných případech oleje vysokoviskózní.

## **2.4. Chlazení v dalších aplikacích**

Chlazení pomocí nuceného oběhu chladiva můžeme nalézt i v dalších částech obráběcích strojů nebo v jiných oborech týkajících se stavby strojů.

### **2.4.1. Chlazení pro vysokorychlostní kuličkové šrouby**

Kuličkové šrouby provádějí krátké pohyby v mnoha cyklech. Můžeme chladit matici nebo hřídel kuličkového šroubu. Pro dosažení největšího chladicího účinku je výhodné použít obě metody chlazení. [8]



Obr. 17: Graf znázorňující závislost teploty na čase [8]



Na obr. 17 je znázorněna teplota kuličkového šroubu v závislosti na čase. Je patrné, že teplota je největší bez chlazení a nejlepší chladicí efekt je dosažen při chlazení matice i hřídele.

Na obr. 18 jsou chlazené matice pro kuličkové šrouby. Matice nahoře je matice jednoduchá s jedním chladícím oběhem a matice dole, je matice dělená, která je chlazená 2 oddělenými chladícími oběhy. [8]



Obr. 18: Rozdíl mezi jednoduchou a dělenou maticí [8]

#### ***2.4.2. Chlazení ložisek v leteckém průmyslu***

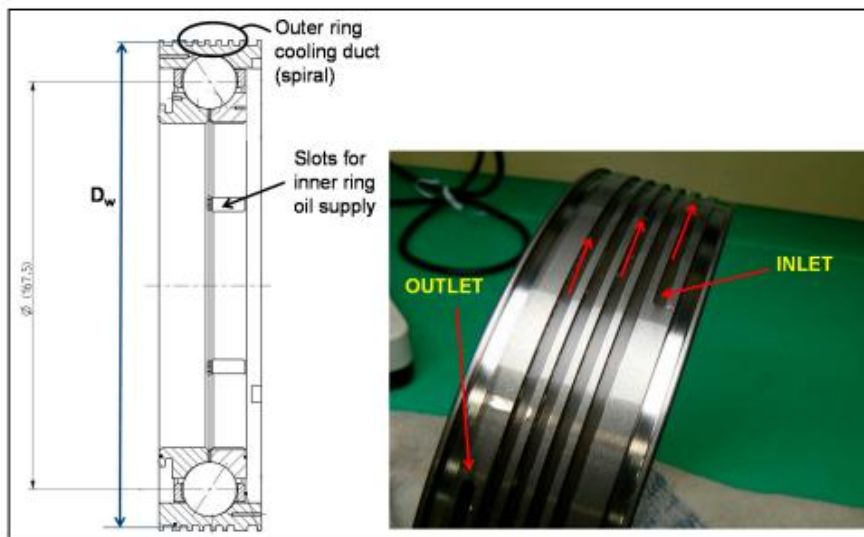
Ložiska v leteckých motorech musí odolávat velmi náročným provozním podmínkám (velké zahřívání). Ložiska těchto motorů musí být mazána a chlazená nepřetržitým proudem oleje. Olej je do ložiska dopravován dírami ve vnitřním kroužku. Na své cestě ložiskem olej odvádí teplo z vnitřního kroužku, rotujících elementů a ložiskové klece dokud nedosáhne vnějšího kroužku.

Olej se v ložisku ohřeje dříve, než dosáhne vnějšího kroužku. Proto je jeho schopnost chladit vnější kroužek značně snížena. Zvýšení průtoku oleje ložiskem, ale není dostatečné řešení pro tento způsob chlazení, protože přebytečné množství oleje by způsobilo velké ztráty v ložisku. Zvýšily by se i nároky na čištění, chlazení a skladování oleje. Proto byla vyvinuta metoda aktivního chlazení vnějšího kroužku. Tato metoda byla převzata z chlazení elektronických zařízení. Šroubovitá drážka ve vnějším kroužku chladí ložisko s olejem nebo vzduchem jako chladícím médiem.



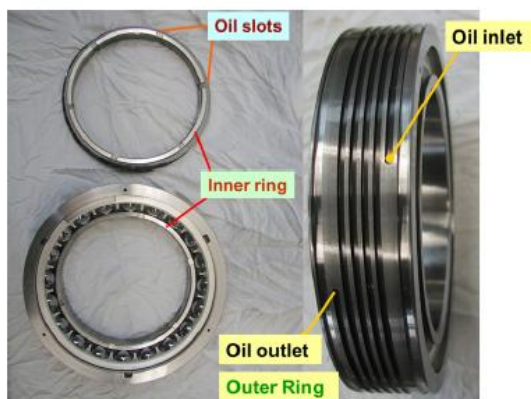


Obr. 19 zobrazuje schéma ložiska s chlazením vnějšího kroužku. Na pravé straně je chladicí kanál s přítokem a odtokem. Vnější kroužek je pak podobně jako u chladicího pláště chlazen proudícím chladicím médiem v drážkách ložiska. [9]

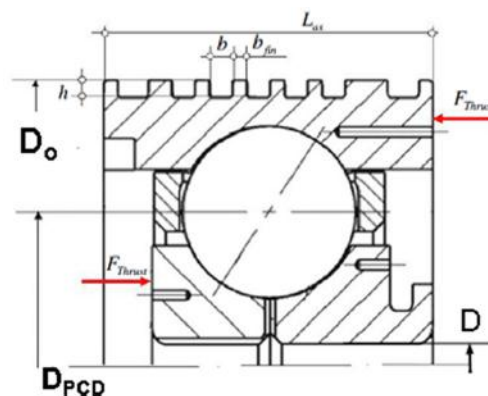


Obr. 19: Schéma chlazení ložiska pomocí aktivního chlazení vnějšího kroužku [9]

Na obr. 21 je vidět schéma chladicí drážky vnějšího kroužku a na obr. 20 je pohled na celé ložisko a na vnitřní kroužek, v kterém jsou vidět vstupy pro přívod oleje, který odtud proudí do celého ložiska. [9]



Obr. 20: Popis částí ložiska [9]

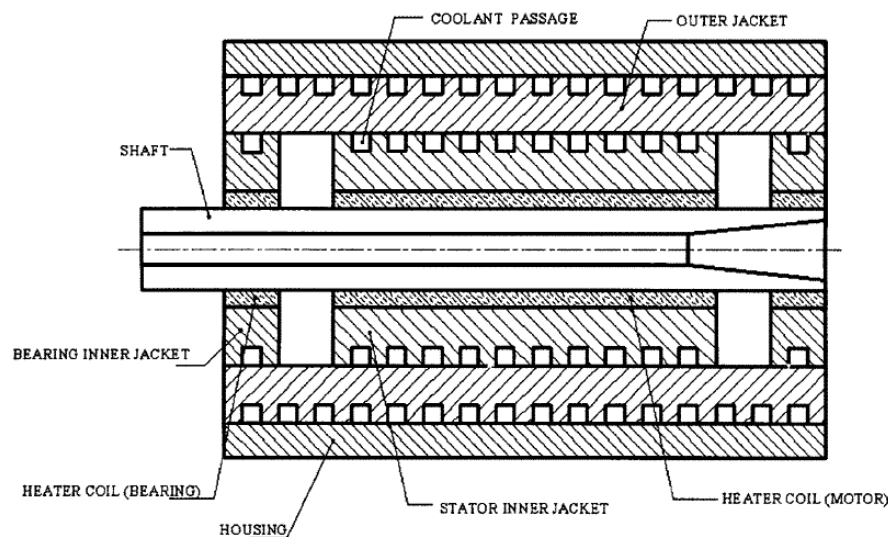


Obr. 21: Parametry ložiska [9]



### 2.4.3. Experimentální studie chlazení pomocí dvojitého chladicího pláště

Teplota většiny vřeten je regulována nucenou cirkulací kapaliny, aby se minimalizovala tepelná deformace. Chladicí kapalina může způsobit nerovnoměrné rozložení teploty ve vřetenu, proto přidáme druhý chladicí plášť. Pomocí druhého chladicího pláště zajistíme tepelnou stálost vřetene. Při zahřívání dojde k přenosu tepla mezi chladicí kapalinou v primárním plášti a kapalinou v sekundárním plášti. Schéma chlazení s dvojitým chladicím pláštěm je znázorněno na obr. 22. Teplota tekutiny, která protéká sekundárním pláštěm, je blízko okolní teplotě. Sekundární plášť je přidán tak, aby zajišťoval tepelnou stálost vřetene po celé jeho délce. [10]



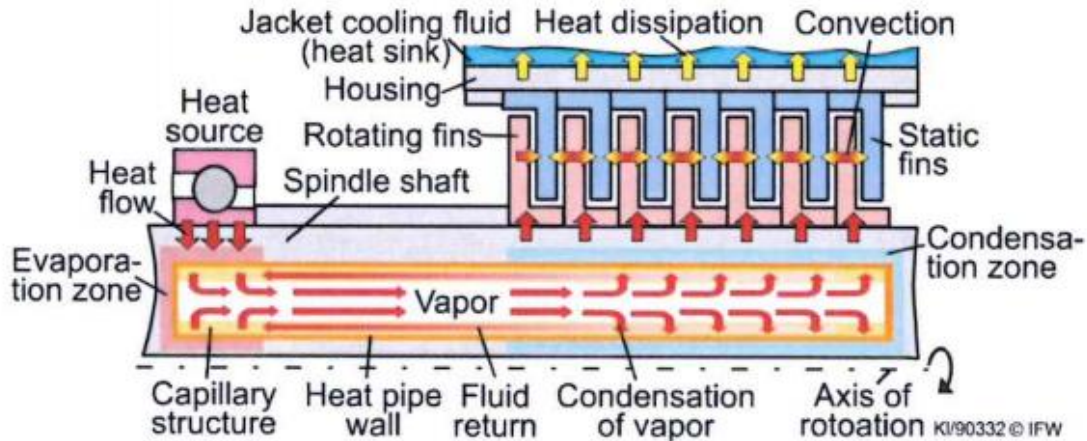
Obr. 22: Schéma chlazení pomocí dvojitého chladicího pláště [10]

### 2.4.4. Heat pipe

Heat pipe se používá pro odvádění tepla z jednoho místa na místo jiné, pomocí pracovního média. Jedná se o uzavřený kovový válec, který je naplněn kapalinou. Jeden konec válce je zasazený v místě zdroje tepla a druhý konec do chladiče. Poté co teplota dosáhne nastavené hodnoty, začne se pracovní kapalina vypařovat a proudit do druhé části válce, která je umístěna v chladiči. Jakmile se kapalina dostane do místa chladiče, začne kondenzovat. Páry se dají do pohybu v důsledku rozdílného tlaku v místě výparníku (vyšší tlak) a tlaku v místě kondenzátoru (nižší tlak). Kondenzát se dostane zpět ke zdroji tepla pomocí kapilárních sil v porézním materiálu. Tento materiál v podstatě „nasává“ kondenzát zpět ke zdroji tepla.



Díky tomu může heat pipe pracovat i v poloze, kdy je výparník umístěný nad kondenzátorem. V současné době dokážou porézní materiály nasát kondenzát až z hloubky 40 centimetrů zpět k výparníku. [17]





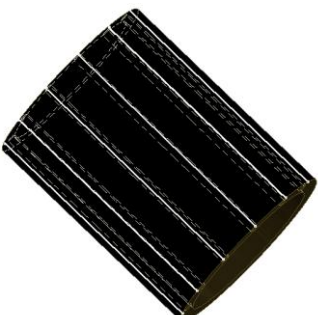
Obr. 23: Chlazení vřetene pomocí Heat pipe [16]

Na obr. 23 je znázorněno schéma chlazení vřetene pomocí heat pipe. V levé části hřídele, ve vypařovací oblasti („evaporation zone“) dochází k vypařování chladicího média. Pára se díky rozdílnému tlaku pohybuje doprava do kondenzační oblasti („condensation zone“), kde je chlazena. Chlazená je pomocí žebířek. Rotující žebra jsou umístěna na hřídeli a chlazená jsou statickými žebry ze statoru. Zde kapalina kondenzuje a pomocí kapilárních sil ve výstelce kanálu (porézní materiál) se vrací zpět k tepelně ovlivněnému místu. [16]

## 2.5. Shrnutí rešerše

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že chlazení rotoru není vhodné pro zadané testovací zařízení. Chlazení hřídele není možné z důvodu konstrukčního uspořádání aplikovat na testovací zařízení. Vhodný způsob chlazení je chlazení ve statorové části. Výhodou této varianty je možnost úpravy součástí, které už jsou umístěny v testovacím zařízení, jako je například stator nebo distanční trubka. Další pozitivní vlastností tohoto způsobu chlazení je jednodušší konstrukce a výroba oproti chlazení rotoru a snadný přívod chladicího média do oběhu. Typická řešení zástavby chlazení ve statorové části jsou shrnuta v tabulce 1. U každého provedení je nutné zajistit co nejdokonalejší těsnění, aby chladicí médium neunikalo do testovacího zařízení.



		
1.	2.	3.

**Tabulka 1: Varianty chlazení ve statorové části**

Varianta 1 je chlazení pomocí chladicího kanálu ve tvaru šroubovice, výroba této varianty je jednoduchá, protože drážku je možné vytvořit např. soustružením. Varianta 2 je chlazení pomocí chladicího labyrintu. Výroba této varianty je složitější než výroba varianty 1, protože se po soustružení musí ještě frézovat. Varianta 3 je chlazení pomocí vyvrtaných otvorů ve statoru. Tato varianta je na výrobu nejsložitější, protože je nutné vyvrtat dlouhé otvory do statoru a jednotlivé kanály propojit pomocí drážek ve víku uzavírajícím tubus.



### 3. VARIANTY ŘEŠENÍ

Jak bylo uvedeno v úvodní části práce, cílem je konstrukční návrh chlazení testovaných ložisek v testovacím zařízení. Z dané konstrukční zástavby vyplývají určitá omezení a požadavky na podobu navrhovaného zařízení.

Omezující prvky:

- Otvory ve stávající konstrukci musejí být zachovány
- Omezení vnějších rozměrů vyplývajících ze stávající konstrukce – vnější průměr statoru nad stolem
- Omezení vnitřních rozměrů – vnější průměr ložisek musí být zachován

Požadavky na konstrukci:

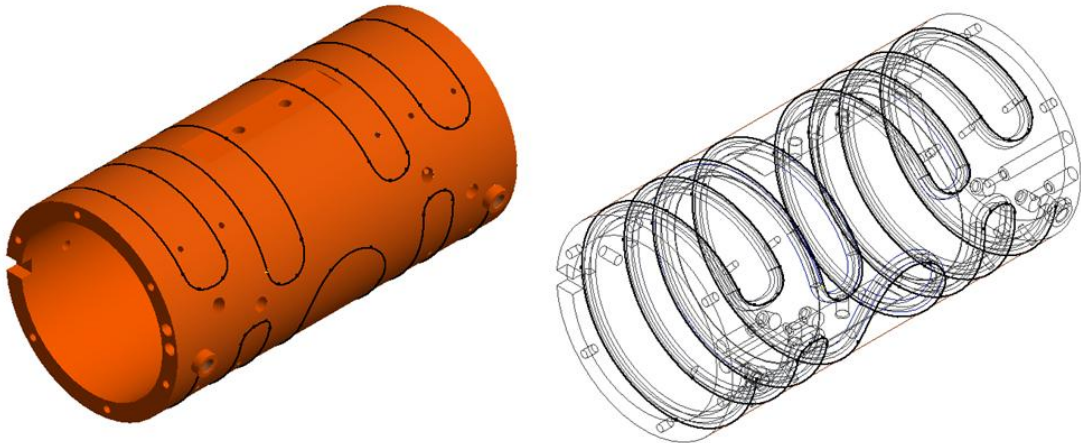
- Zachování všech stávajících funkcí zkušebního zařízení – měření pasivního momentu, teplot a mazání ložisek metodou olej – vzduch
- Jednoduchá výroba, montáž, nízké náklady na výrobu
- Minimální počet změn ve stávající konstrukci, ideálně řešit záměnou stávajícího dílu
- Úpravy by neměly zvyšovat hmotnost celého zařízení
- Připojovací prvky pro hadice – vedení chladicího média musí být připojeno dokonalým těsněním a musí být zajištěno, že tah hadic nebude ovlivňovat měření pasivních odporů

Na základě rešerše, bylo navrženo několik variant. Konstrukčně vycházejí z obecně používaných přístupů v konstrukci chlazení ložisek vřeten.



### 3.1. Chlazení pomocí chladicího kanálu přímo ve statoru

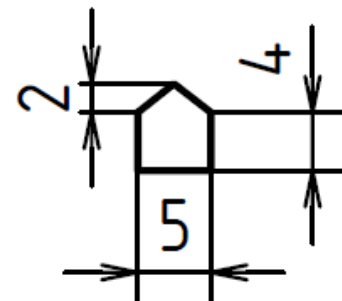
Ložiska zkušebního zařízení jsou chlazena pomocí chladicího kanálu umístěného přímo ve statoru. Tato varianta je vyráběna metodou, která se nazývá WAAM (Wire and Arc Additive Manufacture).



Obr. 25: Chlazení pomocí chladicího kanálu ve statoru

WAAM je forma 3D tisku využívající kov a jeho postupné navařování. Dílec se následně obrobí. Z tohoto důvodu byl zvolen průřez kanálu znázorněný na obr. 24. Jelikož pomocí navařování nelze chladicí kanál uzavřít dokonale plochou vrstvou, musí být kanál uzavřen touto „stříškou“.

Chladicí kanál je v této variantě dlouhý 3,28 m a při jeho návrhu bylo zohledněno mnoho faktorů. Mezi tyto faktory patří délka děr pro šrouby, díry pro umístění chlazení ložisek a díry pro kontrolu ložisek. Těmto prvkům je nutno se chladicím kanálem vyhnout. S ohledem na tloušťku statoru je nutné umístit chladicí kanál doprostřed. Tvar kanálu a celkový pohled na tuto variantu řešení je na obr. 25

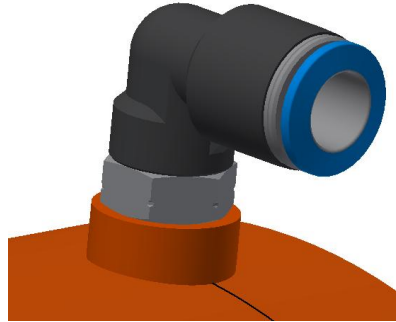


Obr. 24: Průřez chladicího kanálu

Při návrhu řešení je nutné spočítat celkové ztráty v chladicím kanálu. Tyto ztráty určí minimální tlak, který je potřebný k tomu, aby chladicí médium daným chladicím kanálem při požadovaném objemovém průtoku protéklo. Tlakové ztráty jsou spočítány ze vzorců (26-29).



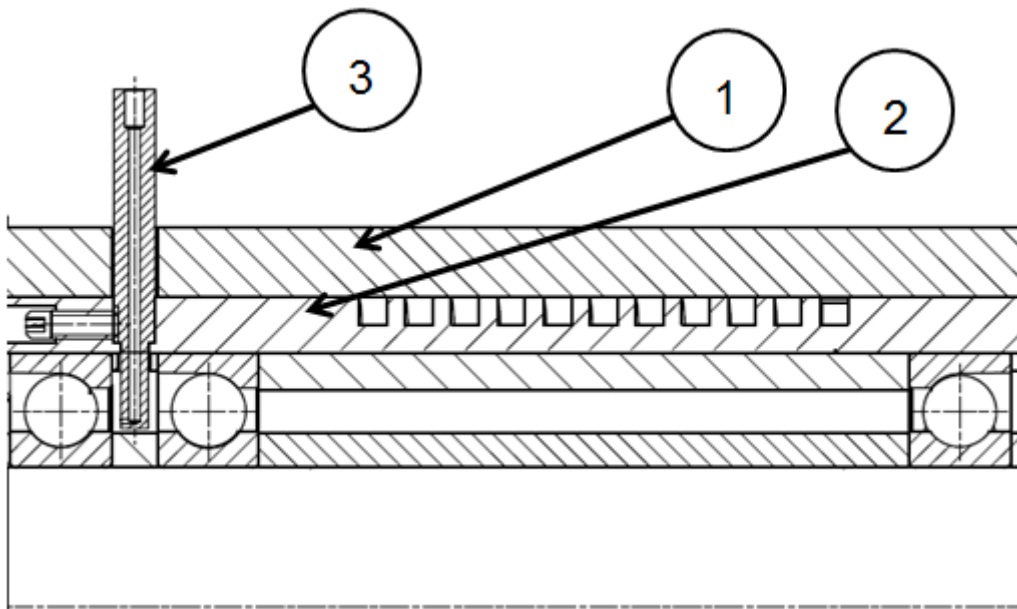
Chladicí médium je do chladicího kanálu dopravováno pomocí šroubení s nástrčnou koncovkou Festo viz obr. 26. Šroubení je připojeno k chladicímu kanálu pomocí kuželového závitu z důvodu těsnění. Při připojování chladicího média do oběhu, je nutné použít měkké hadice, z důvodu eliminace chyb při snímání pasivních momentů.



Obr. 26: Šroubení s nástrčnou koncovkou Festo

### 3.2. Chlazení pomocí chladicího pláště s chladicí šroubovicí umístěnou mezi tryskami pro mazání ložisek

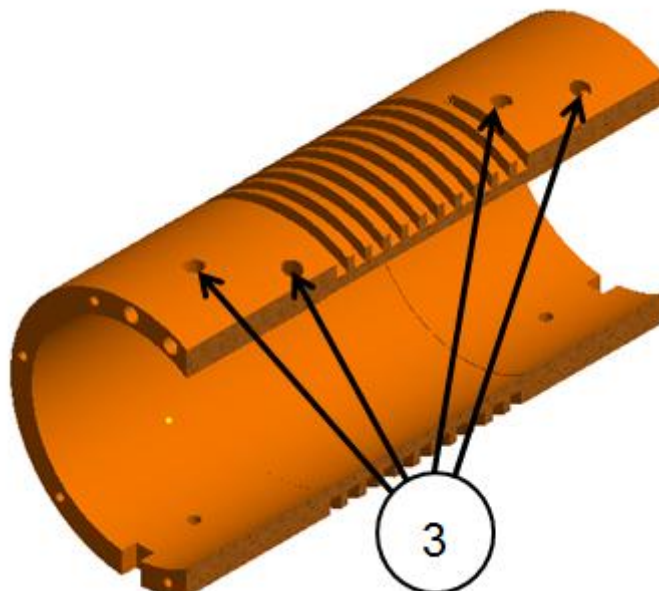
Drážka tvořící kanál pro chlazení je vytvořena v původním statoru (2) a je překryta opláštěním. Řez tímto zařízením je znázorněn na obr. 27. Na tomto obrázku je vidět opláštění (1) a mazací tryska (3).



Obr. 27: Chlazení pomocí chladicího pláště mezi tryskami



Na obr. 28 je detailní pohled na chladicí plášť. Je zde znázorněné rozložení chladicí drážky a umístění otvorů pro mazací trysky (3), kterým se vyhýbáme. Rozměry drážky a šroubovice jsou shrnuty v tabulce 2.



Obr. 28: Detailní pohled na chladicí plášť

Rozměry šroubovice viz Tabulka 2

Rozměr	Označení	Velikost [m]
Průměr	Dw	0,13
Stoupání šroubovice	k	0,01
Šířka drážky	b	0,004
Výška drážky	a	0,005

Tabulka 2: Rozměry šroubovice pro variantu 2

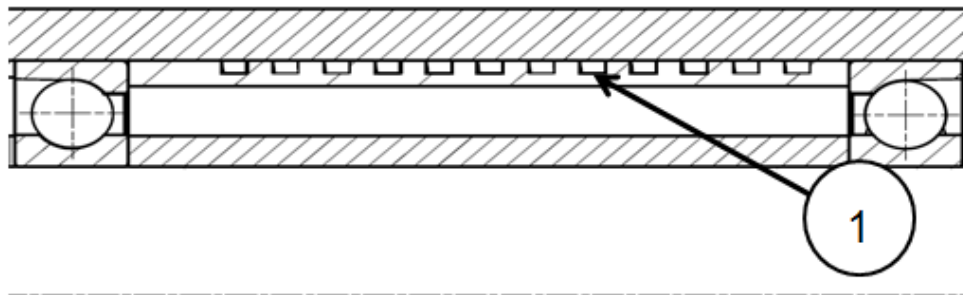
### 3.3. Chlazení pomocí distanční trubky

Chlazení probíhá pomocí chladicí šroubovice umístěné v distanční trubce (1). Tato varianta má velkou výhodu v tom, že je zde chlazena přímo součást, která vyvolává nárůst předpětí v ložiskách a nemění se zástavba testovacího zařízení. To je zvláště výhodné v zařízeních, kde se uvažuje o dodatečné realizaci chlazení, neboť se téměř nemění stávající konstrukce.





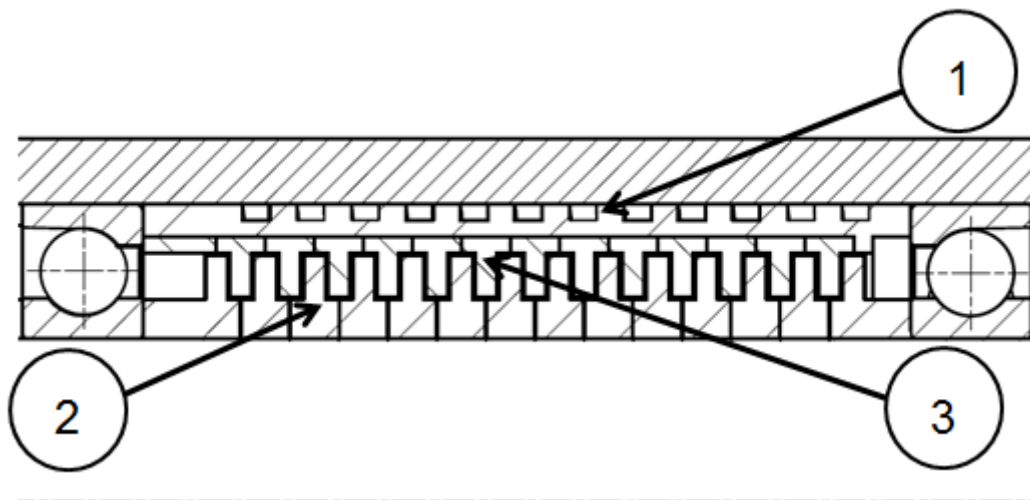
U této varianty je nutné dobře zatěsnit distanční trubku pomocí těsnících kroužků, aby bylo zabráněno úniku chladicího média do ložiska.



Obr. 29: Chlazení pomocí distanční trubky

### 3.4. Chlazení pomocí distanční trubky s odvodem tepla z hřídele

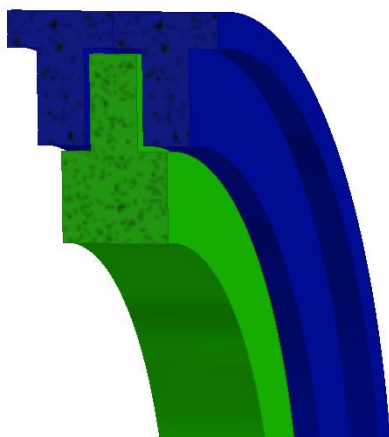
Tato varianta chlazení vychází z varianty chlazení distanční trubky, ale navíc zde dochází k odvodu tepla z hřídele pomocí žeber. Rotační žebra (2) na hřídeli odvádějí teplo a jsou chlazena statickými žebry (3) umístěnými ve statoru. Jak je vidět na obr. 30 je nutné tato žebra s ohledem na montáž vyrábět samostatně a při montáži je nutné vkládat střídavě statické a rotační žebro. U těchto žeber je kladen velký nárok na přesnost, protože na hřídeli slouží i jako distanční trubka. Obr. 30.



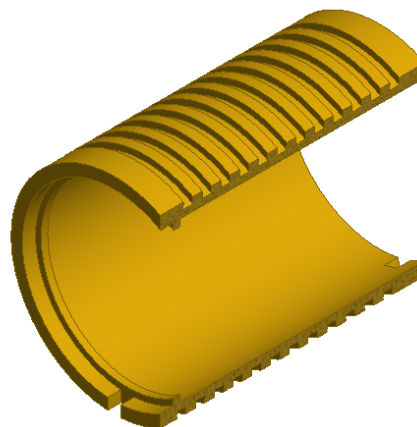
Obr. 30: Chlazení pomocí distanční trubky s odvodem tepla z hřídele



Na obr. 32 je vidět detailní pohled na žebra. Vzdálenost mezi plochami těchto žeber je 0,2 mm. Na vedlejším obrázku obr. 31 je znázorněna distanční trubka s chladícím kanálem.



Obr. 32: Detailní pohled na žebra



Obr. 31: Detail distanční trubky

Rozměry šroubovice viz Tabulka 3

Rozměr	Označení	Velikost [m]
Průměr	Dw	0,1
Stoupání šroubovice	k	0,01
Šířka drážky	b	0,004
Výška drážky	a	0,005

Tabulka 3: Rozměry šroubovice pro variantu 3-4



### 3.5. Shrnutí a výběr variant

Vyhodnocení pozitivních a negativních vlastností jednotlivých variant je shrnuto v tabulce 4. Vyhodnocení probíhalo na základě kritérií. Nejvýznamnější kritéria: rozsah zásahů do stávající konstrukce a náročnost výroby.

Varianta	Klady	Zápory
1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• chladicí kanál uvnitř statoru</li> <li>• chladicí kanál navržen tak, aby chladil každé ložisko i součásti způsobující předpětí</li> <li>• neměníme vnější rozměry</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• náročná výroba</li> </ul>
2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá výroba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zvětšení vnějších rozměrů</li> <li>• nárůst hmotnosti</li> </ul>
3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá výroba</li> <li>• chlazení přímo součásti vyvolávající předpětí</li> <li>• neměníme rozměry testovacího zařízení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• riziko úniku chladiva do ložisek</li> </ul>
4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá výroba</li> <li>• chlazení přímo součásti vyvolávající předpětí</li> <li>• neměníme rozměry testovacího zařízení</li> <li>• odvod tepla z hřídele</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• riziko úniku chladiva do ložisek</li> <li>• náročná výroba žeber a jejich montáž</li> </ul>

**Tabulka 4: Porovnání variant řešení**

Po porovnání navrhovaných variant vychází nejlépe varianta č. 1 chlazení pomocí chladicího kanálu ve statoru. Pokud není k dispozici technologie WAAM vychází nejlépe varianta č. 3 chlazení pomocí distanční trubky. Pro tyto dvě varianty bude proveden výpočet chladicího výkonu.



## 4. POSTUP PRO VÝPOČET CHLADÍČÍHO VÝKONU

Úkolem je stanovit chladící výkon navržené konstrukční varianty pomocí výpočtu. Provést exaktní výpočet odvodu tepla z dané geometrie vyžaduje provést simulaci za pomoci numerických metod (MKP, CFD) a přesahuje tak svým objemem a náročností rámec bakalářské práce. Pro kvantifikaci odebrané tepelné energie z prostoru chladícího kanálu poslouží stanovení součinitele přestupu tepla, který bude reprezentovat chladící výkon vybrané varianty.

Energie dodávaná do systému je reprezentována ztrátami v ložiscích. Výpočet ztrát ložisek bude proveden pro vybrané otáčkové hladiny a bude sloužit k určení potřebného chladícího výkonu resp. posouzení vybrané varianty.

Vstupními parametry výpočtu bude geometrie kanálu (velikost průřezu a délka), objemový průtok, typ chladícího média a jeho nejdůležitější fyzikální vlastnosti (měrná tepelná kapacita, hustota, kinematická viskozita a tepelná vodivost). Vlastnosti chladícího média budou uvažovány jako teplotně závislé pro postihnutí změny součinitele přestupu tepla v závislosti na změně teploty chladícího média.

Pro vybranou variantu budou spočteny tlakové ztráty v chladícím kanále, které určí minimální hodnotu tlaku, který je potřebný pro dosažení požadovaného hmotnostního toku.

### 4.1. Součinitel přestupu tepla

Pro určení hodnoty součinitele přestupu tepla je nutné stanovit hodnotu Nusseltova čísla, hydraulický průměr a tepelnou vodivost. Tyto veličiny byly použity v následujícím vzorci.

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

#### 4.1.1. Nusseltovo číslo

Pro výpočet Nusseltova čísla je nutné nejprve určit, o jaký typ proudění se v chladícím kanále jedná a následně Nusseltovo číslo spočítat ze vztahů (2,3,4,5).



### **Laminární proudění**

Laminární proudění nastane, pokud je hodnota Reynoldsova čísla menší nebo rovna hodnotě kritického Reynoldsova čísla ( $Re \leq Re_{crit}$ ). Je to způsob proudění viskózní kapaliny, při kterém jsou dráhy pohybu jednotlivých částic kapaliny navzájem rovnoběžné. Částice se pohybují v rovnoběžných vrstvách, bez vzájemného mísení. [11]

Pro výpočet Nusseltova čísla byl využit následující Schmidtův vztah. Rozptyl výsledků při použití tohoto vztahu může být  $\pm 15\%$ .

$$Nu = 3,66 + 0,08 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,9}\right) Re^x \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,14} \quad (2)$$

$$\text{Kde} \quad x = 0,5 + 0,2903 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,194} \quad (3)$$

Prandtlovo číslo  $Pr$  je vyhodnoceno při průměrné teplotě chladícího média a  $Pr_w$  je Prandtlovo číslo vyhodnocené při teplotě stěny kanálu. V našem případě je uvažován korekční faktor  $\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,14} = 1$

### **Přechodová oblast**

K proudění v přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním prouděním dojde, pokud je Reynoldsovo číslo větší než jeho kritická hodnota a menší než  $2,2 \cdot 10^4$ . ( $Re_{crit} < Re \leq 2,2 \cdot 10^4$ ). Nusseltovo číslo v přechodové oblasti se spočítá dle následujícího vzorce. Pro výpočet je nutné stanovit Nusseltovo číslo, jak pro laminární tak pro turbulentní proudění.

$$Nu = y \cdot Nu_{lam}(Re_{crit}) + (1 - y) \cdot Nu_{tur}(Re = 2,2 \cdot 10^4) \quad (4)$$

$$\text{Kde} \quad y = \frac{2,2 \cdot 10^4 - Re}{2,2 \cdot 10^4 - Re_{crit}} \quad (5)$$

### **Turbulentní proudění**

Turbulentní proudění nastává, pokud je hodnota Reynoldsova čísla větší než  $2,2 \cdot 10^4$ . ( $Re > 2,2 \cdot 10^4$ ) Je to způsob pohybu kapaliny, při kterém jednotlivé částice kapaliny přecházejí mezi různými vrstvami kapaliny a dochází k promíchávání těchto vrstev. Částice vykonávají jak posuvný pohyb, tak i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. [11]



Pro výpočet Nusseltova čísla při turbulentním proudění byl použit Schmidtův vztah pro turbulentní proudění s rozptylem výsledků  $\pm 15\%$ .

$$Nu = \frac{0,125 \cdot \xi \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{0,125 \cdot \xi} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,14} \quad (6)$$

Faktor tření při turbulentním proudění v šroubovitém kanálu je dán vztahem uvedeným níže.

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,27} \quad (7)$$

Korekční faktor je dán vztahem  $\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,27}$ , kde  $\eta$  je dynamická viskozita při průměrné teplotě chladicího média a  $\eta_w$  je dynamická viskozita při teplotě stěny. V našem případě je korekční faktor uvažován  $\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,27} = 1$

### **Reynoldsovo číslo**

Je vypočítáno dle následujícího vztahu, kde  $w$  je rychlost proudění,  $d$  hydraulický průměr a  $\nu$  kinematická viskozita:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (8)$$

### **Kritické Reynoldsovo číslo**

V důsledku zakřivení chladicího kanálu dochází ke vzniku odstředivých sil, které způsobí vznik sekundárního toku. Výhodou, oproti přímému kanálu je zvýšený přenos tepla mezi kapalinou a stěnou. Nevýhodou je, že se zvyšuje hodnota tlakových ztrát. Navíc přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním se pohybuje ve vyšších hodnotách Reynoldsova čísla a roste v závislosti na poměru zakřivení  $d/D$  (hydraulický průměr/střední průměr zakřivení). Proto je Reynoldsovo číslo upraveno z původní hodnoty 2300 následujícím vztahem:

$$Re_{crit} = 2300 \cdot \left(1 + 8,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,45}\right) \quad (9)$$

### **Hydraulický průměr $d$**

Je definován poměrem čtyřnásobku vnitřního průřezu daného profilu (v našem případě obdélník) a jeho omočeného obvodu.

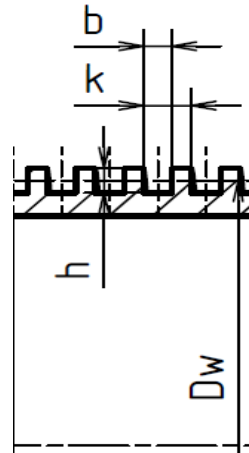
$$d = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h} \quad (10)$$



### ***Střední průměr zakřivení $D$***

$$D = D_w \cdot \left(1 + \left(\frac{k}{\pi \cdot D_w}\right)^2\right) \quad (11)$$

Znatelné rozdíly mezi  $D$  a  $D_w$  jsou pouze pro silně zakřivené šroubovice a velké rozteče. Mnoho autorů nerozlišuje rozdíl mezi  $D$  a  $D_w$ . Pro většinu praktických případů je rozdíl zanedbatelný, protože  $k$  je mnohem menší než  $D_w$ . [11]



**Obr. 33: Rozměry drážky**

### ***Prandtlovo číslo***

Je podobnostní číslo, které určuje, jaký způsob přenosu tepla převládá v dané látce (konvektivní nebo konduktivní přenos tepla). Je definováno jako poměr kinematické viskozity  $\nu$  a teplotní vodivosti  $a$ .

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (12)$$

## **4.2. Ztráty v ložisku podle SKF**

Ztrátový výkon ložisek představuje energii dodávanou do systému. Výpočet byl proveden pro ložiska SKF 7212 CD P4A zatížená lehkým předpětím. Proměnou hodnotou při výpočtu byly uvažovány otáčky ložiska. Výpočet byl proveden dle [12] podle následujících vztahů.

### ***Ztrátový výkon***

Pro určení ztrátového výkonu ložiska je nutné stanovit otáčky ložiska a třecí moment ložiska.

$$P_{loss} = 1,05 \cdot 10^{-4} M_t \cdot n \quad (13)$$



### ***Celkový třecí moment***

Pro určení třecího momentu ve valivém ložisku, musí být počítáno se čtyřmi zdroji tření. Třecí moment způsobený odporem brodění ( $M_{drag}$ ), třecí moment těsnění ( $M_{seal}$ ), moment smykového tření ( $M_{sl}$ ) a moment valivého tření ( $M_{rr}$ ), který je přenásoben redukčním součinitelem vířivého ohřevu ( $\phi_{ish}$ ) a redukčním součinitelem následného nezalítí stopy ( $\phi_{rs}$ ). [12]

$$M_t = \phi_{ish} \cdot \phi_{rs} \cdot M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (14)$$

### ***Moment valivého tření***

Pro výpočet použijeme vztah:

$$M_{rr} = G_{rr} \cdot (v \cdot n)^{0,6} \quad (15)$$

$G_{rr}$  ... proměnná, která závisí na typu ložiska, středním průměru ložiska a zatížení

$n$  ... otáčky

$v$  ... kinematická viskozita maziva při provozní teplotě

### ***Moment smykového tření***

Pro výpočet použijeme vztah:

$$M_{rr} = G_{sl} \cdot \mu_{sl} \quad (16)$$

$G_{sl}$  ... proměnná, která závisí na typu ložiska, středním průměru ložiska a zatížení

$\mu_{sl}$  ... součinitel smykového tření

Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem	
$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} (F_r + F_g + R_2 F_a)^{0,54}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} ((F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3})$
$F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$F_g = S_3 d_m^4 n^2$

**Tabulka 5: Vztahy pro výpočet proměnných pro ložiska s kosoúhlým stykem [12]**

Tabulka 5 udává vzorce, podle kterých vypočítáme hodnoty proměnných  $G_{rr}$  a  $G_{sl}$ . [12]





### ***Třecí moment těsnění***

Těsnění ložisek může v krajních případech způsobit ztráty, které jsou větší než ztráty v ložisku. Pokud má ložisko těsnění po obou stranách, spočítá se třecí moment dle následujícího vztahu: [12]

$$M_{seal} = K_{s1} \cdot d_s^\beta + K_{s2} \quad (17)$$

$K_{s1}$  ... konstanta závislá na typu ložiska

$K_{s2}$  ... konstanta závislá na typu těsnění

$d_s$  ... průměr těsnící plochy

$\beta$  ... exponent závislý na typu ložiska a těsnění

### ***Redukční součinitel vířivého ohřevu***

I když je v ložisku dostatek maziva, nepronikne všechno mazivo mezi stykové plochy. Na tvorbu mazivového filmu se spotřebuje jen malé množství maziva. Díky tomu je část maziva, která je blízko vstupu do stykové plochy, vytlačena a mazivo začne proudit opačným směrem. Toto zpětné proudění vyvolá v mazivu tření, které způsobí zvýšení teploty a důsledkem toho se sníží viskozita maziva. [12]

$$\phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \cdot 10^{-9} (n \cdot d_m)^{1,28} \nu^{0,64}} \quad (18)$$

### ***Redukční součinitel následného nezalítí stopy***

Při mazání olej-vzduch, mazání vstřikovaným olejem, mazání nízkou hladinou oleje v olejové lázni a při mazání plastickým mazivem může dojít k vytlačování maziva z oběžných drah. Vlivem otáček ložiska a vysoké viskozity nemá mazivo na okrajích místa styku dostatečný čas, pro vrácení se na oběžnou dráhu. Tento jev se nazývá "následné nezalítí stopy" a způsobuje zmenšení tloušťky mazivového filmu a zmenšuje složku valivého tření. [12]

$$\phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs} \cdot \nu \cdot n \cdot (d+D) \sqrt{\frac{K_z}{2 \cdot (D-d)}}}} \quad (19)$$

$e$  ... základ přirozeného logaritmu

$K_{rs}$  ... konstanta následného nezalítí stopy

$K_z$  ... geometrická konstanta závislá na typu ložiska



### ***Odpor brodění***

Během mazání olejovou lázní je ložisko ponořeno pouze částečně, popř. v některých zvláštních případech je ponořeno zcela. Velikost nádrže s olejem, spolu s výškou hladiny oleje mají zásadní vliv na hodnotu třecího momentu ložiska. [12]

$$M_{drag} = V_m \cdot K_{ball} \cdot d_m^5 \cdot n^2 \quad (20)$$

$V_m$  ... proměnná jako funkce hladiny oleje

$K_{ball}$  ... konstanta pro ložiska s bodovým stykem

### **4.3. Ztráty v ložisku podle Harrisova (Palmgrenova) modelu**

Model slouží k určení celkového třecího momentu v ložisku. Výsledný třecí moment se určí součtem viskózní a valivé složky:

$$M_T = M_v + M_l \quad (21)$$

#### ***4.3.1. Viskózní složka:***

Je hlavní složkou třecího momentu ložiska. Mění se v závislosti na typu mazání (v našem případě mazání olej-vzduch), použitém mazivu, otáčkách ložiska a středním průměru ložiska. Výpočet byl proveden podle [18] pomocí následujících vztahů.

$$M_v = 4501 \cdot f \cdot \nu \cdot \omega^{2/3} \cdot d_m^3 \quad (22)$$

$f_0$  ... součinitel závislý na typu mazání

$\nu$  ... kinematická viskozita

$\omega$  ... úhlová rychlost

$d_m$  ... střední průměr ložiska

#### ***4.3.2. Valivá složka:***

Je vyvolána vnějšími silami působícími na ložisko.

$$M_l = f_1 \cdot F_\beta \cdot d_m \quad (23)$$

$f_1$  ... faktor zohledňující typ ložiska a jeho zatížení:

$$f_1 = z \cdot \left(\frac{F_S}{C_S}\right)^y \quad (24)$$

$z$  ... součinitel závislý na typu ložiska

$F_S$  ... ekvivalentní zatížení ložiska:



$$F_S = X_S \cdot F_R + Y_S \cdot F_A \quad (25)$$

$C_S$ ... statická únosnost ložiska

$y$ ...součinitel typu ložiska

$F_\beta$  ... zohledňuje směr a velikost zatížení  $F_\beta = F_A$

#### 4.4.Ztráty při proudění v chladícím kanálu

Pro určení minimální hodnoty tlaku v kanálu byly uvažovány jako vstupní veličiny objemový průtok, délka a tvar chladícího kanálu. Tato hodnota se počítá z toho důvodu, abychom věděli jaký minimální tlak, je potřebný k proudění chladícího média kanálem při požadovaném hmotnostním toku. Výpočet byl proveden podle [11], pomocí následujících vztahů.

##### 4.4.1. Tlakové ztráty

Tlakovou ztrátu pro laminární a turbulentní proudění lze spočítat z následujících vztahů:

$$\Delta p = \zeta \frac{l_{ch} \rho w^2}{2d} \quad (26)$$

$\zeta$  ... ztrátový součinitel

*Laminární proudění:*

$$\zeta_{lam} = \varphi \frac{64}{Re} \left[ 1 + 0,033 \left( \lg \left\{ \sqrt{\frac{d}{D}} \right\} \right)^2 \right] \quad (27)$$

Kde  $\varphi$  je faktor laminárního proudění v obdélníkovém průřezu

*Turbulentní proudění:*

$$\zeta_{tur} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \left[ 1 + 0,095 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,5} Re^{0,25} \right] \quad (28)$$

$l_{ch}$ ... délka kanálu

$$l_{ch} = \sqrt{(\pi D_w)^2 + k^2} \quad (29)$$

$k$ ... stoupání šroubovice



#### **4.4.2. Místní tlakové ztráty**

Pro variantu 1 je nutné počítat také s místními ztrátami, které představují náhlou změnu směru proudění. [13]

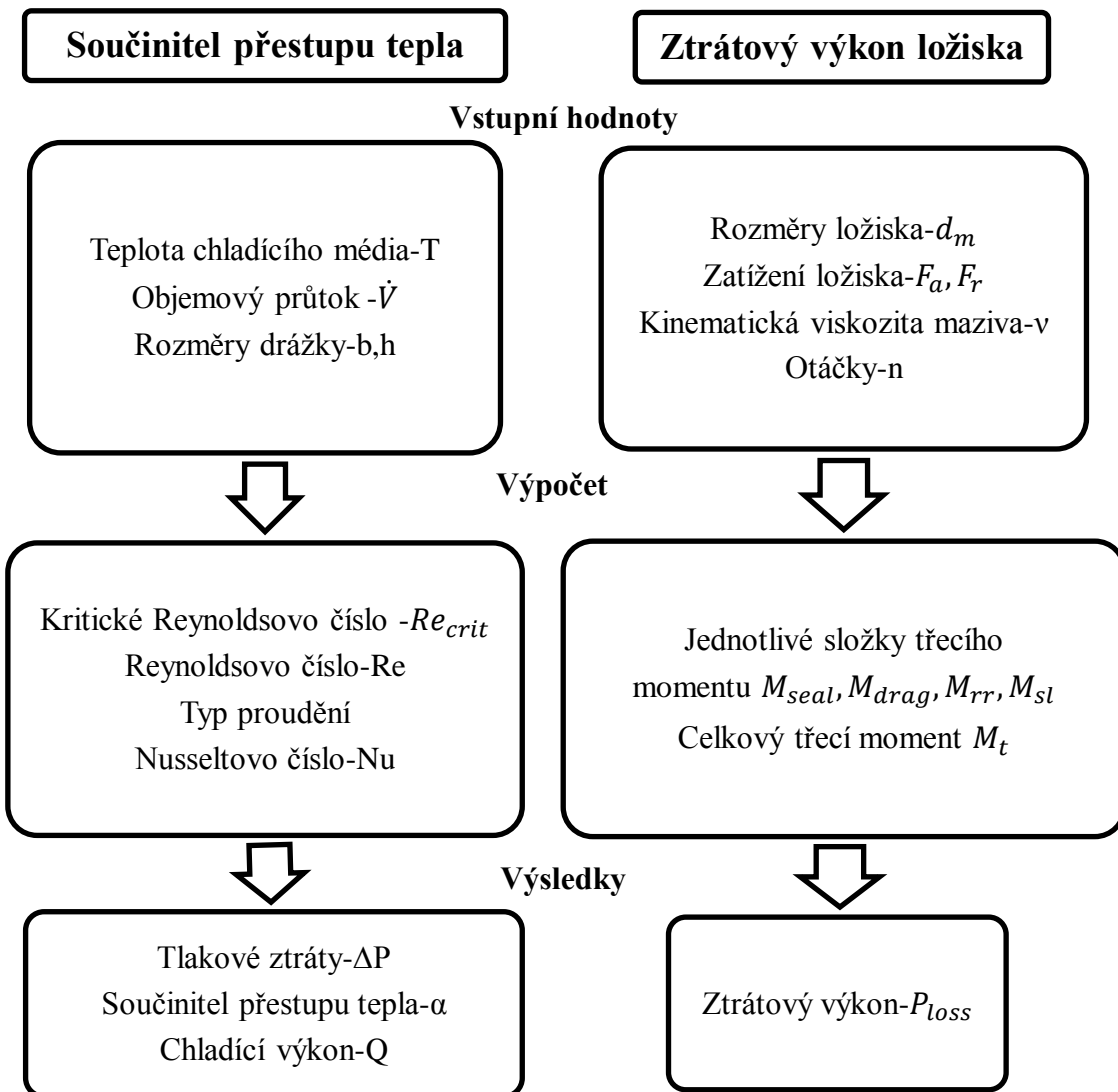
$$\Delta p_m = \zeta_m \rho \frac{w^2}{2} \quad (30)$$

$\zeta_m$  ... ztrátový součinitel místních ztrát



#### 4.5. Shrnutí postupu pro výpočet součinitele přestupu tepla, tlakových ztrát a ztrátového výkonu ložisek

Na obr. 34 je znázorněn postup pro výpočet. Ze vstupních hodnot byly pomocí výše uvedených vztahů vypočítány tlakové ztráty, chladicí výkon a ztrátový výkon ložiska. Ztrátový výkon ložiska byl porovnán s chladicím výkonem vybrané konstrukční varianty. Pokud je chladicí výkon větší než výkon ztrátový tak vybraná varianta ložiska uchladí.



Obr. 34: Postup výpočtu



## 5. VYPOČÍTANÉ HODNOTY

Po dosazení jednotlivých vstupních veličin do vztahů, byly výsledky shrnuty do tabulek a vyneseny do grafů.

### 5.1. Vstupní parametry chladících kapalin

Jako hlavní vstupní parametry byly uvažovány objemový průtok a teplota chladícího média. Se změnou teploty média se mění i další veličiny, které ovlivňují výpočet. Tyto veličiny jsou hustota, kinematičká viskozita, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Součinitel přestupu tepla byl spočítán pro 4 různá chladící média. Chladící média, která byla použita, jsou voda, 30% roztok etylenglykolu ve vodě a dva typy olejů. Olej ISO VG68 a ISO VG5. Pro chladící média na bázi vody bylo počítáno s objemovým průtokem (5-15) l/min. Pro výpočet s oleji bylo počítáno s objemovým průtokem (1-6) l/min z důvodu nižší doporučené rychlosti proudění v kanálu. Vlastnosti těchto chladících médií při teplotě 20°C jsou zobrazeny v tabulce 6.

T= 20 [°C]	Jednotka	Voda	Roztok	ISO VG68	ISO VG5
Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	4182	3761	1870	1917
Tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,598	0,481	0,132	0,266
Hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$	998,2	1046	880	832,03
Kinematičká viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}] \cdot 10^{-6}$	1,0035	2,08	223	7,37

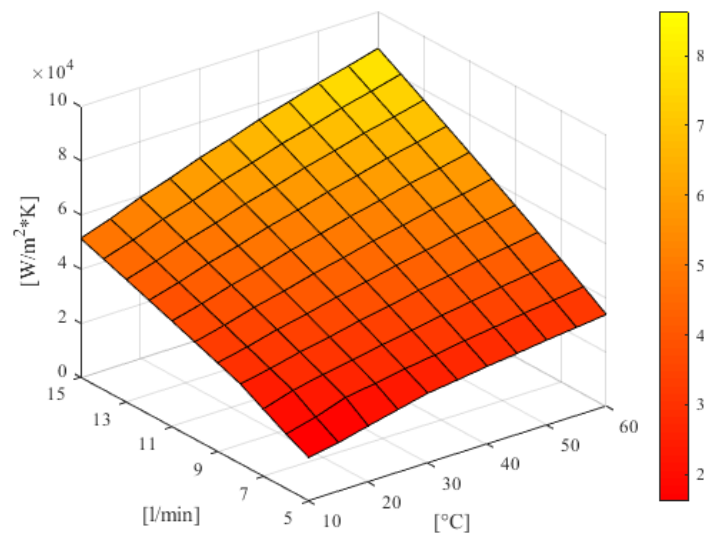
Tabulka 6: Porovnání chladících kapalin

Z tabulky 6 je vidět, že voda má větší měrnou tepelnou kapacitu než ostatní chladící média. Proto budeme-li chtít, dosáhnout roztokem stejných hodnot jakých dosahuje voda, musí být zvýšen objemový průtok kapaliny nebo sníženo procentuální zastoupení ethylenglykolu v roztoku. Doporučená minimální koncentrace je 25-30%. Oleje se kvůli své vysoké viskozitě hodnotám vody nemůžou přiblížit. Přesto se oleje používají v řadě aplikací, kde chladící média na bázi vody nemůžou být použita.

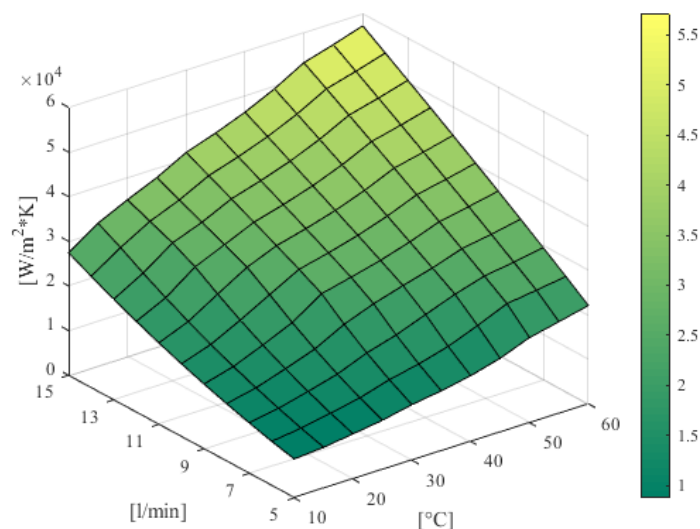


## 5.2. Součinitel přestupu tepla

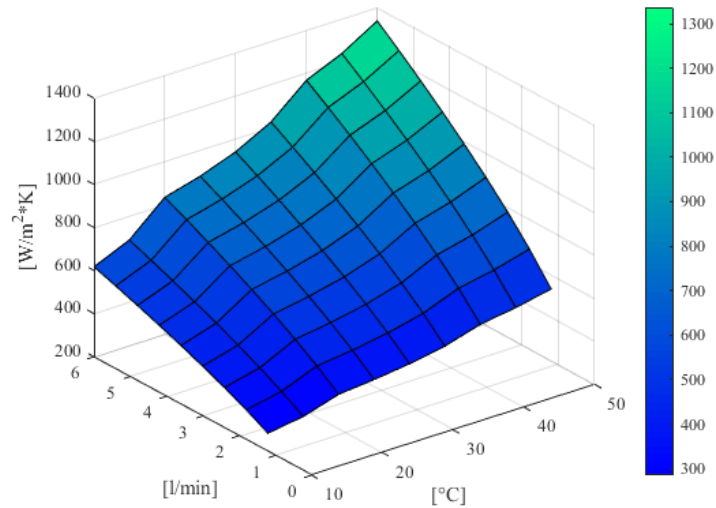
Pro výpočet součinitele přestupu tepla byly použity vzorce (1-12). Výpočet byl proveden pro interval objemových průtoků pro chladicí média na bázi vody (5-15) l/min a pro oleje (1-6) l/min při teplotě chladicího média (10-50) °C. Oleje jsou počítány s menšími hodnotami objemových průtoků, protože jejich doporučené rychlosti proudění se pohybují v rozmezí (1-2) m/s. Součinitel přestupu tepla byl vypočítán pro variantu 3. Součinitel přestupu tepla pro variantu 1 nelze analyticky určit z důvodu složitého tvaru kanálu, nicméně není očekávána výrazná odlišnost od varianty 3.



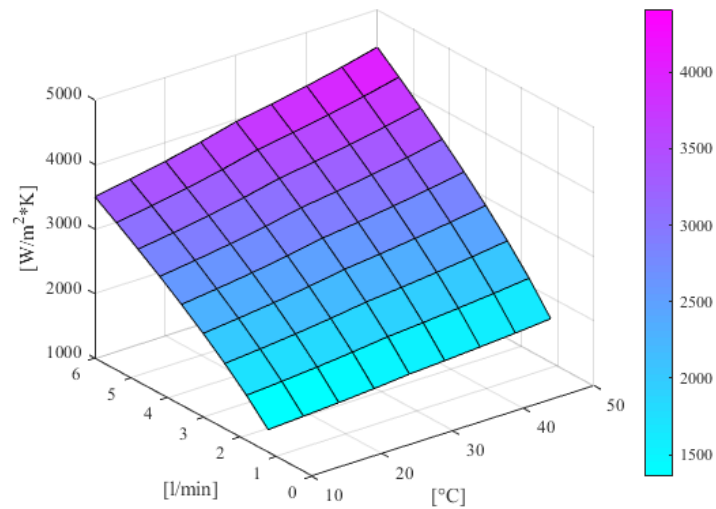
Graf 1: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro vodu



Graf 2: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro roztok



**Graf 3: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG68**



**Graf 4: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG5**

Z grafů je patrné, že voda a roztok ethylenglykolu na bázi vody, mají vyšší součinitel přestupu tepla než oleje. Hlavním důvodem tohoto rozdílu je, že chladicí média na bázi vody mají vyšší tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost než oleje. Při porovnávání olejů je zřejmé, že olej s menší viskozitou ISO VG5 odvádí lépe teplo než olej ISO VG68.





S rostoucí teplotou a objemovým průtokem roste i součinitel přestupu tepla. Vypočítané hodnoty pro objemový průtok 10 l/min pro chladicí média na bázi vody a pro objemový průtok 2,4 l/min pro oleje jsou uvedeny v tabulce 7.

T[°C]	Součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]			
	$\dot{V} = 10$ [l/min]		$\dot{V} = 2,4$ [l/min]	
	Voda	Roztok	ISO VG68	ISO VG5
10	35 391	15 736	387,22	2 015
20	40 953	21 396	505,55	2 121
30	46 195	28 611	562,94	2 264
40	51 084	31 911	686,53	2 374
50	55 575	36 640	779,21	2 511

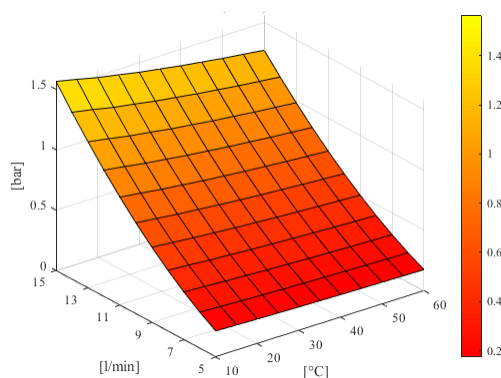
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla

### 5.3. Tlakové ztráty

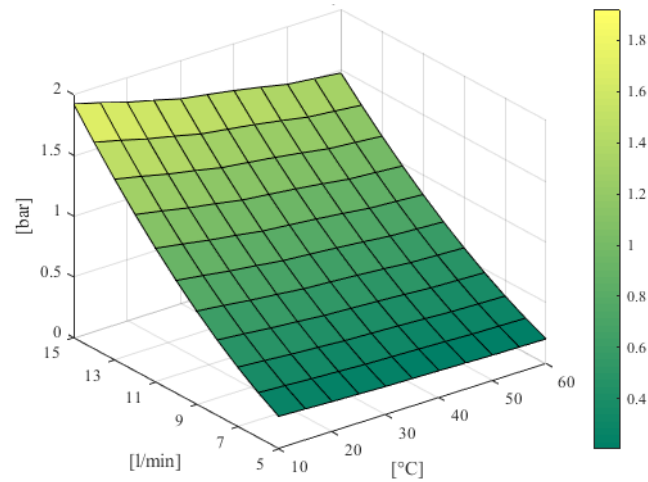
Tlakové ztráty byly spočítány pro variantu 1 a 3 podle vzorců 26-30. Výpočet byl proveden pro stejné objemové průtoky a teploty jako výpočet pro součinitel přestupu tepla. Rozdílem mezi výpočty obou variant je, že pro variantu 1 byly započítány navíc i místní tlakové ztráty, protože zde dochází ke změně směru proudění. Pro obě varianty je uvažován obdélníkový průřez kanálu.

#### 5.3.1. Varianta 3

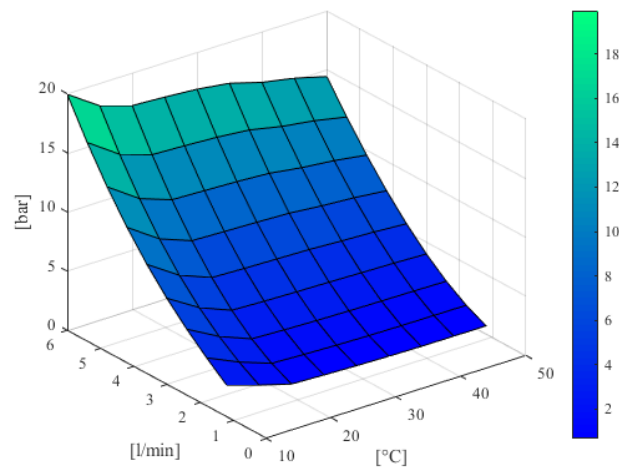
Na grafech 5-8 je znázorněna závislost tlakové ztráty na teplotě chladícího média a objemovém průtoku.



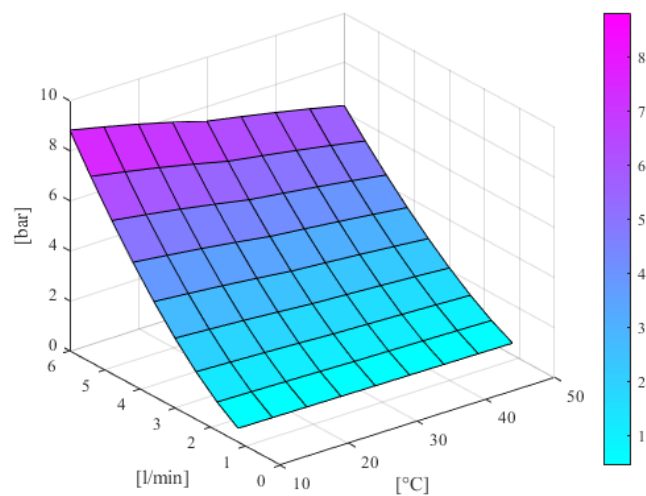
Graf 5: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro vodu



**Graf 6: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro roztok**



**Graf 7: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG68**



**Graf 8: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG5**



Z grafů je patrné, že se ztráty se zvětšující teplotou snižují. To je způsobené snižováním kinematické viskozity. U chladících kapalin na bázi vody je tento pokles velmi malý, protože i kinematická viskozita se mění jen minimálně. Rozdíl tlakových ztrát v závislosti na teplotě je lépe patrný u olejů, protože jejich kinematická viskozita se se zvyšující teplotou znatelně mění. Konkrétní hodnoty pro uvažovaný objemový průtok 10 l/min a 2,4 l/min jsou uvedeny v tabulce 8.

T [°C]	Tlakové ztráty [bar]			
	V̇ = 10 [l/min]		V̇ = 2,4 [l/min]	
	Voda	Roztok	ISO VG68	ISO VG5
10	0,75	0,92	5,59	1,90
20	0,71	0,86	3,02	1,85
30	0,68	0,81	2,8	1,80
40	0,65	0,77	2,69	1,73
50	0,63	0,73	2,61	1,66

**Tabulka 8: Výsledné ztráty v závislosti na teplotě při průtoku 10 l/min**

Tlakové ztráty při teplotě chladícího média 20°C a proměnném objemovém toku jsou zobrazeny v tabulce 9. Se zvětšujícím se objemovým průtokem dochází ke zvětšování tlakových ztrát. Největší ztráty jsou dosahovány oleji, opět z důvodu vysoké kinematické viskozity oproti zbylým chladícím médiím.

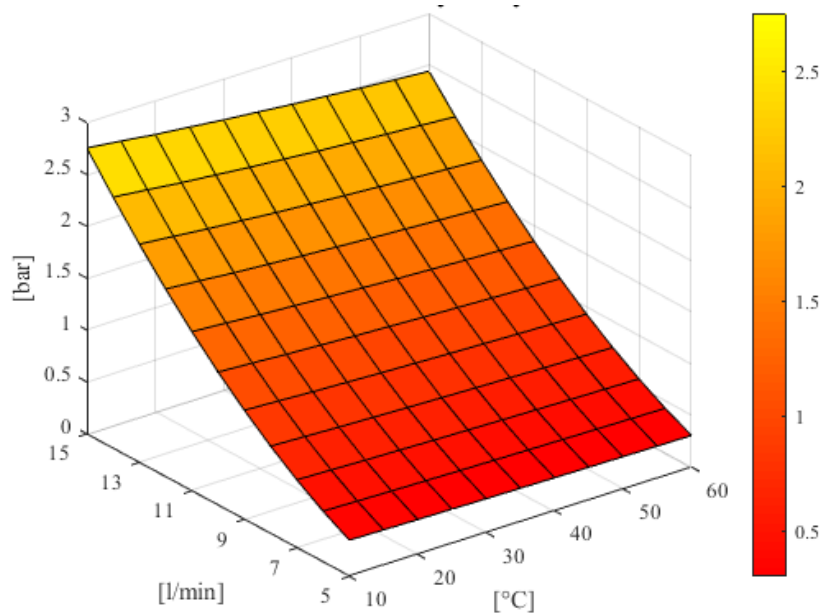
T=20 [°C]	Tlakové ztráty[bar]				
V̇[l/min]	Voda	Roztok	V̇[l/min]	ISO VG68	ISO VG5
5	0,20	0,24	1	0,81	0,38
7,5	0,42	0,51	2	2,20	1,31
10	0,71	0,86	3	4,51	2,6
12,5	1,06	1,29	4	7,79	4,23
15	1,48	1,79	5	12,04	6,09

**Tabulka 9: Výsledné ztráty v závislosti na průtoku při teplotě 20°C**

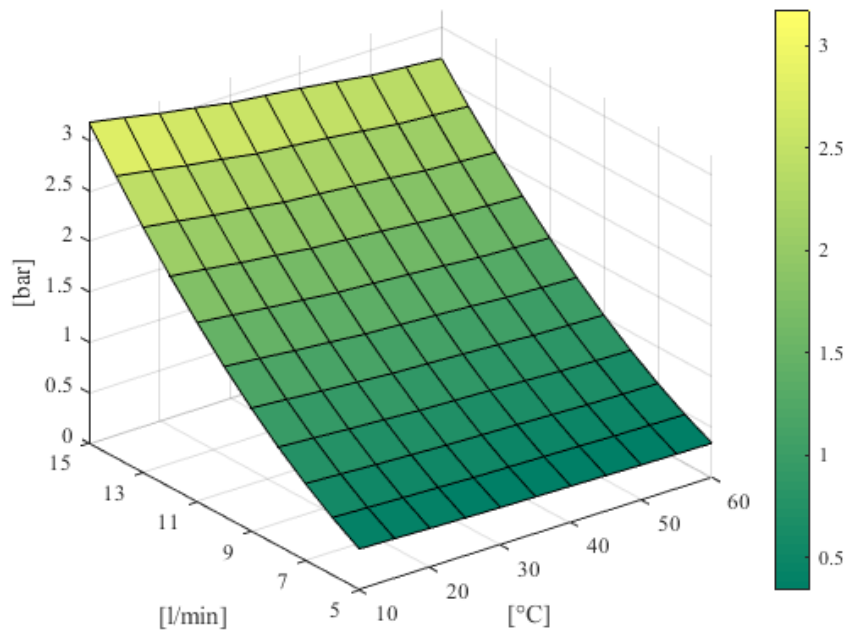


### 5.3.2. Varianta 1

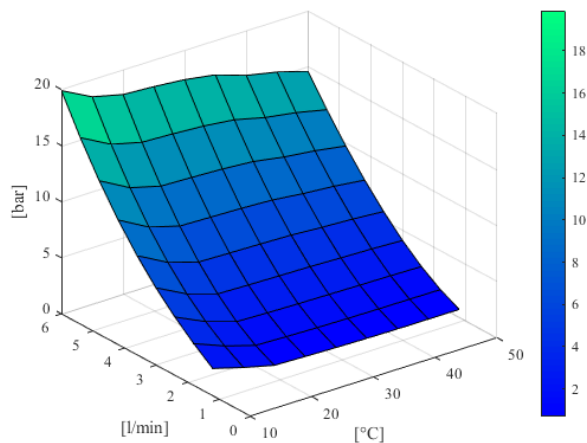
Na grafech 9-12 je znázorněna hodnota tlakových ztrát v závislosti na objemovém toku a teplotě chladicího média pro variantu č. 1 chlazení kanálem ve statoru.



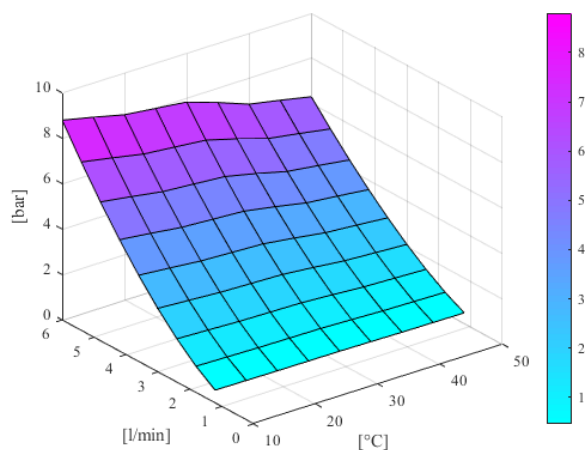
**Graf 9:** Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro vodu



**Graf 10:** Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro roztok



**Graf 11: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG68**



**Graf 12: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG5**

Výsledné hodnoty tlakových ztrát pro variantu 1 při dané teplotě chladícího média  $T=20^{\circ}\text{C}$  jsou uvedeny v tabulce 10.

$T=20[^{\circ}\text{C}]$	Tlakové ztráty[bar]				
$\dot{V}[l/min]$	Voda	Roztok	$\dot{V}[l/min]$	ISO VG68	ISO VG5
5	0,33	0,38	1	0,76	0,39
7,5	0,72	0,82	2	2,20	1,32
10	1,24	1,42	3	4,60	2,62
12,5	1,89	2,16	4	8,01	4,22
15	2,67	3,04	5	12,42	6,07

**Tabulka 10: Výsledné ztráty v závislosti na průtoku při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$**



## 5.4. Výpočet velikosti pasivních odporů ložisek

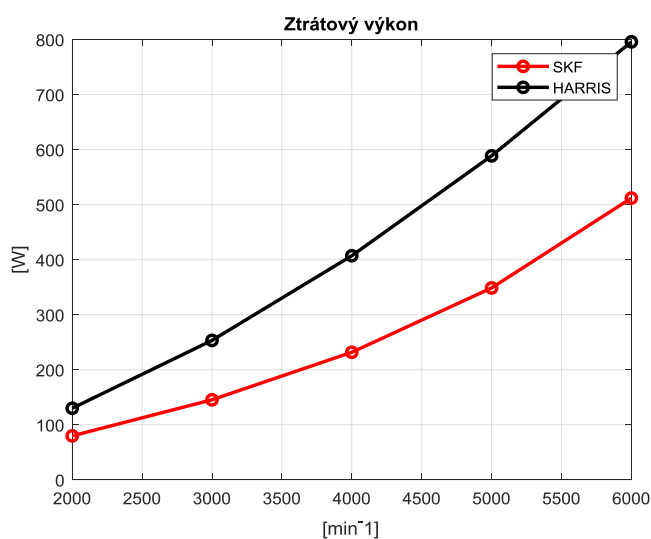
Pro výpočet ztrátového výkonu v ložiskách je nutné stanovit vstupní hodnoty. Ztrátový výkon je vypočítán pro ložiska SKF 7212 CD P4 A. Ložiska jsou na hřídeli namontována s lehkým předpětím. Toto předpětí představuje axiální zatížení 350 N. Další vstupní hodnoty jsou rozměry ložiska, otáčky a radiální síla, která zde nepůsobí aktivně, ale je uvažována jako síla přitěžující ložiskům, díky tíze statoru. Její velikost činí 98 N.

## 5.5. Ztráty v ložiskách-chladicí výkon

Dle vzorců (13-25) byly vypočítány ztrátové výkony ložisek. V tabulce 11 jsou zobrazeny hodnoty ztrátového výkonu pro všechna testovaná ložiska. Grafická závislost ztrát na otáčkách je vykreslena v grafu 13.

n[ $\text{min}^{-1}$ ]	Ztrátový výkon[W]	
	SKF	Harrisův model
2 000	79,9	130,1
3 000	145,5	253,4
4 000	231,8	407,2
5 000	348,7	588,7
6 000	511,9	795,8

Tabulka 11: Hodnoty tlakových ztrát pro všechna ložiska



Graf 13: Závislost ztrátového výkonu ložisek na otáčkách



Z grafu je patrné, že ztrátový výkon roste se zvyšujícími se otáčkami. Vypočítané hodnoty mohou být výpočtovými modely nadhodnocovány. Hodnoty ztrát vypočítané pomocí Harrisova modelu jsou větší než hodnoty vypočítané pomocí postupu od firmy SKF. To může být způsobeno tím, že Harrisův model není primárně určen pro výpočet mazání olej-vzduch. Pro určení chladicího výkonu byly uvažovány hodnoty větších ztrát, tedy výpočet podle Harris. Dle Harrisova modelu činí až 98% z celkového třecího momentu viskózní složka.

Pro stanovení chladicího výkonu bylo vycházeno ze vzorce (31). Plocha chladicí drážky je dána konstrukcí, součinitel přestupu tepla je vypočten, znám není pouze střední logaritmický teplotní spád. Jeho přesné určení vyžaduje užití numerických metod a přesahuje tak rámec bakalářské práce. Pro určení chladicího výkonu byl odhadnut střední logaritmický teplotní spád mezi hodnotami  $\Delta T_{LM}=2,5$  a  $\Delta T_{LM}=5$ . Tyto hodnoty představují rozdíl vstupní a výstupní teploty chladicího média. Chladicí výkon pro chladicí média na bázi vody byl spočítán pro objemový průtok 10 l/min. Chladicí výkon olejů byl vypočten pro hodnotu 3 l/min. Teplota chladicího média je 20°C.

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \quad (31)$$

$\Delta T_{LM} [^{\circ}C]$	Chladicí výkon [W]			
	Voda	Roztok	ISO VG68	ISO VG5
2,5	5 590	2 920	68,24	286,33
5	11 180	5 841	136,49	572,67

**Tabulka 12: Výsledné hodnoty chladicího výkonu pro variantu 3**

Chladicí výkon byl vypočítán pro variantu 3, protože pro ni je stanoven součinitel přestupu tepla. Chladicí výkon varianty 1 nelze přesně určit, protože díky geometrické složitosti kanálu se analyticky nedá snadno spočítat součinitel přestupu tepla. Když uvážíme, že chladicí kanál ve statoru varianty 1 má sice kratší délku, ale větší plochu drážky- navíc je lépe umístěn přímo v poloze ložisek a členu vyvolávajícího předpětí, můžeme usuzovat, že chladicí výkon této varianty bude srovnatelný či ještě lepší než varianty 3.

Dále také musíme uvážit, že chladicí výkon způsobený prouděním chladicího média není jediným tepelným propadem. Další nezanedbatelný tepelný tok je odveden



sáláním (radiací), volnou a nucenou (rotace hřídele) konvekcí, které zajišťují přirozené chlazení testovacího zařízení.

$$Q_{loss} - Q_{kapalina} - Q_{rad} - Q_{konvektivní} = 0 \quad (33)$$

Vztah (33) pak představuje zjednodušenou tepelnou bilanci kde  $Q_{loss}$  je ztrátový výkon ložiska,  $Q_{kapalina}$  teplo odvedené prouděním kapaliny a  $Q_{rad}$  teplo odvedené radiací a  $Q_{konvektivní}$  je teplo odvedené volnou a nucenou konvekcí do okolí.





## 6. ZÁVĚR

Z výsledných hodnot chladicího výkonu je patrné, které chladicí médium při vstupní teplotě chladicího média 20°C a daném objemovém průtoku, uchladí ztráty z ložisek. Chladicí média, která vyhovují, jsou voda a roztok ethylenglykolu. Oleje nejsou vhodné pro chlazení z důvodu nízkého součinitele přestupu tepla. Ložiska budou uchlazena i variantou č 1, která polohou chladicího kanálu pravděpodobně zajistí ještě lepší přenos tepla než varianta 3.

Pro zvolenou teplotu a průtok jsou tlakové ztráty varianty 1 o 42% vyšší než u varianty 3. Pro vodu je zvolená teplota 20°C a objemový průtok 10 l/min. Tyto hodnoty byly zvoleny tak, aby se co nejvíce přiblížily reálným hodnotám, které jsou v chladicím kanále dosahovány. Hodnota ztrát varianty 1 při použití vody je 1,24 bar a varianty 3 0,71 bar což jsou hodnoty, které lze běžným oběhovým čerpadlem bez problémů dosáhnout.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla, tlakových ztrát a ztrátového výkonu ložisek byly vytvořeny výpočtové programy v programu Matlab. Tyto programy mohou sloužit k předběžnému návrhu chladicí drážky. Další uplatnění naleznou při tvorbě MKP modelů, resp. definování vlastností prvků tekutinových náhrad, při modelování chlazení nosných struktur obráběcích strojů.

Při porovnání varianty 1 a varianty 3 bylo zjištěno, že obě varianty při použití vody nebo roztoku, testovací zařízení uchladí. Mají nízké ztráty v kanálu a konstrukčně nemění zástavbu testovacího zařízení. Výhoda varianty 1 je, že kanál je navržen přesně podle polohy ložisek a zajišťuje lepší odvod ztrátového výkonu. Mezi další výhody patří, že zároveň chladí i součást vyvolávající předpětí. Nehrozí únik chladicího média do ložiska a měníme pouze jednu součást testovacího zařízení. Proto je varianta 1 zvolena jako nejvýhodnější a doporučená k realizaci. Detailní návrh modifikace tohoto dílce je zpracován ve formě výrobní dokumentace.

Ideálním řešením z hlediska zástavbového prostoru a náročnosti výroby se v reálných aplikacích jeví kombinace chlazení pomocí drážky přímo ve statoru, popř. chlazení pomocí distanční trubky v kombinaci s žebry umístěnými na hřídeli, která tvoří s žebrováním distanční trubky tepelný výměník mezi rotorem a statorem a poskytuje tak navíc i odvod tepla z hřídele. Tato varianta je vhodná pro typické zástavby v konstrukci uložení hřídelí a vřeten.



## SEZNAMY

### Seznam použité literatury

- [1] Milling Heads - Nicolás Correa. [online]. Copyright © [cit. 03.01.2019]  
Dostupné z: <https://www.nicolascorrea.com/en/milling-heads>
- [2] Motor cooling [online]. Copyright © [cit. 01.02.2019] Dostupné z:  
<http://www.gmn.de/en/spindles/know-how/motor-cooling/>
- [3] Precision roller bearings [online]. Copyright © [cit. 01.02.2019]. Dostupné z:  
<http://www.ntnamericas.com/en/website/documents/brochures-and-literature/catalogs/precision%20roller%20bearings%202260-iv.pdf>
- [4] NTN TR 82 [online]. Copyright © [cit. 05.03.2019]. Dostupné z:  
[https://www.ntnglobal.com/en/products/review/pdf/NTN\\_TR82\\_en\\_038\\_043p.pdf](https://www.ntnglobal.com/en/products/review/pdf/NTN_TR82_en_038_043p.pdf)
- [5] Compact Shaft Cooling [online]. Copyright © [cit. 01.02.2019] Dostupné z:  
<https://www.fischerspindle.com/technology/compact-shaft-cooling/>
- [6] Liquid Cooling - The Best Heat Transfer Fluids for Liquid Cooling Application Note - Lytron Inc . [online]. Copyright © [cit. 06.05.2019]. Dostupné z:  
<https://www.lytron.com/Tools-and-Technical-Reference/Application-Notes/The-Best-Heat-Transfer-Fluids-for-Liquid-Cooling>
- [7] MOTOREX COOL X [online]. Copyright © [cit. 06.05.2019] Dostupné z:  
[http://www.shop.fischerspindle.com/WebRoot/Store/Shops/fp/4FED/A207/632C/9160/D5F4/B2FA/1909/8549/MOTOREX\\_COOL-X\\_E\\_30.03.15.pdf](http://www.shop.fischerspindle.com/WebRoot/Store/Shops/fp/4FED/A207/632C/9160/D5F4/B2FA/1909/8549/MOTOREX_COOL-X_E_30.03.15.pdf)
- [8] High speed ballscrew [online]. Copyright © [cit. 01.02.2019] Dostupné z:  
<https://www.nskeurope.es/product-high-speed-ball-screw-1004.htm>
- [9] Flouros, M, M Hirschmann, F Cottier, P Gloeckner K Dullenkopf. ActiveOuter Ring Cooling of High Loaded and High Speed Ball Bearings. Volume 1: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Controls, Diagnostics and Instrumentation [online]. ASME, 2012, 2012-6-11, , 1- [cit. 2019-07-11]. DOI: 10.1115/GT2012-68138. ISBN 978-0-7918-4467-0.  
Dostupné z:



- <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/GT2012-68138>
- [10] Experimental study on spindle wirh dual cooling jacket[online]. Copyright © [cit.06.03.2019].Dostupné z: [http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/108802/18/18\\_chapter%20.pdf](http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/108802/18/18_chapter%20.pdf)
- [11] Weber, J. Thermal Impact of Different Cooling Sleeve's Flow Geometries in Motorized High-Speed SpindlesofMachineTools. In: 9th FPNI Ph.D. Symposium on Fluid Power[online]. ASME, 2016, 2016-10-26, 46, V001T01A012- [cit. 2019-07-11]. DOI: 10.1115/FPNI2016-1517. ISBN 978-0-7918-5047-3. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/FPNI2016-1517>
- [12] Třecí moment [online].Copyright © [cit. 12.01.2019]Dostupné z: [https://www.pkservis.com/data/web/skf/6000\\_CS\\_00\\_04\\_T%C5%99en%C3%AAD.pdf](https://www.pkservis.com/data/web/skf/6000_CS_00_04_T%C5%99en%C3%AAD.pdf)
- [13] Výpočet tlakových ztrát [online]. Copyright © 2019 eStránky.cz [cit. 12.01.2019]. Dostupné z: <http://www.ipotrubi.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/3.-mistni-tlakove-ztraty.html>
- [14] Kessler [online]. Copyright © [cit. 05.02.2019]. Dostupné z: [https://kessler-group.biz/files/images/2\\_Kessler/7\\_Downloads/Spindles\\_V\\_line.pdf](https://kessler-group.biz/files/images/2_Kessler/7_Downloads/Spindles_V_line.pdf)
- [15] Product details - IBAG HF Motor Spindles. [online]. Copyright © [cit. 11.07.2019]. Dostupné z: <http://www.ibag.ch/en/product-details.html?id=251>
- [16] Denkena, B., Dahlmann, D., Klemme, H., 2016: Investigations on Thermal Management of a Machine Tool Spindle by UsingLamellar Heat Exchangers, EuspensSIG: ThermalIssues,Presentation, Prag
- [17] Heat Pipe: princip a konstrukce | Svět hardware. Svět hardware | homepage [online]. Copyright © 1998 [cit. 06.03.2019]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/heat-pipe-princip-a-konstrukce/15941>
- [18] Kauschinger, B Schroeder, S. Uncertainties in Heat Loss Models of Rolling Bearings of Machine Tools. In: Procedia CIRP [online]. 2016, 46, s. 107-110



## Seznam obrázků

Obr. 1: Sestava zkušebního zařízení s motorem .....	13
Obr. 2: Celkový řez hřídelí .....	14
Obr. 3: Řez statorem.....	14
Obr. 4: Chlazení frézovací hlavy od firmy Correa [1] .....	16
Obr. 5: Schéma chlazení elektrovřetene [2] .....	17
Obr. 6: Graf závislosti výkonu vřetene na teplotě a typu použitého chladicího media [2] .....	17
Obr. 7: Ilustrativní graf závislosti osového posunutí TCP v čase, při použití nuceného chlazení [2] .....	18
Obr. 8: Schéma chlazení uložení ložisek pomocí chladicího pláště [3] .....	18
Obr. 9: Vřeteno Kessler [14].....	19
Obr. 10: Další pohled na vřeteno Kessler chlazené pomocí labyrintu .....	19
Obr. 11: Chlazení vřetene od firmy Ibag se znázorněným prouděním chladicího média .....	20
Obr. 12: Vřeteno Ibag se znázorněnými otvory pro propojení kanálů [15] .....	20
Obr. 13: Graf popisuje závislost teploty vřetene na čase [5].....	21
Obr. 14: Vřeteno s chlazenou hřídelí [3] .....	21
Obr. 15: Chlazení pomocí distančního kroužku [4] .....	22
Obr. 16: Schéma chlazení ložisek pomocí chlazení distančního kroužku [4] .....	22
Obr. 17: Graf znázorňující závislost teploty na čase [8] .....	24
Obr. 18: Rozdíl mezi jednoduchou a dělenou maticí [8].....	25
Obr. 19: Schéma chlazení ložiska pomocí aktivního chlazení vnějšího kroužku [9] .....	26
Obr. 20: Popis částí ložiska [9]                      Obr. 21: Parametry ložiska [9] .....	26
Obr. 22: Schéma chlazení pomocí dvojitého chladicího pláště [10].....	27



Obr. 23: Chlazení vřetene pomocí Heat pipe [16] .....	28
Obr. 24: Průřez chladicího kanálu.....	31
Obr. 25: Chlazení pomocí chladicího kanálu ve statoru.....	31
Obr. 26: Šroubení s nástrčnou koncovkou Festo .....	32
Obr. 27: Chlazení pomocí chladicího pláště mezi tryskami .....	32
Obr. 28: Detailní pohled na chladicí plášť.....	33
Obr. 29: Chlazení pomocí distanční trubky .....	34
Obr. 30: Chlazení pomocí chlazení distanční trubky .....	34
Obr. 31: Detail distanční trubky.....	35
Obr. 32: Detailní pohled na žebra .....	35
Obr. 33: Rozměry drážky .....	40
Obr. 34: Postup výpočtu.....	46

### **Seznam tabulek**

Tabulka 1: Varianty chlazení ve statorové části .....	29
Tabulka 2: Rozměry šroubovice pro variantu 2.....	33
Tabulka 3: Rozměry šroubovice pro variantu 3-4.....	35
Tabulka 4: Porovnání variant řešení.....	36
Tabulka 5: Vztahy pro výpočet proměnných pro ložiska s kosoúhlým stykem[12].....	41
Tabulka 6: Porovnání chladicích kapalin .....	47
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla.....	50
Tabulka 8: Výsledné ztráty v závislosti na teplotě při průtoku 10 l/min.....	52
Tabulka 9: Výsledné ztráty v závislosti na průtoku při teplotě 20°C .....	52
Tabulka 10: Výsledné ztráty v závislosti na průtoku varianta1 .....	54
Tabulka 11: Hodnoty tlakových ztrát pro všechna ložiska.....	55
Tabulka 12: Výsledné hodnoty chladicího výkonu pro variantu 3 .....	56



## Seznam grafů

Graf 1: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro vodu	48
Graf 2: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku roztoku	..48
Graf 3: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG68	.....49
Graf 4: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG5	.....49
Graf 5: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro vodu	.....50
Graf 6: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro roztok	.....51
Graf 7: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG68	.51
Graf 8: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG5	...51
Graf 9: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro vodu	.....53
Graf 10: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro roztok	.....53
Graf 11: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro ISO VG68	.....54
Graf 12: Závislost tlakových ztrát na teplotě a objemovém průtoku pro olej ISO VG5	..54
Graf 13: Závislost ztrátového výkonu ložisek na otáčkách	.....55

## Seznam příloh

Výkresy:	Chladicí kanál BP 0246-01-01-01
	Chladicí kanál-geometrie BP 0246-01-01-02
CD:	Bakalářská práce.pdf
	Chladicí kanál.pdf
	Chladicí kanál-geometrie.pdf
	Chladicí kanál.step