

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N0715A270013  
Studijní obor: N0715A270013S01

Stavba energetických strojů a zařízení  
Stavba energetických strojů a zařízení

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Modely valivých ložisek pro CFD simulace v pohonných mechanismech

Autor: **Bc. Voráček Lukáš**  
Vedoucí práce: **Ing. Richard Matas, Ph.D.**  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jindřich Kňourek, Ph.D.**

Akademický rok 2020/2021

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš VORÁČEK**  
Osobní číslo: **S19N0153P**  
Studijní program: **N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení**  
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Téma práce: **Modely valivých ložisek pro CFD simulace v pohonných mechanismech**  
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Zásady pro vypracování

1. Rešerše problematiky použití valivých ložisek v pohonných mechanismech (převodovkách) a případně jejich náhrad v CFD modelech.
2. Výběr vhodných modelových ložisek a jejich geometrií.
3. Návrh a popis zjednodušených modelů pro simulace.
4. Příprava CFD modelů vybraných ložisek.
5. CFD simulace modelů ložisek pro různé podmínky provozu.
6. Analýza získaných výsledků.
7. Doporučení pro modelování ložisek v CFD pohonných mechanismů (převodovek).
8. Ideový návrh experimentu pro validaci modelů ložisek.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **grafické výstupy, grafy z CFD simulací a geometrie modelů**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

- Davidson, L., Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling, Chalmers University of Technology, 2020
- Firemní podklady výrobců valivých ložisek
- Manuály a firemní literatura ANSYS, Inc.
- Liu, H.; Jurkschat, T.; Lohner, T.; Stahl, K. Detailed Investigations on the Oil Flow in Dip-Lubricat. Gearboxes by the Finite Volume CFD Method. Lubricants 2018, 6, 47.
- Bao, H.; Hou, X.; Lu, F. Analysis of Oil-Air Two-Phase Flow Characteristics inside a Ball Bearing with Under-Race Lubrication. Processes 2020, 8, 1223
- Hu, J. ; Wu, W. ; Wu M. ; Yuan S. Numerical investigation of the air-oil two-phase flow inside an oil-jet lubricated ball bearing. International Journal of Heat and Mass Transfer 68 (2014) 85-93

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Richard Matas, Ph.D.**  
Nové technologie – výzkumné centrum

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jindřich Kňourek, Ph.D.**  
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Dr. Ing. Jaroslav Synáč**  
vedoucí katedry

### **Prohlášení o autorství**

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

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

**V Plzni dne: .....**

.....  
**podpis autora**

## **Poděkování**

Rád bych tímto způsobem poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Richardu Matasovi, Ph.D. a také konzultantovi diplomové práce panu Ing. Jindřichu Kňourkovi, Ph.D. za mnoho rad a za vynaložené úsilí při konzultacích.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Voráček	<b>Jméno</b> Lukáš	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Matas, Ph.D.	<b>Jméno</b> Richard	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Modely valivých ložisek pro CFD simulace v pohonných mechanismech		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	92	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	63	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	29
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce popisuje výpočetní metodiku pro valivá ložiska v oblasti CFD simulací. Byly vytvořeny čtyři varianty geometrií, které byly následně diskretizovány. Byly vyzkoušeny různé výpočetní přístupy a různé okrajové podmínky. V práci je rozebírán vliv na ztráty spolu s porovnáním proudových polí jednotlivých variant výpočtů. Veškeré simulace byly provedeny v programu Ansys Fluent 2020 R1.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Valivá ložiska, aerodynamika, ztráty, odpor tekutiny proudové pole, obtékání, CAD, CFD, počítačová simulace

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Voráček	<b>Name</b> Lukáš
<b>FIELD OF STUDY</b>	Design of power system machines and equipment	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Matas, Ph.D.	<b>Name</b> Richard
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Rolling bearings models for CFD simulations in drive mechanisms	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	92	<b>TEXT PART</b>	63	<b>GRAPHICAL PART</b>	29
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This master thesis describes methodology of CFD simulations of ball bearings. Four variations of geometry were made, and then they were discretized. Different approaches were tested together with different boundary conditions. In thesis an effect on losses in bearings is described together with comparison of fluid flows of each variations of simulations. All simulations were computed in Ansys Fluent 2020 R1.
<b>KEY WORDS</b>	Rolling bearings, aerodynamics, losses, fluid drag, fluid flow, circumfluence, CAD, CFD, computer simulation

## Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	Motivace a cíle diplomové práce .....	14
3.	Valivá ložiska v pohonných mechanismech .....	16
3.1.	Otočná uložení – ložiska.....	16
3.1.1.	Valivá ložiska.....	16
3.1.2.	Konstrukce valivých ložisek .....	17
3.1.3.	Mazání valivých ložisek.....	17
3.2.	Valivá ložiska v pohonných mechanismech.....	18
3.3.	Definice hydraulických ztrát ve valivých ložiskách .....	19
4.	Geometrie modelovaného ložiska .....	20
4.1.	Jednořadé kuličkové ložisko s otevřenou klecí.....	20
4.2.	Popis pohybu součástí kuličkového ložiska.....	21
4.2.1.	Výpočet otáček pro řešené okrajové podmínky .....	22
5.	Zjednodušení geometrie pro CFD simulace .....	23
5.1.	Zjednodušení jednořadého kuličkového ložiska – Geometrie 1 .....	24
5.2.	Geometrie jednořadého kuličkového ložiska pro ověření okrajových podmínek – Geometrie 2 .....	25
5.3.	Zjednodušení jednořadého kuličkového ložiska pro simulaci tečného dotyku mezi kuličkami a kroužky – Geometrie 3.....	25
6.	Diskretizace výpočetní oblasti .....	27
6.1.	Polyhedrální buňky.....	27
6.1.1.	Kvalita polyhedrální sítě .....	28
6.2.	Objemové prismatické buňky – „Thin volume mesh“.....	28
6.3.	Generování výpočetní sítě pro Geometrii 1 .....	28
6.3.1.	Nastavení povrchové sítě .....	28
6.3.2.	Nastavení prismatické vrstvy v blízkosti stěn .....	29
6.3.3.	Nastavení objemové sítě.....	30
6.4.	Studie nezávislosti výpočetní sítě.....	30
6.4.1.	Definice sil a momentů na stěnu v Ansys Fluent .....	31
6.4.2.	Vyhodnocení studie nezávislosti výpočetní sítě.....	33
6.5.	Generování výpočetní sítě pro Geometrii 1 – Prismatická síť.....	38
6.6.	Generování výpočetní sítě pro Geometrii 2 .....	39
6.7.	Generování výpočetní sítě pro Geometrii 3 .....	40
7.	CFD simulace.....	41
7.1.	Modelování pohybujících se referenčních domén .....	41
7.2.	Modelování problémů s pohybující se výpočetní sítí .....	42
7.3.	Okrajové podmínky .....	42
7.3.1.	Simulace rotace kuliček v přídavném objemu.....	42
7.3.2.	Výpočet s okrajovou podmínkou na stěně kuliček .....	43
7.3.3.	Výpočet nerotujících kuliček.....	44
7.3.4.	Výpočet tečného dotyku kuliček a kroužků .....	44
7.4.	Výpočtová metodika.....	46
7.5.	Označení nestacionárních výpočetních variant.....	49
7.6.	Označení stacionárních výpočetních variant .....	50
7.7.	Výpočetní časy a splnění podmínky konvergence jednotlivých nestacionárních variant .....	51
8.	Analýza odporového momentu v nestacionárních úlohách.....	52
8.1.	Analýza odporového momentu pro Vyp_Nest_Ref_V2_G1 .....	52
8.1.1.	Odporový moment jednotlivých komponent valivého ložiska .....	53
8.2.	Analýza odporového momentu pro Geometrii 1 a Geometrii 2.....	54
8.3.	Analýza odporového momentu pro Geometrii 3 .....	55
9.	Analýza odporového momentu ve stacionárních úlohách.....	58
10.	Analýza odporového momentu pro různé podmínky provozu .....	59
10.1.	Vyhodnocení změny otáček.....	59
10.2.	Vyhodnocení změny teploty.....	61
11.	Analýza proudového pole .....	62
11.1.	Proudové pole Vyp_Stac_Ref_V2_G1.....	64
11.1.1.	Rozložení absolutní rychlosti.....	64



11.1.2.	Rozložení relativní rychlosti .....	66
11.1.3.	Rozložení upravené axiální rychlosti .....	67
11.1.4.	Rozložení statického tlaku .....	69
11.1.5.	Vizualizace vektorového pole .....	69
11.1.6.	Zobrazení proudnic pro výpočet Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	72
11.2.	Porovnání proudového pole Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Nest_Ref_V2_G1 .....	73
11.3.	Porovnání proudového pole Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_Ref_Prism_G1 .....	75
11.4.	Porovnání proudového pole Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NK_V2_G2 .....	76
11.5.	Porovnání proudového pole Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NT1_Prism_G3 .....	80
12.	Doporučení pro modelování ložisek v CFD modelech pohonných mechanismů .....	82
12.1.	Doporučení pro geometrii .....	82
12.2.	Doporučení pro výpočetní síť .....	82
12.3.	Doporučení pro nastavení výpočtu .....	83
13.	Ideový návrh experimentu pro validaci modelů ložisek .....	85
13.1.	Návrh experimentu pro validaci odporového momentu .....	85
13.1.1.	Měřící zařízení .....	85
13.1.2.	Konfigurace měření .....	86
13.1.3.	Postup měření .....	86
14.	Závěr a diskuse .....	88
15.	Reference .....	89
16.	Seznam příloh .....	90

## Použité symboly a zkratky

Zkratka	Jednotky	Název
A	[-]	střed otáčení
B	[mm]	šířka ložiska
D	[mm]	vnější průměr vnějšího kroužku
d	[mm]	vnitřní průměr vnitřního kroužku
d <sub>2</sub>	[mm]	vnější průměr vnitřního kroužku
D <sub>2</sub>	[mm]	vnitřní průměr vnějšího kroužku
d <sub>s</sub>	[mm]	rozteč kuliček
D <sub>w</sub>	[mm]	průměr kuličky
F <sub>a</sub>	[N]	síla na stěnu
F <sub>p</sub>	[N]	síla od tlaku
F <sub>v</sub>	[N]	síla viskózní
k <sub>max</sub>	[-]	poměr maximální délky hrany ku maximální velikosti buňky
k <sub>min</sub>	[-]	poměr tloušťky přídavného objemu ku minimální velikosti buňky
l	[mm]	maximální délka hrany
M <sub>a</sub>	[Nm]	celkový moment
M <sub>celkový</sub>	[Nm]	odporový moment celkový – měření
M <sub>I</sub>	[Nm]	odporový moment první fáze
M <sub>II</sub>	[Nm]	odporový moment druhá fáze
M <sub>III</sub>	[Nm]	odporový moment třetí fáze
M <sub>ložisko</sub>	[Nm]	odporový moment vlivem osazení ložiska
M <sub>z</sub>	[Nm]	odporový moment
N	[ot/min]	otáčky hřídele
N <sub>s</sub>	[ot/min]	otáčky klece
N <sub>w</sub>	[ot/min]	otáčky kuliček
p <sub>max</sub>	[mm]	maximální velikost buňky
p <sub>min</sub>	[mm]	minimální velikost buňky
P <sub>z</sub>	[w]	ztrátový výkon
r	[mm]	poloměr dotyku kuličky a vnitřního kroužku
r <sub>s</sub>	[mm]	střední poloměr (klec)
r <sub>w</sub>	[mm]	poloměr kuličky
t	[mm]	tloušťka přídavného kulového objemu

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Kuličkové ložisko [1] .....	16
Obrázek 2 - Kuželíkové ložisko [1] .....	16
Obrázek 3 - Konstrukce kuličkového a válečkového ložiska [3] přeloženo .....	17
Obrázek 4 - Planetová převodovka s variací ložisek [5] .....	18
Obrázek 5 - Dělení ztrát ve valivých ložiskách [6] přeloženo .....	19
Obrázek 6 - Charakteristické rozměry kuličkového ložiska [5] .....	21
Obrázek 7 - Otevřená klec [8] .....	21
Obrázek 8 - Schéma pohybu ložiska .....	22
Obrázek 9 - Inverzní objem kuličkového ložiska .....	23
Obrázek 10 - Původní geometrie kuličkového ložiska .....	24
Obrázek 11 - Zjednodušená geometrie kuličkového ložiska .....	24
Obrázek 12 - Detail inverzního objemu kuliček .....	25
Obrázek 13 - Pohled na původní zjednodušení Geometrie 1 .....	25
Obrázek 14 - Pohled na zjednodušení Geometrie 2 .....	25
Obrázek 15 - Detailní pohled na zjednodušení tečnosti Geometrie 3 .....	26
Obrázek 16 - Pohled na inverzní objem Geometrie 3 .....	26
Obrázek 17 - Příklad polyhedrální sítě [11] .....	27
Obrázek 18 - Last ratio [12] .....	29
Obrázek 19 - Detail pohled na řez výpočetní sítě Varianta č. 1 .....	31
Obrázek 20 - Detailní pohled na řez výpočetní sítě Varianta č. 4 .....	31
Obrázek 21 - Definice momentu na stěnu [10] přeloženo .....	32
Obrázek 22 - Prismatická objemová síť .....	37
Obrázek 23 - Řez jednou polovinou výpočetní sítě pro Geometrii 2 .....	38
Obrázek 24 - Detailní řez jednou polovinou výpočetní sítě pro Geometrii 2 .....	38
Obrázek 25 - Příklad pohybující se referenční domény [10] .....	40
Obrázek 26 - Zobrazení okrajových podmínek .....	42
Obrázek 27 - Zobrazení okrajových podmínek bez stacionární vnější stěny .....	42
Obrázek 28 - Okrajové podmínky pro tečný dotyk .....	44
Obrázek 29 - Vyhodnocovací rovina YZ .....	60
Obrázek 30 - Vyhodnocovací rovina XY .....	60
Obrázek 31 - Vyhodnocovací roviny na hraně inverzního objemu ložiska .....	61
Obrázek 32 - Rozložení absolutní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	61
Obrázek 33 - Rozložení absolutní rychlosti v rovině XY Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	62
Obrázek 34 - Detail rozložení absolutní rychlosti v rovině XY Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	63
Obrázek 35 - Rozložení relativní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	63
Obrázek 36 - Rozložení axiální rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	64
Obrázek 37 - Detailní rozložení axiální rychlosti v oblasti kuličky Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	65
Obrázek 38 - Rozložení axiální rychlosti na rozhraní Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	65
Obrázek 39 - Rozložení statického tlaku na rozhraní Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	66
Obrázek 40 - Vektorové pole Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	66
Obrázek 41 - Promítnutí proudnic do vyhodnocovací roviny Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	67
Obrázek 42 - Porovnání rozložení axiálních rychlostí na rozhraní Vyp_Stac_Ref_V2_G1 .....	68
Obrázek 43 - Zobrazení proudnic v otevřené části klece .....	69
Obrázek 44 - Zobrazení proudnic v uzavřené části klece .....	69
Obrázek 45 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Nest_Ref_V2_G1 .....	70
Obrázek 46 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Nest_Ref_V2_G1 .....	71
Obrázek 47 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_Ref_Prism_G1 .....	72
Obrázek 48 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_Ref_Prism_G1 .....	73
Obrázek 49 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NK_V2_G2 .....	74
Obrázek 50 - Porovnání relativní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NK_V2_G2 .....	75
Obrázek 51 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NK_V2_G2 .....	76
Obrázek 52 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NT1_Prism_G3 .....	77
Obrázek 53 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp_Stac_Ref_V2_G1 a Vyp_Stac_NT1_Prism_G3 .....	78

Obrázek 54 - T11 Bearingless Rotary Torque Transducer [15] .....	81
Obrázek 55 - Konfigurace měření [16] .....	82

## Seznam grafů

Graf 1 - Průběh celkového odporového momentu pro studii nezávislosti výpočetní sítě .....	33
Graf 2 - Průběh procentuální odchylky sledovaného odporového momentu .....	34
Graf 3 - Detailní průběh celkového momentu pro studii nezávislosti výpočetní sítě .....	35
Graf 4 - Detailní průběh procentuálního odchýlení .....	36
Graf 5 - Celkový průběh sledovaného momentu Varianty 1 a 2 .....	36
Graf 6 - Odporový moment pro Vyp_Nest_Ref_V2_G1 – celý průběh .....	50
Graf 7 - Průběh odporového momentu pro Vyp_Nest_Ref_V2_G1 – částečný průběh .....	51
Graf 8 - Odporový moment jednotlivých komponent ložiska .....	51
Graf 9 - Odporový moment pro varianty Geometrií 1 a 2 .....	52
Graf 10 - Analýza odporového momentu pro varianty výpočtů Vyp_Nest_Ref_V2_G1, Vyp_Nest_Ref_Prism_G1 a Vyp_Nest_NK_V2_G1 .....	53
Graf 11 - Analýza odporového momentu pro Vyp_Nest_Ref_V2_G1, Vyp_Nest_NT1_Prism_G3, Vyp_Nest_NT2_Prism_G3 a Vyp_Nest_NT3_Prism_G3 .....	54
Graf 12 - Analýza odporového momentu pro Vyp_Nest_Ref_V2_G1, Vyp_Nest_NT1_Prism_G3 a Vyp_Nest_NT2_Prism_G3 .....	55
Graf 13 - Vliv změny otáček na odporový moment .....	58
Graf 14 - Vliv změny teploty na velikost odporového momentu valivého ložiska .....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Charakteristické rozměry kuličkového ložiska .....	20
Tabulka 2 - Parametrizace Geometrie 3 .....	26
Tabulka 3 - Podmínky pro vygenerování povrchové sítě Geometrie 1 .....	28
Tabulka 4 - Bezrozměrová čísla pro diskretizaci výpočetního objemu .....	29
Tabulka 5 - Varianty výpočetní sítě pro verifikaci sítě .....	30
Tabulka 6 - Průměrné hodnoty sledovaného momentu .....	34
Tabulka 7 - Tabulka variant výpočetní sítě Geometrie 3 .....	39
Tabulka 8 - Souřadnicové podmínky pro jednotlivé rotace objemů .....	42
Tabulka 9 - Parametry oleje [13] .....	45
Tabulka 10 - Nastavení řešiče Ansys Fluent .....	45
Tabulka 11 - Rozběhové časové kroky .....	46
Tabulka 12 - Časové kroky pro jednu otáčku kuličkové klece .....	46
Tabulka 13 - Označení nestacionárních výpočtů .....	47
Tabulka 14 - Označení stacionárních výpočtů .....	48
Tabulka 15 - Výpočetní náročnost nestacionárních výpočtů .....	49
Tabulka 16 - Odporový moment jednotlivých komponent valivého ložiska .....	52
Tabulka 17 - Průměrné hodnoty odporového momentu pro Geometrii 3 .....	54
Tabulka 18 - Odporový moment pro stacionární výsledky variant .....	56
Tabulka 19 - Okrajové podmínky otáček pro komponenty valivého kuličkového ložiska .....	57
Tabulka 20 - Hodnoty odporového momentu pro jednotlivé otáčky na hřídeli .....	57
Tabulka 21 - Vliv změny parametrů oleje na odporový moment valivého ložiska .....	58
Tabulka 22 - Parametry měřicího zařízení [15] .....	81

## 1. Úvod

Diplomová práce je zaměřena na problematiku výpočtů proudění oleje v zaplavených ložiscích. Valivá ložiska jsou součástí využívané v mechanických celcích a vymezují vzájemný pohyb rotujících a nerotujících částí.

Kvůli vyšším nárokům na spotřebu a emise mechanických celků se provádí mnoho výzkumů s cílem zvýšení jejich účinnosti. Jednou z možností, jak zvyšovat účinnost mechanických celků, je výběr vhodných ložisek, která vymezují pohyb při co možná nejmenším tření, a tedy při co možná nejmenších ztrátách.

Diplomová práce popisuje metodiku a doporučení pro CFD výpočty valivých ložisek, která jsou zaplavena mazacím olejem.

V úvodu práce je popsána obecná problematika valivých ložisek v pohonných mechanismech. Dále jsou v práci popsány různé přístupy pro tvorbu výpočetní oblasti z geometrie valivých ložisek.

Následuje kapitola o diskretizaci výpočetní oblasti. V této kapitole je popsána parametrizace výpočetní sítě spolu s vyhodnocením studie nezávislosti výpočetní sítě. Výsledky ze studie nezávislosti jsou dále aplikovány pro různé přístupy diskretizace výpočetní oblasti.

Další kapitola je věnována nastavení různých okrajových podmínek a různých vyhodnocovacích metod pro problematiku simulací valivých ložisek ponořených v olejové lázni.

Závěr diplomové práce je zaměřen na analýzu ztrátového momentu ve valivých ložiscích vlivem ponoru do olejové lázně a na vyhodnocení proudového pole valivého kuličkového ložiska s otevřenou klecí spolu s porovnáním proudových polí pro jednotlivé výpočtové přístupy. Práce je zakončena návrhem ideového experimentu, kterým by bylo možné validovat výsledky ztrát z provedených simulací.

Diplomová práce může sloužit jako podklad pro další výzkum v oblasti vyhodnocení ztrát a analýzy proudového pole valivých ložisek, například pro výpočty dvoufázového proudění, kdy je ložisko ponořeno pouze částečně v olejové lázni. Dále pak může sloužit jako podklad pro výpočty velkých pohonných celků, kde je kladen důraz pro minimalizaci výpočetní náročnosti jednotlivých komponent spolu s dodržením jejich vlivu na okolí.

## 2. Motivace a cíle diplomové práce

Se zvyšujícími se nároky na efektivitu mechanických celků se ve světě provádí mnoho výzkumů pro jejich optimalizace napříč všemi obory. Každý takový mechanismus, který vykonává nebo přenáší práci, je složen z mnoha součástí. Příkladem součástí jsou valivá ložiska, kde spolu s mechanickými ztrátami vznikají také ztráty od mazacího oleje.

Tato diplomová práce se zabývá simulacemi proudění oleje v prostoru pohybujícího se, olejem plně zaplaveného, valivého kuličkového ložiska. Komponenty valivých ložisek se vzájemně dotýkají a konají různé pohyby. Popis takového chování a vliv na okolní médium, například na vzduch nebo na mazací olej, může být velmi komplikovaný, a proto můžeme k takovému popisu přistupovat různými způsoby. Nejkomplikovanější, časově nejnáročnější, ale nejpresnější, je experimentální měření. Další varianta je využití výpočetních programů a pokusit se chování valivých ložisek nasimulovat.

K simulacím proudění můžeme přistupovat různými metodami v závislosti na vybraném řešiči. Například Ansys Fluent, dále jen Fluent, nabízí širokou škálu metod, kterými můžeme pohyby ve valivých ložiscích definovat. Tyto metody jsou dále děleny dle typů výpočtu, a to na stacionární, kdy je úloha řešena v ustáleném čase, kdy sledované veličiny nejsou časově závislé, nebo nestacionární, kdy je úloha řešena v průběhu času a všechny sledované veličiny jsou na čase závislé.

Fluent dále umožňuje simulaci proudění v okolí nepohyblivých a i v okolí pohyblivých stěn. Jako pohyblivou stěnu můžeme označit takovou, která koná posuvný pohyb, rotační pohyb anebo jejich kombinaci. Takovéto pohyby lze simulovat pomocí okrajové podmínky na stěně, která je vhodná pouze pro rotačně „hladké“ stěny. Rotačně hladkou stěnou můžeme označit takovou stěnu, která je rotačně symetrická. V případě nesymetrických stěn, například v případě ozubených kol, musíme danou oblast obalit rotačně symetrickou oblastí, která bude spolu s danou stěnou rotovat. Pro takovéto případy je vhodné použít výpočetní metody, které Fluent nabízí.

Stacionární varianty výpočtů využívají metodu „Moving reference frame“. Tato metoda v místě pohybující se domény modifikuje rovnice, kterými je tato doména popisována, aby v nich bylo zahrnuto relativní zrychlení způsobené samotným pohybem dané domény. Fyzicky se domény nepohybují a relativní pohyby jsou do výpočtu vnořeny pouze modifikací rovnic.

Nestacionární varianty výpočtů využívají metody „Moving mesh“, „Overset mesh“ a „Remeshing“. Metoda „Moving mesh“ je podobná metodě „Moving reference frame“, relativní zrychlení je ovšem v rovnicích přidáno samotným pohybem výpočetní sítě dané domény. Tyto domény se v čase fyzicky pohybují. Metoda „Overset mesh“ využívá překrytí dvou výpočetních sítí, které jsou spojeny až ve fázi řešení dané úlohy. Jedna výpočetní síť je tedy nehybná a je do ní vnořena jiná výpočetní síť, která se v čase může pohybovat. Konečně „Remeshing“ je metoda, která simuluje pohyb domény tak, že v případě nutnosti vytváří v daném časovém kroku novou výpočetní síť.

Pro co možná nejrealnější simulaci je potřeba jednotlivé metody znát a nebo odzkoušet a vybrat nejvhodnější metodu s přihlédnutím na jejich výpočetní náročnost, a především na omezení pro simulace tečných dotyků. Například pro „Overset mesh“ musíme dodržet určité překrytí dvou výpočetních sítí, tečný dotyk tedy pro takovouto metodu není možný. Metoda „Remeshing“ je časově velmi náročná, protože v každém časovém kroku je výpočetní síť znovu generována.

Jednotlivé části valivých ložisek se pohybují různými pohyby, ale zachovávají svou relativní polohu, proto je vhodné použít následující výpočetní metody „Moving reference frame“ a nebo „Moving mesh“.

Pro metody „Moving reference frame“ a „Moving mesh“ musíme, v případě valivých kuliček, pohybovat s buňkami, nelze tedy nastavit pouze podmínku pohybu na samotných stěnách, což nám také omezuje simulaci tečného dotyku. I přes výše popsaná omezení budou v diplomové práci uvažovány právě tyto dvě poslední metody, a to kvůli nízké výpočetní náročnosti, za účelem vytvoření výpočtové metodiky popisující co možná nejvíce reálný pohyb ložiska.

Cílem samotné práce je tedy zjednodušit nebo doplnit samotnou geometrii valivého kuličkového ložiska tak, aby bylo docíleno co možná nejvhodnějšího nahrazení tečných dotyků, doporučit vhodnou metodu diskretizace výpočetní oblasti a dále určit výpočtovou metodiku samotného kuličkového ložiska z hlediska přesnosti a z hlediska výpočetní náročnosti pro stacionární a nestacionární výpočty v jednofázovém médiu.

Závěry popsané v diplomové práci lze použít pro další výzkum valivých ložisek, například pro dvoufázové médium, anebo závěry implementovat pro větší mechanické celky, kde vhodným nastavením oblasti valivého ložiska můžeme ušetřit výpočetní čas anebo upřesnit fyzikální chování. Nicméně správnost závěrů v diplomové práci by bylo vhodné validovat vhodným experimentální měřením.

### 3. Valivá ložiska v pohonných mechanismech

Tato kapitola popisuje obecné informace spjaté s problematikou otočného uložení, obecný popis valivých ložisek spolu s jejich konstrukčními prvky, problematiku mazání valivých ložisek. Dále je v kapitole obecně popsán převodový mechanismus spolu s využitím valivých ložisek.

#### 3.1. Otočná uložení – ložiska

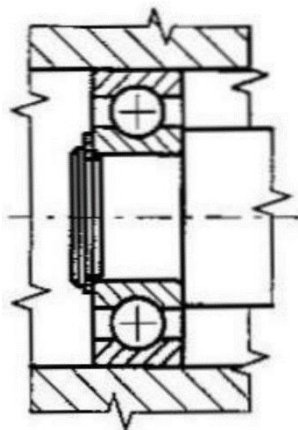
Ložiska jsou strojními součástmi, které vymezují vzájemnou polohu jedné rotující a druhé nepohyblivé součásti nebo polohu součástí o různé rotační rychlosti. Ložiska rozlišujeme podle jejich schopnosti přenosu vnějších sil na radiální ložiska anebo axiální ložiska [1].

Ložiska můžeme dále rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří ložiska hydrodynamická, kde je kontakt mezi stacionární a pohybující se částí zabráněn hydrodynamickým filmem. Druhou skupinu pak tvoří ložiska valivá, kde je dotyk mezi hybnou a nehybnou součástí zabráněn valivými prvky, například kuličkami nebo válečky [2]. Dále budou popisována pouze ložiska valivá.

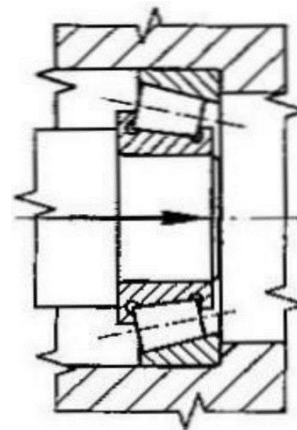
##### 3.1.1. Valivá ložiska

Valivá ložiska jsou aplikována pro otočné uložení, které je charakterizováno valivým dotykem, a s tímto dotykem je vyvozováno i valivé tření [1].

Příklady valivých ložisek jsou znázorněny na obrázku 1, kde je znázorněno ložisko kuličkové, a na obrázku 2, kde je znázorněné ložisko kuželíkové.



Obrázek 1 - Kuličkové ložisko [1]



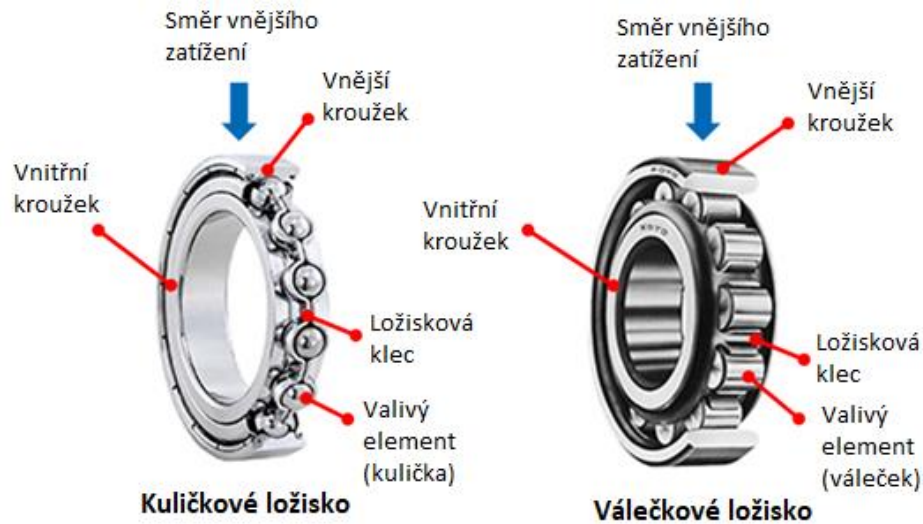
Obrázek 2 - Kuželíkové ložisko [1]

Mezi valivá ložiska řadíme: kuličková ložiska, válečková ložiska, jehlová ložiska, soudečková ložiska a kuželíková ložiska [1].



### 3.1.2. Konstrukce valivých ložisek

Valivá ložiska se skládají z vnitřního a vnějšího kroužku, klece a z valivých elementů.



Obrázek 3 - Konstrukce kuličkového a válečkového ložiska [3]

Na výše zobrazeném obrázku můžeme vidět kuličkové a válečkové ložisko spolu s jejich komponenty.

### 3.1.3. Mazání valivých ložisek

Hybné mechanismy je potřeba dostatečně mazat tak, aby se redukovaly třecí ztráty, opotřebení a hlučnost, dále pro zvýšení vlivu tlumení a zlepšení korozivzdornosti. Ve valivých ložiscích má mazání další funkci. A to vytvoření stálého nosného filmu na povrchu valivých elementů, na plochách kroužků a kluzných plochách klece [1]. Pro valivá ložiska lze využít následující maziva:

#### Tuhá maziva

Tuhá maziva se používají v nepřístupných místech strojních systémů, v případě přerušovaných chodů stroje, při nízkých pracovních otáčkách a při vysokých pracovních teplotách. Využívají se především anorganická anebo chemicky nanášená maziva [1].

#### Plastická maziva

Plastická maziva mají využití opět ve špatně přístupných místech, jsou ale aplikována pro nižší obvodové rychlosti (do 25 m/s) a pro nižší tlaky. Jsou vyráběna z minerálních olejů, které jsou zahušťovány přísadami mýdel a mastných kyselin [1].

#### Kapalná maziva

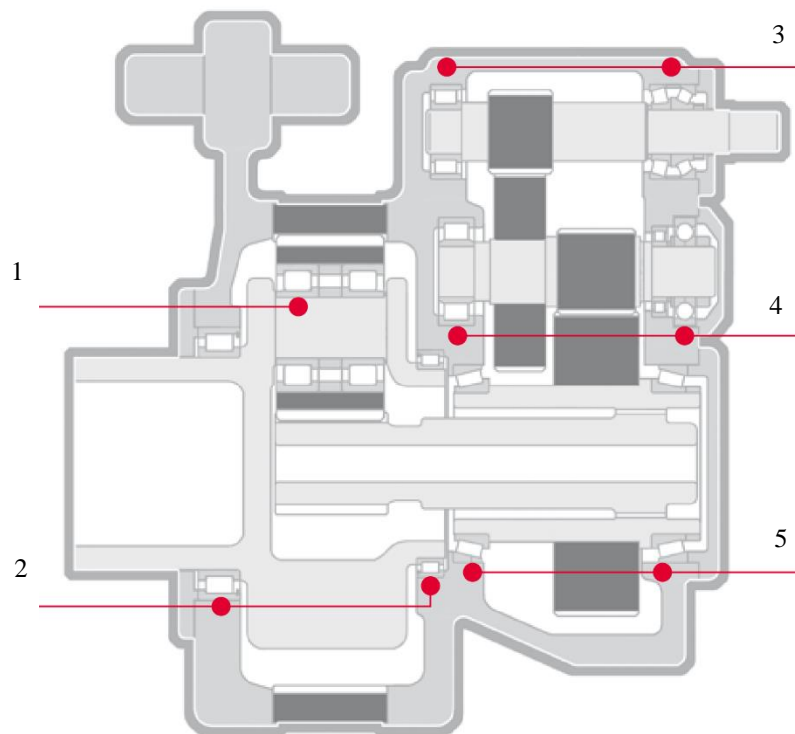
Využívají se v ostatních běžných konstrukčních místech. Jsou tvořena především minerálními oleji. Aplikují se v případě vysokých teplot a v případě mazání ostatních strojních částí například ozubených kol. Oleji lze mazat následujícími způsoby: olejovou lázní, oběhově a nebo olejovou mlhou [1].

### 3.2. Valivá ložiska v pohonných mechanismech

Převodové systémy, dále převodovky, jsou používány ve velké škále strojních odvětví. Převodovky mají za funkci změnu kroutícího momentu a změnu otáček z jednoho zařízení na druhé. Převodovky mají zastoupení například ve větrných elektrárnách, v automobilech anebo v čerpadlech.

Standartně jsou v převodovkách zastoupena ložiska: válečková ložiska, soudečková ložiska, kuželíková ložiska, kuličková ložiska s kosoúhlým stykem a kuličková ložiska v hluboké drážce [4].

Příklad použití valivých ložisek v planetové převodovce spolu s popisem ložisek je znázorněn na obrázku 4.



Obrázek 4 - Planetová převodovka s variací ložisek [5]

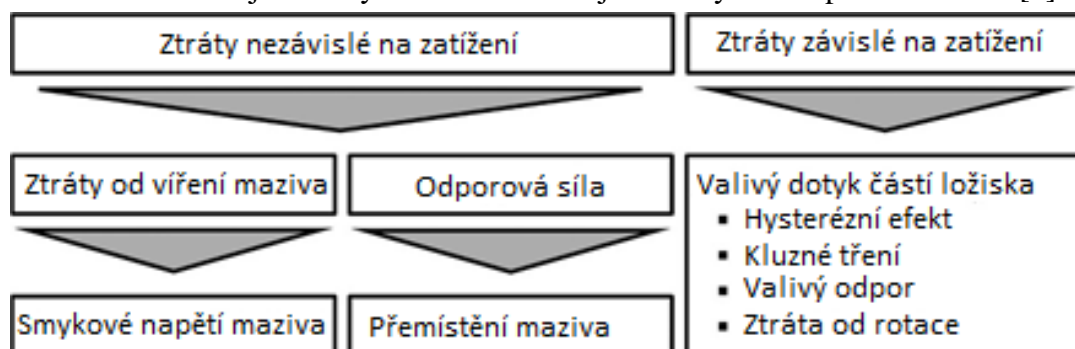
Pod čísla 1 a 2 jsou označeny dvojice válečkovitých ložisek, číslem 3 pak kombinace válečkovitého a kuželíkového ložiska v asymetrickém páru, číslem 4 válečkovité ložisko spolu s čtyřbodovým kontaktním ložiskem a konečně číslem 5 dvě kuželíková ložiska [5].

V převodovkách nebo reduktorech je vnitřní prostor částečně zaplaven olejovou lázní. Při pohybu ozubených kol dochází k rozstříku oleje a k mazání kontaktů ozubených kol. Olej se dostává do prostoru ložisek, ty mohou být podle konfigurace částečně nebo plně zaplaveny. Jiné (v horních pozicích) jsou mazány rozstříkovaným olejem. Olej slouží k mazání ložisek a k odvodu tepla. Pracovní teploty v převodovkách jsou od 80 do 110 °C, pro účely mazání a odvodu tepla se používají oleje s nízkou viskozitou například Fuchs Pentosin MB-EP2, Shell Spirax atd.

### 3.3. Definice hydraulických ztrát ve valivých ložiskách

Zvyšující se ceny paliv a striktní regulace, které zvyšují požadavky na redukci emisí vypouštěných do ovzduší, nutí výrobce, například automobilů, se zaměřit na zvyšování účinnosti mechanických systémů. V problematice, kterou tato práce popisuje, se jedná především o zvyšování účinnosti vlivem snižování hydraulických ztrát ve valivých ložiskách [6].

Obecně lze ztráty v ložiscích rozdělit do dvou skupin, a to na ztráty závislé a nezávislé na zatížení, rozdělení je znázorněno na obrázku 5. Zatížením se myslí axiální nebo radiální síly působící na ložisko. Ztráty závislé na míře zatížení jsou především definovány hysterézním efektem, kluzným třením, valivým odporem. Ztráty nezávislé na zatížení jsou pak ztráty třením způsobené viskozitou oleje a ztráty vlivem obtékání jednotlivých komponent ložisek [6].



Obrázek 5 - Dělení ztrát ve valivých ložiskách [6] přeloženo

V případě vnoření ložiska do olejové lázně by mělo být cíleno na optimální míru ponoření, a to za účelem minimalizace nezávislých ztrát na zatížení. Ponor ložiska ovšem musí zajistit dostatečné mazání jednotlivých částí ložisek a optimální odvod tepla tvořeného ztrátami. V případě, že ložisko bude potopeno příliš hluboko, lze očekávat navýšení celkových ztrát a stroj, který „pohání“ toto ložisko, bude muset produkovat víc práce [7].

Ložiska mají dva stupně ztrát. První stupeň je při rozběhu ložisek a druhý stupeň při ustáleném běhu ložisek. Lze očekávat, že ztráty v prvním stupni budou vyšší než ztráty ve stupni druhém [7].

V této práci budou pomocí „Computational Fluid Dynamics“, dále jako CFD, simulací odhadovány hydraulické ztráty, které jsou nezávislé od zatížení. Takovéto ztráty budou vyjadřovány pomocí odporového momentu  $M_z$ , definice vyhodnocení momentu je popsána v kapitole 6.4.1., tento moment lze přepočítat na ztrátový výkon na hnací hřídeli pomocí úhlové rychlosti hřídele.

## 4. Geometrie modelovaného ložiska

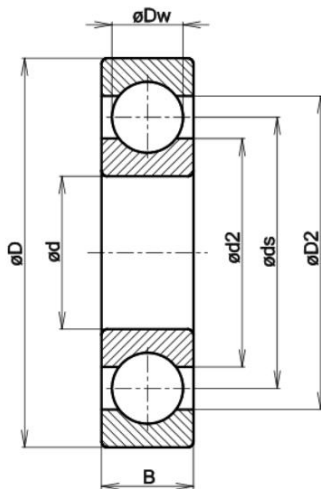
Kapitola popisuje geometrii valivého kuličkového ložiska, na které byly vyhodnoceny diskretizační a výpočtové metodiky. V kapitole je rozepsán popis charakteristických rozměrů uvažovaného ložiska. Poslední část je věnována popisu pohybů jednotlivých komponent valivého kuličkového ložiska.

### 4.1. Jednořadé kuličkové ložisko s otevřenou klecí

Pro CFD simulace bylo vybráno jednořadé kuličkové ložisko se čtyřbodovým stykem. Ložisko bylo vybráno pro jeho typičnost. Vyšetřované techniky jsou obecně použitelné i pro jiná obdobně uspořádaná ložiska. Ložisko je složeno z vnějšího a vnitřního kroužku, otevřené klece a z osmi kuliček. Charakteristické rozměry ložiska jsou popsány v tabulce 1 a znázorněny na obrázku 6. Kuličky jsou v ložisku vedeny otevřenou klecí, která je znázorněna na obrázku 7.

Tabulka 1 - Charakteristické rozměry kuličkového ložiska

	Označení	[mm]
Vnější průměr vnějšího kroužku	$\varnothing D$	110
Vnitřní průměr vnějšího kroužku	$\varnothing D_2$	92
Vnější průměr vnitřního kroužku	$\varnothing d_2$	70
Vnitřní průměr vnitřního kroužku	$\varnothing d$	50
Šířka ložiska	$B$	27
Průměr kuličky	$\varnothing D_w$	19,05
Rozteč kuliček	$\varnothing d_s$	80,5
Poloměr klece	$r_s = \frac{d_s}{2}$	40,25
Poloměr kuličky	$r_w = \frac{D_w}{2}$	9,525
Poloměr tečného dotyku mezi kuličkou a vnitřním kroužkem	$r = r_s - r_w$	30,725



Obrázek 6 - Charakteristické rozměry kuličkového ložiska [5]



Obrázek 7 - Otevřená klec [8]

## 4.2. Popis pohybu součástí kuličkového ložiska

Pro CFD simulace je nutné znát úhlové rychlosti jednotlivých komponent, které se nacházejí ve výpočetní doméně.

Do kuličkového ložiska byl vnášen rotační pohyb od vnitřního kroužku, který byl napojen na hnací hřídel. Vnější kroužek byl uvažován jako nehybný.

Pro popis pohybu v ložisku budeme uvažovat, že nedochází k prokluzu mezi kroužky a kuličkami. Pro rozbor pohybu si definujeme otáčky hřídele  $N$ , které jsou zároveň otáčkami vnitřního kroužku, otáčky kuliček  $N_w$  a otáčky klece  $N_s$ . Dále je potřeba znát charakteristické rozměry všech komponent, viz předchozí kapitola 4.1. [2].

Mezi vnitřním kroužkem a kuličkami dochází k valení. Lze dokázat, že tečná rychlost na vnitřním kroužku je rovna tečné rychlosti kuličky v místě dotyku a poměr mezi otáčkami zmíněných komponent je popsán rovnicí (2) [2]. Otáčky kuliček  $N_w$  jsou vztaženy k jejich středu otáčení.

$$(1) \quad 2\pi r N = 2\pi r_w N_w$$

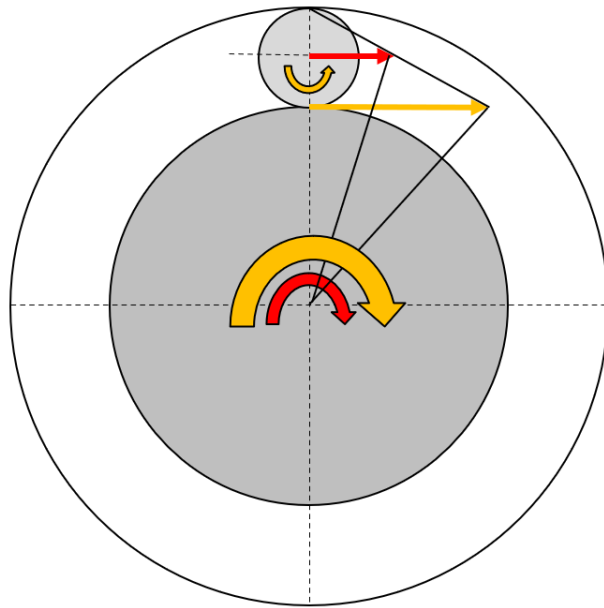
$$(2) \quad N_w = \frac{r}{r_w} N$$

Dále lze dokázat, že obvodová rychlost klece, vztažená ke středu otáčení ložiska, je poloviční oproti obvodové rychlosti hřídele, a to proto, že vnější kroužek je nehybný, tedy na stěnách vnějšího kroužku je obvodová rychlost nulová. Obvodová rychlost klece je popsána rovnicí (3). Otáčky klece, vyjádřeny ke středu otáčení ložiska, a jsou popsány rovnicí (4) [2].

$$(3) \quad V_s = \frac{2\pi r N}{2} = \pi r N$$

$$(4) \quad N_s = \frac{r}{r_s} \frac{N}{2}$$

Schématické znázornění, které není v měřítku, můžeme vidět na obrázku 8.



Obrázek 8 - Schéma pohybu ložiska

Na obrázku můžeme vidět obvodovou rychlost vnitřního kroužku a obvodovou rychlost, stejně velkou a stejně orientovanou, valivé kuličky (označeno oranžovou barvou). Tato obvodová rychlost vychází z otáček hnací hřídele. Dále je na obrázku znázorněna červenou barvou obvodová rychlost středu valivé kuličky, která je zároveň obvodovou rychlostí ložiskové klece. Z této obvodové rychlosti lze vypočítat úhlovou rychlost otáčení ložiskové klece.

#### 4.2.1. Výpočet otáček pro řešené okrajové podmínky

Ve většině simulací popsaných v diplomové práci byly uvažovány otáčky na hřídeli  $N = -1200$  ot/min, záporné znaménko znamená, že se hřídel otáčela po směru hodinových ručiček. Pro tyto otáčky vychází po zaokrouhlení otáčky valivých kuliček  $N_W = 3871$  ot/min a otáčky klece  $N_S = -458$  ot/min.





byla zjednodušena tak, že došlo ke zmenšení průměru valivých kuliček. Kuličky byly obaleny přídatným „fluidním“ objemem, který spolu s kuličkami rotoval. Tato úprava je potřeba pro zachování korektnosti využitých výpočtových metod.

Ve druhé variantě, označené jako Geometrie 2, byl výše popsán přídatný objem spojen s objemem okolní tekutiny. Geometrie 2 byla vytvořena za účelem ověření nesprávnosti výpočtu při použití okrajových podmínek a dále za účelem ověření vlivu relativní rotace valivých kuliček na správnost výsledků.

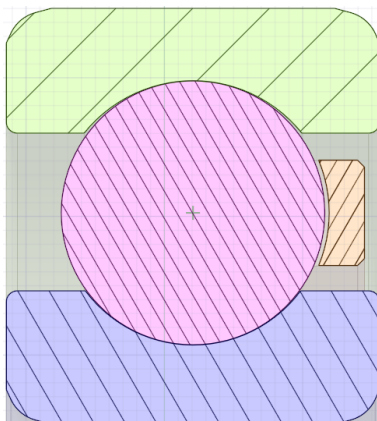
Třetí varianta Geometrie 3 byla vyhotovena za cílem nahrazení tečného dotyku mezi kuličkami a stěnami kroužků. V Geometrii 3 byl použit přídatný objem jako v Geometrii 1.

## 5.1. Zjednodušení jednořadého kuličkového ložiska – Geometrie 1

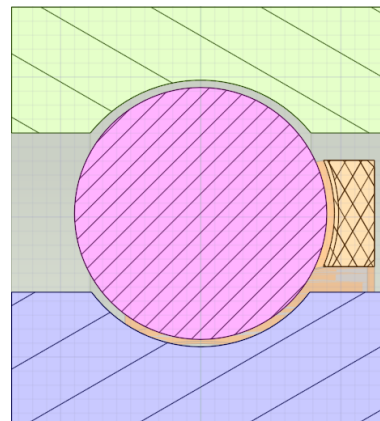
Pro prvotní výpočty a studii nezávislosti sítě bylo původní kuličkovité ložisko zjednodušeno následovně:

- ◀ Z původní geometrie byly odstraněny veškeré malé radiusy.
- ◀ Byly zachovány charakteristické rozměry kroužků a klece.
- ◀ Došlo ke zmenšení průměrů všech valivých kuliček z průměru  $\varnothing D_w = 19,05$  mm na  $\varnothing D_w = 18$  mm. V upravené geometrii nedocházelo k dotyku kuliček s klecí a kroužky. Tato úprava byla implementována kvůli omezení simulace pro dané výpočetní metody v Ansys Fluent.

Zjednodušení je znázorněno na obrázku 10 a na obrázku 11.

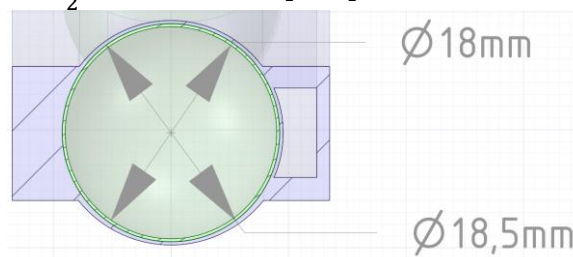


Obrázek 10 - Původní geometrie kuličkového ložiska



Obrázek 11 - Zjednodušená geometrie kuličkového ložiska

Každá valivá kulička byla obalena kulovým přídatným objemem o průměru  $\varnothing D_{w\text{přidavný}} = 18,5$  mm, viz Obrázek 12. Vznikla tedy tenká vrstva okolo každé kuličky o tloušťce  $t$ , kde  $t = \frac{\varnothing D_{w\text{přidavný}} - \varnothing D_w}{2} = 0,25$  [mm].



Obrázek 12 - Detail inverzního objemu kuliček

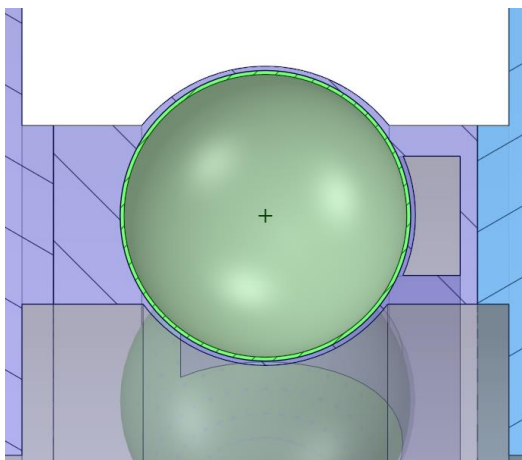


Přídavný objem byl definován jako tekutina a byl implementován z důvodu korektní definice rotace valivé kuličky. Nastavení jednotlivých okrajových podmínek bude popsáno v následujících kapitolách.

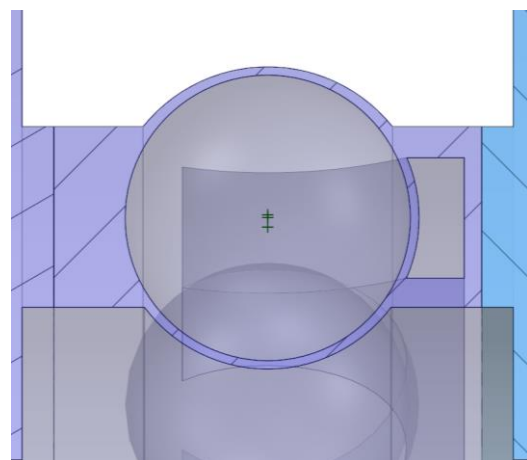
## 5.2. Geometrie jednořadého kuličkového ložiska pro ověření okrajových podmínek – Geometrie 2

Následující zjednodušení geometrie bylo vytvořeno za účelem ověření výpočtu při nevhodně nastavených okrajových podmínkách a za účelem ověření vlivu na výsledky relativního pohybu valivých kuliček.

Rozdíl mezi Geometrií 1 a Geometrií 2 je znázorněn na obrázku 13 a na obrázku 14. Přídavný objem valivých kuliček byl spojen s okolním objemem oleje. Ostatní zjednodušení zůstala v souladu s Geometrií 1.



Obrázek 13 - Pohled na původní zjednodušení Geometrie 1



Obrázek 14 - Pohled na zjednodušení Geometrie 2

## 5.3. Zjednodušení jednořadého kuličkového ložiska pro simulaci tečného dotyku mezi kuličkami a kroužky – Geometrie 3

CFD simulace tečného dotyku mezi dvěma tělesy v programu Ansys Fluent je velmi náročnou disciplínou. Problém nastává při tvorbě výpočetní sítě, kdy při tečném dotyku vznikají v těsném okolí kontaktu buňky o špatné kvalitě. Tyto buňky pak zapříčiňují špatné výsledky anebo mohou způsobit divergenci výpočtu. Tento problém se dá částečně vyřešit zjemněním sítě neboli zmenšováním velikosti buněk v okolí kontaktu těles. Bohužel i po zjemnění nemusíme dosáhnout správnosti výsledků či konvergence. Dále také musíme počítat s enormním nárůstem počtu buněk, což zapříčiní zvýšené nároky na výpočetní výkon a také prodloužení doby výpočtu.

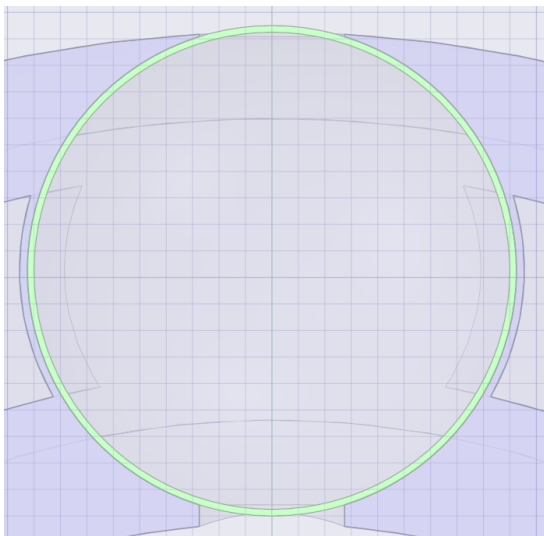
Pro korektnost výpočtu při použitých výpočetních metodách je dle Ansys manuálu potřeba využít přídavný objem kuliček tak, aby byla zachována jejich správná rotace [10]. Z tohoto důvodu nebyla pro simulace tečného dotyku použita Geometrie 2, která byla vytvořena pouze pro ověření okrajových podmínek a dále také pro porovnání vlivu výsledků na zanedbání relativního pohybu jednotlivých kuliček.

Problém tečného dotyku kuliček s plochami kroužků byl vyřešen následovně. Mezi kuličkami a kroužky byla stále uvažována mezera. Tečnost byla pak nahrazena vyříznutím válcovitých objemů o průměru 5,5 mm z objemu oleje uvnitř ložiska, pokaždé byl řez veden

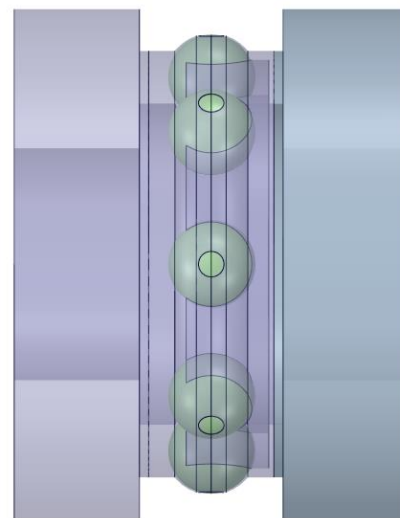
osou protínající střed ložiska a střed dané kuličky. Vyříznutý objem zajistil, že zde nebude proudit olej.

Dále byl rádius na vrcholu vnějšího kroužku oříznut válcovou plochou o průměru 98,5 mm. Oříznutím této stěny dostaneme zjednodušení tečného dotyku. Kuličky tak vizuálně zasahují do vnějšího kroužku. Výše popsany zásah ovšem nebyl proveden i na vnitřním kroužku, a to z důvodu porovnání vlivu takového zásahu. Zjednodušení geometrie je znázorněno na obrázku 15 a na obrázku 16.

Celá geometrie byla rozdělena rovinou, která protínala všechny středy kuliček a střed samotného ložiska, na dvě poloviny. Rozdělení bylo implementováno kvůli metodě diskretizace přídavného objemu kuliček popsané v kapitole 6.7.



Obrázek 15 - Detailní pohled na zjednodušení tečnosti Geometrie 3



Obrázek 16 - Pohled na inverzní objem Geometrie 3

Geometrie 3 byla vytvořena ve třech variantách. V každé variantě došlo ke zvětšení průměru kuliček, a tedy ke zúžení mezery  $t$ . Takováto parametrizace Geometrie 3 je rozepsána v tabulce 2.

Tabulka 2 - Parametrizace Geometrie 3

	$\varnothing D_w$ [mm]	$\varnothing D_w$ přídavný [mm]	$t$ [mm]
Náhrada tečnosti 1	18	18,5	0,25
Náhrada tečnosti 2	18,25	18,5	0,125
Náhrada tečnosti 3	18,35	18,5	0,075

## 6. Diskretizace výpočetní oblasti

Jednou z nejdůležitějších částí přípravy CFD modelu je diskretizace výpočetní oblasti. Řešiče pro CFD výpočty vyžadují rozdělení výpočetní oblasti do menších nepřekrývajících se částí, aby bylo dosaženo správného fyzikálního řešení. Výsledkem dělení výpočetní oblasti je vygenerování sítě, která je tvořena výpočetními buňkami. Fyzikální děje v buňkách jsou řešeny numerickými metodami a postupným řešením buněk se určují diskrétní fyzikální hodnoty. Pro CFD jsou to například rychlost proudění, tlak, teplota atd. Přesnost výsledků je ovlivněna počtem buněk ve výpočetní oblasti. Obecně lze stanovit, že s rostoucím počtem buněk se zlepšuje přesnost výpočtu. Přesnost výpočtu je ovšem dána dalšími faktory, například typem buňky, řádem numerické metody anebo zvoleným matematickým modelem popisující daný fyzikální jev. Omezující vliv v praxi má ovšem také hardwarová kapacita a limitace výpočetního času [11].

Výše popsané geometrie, tedy jejich výpočetní oblasti, byly diskretizovány v programu Ansys Fluent Meshing 2020 R1.

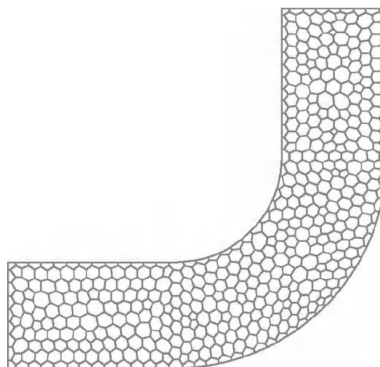
Tento program umožňuje tvorbu nestruturované výpočetní sítě a je vhodný pro tvorbu velkých sítí o komplexních tvarech. Ansys Fluent Meshing umožňuje tvorbu tetraherálních, hexahedrálních, polyhedrálních, prismatických anebo pyramidálních buněk [12].

Pro diskretizaci výpočetních oblastí byl pro všechny případy zvolen typ objemových buněk polyhedrální. Pro případy tenkého objemu kolem valivých ložisek pak byly vyzkoušeny varianty s objemovými prismatickými buňkami, tvořeny metodou „Thin volume mesh“.

Kapitola popisuje diskretizaci výpočetní oblasti všech geometrií. V kapitole je také popsána studie nezávislosti sítě na Geometrii 1, která byla řešena nestacionární. Studie nezávislosti obsahovala celkem pět variant výpočetní sítě, byla vybrána jedna varianta, jejíž nastavení bylo použito pro diskretizaci zbylých variant geometrií. Dále jsou v kapitole popsány teoretické poznatky k nastavení výpočetní sítě a k vybranému typu buněk.

### 6.1. Polyhedrální buňky

Polyhedrální buňky tvoří nestruturované sítě, jejich výhoda spočívá v menším počtu generovaných buněk s porovnáním s jinými tetraedrálními či hybridními výpočetními sítěmi při zachování přesnosti výsledků. Počet buněk může být 3 až 5krát nižší, než počet buněk při použití tetraedrální sítě. Obecně lze konstatovat, že bude dosaženo dřívější konvergence výpočtu při menší hardwarové náročnosti [12]. Příklad polyhedrální sítě je znázorněn na obrázku 17.



Obrázek 17 - Příklad polyhedrální sítě [11]

### 6.1.1. Kvalita polyhedrální sítě

Pro dosažení přesných výsledků při použití polyhedrální sítě je potřeba dodržet následující kritéria kvality buněk ve výpočetní síti [12].

- ◁ Poměr stran, neboli „Aspect ratio“, pro prizmatickou vrstvu by mělo být nižší než 50 [12].
- ◁ Objemové buňky by měly mít co možná nejnižší hodnotu zkosení, neboli „Skewness“ [12].
- ◁ Inverzní ortogonální kvalita, neboli „Inverse Orthogonal quality“, by měla být co možná nejbližší k hodnotě 0 [12].

## 6.2. Objemové prizmatické buňky – „Thin volume mesh“

Prizmatické buňky tvořeny funkcí „Thin volume mesh“ mohou být v Ansys Fluent Meshing vygenerovány z povrchové čtyřúhelníkové nebo trojúhelníkové sítě. Prizmatické buňky se v programu Ansys Fluent běžně používají v místě mezních vrstev nebo v místě potřeby lokálního zjemnění výpočetní sítě pro popis polí s velkými lokálními gradienty. Funkce „Thin volume mesh“ se využívá k prodloužení vstupů/výstupů z výpočetních domén, kde by například mohlo dojít ke zpětnému proudění (pro případ výstupu proudu z domény). Dále se takto vytvořené prizmatické buňky využívají například v tenkých vrstvách. Funkce „Thin volume mesh“ pracuje na principu vytažení objemové sítě ze základní „zdrojové“ povrchové sítě do „cílové“ povrchové sítě [12].

## 6.3. Generování výpočetní sítě pro Geometrii 1

Na Geometrii 1 byly vytvořeny základní varianty výpočetních sítí, které sloužily pro studii nezávislosti výpočetní sítě. Bylo vytvořeno celkem 5 výpočetních sítí o různých velikostech buněk.

Dále byla na Geometrii 1 vyzkoušena korektnost výsledků při použití funkce „Thin volume mesh“ pro tenké přídavné objemy okolo valivých kuliček.

### 6.3.1. Nastavení povrchové sítě

Zjednodušená geometrie byla naimportována do programu Ansys Fluent Meshing 2020 R1. Byla vygenerována povrchová trojúhelníková síť, ze které byla následně vytvořena objemová polyhedrální síť. Objemová síť je definována velikostí buněk v síti povrchové a dalšími omezeními, které se definují při samotné generaci objemové sítě.

Povrchová síť byla použita jako prostředek k parametrizaci sítě objemové. Díky této parametrizaci bylo možno vyhodnotit studii nezávislosti výpočetní sítě.

Generování povrchové výpočetní sítě bylo definováno následujícími parametry, viz tabulka 3.

**Tabulka 3 - Parametry pro vygenerování povrchové sítě Geometrie 1**

Název podmínky	Hodnota
Minimální velikost buňky	$P_{min}$ [mm]
Maximální velikost buňky	$P_{max}$ [mm]
„Face Proximity“ – minimální počet buněk mezi dvěma sousedními stěnami	3 [-]
„Curvature normal angle“ – úhel zakřivení	10 [°]

Minimální velikost buňky  $P_{min}$  a maximální velikosti buněk  $P_{max}$  byly v tabulce uvedeny jako proměnné. Důvodem je, že hodnota pro  $P_{max}$  byla vázána na maximální geometrické rozměry výpočetní domény a hodnota  $P_{min}$  byla použita jako parametr pro studii nezávislosti sítě. Minimální počet buněk mezi dvěma stěnami a úhel zakřivení byl definován stejný pro všechny výpočetní sítě.

Pro určení maximálních a minimálních rozměrů jednotlivých buněk definujeme následující bezrozměrné čísla.

**Tabulka 4 - Bezrozměrová čísla pro diskretizaci výpočetního objemu**

Bezrozměrná čísla	Definice
$K_{min}$	$K_{min} = \frac{t}{P_{min}}$
$K_{max}$	$K_{max} = \frac{l}{P_{max}}$

Proměnná  $l$  je nejdelší hrana výpočetní domény  $l = \frac{\varnothing D - \varnothing d}{2} = 30$  [mm] a  $t$  je šířka mezery přidavného objemu.

Bezrozměrné číslo  $K_{max}$  pro Geometrii 1, 2 i 3 bylo nastaveno na hodnotu  $K_{max} = 15$ , tedy maximální velikost buněk v povrchové síti byla 2 mm.

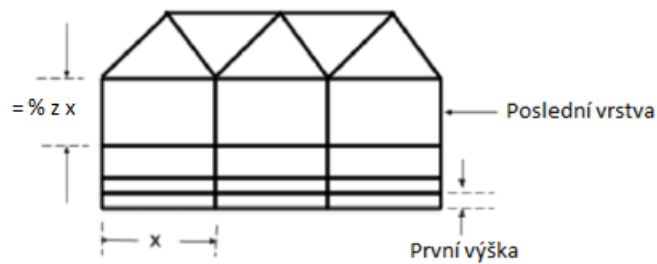
Podmínka pro minimální velikost buňky, tedy hodnota bezrozměrového čísla  $K_{min}$ , byla využita jako parametr, k již zmíněné studii nezávislosti výpočetní sítě. Studie nezávislosti sítě bude popsána v kapitole 6.4. Pro první výpočetní síť bylo nastaveno  $K_{min} = 2$ , tedy minimální velikost buňky byla nastavena na hodnotu  $P_{min} = 0,125$  mm.

Povrchová síť je znázorněna na obrázku v příloze č. 1.

### 6.3.2. Nastavení prismatické vrstvy v blízkosti stěn

Prismatická vrstva v blízkosti stěn v celé výpočetní doméně byla tvořena metodou „last ratio“. Tato metoda spočívá v nastavení výšky první vrstvy buněk a dále v nastavení procentuální velikosti poslední vrstvy buněk v mezní prismatické vrstvě. Procentuální velikost se počítá z velikosti nastavené v povrchové síti [12].

Schéma takovéto mezní vrstvy je zobrazeno na obrázku 18.



Obrázek 18 - Last ratio [12]

Podmínky pro vygenerování prismatické vrstvy v blízkosti stěn byly nastaveny následovně:

- ⟨ Počet prismatických vrstev byl v celé výpočetní doméně roven 5.
- ⟨ Výška poslední vrstvy byla nastavena na 40 % z velikosti buňky v povrchové síti.
- ⟨ Výška první vrstvy byla nastavena parametricky  $\frac{P_{min}}{10}$ .

### 6.3.3. Nastavení objemové sítě

Z předem vytvořené povrchové trojúhelníkové sítě byla vygenerována síť objemová s mezní vrstvou. Výpočetní síť byla generována separátně v 11 nezávislých částech. Vznikla tak nekonformní výpočetní síť, kde byly všechny části následně spojeny přes „grid interface“ v další fázi definice výpočetního modelu. Dvě části výpočetní sítě připadaly na stacionární objemy (pravá a levá část olejové lázně), jedna část výpočetní sítě, která se nacházela mezi stacionárními částmi, reprezentovala objem uvnitř ložiska a zbylých 8 částí výpočetní sítě reprezentovaly objemy okolo valivých kuliček.

Objemové buňky byly generovány jako polyhedrální o maximální velikosti totožné s maximální velikostí buňky v povrchové výpočetní síti, tedy  $P_{max} = 2$ , růst buněk byl pak nastaven na hodnotu 1,2. Toto číslo udává maximální zvětšení aktuálně generované buňky od předchozí.

Objemová výpočetní síť je znázorněna na obrázku, viz příloha č. 2, kde je znázorněn řez jednou polovinou výpočetní domény.

## 6.4. Studie nezávislosti výpočetní sítě

V praxi je snaha o docílení redukce hardwarových nároků a redukce výpočetního času při zachování správnosti výsledků. Z toho důvodu byla provedena studie nezávislosti výpočetní sítě. Studie zohledňuje vliv hrubosti sítě na správnost CFD výsledků.

Studie byla provedena pouze na Geometrii 1. Bylo vytvořeno celkem pět výpočetních sítí, včetně výpočetní sítě popsané v kapitole 6.3. o různém počtu buněk. Velikost buněk, a tím i daný počet buněk v celé výpočetní oblasti, byl určen parametrem  $K_{min}$ . Rozdíl v jednotlivých variantách je popsán v tabulce 5.

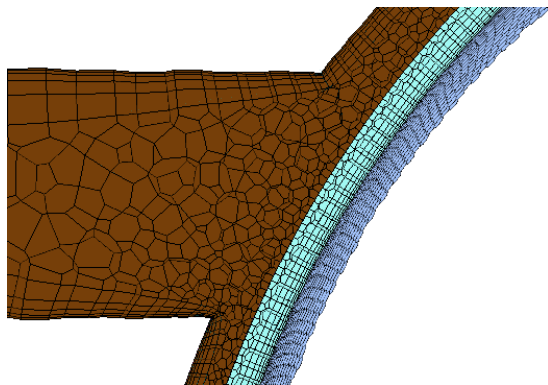
**Tabulka 5 - Varianty výpočetní sítě pro verifikaci sítě**

	$K_{\min}$	Celkový počet buněk v milionech	„Skewness“ zkosené objemové sítě [-]	Hustota výpočetní sítě
Varianta č. 1	2	9,5	0,86	18352
Varianta č. 2	1	3,1	0,87	5989
Varianta č. 3	0,5	1,15	0,94	2222
Varianta č. 4	0,25	0,66	0,96	1275
Varianta č. 5	0,125	0,44	0,96	850

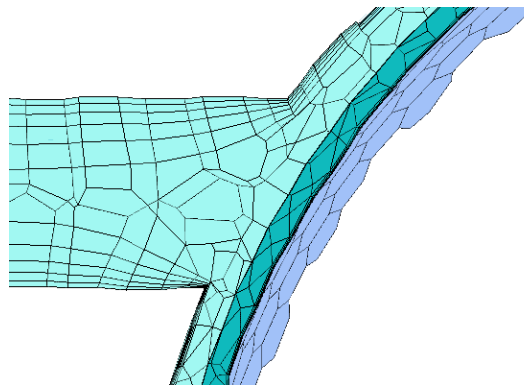
Hustota sítě je dána následujícím vztahem (5):

$$(5) \frac{\text{Počet buněk [-]}}{\text{Objem výpočetní oblasti [ ]}} = \text{Hustota výpočetní sítě [1/cm}^3\text{]}$$

V tabulce můžeme vidět vliv koeficientu  $K_{\min}$  na celkový počet buněk a na hustotu sítě. Dále je názorné, že s klesajícím koeficientem se zhoršuje kvalita výpočetní sítě. Kvalita výpočetní sítě v tabulce zastoupena pouze jednou funkcí, která zohledňuje kvalitu zkosení buněk, a to „Skewness“. Zhoršená kvalita je dána většími buňkami v okolí valivých kuliček a jejich přídavného objemu. Nicméně i výpočetní síť s nejhorsí kvalitou „Skewness“ je v souladu s manuály od firmy Ansys, kdy je horní mez „Skewness“ pro výpočet 0,98 [12]. Rozdíl v hrubosti je znázorněn na obrázku 19, který znázorňuje detail na nejjemnější výpočetní síti, a na obrázku 20, který znázorňuje Variantu č. 4.



Obrázek 19 - Detail pohled na řez výpočetní sítě Varianta č. 1



Obrázek 20 - Detailní pohled na řez výpočetní sítě Varianta č. 4

Z obrázků je patrná rozdílnost v jemnosti výpočetní sítě. Na obrázku vpravo dokonce špatným nastavením sítě není zřetelná prismatická vrstva mezi klecí a valivou kuličkou. Prismatická vrstva v této oblasti nebyla vygenerována korektně vlivem nastavení moc velkých buněk v povrchové výpočetní síti. Tato varianta výpočetní sítě tedy není korektní.

#### 6.4.1. Definice sil a momentů na stěnu v Ansys Fluent

Fluent umožňuje vyhodnocení sil na vybraných stěnách v zadaném směru, vyhodnocení momentu kolem zadaného středu otáčení a specifického vektoru (určuje směr otáčení) a dále umožňuje vyhodnocení středu tlaku. Výše uvedená funkce je využívána pro určování aerodynamických veličin, a to například vztlakové či odporové síly, koeficienty momentu či již zmíněného středu tlaku například pro obtékání leteckého profilu [10].

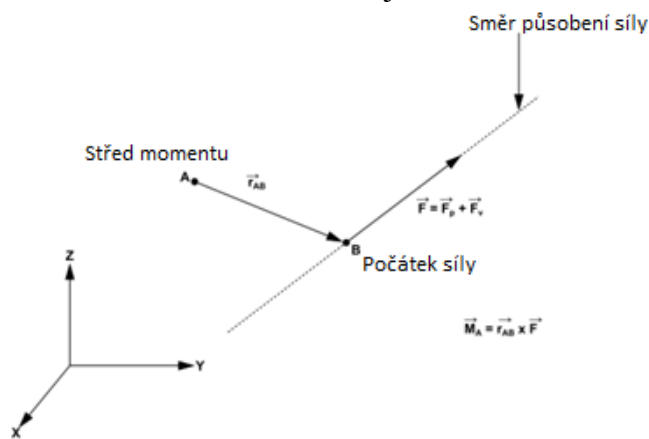
### Definice síly na stěnu v Ansys Fluent

Celková síla  $F_a$  působící na stěnu výpočetní domény ve směru specifického vektoru  $\vec{a}$  je počítána jako skalární součin specifického vektoru  $\vec{a}$  s vektorem tlakové síly  $\vec{F}_p$  a s vektorem viskózní síly  $\vec{F}_v$  [10]. Celková síla je dána rovnicí (6):

$$(6) \quad F_a = \vec{a} * \vec{F}_p + \vec{a} * \vec{F}_v$$

### Definice momentu na stěnu v Ansys Fluent

Celkový moment  $\vec{M}_A$  působící na stěnu vztažený k počátku otáčení A se počítá vektorovým součinem vektoru  $\vec{r}_{AB}$  s vektorem celkové síly  $\vec{F}$ , která je rovna součtu sil  $\vec{F}_p$  a  $\vec{F}_v$ . Vektor  $\vec{r}_{AB}$  je vektorem začínajícím v bodě A směřujícím k bodu B. Bod B pak reprezentuje počátek celkové síly  $\vec{F}$  [10]. Schématické definice momentu je znázorněno na obrázku 21.



Obrázek 21 - Definice momentu na stěnu [10]

Celkový moment  $\vec{M}_A$  je dán následující rovnicí (7):

$$(7) \quad \vec{M}_A = \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_p + \vec{r}_{AB} \times \vec{F}_v$$

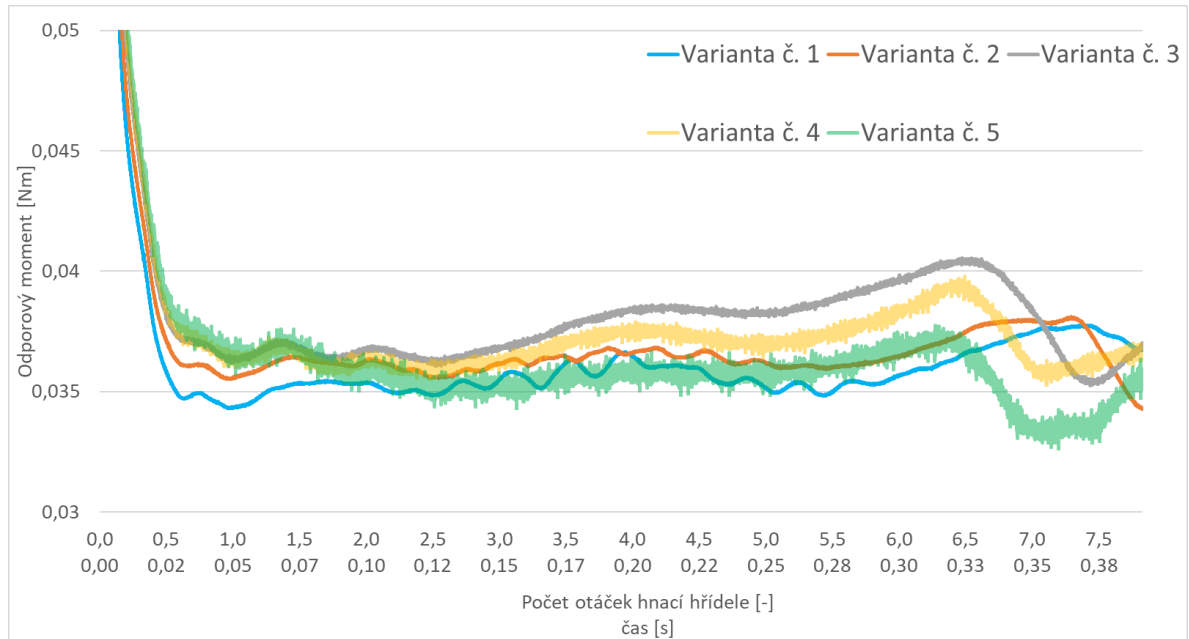
#### 6.4.2. Vyhodnocení studie nezávislosti výpočetní sítě

Pro vyhodnocení korektnosti výpočetní sítě byl sledován celkový odporový moment působící na všechny stěny (vyjímaje všechny „interface“) nacházející se ve výpočetním objemu a dále bylo porovnáváno proudové pole jednotlivých variant. Sledovaný odporový moment byl definován popsanou metodikou v předchozí podkapitole, s definovaným středem otáčení v bodě A, který byl uvažován ve středu otáčení valivého ložiska. Tento moment reprezentuje odpor způsobený mazivem uvnitř ložiska a je tvořen silou odporovou a silou způsobenou od viskozity oleje.

Studie nezávislosti byla v nestacionárních variantách z důvodu limitovaných výpočetních možností omezena na průběh celkových odporových momentů pouze na 7,5 otáčky hnací hřídele, která roztáčí ložisko. Tyto otáčky hřídele odpovídají času 0,392 sekundy.

Průběh celkových odporových momentů pro všechny varianty výpočetních sítí je znázorněn v grafu 1.

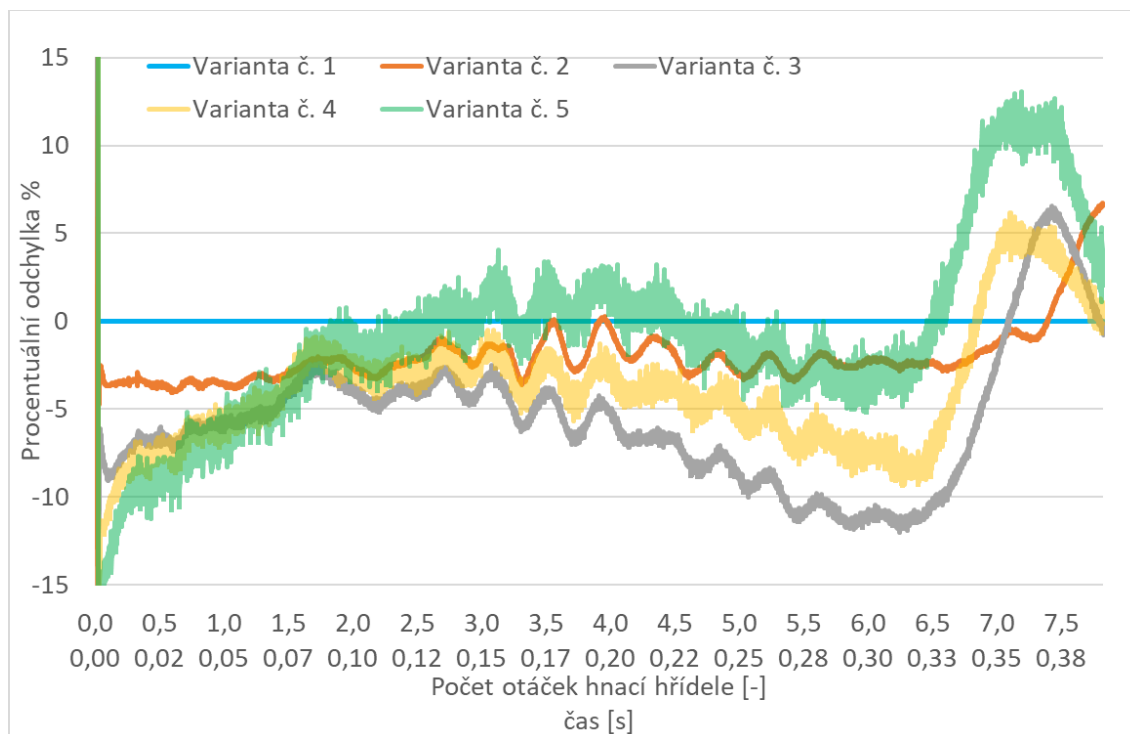




**Graf 1 - Průběh celkového odporového momentu pro studii nezávislosti výpočetní sítě**

Z výše přiloženého grafu je pro nás nejdůležitější průběh odporového momentu zobrazen modrou barvou. Tento průběh momentu byl získán z výpočetní sítě Varianty č. 1 a byl uvažován vlivem jemnosti výpočetní sítě jako nejpřesnější. V grafu je viditelná vysoká hodnota sledovaného momentu při začátku výpočtu. Tato hodnota následně klesá až k ustálené hodnotě, která je viditelná na celém průběhu, který je znázorněn na grafu 5. Na výše zobrazeném grafu vidíme totožný trend průběhu všech momentů variant výpočetních sítí.

Zlom nastává v čase 0,32 s, kdy sledovaný moment pro varianty s hrubší výpočetní sítí s označením Varianta č. 3, Varianta č. 4 a Varianta č. 5 začíná klesat. Trend výsledků zmíněných variant předbíhá trend výsledků výpočetní sítě Varianty č. 1. Sledovaný moment Varianty č. 1 začal klesat až od výpočetního času 0,37 s. Nutno podotknout, že změna průběhu sledovaného momentu pro Variantu č. 1 se odráží od nižšího vrcholu nežli ve variantách s hrubší sítí.



**Graf 2 - Průběh procentuální odchylky sledovaného odporového momentu**

Výše zobrazený graf 2 zobrazuje procentuální odchýlení výsledků Variant č. 2 až 5 od Varianty č. 1. Varianta č. 1 je reprezentována modrou barvou a její hodnota v čase pro tento graf nabývá 0. Z grafu vidíme vysoké hodnoty odchýlení. Nutno podotknout, že odchýlení je dáno jak samotnou odchylkou, tak vlivem posunu trendu jednotlivých variant. Proto bude dále studie nezávislosti rozebírána především dle dosahovaných lokálních maxim a minim s ohledem na změnu trendu.

**Tabulka 6 - Průměrné hodnoty sledovaného momentu**

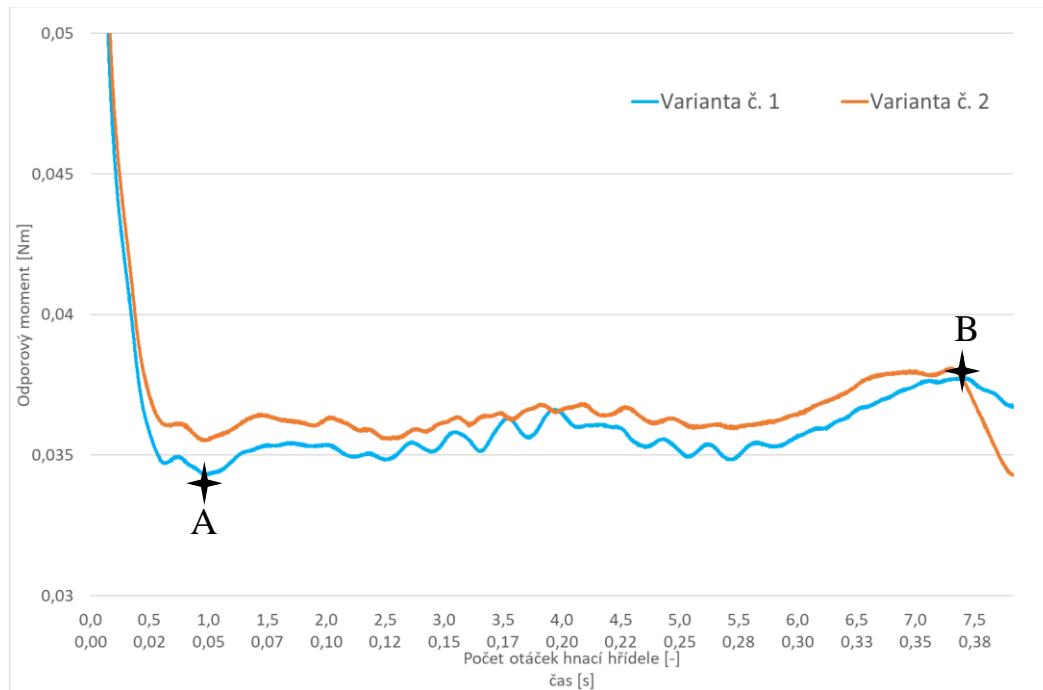
	Průměrná hodnota [Nm]	Procentuální odchylka
Varianta č. 1	0,0355	0
Varianta č. 2	0,0362	2,2
Varianta č. 3	0,0377	6,4
Varianta č. 4	0,0369	4,2
Varianta č. 5	0,0359	1,2

Průměrné hodnoty v tabulce byly počítány od 1000. iteračního kroku (čas výpočtu 0,05 s) do iteračního kroku číslo 6300 (čas výpočtu 0,3 s). Důvodem bylo nezapočítat vysoké hodnoty sledovaného momentu na začátku výpočtu do průměrných hodnot. Procentuální odchylky variant v tabulce 6 jsou počítány od průměrné hodnoty sledovaného momentu Varianty č. 1.

Z tabulky je patrné, že Varianty č. 3 a č. 4 dosahují vyššího odchýlení než Varianty č. 2 a 5. Nebudou tedy dále rozebírány. Varianta č. 5 i přes slibné průměrné hodnoty nebude dále uvažována, a to z důvodu rozdílného průběhu sledovaného momentu, viz graf 1, a rozsáhlého intervalu vysokých odchýlení, viz graf 2.

Dále budou tedy rozebírány pouze výsledky z Varianty č. 1 a č. 2.

Detailnější graf je pak znázorněn níže, viz graf 3.



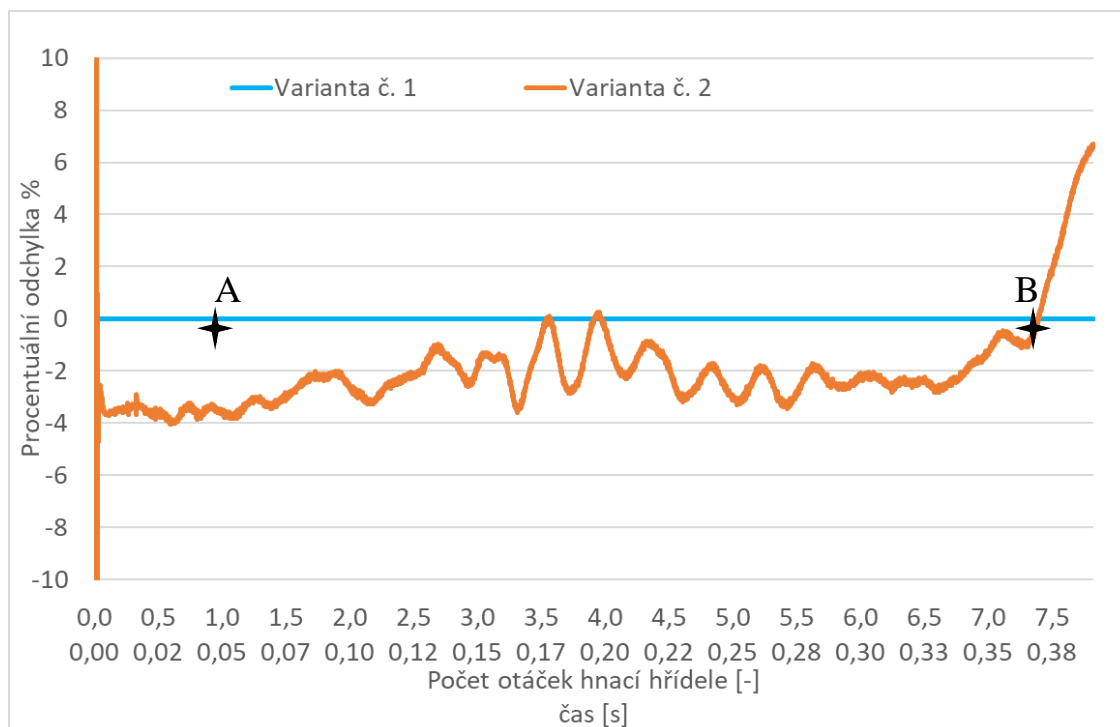
**Graf 3 - Detailní průběh celkového momentu pro studii nezávislosti výpočetní sítě**

Výše zobrazený graf 3 můžeme rozdělit do tří pomyslných částí. První část by byla uvažována od počátku výpočtu v čase 0,0 s a byla by zakončena lokálním minimem v bodě A sledovaného momentu v čase 0,05 s. V bodě A sledovaný moment pro Variantu č. 1 nabývá přibližné hodnoty 0,34 Nm. V této části můžeme prohlásit, že trend průběhu sledovaného momentu je pro obě varianty výpočetní sítě totožný s procentuální odchylkou do 4 %, viz graf 4.

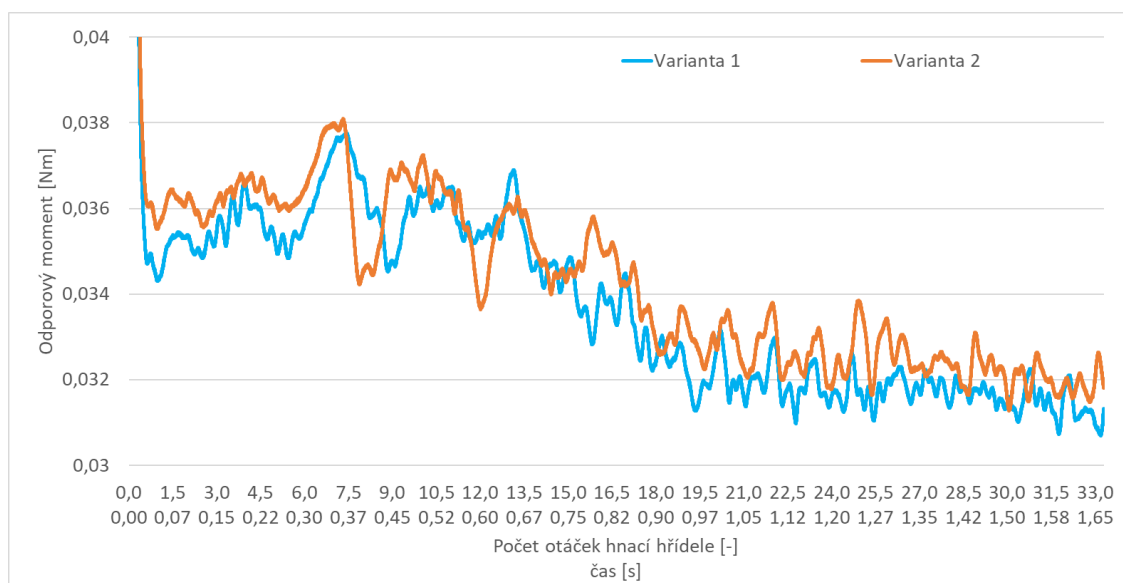
Druhá pomyslná část grafu začínající minimem A v čase 0,05 s a končící lokálním maximem B v čase 0,365 s. Takovou část lze popsat jako část, kde obě varianty mají totožný trend průběhu sledovaného momentu s maximálním procentuálním odchýlením do 4 %, viz graf 4.

Ve třetí pomyslné části dochází k vysokému odchýlení, přesahující 6 %, Varianty č. 2 od Varianty č. 1. nicméně se jedná pouze o lokální skok. Průběh obou variant je znázorněn na grafu 5. Zde je názorný totožný průběh sledovaného momentu v obou variantách.

Z výše popsaného byla pro další výpočty vybrána jako nejvhodnější výpočetní síť Varianty č. 2.



**Graf 4 - Detailní průběh procentuálního odchýlení**

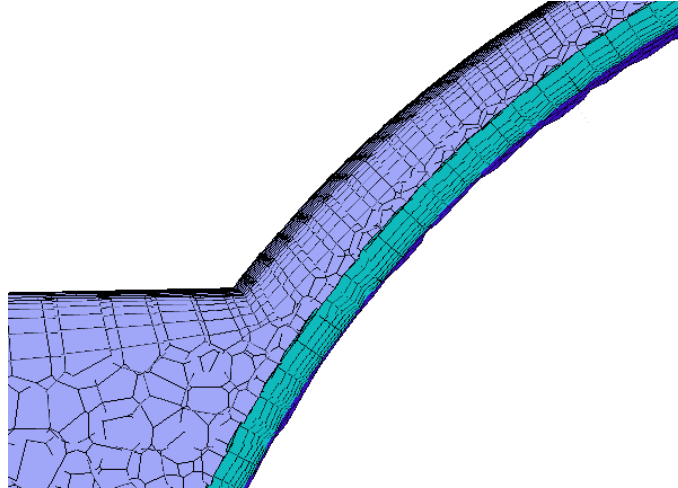


**Graf 5 - Celkový průběh sledovaného momentu Varianty 1 a 2**

V grafu 5 je názorné, že trend průběhu sledovaného momentu je pro obě varianty sítě totožný. Rozdíl je pak v lokálních extrémech sledované veličiny. Tato rozdílnost je způsobena hrubším nastavením výpočetní sítě. Další rozbor výše zobrazeného průběhu bude rozebrán pro Variantu č. 2 v kapitole 8.1.

## 6.5. Generování výpočetní sítě pro Geometrii 1 – Prismatická síť

Pro Geometrii 1 byla vytvořena další varianta výpočetní sítě pojmenovaná Prismatická síť, a spočívala ve využití funkce „Thin Volume Mesh“. Touto metodou byla vytvořena prismatická objemová síť pro všechny přídavné objemy valivých kuliček. Objemová síť byla vygenerována v souladu s pravidly pro vygenerování výpočetní sítě nazvané Varianta č. 2. Výpočetní síť je znázorněna na obrázku 22.



Obrázek 22 - Prismatická objemová síť

Na obrázku můžeme vidět objemovou síť uvnitř ložiska a objemovou síť v přídavném objemu valivých kuliček. Přídavný objem byl vytvořen šesti prismatickými vrstvami s nastaveným poměrným růstem jejich výšky 1,4. Pravidlo šesti buněk v tomto objemu bylo určeno z předchozí varianty, kde bylo pět buněk v mezní vrstvě a jedna objemová buňka. Takto vygenerovaná výpočetní síť obsahovala  $3,6 \times 10^6$  buněk o nejhorší kvalitě „Skewness“ 0,87.

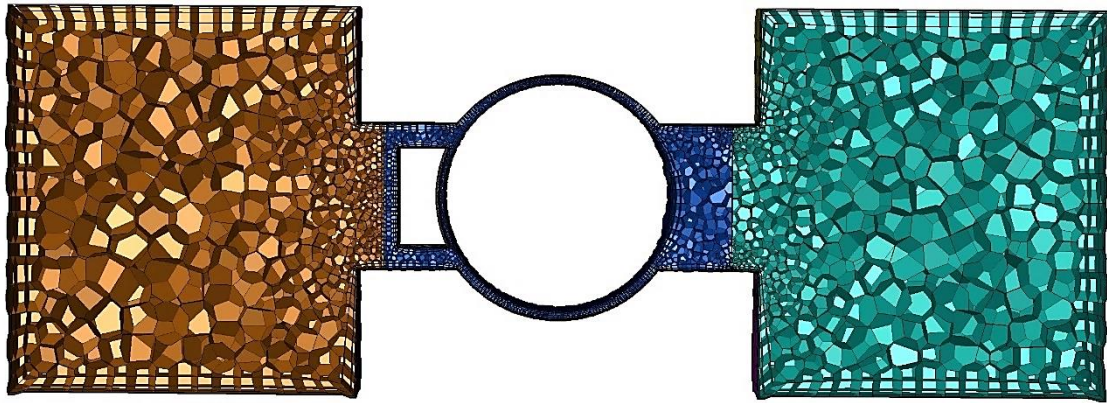
## 6.6. Generování výpočetní sítě pro Geometrii 2

Pro Geometrii 2 byla vygenerována jedna varianta výpočetní sítě. Celá výpočetní síť byla rozdělena na tři části. Dvě části připadaly na nehybnou olejovou lázeň, stejně jako v předešlé kapitole, a jedna část pak na rotující objem uvnitř ložiska. Objemy obklopující kuličky byly v této geometrii spojeny s objemem uvnitř ložiska.

Byla tak vytvořena polyhedrální síť v souladu s pravidly pro vygenerování sítě nazvané Varianta č. 2, viz předchozí kapitoly o diskretizaci výpočetní oblasti.

Vygenerovaná výpočetní síť v řezu pro Geometrii 2 je znázorněna na obrázku 23 a na obrázku 24.

Celkový počet buněk v této síti byl  $2,25 \times 10^6$  při nejhorší kvalitě buňky „Skewness“ 0,84. Je zřejmé, že spojením přídavného objemu kuliček s objemem uvnitř ložiska je možné dosáhnout lepší kvality sítě spolu s menším počtem buněk.



Obrázek 23 - Řez jednou polovinou výpočetní sítě pro Geometrii 2



Obrázek 24 - Detailní řez jednou polovinou výpočetní sítě pro Geometrii 2

## 6.7. Generování výpočetní sítě pro Geometrii 3

Objemová výpočetní síť pro Geometrii 3 byla rovněž generována v souladu s výpočetní sítí nazvanou Varianta č. 2. Rozdíl spočívá ve využití funkce „Thin Volume Mesh“, viz kapitola 6.5., pro všechny přídavné objemy valivých kuliček. Pro Geometrii 3 byly vygenerovány celkem tři varianty výpočetní sítě, každá pro jiný průměr valivých kuliček, viz kapitola 5.3.

Všechny přídavné objemy byly tvořeny šesti prismatickými vrstvami o poměrném růstu jejich výšky 1,4. Varianty objemových sítí pro Geometrii 3 byly pak pojmenovány totožně s rozdílným číslováním, takovéto označení můžeme vidět v tabulce 7. Náhled jednotlivých variant a jejich detailu v tečném dotyku, jsou znázorněny v příloze č. 3 a příloze č. 4.

**Tabulka 7 - Tabulka variant výpočetní sítě Geometrie 3**

	$t$ [mm]	Počet buněk $\times 10^6$	Maximální „Skewness“
Náhrada tečnosti 1	0,25	3,5	0,87
Náhrada tečnosti 2	0,125	3,5	0,87
Náhrada tečnosti 3	0,075	3,5	0,87

## 7. CFD simulace

Simulace pohybu valivého kuličkového ložiska v olejové lázni byla provedena v programu Ansys Fluent 2020 R1.

Ansys Fluent nabízí rozsáhlou nabídku metod pro výpočet stlačitelných, nestlačitelných, laminárních a turbulentních problémů v oblasti mechaniky tekutin. Použitím tohoto programu lze řešit stacionární anebo nestacionární úlohy. Dále nabízí rozsáhlou škálu matematických modelů například pro prostup tepla nebo pro chemické reakce, tyto metody lze použít i na složité výpočetní domény [10].

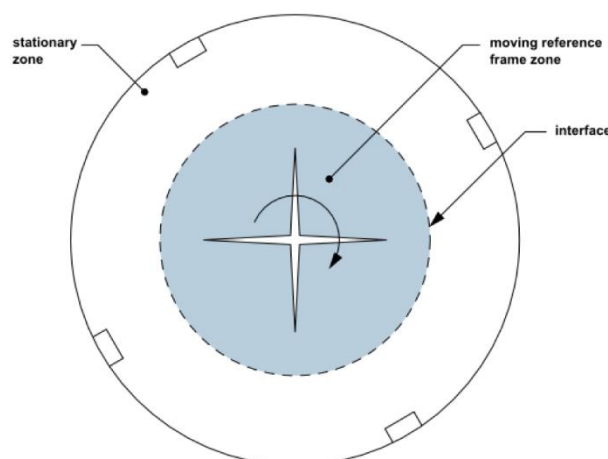
V kapitole jsou popsány použité metody ve výpočtech, okrajové podmínky pro všechny varianty výpočetních sítí a geometrií, dále je popsáno nastavení výpočtu, označení výpočetních variant a podmínky konvergence výpočtů. Dále jsou v kapitole popsány pojmenování jednotlivých stacionárních i nestacionárních výpočetních variant spolu s jejich výpočetní náročností.

### 7.1. Modelování pohybujících se referenčních domén

Tato kapitola popisuje teoretické základy pro modelování proudění v pohybujících se referenčních doménách. Řešiče programu Ansys Fluent řeší rovnice popisující proudění ve výchozím nastavení ve stacionární referenční doméně. Nicméně existuje mnoho problémů, které je potřeba řešit v pohybujících se doménách, například v případě rotujících lopatek, oběžných kol, a jinak vzájemně se pohybujících stěn. Ve většině případů se takovéto problémy řeší nestacionárními výpočty. Při určitých omezeních lze tyto problémy řešit i stacionárně za použití této metody [10].

Při modelování pohybujících se referenčních domén jsou klasické pohybové rovnice proudění modifikovány, tak aby zahrnovaly přídatné zrychlení v okamžiku, kdy pozorovaný „bod“ přestupuje z nepohybujících se domén do pohybujících se domén [10].

Pro nastínění této situace je na obrázku 25 znázorněn lopátkový stroj s jednou stacionární doménou a jednou rotační doménou. Obě domény jsou rozděleny rozhraním zvaným „interface“.



Obrázek 25 - Příklad pohybující se referenční domény [10]



## 7.2. Modelování problémů s pohybující se výpočetní sítí

Použití metody pohybujících se výpočetních sítí umožňuje simulovat fyzický pohyb jednotlivých částí výpočetní sítě relativně k jiné části výpočetní sítě. Všechny části výpočetní sítě musí být spojeny nekonformním rozhraním, na kterém nejsou spojeny uzly nebo vrcholy jednotlivých buněk mezi spojovanými výpočetními částmi. Při pohybu výpočetní sítě v čase je toto nekonformní rozhraní aktualizováno, aby odpovídalo jejím posunům. Je nutno podotknout, geometrie rozhraní na obou částech výpočetní sítě musí být po celou dobu stejná nebo alespoň zachovávat minimální geometrické odchýlení pro udržení kontaktu. V případě, že „interface“ ztratí tento kontakt mezi sousedními částmi, uvažuje řešič tento prostor jako stěnu a výsledky mohou být nekorektní [10].

Pro ilustraci slouží obrázek pro pohybující se referenční domény, viz obrázek 25. Rozdíl spočívá v tom, že v předešlé kapitole je výpočetní síť nehybná, pro popisující se příklad se ale část výpočetní sítě bude otáčet a tím se bude v čase měnit i samotná poloha lopatek v rotační doméně [10].

## 7.3. Okrajové podmínky

Tato kapitola popisuje okrajové podmínky pro výpočet valivého kuličkového ložiska. Byly použity různé okrajové podmínky pro různé varianty geometrií a výpočetních sítí za cílem určení nejvhodnější výpočetní metodiky. Okrajové podmínky byly děleny do následujících variant, viz následující kapitoly.

Nutno podotknout, že ve všech zmíněných variantách byla na všech stěnách (vyjímaje všech „interface“) použita podmínka „no slip“. Tato podmínka udává nulovou relativní rychlost mezi stěnou a tekutinou v jejím přímém okolí (v mezní vrstvě).

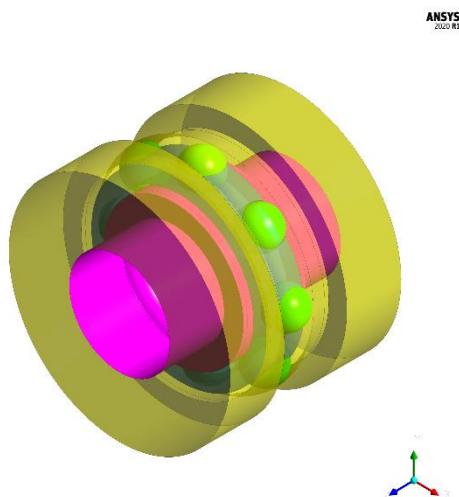
### 7.3.1. Simulace rotace kuliček v přídavném objemu

V referenčním výpočtu byly nastaveny následující okrajové podmínky, které zajistily simulaci plnohodnotného pohybu všech komponent valivého ložiska.

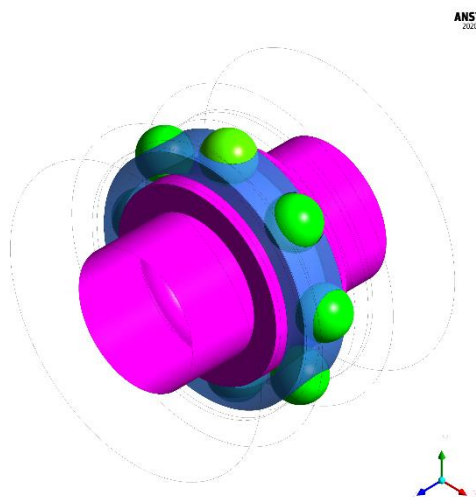
Jednotlivé okrajové podmínky na stěnách výpočetní domény lze definovat následovně. Označení jednotlivých stěn je v souladu s obrázkem 26 a obrázkem 27.

- ◁ Žlutě označené vnější stěny olejové lázně a vnitřní stěny vnějšího kroužku byly nastaveny jako nehybné s absolutní nulovou rychlostí otáčení kolem osy Z neboli  $N_{stac} = 0$  ot/min.
- ◁ Fialově označené stěny hřídele neboli vnitřní stěny výpočetní domény olejové lázně a vnější stěny vnitřního kroužku byly nastaveny na rychlost otáčení hřídele  $N = -1200$  ot/min. Záporné znaménko znamená, že se hřídel otáčela po směru hodinových ručiček.
- ◁ Modře označené stěny kuličkové klece byly nastaveny jako stacionární relativně k jejich výpočetní oblasti. Pohybovaly se tedy stejnou rychlostí jako jejich obklopující výpočetní doména a nevykonávaly další pohyb. Zde můžeme definovat pohyb objemu uvnitř ložiska. Tento objem se otáčel po směru hodinových ručiček okolo hlavní osy otáčení Z, a to otáčkami  $N_S = -458$  ot/min.
- ◁ Zelenou barvou jsou označeny přídavné objemy kuliček. Každý z přídavných objemů rotoval kolem vlastní osy otáčení, která je paralelní s hlavní osou otáčení Z, otáčkami  $N_W = 3871$  ot/min. Dále byl každý z přídavných objemů unášen okolním objemem uvnitř ložiska. Okolní objem konal stejný rotační pohyb okolo osy jako

modré stěny klece. Přídavné objemy kuliček byly tedy unášeny otáčkami  $N_S = -458$  ot/min okolo osy Z. Samotné stěny kuliček byly nastaveny jako stacionární vůči své výpočetní doméně, takže se otáčely stejnou rychlostí jako jim přiřazený přídavný objem.



Obrázek 26 - Zobrazení okrajových podmínek



Obrázek 27 - Zobrazení okrajových podmínek bez stacionární vnější stěny

Tabulka 8 - Souřadnicové podmínky pro jednotlivé rotace objemů

Výpočetní objem	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rychlost otáčení
Objem ložiska	0	0	0	$N_S$
Valivá kulička 1	0	40,25	0	$N_W$
Valivá kulička 2	-28,46	28,46	0	$N_W$
Valivá kulička 3	-40,25	0	0	$N_W$
Valivá kulička 4	-28,46	-28,46	0	$N_W$
Valivá kulička 5	0	-40,25	0	$N_W$
Valivá kulička 6	28,46	-28,46	0	$N_W$
Valivá kulička 7	40,25	0	0	$N_W$
Valivá kulička 8	28,46	28,46	0	$N_W$

Rotace všech objemů byly nastaveny v souladu s tabulkou 8. Sloupce X, Y, Z definují střed otáčení v počátku výpočtu. Pro všechny rotace byl nastaven vektor směru otáčení (0,0,1) neboli vektor směřující v kladném směru osy Z. Výpočet s okrajovými podmínkami v této kapitole bude dále označen jako **Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1** a **Vyp\_Nest\_Ref\_Prism\_G1**. První označení je platné pro variantu výpočetní sítě Varianta č. 2 a druhé označení pro variantu výpočetní sítě Prismatická síť.

### 7.3.2. Výpočet s okrajovou podmínkou na stěně kuliček

Takto definovaný výpočet je v rozporu s předepsanou výpočetní metodikou uvedenou v literatuře [12] a [10]. V této literatuře je uvedeno, že každá rotačně nehladká stěna konající

pohyb, by měla být obklopena vlastním objemem, který bude tento pohyb vykonávat, viz kapitola 7.1. Přesto bylo nastavení okrajových podmínek připraveno a výsledky simulace byly porovnány se správnou metodikou, která je uvedena v předchozí kapitole. Účelem nekorektně nastaveného výpočtu bylo ověření jeho chování s takto nekorektně nastavenými okrajovými podmínkami a vliv na získané výsledky.

Okrajové podmínky na stěnách olejové lázně, vnějším a vnitřním kroužku a na kleci jsou totožné s předchozí kapitolou.

Okrajové podmínky byly nastaveny na Geometrii 2. V této geometrii byl přídavný objem jednotlivých kuliček sloučen s okolním objemem uvnitř ložiska. Zelené stěny, viz obrázek 27, by tedy reprezentovaly samotné stěny kuliček. Na tyto stěny byla nastavena podmínka rotace podobně jako podmínka rotace přídavných objemů. Samotné stěny kuliček konaly rotační pohyb kolem jejich středu otáčení o otáčkách  $N_W = 3871$  ot/min a byly unášeny rotačním pohybem okolního objemu o otáčkách  $N_S = -458$  ot/min.

Výpočet bude dále označen jako **Vyp\_Nest\_Ref\_OP\_V2\_G2**.

### 7.3.3. Výpočet nerotujících kuliček

V této variantě výpočtu byly okrajové podmínky stěn olejové lázně, vnitřního a vnějšího kroužku a stěny klece definovány stejně, jako ve variantě okrajových podmínek uvedených v kapitole 7.3.1. Opět byla použita Geometrie 2, kde byl přídavný objem kuliček spojen s okolním objemem uvnitř ložiska. Ovšem v této variantě nedocházelo k rotaci jednotlivých kuliček. Valivé kuličky byly pouze unášeny okolním objemem o otáčkách  $N_S = -458$  ot/min.

Výpočet byl proveden za účelem popsání vlivu zanedbání pohybu kuliček na výsledky. Výpočet bude dále označen jako **Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G2**.

### 7.3.4. Výpočet tečného dotyku kuliček a kroužků

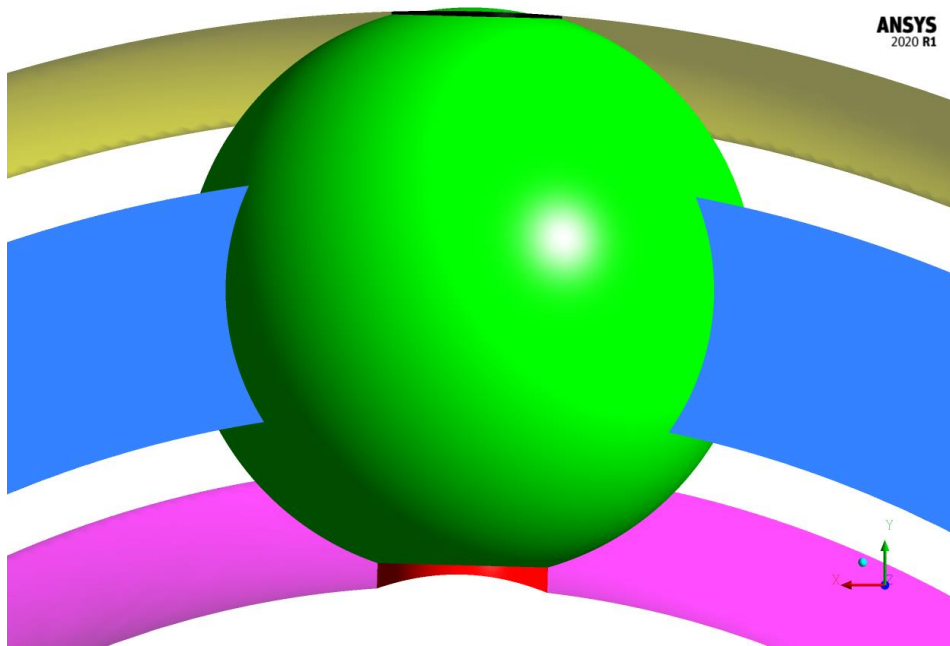
Varianta výpočtu tečného dotyku byla provedena pro nastínění možného nastavení reálných podmínek valení kuliček v ložisku.

Okrajové podmínky jsou v souladu s kapitolou 7.3.1. V této variantě jsou kuličky také obklopeny přídavným objemem, který reprezentuje jejich rotaci. Samotné stěny kuliček jsou pak nastaveny jako stacionární relativně k výpočetní doméně jim přiřazené a jsou tedy tímto objemem unášeny.

Rozdíl v okrajových podmínkách je dán rozdílností geometrií. V tomto případě byl výpočet proveden na Geometrii 3. Musíme tedy přidat další dvě okrajové podmínky pro stěny, které nahrazují tečný dotyk kuliček a stěn kroužků. Zobrazení okrajových podmínek je znázorněno na obrázku 28.

- ◁ Černé stěny u vnějšího kroužku (u vrcholu kuličky), byly nastaveny jako stacionární relativně k výpočetní doméně. Stěny byly unášeny výpočetní doménou uvnitř ložiska otáčkami  $N_S = -458$  ot/min, ale nekonaly žádný další pohyb.
- ◁ Červené stěny u vnitřního kroužku byly nastaveny totožně s vnější stěnou vnitřního kroužku (fialové stěny, viz Obrázek 27). Červené stěny konaly rotační pohyb okolo hlavní osy otáčení Z otáčkami  $N = -1200$  ot/min.

Varianty výpočtů, ve kterých byly použity popsané okrajové podmínky, budou dále označeny **Var\_Nest\_NT1\_V2\_G3**. Třetí část názvu se dále mění podle tloušťky přídavného obalu valivých kuliček, a to na NT1, NT2 a NT3.



Obrázek 28 - Okrajové podmínky pro tečný dotyk

## 7.4. Výpočtová metodika

Pro simulace bylo použito následující nastavení řešiče, viz tabulka 10. V tabulce je popsána výpočtová metodika jak pro stacionární, tak nestacionární výpočty. V práci byl kladen důraz na nestacionární výpočty, ze kterých byly vyvozeny závěry. Přesto byly veškeré varianty vypočítány i jako stacionární. Stacionární výsledky byly využity pro ověření konvergence nestacionárních výpočtů a pro porovnatelnou analýzu proudových polí jednotlivých variant. Dále je nutné podotknout, že výše zmíněná studie nezávislosti sítě byla provedena pouze pro nestacionární nastavení výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1 a na příslušné modifikace výpočetní sítě, jak tomu bylo popsáno v kapitole 6.4.

Použité médium uvnitř výpočetní domény byl převodový olej, dále Oil. Parametry tohoto média jsou vypsány v tabulce 9. Pro všechny varianty výpočtů byla zvolena teplota 80 °C kromě výpočtů, které byly řešeny za cílem odhadu vlivu změny teploty na odporový moment, viz kapitola 10.2.

**Tabulka 9 - Parametry oleje [13]**

Název	Typ	Teplota [° C]	Hustota [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	Dynamická viskozita [ $\frac{kg}{m*s}$ ]
Oil	Fluid	-20	864,6	0,4615
		-10	858,4	0,2067
		0	852,2	0,1038
		10	845,9	0,0574
		20	839,7	0,0345
		40	827,0	0,0151
		60	814,3	0,008
		80	801,5	0,005
		110	782,1	0,0029
		150	756,0	0,0018

**Tabulka 10 - Nastavení řešiče Ansys Fluent**

Ansys Fluent Settings			
Time		Steady	Transient
Solver		Pressure Based	
Gravity		$[0; -9,81; 0] \frac{m}{s^2}$	
Cell Zone Condition		Frame Motion	Mesh Motion
Model	Viscous model	SST k- $\omega$	
Material		Oil	
Solution methods	Scheme	Coupled	
	Gradient	Least Squares Cell Based	
	Pressure	Second Order	
	Momentum	Second Order Upwind	
	Turbulent kinetic energy	Second Order Upwind	
	Specific dissipation rate	Second Order Upwind	
	Transient Formulation	Second Order Implicit	-
	Pseudo Transient	-	off
Monitor	Residuals	$1^{-5}$	
Initialization		Hybrid initialization	

Model turbulence byl pro výpočty valivých ložisek zvolen SST k- $\omega$ . Tento model kombinuje výhody modelu k- $\epsilon$  a k- $\omega$ . Jedná se o robustní model, který kombinuje popis proudění v blízkosti stěn dle k- $\omega$  a zároveň i popis proudění ve volném proudu dle k- $\epsilon$  [14].

Nestacionární varianty výpočtu byly počítány s rozběhovými časovými kroky, které jsou popsány v tabulce 11. V počátku výpočtu je u nestacionárních úloh potřebný „rozběh“ a to pro správnou konvergenci výpočtu. Postupným navyšováním hodnoty kroku dosáhneme požadované hodnoty, při kterém je daná úloha počítána. Hodnota požadovaného časového kroku je uvedena v tabulce 12 spolu s počtem časových kroků na jednu otáčku kuličkové klece.

**Tabulka 11 - Rozběhové časové kroky**

Počet časových kroků	Časový krok [s]	Počet iterací na jeden časový krok
10	$1 \times 10^{-7}$	100
9	$1 \times 10^{-6}$	100
4	$1 \times 10^{-5}$	100

**Tabulka 12 - Časové kroky pro jednu otáčku kuličkové klece**

Počet časových kroků	Časový krok [s]	Počet iterací na jeden časový krok
2619	$5 \times 10^{-5}$	100

Na každý časový krok se dle tabulek počítalo 100 iterací. Časový krok mohl být ukončen dříve než po dovršení sté iterace, a to po dosažení kritérií konvergence. Kritérium konvergence bylo pro všechny sledované veličiny definované Fluentem nastaveno na  $1 \times 10^{-5}$ . Kritérium konvergence pro sledovaný odporový moment na všech stěnách bylo nastaveno na hodnotu  $1 \times 10^{-4}$

## 7.5. Označení nestacionárních výpočetních variant

V níže uvedené tabulce 13 jsou uvedeny všechny nestacionární varianty, které byly pro jednotlivé geometrie počítány. Tabulka nezahrnuje varianty výpočetní sítě pro studii nezávislosti výpočetní sítě. Tyto varianty byly již popsány v předchozích kapitolách. Formát označení je následující: První řetězec je vždy stejný, druhý řetězec označuje, zda byl výpočet stacionární či nestacionární, třetí řetězec vyjadřuje název okrajových podmínek, čtvrtý řetězec označuje použitou variantu výpočetní sítě a pátý řetězec použitou variantu geometrie.

**Tabulka 13 - Označení nestacionárních výpočtů**

	Označení varianty výpočtu	Výpočetní síť	Geometrie	
Referenční výpočet	<b>Vyp_Nest_Ref_V2_G1</b>	Varianta č. 2	Geometrie 1	
Referenční výpočet – Prismatická síť	<b>Vyp_Nest_Ref_Prism_G1</b>	Prismatická síť		
Nerotující kuličky	<b>Vyp_Nest_NK_V2_G2</b>	Varianta č. 2	Geometrie 2	
Rotace pomocí o. p.	<b>Vyp_Nest_OP_V2_G2</b>			
Náhrada tečnosti 1	<b>Vyp_Nest_NT1_Prism_G3</b>	Prismatická síť	Geometrie 3	Náhrada tečnosti 1
Náhrada tečnosti 2	<b>Vyp_Nest_NT2_Prism_G3</b>			Náhrada tečnosti 2
Náhrada tečnosti 3	<b>Vyp_Nest_NT3_Prism_G3</b>			Náhrada tečnosti 3

## 7.6. Označení stacionárních výpočetních variant

Stejně jako v předchozí kapitole je v níže zobrazené tabulce 14 uvedené označení všech stacionárních variant, které byly počítány. Tabulka opět nezahrnuje varianty pro studii nezávislosti sítě.

Tabulka 14 - Označení stacionárních výpočtů

	Označení varianty výpočtu	Výpočetní síť	Geometrie	
Referenční výpočet	<b>Vyp_Stac_Ref_V2_G1</b>	Varianta č. 2	Geometrie 1	
Referenční výpočet – Prismatická síť	<b>Vyp_Stac_Ref_Prism_G1</b>	Prismatická síť		
Nerotující kuličky	<b>Vyp_Stac_NK_V2_G2</b>	Varianta č. 2	Geometrie 2	
Rotace pomocí o. p.	<b>Vyp_Stac_OP_V2_G2</b>			
Náhrada tečnosti 1	<b>Vyp_Stac_NT1_Prism_G3</b>	Prismatická síť	Geometrie 3	Náhrada tečnosti 1
Náhrada tečnosti 2	<b>Vyp_Stac_NT2_Prism_G3</b>			Náhrada tečnosti 2
Náhrada tečnosti 3	<b>Vyp_Stac_NT3_Prism_G3</b>			Náhrada tečnosti 3



### 7.7. Výpočetní časy a splnění podmínky konvergence jednotlivých nestacionárních variant

Níže zobrazená tabulka 15 dává informaci o výpočetní náročnosti jednotlivých nestacionárních variant.

Tabulka 15 - Výpočetní náročnost nestacionárních výpočtů

	Velikost výpočetní sítě x 10 <sup>6</sup>	Počet výpočetních jader	Dosažena podmínka konvergence	Výpočetní čas [min] na 1000 časových kroků
Vyp_Nest_Ref_V2_G1	3,1	32	Ano	437
Vyp_Nest_Ref_Prism_G1	3,6	32	Ano	459
Vyp_Nest_NK_V2_G2	2,2	32	Ano	189
Vyp_Nest_OP_V2_G2	2,2	32	Ano	304
Vyp_Nest_NT1_V2_G3	3,5	32	Ano	713
Vyp_Nest_NT2_V2_G3	3,5	32	Ano	540
Vyp_Nest_NT3_V2_G3	3,5	32	Ano	1298

Z tabulky je patrné, že nejméně náročná varianta na výpočet je varianta Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G2. Tato varianta má nejnížší počet buněk ve výpočetní síti a také nezahrnuje relativní pohyb samotných valivých kuliček. Bohužel tato varianta výpočtu není tak přesná jako zbylé varianty. V porovnání s variantou Vyp\_Nest\_OP\_V2\_G2 můžeme vidět, že výpočetní čas je trojnásobný. To je dáno špatným nastavením výpočtu, bude popsáno dále.

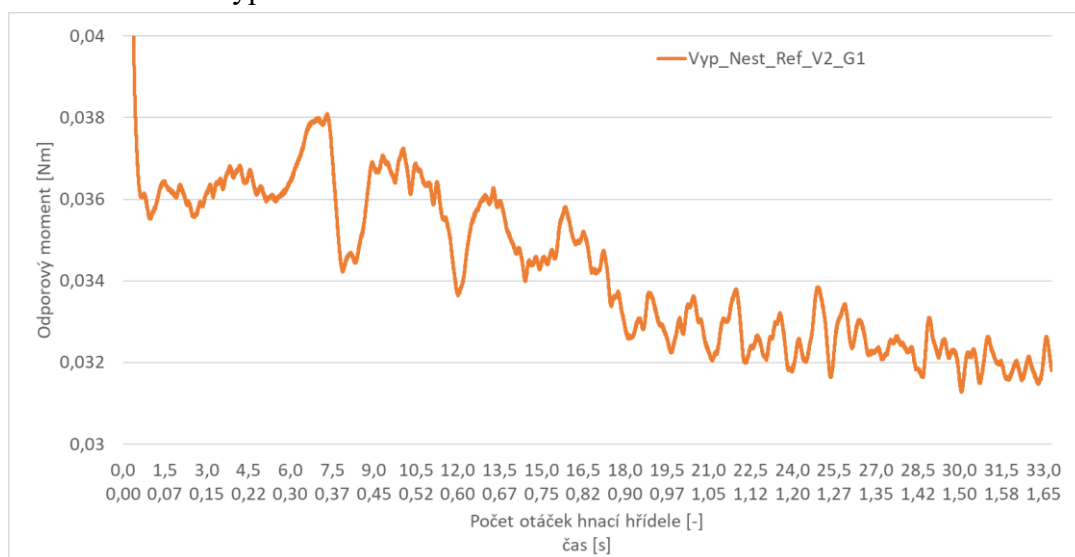
Nejnáročnější varianta na výpočet je varianta Vyp\_Nest\_NT3\_V2\_G3. Tato varianta je náročná vzhledem k velmi malé šířce přídavného objemu v okolí valivých kuliček.

## 8. Analýza odporového momentu v nestacionárních úlohách

Tato kapitola popisuje analýzu odporového momentu z nestacionárních výpočtů, který je vztažen ke středu otáčení valivého ložiska. V kapitole je podrobně popsána studie odporového momentu pro referenční výpočet neboli pro Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1 a studie odporového momentu jednotlivých komponent valivého ložiska pro výše zmíněnou variantu výpočtu. Dále jsou porovnány všechny varianty výpočtů právě s výpočtem Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. V každé podkapitole je vyhodnocen závěr o nejhodnější metodice výpočtu.

### 8.1. Analýza odporového momentu pro Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1

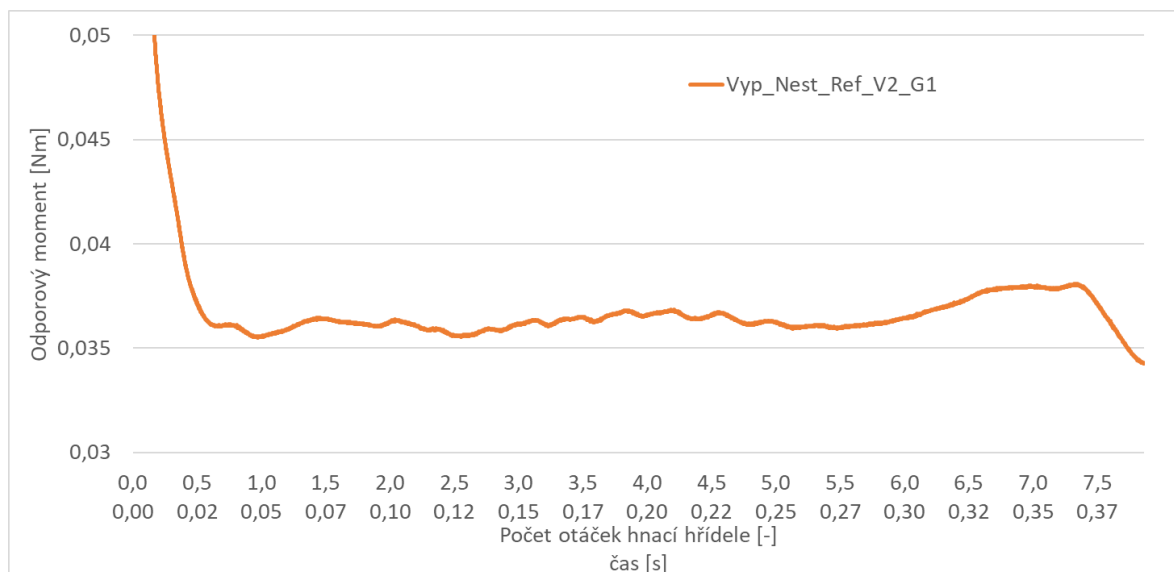
Byla provedena totožná analýza odporového momentu jako v kapitole 6.4. o studii nezávislosti sítě. Středem zájmu bylo pozorování celkového odporového momentu v průběhu celého nestacionárního výpočtu.



Graf 6 - Odporový moment pro Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1 – celý průběh

Na znázorněném grafu 6 můžeme vidět průběh celkového odporového momentu pro variantu výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. V grafu je znázorněn celý časový průběh až do ustálení v čase 1,4 s a pak průběh dynamicky ustáleného stavu do času 1,65 s. Bod dynamického ustálení byl zvolen tak, že následující průběh sledovaného odporového momentu fluktoval kolem stejné střední hodnoty. Dynamicky ustálená hodnota odporového momentu od výpočetního času 1,4 s je rovna 0,0321 Nm. Při přenásobení dynamicky ustálené hodnoty momentu úhlovou rychlostí hřídele dostáváme ztrátový výkon na hřídeli vlivem hydraulických ztrát v ložisku  $P_z = 4,03$  W.

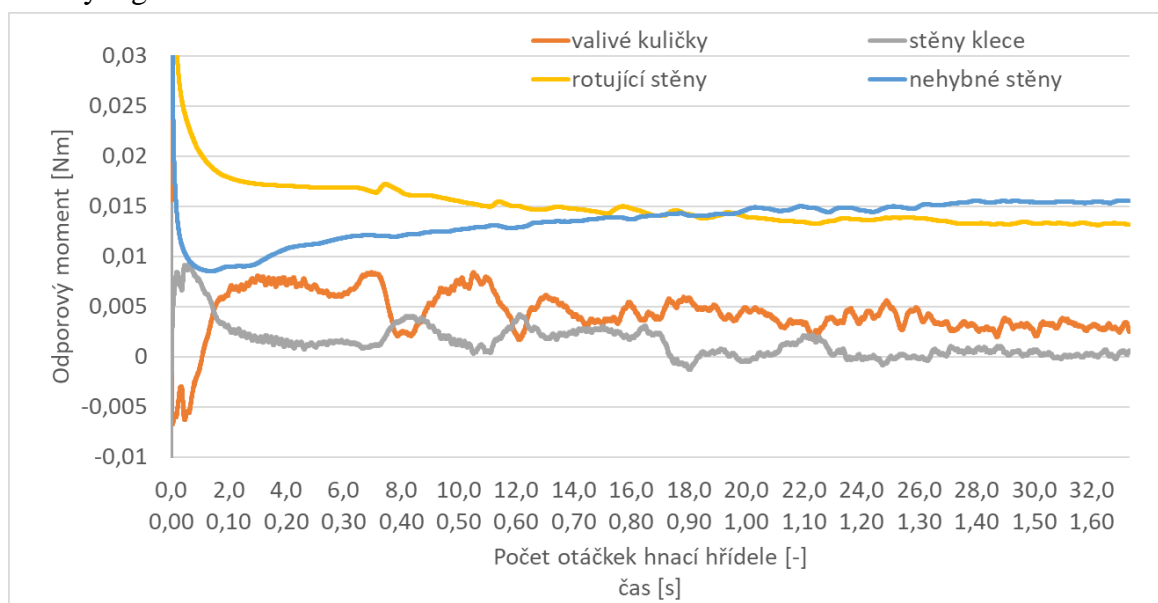
Z výpočetní náročnosti byl pro srovnání s ostatními variantami průběh sledovaného momentu omezen pouze na 7,5 otáček hnací hřídele, které odpovídají času 0,38 s. Průběh odporového momentu je znázorněn níže v grafu 7.



**Graf 7 - Průběh odporového momentu pro Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1 – částečný průběh**

### 8.1.1. Odporový moment jednotlivých komponent valivého ložiska

Analýza ztrát jednotlivých komponent valivého ložiska byla provedena na výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. Tato analýza byla provedena za účelem určení nejvlivnějších komponent na celkový odporový moment ložiska. Jednotlivé odporové momenty jsou znázorněny v grafu 8.



**Graf 8 - Odporový moment jednotlivých komponent ložiska**

Na výše uvedeném grafu jsou znázorněny čtyři průběhy odporového momentu. Oranžová barva znázorňuje odporový moment vznikající působením valivých kuliček na okolní olej, barvou šedou je pak znázorněn odporový moment vznikající působením klece na okolní olej, barvou modrou je znázorněn odporový moment od nehybných stěn a konečně odporový moment znázorněný barvou žlutou, který znázorňuje ztráty vzniklé rotujícími stěnami.

Z grafu je patrné, že nejvyšší vliv na odporový moment mají nehybné a rotující stěny. Moment na rotujících stěnách vzniká odporem oleje, který je vlivem nucené rotace stěn

rozpohybován.

Na stacionárních stěnách je odporový moment tvořen opačným způsobem. Již pohybující se olej je na nehybné stěny brzděn a je tedy následně nutné dodat další energii pro jeho další rozpohybování.

Nižší vliv na odporový moment mají pak samotné kuličky a stěny klece ložiska. Tvoří cca 10 % odporového momentu.

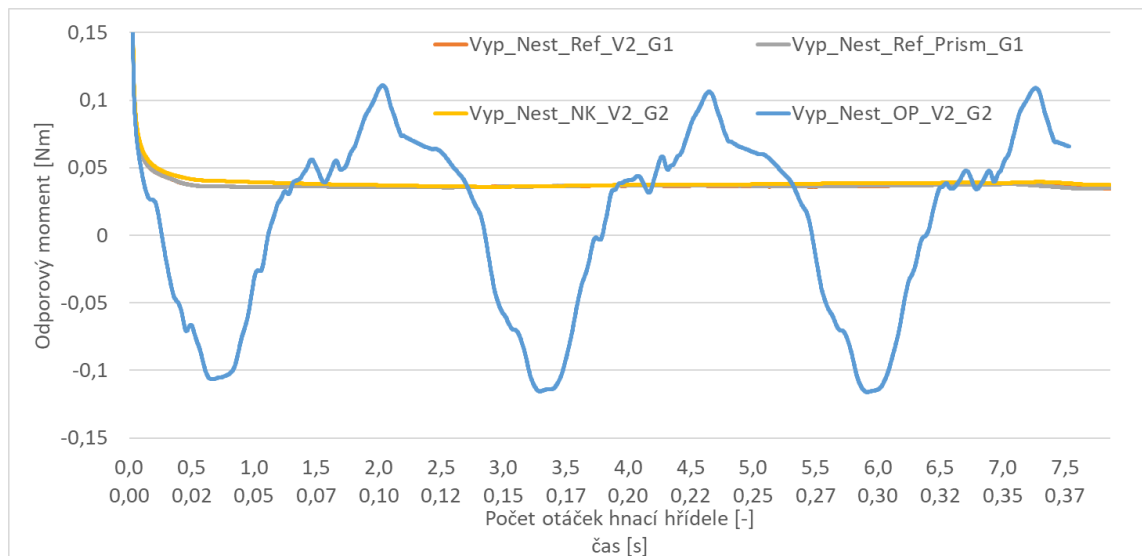
Zprůměrované hodnoty a jejich procentuální zastoupení od ustálení (1,4 s) jsou vypsány v tabulce 16.

**Tabulka 16 - Odporový moment jednotlivých komponent valivého ložiska**

	Odporový moment [Nm]	%
Valivé kuličky	0,0030	9,5
Stěny klece	0,0003	1
Rotační stěny	0,0133	41,5
Stacionární stěny	0,0154	48

## 8.2. Analýza odporového momentu pro Geometrii 1 a Geometrii 2

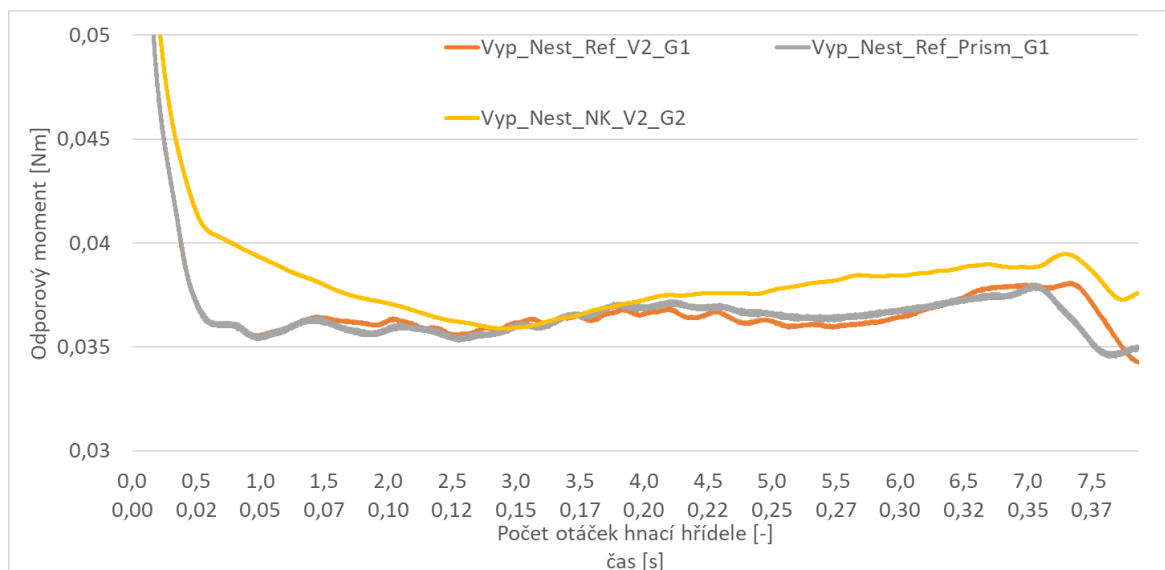
Tato kapitola porovnává odporový moment získaný z výpočtů Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1, Vyp\_Nest\_Prism\_V2\_G1, Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G2 a Vyp\_Nest\_OP\_V2\_G2 toto srovnání je znázorněno v grafu 9.



**Graf 9 - Odporový moment pro varianty Geometrií 1 a 2**

Na výše uvedeném grafu je názorná odchylka hodnot odporového momentu pro variantu výpočtu Vyp\_Nest\_OP\_V2\_G2 od ostatních variant výpočtů. Tato varianta byla připravena pro demonstraci vlivu špatného nastavení okrajových podmínek na výsledky výpočtů. Varianta udává špatné výsledky a nebude tedy dále rozebírána a nedoporučuje se pro použití.

Rozbor odporového momentu pro zbylé varianty výpočtů připravených pro Geometrii 1 a 2 je znázorněn na grafu 10.



**Graf 10 - Analýza odporového momentu pro varianty výpočtů Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1, Vyp\_Nest\_Ref\_Prism\_G1 a Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G1**

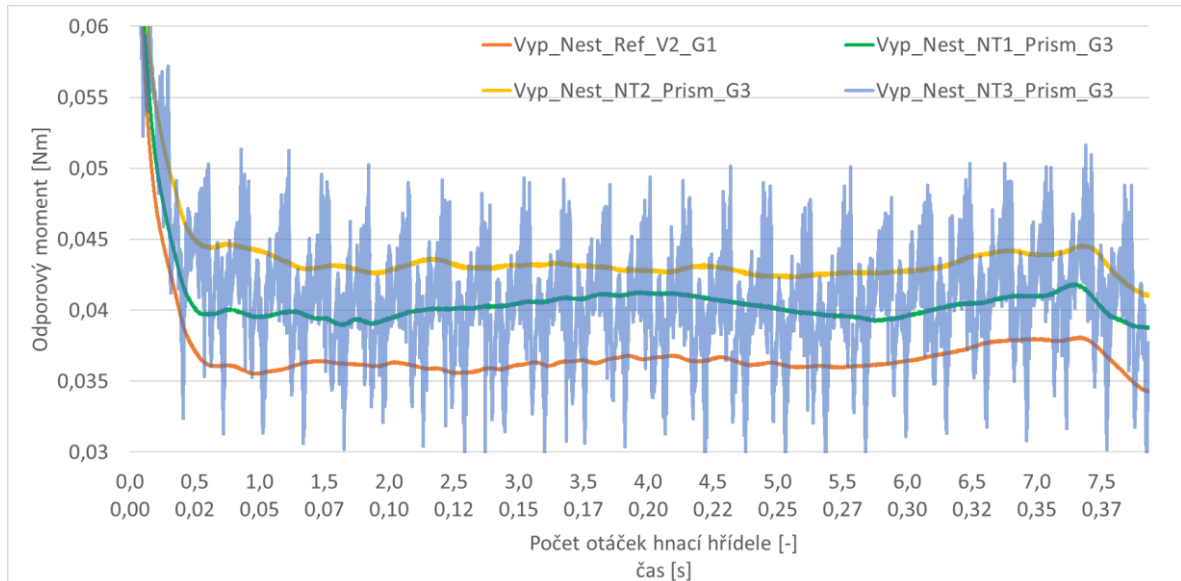
Na výše zobrazeném grafu můžeme vidět totožný trend průběhu odporového momentu pro variantu výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_Prism\_G1, znázorněno šedou křivkou, jako v případě průběhu odporového momentu v referenčním výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1 – oranžová křivka. Procentuální odchýlení hodnot je do 6 % a lze tedy prohlásit, že tato varianta výpočtu je korektní s referenčním výpočtem a lze použít Prismatickou síť v přídatném objemu valivých kuliček.

Trend průběhu odporového momentu pro variantu výpočtu s nerotujícími kuličkami, neboli Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G1 – žlutá křivka, je totožný s průběhem odporového momentu referenčního výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. Můžeme tedy prohlásit, že varianta s nerotujícími kuličkami je z pohledu průběhu odporového momentu také korektní, nicméně může docházet k lokálnímu odchýlení hodnot.

### 8.3. Analýza odporového momentu pro Geometrii 3

Tato kapitola se zabývá rozбором průběhu odporového momentu variant výpočtů, ve kterých je snaha o náhradu tečnosti, Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3, Vyp\_Nest\_NT2\_Prism\_G3 a Vyp\_Nest\_NT3\_Prism\_G3, a porovnává je s průběhem odporového momentu výpočtu referenční varianty Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1.

Porovnání je znázorněno na následujícím grafu 11.



**Graf 11 - Analýza odporového momentu pro Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1, Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3, Vyp\_Nest\_NT2\_Prism\_G3 a Vyp\_Nest\_NT3\_Prism\_G3**

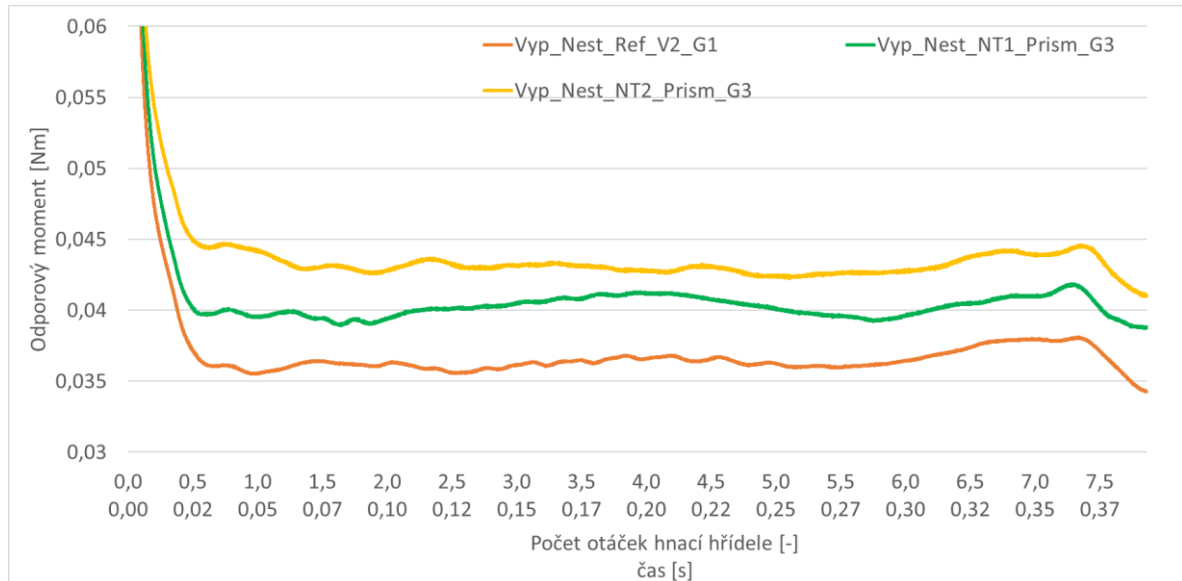
Z grafu je patrný nárůst odporového momentu pro varianty výpočtů náhrady tečnosti, neboli pro Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3, Vyp\_Nest\_NT2\_Prism\_G3, a Vyp\_Nest\_NT3\_Prism\_G3 oproti referenčnímu výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. Tento nárůst je nejspíš způsobený přidáním ploch, které reprezentují tečný dotyk mezi kuličkami a kroužky.

Dále můžeme pozorovat vysokou fluktuaci hodnot odporového momentu pro variantu výpočtu Vyp\_Nest\_NT3\_Prism\_G3. Výsledky odporového momentu varianty jsou vlivem příliš tenké mezery v přidavném objemu valivých kuliček nesprávné. Varianta kvůli vysoké fluktuaci byla označena za nesprávnou, a to i přes neodchýlení průměrné hodnoty, která je uvedena v níže zobrazené tabulce 17, odporového momentu od variant Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3 a Vyp\_Nest\_NT2\_Prism\_G3.

**Tabulka 17 - Průměrné hodnoty odporového momentu pro Geometrii 3**

	Vyp_Nest_NT1_Prism_G3	Vyp_Nest_NT2_Prism_G3	Vyp_Nest_NT3_Prism_G3
Odporový moment [Nm]	0,0400	0,0432	0,0408

Ve výše uvedené tabulce 17, jsou vypsány průměrné hodnoty odporových momentů pro varianty výpočtů Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3, Vyp\_Nest\_NT2\_Prism\_G3 a Vyp\_Nest\_NT3\_Prism\_G3. Tato průměrná hodnota byla vypočítána z hodnot odporového momentu od výpočetního času 0,02 s, aby do průměrných hodnot nezasahovaly vysoké hodnoty odporového momentu na začátku výpočtu.



**Graf 12 - Analýza odporového momentu pro Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1, Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3 a Vyp\_Nest\_NT2\_Prism\_G3**

Na výše zobrazeném grafu 12 můžeme vidět průběh odporového momentu bez nevhodné varianty Vyp\_Nest\_NT3\_Prism\_G3. Z grafu je patrný nárůst odporového momentu vlivem ztenčení šířky mezery  $t$  v přidavném objemu valivých kuliček. Bohužel bez validačního experimentu není možné určit přesnou hodnotu odporového momentu pro takový provoz ložiska, a proto bude jako nejvhodnější varianta určena taková varianta, která má odporový moment nejbližší k referenčnímu výpočtu, neboli k výpočtu Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. Jako nejvhodnější metodou pro simulaci tečného dotyku kuliček byla vybrána varianta výpočtu náhrady tečnosti Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3.

## 9. Analýza odporového momentu ve stacionárních úlohách

Tato kapitola popisuje analýzu odporového momentu pro stacionární výsledky variant výpočtů. Stacionární varianty výpočtů byly použity pro určení dynamicky ustálené hodnoty odporového momentu v jednotlivých nestacionárních variantách výpočtů. Hodnoty odporových momentů ze stacionárních výpočtů můžeme vidět v tabulce 18. Byly připraveny pouze čtyři stacionární výpočty podle uvedených závěrů v předchozí kapitole.

**Tabulka 18 - Odporový moment pro stacionární výsledky variant**

	Vyp_Stac_Ref_V2_G1	Vyp_Stac_Ref_Prism_G1
Odporový moment [Nm]	0,0326	0,0325
	Vyp_Stac_NT1_Prism_G3	Vyp_Stac_NK_V2_G2
Odporový moment [Nm]	0,0363	0,0326

Při porovnání hodnoty odporového momentu ze stacionárního řešení Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a dynamicky ustálené hodnoty (0,0321 Nm) z výpočtu nestacionárního Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1 vidíme, že jsou hodnoty totožné s odchylkou 0,005 Nm. Stacionární řešení variant výpočtů tedy reprezentují dynamicky ustálené stavy všech nestacionárních variant. Lze prohlásit, že metoda „Moving mesh“ dává po ustálení totožné výsledky jako metoda „Moving reference frame“.

Výsledky odporových momentů ze stacionárních úloh potvrzují závěry, které byly popsány v předchozí kapitole. Použitím výpočetní sítě s názvem Prismatická síť se nedopouštíme větší chyby a lze touto metodou diskretizace s vhodným nastavením zlepšit kvalitu buněk ve výpočetní oblasti.

Výsledky varianty výpočtu nerotujících kuliček Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2, kde valivé kuličky nekonají relativní pohyb, ale jsou pouze unášeny, jsou totožné s hodnotou odporového momentu z referenčního výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1. Můžeme prohlásit, že relativní pohyb kuliček nemá na velikost odporového momentu přímý vliv. Pro vyhodnocování odporových momentů, neboli ztrát jednotlivých valivých ložisek, lze výše uvedenou metodu výpočtu prohlásit jako nejvhodnější a to díky její nízké výpočetní náročnosti.

Pro poslední varianty výpočtu Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3, kde byla snaha o docílení simulace tečného dotyku, by bylo vhodné provést validační experimentální měření, které by potvrdilo korektnost výsledků. Z výsledků CFD simulací pozorujeme navýšení odporového momentu, které je dáno zásahem do geometrie. Vzhledem k rozdílnosti výsledků od referenčního výpočtu tedy nemůžeme s jistotou prohlásit, zda jsou výsledky náhrady tečnosti korektní.



## 10. Analýza odporového momentu pro různé podmínky provozu

Další částí diplomové práce je vyhodnocení vlivu změny podmínek provozu na odporový moment valivého ložiska. Byl vyhodnocen vliv změny otáček na odporový moment a vliv změny parametrů oleje na odporový moment. Nutno podotknout, že všechny výpočty byly provedeny na referenční variantě výpočtů Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1. Výsledky udávají vliv změny podmínek provozu v dynamicky ustáleném stavu.

### 10.1. Vyhodnocení změny otáček

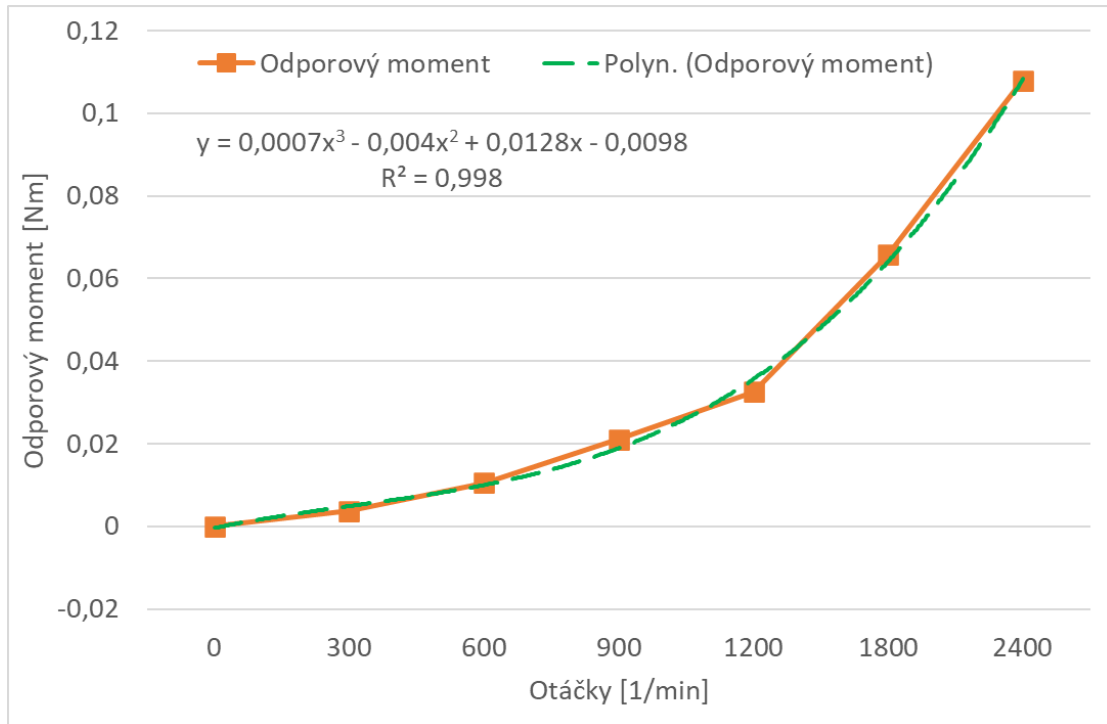
Bylo vyšetřeno šest různých okrajových podmínek otáček na hnací hřídeli. Byl dodržen směr otáčení jako v případě výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1, a tedy otáčky na hnací hřídeli byly záporné. Hodnoty řešených otáček můžeme vidět v tabulce 19. Vyhodnocení odporového momentu ke středu otáčení ložiska je zobrazeno v tabulce 20 a znázorněno v grafu 13.

Tabulka 19 - Okrajové podmínky otáček pro komponenty valivého kuličkového ložiska

Otáčky hřídele [1/min]	Otáčky kuličkové klece [1/min]	Otáčky valivých kuliček [1/min]
-300	-114,5	967,8
-600	-229,0	1935
-900	-343,6	2903
-1200	-458,0	3871,5
-1800	-687,1	5807,2
-2400	-916,2	7743,0

Tabulka 20 - Hodnoty odporového momentu pro jednotlivé otáčky na hřídeli

Otáčky hřídele [1/min]	Odporový moment [Nm]
-300	0,0037
-600	0,0105
-900	0,0210
-1200	0,0326
-1800	0,0658
-2400	0,108



Graf 13 - Vliv změny otáček na odporový moment

Na výše zobrazeném grafu můžeme vidět již zmíněný průběh odporového momentu v závislosti na otáčkách hnací hřídele. Nutno podotknout, že odporový moment bude mít vždy opačné znaménko oproti směru otáčení (v grafu byly vyneseny absolutní hodnoty). Vidíme, že se zvyšujícími otáčkami se odporový moment zvyšuje. Z výsledů byla vynesena oranžová křivka. Tato křivka byla dále podložena zelenou čárkovanou křivkou, která reprezentuje spojnicí trendu. Pro spojnicí trendu byla vybrána polynomiální funkce třetího řádu, která dosáhla hodnoty spolehlivosti 0,998. Byla tak získána rovnice (8).

$$(8) \quad y = -0,0007x^3 + 0,004x^2 - 0,0128x + 0,0098$$

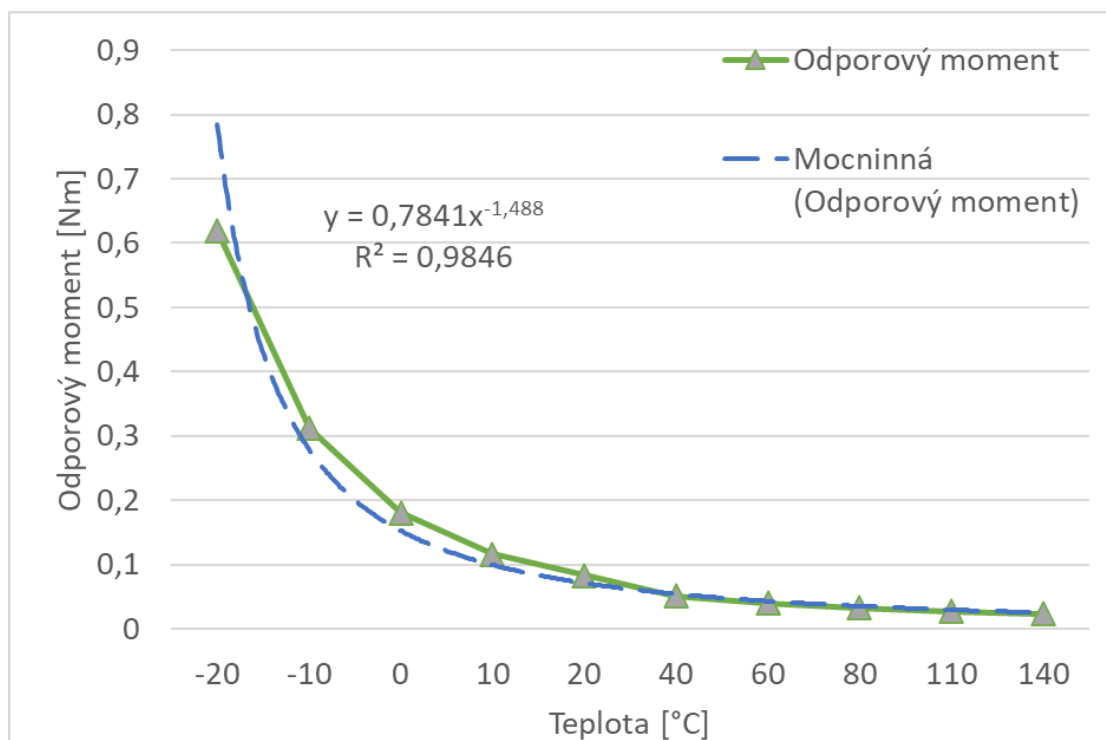
V této rovnici  $y$  vyjadřuje hodnotu odporového momentu a  $x$  otáčky hnací hřídele.

## 10.2. Vyhodnocení změny teploty

Dalším řešením vlivem na odporový moment byla změna parametrů mazacího oleje. Změna parametrů oleje byla řešena změnou teploty oleje a byla tedy měněna viskozita. Bylo řešeno osm úloh pro olej o různé teplotě od -20 °C do 140 °C. Teploty spolu s viskozitou oleje a příslušným vyhodnoceným odporovým momentem valivého ložiska můžeme vidět v tabulce 21.

Tabulka 21 - Vliv změny parametrů oleje na odporový moment valivého ložiska

Teplota oleje [°C]	Dynamická viskozita $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$	Odporový moment [Nm]
-20	0,4615	0,6187
-10	0,2067	0,3117
0	0,1038	0,1810
10	0,0574	0,1164
20	0,0345	0,0831
40	0,0151	0,0515
60	0,008	0,0405
80	0,005	0,0326
110	0,0029	0,0276
140	0,0018	0,0240



Graf 14 - Vliv změny teploty na velikost odporového momentu valivého ložiska

Na grafu 14 můžeme vidět zelenou křivku spojující vypočítané hodnoty odporového momentu pro dané teploty. Tato zelená křivka byla podložena čárkovanou modrou křivkou,

která reprezentuje spojnicí trendu získaných bodů. Ze spojnice trendu dostáváme mocninovou rovnici popisující vliv změny teploty na hodnotu odporového momentu se spolehlivostí 0,9846. Rovnice (9) popisující tento vliv je uvedena níže.

$$(9) \quad y = 0,7841x^{-1,488}$$

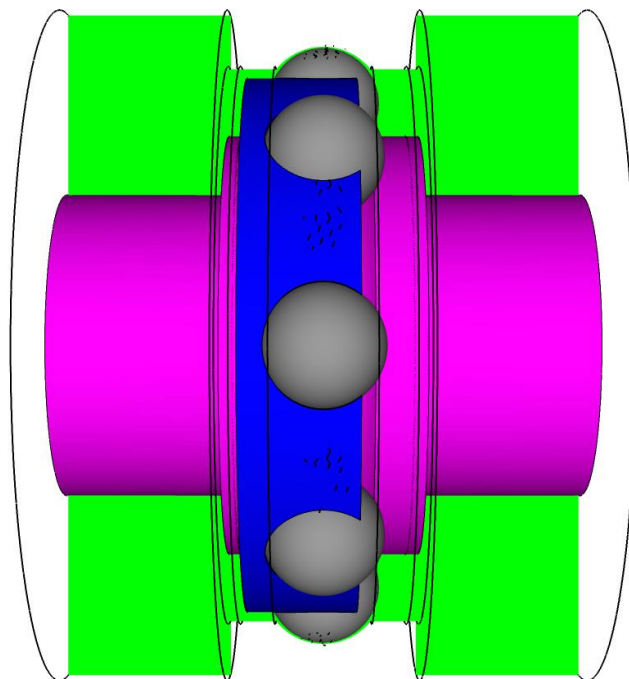
V rovnici  $y$  vyjadřuje odporový moment a  $x$  teplotu mazacího oleje.

Je zřejmé, že se zvyšující se teplotou, tedy se snižující se dynamickou viskozitou, hodnota odporového momentu klesá. Z pohledu ztrát ve valivém ložisku je nejvhodnější ložisko provozovat při co možná nejvyšších teplotách.

## 11. Analýza proudového pole

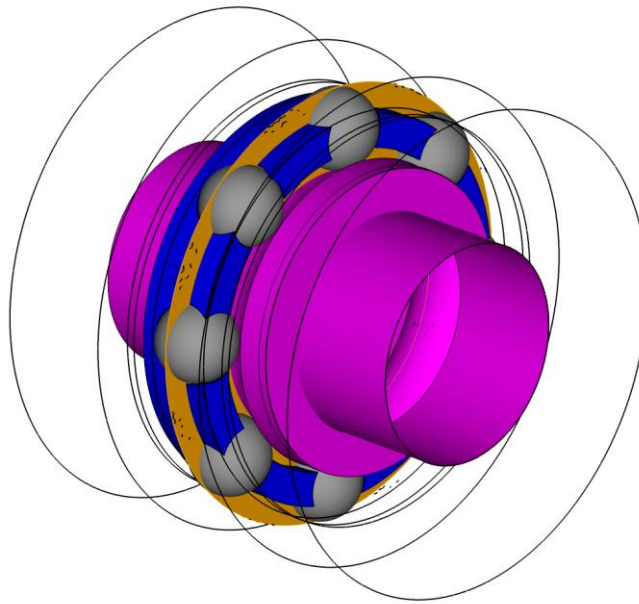
Pro další rozbor korektnosti výpočtové metodiky byla provedena analýza proudového pole ve valivém ložisku. V této kapitole je proveden rozbor absolutních a relativních rychlostí, upravených axiálních rychlostí, rozbor statického tlaku ve výpočetní doméně a rozbor vektorového pole ve výpočetní doméně. Nutno podotknout, že analýza proudového pole byla vyhotovena pouze pro výsledky stacionárních výpočtů, a to z důvodu porovnatelnosti výsledků, které by při různých časových krocích v případě nestacionárních výsledků nebylo možné.

Když nebude popsáno jinak, všechny řezy v této kapitole budou vedeny středem otáčení a středem valivé kuličky, která byla v počátku výpočtu na souřadnicích  $x = 0$ ,  $y = 0,04025$ ,  $z = 0$ . Sledované veličiny byly zobrazeny v této rovině pouze v její horní polovině, a to pro lepší zobrazení. Zobrazení jedné poloviny ložiska je možné díky symetričnosti geometrie a i symetrickému chování proudění. Tato rovina je zobrazena zelenou barvou na obrázku 29.



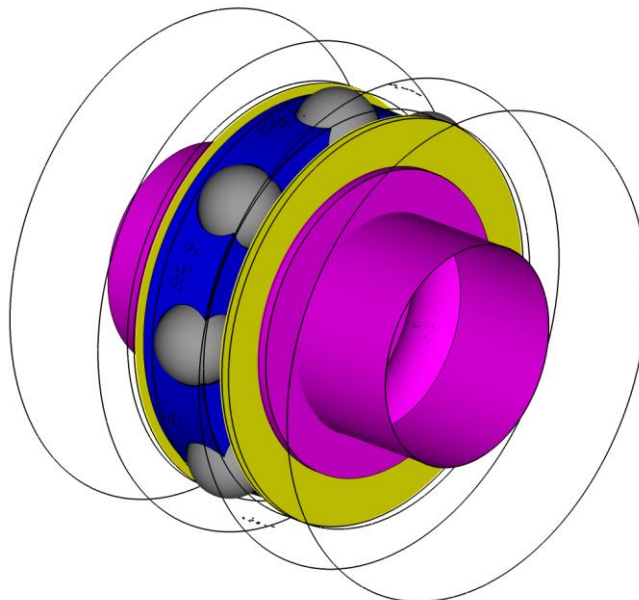
Obrázek 29 - Vyhodnocovací rovina YZ

Dále byla vytvořena vyhodnocovací rovina XY, která je znázorněna na obrázku 30 oranžovou barvou.



**Obrázek 30 - Vyhodnocovací rovina XY**

Dalšími vyhodnocovacími rovinami jsou roviny v místě spojení inverzního objemu uvnitř ložiska s prstenci v inverzním objemu olejové lázně. Roviny jsou znázorněny žlutou barvou na obrázku 31.

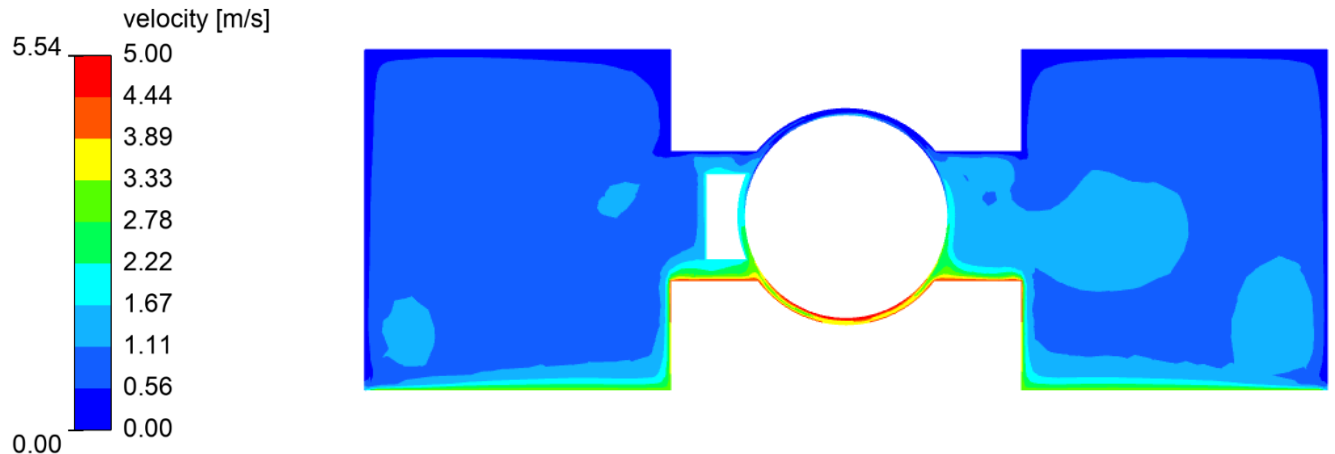


**Obrázek 31 - Vyhodnocovací roviny na hraně inverzního objemu ložiska**

## 11.1. Proudové pole Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

### 11.1.1. Rozložení absolutní rychlosti

Jedna z nejdůležitějších veličin, která popisuje proudové pole, je absolutní rychlost média uvnitř výpočetní domény. Konturu této veličiny můžeme vidět na obrázku 32.

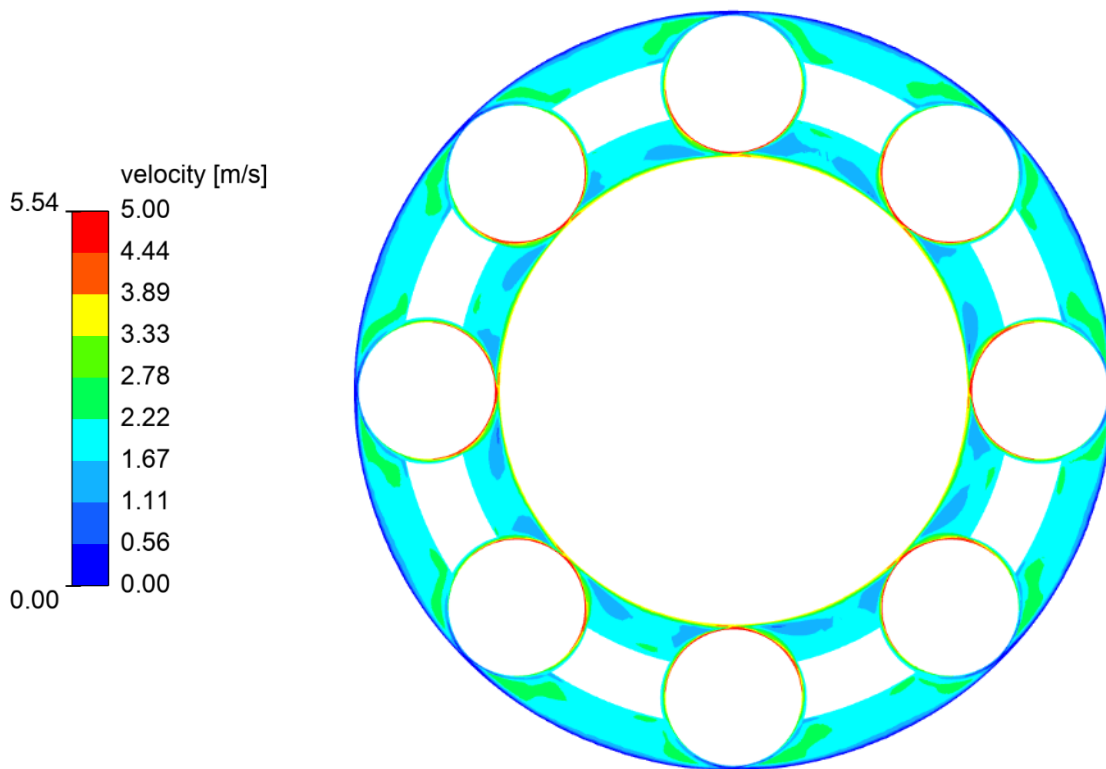


Obrázek 32 - Rozložení absolutní rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

V levé části obrázku vidíme škálu hodnot rychlostí. Hodnoty vlevo od škály zobrazují maximum a minimum dané veličiny v celé výpočetní doméně a hodnoty vpravo od škály pak hodnoty pro příslušné zbarvení veličiny. Škála s takovýmto nastavením je použita pro všechna vyhodnocení. Maximální rychlost pro variantu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 dosahuje hodnoty 5,54 m/s, a to v místě dotyku valivé kuličky s vnitřním kroužkem. V tomto místě je okolní olej stlačován a urychlován rotací kuličky a rotací vnitřního kroužku.

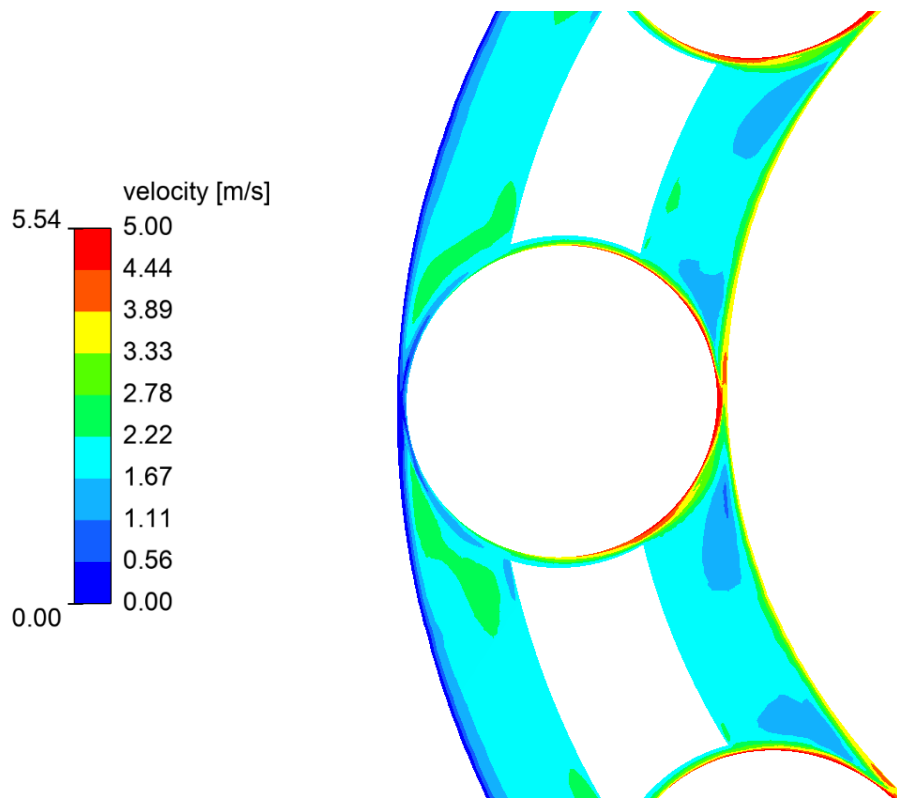
Nenulové hodnoty absolutní rychlosti jsou na stěnách rotující hřídele, kde absolutní rychlost dosahuje hodnot 3,13 m/s, a na stěnách vnitřního kroužku, kde se hodnoty absolutní rychlosti pohybují v intervalu od 3,13 m/s do 4,35 m/s v závislosti na vzdálenosti od osy otáčení. Samotná klec urychluje okolní olej rychlostí 2 m/s na poloměru  $\varnothing_{d_s}$ .

Nulové hodnoty absolutní rychlosti jsou v okolí nehybných stěn vnějšího kroužku a vnější stěny olejové lázně. Na vrcholu kuličky, kde dochází k dotyku kuličky s vnějším kroužkem, můžeme pozorovat mírné urychlení oleje vlivem rotace valivé kuličky. Toto urychlení není tak silné jako v případě dotyku kuličky s vnitřním kroužkem, který také rotuje.



**Obrázek 33 - Rozložení absolutní rychlosti v rovině XY Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1**

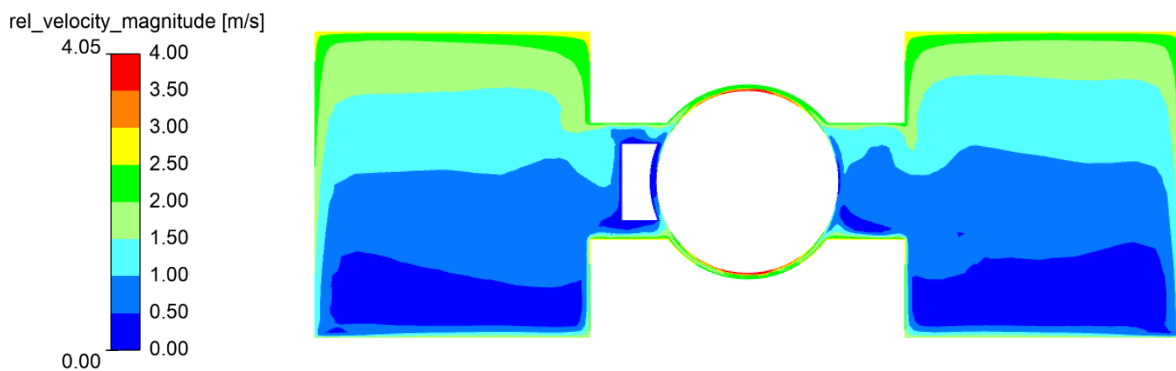
Absolutní rychlost byla zobrazena i v rovině XY, viz obrázek 33. V tomto pohledu vidíme, že olej je v oblasti ložiska urychlován rotací na vnitřním kroužku, rotací valivých kuliček a rotací ložiskové klece. Nejvyšší rychlost oleje se nachází v místě dotyku kuliček s vnitřním kroužkem, kde dochází ke stlačování oleje a k jeho urychlení, takovéto chování je znázorněno v detailu na obrázku 34. Nejnižší absolutní rychlost je v blízkosti vnějšího kroužku, který je nehybný. V oblasti je dominantní absolutní rychlost v rozmezí 1,67 až 2,22 m/s. Tato rychlost je rovna obvodové rychlosti v daném místě při zadaných otáčkách hřídele.



Obrázek 34 - Detail rozložení absolutní rychlosti v rovině XY Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

### 11.1.2. Rozložení relativní rychlosti

Rozložení relativní rychlosti, viz obrázek 35, je vztaženo k rychlosti objemu ložiska neboli k unášivé rychlosti kuliček, rovnající se rychlosti rotace klece.



Obrázek 35 - Rozložení relativní rychlost Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

Nejvyšších hodnot dosahuje relativní rychlost v místě dotyku valivých kuliček se stěnami kroužků, zde relativní rychlost dosahuje hodnot až 4,05 m/s. Na samotných stěnách valivých kuliček pak relativní rychlost dosahuje maximální hodnoty 3,65 m/s. Relativní rychlost na stěnách kuliček odpovídá nastaveným otáčkám kuliček při jejich poloměru.

Na stacionárních stěnách (vnější kroužek a stěny olejové lázně) relativní rychlost dosahuje hodnot až 2,6 m/s. Tato rychlost je dána vlivem relativního pohybu mezi vnitřním objemem ložiska a stacionárními stěnami. Při pozorování z pohybujícího se objemu ložiska se stacionární stěny pohybují opačnou rychlostí, než bylo nastaveno pro objem ložiska, proto je zde relativní rychlost nenulová, i když absolutní rychlost je na těchto stěnách rovna nule.

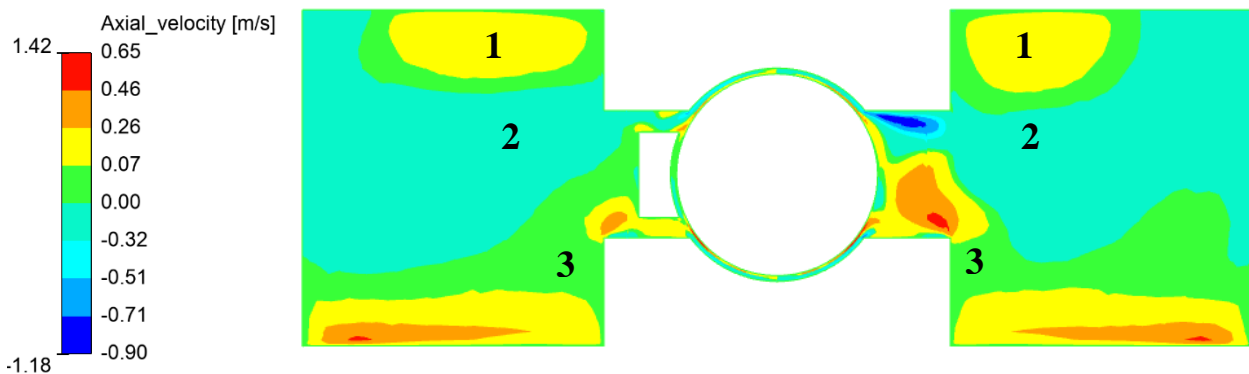


Stěny hřídele a vnitřního kroužku se pohybují relativní rychlostí od 1,58 m/s do 2,69 m/s. Rychlost je dána rozdílem rychlostí nehybných stěn a rychlostí rotace prostoru uvnitř ložiska.

Na obrázku vidíme, že relativní rychlost na stěně klece je nulová. Klec se tedy pohybuje stejnou rychlostí jako vnitřní objem ložiska a nekoná žádný další pohyb, jako je tomu například u valivých kuliček.

### 11.1.3. Rozložení upravené axiální rychlosti

Axiální rychlost popisuje chování průtoku oleje v ložisku. Dostáváme tak informaci o místě, kde dochází k nasávání okolního oleje do prostoru ložiska, a i o místě, kde dochází k vytlačování oleje z prostoru ložiska. Rozložení upravené axiální rychlosti je znázorněno na obrázku 36.



Obrázek 36 - Rozložení axiální rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

Před samotným rozbořením rozložení upravené axiální rychlosti je vhodné definovat upravenou axiální rychlost. Kladné rychlosti zobrazují sání oleje do středu kuliček a negativní rychlosti zobrazují výtlač oleje od středu kuliček do prostoru nádrže. Tato upravená axiální rychlost je definována rovnicí (10). Tyto rychlosti pak nereprezentují hmotnostní průtok oleje v daných oblastech.

$$(10) \quad Axial\_velocity = -1 * Axial\_velocity\_original * \frac{ABS(Z)}{Z}$$

$Axial\_velocity$  je upravená axiální rychlost,  $Axial\_velocity\_original$  je axiální rychlost z Fluentu,  $Z$  je souřadnice jednotlivých buněk v ose  $Z$ .

Rozložení axiální rychlosti bude rozděleno do dvou pomyslných prostorů. První prostor reprezentuje objem olejové lázně a objem ložiska, krom blízkého prostoru kuliček. Druhý prostor reprezentuje blízké okolí kuliček.

Na výše zobrazeném obrázku pak vidíme, že v prvním prostoru dochází jak k sání, tak i k výtlaču oleje.

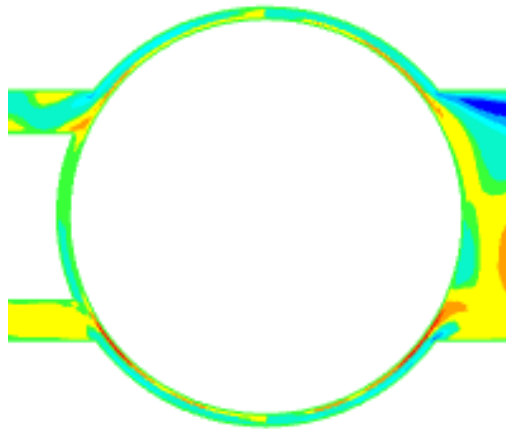
V oblastech **1** vidíme, že axiální rychlost směřuje ke středu valivých kuliček, takovéto chování je ovšem dáno vířivým chováním proudění v této oblasti a je následkem výtlaču oleje z oblasti ložiska.

V oblastech **2** pak vidíme výtlač oleje z oblasti ložiska, a lze prohlásit, že k výtlaču z oblasti ložiska dochází u vnějšího nehybného kroužku se závislostí na geometrii klece. Různá geometrie klece má přímý vliv na míru výtlaču oleje.

V oblastech **3** pak dochází k sání oleje z okolí do oblasti ložiska. A lze tedy prohlásit, že k sání dochází u vnitřního rotačního kroužku.

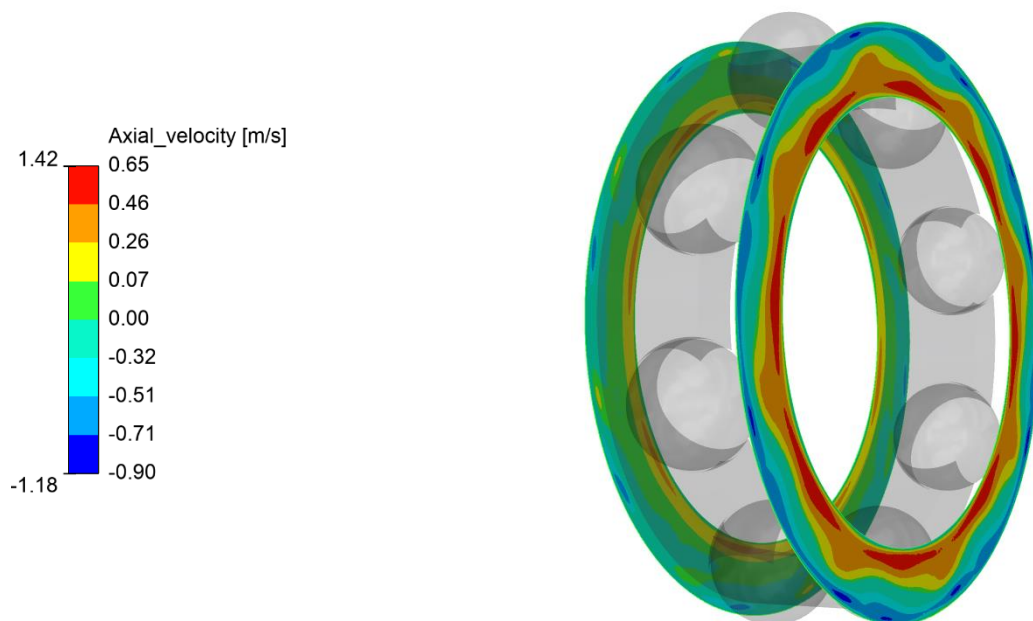
V případě druhého prostoru, který reprezentuje blízké okolí kuliček, dochází k rozdílnému

chování. V blízkosti stěn kuliček dochází k sání oleje ke středu kuliček, naopak v blízkém okolí kroužků dochází k mírnému výtlačku oleje od středu kuliček, viz obrázek 37.



**Obrázek 37 - Detailní rozložení axiální rychlosti v oblasti kuličky Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1**

Výše popsané celkové chování je pro lepší představivost znázorněno na obrázku 38, kde jsou znázorněny dva řezy objemem ložiska na rozhraní mezi objemem ložiska a objemem olejové lázně.

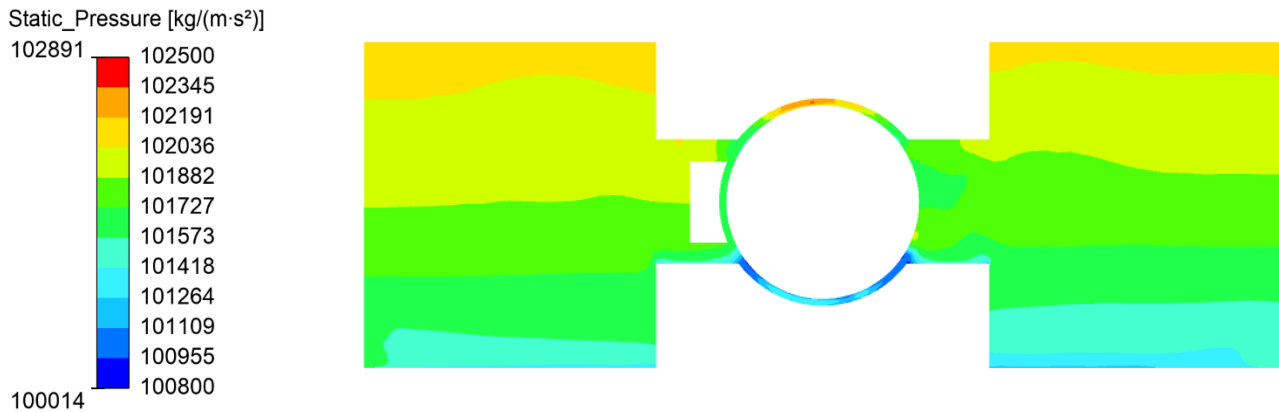


**Obrázek 38 - Rozložení axiální rychlosti na rozhraní Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1**

Z výše zobrazeného obrázku je patrné, že při stěnách vnitřního kroužku dochází v místě mezi valivými kuličkami k sání oleje z okolí ke středu valivých kuliček. U stěn vnějšího kroužku v místě valivých kuliček pak dochází k výtlačku oleje směrem od středu kuliček. Na obrázku je dále vidět vliv geometrie klece. Díky nesymetrické geometrii vidíme, že na přední rovině dochází k větší výměně oleje v axiálním směru, než je tomu v rovině zadní. Geometrie klece má tedy přímý vliv na velikost hmotnostního průtoku takovými rovinami.

### 11.1.4. Rozložení statického tlaku

Rozložení statického tlaku je zobrazeno pro doplnění předchozí kapitoly pojednávající o axiální rychlosti. Rozložení statického tlaku nám ukazuje místa, kde dochází k poklesu statického tlaku vlivem nárůstu tlaku dynamického. Do míst o nižším statickém tlaku pak dochází k sání oleje z okolí. Rozložení statického tlaku je znázorněno na obrázku 39. Toto rozložení potvrzuje výrok z předchozí kapitoly.

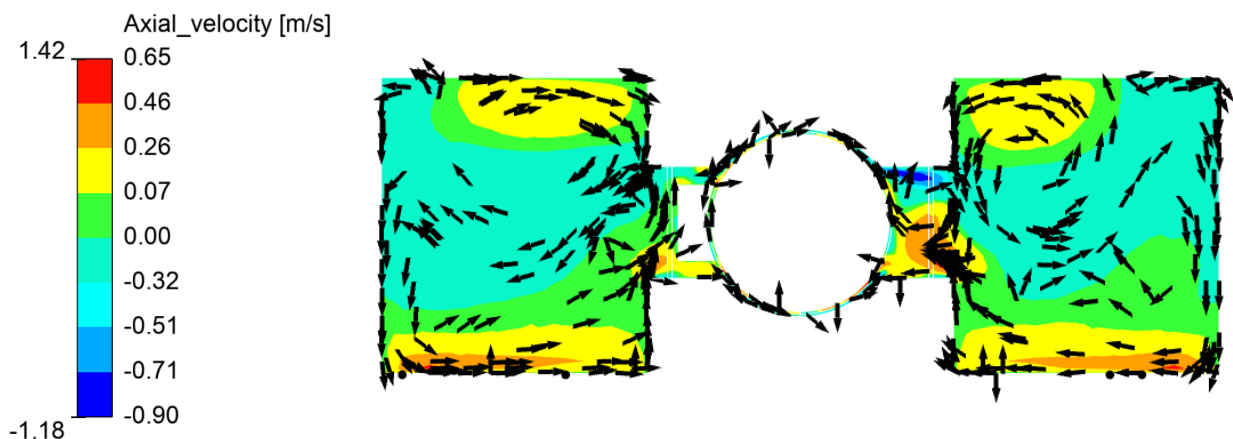


Obrázek 39 - Rozložení statického tlaku na rozhraní Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

Na obrázku vidíme, že v místech nehybných stěn je statický tlak nejvyšší a v místech hybných stěn statický tlak klesá dle lokální absolutní rychlosti. V případě valivé kuličky je důležité se zaměřit na její okolí. Na jejím vrcholu můžeme pozorovat vysoký statický tlak, olej bude tedy z této oblasti vytlačován do míst o nižším statickém tlaku. V nejnižším místě kuličky vidíme lokální minimum statického tlaku. Do této oblasti bude olej přisíván z okolí. Rozložení statického tlaku je v souladu s rozložením upravené axiální rychlosti a absolutní rychlosti.

### 11.1.5. Vizualizace vektorového pole

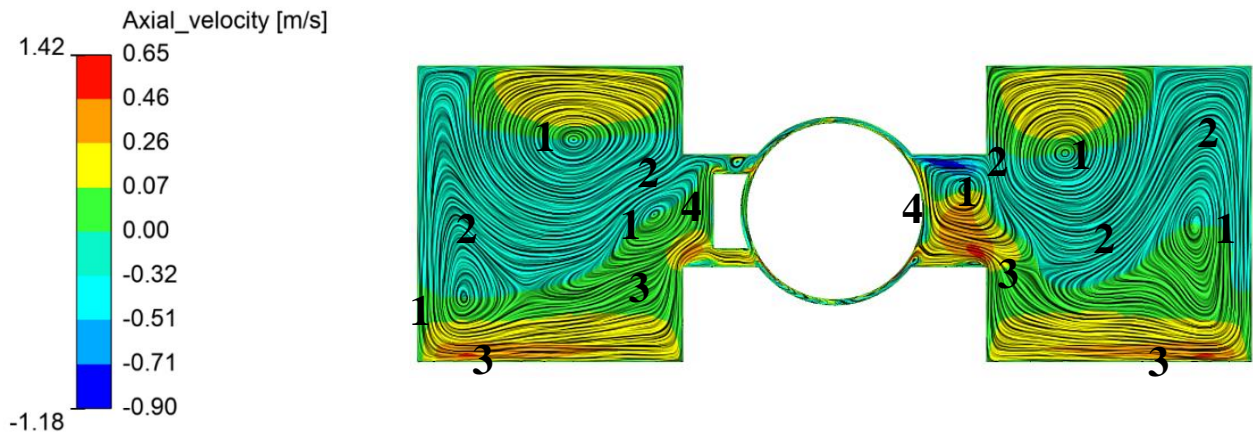
Níže zobrazené vektorové pole, viz obrázek 40, zobrazuje chování proudění v řezu. Na obrázku jsou patrná místa sání a výtlaku oleje spolu s dalšími víry ve výpočetní doméně.



Obrázek 40 - Vektorové pole Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

Na obrázku 40 vidíme rozložení upravené axiální rychlosti spolu se směry rychlostních vektorů. Nutno podotknout, že velikosti vektorů nevyjadřují velikost lokální rychlosti. Pro lepší představitelnost je výše znázorněné vektorové pole rozšířeno zobrazením proudnic do

zobrazené roviny, viz obrázek 41.



**Obrázek 41 - Promítnutí proudnic do vyhodnocovací roviny Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1**

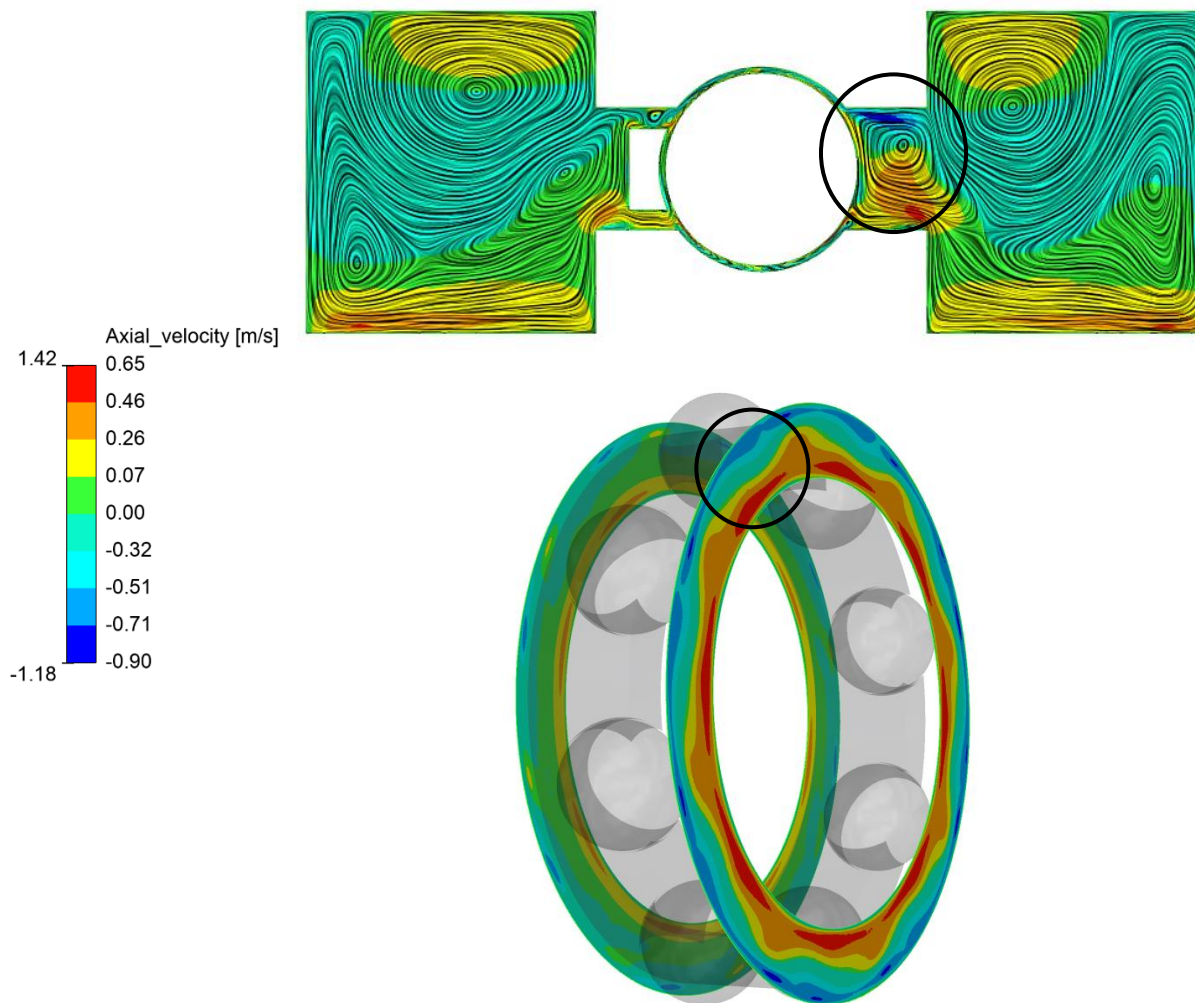
Na obrázku 41 vidíme znázorněné proudnice do roviny. Zobrazení nám pomůže v lepším pochopení vlivu ložiska na proudové pole oleje. Pro určení směru, například vírů, je zobrazení proudnic podloženo rozložením upravené axiální rychlosti, lze určit směr proudu při pohledu na vektorové pole, viz obrázek 40.

Ve vyhodnocovací oblasti vidíme šest velkých vírů, které vznikají vlivem rotace ložiska, viz číslované oblasti **1**.

Další důležitou oblastí je právě oblast výtlačku, která působí od oblasti ložiska až ke stěnám samotné olejové nádrže vlivem okolních vírů, viz číslované oblasti **2**.

V oblasti sání oleje, viz číslované oblasti **3**, z okolí do oblasti ložisek můžeme vidět další víření. Část nasávaného oleje z olejové nádrže je nasávána podél vnitřního kroužku ložiska do oblasti valivé kuličky. Zbýlý nasávaný olej je vytláčován podél stěny klece nebo podél stěny valivé kuličky vzhůru, viz číslované oblasti **4**.

Při porovnání obrázku, který znázorňuje rozložení upravené axiální rychlosti na rozhraní prostoru ložiska a olejové nádrže, s obrázkem, který znázorňuje rozložení proudnic, můžeme prohlásit, že geometrie ložiskové klece má přímý vliv na proudové pole.



**Obrázek 42 - Porovnání rozložení axiálních rychlostí na rozhraní Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1**

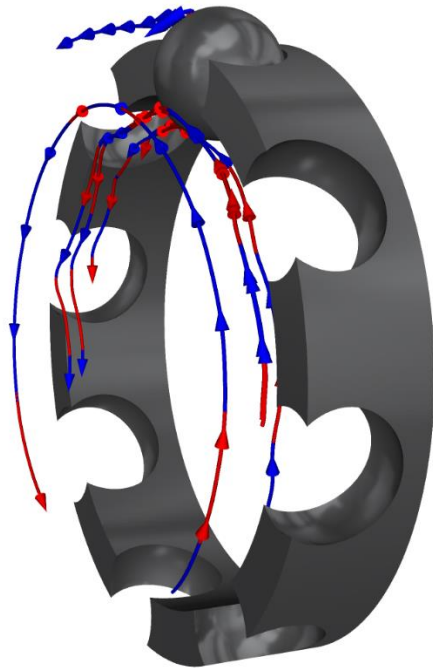
Na výše zobrazeném obrázku 42 vidíme, že na rozhraní, které je blíže k pozorovateli (pravá rovina), jsou vyšší lokální maxima i minima axiální rychlosti. Na první pohled se tedy zdá, že geometrie ložiskové otevřené klece má v místě otevření „lepší“ proudové vlastnosti, přesněji vlivem vyšších axiálních rychlostí sání i výtlačku by se zde předpokládala intenzivnější výměna oleje. Při detailnějším rozboru, a tedy porovnáním výše zmíněných lokálních maxim a minim s rozložením proudnic, vidíme, že tato maxima a minima jsou zde tvořena vlivem zavíření. Takovéto zavíření ovšem zamezuje výměnu oleje a dochází zde pouze k lokální recirkulaci. Recirkulace může být nebezpečná v případě simulace mazání ložiska dvoufázovým médiem, například ve složení olej a vzduch. V případě, že by hladina oleje byla nízká a přívod oleje by byl ze strany vnějšího kroužku, může například recirkulace vzduchu zamezit v tomto místě přívod oleje do ložiska. V případě přívodu oleje ze strany vnitřního kroužku by ovšem přívod oleje do ložiska byl zesílen výše zmíněným zavířením. Kritické místo je na výše zobrazeném obrázku vyznačeno kružnicemi.

Ověření výše popsaného bude dokázáno v následující kapitole.

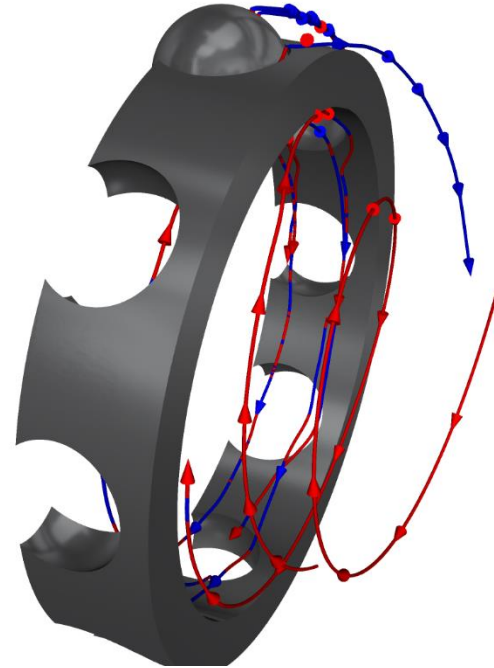


### 11.1.6. Zobrazení proudnic pro výpočet Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1

Zobrazení proudnic v referenčním výpočtu, neboli ve výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1, definuje místa, kde dochází k sání a kde dochází k výtlaku oleje z oblasti a do oblasti valivých kuliček. Pro přehlednost bylo zobrazeno malé množství proudnic a proudnice byly osazeny šipkami, které reprezentují jejich směr. Nutno podotknout, že červená barva znázorňuje směr ke středu kuliček a barva modrá směr od středu kuliček, podobně jako tomu bylo pro upravenou axiální rychlost.



Obrázek 43 - Zobrazení proudnic v otevřené části klece



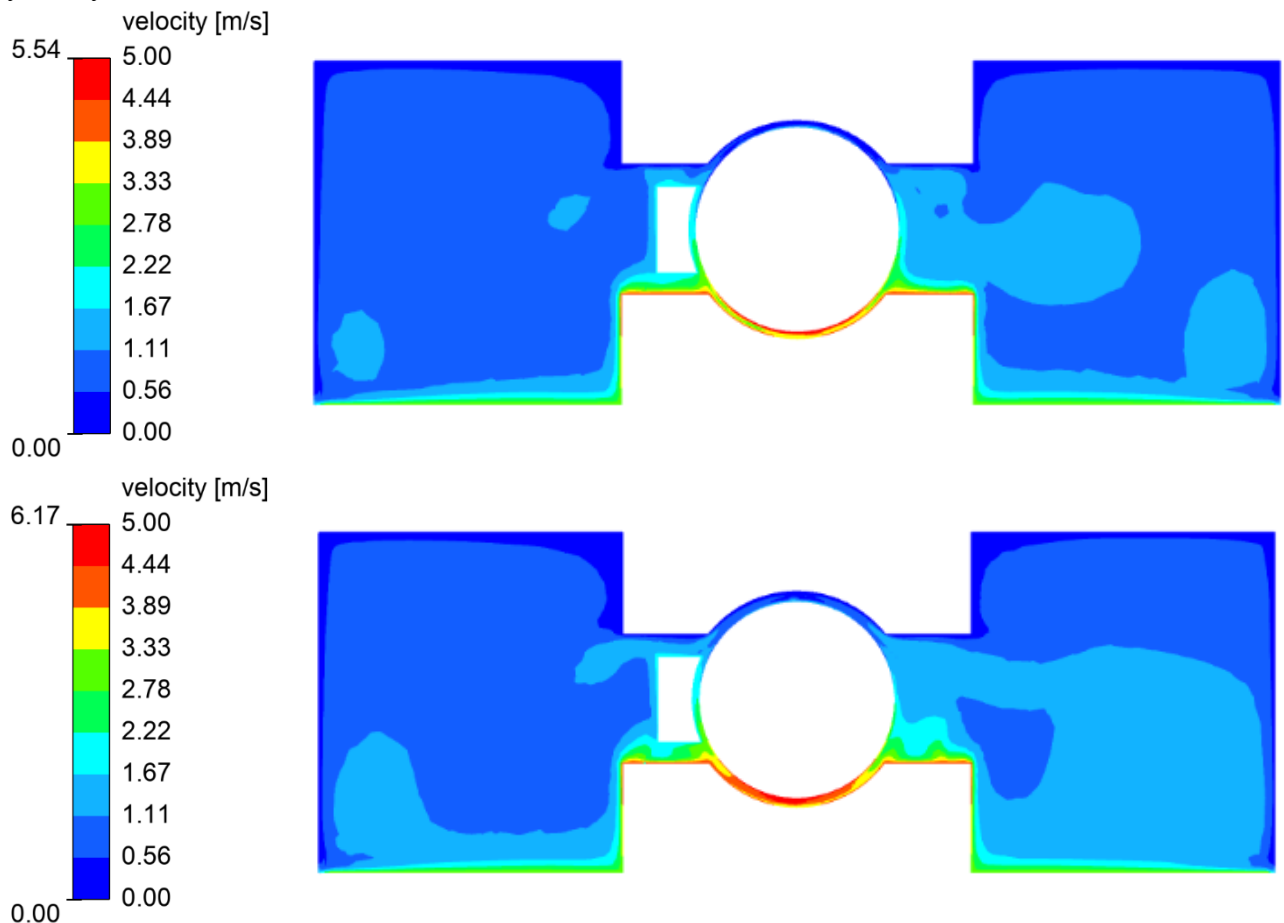
Obrázek 44 - Zobrazení proudnic v uzavřené části klece

Na obrázku 43 vidíme, že všechny proudnice u vnitřního kroužku rotují spolu s klecí. Žádná z proudnic nesměruje do středu kuliček. Proudnice jsou tedy v místě kuličky „odraženy“ zpět do prostoru olejové lázně a jenom minimální množství oleje se z prostoru lázně dostane do prostoru ložiska. Naopak z míst u vnějšího kroužku dochází k výtlaku oleje do oblasti lázně. Zobrazené proudnice upřesňují vektorové pole popsané v předchozí kapitole. V otevřené části ložiskové klece vlivem víření nedochází k významnému sání oleje z nádrže do prostoru ložiska a dochází zde pouze k významnému výtlaku oleje.

Na obrázku 44 vidíme rozdílné chování. Při stěnách vnitřního kroužku dochází k výraznému sání oleje do prostoru ložiska, ale stejně jako v předchozím pohledu při stěnách vnějšího kroužku dochází k výtlaku oleje z prostoru ložiska do prostoru nádrže.

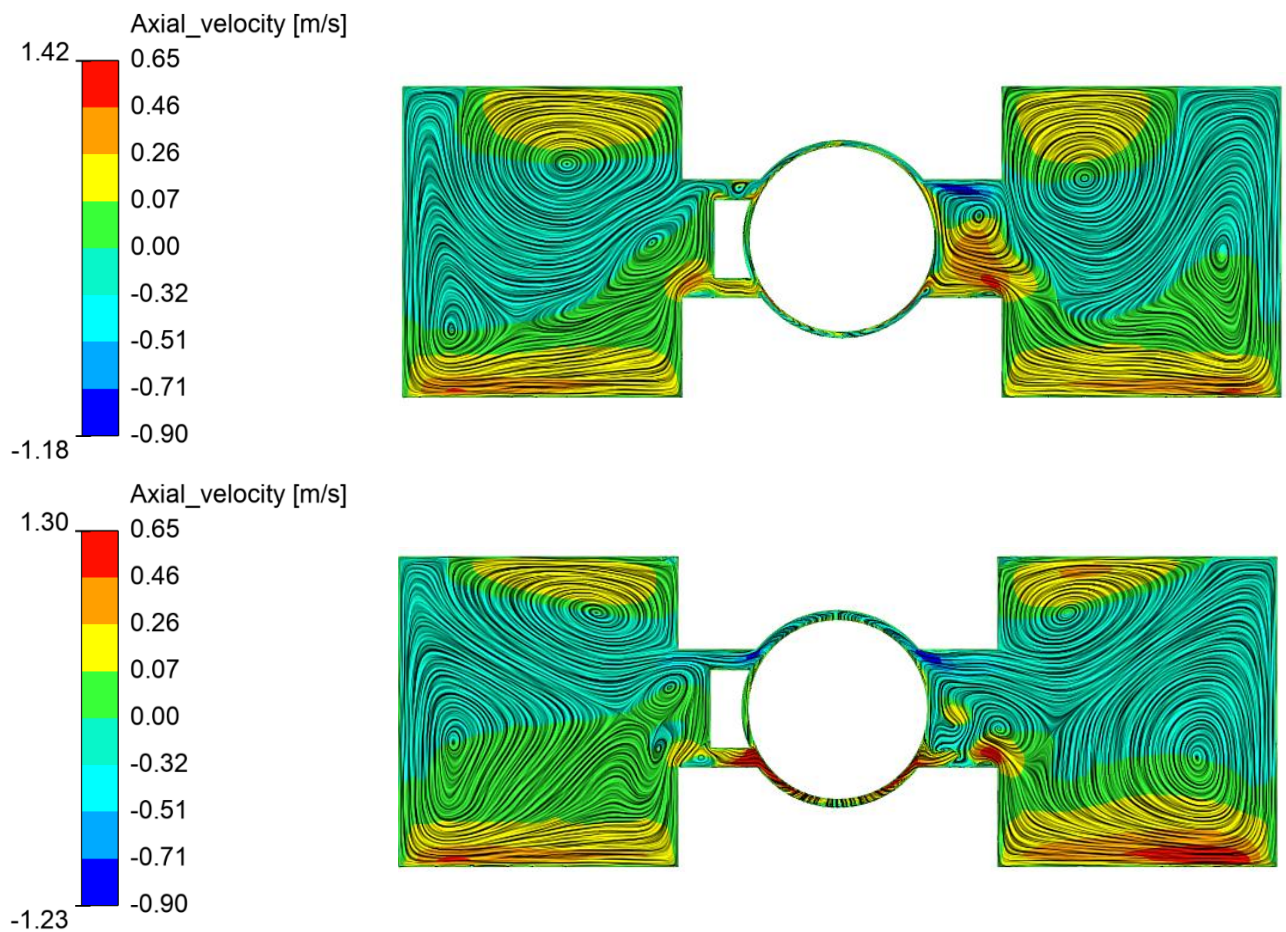
## 11.2. Porovnání proudového pole Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1

Pro porovnání výsledků nestacionárních výpočtů a stacionárních výpočtů použijeme výsledky výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a výsledky Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. Zaměříme se především na rozložení absolutních rychlostí a rozložení upravené axiální rychlosti s vykreslením proudnic do roviny. Všechny níže zobrazené obrázky budou uspořádány tak, že horní část obrázku znázorňuje stacionární výsledky a dolní část obrázku nestacionární výsledky.



Obrázek 45 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1

Z obrázku 45 vidíme, že rozložení absolutní rychlosti je v případě nestacionárního výpočtu totožné s výpočtem stacionárním. Vidíme také, že v případě nestacionárního výpočtu je odlišné maximum absolutní rychlosti v celé výpočetní oblasti a to 6,17 m/s oproti maximu 5,54 m/s ve variantě stacionární. Dále je patrné, že v nestacionární variantě je v oblasti kuličky u vnitřního kroužku větší oblast vysoké absolutní rychlosti než ve variantě stacionární. Odchýlení je dáno rozdílem zastavení v určitém časovém kroku výsledků v případě nestacionárních výsledků oproti časově průměrovaným výsledkům ve variantě stacionární. Trend absolutní rychlosti v zobrazené oblasti je pro obě varianty totožný a lze prohlásit, že jsou shodné.



**Obrázek 46 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1**

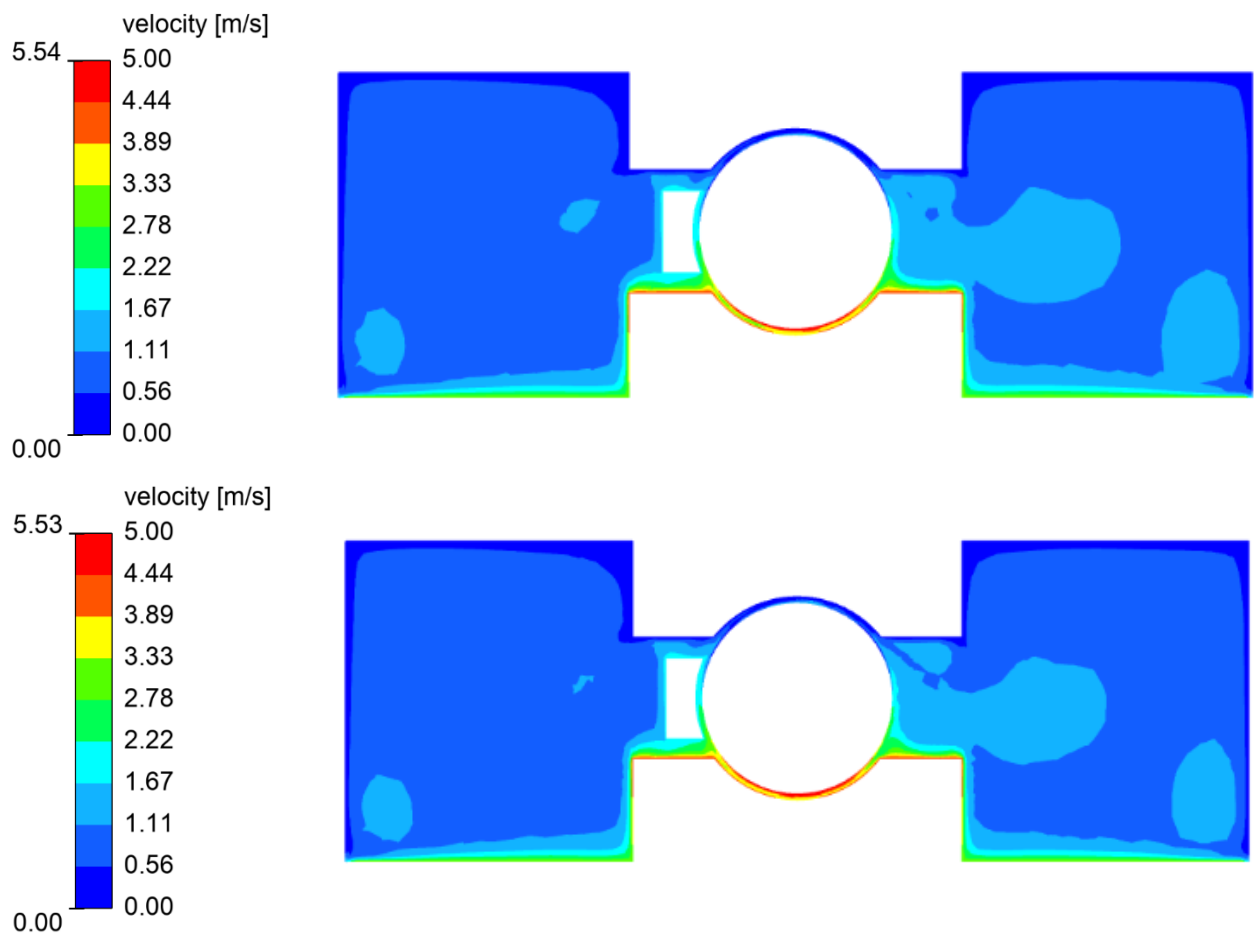
Na výše zobrazeném obrázku 46 můžeme vidět zobrazení upravené axiální rychlosti a promítnutí proudnic do zobrazené roviny. Vidíme, že stacionární varianta výpočtu dosahuje vyššího maxima upravené axiální rychlosti a to 1,42 m/s, než je tomu ve variantě nestacionární 1,3 m/s. V případě minimální upravené axiální rychlosti je hodnota nižší u nestacionární varianty a to -1,23 m/s oproti stacionární variantě, kde je minimum -1,18 m/s.

Při porovnání vidíme, že je dodrženo totožné rozmístění lokálních vírů v obou variantách a celkový vliv ložiska na upravené axiální rychlosti je také stejný. Lze tedy prohlásit, že obě varianty mají stejný průběh, a to sání oleje do prostor ložiska kolem vnitřního kroužku a výtlač oleje od středu kuliček do okolí při stěnách vnějšího kroužku. Jediná větší odchylka v proudovém poli je v místě otevření klece. V případě nestacionární úlohy je zde jiné rozložení lokálního víru. Nicméně se může jednat o rozdíl v časovém kroku, ve kterém byl nestacionární výpočet zastaven oproti, zprůměrovaným hodnotám ve variantě stacionární.



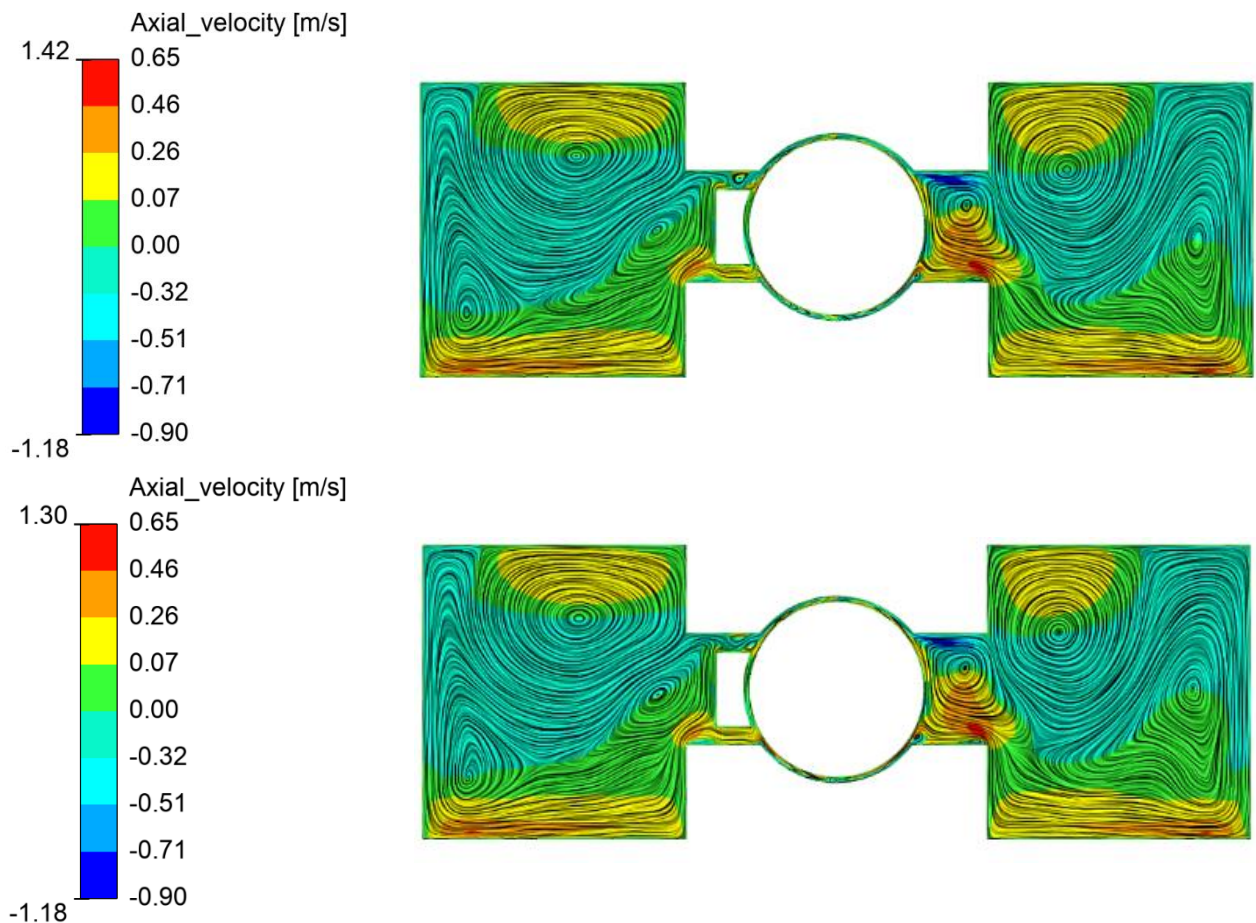
### 11.3. Porovnání proudového pole Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_Ref\_Prism\_G1

Další částí analýzy proudového pole je porovnání referenčního stacionárního výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 se stacionární variantou referenčního výpočtu s prismatickou sítí Vyp\_Stac\_Prism\_V2\_G1. Tato analýza pojednává o vhodnosti použití objemové sítě, která byla vytvořena funkcí „Thin volume mesh“ v přídatném objemu valivých kuliček. Zobrazení se zde bude řídit totožným principem jako v předchozí kapitole. Horní obrázek je referenční výpočet Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a dolní obrázek reprezentuje referenční výpočet s prismatickou sítí Vyp\_Stac\_Prism\_V2\_G1.



Obrázek 47 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_Ref\_Prism\_G1

Na výše zobrazeném obrázku 47 můžeme vidět porovnání absolutní rychlosti obou variant výpočtů. Vidíme, že výsledky jsou až na mírné odchylky naprosto totožné.

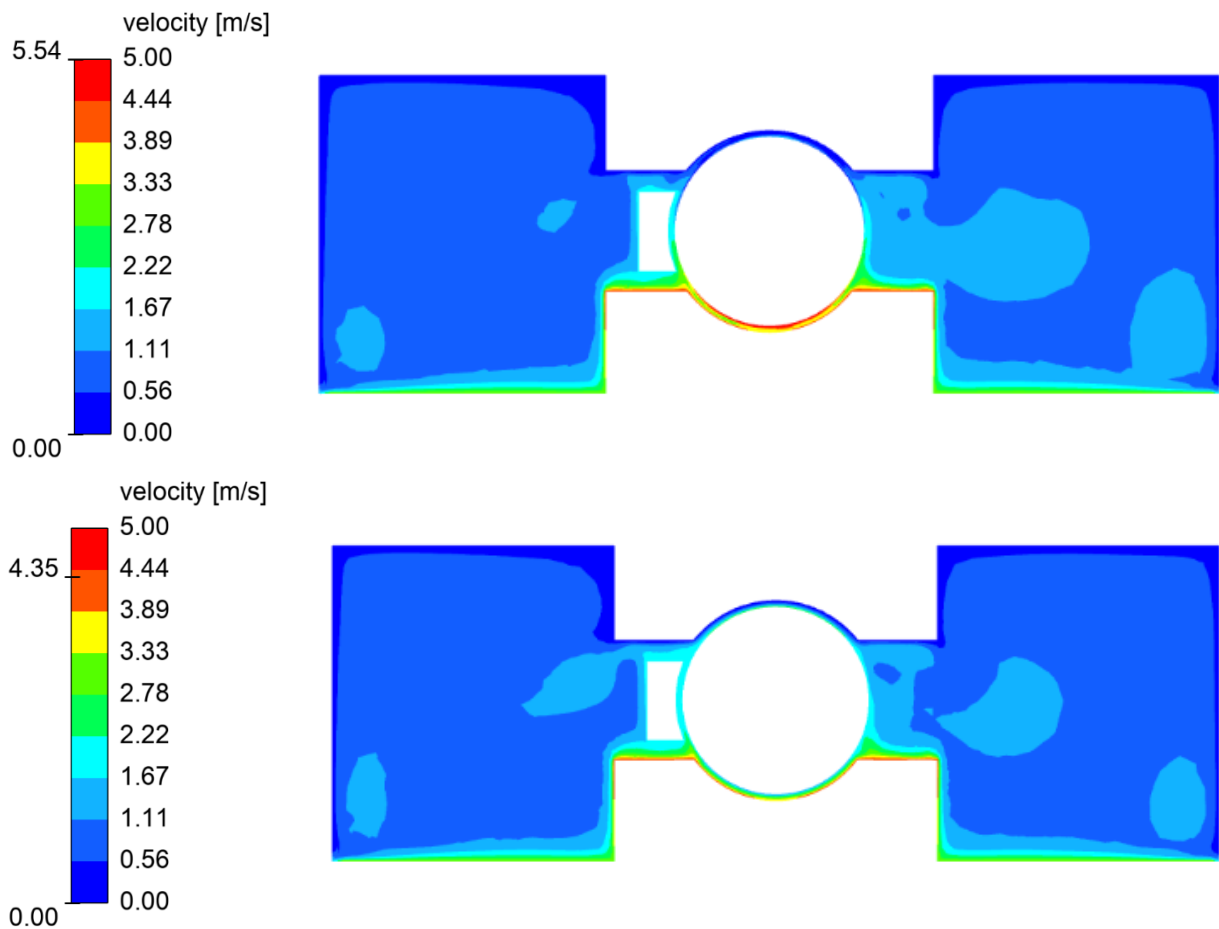


**Obrázek 48 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_Ref\_Prism\_G1**

Na obrázku 48 můžeme vidět rozložení upravené axiální rychlosti a promítnutí proudnic do zobrazené roviny. Stejně jako v předchozím porovnání absolutních rychlostí vidíme, že jsou obě rozložení totožná. Rozdíl je v maximum upravené axiální rychlosti v celém výpočetním objemu pro první obrázek, kde maximum dosahuje 1,42 m/s oproti 1,3 m/s. Rozložení všech vírů je také totožné. Lze tedy prohlásit variantu Vyp\_Stac\_Ref\_Prism\_G1 jako korektní. A lze tedy ve vhodných případech použít vygenerovanou výpočetní síť způsobem, který byl popsán v kapitole 6.5.

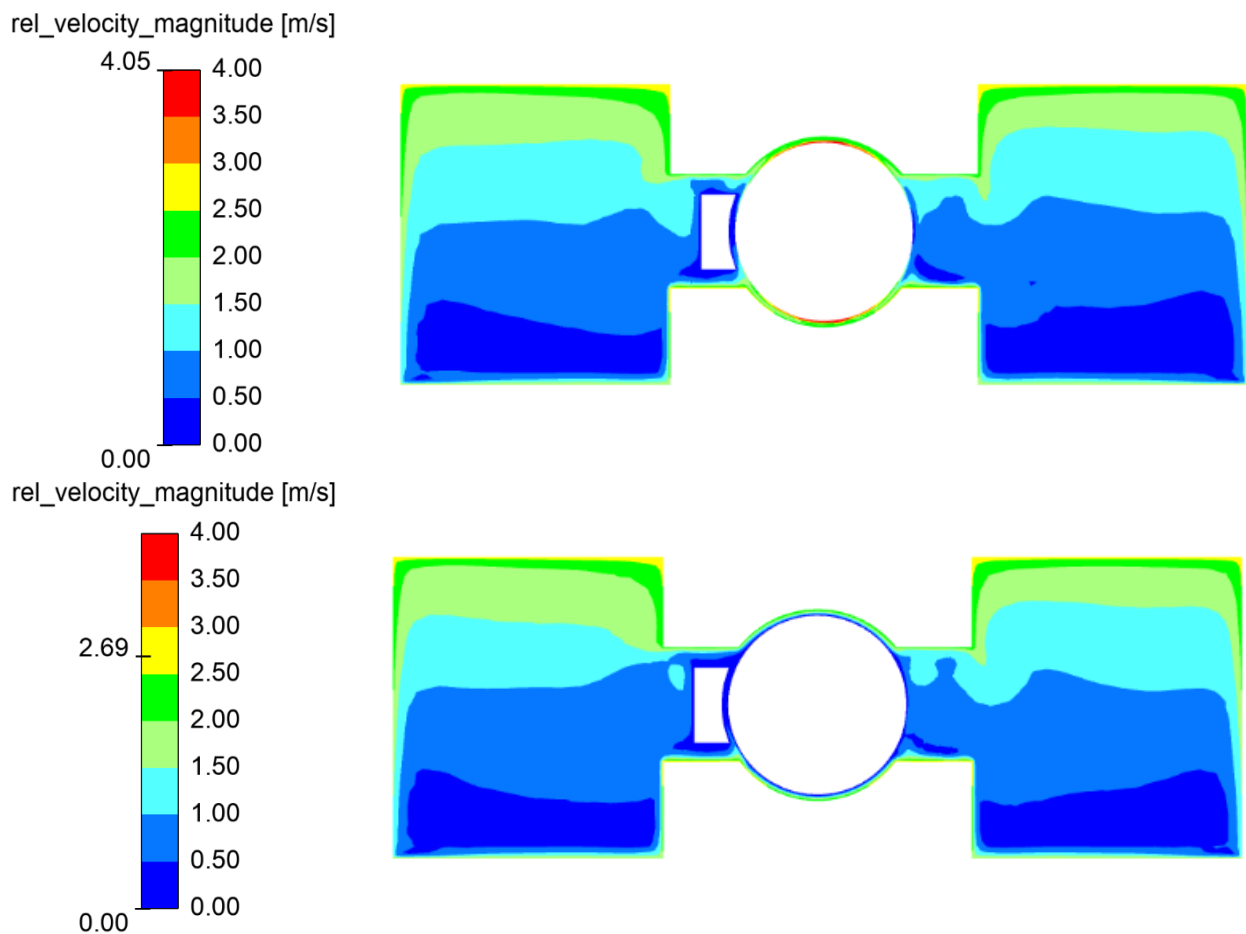
#### **11.4. Porovnání proudového pole Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2**

Jedním z nejzajímavějších vyhodnocení je porovnání proudového pole referenčního výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 s výpočtem uvažovacím nerotující kuličky Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2, a to kvůli závěru, který byl vyvozen z analýzy odporového momentu, kde v obou variantách vyšly stejné hodnoty, ale v případě nerotujících kuliček došlo k významnému poklesu výpočetní náročnosti. Horní obrázek opět reprezentuje referenční výpočet Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a dolní obrázek výpočet nerotujících kuliček Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2.



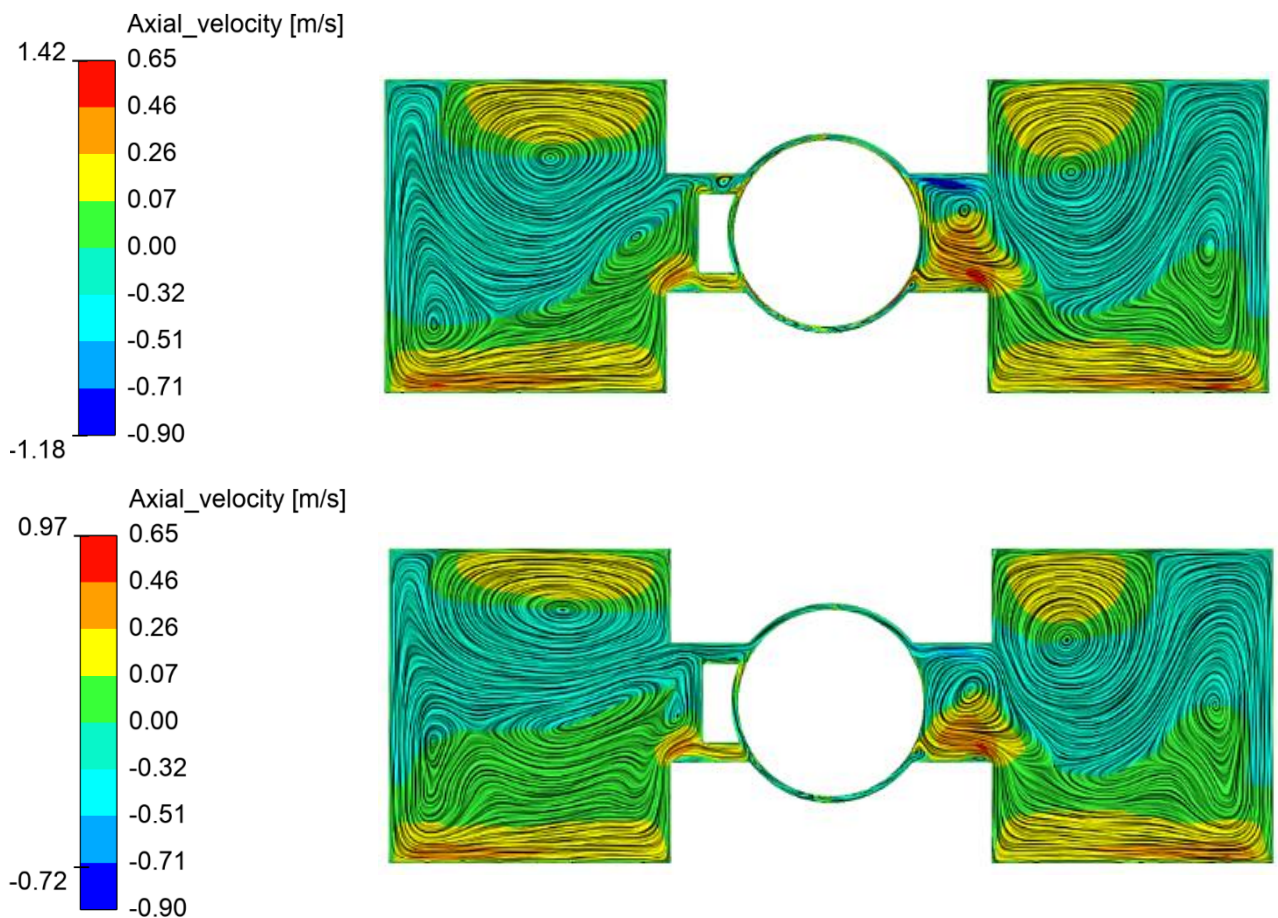
**Obrázek 49 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2**

Na výše zobrazeném obrázku je znázorněno porovnání absolutní rychlosti pro výpočty Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2. Pro variantu Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2 vidíme, že došlo k poklesu maximální hodnoty absolutní rychlosti. Pokles maxima je dán nulovou relativní rychlostí valivých kuliček. Absolutní rychlost na stěnách valivých kuliček je tedy rovna jejich unášivé rychlosti. Trend rozložení absolutní rychlosti je v celé doméně, vyjma blízkého okolí valivých kuliček, v obou variantách stejný.



**Obrázek 50 - Porovnání relativní rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2**

Pro detailnější rozbor proudového pole bylo pro toto porovnání zobrazeno rozložení relativních rychlostí, viz obrázek 50. Relativní rychlost je vztažena k ložiskové kleci neboli k rychlosti, která unáší valivé kuličky. Z obrázku vidíme, že v případě referenčního výpočtu Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 je na vrcholech kuliček relativní rychlost rovna 4 m/s a směrem ke středu tato rychlost klesá k nule. Oproti tomu je relativní rychlost pro variantu nerotujících kuliček Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2 na stěnách valivých kuliček ve všech místech rovna nule. Relativní rychlost je ve zbytku výpočetní domény totožná pro obě varianty.

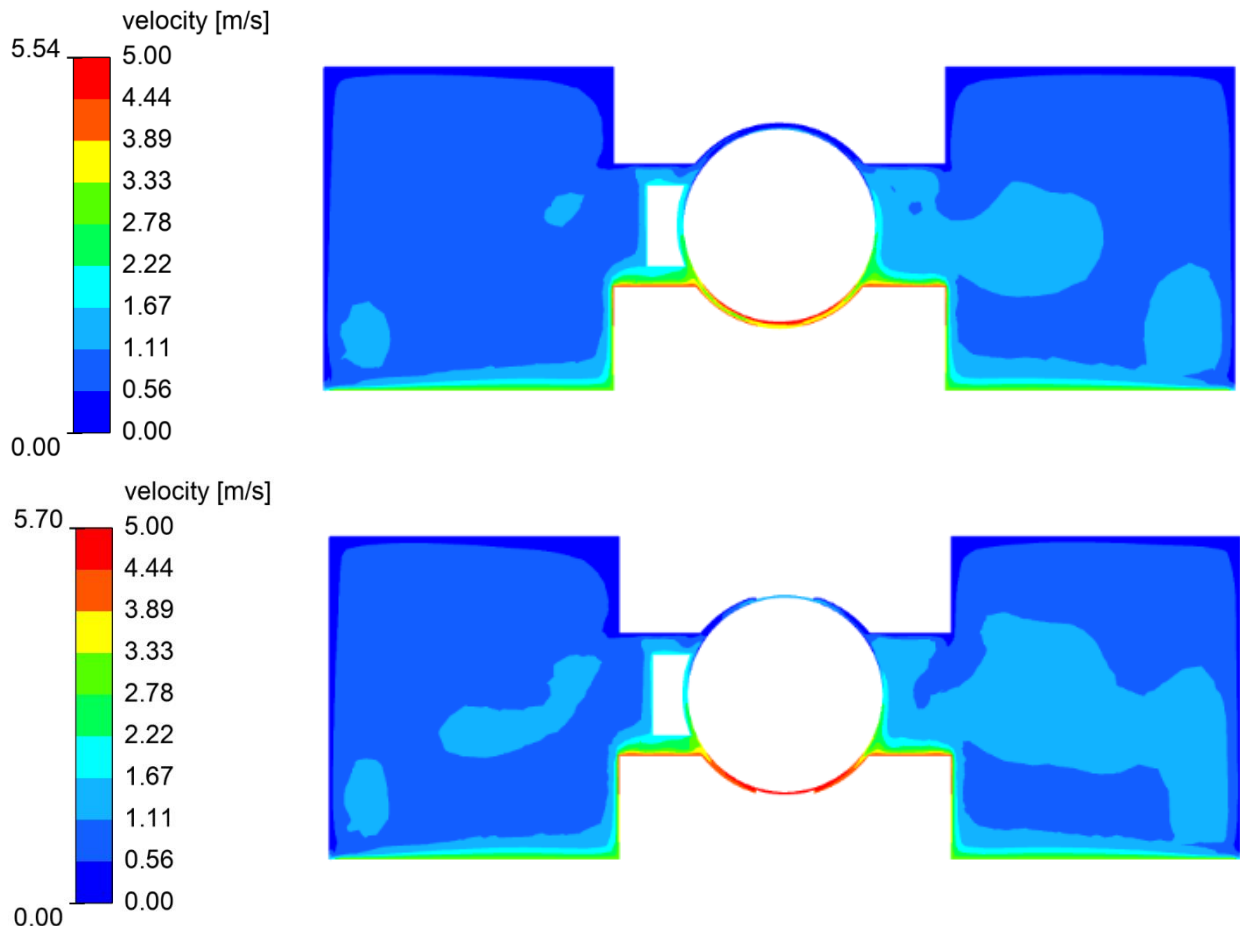


**Obrázek 51 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2**

Rozhodujícím pro porovnání variant je rozložení upravené axiální rychlosti spolu s promítnutím proudnic do zobrazené roviny. Porovnání můžeme vidět na obrázku 51. Vidíme, že ve variantě Vyp\_Stac\_NK\_V2\_G2 došlo ke snížení maximální upravené axiální rychlosti, a to na hodnotu 0,97 oproti 1,42 m/s a minimální hodnota upravené axiální rychlosti se zvýšila z -1,18 m/s na -0,72 m/s. Trend rozložení upravené axiální rychlosti spolu s hlavními víry je ovšem zachován. Lze tedy prohlásit, že samotná rotace valivých kuliček nemá vliv na makroskopické jevy v proudovém poli. Byly zachovány sací a výtlačné strany kuličkového ložiska a rozdílnost obou variant je právě v blízkém okolí valivé kuličky. Lze tedy prohlásit, že tato varianta se jeví jako nejlepší pro výpočty ve velkých výpočetních doménách, kde není přímým zájmem řešit jevy v blízkosti valivých kuliček. Pro výpočty zabývající se vlivy v místě valivých kuliček tato metoda výpočtu valivého ložiska není vhodná.

### 11.5. Porovnání proudového pole Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3

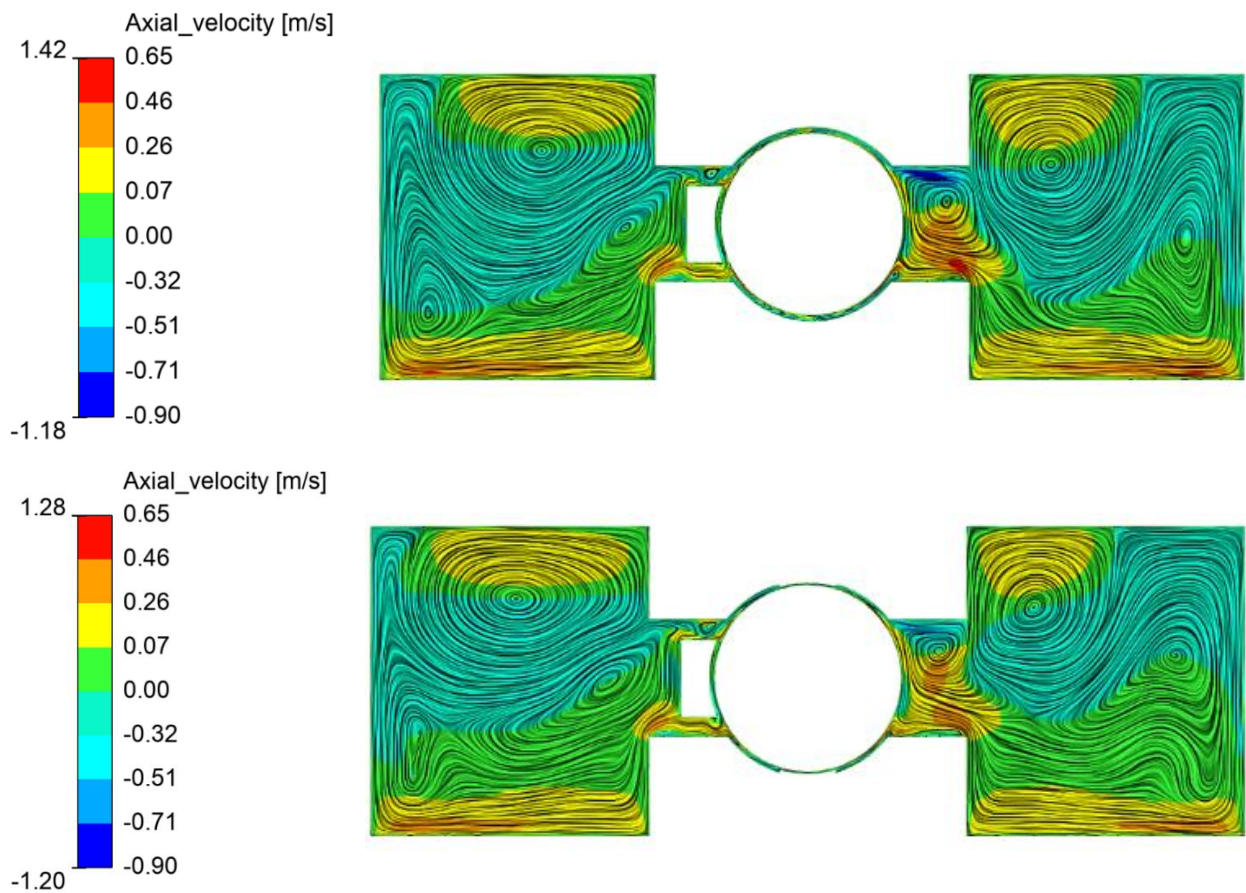
Poslední varianta výpočtu, která se porovnává s referenčním výpočtem Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1, je varianta náhrady tečnosti Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3. V této variantě byla snaha o simulaci tečného dotyku mezi valivými kuličkami a stěnami kroužků. Teoreticky můžeme takovou variantu považovat za co nejbližší realitu. Porovnání je uspořádáno stejně jako v předchozích kapitolách. Horní obrázek reprezentuje referenční výpočet Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a spodní Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3.



Obrázek 52 - Porovnání absolutní rychlosti Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3

Na výše zobrazeném obrázku vidíme rozložení absolutní rychlosti v obou variantách. Pro variantu výpočtu náhrada tečnosti Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3 došlo k navýšení maximální hodnoty absolutní rychlosti na hodnotu 5,7 m/s oproti 5,54 m/s. Je vidět rozdíl v místě dotyku valivé kuličky s vnitřním kroužkem, kde vlivem simulace tečného dotyku došlo k navýšení rychlosti a rozšíření oblasti takto vysoké absolutní rychlosti. Ovšem trend absolutní rychlosti je ve zbylé domněně pro obě varianty totožný.





**Obrázek 53 - Porovnání upravené axiální rychlosti a promítnutých proudnic Vyp\_Stac\_Ref\_V2\_G1 a Vyp\_Stac\_NT1\_Prism\_G3**

Obrázek 53 reprezentuje rozložení upravené axiální rychlosti spolu s promítnutím proudnic do zobrazené roviny. Vidíme, že vlivem simulace tečnosti došlo ke snížení maxima upravené axiální rychlosti, ale také došlo ke snížení minima na hodnotu -1,2 m/s oproti -1,18 m/s. Celkový trend rozložení upravené axiální rychlosti je ovšem stejný pro obě varianty. Lokální víry jsou situovány stejně a mají stejné směry otáčení. Takováto varianta výpočtu má tedy přímý vliv na blízké okolí valivých kuliček, nikoli na celou výpočetní doménu. Dále má simulace tečnosti vliv na míru výtlačku a sání oleje z a do oblasti valivého ložiska. To je vidět z poklesu lokálních extrémů upravené axiální rychlosti v oblasti otevření ložiskové klece.

Ovšem proto, aby byla takováto varianta označena jako vhodná pro reálný popis chování valivého ložiska, bylo by nastavení výpočtu potřeba validovat a následně doladit experimentálními měřeními, které by potvrdilo korektnost simulace.

## 12. Doporučení pro modelování ložisek v CFD modelech pohonných mechanismů

### 12.1. Doporučení pro geometrii

Doporučení pro tvorbu geometrie valivých ložisek v pohonných mechanismech pro CFD simulace se řídí především dle stanovených cílů samotného výpočtu valivého ložiska.

V případě, že je valivé ložisko součástí velké výpočetní domény, která je náročná na výpočet a našim zájmem není přesný popis proudového pole v přímé blízkosti valivých kuliček ložiska, je možno využít variantu výpočtu s využitím varianty Geometrie 2. Neboli je možné valivé ložisko namodelovat tak, aby v okolí valivých kuliček nebyl žádný přídavný objem. Takovéto zjednodušení sníží výpočetní náročnost simulace ložiska za cenu nepřesných výsledků v blízkém okolí valivých kuliček vlivem nezahrnutí rotace valivých kuliček. Nutno podotknout, že vliv ložiska na okolní tekutinu v olejové lázni bude stejný jako v případě úplné simulace. Takovéto zjednodušení pohybu kuliček znamená použití nastavení okrajových podmínek označených pod názvem Nerotující kuličky tedy varianta výpočtu Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G2. Samotné valivé kuličky tedy nerotují, ale jsou pouze unášeny rotací klece. Pro Geometrii 2 nelze použít okrajovou podmínku rotace na stěnách valivých kuliček neboli variantu výpočtu Vyp\_Nest\_OP\_V2\_G2. Pro výše zmíněné musí být mezi valivými kuličkami a kroužky, popřípadě klecí, zachovaná mezera. A to mezera alespoň taková, aby se do její šířky vešly dvě vrstvy mezních buněk spolu s alespoň třemi objemovými buňkami. V diplomové práci byla například tato mezera široká 0,25 mm.

V případě, že cílem výpočtů je co možná nejpřesnější popis proudového pole v ložisku a získání přesných veličin v oblasti valivých kuliček, jeví se jako nejvhodnější varianta geometrie valivého ložiska pod názvem Geometrie 3, tedy varianta výpočtu Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3, tedy úprava geometrie s použitím přídavného objemu valivých kuliček. Ten zajistí simulaci relativního pohybu valivých kuliček a také vytvoření náhrady tečnosti, například tak, jak to bylo popsáno v kapitole 5.3. Vhodnost tohoto způsobu modelování by bylo ovšem vhodné ověřit validačním experimentem. Bez validačního měření by pak pro úplný popis proudového pole ložiska byla nevhodnější Geometrie 1 tedy varianta referenčního výpočtu pod názvem Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1.

Pro určení výšky  $t$  přídavného objemu bych doporučil výsledky z porovnání uvedeného v kapitole 8.3. Řídil bych se tedy minimální možnou šířkou přídavného objemu kuliček  $t = 0,25$  mm, aby bylo dosaženo optimální konvergence výpočtu.

### 12.2. Doporučení pro výpočetní síť

Doporučení pro diskretizaci výpočetní oblasti popisuje kapitola 6., která se zabývá studií nezávislosti sítě. Tato kapitola pojednává o maximální velikosti a minimální velikosti buňky v povrchové síti. Doporučení pro nastavení minimální velikosti buňky je takové, že velikost povrchové buňky by měla být rovna alespoň šířce mezery přídavného objemu valivé kuličky, například 0,25 mm. Toto pravidlo však platí pouze v případě, že je šířka  $t$  přídavného objemu velmi nízká, jak tomu bylo například popsáno v doporučení pro geometrii v předchozí kapitole.

V případě, že je valivé ložisko počítáno metodou nerotujících kuliček, můžeme nastavit minimální velikost buněk na hodnotu 0,25 mm dle vyhotovené studie nezávislosti. Pro takovouto metodiku, kdy není počítána relativní rychlost valivých kuliček, se nabízí možnost další studie nezávislosti výpočetní sítě, která by mohla ještě více snížit náročnost celého



výpočtu snížením počtu buněk.

Pro úplný výpočet, kdy je simulován i relativní pohyb valivých kuliček vůči kleci, je potřeba do přídatného objemu vtěsnat prismatickou vrstvu buněk spolu s alespoň jednou objemovou buňkou. Opět bychom se měli řídit pravidlem o maximální velikosti nejmenší buňky a to tak, aby byla v souladu s vyhotovenou studií nezávislosti výpočetní sítě. V případě špatné kvality buněk v přídatném objemu lze využít prismatickou síť tvořenou funkcí „Thin volume mesh“. Díky této funkci se vyhneme vytváření mezní vrstvy v přídatném objemu, který je velmi „tenký“, a při vhodném nastavení této funkce nedojde k odchýlení výsledků od klasické výpočetní sítě. Vhodným nastavením této funkce se myslí dodržení velikosti buněk v přídatném objemu tak, aby buňky nahrazovaly mezní vrstvu. Bohužel tato funkce neumí vytvořit kulovitou výpočetní síť a je potřeba celou výpočetní doménu vhodně rozpůlit tak, aby přídatné objemy, na které bude tato funkce uplatněna, byly symetrické a bylo možno nastavit jejich správnou podmínku rotace. Takovýmto krokem se bohužel zvyšuje časová náročnost na diskretizaci výpočetní oblasti a při ruční tvorbě výpočetní sítě se zde zvyšuje šance vytvoření chyb uživatelem.

### 12.3. Doporučení pro nastavení výpočtu

Nastavení výpočtu v programu Ansys Fluent se opět odráží od cíle dané úlohy.

V případě, že cílem dané úlohy není přesný popis proudového pole v blízkosti valivých kuliček, je nejvhodnější variantou výpočtu Vyp\_Nest\_NK\_V2\_G2. Lze tedy vynechat relativní pohyb valivých kuliček a lze simulovat pouze jejich unášivý pohyb vlivem rotace hnací hřídele. Takovouto metodikou výpočtu lze dosáhnout přesných hodnot ztrát a jsme také schopni detailně popsat proudové pole v okolí valivého ložiska. Takto získané proudové pole je odchýleno v přímé blízkosti valivých kuliček od proudového pole vycházejícího z metodiky úplné simulace valivého ložiska se všemi relativními pohyby. Všechny makroskopické vlivy jsou však v souladu s úplnou simulací a metoda je tedy korektní pro velké výpočetní domény.

V případě, že cílem úlohy je detailní simulace valivých ložisek a záměrem je vyhodnocení blízkého okolí valivých ložisek, například pro optimalizaci ložiskových klecí, je vhodnou metodikou výpočtu varianta Vyp\_Nest\_NT1\_Prism\_G3 anebo Vyp\_Nest\_Ref\_V2\_G1. Metodika výpočtu musí simulovat unášivý pohyb valivých kuliček vlivem rotace hnací hřídele a také musí popisovat samotné rotace kuliček. Pro přesné simulace je dále vhodné vyhotovit optimální experimentální měření, které by validovalo nastavení výpočtu a použité zjednodušení geometrií.

Pro popis proudových polí či vyhodnocení ustálených veličin v oblasti valivých ložisek je možné dané úlohy řešit jak stacionárními přístupy, tak nestacionárními přístupy. Pro stacionární nastavení výpočtu byla použita metoda „Moving reference frame“ a pro nestacionární nastavení výpočet metoda „Moving mesh“. Tyto metody byly vybrány díky jejich nízké výpočetní náročnosti oproti metodě „Remeshing“, kterou lze použít pouze pro nestacionární úlohy, metody jsou rovněž úsporné oproti výpočetní metodě „Overset mesh“, která vyžaduje překrytí výpočetních sítí alespoň čtyřmi vrstvami buněk o podobných velikostech. Tento překryv výpočetních sítí by zamezil simulaci tečného dotyku a také by velmi zvýšil počet buněk a tím zvýšil i výpočetní náročnost dané úlohy.

Dynamické ustálení výsledků v případě nestacionárních úloh nastalo u vyhodnocovaného ložiska s otevřenou klecí po třiceti otáčkách hnací hřídele aneb po deseti otáčkách kuličkové klece. Pro vyhodnocení ustálených veličin v nestacionárních úlohách by měl být výpočet počítán alespoň takový výpočetní čas, který tedy odpovídá třiceti otáčkám hřídele. Tato hodnota je velmi vysoká a ukazuje, že náročnost těchto úloh v praxi vyžaduje pro získání přesných

výsledků velký výpočetní výkon.

Za vhodný model turbulence byl zvolen SST k-w model. Tento model je vhodný pro úlohy, kde je potřeba kombinovat přesnost výpočtu jak u stěny, tak ve volném proudu.

## 13. Ideový návrh experimentu pro validaci modelů ložisek

Pro dokonalé naladění a ověření výpočtové metodiky, která byla pospána v této práci, je vhodné veškeré výsledky validovat s výsledky experimentu. Pro naladění výpočtové metodiky bychom se tak mohli zaměřit například na korektnost výsledků odporového momentu na hřídeli, která pohání měřené ložisko.

### 13.1. Návrh experimentu pro validaci odporového momentu

Experiment, který by validoval odporový moment neboli ztrátový výkon na hřídeli vlivem ložiska potopeného v olejové lázni, musí být navržen tak, aby byl v souladu s provedenými výpočty. Musí být dodrženy charakteristické rozměry ložiska, geometrie klece, tvar a objem olejové lázně, ve které je ložisko ponořeno, a především musí být použit mazací olej o stejných parametrech.

#### 13.1.1. Měřicí zařízení

Vzhledem k velikosti ztrát, které byly vypočteny a popsány v předchozích kapitolách, musí být měřicí zařízení dostatečně přesné i pro velmi nízké hodnoty momentů. Samotné zařízení pak nebude měřit pouze ztráty v ložisku nezávislé na zatížení, jako tomu bylo v případě výpočtů, bude také snímat další mechanické ztráty (valivý odpor valivých kuliček, mechanické tření, ztráty v těsnění olejové nádrže atd.).

Pro návrh takového experimentu by mohlo být vybráno například měřicí zařízení „T11 Bearingless Rotary Torque Transducer“, viz Obrázek 54, od firmy „Interface force measurement solutions“, parametry tohoto měřicího zařízení jsou vypsány v tabulce 22 [15].

Tabulka 22 - Parametry měřicího zařízení [15]

	Rozsah	Jednotky
Měřicí rozsah	0,005 – 150	Nm
Chyba měření	0,1	%
Maximální otáčky	30000	1/min
Výstup	5 nebo 10	V



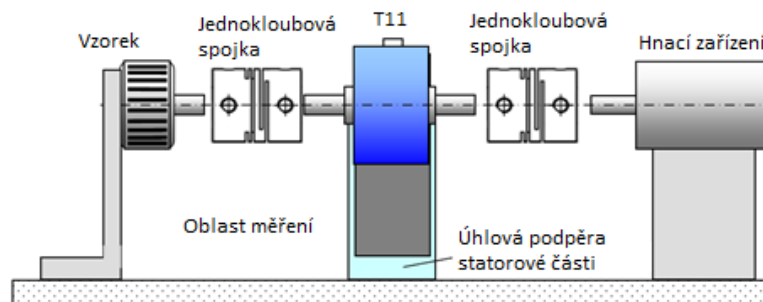
Obrázek 54 - T11 Bearingless Rotary Torque Transducer [15]

Výše popsané měřicí zařízení je schopno měřit dynamické i statické momenty. Předepsaná poloha zařízení je horizontální. [15]

### 13.1.2. Konfigurace měření

Konfigurace měřícího zařízení musí být v souladu s funkčním zapojením měřícího zařízení. K měření je potřeba hnací stroj, dvě hřídelové spojky, měřící zařízení a testovaný prvek, který bude popsán níže.

V našem případě by mohl být hnacím strojem například asynchronní motor s kotvou nakrátko. Jeho výhodou je jednoduchá regulace otáček a momentu na hřídeli. Takováto konfigurace pro výše zmíněné měřící zařízení je zobrazená na obrázku 55. Vzhledem k charakteristice měření je zapotřebí dosáhnout přesné souososti všech komponent měření a pro velmi nízké měřené hodnoty (do 150 Nm) je potřeba dosáhnout co možná nejnižšího předpětí v měřené soustavě [16].



Obrázek 55 - Konfigurace měření [16]

Testovaným prvkem je myšleno ložisko ponořené v olejové nádrži. Aby byla dodržena korektnost mezi výpočty a experimentem, je potřeba, aby hřídel procházela celou olejovou nádrží. Takovéto provedení by tedy muselo být osazeno dvěma hřídelovými těsněními. Na samotné hřídeli pak bude muset být zajištěno upevnění samotného ložiska například pojistným kroužkem (pro nezatížené měření) ze strany jedné a osazením ze strany druhé. Samotná olejová nádrž pak musí být horizontálně dělená, aby byla umožněna lehká demontáž, a musí mít otvory pro vypouštění a napouštění oleje. Nejvhodnějším tvarem olejové nádrže by byla krátká trubka o stejném vnitřním průměru, jako je vnější průměr vnějšího kroužku valivého ložiska.

Pro budoucí varianty testování ložisek je vhodné nádrž osadit i měrkou hladiny, a to z důvodu umožnění experimentu při jiných okrajových podmínkách než při úplném zaplavení ložiska.

Jako další nabízenou možností, jak udělat měření více flexibilní, je zahrnutí radiální a axiální síly působící na ložisko. Tato variace by mohla být zrealizována například přidavnými šrouby nebo pružinami, které by tvořily požadované síly v požadovaných směrech.

### 13.1.3. Postup měření

Měření každého ložiska je potřeba rozdělit do tří fází. V první fázi by se měřil odporový moment vyvozený od rotace hřídele vznikající třením o okolní vzduch a odporový moment vzniklý vlivem tření v těsnění v olejové nádrži, dále by se v této fázi naměřily další ztráty ostatních zařízení. Nutno podotknout, že olejová nádrž v této fázi nebude osazena ložiskem a samotná nádrž bude vypuštěná. Takto naměřený odporový moment bude dále označen jako moment vlivem testovacího zařízení a bude pro totožné okrajové podmínky a stejný průměr hřídele vždy stejný. Tento odporový moment označíme  $M_1$ .

Ve fázi druhé by se hřídel osadila testovaným ložiskem a samotné ložisko by bylo mazáno alespoň minimálním množstvím oleje, které je předepsané výrobcem ložiska pro minimalizaci

mechanického tření. Takto měřený odporový moment by pak reprezentoval ztráty vlivem osazení ložiska na hřídeli a odporový moment vlivem testovacího zařízení. Tento odporový moment bude dále označován jako  $M_{II}$ . Pro vyjádření odporového momentu, který vzniká pouze vlivem testovacího ložiska, musíme odečíst od měřeného odporového momentu odporový moment vznikající vlivem testovacího zařízení neboli  $M_{I\text{ložisko}} = M_{II} - M_I$ .

Ve fázi třetí by se testovaly ztráty vlivem ponoření ložiska do oleje. Tato fáze by pak validovala výsledky ztrát z CFD výpočtů popisované v předchozích kapitolách. Při této fázi měříme celkový odporový moment  $M_{\text{celkový}}$ , který reprezentuje výše zmíněné ztráty a ztráty vlivem ponoru ložiska. Odporový moment vlivem ponoření ložiska do oleje pak lze získat z následující rovnice (11).

$$(11) \quad M_{III} = M_{\text{celkový}} - M_{II}$$

## 14. Závěr a diskuse

Diplomová práce je zaměřena na popis metodiky a popis doporučení pro CFD výpočty valivých ložisek v komerčním programu Ansys Fluent 2020 R1. Práce je rozdělena do několika kapitol, které rozepisují teoreticky a i prakticky problematiku přípravy geometrie, diskretizace výpočetní oblasti, studii nezávislosti výpočetní sítě, nastavení a vybrání vhodných okrajových podmínek, vliv změny okrajových podmínek provozu valivého ložiska na ztráty hnací hřídele. Závěr diplomové práce je zaměřen na porovnání proudových polí variant výpočtů a na ideový návrh experimentu, kterým by bylo možné validovat CFD výsledky, například ztrát.

Simulace valivých ložisek jsou velmi náročnou disciplínou, kde je velmi důležitá příprava samotného výpočtu, vzhledem ke složitému pohybu valivých kuliček. Největší důraz by měl být kladen na přípravu geometrie a následně na diskretizaci výpočetní oblasti, kdy velmi jemná síť může být zbytečně náročná na samotný výpočet, ale naopak velmi hrubá síť může mít nepříznivý dopad na korektnost výsledků.

Samotné doporučení pro metodiku CFD simulace valivých ložisek se dělí do dvou směrů. První směr je v případě úplné simulace, kdy je cílem přesná simulace okolí valivých kuliček. V tomto případě musíme simulovat všechny relativní pohyby v ložisku a je vhodné připravit geometrii tak, aby byl nahrazen zjednodušený tečný dotyk komponent. Druhý směr je pak vhodný pro výpočty ve velkých výpočetních doménách, které jsou výpočetně náročné, například výpočet chování olejové náplně v převodové skřini s přítomnými ložisky. V takovém případě lze valivé ložisko zjednodušit tak, že nebude neuvážován tečný dotyk komponent ložiska, ani relativní pohyb valivých kuliček vůči unášivému pohybu klece. Tento krok sníží nároky na diskretizaci výpočetní oblasti a také sníží výpočetní náročnost, a to za cenu odchýlení výsledného proudového pole v přímém okolí valivých kuliček, celkový makroskopický vliv valivého ložiska na okolní olej v lázni je ale i v tomto případě zachován.

Všechny výsledky popsání v diplomové práci by bylo vhodné validovat experimentálním měřením, které by potvrdilo korektnost použitých metod a variant geometrií a okrajových podmínek. V oblasti valivých ložisek v CFD simulacích je prostor pro další výzkum, který by doplnil doporučení výpočetní metodiky, například pro jiné náročnější metody řešení anebo pro dvoufázové proudění, kdy je valivé ložisko zaplaveno olejem jen částečně. Takováto situace je běžná v případě nasazení ložisek v pohonných mechanismech, ale vyžaduje simulaci dvoufázového proudění, což je výrazně náročnější než v případě simulace plně zaplavených ložisek.

## 15. Reference

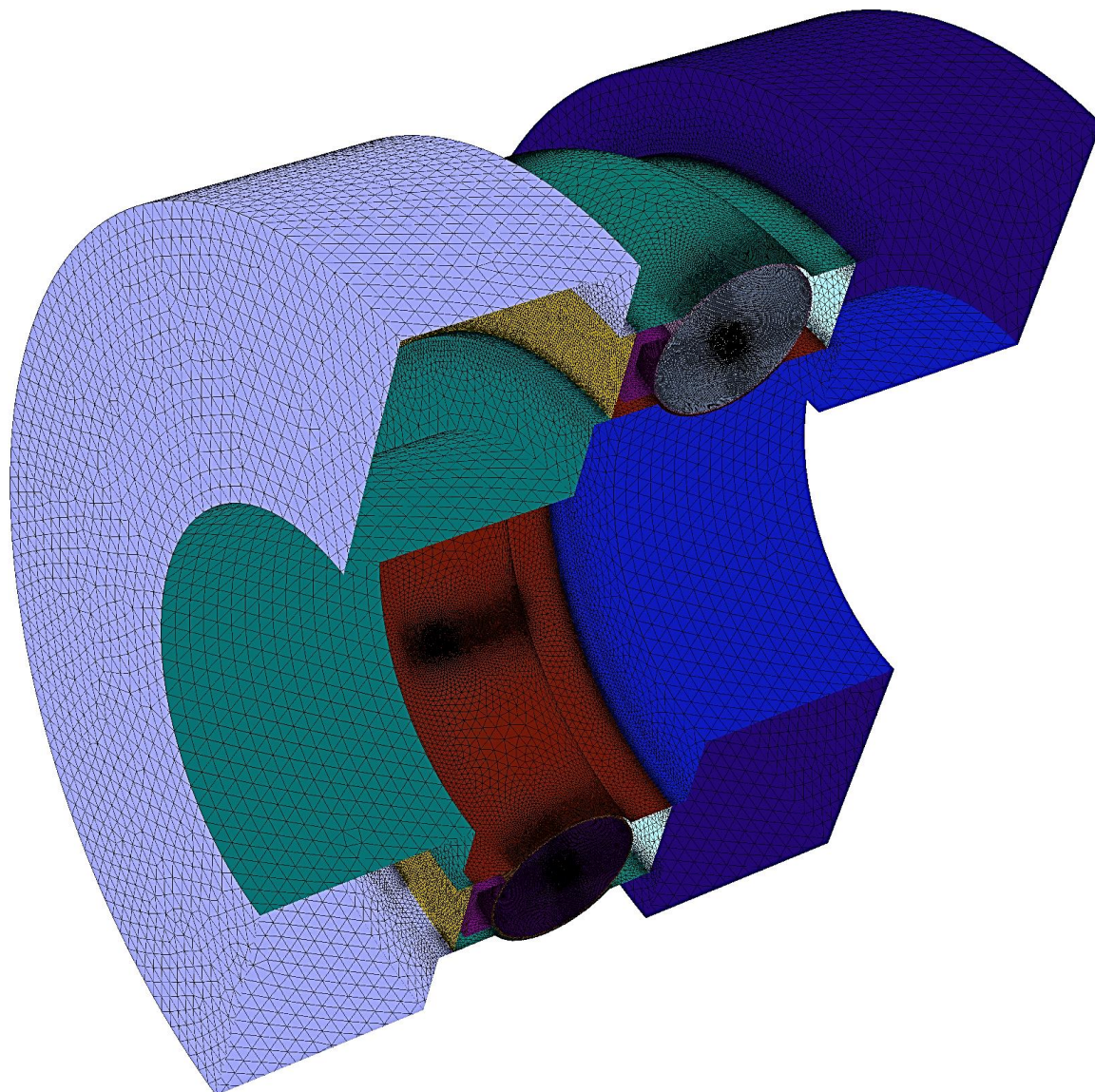
- [1] J. K. Stanislav Hosnedl, Příručka strojního inženýra : obecné strojní části. 1, Praha: Computer press, 1999. ISBN 8072260553.
- [2] Heinz Heisler MSc., BSc., F.I.M.I., M.S.O.E., M.I.R.T.E., M.C.I.T., M.I.L.T, Advanced Vehicle Technology, London: College of North West London, 2002. ISBN 0750651318.
- [3] Koyo Company, „Koyo,“ 8 2019. [Online]. Available: <https://koyo.jtekt.co.jp/en/2019/08/column01-03.html>. [Přístup získán 16.11.2020].
- [4] NKE Austria, „NKE Bearings,“ [Online]. Available: <https://www.nke.at/en/bearings-applications/applications/gearboxes>. [Přístup získán 17.11.2020].
- [5] PK SERVIS, „PK SERVIS,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.pkservis.com/data/web/upload/nsk/gearbox.pdf>. [Přístup získán 17.11.2020].
- [6] Achim Feldermann, Dennis Fischer, Stephan Neumann, Georg Jacobs., Tribology International, 2017, pp. 245-251. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X17301378> [Přístup získán 27.1.2021]. ISSN 0301-679X.
- [7] Noria Corporation, „Machinery Lubrication,“ Noria, [Online]. Available: <https://www.machinerylubrication.com/Read/30520/understanding-lubricant-churning>. [Přístup získán 27.1.2021].
- [8] SKF Group, „skf,“ 2019. [Online]. Available: [https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000\\_1-CS\\_tcm\\_54-121486.pdf#cid-121486](https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf#cid-121486). [Přístup získán 1.1.2021].
- [9] Wyatt Peterson, Thomas Russell, Farshid Sadeghi, Michael Tekletsion Berhan, Lars-Erik Stacke, Jonas Ståhl,, „A CFD investigation of lubricant flow in deep groove ball bearings,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20305600>. ISSN 0301-679X.
- [10] ANSYS, inc., „ANSYS Fluent Theory Guide 2020 R1,“ 2020.
- [11] Jiyuan Tu, Guan-Heng Yeoh, Chaoqun Liu, Computational Fluid Dynamics, Oxford: Elsevier LTD, 2013. ISBN 978-0-08-098243-4.
- [12] ANSYS, inc., „ANSYS Fluent User’s Guide 2020 R1,“ 2020.
- [13] ZF, Interní dokumentace ZF.
- [14] Ing. Petr Vlček, *Modelování turbulentního proudění*, Praha: České Vysoké Učení Technické v Praze, 2013. [Online]. Available: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. [Přístup získán 28.3.2021].
- [15] Dimed Electronic Engineering, „Dimed,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.dimed.eu/products/reaction-and-rotary-torque-measurement/rotary-torque-measurement-dynamic/t11-bearingless.html?fbclid=IwAR1w4tNel67FE4QkGMluqK30iM6GYxQbXKy0jgH-WXkvYcs5ISNwfvX\\_y5w](https://www.dimed.eu/products/reaction-and-rotary-torque-measurement/rotary-torque-measurement-dynamic/t11-bearingless.html?fbclid=IwAR1w4tNel67FE4QkGMluqK30iM6GYxQbXKy0jgH-WXkvYcs5ISNwfvX_y5w). [Přístup získán 2.3.2021].
- [16] Interface, inc., „www.interfaceforce.com,“ 3 11 2009. [Online]. Available: [https://www.dimed.eu/downloads/dl/file/id/225/product/264/interface\\_t11\\_manual.pdf](https://www.dimed.eu/downloads/dl/file/id/225/product/264/interface_t11_manual.pdf). [Přístup získán 28.3.2021].

## 16. Seznam příloh

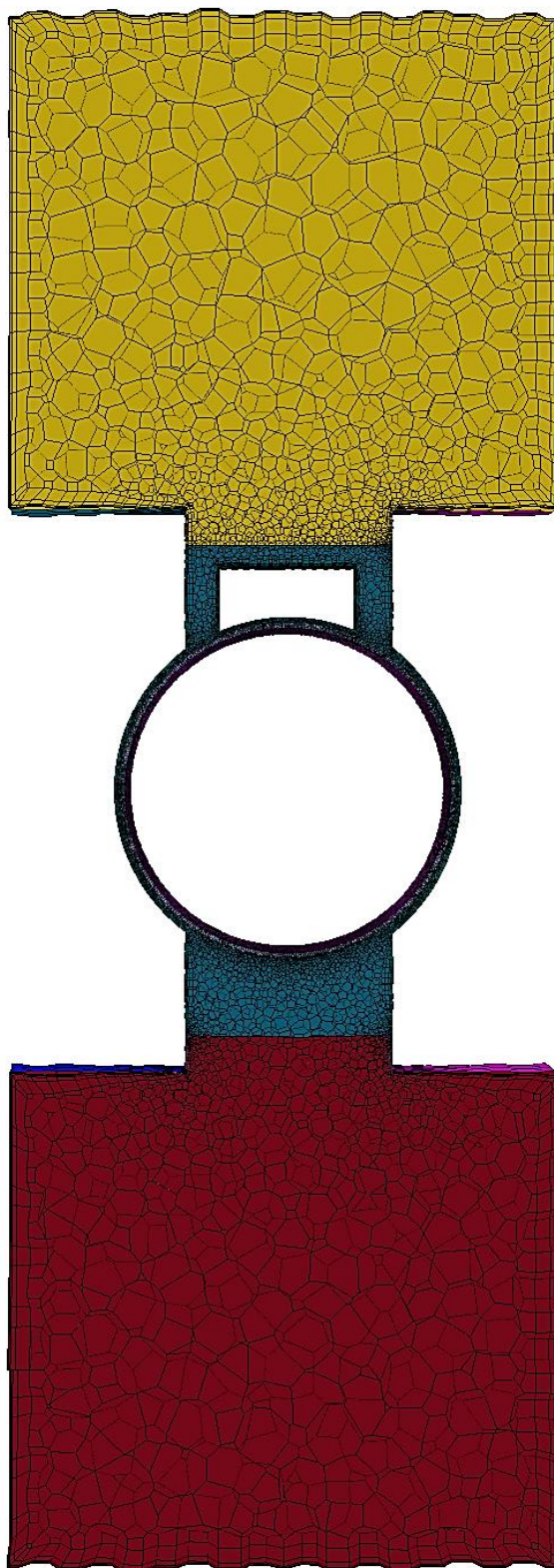
Příloha č. 1	.....	i
Příloha č. 2	.....	ii
Příloha č. 3	.....	iii
Příloha č. 4	.....	iv



## Příloha č. 1

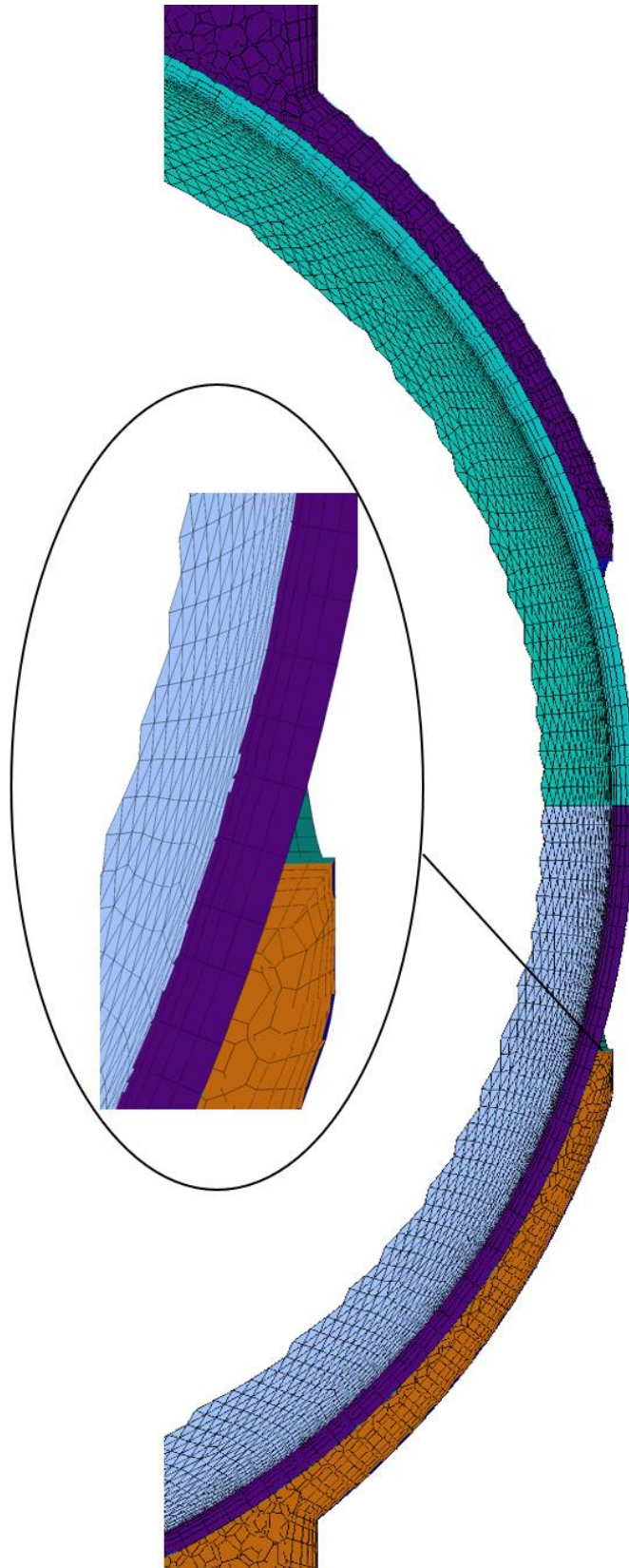


## Příloha č. 2





### Příloha č. 3



## Příloha č. 4

