

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stanoviště pro testování kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce

Autor:

Bc. Oldřich Suchánek

Vedoucí práce:

Ing. Pakosta Jiří, Ph.D.

Rok:

2020/2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Suchánek** Jméno: **Oldřich** Osobní číslo: **466656**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Motorová vozidla**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Stanoviště pro testování kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce

Název diplomové práce anglicky:

Test Bench for Drive Shafts at Juliska Laboratories

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rozbor dosavadního stavu otevřeného zkušebního stanoviště pro testování kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce. Doplněte chybějící části potřebné pro provádění nadefinovaných testů a u již hotových komponent zvažte, zda pracují správně, nebo bude výhodná jejich technická modernizace. Pro nově doplněné komponenty proveďte potřebný návrh a u vyráběných dílů navíc vytvořte příslušnou výkresovou dokumentaci.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Pakosta, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.09.2021**

Ing. Jiří Pakosta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno autora: Bc. Oldřich Suchánek
Název práce: Stanoviště pro testování kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce
Anglický název: Test Bench for Drive Shafts at Juliska Laboratories
Rozsah práce:

Počet stran 81

Počet obrázků 97

Počet tabulek 5

Počet příloh 13

Akademický rok: 2020/2021
Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program: Dopravní a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. Jiří Pakosta, Ph.D

Klíčová slova: Diplomová práce, otevřené zkušební stanoviště, kloubový hřídel, homokinetický kloub, Rzeppa, Tripod, Weiss, měření teploty kloubového hřídele, ochranný kryt, ventilační trať, tepelné ovlivnění

Key words: Diploma thesis, test bench, joint shaft, constant velocity joint, Rzeppa, Tripod, Weiss, joint shaft temperature measurement, protective cover, ventilation track, thermal influence

Abstrakt

Cílem diplomové práce je modernizace otevřeného zkušebního stanoviště v laboratořích na Julisce. V úvodu je vypracována rešerše zabývající se kloubovými hřídeli s homokinetickými klouby a jejich problematikou v kontextu zkušebního stanoviště. Dále se věnuje rozboru aktuálního stavu stanoviště, kde jsou popsány technické nedostatky a objasněno jejich řešení. V závěru práce je realizován experiment ověřující funkčnost navržených změn.

Abstract

The aim of this thesis is to modernize the test bench at the Juliska laboratories. In the introduction, research is performed concentrating on shafts with constant velocity joints and their issues pertaining to the test bench. The research continues by analysing the current state of the site, describing the technical deficiencies, and explaining proposed solutions. The thesis concludes with an experiment verifying the functionality of the proposed changes.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Testování kloubových hřidelí na zkušebním stavu na Julisce“ vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Jiřího Pakosty Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamů zdrojů.

V Praze dne 10.7.2021

Bc. Oldřich Suchánek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Pakostovi Ph.D., za cenné rady a odborné vedení diplomové práce. Také bych velice rád poděkoval všem kantorům, kteří mi pomohli v rámci problematiky diplomové práce.



Obsah

1. Úvod	2
2. Kloubové hřídele [1],[8].....	3
2.1 Kloubové hřídele s homokinetickými klouby [1],[2],[8]	4
2.1.1 Homokinetické klouby [1]	5
3. Experimentální zkoušení kloubových hřídelů	9
3.1 Měření mechanické účinnosti přenosu hnacího momentu.....	11
3.2 Měření teploty homokinetických kloubů.....	12
4. Rozbor dosavadního stavu zkušebního stanoviště	14
4.1 Průběh testování kloubových hřídelů na stanovišti v minulosti.....	16
4.2 Návrh modernizace zkušebního stavu na Julisce.....	17
5. Ochranný kryt pro kloubový hřídel	21
5.1 Konstrukce ochranného krytu a stojanu.....	22
5.2 Délková a úhlová nastavitelnost	27
6. Ventilační trať	31
6.1 Výběr vhodného provedení pro reálné uskutečnění.....	34
6.2 Zhotovení ventilační tratě.....	35
6.3 Měření rychlosti proudění vzduchu	51
7. Snížení kondukce tepla do hřídelů dynamometrů	52
7.1 Fáze 1 – součinitel tepelné vodivosti λ [30],[31].....	53
7.2 Fáze 2 – návrh nových propojovacích dílů.....	55
7.2.1 Spojovací díl – strana rozvodovka.....	55
7.2.2 Spojovací díl – strana pneumatika	64
8. Kontrolní měření na modernizovaném zkušebním stanovišti	71
8.1 Konfigurace měření.....	71
8.2 Vyhodnocení naměřených dat.....	73
8.3 Závěr kontrolního měření na modernizovaném zkušebním stanovišti	75
9. Závěr	76
10. Seznam použitých zdrojů.....	77
11. Seznam obrázků.....	79



1. Úvod

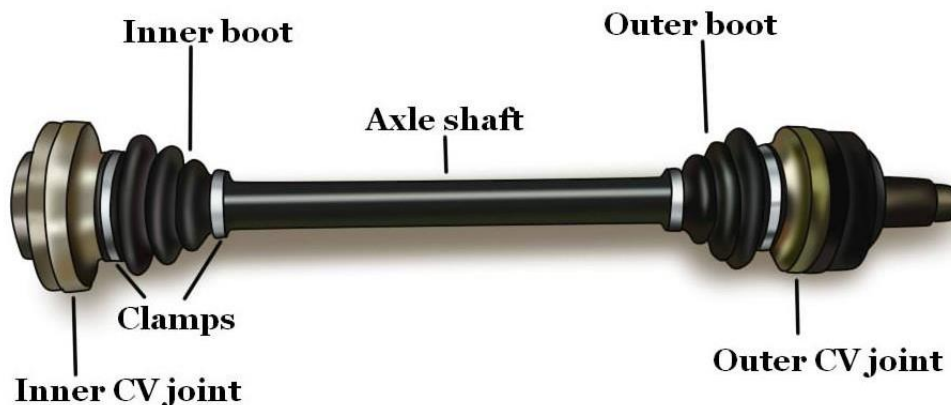
Trend posledních pár desetiletí směřuje směrem rapidního snižování emisí u motorových vozidel. Toto úsilí jde ruku v ruce s vývojem nových komponent, které mají za úkol zlepšit stávající situaci. Mezi tyto nové komponenty lze řadit také prvky zlepšující mechanickou účinnost pohonného řetězce. V tomto případě píšu o využívání různých mazacích olejů a tuků v homokinetických kloubech, které jsou součástí kloubových hřídelů. Výhoda snížení mechanických ztrát použitím nových mazacích látek může ale přinést také skryté nevýhody. Jednou z těchto nevýhod může být menší odolnost maziv vůči tepelnému zatížení. V současné době nastaly již případy, při kterých došlo při dlouhodobé jízdě vysokou rychlostí k zahřátí homokinetických kloubů na takovou úroveň, kdy došlo k porušení gumové manžety a vytečení maziva z kloubu, což mělo za následky zničení stejnoběžného kloubu. Z tohoto důvodu je nutné přejít k experimentálnímu testování v laboratorních podmínkách disponující výhodou spjatou s opakovatelností měření. Pro tento účel vznikla tato diplomová práce, ve které jsem modernizoval otevřený zkušební stav v laboratořích ČVUT v Praze na Julisce.

Začátek práce má za úkol nejdříve čtenáře seznámit s kloubovými hřídeli, tedy popsat jejich funkci a informovat o různých provedeních a jejich stavbě. Poté se zaměří na samotné zkušební stanoviště v laboratořích. Konkrétně jak vypadalo stanoviště dříve a v jakém stavu je po modernizaci, v této části je popsán vznik zcela nových částí a modernizace předešlých. Následně diplomová práce přechází již k závěru, kde jsou zobrazeny výsledky experimentálních zkoušek měření teplot homokinetických kloubů na modernizovaném stanovišti, které proběhly ve spolupráci s kolegou Vasilem Vlasem, který pracoval na diplomové práci „Měřicí aparatura a akvizice dat na zkušebním stanovišti kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce“, jež je věnována problematice spjaté s měřicími aparaturami a akvizicí dat z měření teplot kloubových hřídelů.

2. Kloubové hřídele [1],[8]

Kloubové hřídele jsou převodová ústrojí, s převodovým číslem rovným jedné, sloužící pro trvalý přenos točivého momentu mezi dvojicí zařízení, která mohou měnit svojí vzájemnou relativní polohu. Podle způsobu své konstrukce umožňují vzájemnou výchylku os pomocí použitých kloubů a k pokrytí axiálního posuvu lze využít teleskopické části hřídele či posuvných kloubů. Pro snížení rázů a přenosu kmitání do konstrukce připojených zařízení lze využít pružných kloubových konců hřídelí. Změnu maximální velikosti přenášeného krouťícího momentu lze snadno dosáhnout změnou velikosti hřídele, což vede k vhodnosti jak pro malé, tak i pro obrovské zatížení. Kloubové hřídele uplatňují svojí funkci především v dopravní sféře (automobily, kolejová vozidla) a v hospodářském odvětví (např. pohonné ústrojí zemědělské techniky).

Kloubové hřídele v automobilu lze podle způsobu umístění rozdělit na podélné a příčné. Podélné, jak už název naznačuje, jsou umístěné v podélném směru jízdy, mohou být dvoukloubové či tříkloubové. Tříkloubová konstrukce se využívá, pokud je hřídel příliš dlouhý nebo je nutnost vyhnout se jiné součástce automobilu. Příčné jsou orientovány kolmo na směr jízdy a spojují rozvodovou skříň s kolovou jednotkou. Klouby používané u těchto hřídelů jsou především tyto typy: křížový (kardanův) kloub, dvojitý křížový kloub, kuličkový kloub a tříramenný (tripoidní) kloub. Kuličkové, dvojitý křížový a tripoidní jsou také označovány jako stejnoběžné (homokinetické) klouby. S ohledem na téma diplomové práce, které se uskutečňuje na stanovišti, kde se zkoušejí především příčné automobilové kloubové hřídele s homokinetickými klouby, viz Obrázek 1, se bude práce v dalších částech zabývat pouze touto skupinou.

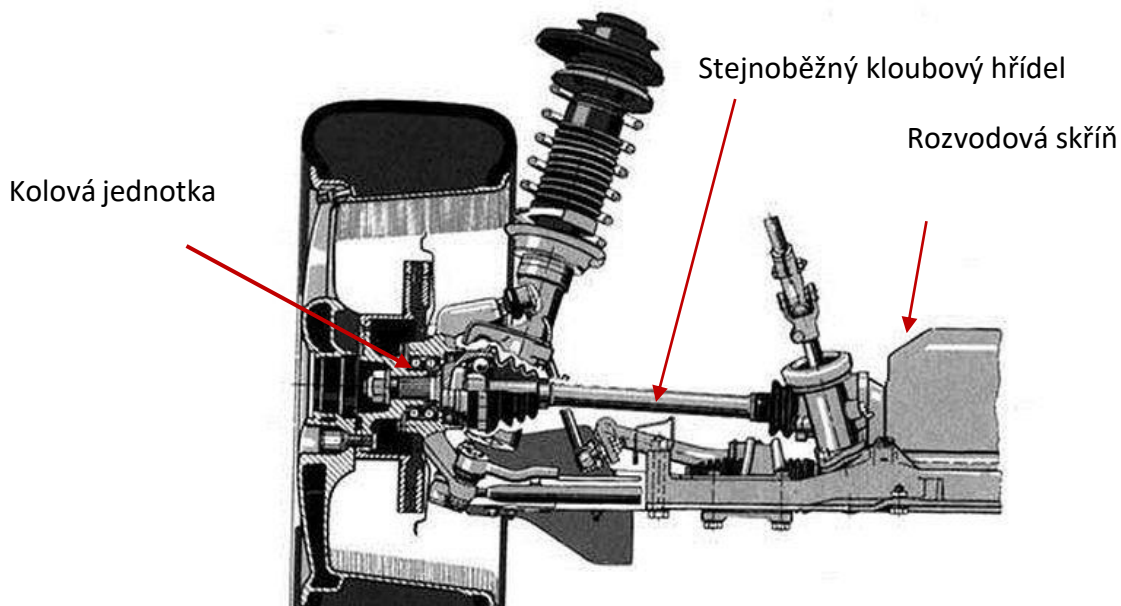


Obrázek 1: Kloubový hřídel [9]

2.1 Kloubové hřídele s homokinetickými klouby [1],[2],[8]

Vývoj této skupiny hřídelů je spjat s požadavkem zachování konstantní úhlové rychlosti při různém zalomení hřídele u automobilů s pohonem přední nápravy. Před objevem moderních homokinetických kloubů byla většina automobilů v konfiguraci RWD (pohon zadní nápravy). Výhody FWD (přední pohon nápravy) společně s objevem moderních homokinetických kloubů, které jsou schopny zachovat konstantní úhlové rychlosti a přenášet požadované síly i při velkém zalomení hřídele, nastartoval vzestup konfigurace předního pohonu nápravy. Dříve používané dvojité křížové klouby, které jsou nejjednodušší druh homokinetického kloubu, nebyly schopny velkého zalomení, přinášeli nežádoucí vibrace do systému, z důvodu odchylek úhlových rychlostí mezi hnacím a hnaným kolem a byly prostorově náročnější.

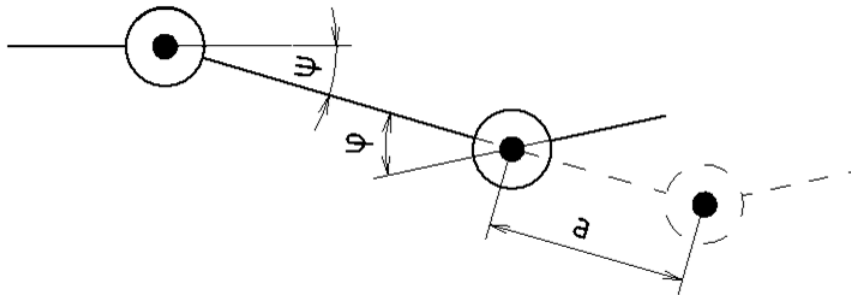
Typickým zástupcem zavěšení přední nápravy v současné době lze vidět na obrázku 2, tato konfigurace je nazývána McPherson a jedná se o levné a funkční řešení zavěšení, které našlo své uplatnění u automobilu nižší a střední třídy.



Obrázek 2: Zavěšení McPherson [10]

Z obrázku lze usoudit že, při propružení nápravy a natáčení kol kvůli změně směru jízdy dochází k relativnímu pohybu mezi kolovou jednotkou a rozvodovou skříní. Jak už bylo v předchozí části řečeno, kloubový hřídel musí být schopen tento relativní pohyb kompenzovat, skládající se jak z vyosení os hnacího i hnaného hřídele (vyosení může být různoběžné i mimoběžné), tak z prodloužení vzdálenosti mezi kolovou jednotkou a

rozvodovou skříní, které může dosahovat velikosti v řádech desítek milimetrů. Na obrázku 3 lze vidět zjednodušené schéma 2D vyosení hřídelů a změnu délky, vyosení je rovno $\psi - \varphi$ a prodloužení hřídele je rovno a .



Obrázek 3: Vyosení a změna délky

2.1.1 Homokinetické klouby [1]

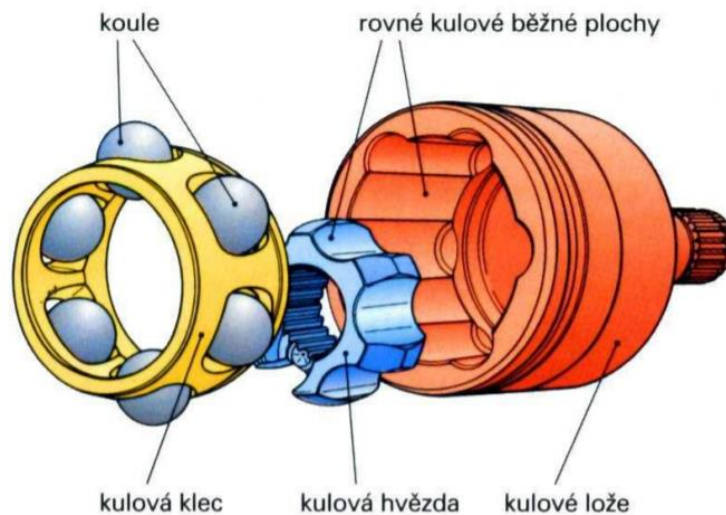
Jak již bylo dříve zmíněno, u dopravních prostředků je požadavek přenášet konstantní úhlové rychlosti na hnané kolo i při velkém úhlu zalomení hřídele, z tohoto důvodu není vhodné použití křížového kloubu. Pro dosažení těchto požadavků se dnes používají stejnoběžné klouby fungující na principu odvalování vnitřních elementů v příslušných drážkách. Při odvalování těchto elementů, ale také dochází ke tření, což vede k zahřívání příslušného kloubu a důsledkem je snížení účinnosti přenosu mechanické energie z důvodu tepelných ztát. Velký vliv na účinnost přenosu mechanické energie má typ použitého mazacího oleje a úhel zalomení kloubového hřídele. Do této kategorie patří například klouby typu Rzeppův (Birfieldův), tříramenný neboli Tripode a Weissův (Bendixův – Weissův). První dva ze zmíněných typů jsou v současné době nejpoužívanějším řešením v automobilovém průmyslu. Umístění kloubů na hnacím hřídeli se nejčastěji provádí v tomto rozpoložení, viz obrázek 2. Na straně rozvodovky musí kloub umožnit maximální zalomení 25° a axiální posun až 50 mm, z tohoto důvodu se využívají posuvné klouby typu Rzeppa nebo Tripod. Na straně kolové jednotky je významným parametrem velké úhlové zalomení, které může dosáhnou až hodnoty 52° a pro tento účel je velice vhodný pevný kloub typu Rzeppa.

2.1.1.1 Kloub Rzeppa (Birfield) [1], [2], [3]

Kloub Rzeppa je dnes nejvíce rozšířeným typem homokinetického kloubu v automobilovém průmyslu, s kterým se lze setkat převážně u osobních a lehkých užitkových vozidel. Byl patentován již v roce 1929. Valivé elementy jsou kuličky, kterých je ve kloubu šest

a odvalují se v oválných otvorech. V současné době je možné v praxi narazit na variantu, která umožňuje axiální posuv, ale i s provedením, které tento pohyb neumožňuje.

Realizace s axiálním posuvem, viz obrázek 4, se typicky používá na straně rozvodovky. Pohyb u tohoto typu je zapříčiněn změnou polohy vnějšího a vnitřního kroužku kloubu, uskutečněn odvalem kuliček v drážkách. Přímé drážky, sloužící k axiálnímu posuvu, ve vnějším tělese nedovolují větší zalomení kloubu než 22° , ale zajišťují axiální posuv až 50 mm.



Obrázek 4: Kloub Rzeppa s axiálním posuvem [11]

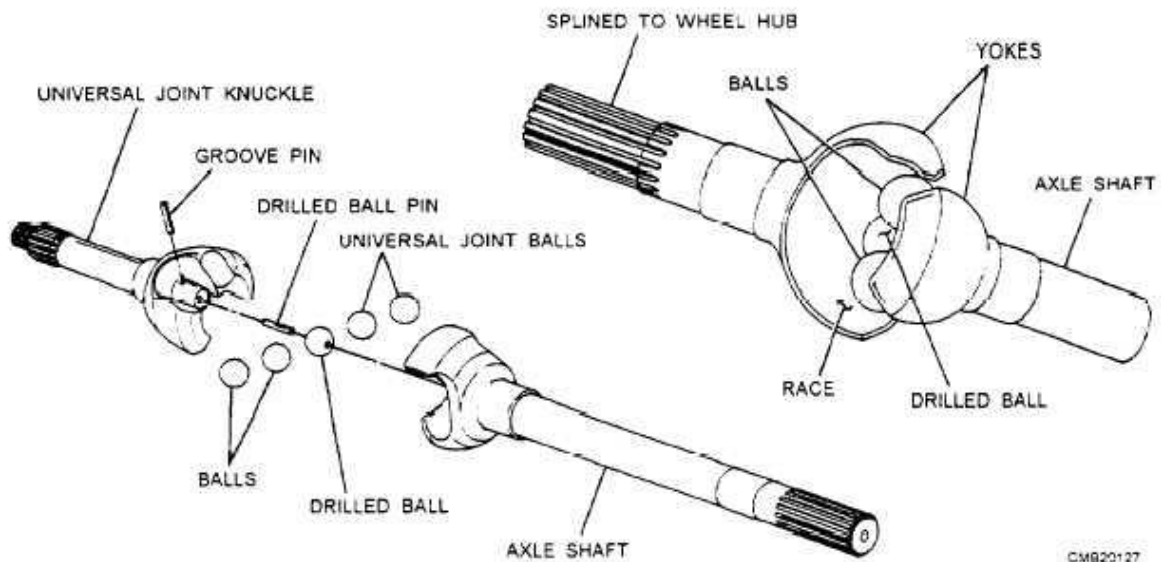
Provedení bez axiálního posuvu, viz obrázek 5, se používá na straně kola. Zakřivené drážky ve vnějším tělese, oproti přímým drážkám v přechodím odstavci, umožňují maximální úhel zalomení kloubu až kolem 50° . Zalomení kloubu také souvisí s účinností přenosu hnacího momentu. S rostoucím úhlem zalomení se účinnost kloubu snižuje. Například při úhlu zalomení 40° je ztráta účinnosti kolem 7 %. Naopak při úhlu zalomení 8° se účinnost pohybuje okolo 99 %.



Obrázek 5: Kloub Rzeppa bez axiálního posuvu [11]

2.1.1.2 Kloub Weiss (Bendix-Weiss) [1],[2],[3]

Návrh řešení byl patentován již roku 1925 Carlem W. Weissesem. Tento typ kloubu využívá stejně jako předchozí zpracování valivé elementy ve formě kuliček. Zde jsou obvykle čtyři kuličky umístěné v zakřivených drážkách, které jsou tvořeny dvojicí do sebe navzájem zapadajících pouzder. U tohoto provedení není použita klec pro kuličky. Pro zaručení funkce musejí být vstupní i výstupní hřídele uloženy a vedené v ložiskách. Druhé řešení využívá pátoú kuličku otáčející se na čepu, který je umístěn ve středu vnější části kloubu, a slouží jako zajišťovací medium pro zbylé čtyři kuličky. Ke kontaktu (rovina, kde se nacházejí kuličky) dochází v rovině úhlem odpovídajícím polovině úhlu zalomení vstupního a výstupního hřídele, viz obrázek 6. Pozdější konstrukce z roku 1955 je charakteristická přímými drážkami, které umožňují axiální posuv a úhel zalomení do 20°.

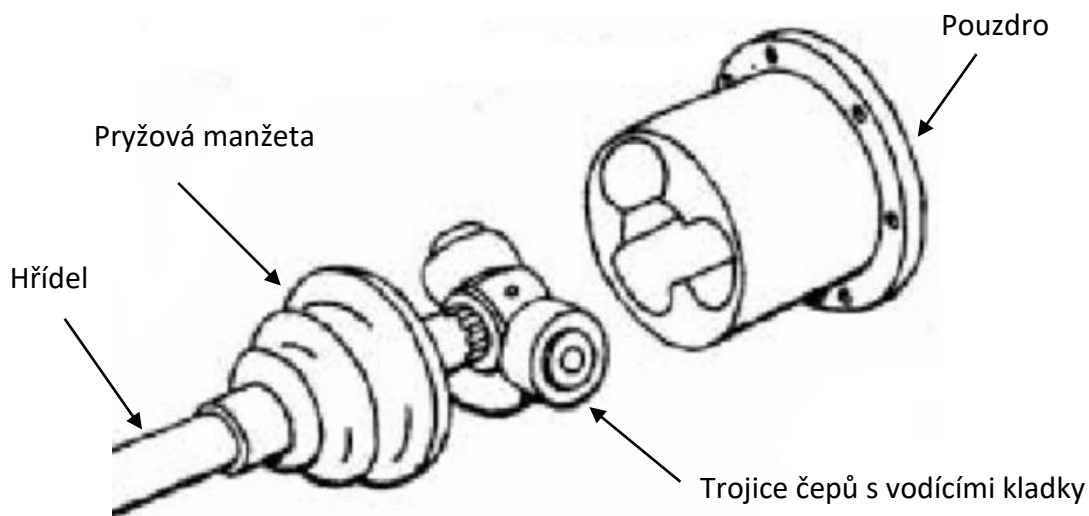


Obrázek 6: Weissův kloub [3]

2.1.1.3 Tříramenný kloub (Tripod) [1],[2],[3]

Kloub Tripod se zpravidla používá na straně rozvodovky kvůli snadné realizaci axiálního pohybu až do hodnoty 50 mm a vysoké účinnosti přenosu hnacího momentu i při velkém zalomení, které dosahuje maximální hodnoty 25°. I když se řadí do skupiny stejnoběžných kloubů, tak průběh výstupních otáček není zcela shodný s otáčkami vstupními. Během jedné otáčky totiž dochází ke třem maximům a třem minimům. Rozdíl mezi těmito hodnoty je ale natolik malý, že se ve většině případů zanedbává. Větší nevýhodou kloubu je

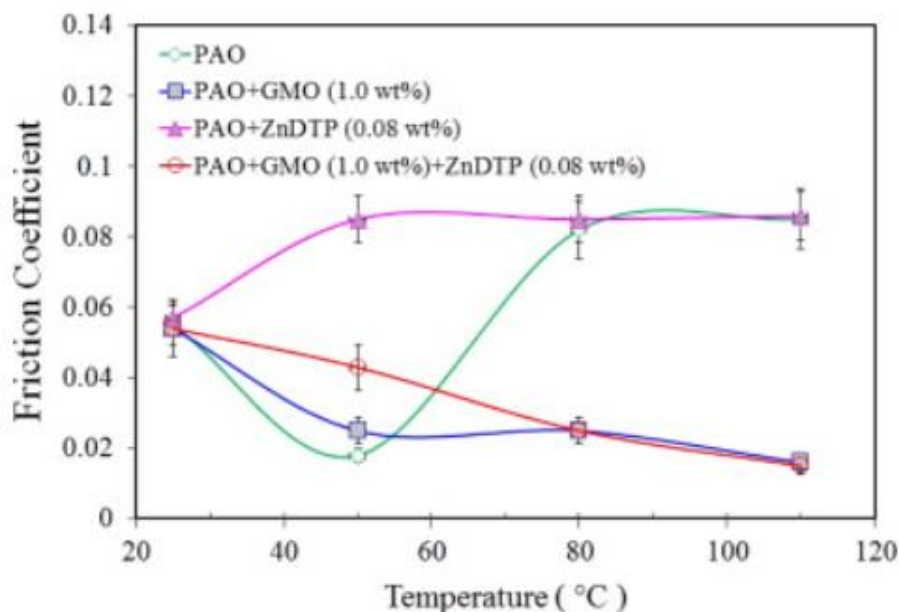
pohyb středu trojice čepů. Během otáčky tento pohyb opisuje elipsu, což způsobuje odstředivé síly a tím pádem větší namáhání kloubu.



Obrázek 7: Kloub Tripod [12]

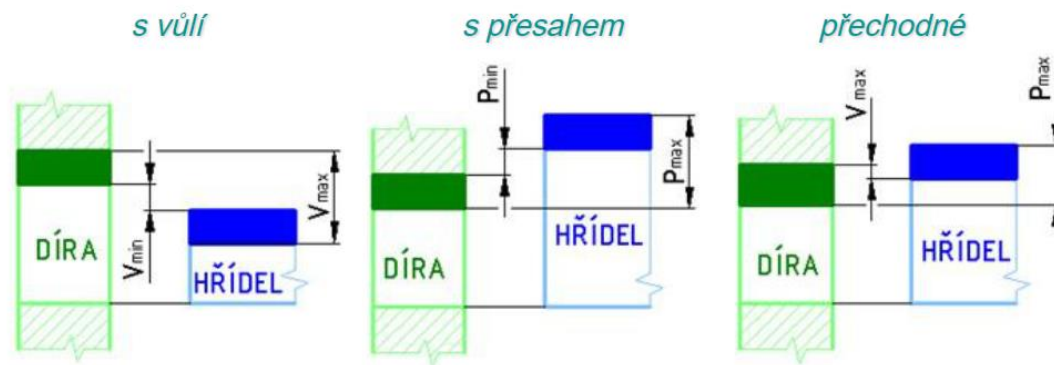
3. Experimentální zkoušení kloubových hřídelů

Jak již bylo v úvodu diplomové práce napsáno, nikdy nekončící snaha o vylepšení současných komponent automobilů, pro zlepšení celkové mechanické účinnosti přenosu hnacího momentu a tím spojené snížení spotřeby paliva, přináší vývoj nových vylepšení v oblasti homokinetických kloubů. Jednou cestou tohoto vývoje je snaha o nalezení vhodného maziva, kterým lze snížit tření ve stejnoběžných kloubech. Snížením třecího koeficientu použitím lepšího maziva lze dosáhnout menší disipace energie, s čímž souvisí zlepšení celkové mechanické účinnosti při přenosu hnacího momentu od motoru až po pneumatiky vozidla. Nová nezkoušená maziva s nízkým koeficientem tření, za normálních podmínek, mohou ale skrývat různé problémy. Některé maziva razantně mění svoje vlastnosti v závislosti na teplotě a při vyšších teplotách již nesplňují požadované vlastnosti, viz obrázek 8, kde lze zpozorovat výrazné změny koeficientu tření různých maziv v závislosti na teplotě.



Obrázek 8: Závislost koeficientu tření na teplotě různých druhů maziv [6]

Další faktor ovlivňující mechanickou účinnost při přenosu hnacího momentu, je spojen se samotnou výrobou jednotlivých částí homokinetických kloubů. Všechny součástky ve strojírenském průmyslu se nevyrábějí vždy v přesných rozměrech, ale pochybují s v rámci svých geometrických tolerancích. Jestliže se poté tyto součástky spojí pro vytvoření jednoho celku, mohou nastat následující případy vzájemného uložení, viz obrázek 9.



Obrázek 9: Typy uložení [13]

V levé části obrázku je zobrazeno uložení s vůlí. Toto uložení je charakterizováno snadným spojením jednotlivých součástí v jeden celek a zároveň nejsou tyto součásti spojením nijak deformovány. Uprostřed obrázku je naopak vyobrazeno uložení s přesahem, jenž se vyznačuje složitějším spojením součástí v jeden celek v závislosti na daném přesahu a zároveň jsou jednotlivé součásti spojením deformovány. Na pravé části obrázku je nakonec zobrazeno uložení přechodné, které se může stát jak uložení s vůlí, tak uložení s přesahem v závislosti na dané kombinaci použitých dílů.

V referenci na homokinetických kloubech lze tuto problematiku nejlépe vysvětlit na stejnoběžných kloubech typu Rzeppa, viz obrázky 4 a 5. V rámci geometrických tolerancí mohou nastat případy, kdy jsou valivé elementy, ve formě kuliček, mezi horními a dolními drážkami buď deformovány nebo uloženy s vůlí. Tento princip uložení funguje obdobně u zbylých typu homokinetických kloubů využívajících valivé elementy k přenosu kroutícího momentu.

Konkrétní typ uložení valivých elementů v kloubu je charakterizován velikostí odporu proti pohybu valivých elementů v drážkách. Na velikosti tohoto odporu jsou závislé mechanické ztráty při přenosu kroutícího momentu, které se projevují na celkové mechanické účinnosti kloubového hřídele. Čím větší je zalomení hnacího hřídele tím větší má uložení vliv na účinnost.

Aby bylo možné stanovit a posléze porovnávat vlastnosti jednotlivých typů kloubových hřídelů mezi sebou, zavedlo se experimentální zkoušení disponující rysí jako je opakovatelnost a porovnatelnost výsledků. V následující části diplomové práce zde budou popsány různé zkoušky prováděné na kloubových hřídelích.

3.1 Měření mechanické účinnosti přenosu hnacího momentu

Kvalitu každého vyrobeného stroje či součásti lze mimo jiné charakterizovat mírou, jak dobře provádí funkci, ke které byl vyroben. Touto mírou je účinnost. Účinnost je bezrozměrné číslo, které ukazuje, jak blízko se děj přiblížil k ideálnímu stavu. U strojních součásti lze toto číslo obvykle vypočítat jako poměr výkonu ku příkonu podle následujícího vzorce 1, jednotlivé členy rovnice jsou zobrazeny na obrázku 10. Vzorec se pro homokinetické hřídele nakonec zjednoduší na poměr momentů, neboť jsou výstupní a vstupní otáčky stejné.

$$\eta_{MECH} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{P_{IN} - P_Z}{P_{IN}} = \frac{M_{OUT} \cdot \omega_{OUT}}{M_{IN} \cdot \omega_{IN}} = \frac{M_{OUT}}{M_{IN}} \quad (1)$$



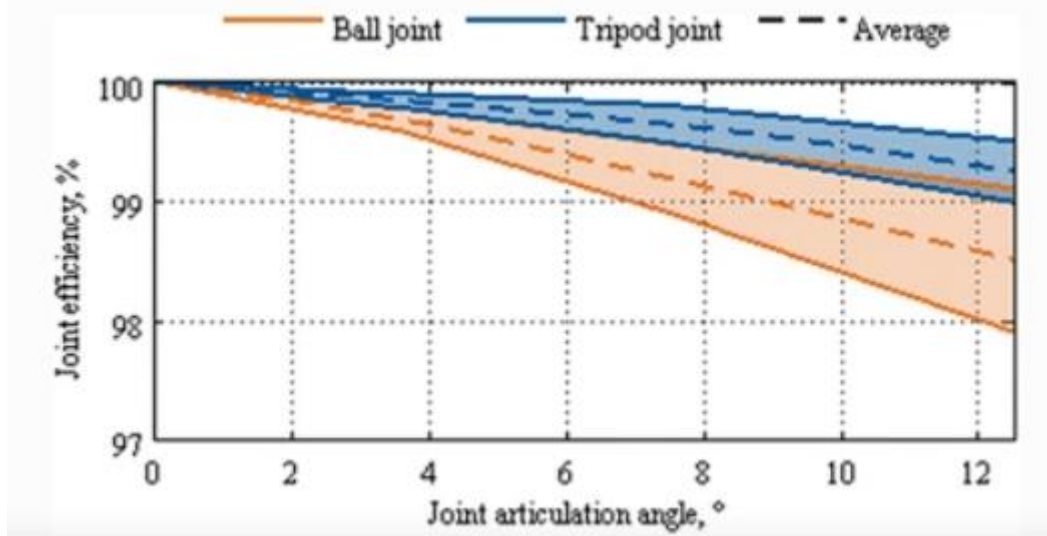
Obrázek 10: Schéma pro výpočet mechanické účinnosti

V kontextu s kloubovými hřídeli lze součást rozdělit na tři části, vstupní a výstupní hřídel a část kde dochází ke vzniku mechanických ztrát. Jak již bylo dříve napsáno, ztráty jsou zapříčiněny disipací mechanické energie na energii tepelnou.

Aby bylo možné určit mechanickou účinnost, je potřeba určit moment, který působí na vstupní hřídel a moment namáhající výstupní hřídel. Pokud se měření provádí na otevřených zkušebních stanovištích, je možné momenty odečíst buď z momentových snímačů připevněných na přírubách dynamometrů, mezi kterými je zkoušená součást umístěna nebo lze hodnotu momentu odvodit z velikosti reakční síly statoru stroje.

Výsledná naměřená mechanická účinnost nemusí být pouze jedno číslo, poněvadž závisí na vícero faktorech, ale výsledky se mohou zakreslovat do 2D a 3D grafů, které se vykreslují například v závislosti na použitém mazivu v homokinetických kloubech, na úhlu zalomení kloubového hřídele, na otáčkách nebo na velikosti zátěžného momentu.

Příklad naměřených hodnot je možné vidět na následujícím 2D grafu, obrázek 11, kde jsou zobrazeny výsledné mechanické účinnosti různých hnacích hřídelů s pevnými klouby Rzeppa a posuvnými homokinetickými klouby Tripod v závislosti na úhlu zalomení.



Obrázek 11: Mechanická účinnost v zavllosti na úhlu zalomení kloubového hřídele [5]

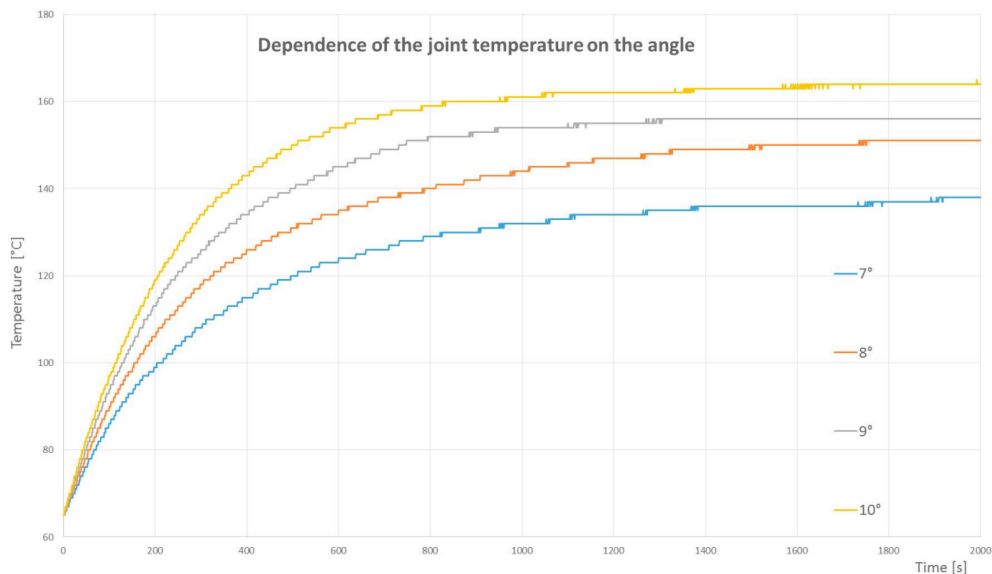
3.2 Měření teploty homokinetických kloubů

Další klíčovou veličinou, která se experimentálně proměřuje v laboratorních podmínkách, je teplota uvnitř homokinetických kloubů v průběhu zkoušek. Maximální naměřenou teplotu lze použít jako srovnávací člen, kterým je možné porovnávat různé druhy kloubových hřídelů. Znalost maximální teploty kloubů je nutná, neboť pryžové manžety sloužící pro konzervaci maziva v kloubu mohou být touto teplotou poškozeny. Poškozené gumové členy neposkytují již perfektní ochranu proti vniknutí nečistot a zároveň nejsou schopny zadržet mazivo uvnitř kloubů. Tento stav vede nenávratně ke zničení či poškození součásti.

Znalost průběhu teploty uvnitř kloubů se také využívá pro výběr vhodného maziva, neboť, jak již bylo na obrázku 8 zobrazeno, hodnota třecího koeficientu různých maziv se s teplotou mění.

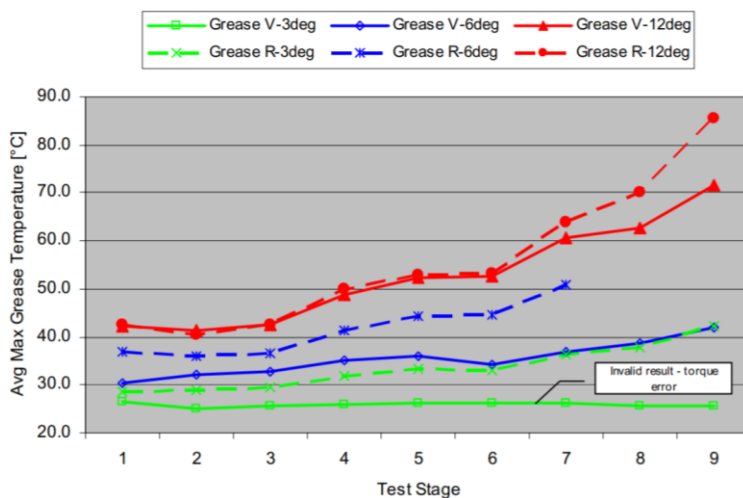
K měření teplot se nejčastěji využívají termočlánky umístěné na vhodném místě uvnitř homokinetických kloubů, kde bude mít naměřená hodnota teploty správnou vypovídající hodnotu.

Příklad naměřeného průběhu teplot je možné vidět na obrázku 12, toto měření bylo provedeno v roce 2017 na otevřeném zkušebním stanovišti v laboratořích na Julisce. Výsledné hodnoty maximálních teplot se liší v závislosti na úhlu zalomení kloubového hřídele.



Obrázek 12: Průběh teploty v zavlosti na úhlu zalomení kloubového hřídele [7]

Příklad závislosti maximální teploty kloubů na volbě maziva je zobrazeno na obrázku 13, kde je možné zpozorovat, jak moc lze maximální teplotu ovlivnit použitím odlišných druhů maziv v rozličných zátěžných stavech při různém zalomení kloubového hřídele.



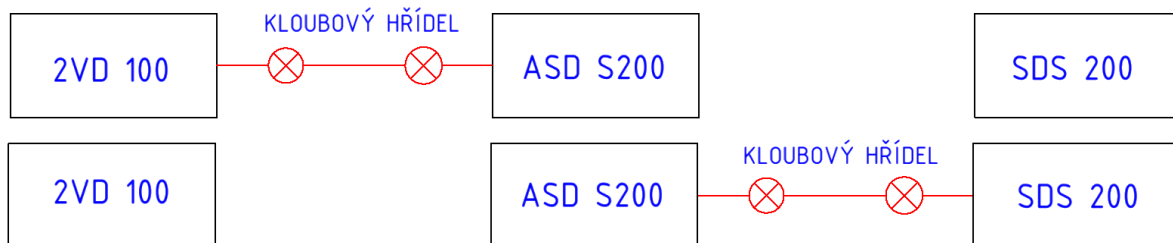
Obrázek 13: Závislost maximální teploty na použitém mazivu [4]

Simulated Vehicle Speed [mph]	0 % Grade (Level Road)	2 % Grade	4 % Grade
25	338 rpm 29 Nm	338 rpm 86 Nm	338 rpm 143 Nm
45	608 rpm 47 Nm	608 rpm 104 Nm	608 rpm 162 Nm
65	878 rpm 77 Nm	878 rpm 134 Nm	878 rpm 191 Nm

Tabulka 1: Zátěžné stavy (Test Stage) [4]

4. Rozbor dosavadního stavu zkušebního stanoviště

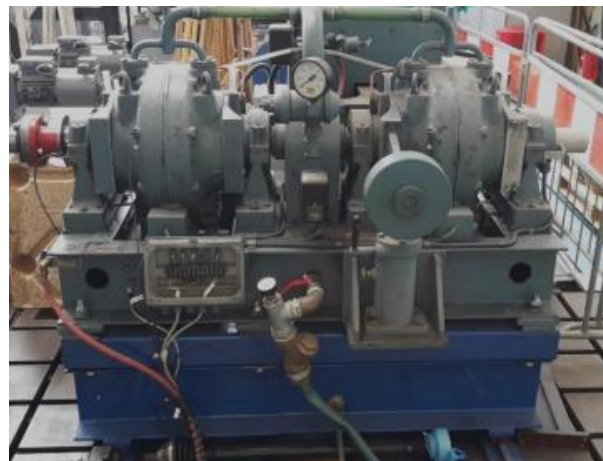
Místo, které se stalo základnou pro tuto diplomovou práci jsou laboratoře fakulty strojní nacházející se v Praze 6 v ulici pod Juliskou. Laboratoř je mimo jiné vybavena třemi samostatnými dynamometry umístěnými v řadě za sebou. Mezi tyto stroje patří vířivý dynamometr 2VD 100, třífázový asynchronní dynamometr ASD S200 a stejnosměrný dynamometr SDS 200. Hřídele dynamometrů jsou na koncích opatřeny přírubami, mezi které lze umístit zkoušené ústrojí, v kontextu diplomové práce je tímto ústrojím kloubový hřídel, hřídel prostředního dynamometru je průchozí a je vybavena na každé straně přírubou. Z této konfigurace vyplývají dvojce možnosti umístění hnacího hřídele, viz obrázek 14.



Obrázek 14: Prostorové rozpoložení dynamometrů zkušebního stavu



Obrázek 15: SDS 200



Obrázek 16: 2VD 100

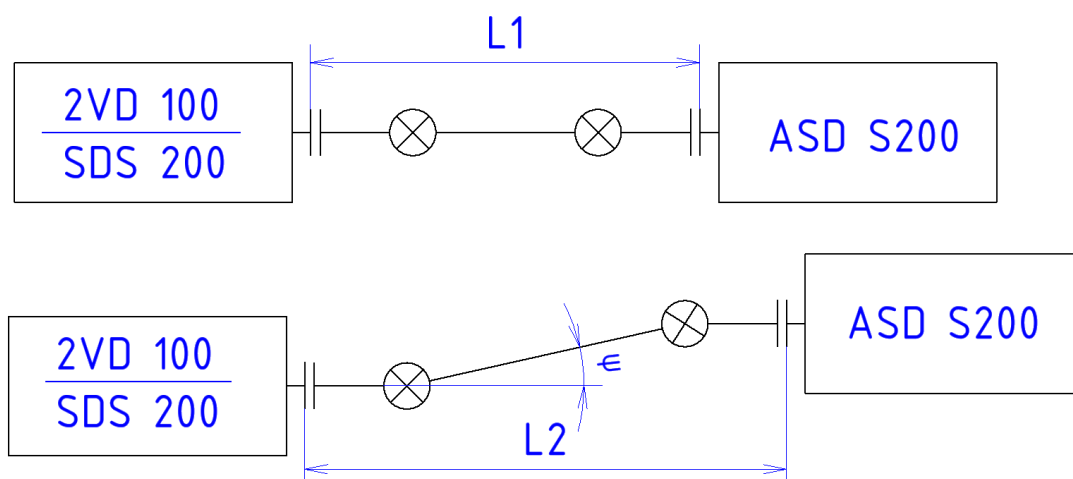
Zkušební stav v tomto rozpoložení se označuje jako otevřené zkušební stanoviště. Tento druh je charakterizován třemi základními komponenty, a to zkoušeným zařízením (např. kloubový hřídel) a dvojicí dynamometrů. Jeden pracuje jako motor a druhý jako zátěž. V tomto konkrétním případě funkci motoru odvádí vždy prostřední dynamometr ASD S200 a funkci zátěže zastupují zbývající dva dynamometry. Volbou vhodného stroje, který bude zastupovat funkci zátěže, lze také značně omezit energetické ztráty při testování. Z principu funkce vířivého stroje vyplývá, že veškerá kinetická energie vstupující do stroje je přeměněna na

energii tepelnou, tudíž energii ztrátovou. Naopak při zapojení třífázového asynchronního dynamometru ASD S200 do soustavy dosáhneme příznivějšího výsledku. Tento stroj funguje na principu generátoru, kde se kinetická energie vstupující do dynamometru přeměňuje, se ztrátou, na energii elektrickou, která se opět vrací do sítě.



Obrázek 17: ASD S200

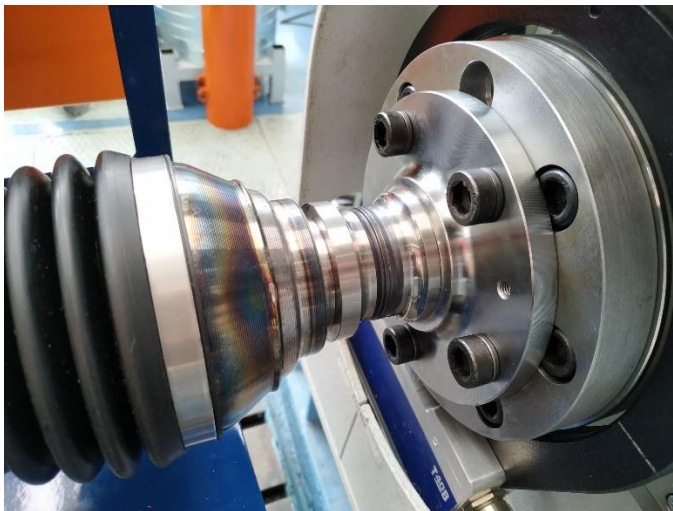
Prostřední dynamometr ASD S200 je schopen popojíždět po vlastních podélných kolejnicích a se stroji SDS 200 a 2VD 100 je možné hýbat v kolmém směru pomocí příčných kolejnicích, kombinací těchto pohybů lze měnit relativní polohu strojů vůči sobě a lze uskutečnit jak délkové nastavení odsazení přírub dynamometrů potřebné pro umístění kloubových hřídelů o různých délkách, tak úhlové zalomení homokinetických kloubů, viz obrázek 18.



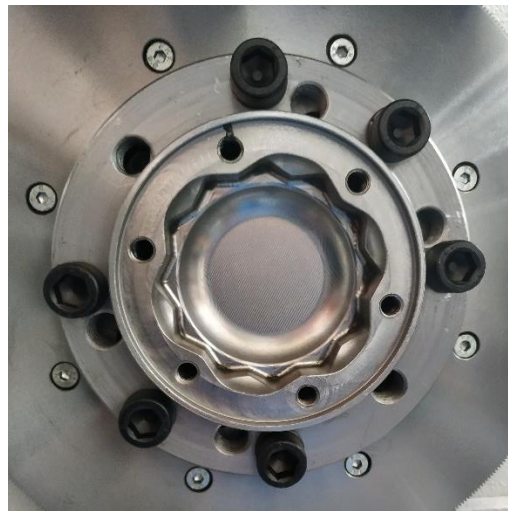
Obrázek 18: Změna polohy dynamometru ASD S200 vůči zbylým strojům

4.1 Průběh testování kloubových hřídelů na stanovišti v minulosti

K testování kloubových hřídelů v laboratořích na Julisce se zkušební stanoviště používalo již delší dobu. Kloubový hřídel se nejčastěji umísťoval mezi dva nejmodernější dynamometry, tedy ASD S200 a SDS 200. K vytvoření otevřeného zkušebního stanoviště bylo nejdříve zapotřebí propojit součást s dynamometry. Klasické provedení hnacího hřídele, viz obrázek 1, je na jedné straně zakončeno drážkováním, které slouží pro propojení s kolovou jednotkou a na druhé straně je díl zakončen přírubou pro připojení k rozvodové skříni, viz obrázek 2. Pro propojení drážkovaného konce hnacího hřídele s dynamometrem se použila již zakoupená kolová jednotka, do kterého se vyvrtaly díry shodující se s otvory příruby dynamometru, načež se díly spojily šrouby, viz obrázek 19. Pro opačnou stranu kloubového hřídele se naopak vyrobil mezikus, ke kterému již bylo schopné připojit přírubu dynamometru a hnací hřídel, viz obrázek 20.



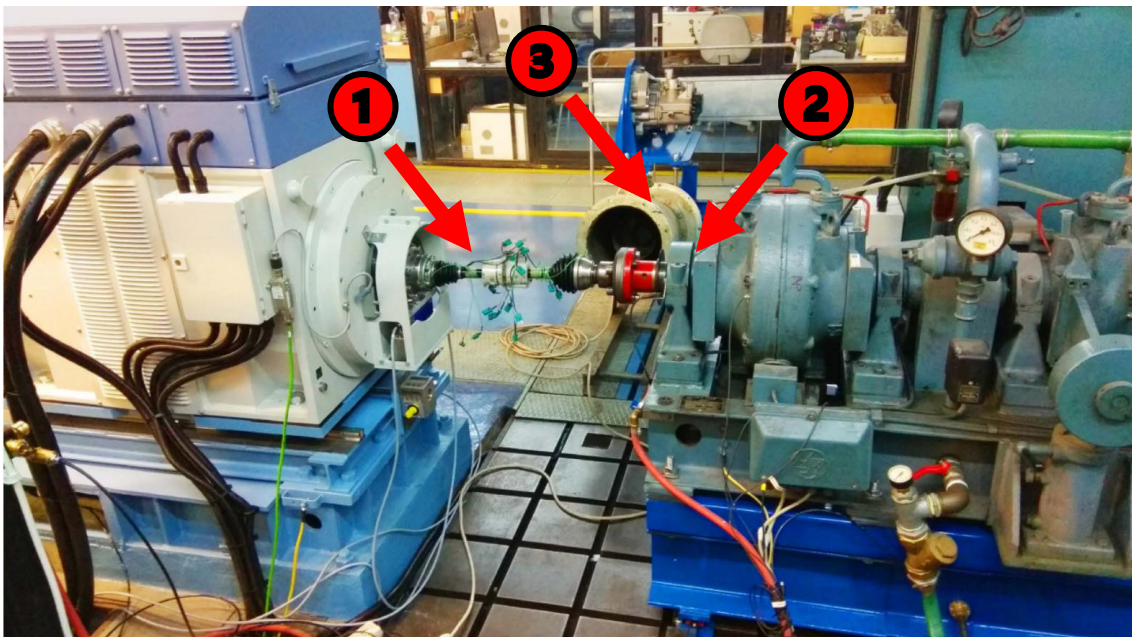
Obrázek 19: Drážkovaný konec KH



Obrázek 20: Konec KH s přírubou

V rámci experimentálního testování v laboratořích je potřeba simulovat podmínky reálného provozu. V tomto konkrétním případě se jedná o simulaci ofukování kloubového hřídele vzduchem, ke kterému dochází při pohybu vozidla po vozovce v reálném světě. Poloha hnacího hřídele v konkrétním vozidle také ovlivňuje úroveň ofukování vzduchem jednotlivých částí. Některé části hřídele, například homokinetické klouby, mohou být více v zákrytu vůči přichozímu vzduchu nežli části jiné. Tuto informaci je nutné brát v potaz.

K simulaci ofukování kloubového hřídele vzduchem byl v laboratořích na Julisce využíván třífázový asynchronní ventilátor. Stroj pracoval pouze ve dvou stavech, a to zapnuto a vypnuto. Úroveň ofukování kloubového hřídele vzduchem simulující určitou rychlost pohybu vozidla se nastavila tak, že byl ventilátor umístěn v laboratořích v příslušné vzdálenosti vůči testovacímu stanovišti. Nastavení různé úrovně ofukování jednotlivých homokinetických kloubů vzduchem se dosahovalo tím, že se ventilátor paralelně s osou hřídele posunul blíže či dále od daného kloubu.



Obrázek 21: Průběh testování kloubových hřídelů na stanovišti v minulosti [7]

- ❶ Propojení KH a dynamometru využitím mezikusu
- ❷ Propojení KH a dynamometru využitím kolového ložiska
- ❸ Ventilátor sloužící k ofukování KH vzduchem

4.2 Návrh modernizace zkušebního stavu na Julisce

Průběh testování kloubových hřídelů v minulosti na tomto stanovišti se vyznačoval několika nedostatky. První problém lze zařadit do kategorie BOZP (bezpečnost a ochrana zdraví při práci). V průběhu zkoušky, viz obrázek 21, se kloubový hřídel otáčí úhlovou rychlostí, která je přímo úměrná simulované dopředné rychlosti vozidla a nepřímo úměrná dynamickému poloměru pneumatiky vozidla.

$$\omega = \frac{v}{r_D} \quad (2)$$



Pokud by se na stanovišti testoval například kloubový hřídel, který by patřil vozidlu simulujícímu dopřednou rychlostí $v = 160 \text{ km/h}$ s pneumatikami o dynamickém poloměru $r_D = 0,3 \text{ m}$. Výsledná úhlová rychlost by měla hodnotu $\omega \doteq 148 \text{ rad/s}$, tato hodnota odpovídá přibližně $n \doteq 1\,415 \text{ 1/min}$.

Z bezpečnostního hlediska je součást rotující takovou úhlovou rychlostí a s hmotností pohybující se řádově v jednotkách kg schopna velmi vážně až smrtelně poranit obsluhu, pokud by došlo k nečekanému uvolnění součásti z dynamometrů.

Pro testování hnacích hřídelů se také využívají různé měřicí aparatury, které je možné připojit na rotující součást. Stejně jak v předchozím případě, propojení mezi měřicí aparaturou a součástí může být přerušeno a letící aparatura je schopná poranit bezprostřední osazenstvo.

Nesmí být také opomenuto, že pro některé zkoušky prováděné na kloubových hřídelích je nutné porušit integritu gumových manžet, například při zavádění termočlánu do vnitřku homokinetický kloubů pro měření teplot. Narušením gumových manžet vzniknou otvory, kterými pak může unikat mazivo potřebné pro mazání valivých elementů kloubů. V průběhu zkoušky se teplota v kloubu zvyšuje a mazivo se stává méně viskózní, zároveň na mazivo působí odstředivá síla zprostředkovávaná rotací součástky. Spojením všech těchto faktorů poté nastává situace, při které dochází v průběhu testování hnacího hřídele k odstříkávání zahřátého maziva do okolí.

Pro řešení, které bylo použito pro odstranění všech těchto nedostatků předešlého stavu stanoviště, byl vyroben ochranný kryt sloužící jako ochrana osob nacházejících se v laboratořích. Návrh a popis ochranného krytu bude osvětlen v další kapitole této diplomové práce.

Druhý problém týkající se předešlého stavu zkušebního stanoviště v laboratořích lze přiřadit k problematice simulace ofukování hnacího hřídele vzduchem. Mezi hlavními cíli každého měření je mimo jiné opakovatelnost, s čímž je spojena porovnatelnost výsledků, a simulace podmínek, ke kterým dochází v reálném světě. Jak již bylo v dřívější kapitole napsáno, úroveň ofukování se nastavovala umístěním ventilátoru vůči hnacímu hřídeli, viz obrázek 21. Aby tedy byla dodržena podmínka opakovatelnosti měření, musela by být označena přesná pozice ventilátoru a dynamometrů při každém měření nového typu kloubového hřídele. V případě, že by se po jisté době měřil stejný typ hnacího hřídele, musely by být komponenty



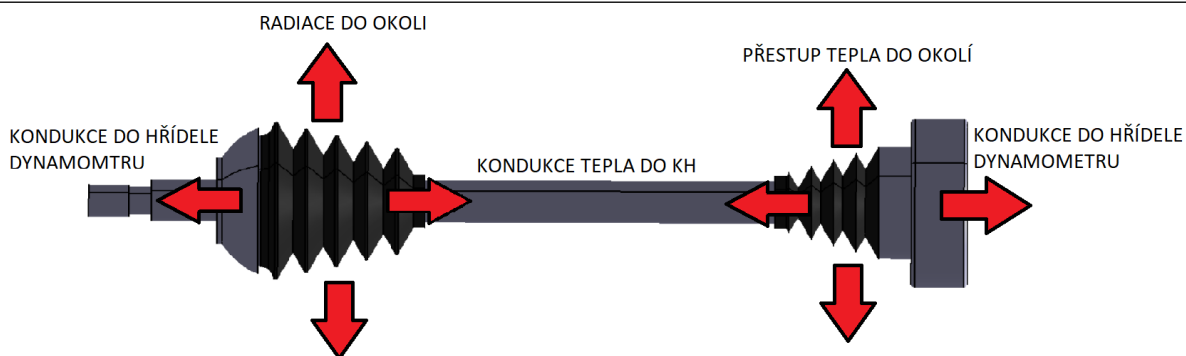
měřicího okruhu umístěny na exaktní pozice. K tomuto označování pozic ale nedocházelo, proto jednotlivé měření nemusely mít vždy stejné počáteční a okrajové podmínky.

Dalším problémem tohoto řešení bylo také nastavení různého stupně ofukování jednotlivých homokinetický kloubů. Z daného principu lze vidět, že jednotlivé stupně ofukování byly sami na sobě závislé, nebylo tedy možné nastavit velké rozdíly ofukování na opačných stranách hřídele (například na jedné straně $v = 160 \text{ km/h}$ a na druhé straně $v = 0 \text{ km/h.}$), aniž by se použila jistá mechanická zábrana.

Pro odstranění těchto nedostatků předešlého stavu stanoviště. Byla navržena a posléze postavena ventilační trať, která bude popsána v dalších částech závěrečné práce.

Třetím a zároveň posledním nedostatkem původního stavu stanoviště, kterým se tato diplomová práce zabývá, souvisí opět s problematikou opakovatelnosti prováděného měření. Nyní je problém opakovatelnosti spjat s tepelným ovlivněním naměřených výsledků. K tomuto úkazu dochází zejména při měření teploty uvnitř kloubů kloubového hřídele. Tato záležitost je způsobena velkou tepelnou kapacitou hřídelů dynamometrů. Nejlépe lze tento problém demonstrovat na následujícím příkladu z praxe.

Na začátku dne, před prvním měřením, mají všechny stroje a součásti v laboratořích ideálně stejnou teplotu, tedy teplotu místnosti. Následně se připojí první hnací hřídel mezi dynamometry a začne se proměřovat teplota homokinetických kloubů. V průběhu tohoto testu se teplota kloubů zvyšuje a vzniklé teplo začne opouštět klouby ve formě radiace a přestupu tepla do okolního prostředí a také pomocí kondukce tepla do hřídelů dynamometrů, viz obrázek 22. Poslední zmíněná forma šíření tepla, tedy kondukce tepla, pomalu zvyšuje v průběhu zkoušky teplotu hřídelů dynamometrů. Na konci zkoušky, po proměření daného hnacího hřídele, je logicky teplota hřídelů dynamometrů vyšší, než byla na začátku měření. Jestliže se následně zapojí do zkušebního stavu nový hnací hřídel a začne se opět proměřovat, změní se u tohoto testu počáteční podmínky a může dojít k jinému koncovému výsledku měření. Radiace a přestup tepla do okolí je v kontextu s opakovatelností měření irelevantní, neboť velká tepelná kapacita okolního prostředí zabraňuje zvyšování teploty v laboratořích v důsledku probíhajících experimentálních zkoušek.



Obrázek 22: Odvod tepla z homokinetických kloubů

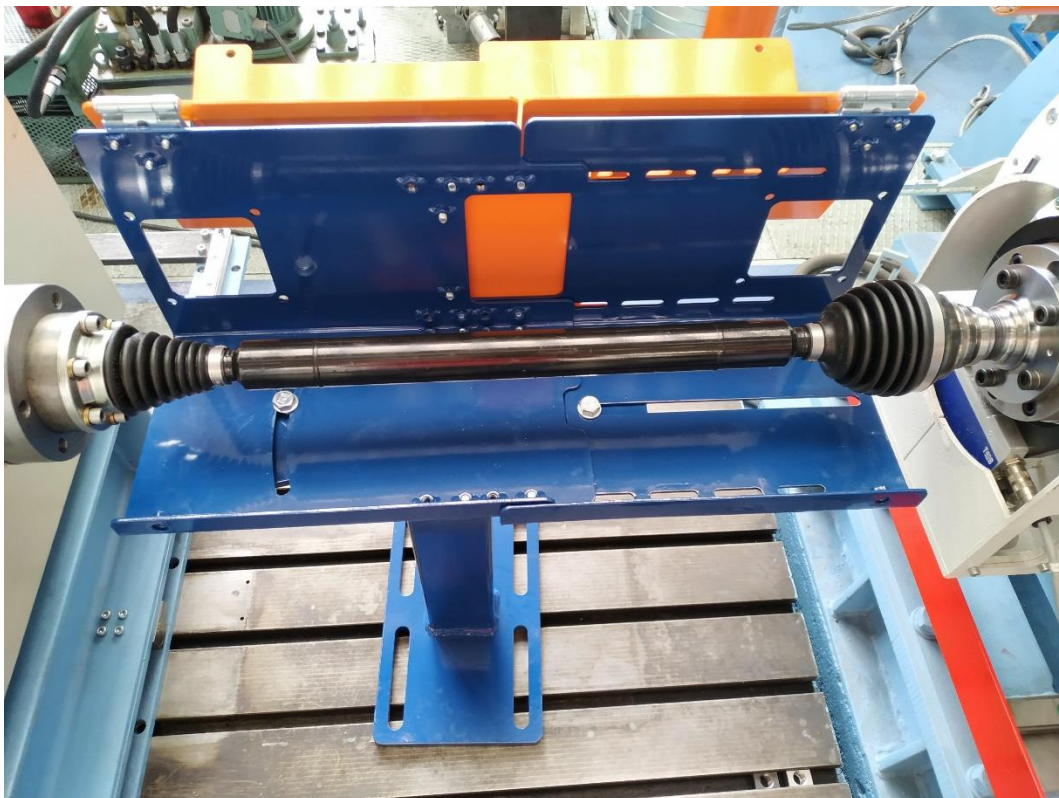
Pro řešení této problematiky, spjaté s opakovatelností měření, jsou v dalších částech diplomové práce navrženy nové spojovací díly, sloužící pro propojení kloubového hřídele s dynamometry, které fungují na principu tepelného izolantu a snižují celkový odvod tepla do hřídelů dynamometrů.

5. Ochranný kryt pro kloubový hřídel

Prvním konstrukčním problémem, kterým se tato diplomová práce zabývá v praktické části, je návrh ochranného krytu, v němž je v průběhu zkoušky umístěn kloubový hřídel. V průběhu návrhu bylo nutné brát v potaz požadavky, které jsou kladeny pro tento výrobek. Mezi tyto požadavky patří:

- ochrana předmětů, strojů a osob v blízkosti zkušebního stanoviště proti odstříkujícím mazivům a vymrštěným měřicím aparaturám
- ochrana předmětů, strojů a osob v blízkosti zkušebního stanoviště v případě, že dojde k uvolnění, či porušení soudržnosti kloubového hřídele
- délková a úhlová nastavitelnost
- jednoduchá změna úhlové a délkové nastavitelnosti
- snadná dostupnost k měřicím aparaturám a kloubovému hřídeli
- zajištění konstrukční kompatibility s ventilační tratí.

S přihlédnutím na tyto požadavky byl posléze vyroben kryt, viz obrázek 23, splňující tyto podmínky. Jak bylo k těmto požadavkům přistupováno a důvod jednotlivých konstrukčních prvků na krytu bude vysvětlen v následující části závěrečné práce.



Obrázek 23: Ochranný kryt pro kloubový hřídel

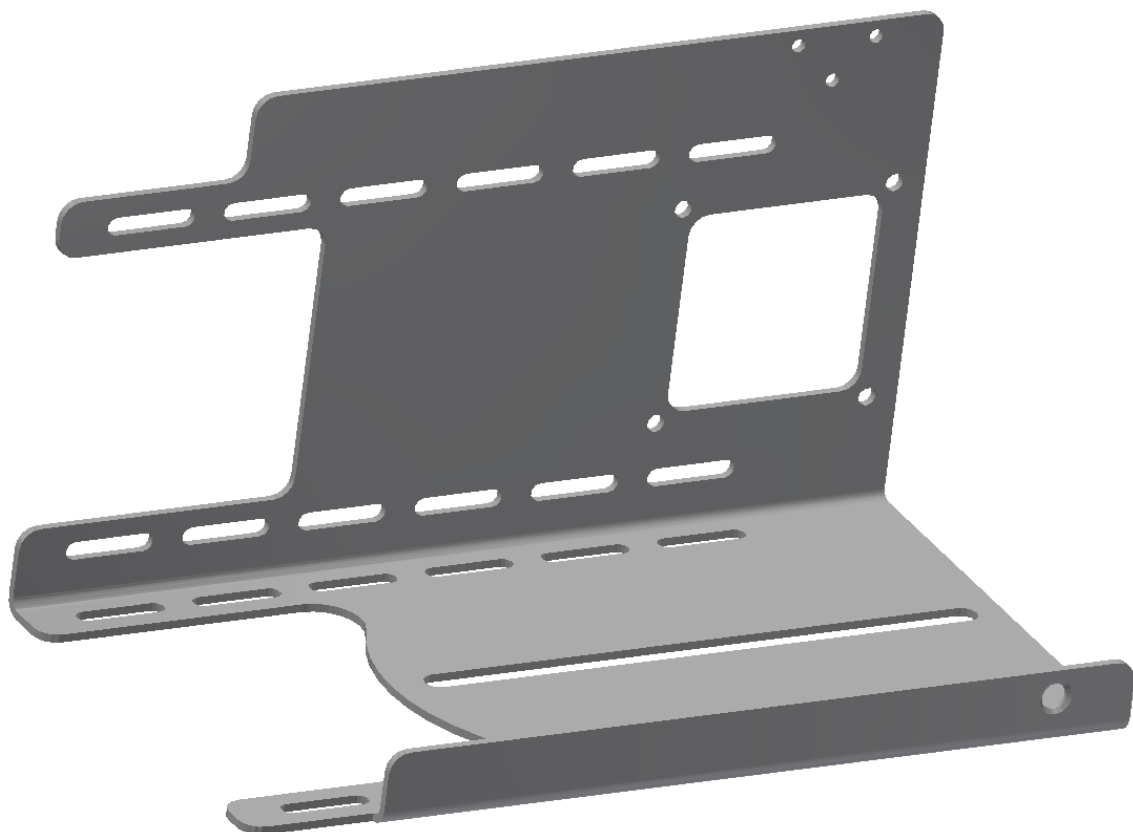


5.1 Konstrukce ochranného krytu a stojanu

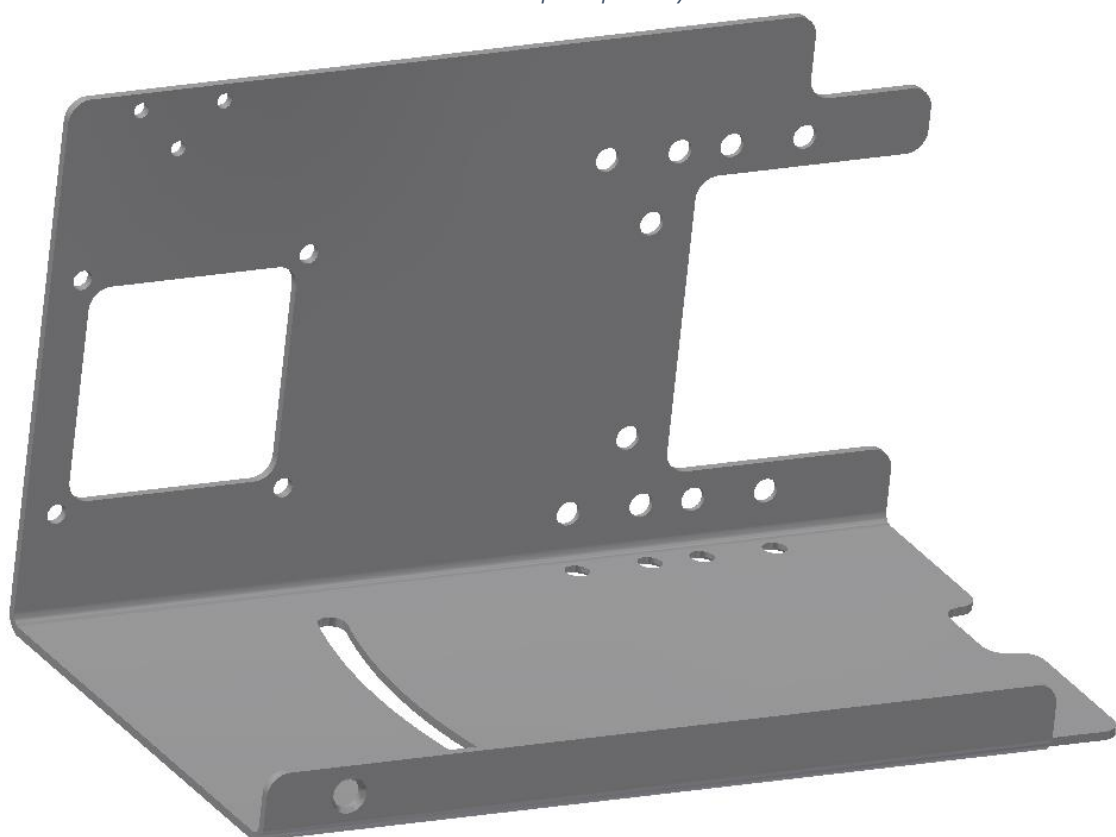
Finální verze ochranného krytu, která byla vyrobena, viz obrázek 23, je složena ze samostatného ochranného krytu připomínající tvar kvádrů a stojanu. Materiál, který byl použit pro zhotovení celého výrobku, je nelegovaná jakostní konstrukční ocel S355JR jejíž vlastnosti jsou pro tuto aplikaci dostačující a také disponuje poměrně nízkou pořizovací cenou.

Samotný ochranný kryt je tvořen čtyřmi částmi tvarem připomínající písmeno „L“, viz obrázky 24 až 27. Pro výrobu těchto dílů byl zvolen plech, jehož tloušťka byla vybrána na základě kompromisu. Při volbě tloušťky stěny se cílilo především na faktor bezpečnosti proti proražení krytu při nehodě. Tento činitel se pozitivně zvyšuje s rostoucí tloušťkou stěny, z tohoto hlediska by bylo vhodné vyrobit díly z co nejtlustšího plechu. Proti tomuto trendu zvětšování tloušťky stěny ale působí celková hmotnost sestavy, která se zvyšuje s rostoucí tloušťkou plechu. S příliš vysokou hmotností výrobku přicházejí problémy spojené s manipulovatelností, s krytem by bylo těžké pohybovat, úhlové a délkové nastavení by bylo problematické a k otevření krytu by byla potřebná velká síla. S rostoucí tloušťkou stěny je zároveň výroba samotných dílů tvářecím procesem komplikovanější. S přihlédnutím na všechny tyto informace byla zvolena tloušťka plechu 4 mm. S takovou to tloušťkou plechu je hmotnost celého krytu včetně stojanu cca 45 kg, bez stojanu cca 24 kg, kde hmotnost dílů tvořících víko krytu, otevíratelného jednou rukou, zobrazených na obrázcích 26 a 27 je přibližně 12 kg. Manipulovatelnost s ochranným krytem v souvislosti s hmotnostmi je tedy v rámci možností jedné či dvou osob.

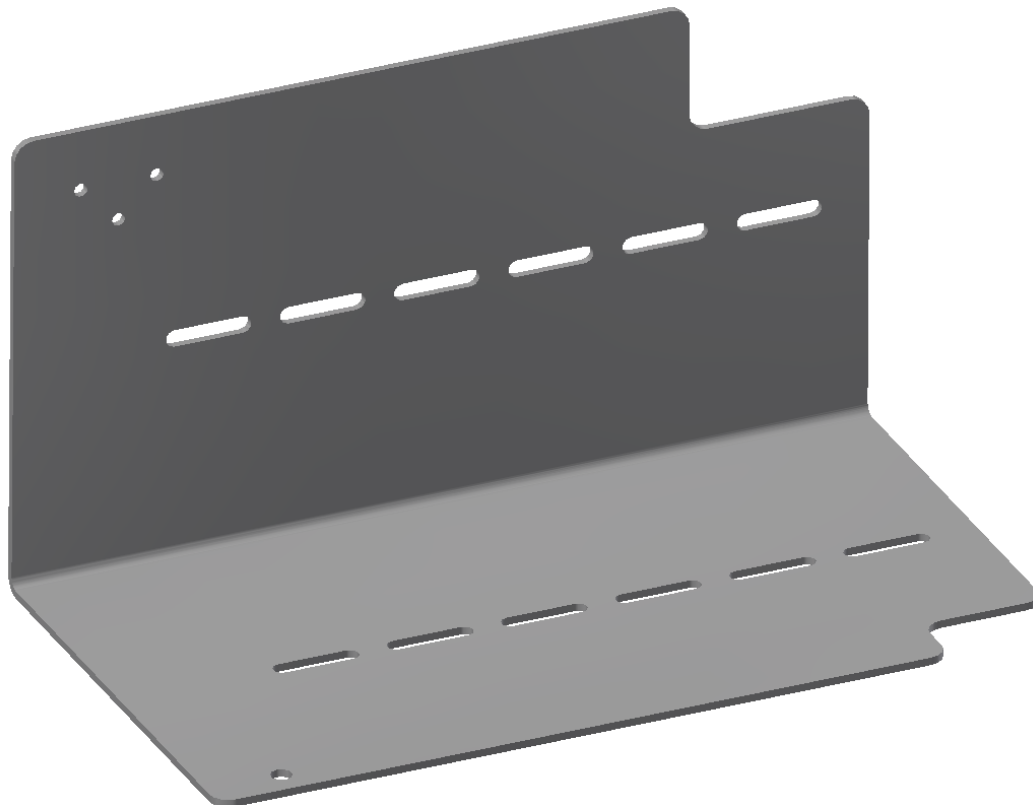
Spodní část krytu, tvořena díly zobrazených na obrázcích 24 a 25, je propojena s víkem krytu pomocí dvojice pantů, jejichž společná osa tvoří osu rotace při otevírání víka krytu. Pro vytvoření této společné osy, bylo nutné podložit jeden závěs dvěma plechovými podložkami o tloušťce 4 mm, které kompenzují konstrukční překrytí plechových dílů. Ukotvení pantů na jednotlivých plechových dílech je určeno trojicí otvorů v trojúhelníkové formaci. K víku krytu bylo také přivařeno jednoduché ocelové madlo, které zajišťuje snadné otevírání toho výrobku jednou rukou. Pro pevné spojení víka a spodní části krytu jsou použity dva šrouby M10, které lze vidět na předchozím obrázku v levé a pravé dolní části krytu.



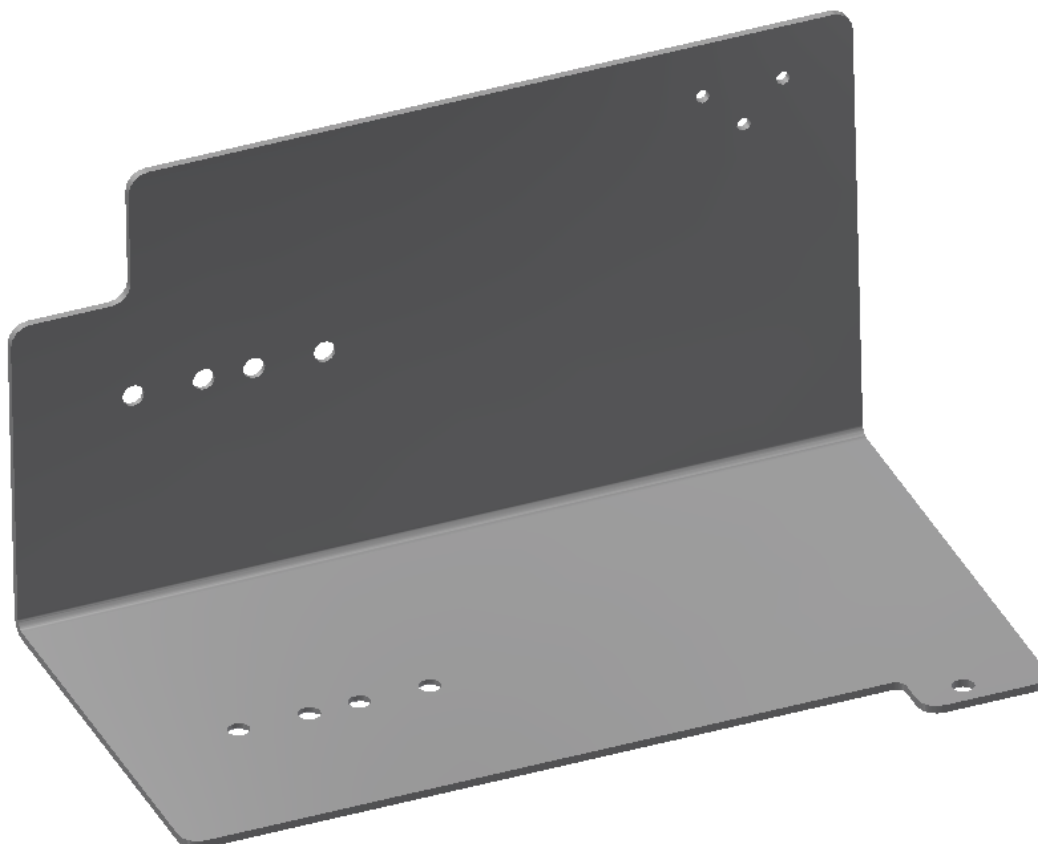
Obrázek 24: Spodní plechový díl 1



Obrázek 25: Spodní plechový díl 2



Obrázek 26: Horní plechový díl 1

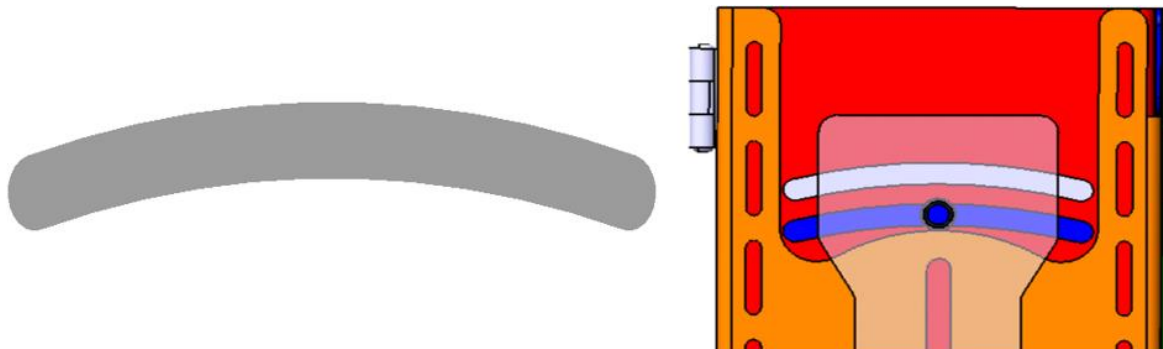


Obrázek 27: Horní plechový díl 2

Jedním z návrhových požadavků na ochranný kryt byl také parametr: „jednoduchá změna úhlové a délkové nastavitelnosti“, ke změně těchto délkových a úhlových hodnot se využívá soustava drážek a děr (toto téma je podrobněji rozepsáno v další části práce). Těmito technologickými prvky procházejí šrouby M8, jenž jsou součástí šroubových spojů spojujících samotné horní a spodní plechové díly mezi sebou. Pro docílení návrhového požadavku byly všechny tyto díry technologicky upraveny tak, aby je bylo možné osadit zapuštěnými nýtovacími maticemi. Použití nýtovacích matic oproti obyčejným maticím zrychluje sestavení ochranného krytu, neboť je závitová díra vždy připravena na místě potřeby, šroubový spoj lze sestavit jednou rukou a zmizí šance na ztrátu používaných matic.

Ke spojení části krytu připomínající tvar kvádrů a stojanu jsou využity dva šrouby M12, které se samostatně pohybují v nedělených drážkách, viz obrázek 23, stojan je opět opatřen díry přizpůsobenými na osazení nýtovacími maticemi pro snadnější spojení těchto výrobků.

Při sestavování krytu, kdy se jednotlivé plechové díly zasunují do sebe, vzniká mezi ochranným krytem a podstavcem konstrukční mezera o tloušťce 4 mm. Pokud by se na tento fakt zapomnělo, došlo při utahování šroubů M12 k ohýbání spodního plechového dílu 2. Z tohoto důvodu byla k potencionálně ohýbanému dílu přivařena součástka, viz obrázek 28, která kopíruje tvar přilehlé drážky a slouží jako opěrná struktura zamezující ohybu dílu.

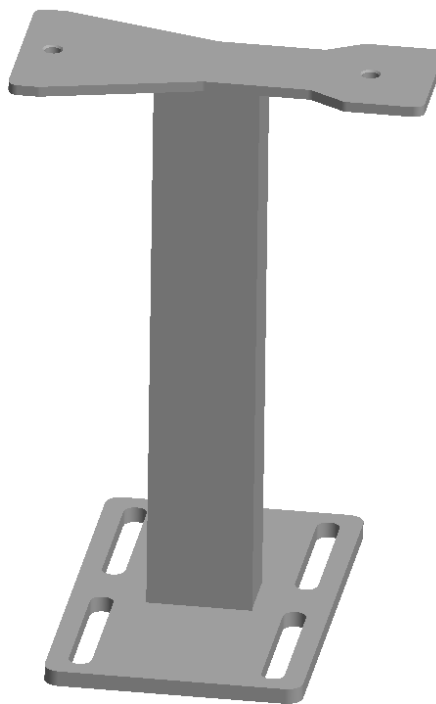


Obrázek 28: Ocelová vložka a její umístění – tloušťka 4 mm

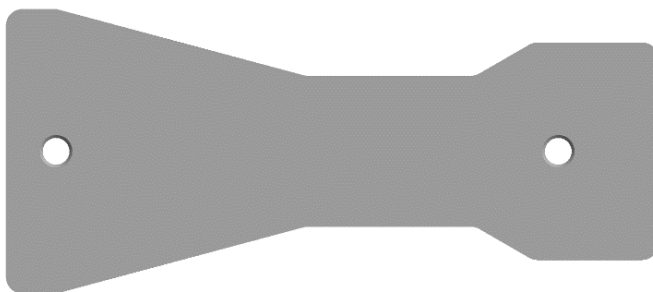
Pro splnění podmínky dané návrhovým požadavkem na zajištění konstrukční kompatibility s ventilačním okruhem byl kryt opatřen dvěma čtvercovými otvory, kterými bude v průběhu experimentů procházet chladicí vzduch, doprovázený osmi kruhovými děrami pro šrouby. Tyto konstrukční prvky slouží pro připojení dvou přírub ventilačního okruhu.

Celková výška a šířka krytu je dána paralelním řazením technologických a konstrukčních prvků. Vnitřní prostor krytu poskytuje s rezervou dostatek místa pro kloubový hřídel osazený měřicími aparaturami používaných na zkušebním stanovišti.

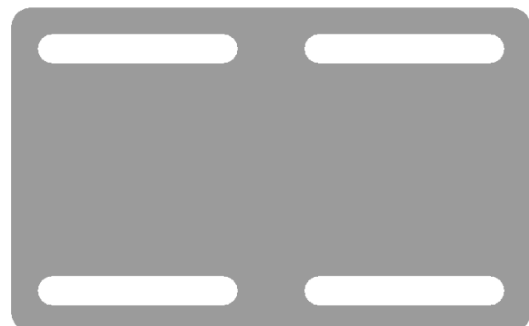
Pro zajištění správné funkce ochranného krytu je potřebné produkt ukotvit a nastavit správnou stavěcí výšku, k tomuto účelu byl vyroben stojan, viz obrázek 29, který byl vyroben tak, aby jej bylo možné umístit mezi modernější dynamometry ASD S200 a SDS 200. Materiálem tohoto výrobku byla opět zvolena nelegovaná jakostní konstrukční ocel S355JR s dostačujícími vlastnostmi a přijatelnou cenou. Stojan byl vyroben svařováním, při kterém se spojily dva plechové díly, viz obrázky 30 a 31 s uzavřeným ocelovým obdélníkovým profilem s parametry 60x100x6 o délce 536,5 mm. Celková výška podstavce následně zaručuje skutečnost, že příchozí vzduchové proudění z ventilační tratě působí přesně na osu kloubového hřídele.



Obrázek 29: Ocelový stojan



Obrázek 30: Horní deska stojanu – tloušťka plechu 10 mm



Obrázek 31: Spodní deska stojanu – tloušťka plechu 15 mm

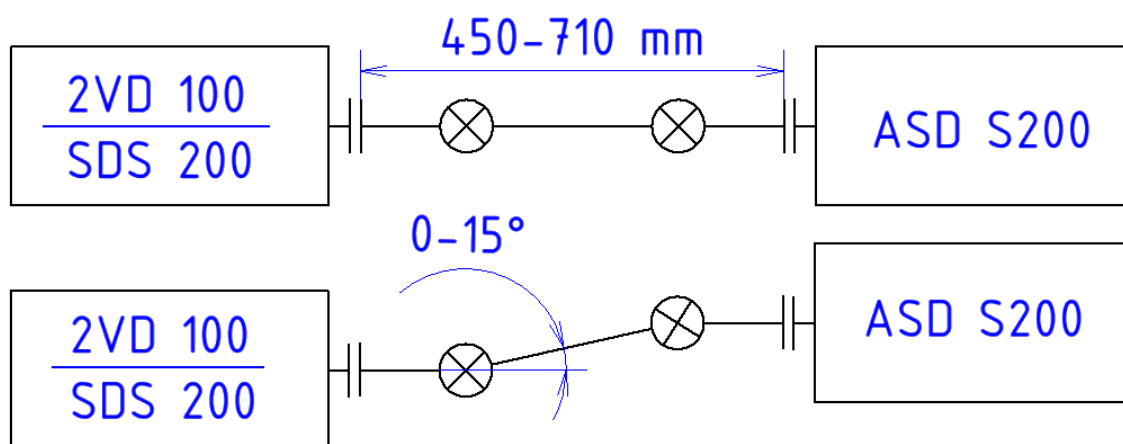
Tvar horní desky stojanu byl odvozen od požadavku správného opření ochranného krytu o stojan, kde bylo nutné respektovat vzájemný relativní pohyb těchto výrobků, aby nedošlo ke střetnutí hlav spojovacích šroubů s podstavcem.

K odvození tvaru spodní desky stojanu byl využit výkres kotvícího systému samotného zkušebního stanoviště mezi dynamometry ASD S200 a SDS 200, u kterého jsou kotvící drážky připomínající písmeno „T“ vyrobeny rovnoběžně s osami hřídelů dynamometrů, viz obrázek 23. Poloha a šířka drážek v plechovém dílu je navržena tak, aby bylo možné stojan umístit kdekoli na zkušebním stanovišti.

5.2 Délková a úhlová nastavitelnost

Základní podstatou experimentálního měření je u zkoušení kloubových hřídelů možnost porovnávat různé hřídele, které se liší například vlastní délkou, a jejich vlastnosti závislé na úhlu zalomení. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout kryt tak, aby se adaptoval těmto rozměrovým úchylkám.

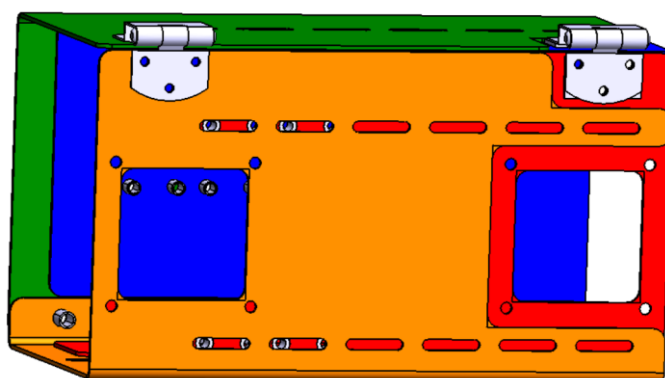
Pro samotný návrh krytu bylo nutné nejdříve stanovit v jakých délkových rozměrech se zkoušené hřídele pohybují (jejich délku) a určit si meze úhlového zalomení hnacích hřídelů při zkoušení na stanovišti. Z provedené rešerše o současných kloubových hřídelích a následné konzultace s obsluhou zkušebního stanoviště, byly stanoveny požadavky na délkové a úhlové rozptyly, kterým se ochranný kryt musí přizpůsobit. Výsledné hodnoty těchto parametrů lze vidět na obrázku 32.



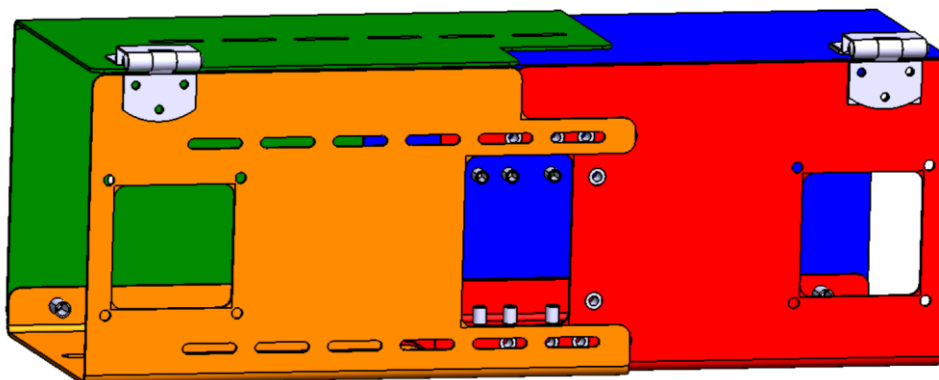
Obrázek 32: Délkové a úhlové rozptyly zkoušených kloubových hřídelů

Z daných hodnot vyplývá fakt, že se ochranný kryt musí zvětšit o téměř 58 %, aby se dostal z minimální délky na délku maximální, viz obrázky 33 a 34. Tato problematika je vyřešena teleskopickým konceptem krytu, kde se jednotlivé plechové díly zasouvají do sebe.

Minimální a maximální délka krytu je vyřešena soustavou přesně vyrobených drážek ve vnějších plechových dílech a speciálně umístěnými dírami ve vnitřních plechových výrobcích. Koncept ochranného krytu, u kterého byla místo šesti po sobě jdoucích krátkých drážek použita jedna dlouhá souvislá drážka, nebyl zhotoven, jelikož rozdělením jedné drážky na několik menších se výrazně zvětší odolnost ochranného krytu proti proražení cizím tělesem při nehodě. Vytvořenými dírami a drážkami procházejí šrouby M8, jenž jsou součástí šroubových spojů spojující plechové díly. V závislosti na příslušném délkovém nastavení ochranného krytu je možné spojit tyto díly 12 až 24 šrouby M8.

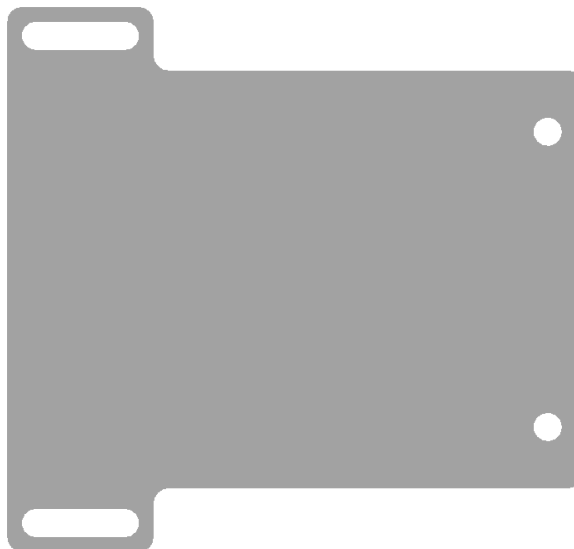


Obrázek 33: Minimální délka krytu

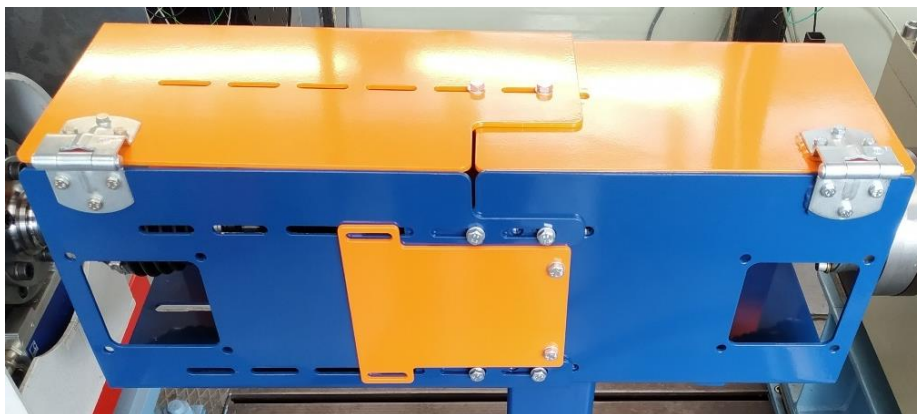


Obrázek 34: Maximální délka krytu

Na obrázku 34, kde je zobrazena maximální délka krytu, je možné zpozorovat nežádoucí díru v ochranném krytu. Tato díra se objevila, jelikož jsou plechové díly opatřeny konstrukčními prvky sloužícími pro připojení přírub ventilačního okruhu. K utěsnění otvoru, jenž se objevuje při délkovém nastavení 620 mm a více, byla vyrobena plechová těsnící dvířka, viz obrázek 35. Pro ukotvení tohoto výrobku na krytu jsou opět použity drážky ze spodního plechového dílu 2 a speciálně vyrobené díry opatřené zápusťnými nýtovacími maticemi na spodním plechovém dílu 1.

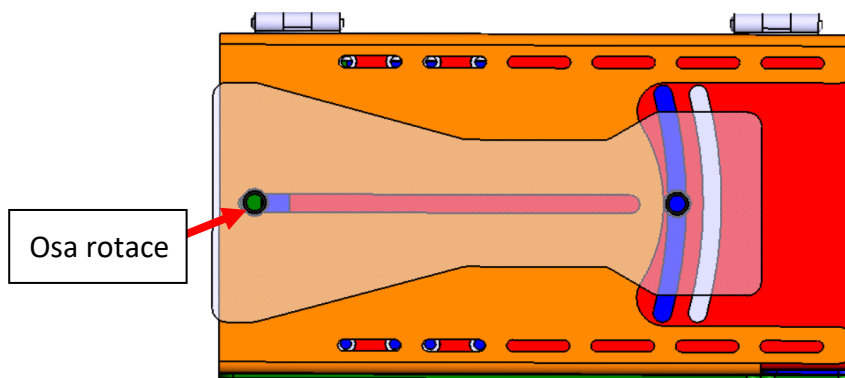


Obrázek 35: Těsnicí dvířka – tloušťka 4 mm

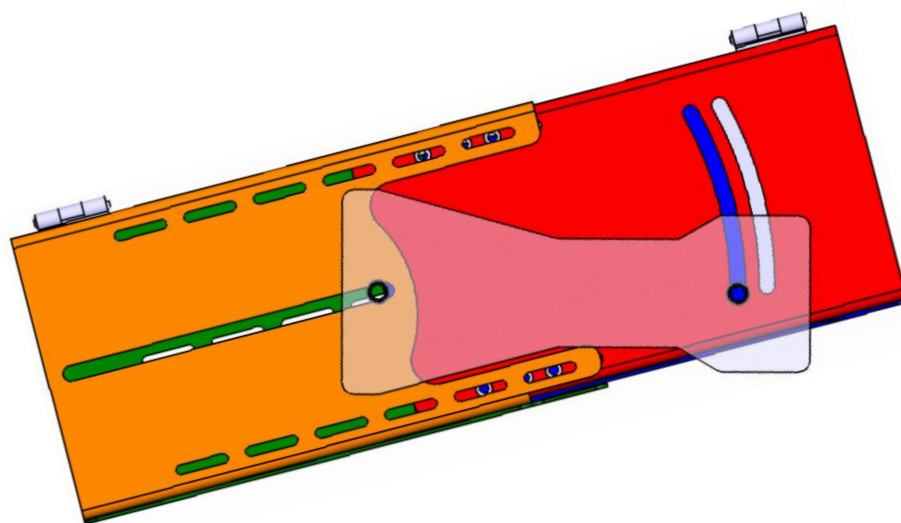


Obrázek 36: Utěsnění otvoru těsnícími dvířky

Pro vyřešení nastavení úhlového zalomení ochranného krytu bylo opět využito soustavy speciálně vyrobených drážek ve krytu a děr v podstavci. Tvar drážek je vyroben tak, aby bylo možné nastavit úhel zalomení nezávisle na konkrétním délkovém nastavení. Osu rotace bezpečnostního boxu udává osa nýtovací matice zapuštěné ve stojanu. Minimální a maximální úhly zalomení krytu je možné vidět na obrázcích 37 a 38.



Obrázek 37: Minimální úhel zalomení + minimální délka krytu



Obrázek 38: Maximální úhel zalomení + maximální délka krytu

Na spodním obrázku je možné vidět, jak speciální tvar horní části stojanu respektuje relativní pohyb ochranného krytu a podstavce, aby nedošlo ke kontaktu šroubů se stojanem.



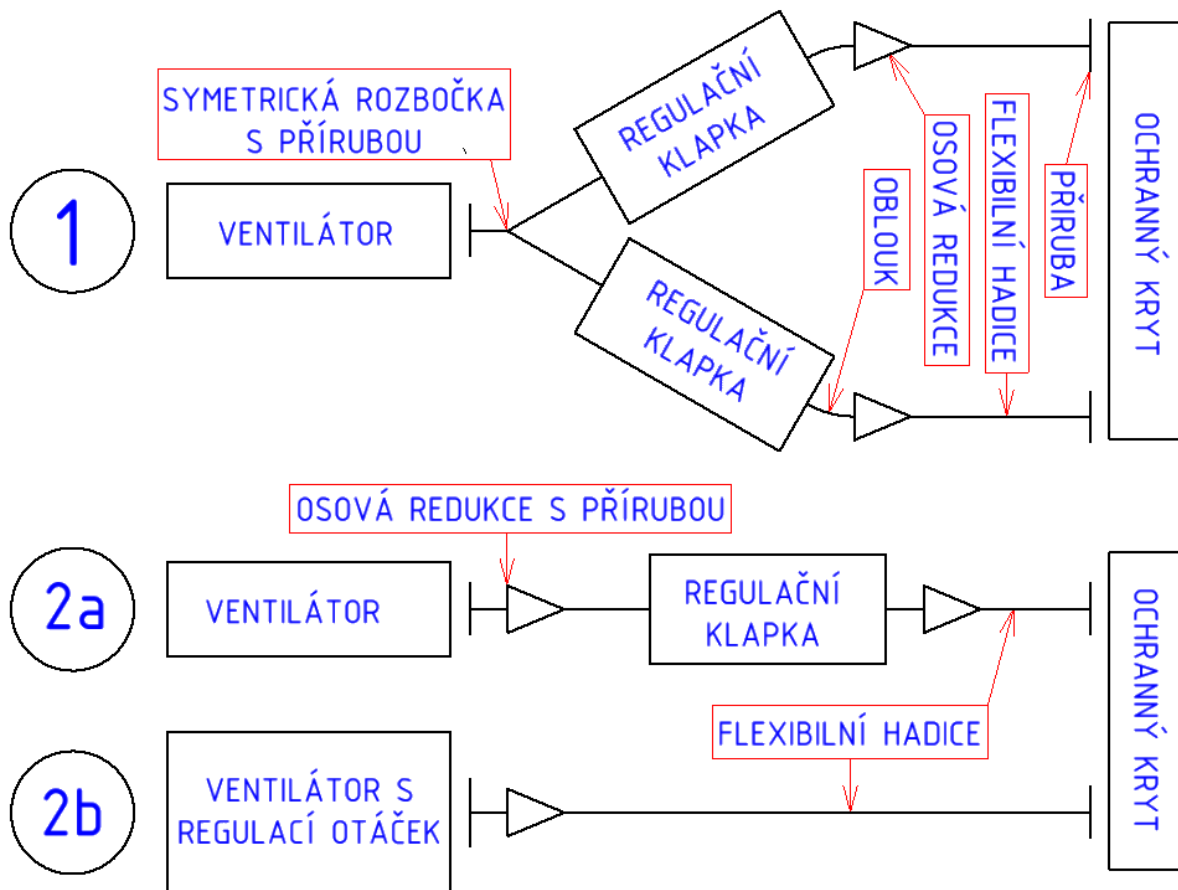
6. Ventilační trať

Tato fáze závěrečné práce je věnována sestavení ventilačního tratě, jenž má za úkol simulovat ofukování homokinetických kloubů vzduchem. Konstrukce a vnější vzhled každého automobilu se více či méně liší. Tyto dvě charakteristiky mají mimo jiné vliv na způsob obtékání vozidla vzduchem. Vztáhne-li se tato problematika na testování kloubových hřídelů, nastane situace, kdy při experimentálním měření je nutno regulovat úroveň ofukování jednotlivých homokinetických kloubů, v závislosti na způsobu umístění hnacího hřídele v konkrétním typu vozidla a jakou mírou je kloub ofukován.

K řešení této problematiky bylo nejdříve nutné určit základní koncept ventilační tratě, kterou by se dosáhlo požadovaného cíle. V návrhu řešení musí být vyřešen zdroj vzduchového proudění, regulace rychlosti vzduchového proudění samostatně na obou homokinetických kloubech a propojení všech komponent ventilačního okruhu. Seznam komponentů a parametry finálních návrhů, mezi kterými se rozhodovalo pro reálné uskutečnění, jsou rozepsány v následující tabulce. Vzhled konceptů je zobrazen na obrázku 39, pro zpřehlednění obrázku nebyly spojovací členy zobrazeny.

Provedení 1	
Zdroj vzduchového proudění:	1x ventilátor
Regulace rychlosti vzduchového proudění:	2x regulační klapky
Propojení komponentů ventilačního okruhu:	symetrická rozbočka, osová redukce, tvarovky – oblouk, flexibilní hadice, příruby, + spojovací členy
Provedení 2	
Zdroj vzduchového proudění:	2x ventilátor
Regulace rychlosti vzduchového proudění:	a) 2x regulační klapky b) regulace otáček ventilátoru
Propojení komponentů ventilačního okruhu:	osová redukce, flexibilní hadice, příruby, + spojovací členy

Tabulka 2: Seznam dílů jednotlivých konceptů



Obrázek 39: Zjednodušený vzhled jednotlivých konceptů – půdorys

Generátorem vzduchového proudění je u konceptu 1 jediný ventilátor, u kterého je zapotřebí rozdělit objemový tok napůl do dvou směrů, cíle je dosaženo symetrickou rozbočkou. Pro regulaci objemového průtoku v jednotlivých ramenech jsou využity regulační/uzavírací klapky, které svým nastavením dokážou škrtit proud vzduchu na požadovanou úroveň. Regulační klapky, zejména z nižší cenové kategorie, jsou konstrukčně limitovány hodnotou maximální rychlostí vzduchového proudění, jenž výrobky prochází. Tyto hodnoty mohou být nižší než požadované rychlosti proudění pro simulace u zkoušek v laboratořích. Tuto překážku lze překonat zakoupením odolnějších a dražších regulačních klapek. Druhé řešení spočívá v nákupu řídicích členů o větším vnitřním průměru. Větší klapky jsou omezeny stejnými maximálními rychlostními hodnoty, ale prochází jimi větší objemový tok. Vložením osové redukce za větší regulační člen se zmenší průtočný obsah a zvýší se rychlost vzduchového proudění, viz odvození vzorce 3 zanedbávající veškeré ztráty, která již koresponduje s požadovanými hodnotami pro simulaci. K osové redukci je následně připojena flexibilní hadice, jejíž druhý konec je připevněn k ocelové přírubě spojující ventilační trať s ochranným krytem.

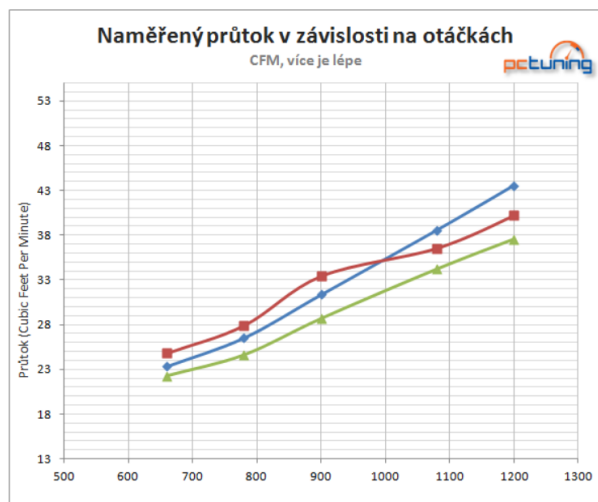


$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot v_1 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot v_2 \rightarrow v_2 = \frac{D^2}{d^2} \cdot v_1 \quad (3)$$

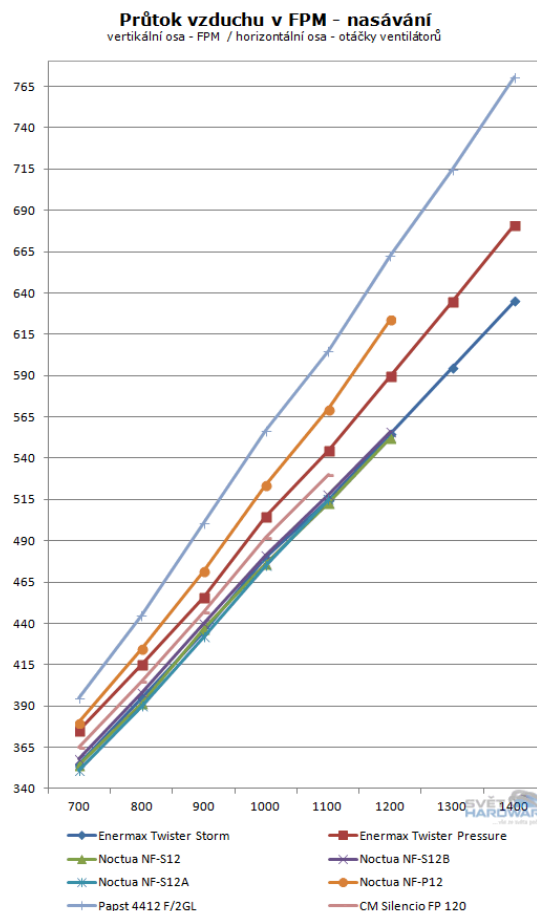
Konstanta D označuje vnitřní průměr regulační klapky, v_1 je rychlost vzduchového proudění uvnitř klapky, d značí menší vnitřní průměr osově redukce a v_2 je rychlost proudění vycházející ze soustavy.

Koncept 2 se liší od předešlého použitím dvou ventilátorů místo jednoho, na každý homokinetický kloub tedy připadá jeden samostatný stroj. Separací jednotlivých rozvodů se navíc odstraní problém spjatý se společnou závislostí jednotlivých regulací předešlého konceptu, kde škrcení proudu vzduchu v jednom ramenu má za následek zvýšení objemového průtoku v rameni druhém. Propojení ventilátoru s dalšími částmi okruhu je vyřešeno osovou redukcí, jenž se se strojem spojí přírubou a opačný konec se připojí k regulační klapce či flexibilní hadicí. Regulaci objemového průtoku v jednotlivých ramenech u tohoto konceptu lze vyřešit dvěma způsoby.

První způsob, označený na obrázku 2a, je obdobou konceptu 1, kde je opět k řízení průtoku vzduchu využita regulační klapka. Princip druhého způsobu, označený 2b, spočívá v regulaci otáček ventilátoru. Kladná či záporná změna otáček motoru se adekvátně projeví na změně objemového průtoku (rychlosti vzduchové proudění), viz obrázky 40 a 41. Změna otáček je docílena elektronickými regulátory, které mění elektrické veličiny (napětí či frekvenci). Nevýhoda způsobu 2b spočívá v omezení maximálních a minimálních otáček motoru ventilátoru. Zvětšování otáček nad jmenovité hodnoty snižuje moment motoru a zároveň odstředivá síla způsobena vysokými otáčkami je schopna poškodit ventilátor. Naopak snížení otáček motoru ventilátoru je doprovázeno problematikou spojenou s nedostatečným chlazením stroje a následným poškozením ventilátoru způsobeným přehřátím. Aby bylo zabráněno vzniku těchto problémů je nutné znát maximální a minimální otáčky daného ventilátoru určené výrobcem, mezi kterými je nutné se pohybovat při provozu. Problematika provedení typu 2b, spjatá především s omezením minimálních otáček, je zároveň důvodem nevhodnosti tohoto řešení k reálnému uskutečnění, neboť by nebylo možné simulovat ofukování homokinetických kloubů při velmi malých rychlostech vozidla.



Obrázek 40: Naměřený průtok vzduchu v závislosti na otáčkách ventilátoru [14]



Obrázek 41: Naměřená rychlost vzduchového proudění (stopy za minutu) v závislosti na otáčkách ventilátoru [15]

Z obrázků lze zpozorovat téměř lineární závislost průtoku vzduchu (případně rychlost vzduchového proudění) na otáčkách ventilátoru. Pokud je tedy zapotřebí simulovat poloviční rychlost vzduchového proudění, oproti nominální hodnotě, musejí být otáčky motoru redukovány přibližně na polovinu.

6.1 Výběr vhodného provedení pro reálné uskutečnění

V předešlé kapitole byly představeny jednotlivé koncepty řešení ventilační tratě. Provedení typu 2b bylo již vyloučeno z výběru, neboť toto řešení není schopné regulovat rychlost vzduchového proudění (úroveň ofukování homokinetického kloubu vzduchem) od nulové rychlosti po maximální. Na výběr tedy zůstaly možnosti 1 a 2a.

K výběru finálního řešení se přistupovalo z finančního hlediska. Jak již bylo v kapitole 4.1 napsáno, v laboratořích se již vyskytuje jeden axiální ventilátor, používaný u předchozích experimentálních měření. Zdroj vzduchového proudění u provedení typu 1, kde je zapotřebí



pouze jeden tento stroj, by byl tedy již vyřešen a největší cenová položka tohoto provedení by byla ušetřena.

K uskutečnění provedení typu 2b, kde jsou zapotřebí dva ventilátory, by bylo potřeba obstarat další drahý stroj. Zároveň nastává problém s použitím stávajícího axiálního ventilátoru pro tuto variantu, neboť průtok vzduchu strojem (bude objasněn v další části práce) je příliš velký a cenově přijatelné regulační klapky nejsou schopné odolat takovému průtoku. Modulace otáček motoru, která byla objasněna u provedení 2b, by také neodstranila tento problém, neboť ventilátor s minimálními provozními otáčky by stále produkoval příliš velký průtok vzduchu. K uskutečnění provedení 2b by tedy bylo potřebné koupit dva nové ventilátory, jejichž pořizovací cena je pro tento projekt příliš vysoká.

Cena zbylých komponentů ventilačních tratí (regulační klapky, osová redukce, hadice atd.) jak u varianty 1, tak u provedení 2b, je téměř stejná a na výběr finálního řešení neměla vliv.

Finální provedení, které bylo v laboratořích nakonec uskutečněno je varianta 1. Pořizovací cena tohoto provedení je několikanásobně menší než u možnosti 2b a zároveň splňuje všechny požadované návrhové cíle na ventilační trať.

6.2 Zhotovení ventilační tratě

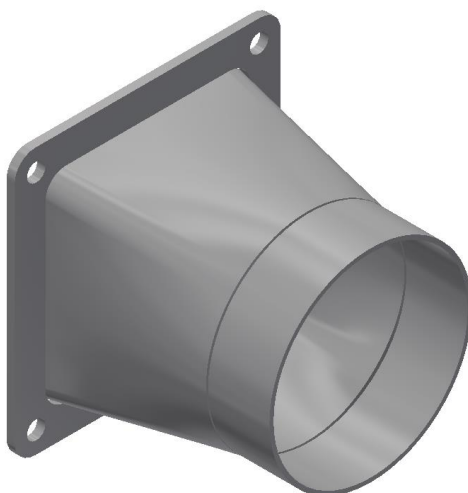
K simulaci ofukování (chlazení) homokinetických kloubů vzduchem v laboratorních podmínkách pro experimentální měření bylo v předešlé kapitole vybráno provedení 1, viz obrázek 39. Tento vzduchotechnický systém se skládá z mnoha různých dílů k jejichž výběru je nejprve nutné znát požadavky na samotnou ventilační trať. Hlavním kritériem pro výběr součástí je dostatečná odolnost proti deformaci či poškození dílů způsobena procházejícím proudem vzduchu. Pro zajištění tohoto požadavku je nejdříve nutné určit maximální požadovanou výstupní rychlost proudění z ventilační tratě.

Jak již bylo v úvodu řečeno, jedním z hlavních cílů experimentálních měření prováděných na kloubových hřídelích je určení maximální dosažené teploty v homokinetických kloubech při dlouhodobé jízdě vysokou rychlostí. Takovýchto podmínek se nejčastěji dosahuje na dálnicích s omezenou či neomezenou maximální povolenou rychlostí. Po provedení rešerše a následné konzultaci s obsluhou zkušebního stanoviště v laboratořích na Julisce bylo rozhodnuto, že ventilační trať musí být schopná simulovat a zároveň ustát proudění vzduchu o výstupní rychlosti $v = 130 \text{ km/h}$.

Kovová příruba

Prvním řešeným dílem ventilačního systému je kovová příruba spojující ventilační trať s ochranným krytem. Samotná příruba byla v rámci návrhu tratě řešena dvěma způsoby. První možností byla zakázková výroba dílu, druhá varianta spočívala v úpravě koupené součástky.

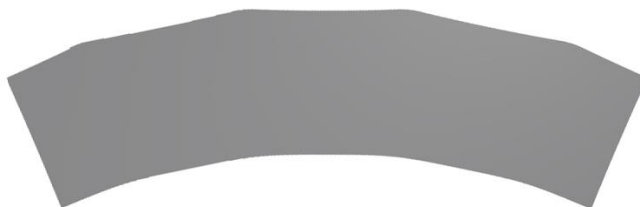
Vyráběná varianta příruby, viz obrázek 42, je tvořena třemi plechovými díly, viz obrázky 43 až 45, jenž jsou vzájemně spojeny svarovými spoji. Plechové díly 2 a 3 jsou navrženy tak, aby je bylo možné vyřezat z rovinného polotovaru a následným ohýbacím procesem je vytvarovat do požadované formy. Výhodou tohoto řešení je přímá komptabilita s ochranným krytem, který byl již navržen na připojení dané součástky. Hlavní nevýhoda konceptu spočívá v zakázkové výrobě, jenž je charakteristická vysokou cenou a zároveň není potenciálními výrobci příliš oblíbená v kusové výrobě.



Obrázek 42: Kovová příruba – vyráběná



Obrázek 43: Plechový díl 1 – tloušťka 2 mm



Obrázek 44: Plechový díl 2 - tloušťka 1 mm



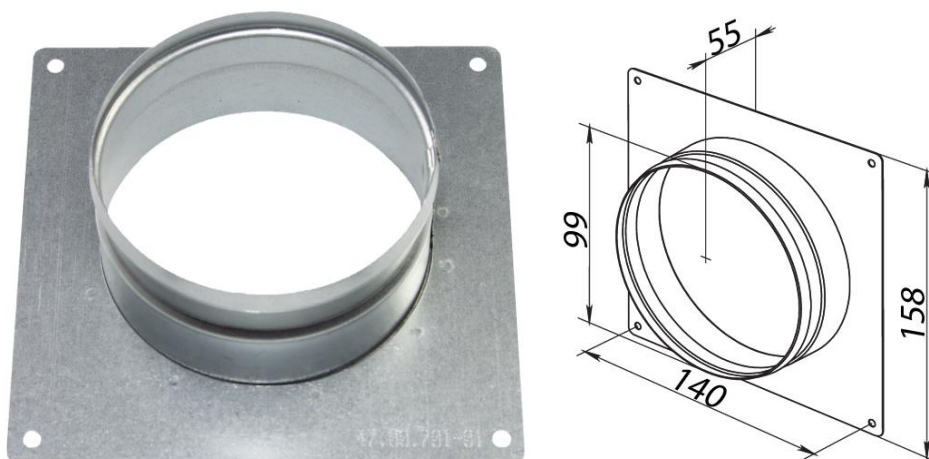
Obrázek 45: Plechový díl 3 - tloušťka 1 mm

Celkový objemový průtok procházející ventilační tratí při zanedbání veškerých tlakových ztrát lze použitím této varianty příruby vypočítat podle vzorce 4:

$$\dot{V} = 2 \cdot S \cdot v = 2 \cdot L^2 \cdot v = 2 \cdot 0,100^2 \cdot 130\,000 = 2\,600 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4)$$

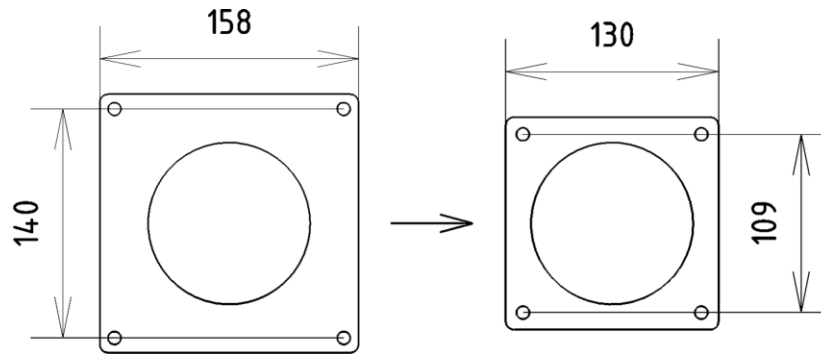
kde číslo 2 reprezentuje dvě ramena tratě, obsah S představuje výstupní průřez příruby a za v lze dosadit maximální požadovanou výstupní rychlost proudění vzduchu z ventilační tratě. Obsah S je možné získat, po zanedbání zaoblení na plechovém dílu 1, vzorcem $S = L^2$, délka L odpovídá čtvercovému tvaru otvoru.

Kupovaná varianta příruby, viz obrázek 46, je vyráběna z pozinkovaného plechu chránící díl proti korozi. Přímá nekompatibilita s ochranným krytem je tvořena vnějším čtvercovým rozměrem 158x158, jenž je příliš velký a docházelo by ke kolizi příruby se spodním plechovým dílem 1, poloha otvorů na šrouby jsou v dílčích dílech na různých pozicích a na rozdíl od předchozího provedení má kruhový výstupní otvor oproti čtvercovému.



Obrázek 46: Kovová příruba – kupovaná [16]

Tuto nekompatibilitu lze jednoduše vyřešit, neboť rovinná plechová část příruby je dostatečně veliká a zároveň má příhodné umístění vlastních děr, které jsou mimo požadovanou funkční oblast příruby upravené. Pro odstranění tohoto problému lze jednoduše oříznout rovinný plechový díl a následně do něj vyvrtat již správně umístěné díry pro spojovací šrouby, viz obrázek 47.



Obrázek 47: Úprava rovinného plechové dílu

Výhodou tohoto řešení je velmi nízká cena a jednoduchá dostupnost plechových přírub. Mezi nevýhody patří již zmíněná snadno opravitelná nekompatibilita dílů a menší obsah výstupního průřezu vůči předchozí variantě, čímž se při stejné výstupní rychlosti proudění vzduchu sníží schopnost chlazení homokinetických kloubů.

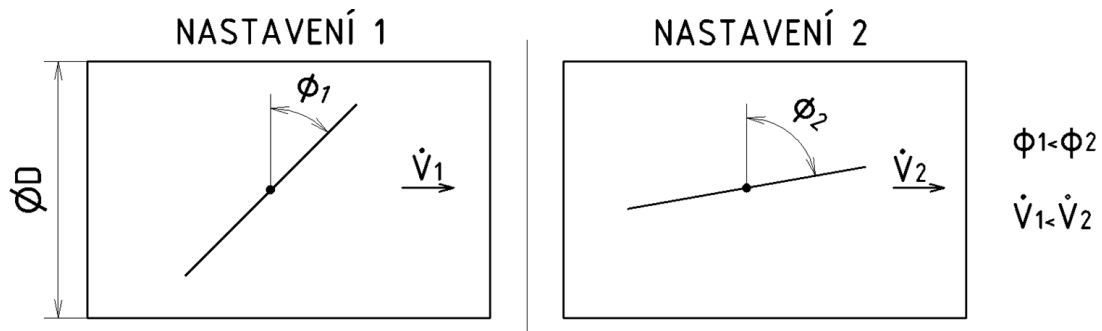
Výpočet celkového objemového průtoku ve ventilační trati při zanedbání veškerých tlakových ztrát je pro tuto variantu obdobný, rozdíl spočívá pouze v určení hodnoty obsahu výstupního průřezu příruby, jenž má kruhový tvar o průměru $d = 98 \text{ mm}$.

$$\dot{V} = 2 \cdot S \cdot v = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,098}{2}\right)^2 \cdot 130\,000 = 1\,961,17 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5)$$

Vybranou variantou kovové příruby se stal kupovaný díl. Při výběru součástky se opět uplatnilo finanční hledisko, kde cena dostupného kupovaného dílu je několikanásobně nižší než případná cena dílu vyráběného.

Regulační klapka

Jakmile byla vyřešena problematika týkající se kovových připojovacích přírub, pozornost se obrátila na výběr vhodné regulační klapky. Tento vzduchotechnický potrubní element slouží k regulaci průtoku vzduchu v potrubí škrcením průřezu. Jedním způsobem, kterým lze uskutečnit škrcení, je dosaženo pomocí plechového kruhového listu, jenž disponuje jedním stupněm volnosti a je schopný rotovat kolem osy kolmé na osu potrubí. Nastavení samotné úrovně škrcení průřezu se dosahuje vhodným natočením čelní plochy listu vůči proudu vzduchu, viz obrázek 48. Při výběru vhodných regulačních klapek je potřebné znát podmínky, kterým budou součástky vystaveny. Do tohoto seznamu patří provozní teplota a tlak a rychlost a složení proudícího média.



Obrázek 48: Nastavení úrovně škrcení průřezu

V průběhu průzkumu trhu bylo zjištěno, že regulační klapky v přijatelné cenové kategorii nejsou stavěné na rychlost proudění vzduchu o hodnotě $v = 130 \text{ km/h}$, jenž je požadována při experimentálních měřeních v laboratořích. Dovolené maximální rychlosti proudění, pro které jsou součástky stavěny, se v této kategorii pohybují v rozmezí $v_{max-dov} = 10 \div 20 \text{ m/s}$. Tento problém, jak již bylo dříve napsáno, lze vyřešit použitím klapky o větším průtočném průřezu, kde bude rychlost vzduchového proudění redukována, ale zároveň se zachová objemový průtok (při zanedbání tlakových ztrát).

Použitím této logiky byla vybrána regulační klapka typu RKKM, viz obrázek 49, jenž zvládá regulovat rychlost proudění vzduchu do hodnoty $v_{max-dov} = 18 \text{ m/s} = 64,8 \text{ km/h}$ a zároveň se svou pořizovací cenou pohybuje v přijatelných mezích.



Obrázek 49: Regulační klapka RKKM S.01 [17]

Díl je vyráběn v různých velikostech podle řady zobrazené v tabulce 3 obsahující různé varianty nabízené klapky. K výběru správně velikosti součástky se opět využije vzorec 3, který se upraví do tvaru vzorce 6, kde hodnota d je výstupní průměr kovové příruby.

$$v_2 = \frac{D^2}{d^2} \cdot v_1 \rightarrow D = \sqrt{d^2 \cdot \frac{v}{v_{max-dov}}} = \sqrt{98^2 \cdot \frac{130}{64,8}} = 138,81 \text{ mm} \quad (6)$$



Z výpočtu vyplývá poznatek, že průtočný průměr regulační klapky musí být větší než $D = 138,81 \text{ mm}$, aby ustál požadovaný průtok vzduchu. Nejbližší větší součást splňující tento požadavek je klapka RKKM 150 s vnitřním průměrem $d = 147,5 \text{ mm}$. Teoreticky by díl bylo možné použít, pokud by vše fungovalo ideálně, avšak v reálném světě je každý fyzikální děj doprovázený vlastní účinností. U proudění vzduchu ve ventilační trati je tato problematika charakterizována tlakovými ztráty, které by zapříčinily nedostatečnou výstupní rychlost proudu vzduchu z tratě při maximálním povoleném zatížení klapky RKKM 150. Z tohoto důvodu byla vybrána větší varianta RKKM 200 s vnitřním průměrem $D = 197,4 \text{ mm}$, kterou prochází při maximálním povoleném zatížení o 79,11 % více media, viz vzorec 7, než za stejných podmínek u předešlého provedení. Tento nárůst objemového průtoku již pokryje přítomné tlakové ztráty a zabezpečí požadovanou výstupní rychlost proudění vzduchu z ventilační tratě. Součást RKKM 200 byla vybrána také na základě kompatibility vůči zbylým dílům sestavy, neboť velikost 200 se nachází v základní řadě normy ČSN EN 1506 a existuje tak velká nabídka připojitelných dílů od prodejců vzduchotechniky.

$$\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot v}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot v} = \frac{D^2}{d^2} = \frac{197,4^2}{147,5^2} = 1,7911 \quad (7)$$

Velikostní řada:	100, 110, 125, 140, 150, 160, 180, 200, 225, ...
Typy koncových připojení:	S – na spiro potrubí (stejně jako zobrazeno obrázku 49) P – na kruh. potrubí s přírubami
Vybrané varianty ovládání:	.01 - ruční ovládání .09 - příprava na osazení servopohonu .57 - ovládání servopohonem 24V SR s plynulou regulací polohy

Tabulka 3: Varianty regulačních klapek typu RKKM [17]

Jedním z důvodů, proč byla zvolena regulační klapka typu RKKM, je také možnost nahradit klasické ruční ovládání servopohonem, viz obrázek 50, komunikujícím s počítačem. Jestliže se provede správná kalibrace tratě této konfigurace, je možné v průběhu zkoušky přesně regulovat objemový průtok media v jednotlivých ramenech. Tato varianta je velice vítaná, neboť by bylo možné experimentálně simulovat na zkušebním stanovišti dynamicky proměnné stavy, jež jsou trendem současné doby. Samotné ovládání servopohonu je

realizováno vodičem obsahující napěťový signál v rozsahu 0-10 V, jenž je připojen k počítači, který musí být opatřen výstupním napěťovým modulem pracujícím v požadovaném rozsahu.



Obrázek 50: Regulační klapka RKKM s ovládním pomocí servopohonu [18]

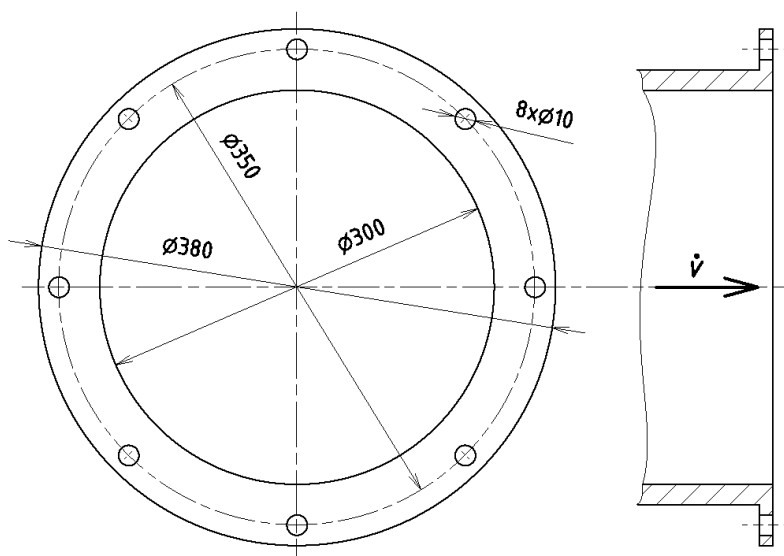
Výběr finální verze regulační klapky RKKM byl opět ovlivněn pořizovací cenou jednotlivých variant. U provedení s klasickým ručním ovládním je pořizovací cena tvořena pouze samotnými plechovými klapkami. Nákupní cena vítané druhé varianty s ovládním zprostředkované motory je nicméně několikanásobně vyšší, neboť k samotným klapkám je nutné dokoupit servopohony a výstupní napěťový modul pro počítač. Po zvážení výhod a nevýhod každého provedení byla nakonec vybrána varianta RKKM 200 S .01, viz obrázek 49. Argument pro výběr této verze je také fakt, že se na zkušebním stavu v laboratořích na Julisce zatím proměřují pouze statické děje, pokud bude v budoucnu požadováno měřit dynamicky proměnné stavy je možné regulační klapky obměnit za dražší variantu.

Ventilátor

Po probrání problematiky spjaté s regulací rychlosti vzduchového proudění nastal okamžik, kdy je nutné vyřešit samotný zdroj objemového průtoku vzduchu. Tímto zprostředkovatelem se stal již v laboratořích přítomný axiální ventilátor od firmy Aerotechna poháněný trojfázovým asynchronním motorem s parametry vypsány v následující tabulce 4 a charakterizujícími rozměry zobrazené na obrázku 51.

Výkon:	900 W	Otáčky:	2800 1/min
Napájecí napětí:	380 V	Počet pólů motoru:	2
Průměrná výstupní rychlost vzduchového proudění (naměřena):	$v = 22 \text{ m/s} = 79,2 \text{ km/h}$		
Vnitřní průměr výstupního průřezu:	$D = 300 \text{ mm}$		

Tabulka 4: Parametry axiálního ventilátoru od firmy Aerotechna



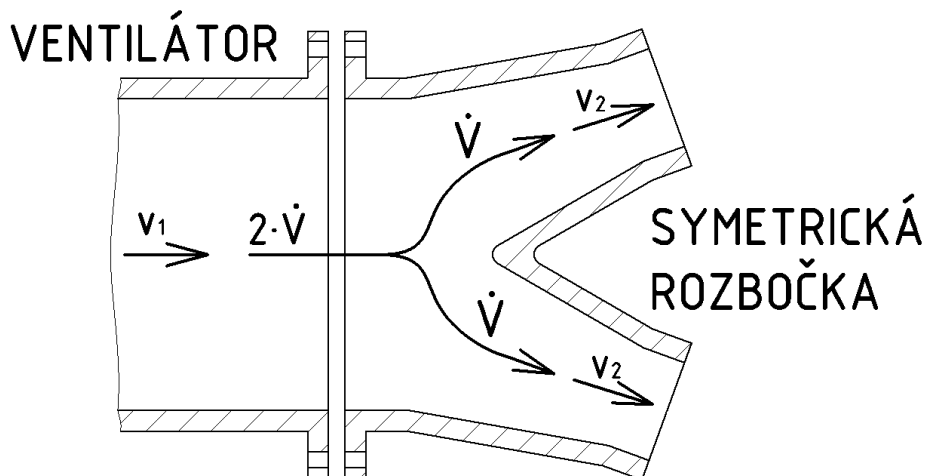
Obrázek 51: Charakteristické rozměry axiálního ventilátoru

Znalostí těchto parametrů lze již snadno vypočítat hodnotu objemového průtoku generovanou axiálním ventilátorem, viz vzorec 8.

$$\dot{V} = S \cdot v = \pi \cdot R^2 \cdot v = \pi \cdot \left(\frac{0,3}{2}\right)^2 \cdot 79\,200 = 5\,598,32 \text{ m}^3/\text{h} \quad (8)$$

Porovnáním tohoto čísla s požadovanou hodnotou vypočtenou ve vzorci 5 vyplývá fakt, že ventilátor od firmy Aerotechna generuje více objemového průtoku, než je vyžadováno pro experimentální měření v laboratořích. Toto zjištění je z jednoho hlediska vítáno, neboť ventilátor nebude mít teoreticky problém s kompenzováním veškerých tlakových ztrát ve trati při dosažení požadované maximální výstupní rychlosti proudícího vzduchu. Proti této výhodě ale vystává nevýhoda spjatá se značným namáháním tratě, kdy velký objemový průtok může poškodit některé díly soustavy a je proto nutné ověřit, zdali nedojde k překročení dovolených konstrukčních hodnot součástí při zapojení silného ventilátoru do sestavy.

Samotná kontrola je provedena na regulačních klapkách RKKM 200, neboť jsou tyto díly nejméně odolné vůči vysokému objemovému průtoku z celé soustavy použitých součástí. Klapky jsou svým použitím omezeny rychlostmi proudícího vzduchu o hodnotě $v = 18 \text{ m/s}$, jak již bylo dříve napsáno, a k jejich kontrole je tedy nutné určit zátěžné podmínky v jednotlivých ramenech tratě, k tomuto účelu je využít obrázek 52.



Obrázek 52: Dělení objemového průtoku symetrickou rozbočkou

Na obrázku je zjednodušeně zobrazeno spojení axiálního ventilátoru se symetrickou rozbočkou, která dělí objemový tok generovaný strojem ideálně napůl. Z redukovaného průtoku lze poté již snadno vypočítat výstupní rychlost v_2 odpovídající rychlosti proudícího vzduchu v regulační klapce (při zanedbání tlakových ztrát), viz vzorec 9, kde d je výstupní vnitřní průměr symetrické rozbočky a zároveň vnitřní průměr regulační klapky RKKM 200.

$$\dot{V} = S \cdot v \rightarrow v_2 = \frac{\frac{\dot{V}}{2}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{\frac{5\,598,32}{2}}{\pi \cdot \left(\frac{0,1976}{2}\right)^2} = 91,28 \text{ km/h} = 25,35 \text{ m/s} \quad (9)$$

Z porovnání vypočítané a maximální dovolené rychlosti vyplývá fakt, že přímým zapojením stávajícího axiálního ventilátoru, aniž by byl nějak poupraven, do ventilační tratě by znamenalo poškození regulačních klapky, neboť by byla dovolená rychlost překročena téměř o 41 % (v reálném provozu by byl rozdíl rychlostí menší, jelikož byly při výpočtu zanedbány veškeré tlakové ztráty).

Řešení tohoto problému spočívá v regulaci ventilátoru, jenž lze uskutečnit dvěma způsoby. První varianta funguje na stejném principu jako regulační klapky, kdy lze dosáhnout snížení objemového průtoku vzduchu dostatečným škrcením. Podstaty lze opět docílit připojením vhodně dimenzované regulační klapky před sání ventilátoru, kdy je možné spojitě regulovat průtok vzduchu, nebo lze napevno zmenšit obsah sacího průřezu, připojením vhodně tvarovaného dílu na přírubu ventilátoru. Z energetického hlediska je tato metoda regulace ztrátová. Druhá varianta, osvětlena již u provedení 2b ventilační tratě, spočívá ve změně otáček motoru ventilátoru, připojením elektronického regulátoru ke stroji.

Frekvenční měnič

K regulaci ventilátoru byl nakonec vybrán frekvenční měnič typu TECO INVERTER 7300 CV model JNTHBCBA0005BE-UF, viz obrázek 53, o jmenovitém výkonu 3,7 kW, který byl zakoupen obsluhou laboratoří již dříve a v současné době nebyl využíván. Recyklací tohoto stroje byla ušetřena znatelná cenová položka, jenž výrazně zlevnila celkovou pořizovací cenu ventilační tratě.



Obrázek 53: TECO INVERTER 7300 CV [19]

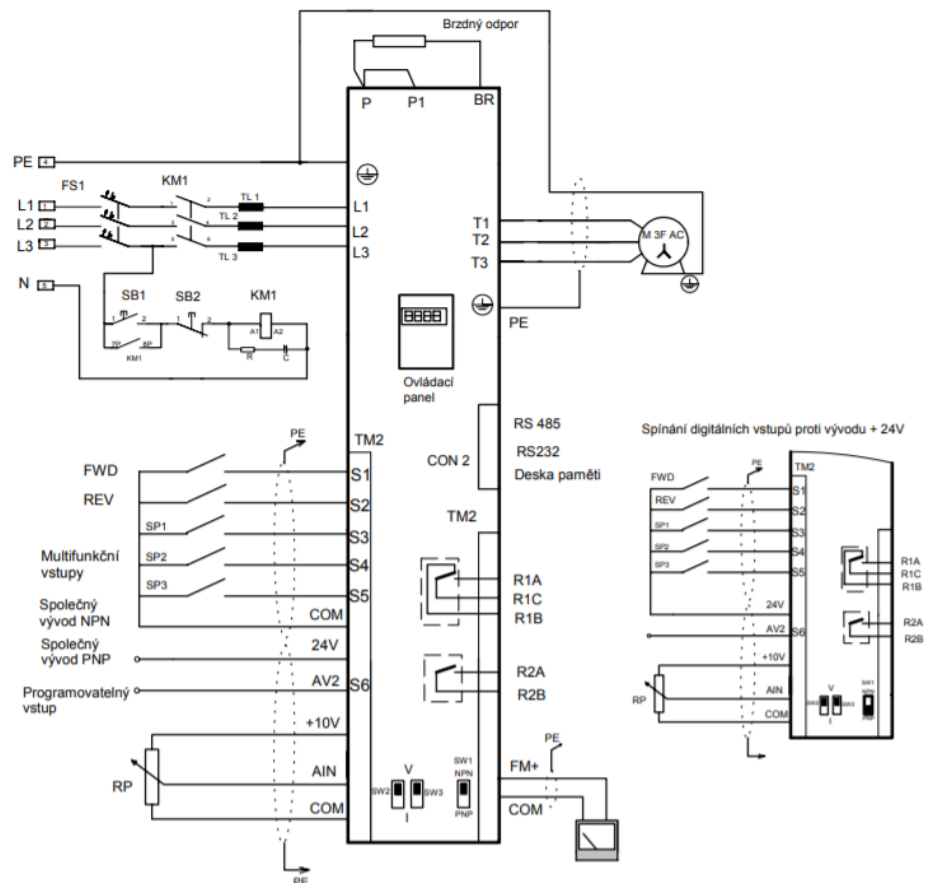
Frekvenční měniče série BE (v názvu modelu) jsou konstruovány na trojfázové napájení 3 x 400 V/50 Hz, jenž koresponduje s trojfázovým asynchronním motorem pohánějícím axiální ventilátor od firmy Aerotechna. Samotný princip stroje spočívá ve změně frekvence výstupního napětí, jenž je zároveň vstupním napětím motoru ventilátoru. Kladná či záporná změna frekvence vstupního napětí následně zapříčiní adekvátní změnu otáček motoru, viz vzorec 10, která má již vliv na velikost generovaného objemového průtoku vzduchu, viz obrázek 40.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = 30 \cdot f \quad (10)$$

$$n = n_s - s \cdot n_s$$

Kde písmeno f reprezentuje frekvenci vstupního napětí motoru, p je počet pólových párů (v případě axiálního ventilátoru od firmy Aerotechna je $p = 2$), n_s označuje synchronní otáčky, s představuje skluz motoru a n jsou výsledné otáčky motoru ventilátoru.

Zapojení elektronického zařízení série BE do elektrického obvodu axiálního ventilátoru se uskutečnilo tak, že byl frekvenční měnič přidělán na stěnu v laboratořích pomocí montážní lišty a na svorky L1, L2 a L3, viz obrázek 54, se připojili síťové vodiče z napájecí sítě laboratoře. K výstupním svorkám T1, T2 a T3 se poté připojili vodiče, které jsou na opačném konci spojeny s vidlicovým konektorem 400 V. Propojení axiálního ventilátoru s frekvenčním měničem je poté již jednoduše docíleno napájecím kabelem, který se spojí s vidlicovým konektorem 400 V. Výhoda této konfigurace spočívá ve snadné obsluze frekvenčního měniče, který je vhodně umístěn na stěně a skutečnost, že při instalaci měniče nebylo potřebné provádět žádné změny na ventilátoru, neboť jsou jednotlivé elektronické obvody separovány.

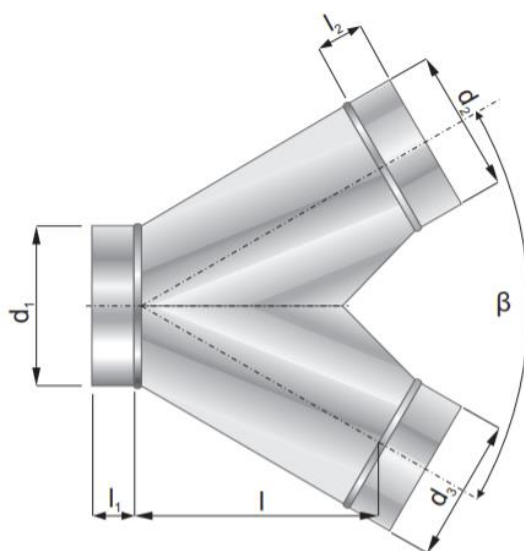


Obrázek 54: Zapojení měniče série BE – trojfázové napájení 3 x 400 V/50 Hz [19]

Symetrická rozbočka

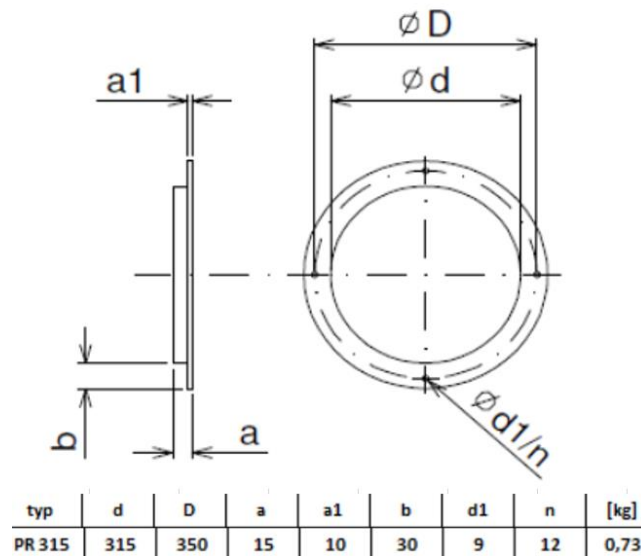
Po vyřešení problematiky týkající se axiálního ventilátoru a výběru regulačních klapek nastala doba, kdy je potřebné vybrat vhodnou plechovou symetrickou rozbočku, jenž pracuje jako mezičlen dříve zmíněných dílů a dělí objemový průtok generovaný axiálním ventilátorem do dvou ramen ventilační tratě. Základní parametry, které je potřebné znát pro výběr tohoto

dílu, jsou vstupní a výstupní průměry (d_1, d_2 a d_3) a úhel β , viz obrázek 55, jenž svírají osy výstupních ramen. Hodnota úhlu β je klíčová, neboť čím menší tato velikost bude tím menší budou vzniklé tlakové ztráty na trati a zároveň má velikost úhlu β vliv na celkovou šířku ventilační tratě, viz obrázek 39. Při výběru dílu bylo tedy urgováno na co nejmenší úhel β . Výstupní průměry d_2 a d_3 jsou dány klapkou RKKM 200. Výběr posledního parametru, vstupní průměr d_1 , byl ovlivněn nabídkou výrobců vzduchotechniky. Nejlepší volbou by byla hodnota odpovídající výstupnímu vnitřnímu průměru ventilátoru $d = 300 \text{ mm}$. Tato velikost, avšak není v hlavní řadě normy ČSN EN 1506, tudíž výrobci nenabízejí symetrické rozbočky s úhlem β menším než 90° a zároveň s průměrem $d_1 = 300 \text{ mm}$. Při výběru dílu byl tedy zvolen kompromis, kdy menší úhel β měl větší prioritu než spojitý přechod ventilátoru a symetrické rozbočky a byl zvolen díl z pozinkovaného plechu s úhlem $\beta = 60^\circ$, se vstupním průměrem $d_1 = 315 \text{ mm}$ a výstupními průměry $d_2, d_3 = 200 \text{ mm}$.



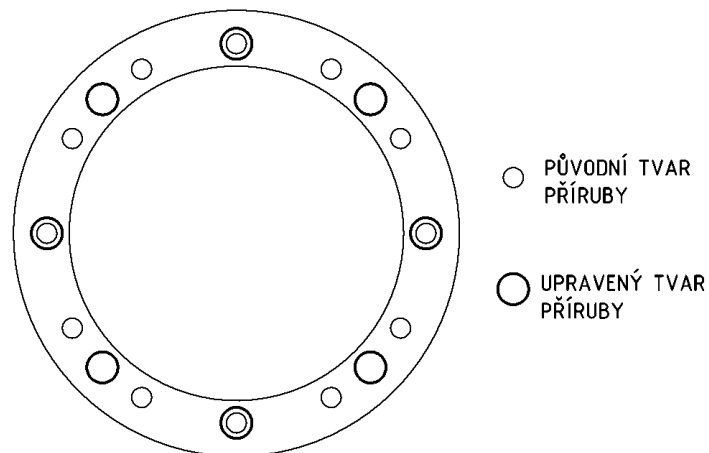
Obrázek 55: Základní parametry symetrické rozbočky [20]

Výběr dílu, jenž má normalizované přípojovací rozměry (průměry) z hlavní řady normy ČSN EN 1506 přináší také výhodu, jenž je spojena s velkou nabídkou kompatibilních spojovacích dílů, mezi kterými se vyskytuje i ocelová příruba PR CZ 315 s rozměry zobrazenými na obrázku 56.



Obrázek 56: Rozměry příruby PR CZ 315 [21]

Při porovnání připojovacích rozměrů na axiálním ventilátoru od firmy Aerotechna, viz obrázek 51, a ocelové příruby PR CZ 315 si lze povšimnout příhodné podobnosti, kdy k dosažení úplné kompatibility těchto dílů postačí rozšířit čtyři stávající otvory a vyvrtat čtyři nové díry, viz obrázek 57, u kterého jsou pozměněny měřítka jednotlivých rozměrů pro lepší představu. Samotné propojení symetrické rozbočky s ocelovou přírubou je již realizováno nasunutím větší součásti na díl menší, neboť oba díly jsou vyrobeny podle normy ČSN EN 1506.

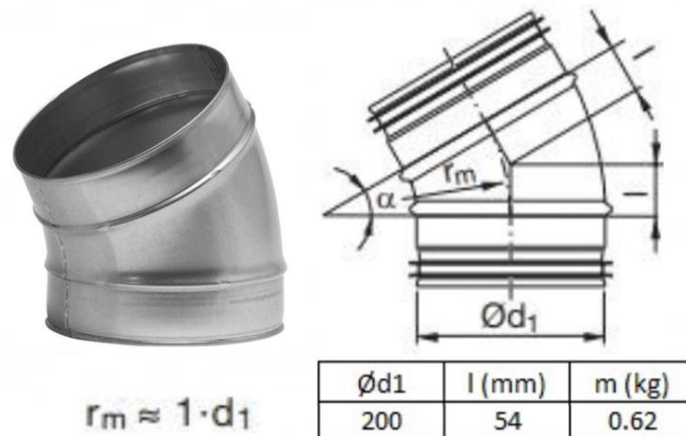


Obrázek 57: Úprava tvaru ocelové příruby PR CZ 315

Propojovací členy

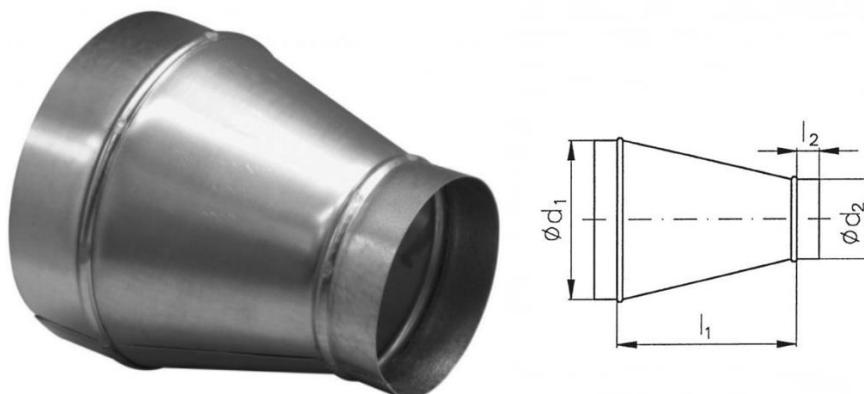
Výběr symetrické rozbočky byl poslední větší problém v problematice týkající se zhotovení ventilační tratě. Závěr této kapitoly je již zaměřený na selekci součástí potřebných k samotnému propojení již dříve vybraných prvků. Prvním tímto kusem je kruhová tvarovka B 200 30° z pozinkovaného plechu, obrázek 58, s obloukovým tvarem a úhlem odpovídajícím

polovině již dříve zmíněného úhlu β , která usměřňuje objemový průtok tak, aby směřoval kolmo na ochranný kryt, viz obrázek 39 a zároveň použití tohoto dílu zmenšuje celkovou šířku ventilační tratě.



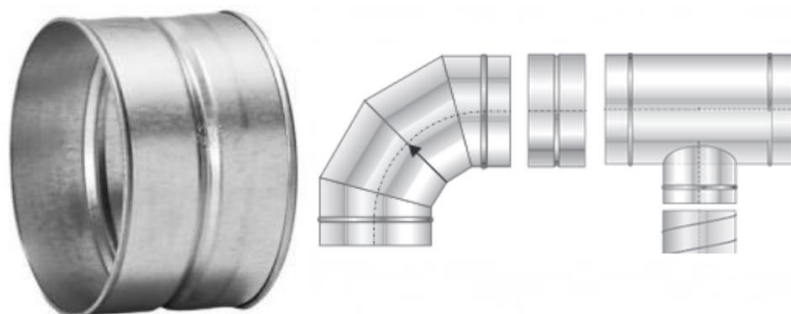
Obrázek 58: Vent lisovaný oblouk B 200 30° [22]

Další propojovací součást, která je umístěna za plechovým obloukem, je osová redukce PRO 200/100, obrázek 59, jejíž úkol je zmenšení průtočného obsahu za účelem zvýšení rychlosti proudícího vzduchu na výstupu ventilační tratě.



Obrázek 59: PRO 200/100 Přechod osový [23]

Na obrázcích 49, 55, 58 a 59 lze vidět, že díly jsou ukončeny stejným normalizovaným tvarem a spojení těchto součástí mezi sebou tedy nelze uskutečnit bez patřičného mezikusu. K tomuto účelu bylo zakoupeno šest vnějších spojek MF 200, viz obrázek 60, do kterých se díly z obrázků zasunou. Spojení je poté zajištěno samořeznými šrouby (TEX šrouby) a samolepicí hliníkovou páskou (ALU páskou).



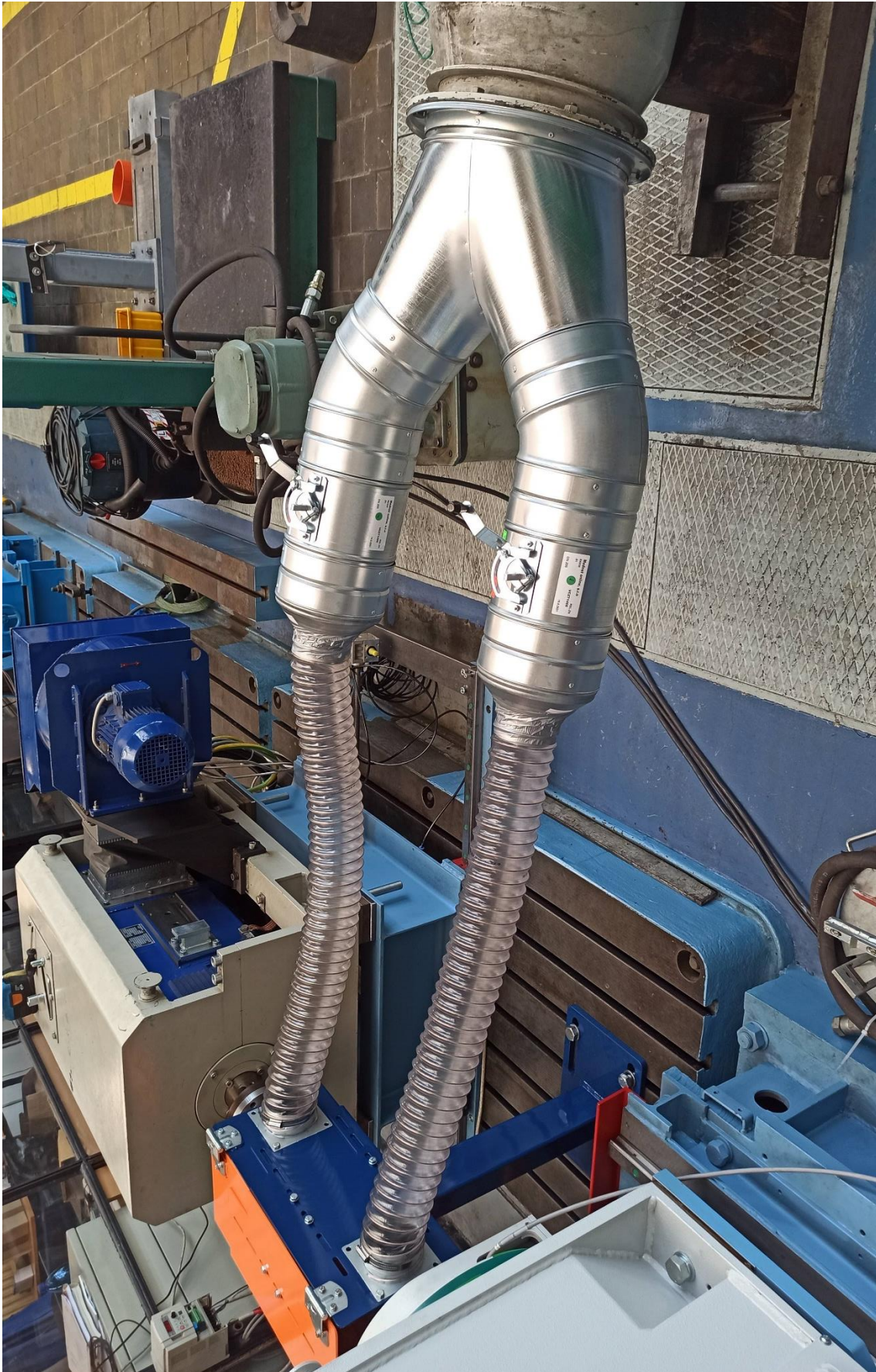
Obrázek 60: Vnější spojka MF 200 [24],[25]

Poslední spojovací díl, jehož zapojením do soustavy předchozích součástí vznikne již plně funkční ventilační trať, je flexibilní hadice FLEXADUR PVC-1N o průměru 100 mm, viz obrázek 61, tvořena plastovým jádrem vyztuženým ocelovou spirálou. Propojení hadice s osovou redukcí a přírubou ochranného krytu je zajištěno kovovými stahovacími pásky.



Obrázek 61: Hadice FLEXADUR PVC-1N [26]

Finální verze sestavené ventilační tratě je zobrazena na následujícím obrázku 62, kde je možné vidět jednotlivé díly sestavy, jejich vzájemné propojení a spojení samotné ventilační tratě s ochranným krytem.



Obrázek 62: Sestrojená finální verze ventilační trati

6.3 Měření rychlosti proudění vzduchu

Určení počátečních podmínek každého experimentálního měření je vyžadováno, jelikož je stěžejní pro porovnávání naměřených dat. V kontextu s navrženou ventilační tratí je potřebné změřit rychlost proudění vzduchu v jednotlivých ramenech před každým měřením. K tomuto účelu je v laboratořích na Julisce využita sada měřících hlavic od firmy TESTO, viz obrázek 63, která je tvořena vrtulkovou sondou o průměru hlavy $d = 16 \text{ mm}$ a bezdrátovým lopatkovým přístrojem s průměrem hlavy $D = 100 \text{ mm}$. K určení průměrné výstupní rychlosti proudícího vzduchu v jednotlivých ramenech tratě je dokonalým strojem větší sonda s měřícím průměrem téměř shodným s výstupním průměrem příruby. Menší ze sond je naopak skoro ideálním přístrojem pro bodové měření rychlosti.



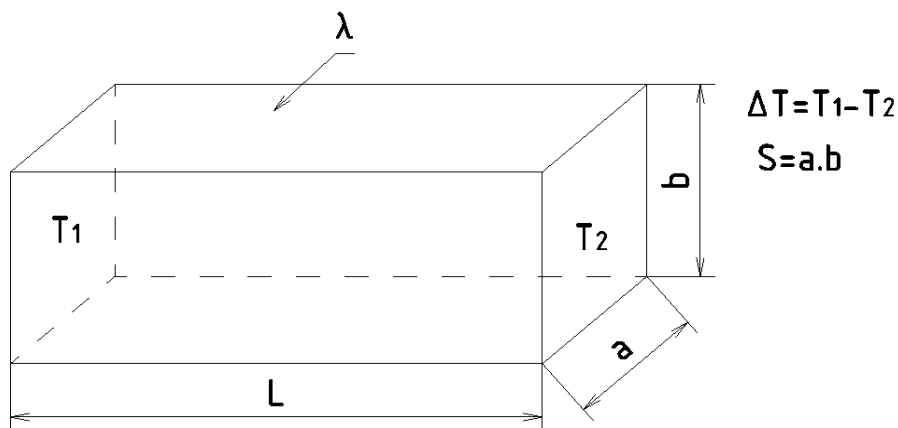
Obrázek 63: Lopatkové sondy od firmy TESTO [27]

7. Snížení konduktance tepla do hřídelů dynamometrů

Finálním konstruktérským problémem, kterým se tato závěrečná práce zabývá, je změna počátečních podmínek experimentálních měření, jež byla objasněna na příkladu v kapitole 4.2. Cílem této části je tedy zredukovat množství tepla procházející mezi homokinetickými klouby a hřídeli dynamometrů, k čemuž je potřebné znát Fourierův zákon vedení tepla ve tvaru vzorce 11, jehož výpočtem lze určit množství tepla prošlého mezi dvěma paralelními plochami za čas τ , viz obrázek 64.

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot \tau \quad (11)$$

Kde λ je součinitel tepelné vodivosti (materiálová konstanta), S je obsah plochy kolmé na tepelný tok, L je vzdálenost mezi jednotlivými plochami, mezi kterými se počítá změna teploty ΔT (v kontextu s řešenou problematikou je to vzdálenost mezi homokinetickými klouby a přírubami dynamometrů).



Obrázek 64: Fourierův zákon – jednoduchá rovinná stěna

Z Fourierova zákona vyplývají dvě možnosti řešení, jak lze docílit požadovaného snížení celkového přenosu tepla vedením. První varianta spočívá v použití materiálů s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti, princip se využívá například ve stavebním průmyslu, kde jsou používány látky s touto vlastností pracující jako tepelné izolanty. Druhá možnost je založena na změně rozměrových parametrů součástky (na obrázku jsou tyto hodnoty označeny písmeny L, a, b), kdy menší průřez dílu a zároveň větší tloušťka izolantu snižuje množství průchozího tepla.

K řešení problematiky diplomové práce je využita kombinace obou variant.

7.1 Fáze 1 – součinitel tepelné vodivosti λ [30],[31]

U této varianty nejdříve proběhla rešerše zkoumající vlastnosti různých materiálů, z které bylo následně usouzeno, že problém lze řešit dvěma způsoby:

1. připojit do systému stávajícího zkušebního stanoviště součást, jež by pracovala na principu tepelného izolantu
2. nahradit stávající díly spojující kloubový hřídel s dynamometry zcela novými součástmi z jiného materiálu s menší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

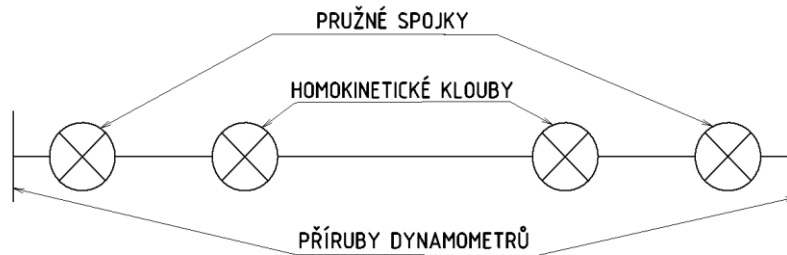
Oba typy řešení musejí být zároveň navrženy tak, aby nedošlo k jejich poškození při namáhání provozním zatížením.

Problematika první možnosti spočívala v nalezení vhodného řešení, kde je princip tepelného izolantu realizován takovým způsobem, že díl s nízkým součinitelem tepelné vodivosti (řádově $\lambda = 10^{-2} \div 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je schopen přenášet provozní zatížení z příruby dynamometru na kloubový hřídel. Součástí, kterou je možné tyto podmínky splnit, je pružná spojka, jež se skládá z kovových částí, mezi kterými je vložen pryžový element, viz obrázek 65, který by splňoval funkci tepelného izolantu.



Obrázek 65: Pružná spojka s pryžovým elementem [28]

Spojení kloubového hřídele s přírubami dynamometrů by bylo následně realizováno přes pružné spojky, speciálně upravenými pro dosažení připojovací kompatibility s danými díly. Tento způsob řešení byl již ve fázi návrhu zamítnut, neboť nevýhoda tohoto řešení spočívá v principu samotné spojky, kde pružnost pryžového elementu lze formulovat jako sférický kloub, který zvyšuje celkový počet stupňů volnosti systému a soustava je poté méně odolná vůči kmitání, viz obrázek 66.



Obrázek 66: Zvýšení stupňů volnosti systému použitím pružných spojek

Řešení druhého způsobu spočívá v nalezení vhodného materiálu, který disponuje nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti λ a zároveň vysokou mezí pevnosti v tahu R_m . Východí hodnoty v průběhu rešerše byly $\lambda = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a $R_m = 500 \text{ MPa}$, jenž jsou obvyklé u uhlíkatých a nízkolegovaných ocelí.

Materiálem s velmi nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti a zároveň vysokou mezí pevnosti v tahu je sloučenina titanu Ti-6Al-4V s hodnotami $\lambda = 6,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a $R_m = 900 \text{ MPa}$, která by byla pro tuto aplikaci velice vhodná. Velkou nevýhodou této slitiny je však pořizovací cena polotovaru, kde se nákupní cena pohybuje v rozmezí 1 500 až 2 000 Kč za kilogram.

S podobnými vlastnostmi a zároveň mnohem nižší cenou existuje varianta, kdy se použije materiál ze skupiny korozi-vzdorných ocelí. Tato vysocelegovaná ocel je pro požadovaný úkol výbornou volbou, neboť vysoký obsah legujících prvků výrazně snižuje součinitel tepelné vodivosti a zároveň ponechává materiálu vysokou mez pevnosti v tahu. Pro konkrétní aplikaci byla vybrána austenitická ocel „automatová nerez“ 1.4305 (ČSN 17 243, AISI 303) s hodnotami $\lambda = 16,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a $R_m = 500 \div 750 \text{ MPa}$ a pořizovací cenou v rozmezí 100 až 200 Kč za kilogram.

Material	Thermal conductivity (W/m°C)		
	At 25°C	At 125°C	At 225°C
Iron	80	68	60
Low carbon steel	54	51	47
Stainless steel	16	17,5	19
Tungsten	180	160	150
Platinum	70	71	72
Aluminium	250	255	250
Gold	310	312	310
Silver	420	418	415
Copper	401	400	398

Obrázek 67: Součinitele vybraných kovových materiálů [29]

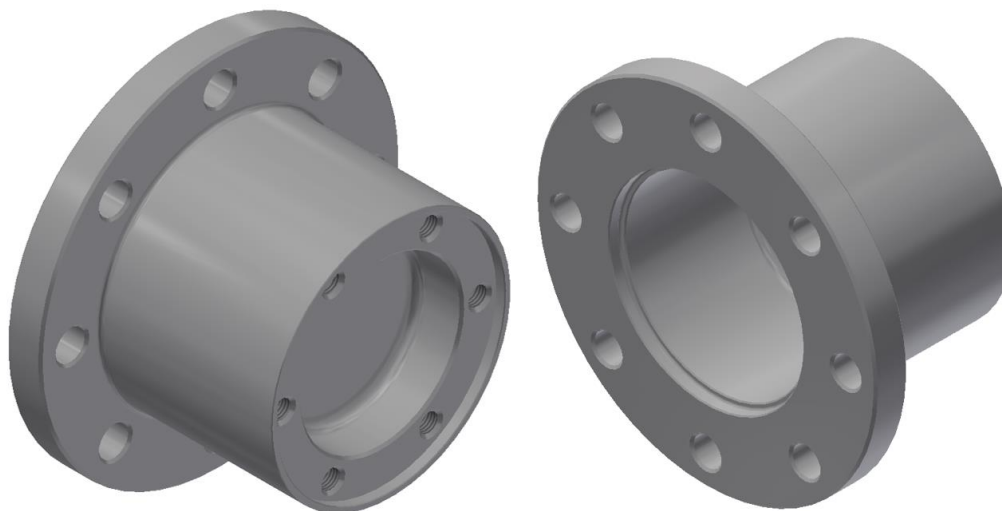
7.2 Fáze 2 – návrh nových propojovacích dílů

Druhá možnost, jak snížit množství tepla prošlého dílem za čas τ , je zeslabení průřezů a zároveň prodloužení součástky, viz vzorec 11. V kontextu s touto závěrečnou prací lze problematiku vyřešit nahrazením stávajících propojovacích dílů, viz obrázky 19 a 20, novými součástmi, které budou prodlouženy v osovém směru a jejich průřez kolmý na stejnou osu bude zmenšen. Touto změnou se docílí zvětšení vzdálenosti mezi homokinetickými klouby a přírubami dynamometrů a menšího průřezu, jímž může procházet vznikající teplo.

Při návrhu součástí je nutné dimenzovat nové díly na provozní zatížení působící v průběhu experimentálních zkoušek a zároveň musejí zajistit pevné spojení kloubového hřídele s dynamometry.

7.2.1 Spojovací díl – strana rozvodovka

Prvním navrženým dílem v této kapitole se stala kovová součást, viz obrázek 68, spojující kloubový hřídel s třífázovým asynchronním dynamometrem ASD S200, což reprezentuje propojení kloubového hřídele s rozvodovkou vozidla (podrobný výkres součásti je přiložen jako příloha závěrečné práce).



Obrázek 68: Příruba pro kloubový hřídel – strana rozvodovka

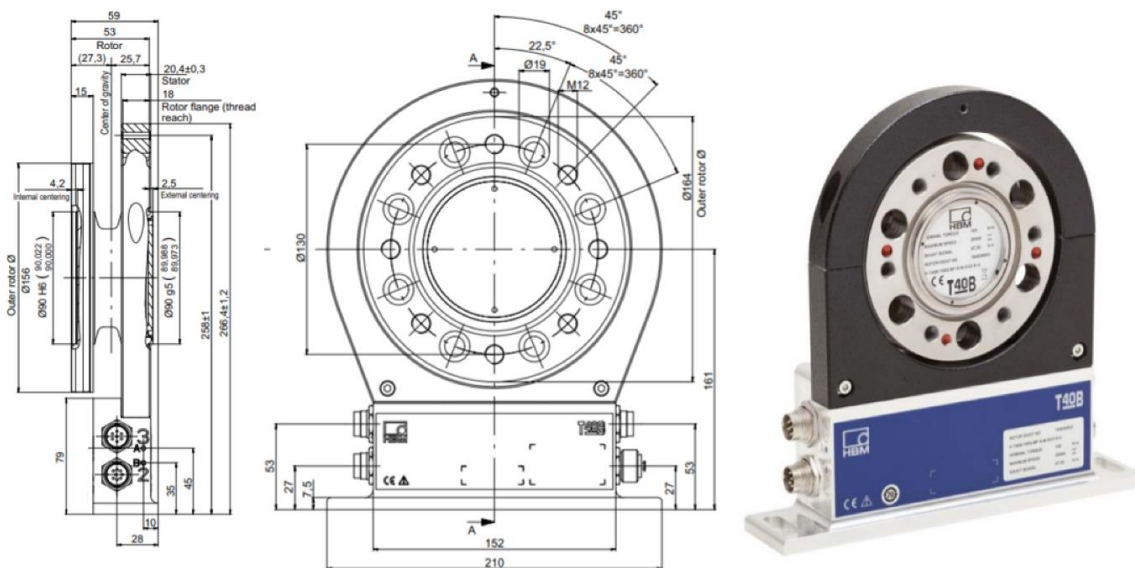
Propojení navrženého dílu s kloubovým hřídelem je řešeno třecím přírubovým spojem realizovaným rovinnou plochou opatřenou šesti díry se závity M8 na průměru $d = 86 \text{ mm}$, ke které se šrouby přitlačí čelní plocha kloubového hřídele, viz obrázek 69. Ke středění součástí je použit vnitřní průměr $D = 100 \text{ mm}$. Použité připojovací rozměry byly zvoleny tak, aby korespondovali s používanými kloubovými hřídeli. Součást musela být také poupravena

z důvodu zalamování kloubového hřídele, kdy při tomto ději dochází ke složité kinematice jednotlivých dílů homokinetického kloubu, jejíž důsledkem je výběh některých prvků mimo základní profil. Z tohoto důvodu byl v čelní ploše součásti vybrán materiál na průměru 70 mm o hloubce 20 mm , pokud by byl díl vyroben bez vybrání, nebylo by možné zalomit kloubový hřídel. Samotné vybrání je zakončeno přepážkou, která brání úniku maziva do okolního prostředí.



Obrázek 69: Propojení kloubového hřídele – strana rozvodovka

Opačná strana součásti je navržena na propojení dílu s dynamometrem, kde bylo cíle dosaženo opět třecím spojem, tentokrát realizovaným osmi šrouby M12 na průměru $D = 130\text{ mm}$, které spojují přírubu s momentovým snímačem HBM T40B, jimž je hřídel dynamometru ASD S200 v současné době zakončena, viz obrázek 69. Ke středění je v tomto případě použit vnitřní průměr $d = 90\text{ mm}$. Připojovací rozměry jsou voleny tak, aby korespondovali s připojovacími rozměry snímače HBM T40B, viz obrázek 70.



Obrázek 70: Momentový snímač HBM T40B jímž je zakončen hřídel dynamometru ASD S200 [32]

Splnění návrhových podmínek, tedy prodloužení součástky v osovém směru a zároveň zmenšení obsahu průřezu, je dosaženo částí dílu, která spojuje přípojovací části součásti, připomínající válcovou trubku o průměru $d = 105 \text{ mm}$ s tloušťkou stěny 10 mm .

7.2.1.1 Pevnostní analýza navrženého dílu [1]

Jednou z nejdůležitějších částí procesu návrhu nového dílu je kontrola, zdali nedojde k poškození součásti při maximálním možném provozním zatížení. K dosažení cíle se využívá pevnostní analýza dílu, ke které byl použit v této závěrečné práci program Workbench 2019 R2 fungující na principu metody konečných prvků (MKP) od společnosti Ansys Inc. Jeho výhodou je založena ve snadném importu geometrie modelu z různých CAD programů a velké uživatelské podpoře.

První krok samotného výpočtu vždy spočívá v určení konkrétního zátěžného stavu, jenž odpovídá největším působícím silám v soustavě. V kontextu testování kloubových hřídelů na zkušebním stavu v laboratořích na Julisce dochází k této situaci v okamžiku, kdy asynchronní dynamometr ASD S200 dodává do systému maximální kroutící moment $M_{krut} = 1375 \text{ N} \cdot \text{m}$ a úhel mezi osami dynamometrů a osou střední části kloubového hřídele je $\alpha = 15^\circ$, zalomením hřídele vzniká v soustavě přídatný ohybový moment. Velikost ohybového momentu lze určit upravením výpočetního vztahu ze skript: Převodová ústrojí motorových vozidel – Kloubové hřídele; strana 29, viz příloha závěrečné práce, kde jsou zobrazeny vztahy potřebné k výpočtu radiálního zatížení ložisek uložené stejnoběžných kloubových hřídelů. Konfigurace zkušebního stanoviště zajišťuje rovnost úhlů α_1 a α_2 , čímž se

zjednoduší výpočetní vztah k určení sil A a B [$A = B = \frac{M_d}{a} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$]. Tato dvojice sil vytváří moment, který velikostí odpovídá přídavnému ohybovému momentu M_{ohyb} .

$$M_{ohyb} = M_{krut} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 1\,375 \cdot \tan\left(\frac{15}{2}\right) = 181,02 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

Model

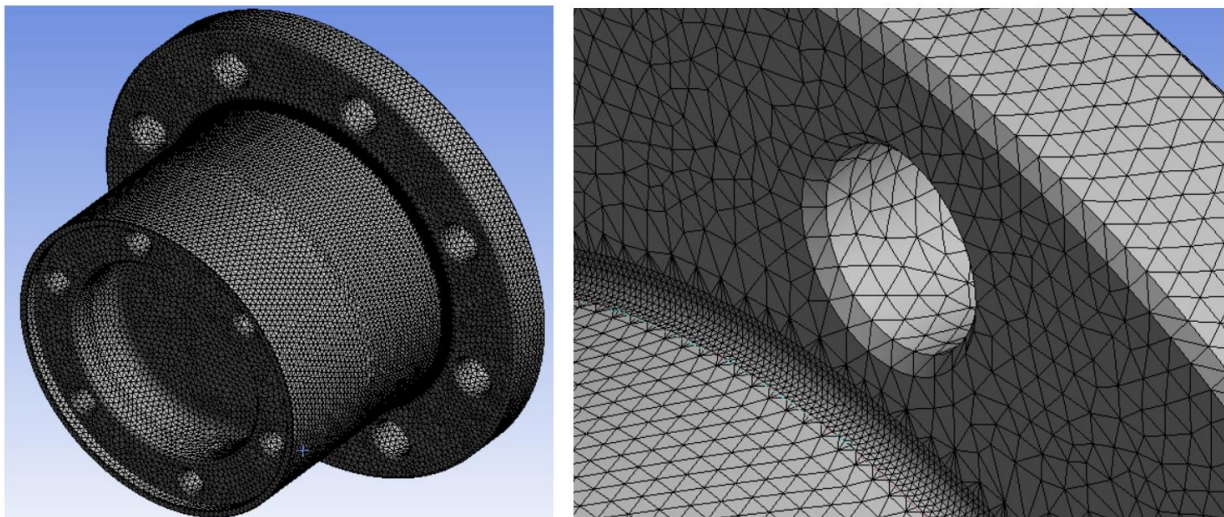
Druhý krok pevnostní analýzy spočívá v importu modelu součásti do MKP programu a v definování potřebných vlastností používaného korozivzdorného materiálu, viz obrázek 71.

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	8030	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	1,93E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6083E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,4231E+10	Pa

Obrázek 71: Vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4305 potřebné pro pevnostní analýzu

Sítování

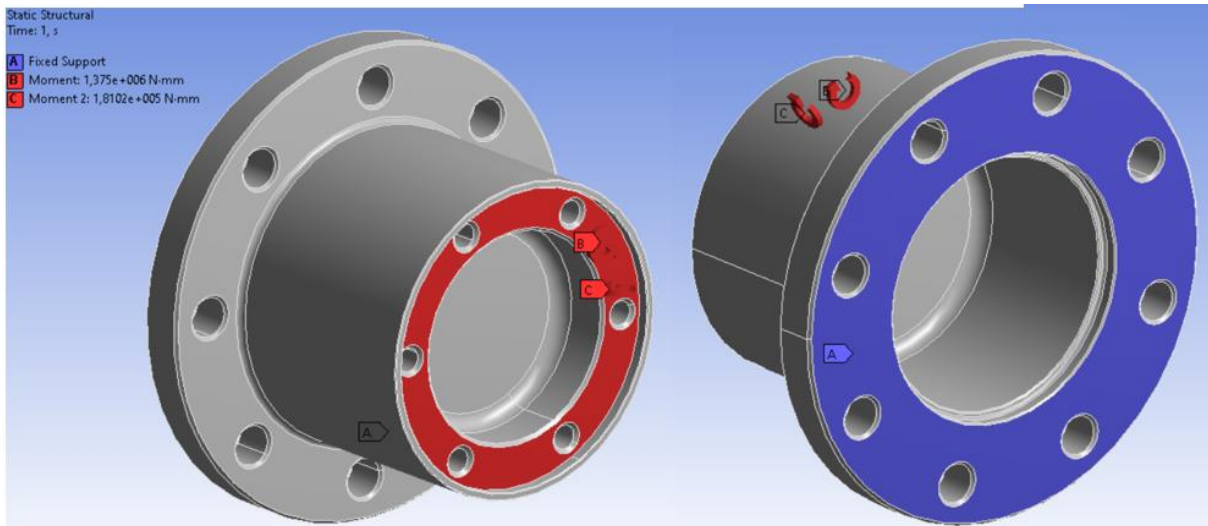
Třetí krok procesu je věnován sítování modelu součástky, viz obrázek 72. Element sítování byl vybrán typ „tetrahedrons“ o velikosti 2 mm. Na zaoblení R2 nacházející se v místě, kde přechází díl z průměru $d = 105 \text{ mm}$ na průměr $D = 158 \text{ mm}$ byla použita funkce „face sizing“, která zmenší velikost elementu sítování na 0,5 mm, neboť je toto místo očekávaným koncentrátorem napětí a ponechání dvou milimetrového elementu by z nepřesnilo výsledky.



Obrázek 72: Sítování modelu příruby

Okrajové podmínky

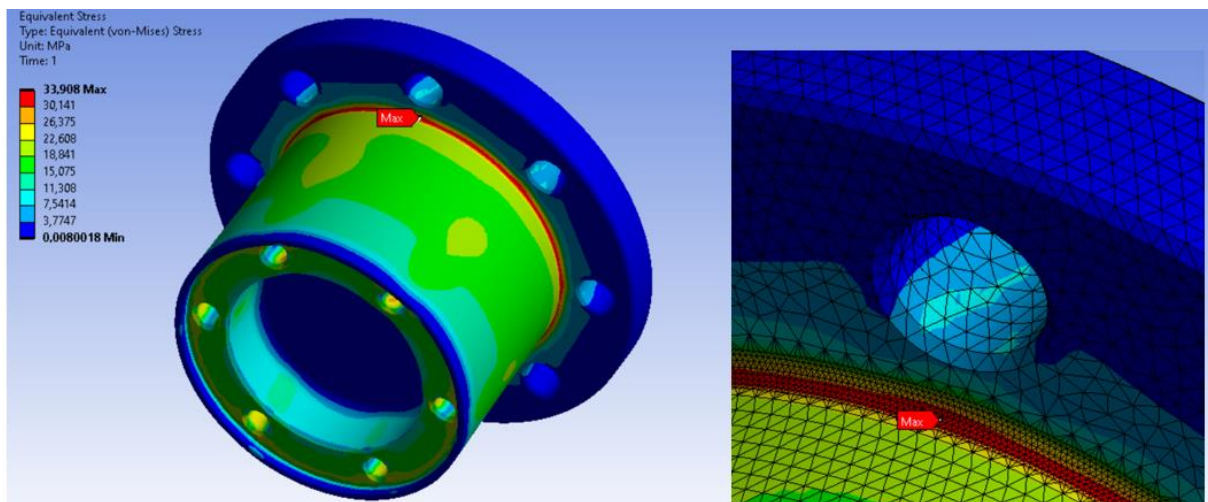
Posledním krokem výpočtu je nadefinování okrajových podmínek MKP modelu. Na uložení příruby byla použita funkce „fixed support“, která byla přiřazena ploše čelící momentovému snímači HBM T40B a reprezentuje připojení dílu k dynamometru. Dále jsou na plochu čelící kloubovému hřídeli zavedeny momenty $M_{krut} = 1\,375\text{ N}\cdot\text{m}$ a $M_{ohyb} = 181,02\text{ N}\cdot\text{m}$ simulující provozní zatížení.



Obrázek 73: Okrajové podmínky pevnostní analýzy

Výsledek pevnostní analýzy

Výsledné maximální napětí podle hypotézy HMH má hodnotu $\sigma_{max} = 36,08\text{ MPa}$ a dle očekávání se nachází na zaoblení velikosti R2, viz obrázek 74. Porovnáním s hodnotou meze únavy korozivzdorné oceli 1.4305 [33] $\sigma_c = 240\text{ MPa}$, vychází bezpečnost $k = 6,65$.



Obrázek 74: Výsledek pevnostní analýzy – napětí dle hypotézy HMH

7.2.1.2 Teplotní analýza navrženého dílu

Po provedení pevnostní analýzy a verifikaci, že navržený díl je dostatečně dimenzován ke svému účelu, lze přistoupit k dalšímu tématu, jímž je teplotní analýza navržené součástky. K úkolu je opět využita aplikace Workbench 2019 R2 od firmy Ansys Inc, kde se tentokrát použil analytický systém „Transient Thermal“, jenž je schopný počítat průběhy teplot na dílu v definovaném čase.

Pro účely této závěrečné práce je samotná aplikace využita k porovnání teplotního chování nově navrženého dílu a součástí předchozího řešení, kdy je zanedbána přirozená a nucená konvekce tepla (tyto podmínky se v průběhu jednotlivých zkoušek mění v závislosti na konkrétní simulované rychlosti proudícího vzduchu ve ventilační trati) a změna teploty v čase je realizována pouze kondukcí tepla. Srovnání výsledků obou simulací prokáže, jak moc se proces vedení tepla do hřidelů dynamometrů omezil.

7.2.1.2.1 Teplotní analýza příruby předchozího řešení

Model

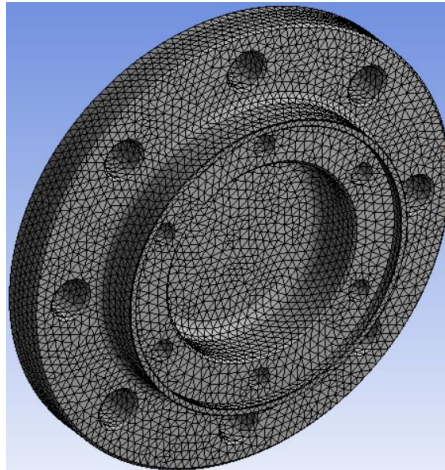
Proces tvorby modelu je u teplotní analýzy stejný, jako u předešlého případu. Základem je importování modelu příruby, jejíž tvar byl pro výpočet zjednodušen a nadefinování parametrů potřebných k výpočtu.

	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Thermal Conductivity	50	W m ⁻¹ K ⁻¹	
5	Specific Heat, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Obrázek 75: Vlastnosti materiálu příruby přechozího řešení potřebné pro teplotní analýzu

Sítování

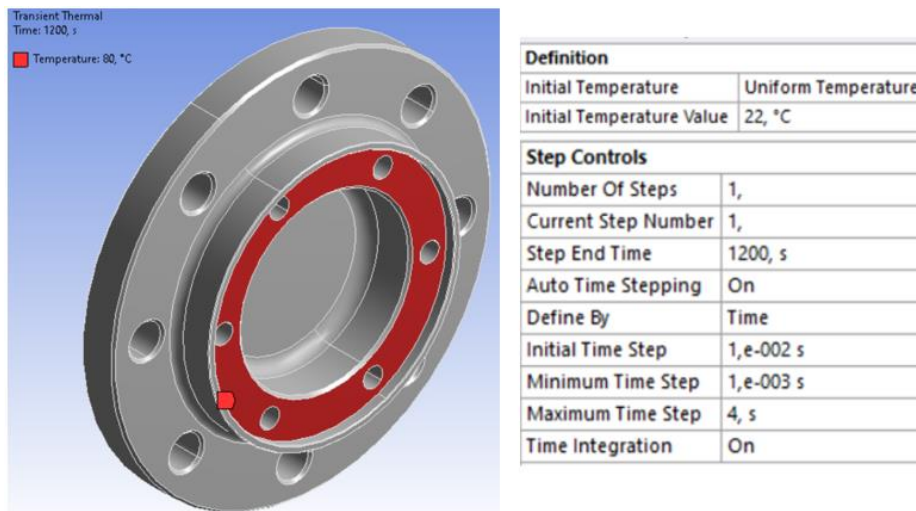
V metodě sítování modelu byl vybrán typ elementu „tetrahedrons“ tentokrát o velikosti prvku 3 mm. Výběr velikosti a typu elementu byl realizován na základě porovnání výsledků několika kratších simulací s rozdílnými sítěmi, aby se zamezilo nepřesnostem použitím chybně nastavené sítě.



Obrázek 76: Síťování modelu příruby přechozího řešení

Okrajové podmínky

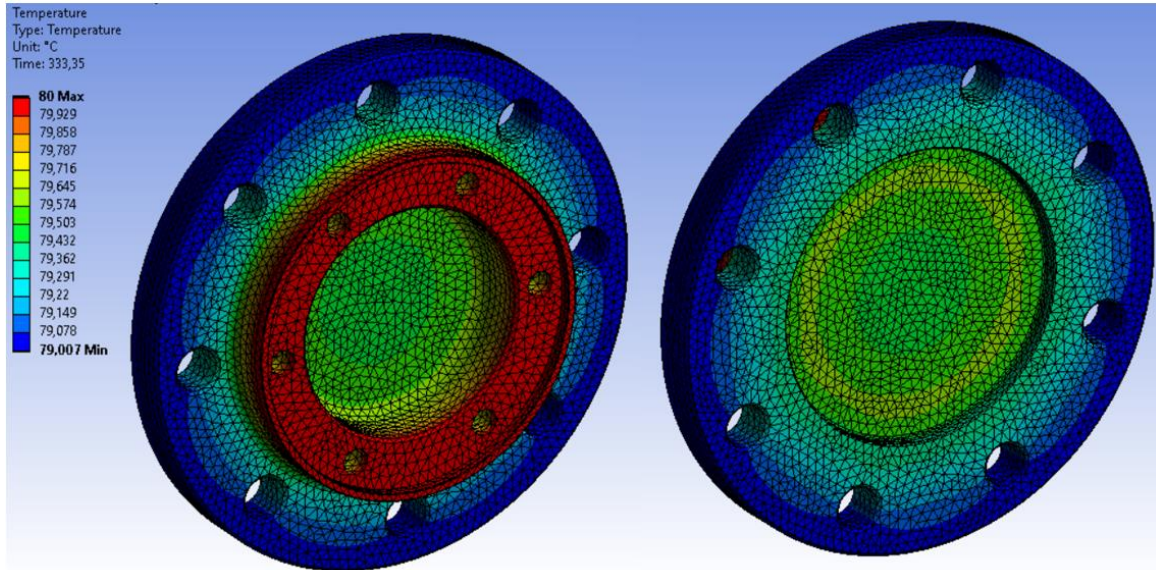
K uskutečnění výpočtu v analytickém systému „Transient Thermal“ je potřebné nadefinovat počáteční teplotu součásti, jenž odpovídá teplotě vzduchu v laboratořích, a ve „Step Controls“ nastavit, jak dlouho má výpočet probíhat v simulačním čase. Délka simulace byla zvolena tak, aby odpovídala délce testování kloubových hřídelí na zkušebním stavu v laboratořích. V modelu je také definována teplota čelní plochy, která přichází do kontaktu s kloubovým hřídelem a simuluje připojení zahřátého homokinetického kloubu, ve kterém v průběhu prováděného testu na zkušebním stanovišti vzniká teplo disipací energie.



Obrázek 77: Okrajové podmínky teplotní analýzy – příruba předchozího řešení

Výsledek teplotní analýzy

Z obrázku 78 lze vidět, že teplo se dílem šíří velice rychle a již po 333 sekundách je rozdíl maximální a minimální teploty menší než 1 °C.



Obrázek 78: Výsledek teplotní analýzy příruby přechozího řešení

7.2.1.2.2 Teplotní analýza nově navrženého dílu

Model

Sestavení modelu je opět dosaženo importováním step souboru do prostředí MKP programu a následným nadefinováním vlastností korozivzdorné oceli.

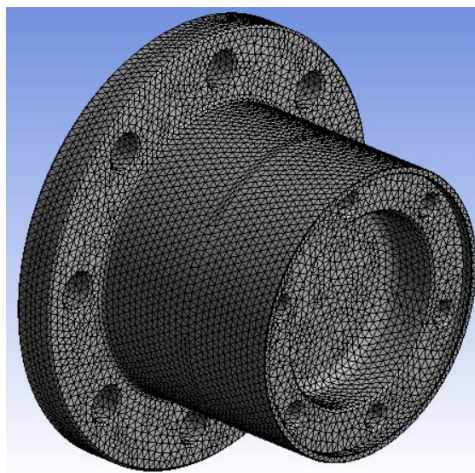
	A	B	C		A	B
1	Property	Value	Unit		1	Temperature (C)
2	Material Field Variables	Table			2	20
3	Density	8030	kg m ⁻³		3	100
4	Isotropic Thermal Conductivity	16,3	W m ⁻¹ C ⁻¹			
5	Specific Heat, C _p	Tabular				

	A	B
1	Temperature (C)	Specific Heat (J kg ⁻¹ C ⁻¹)
2	20	440
3	100	480

Obrázek 79: Vlastnosti materiálu nově navržené příruby potřebné pro teplotní analýzu

Sítování

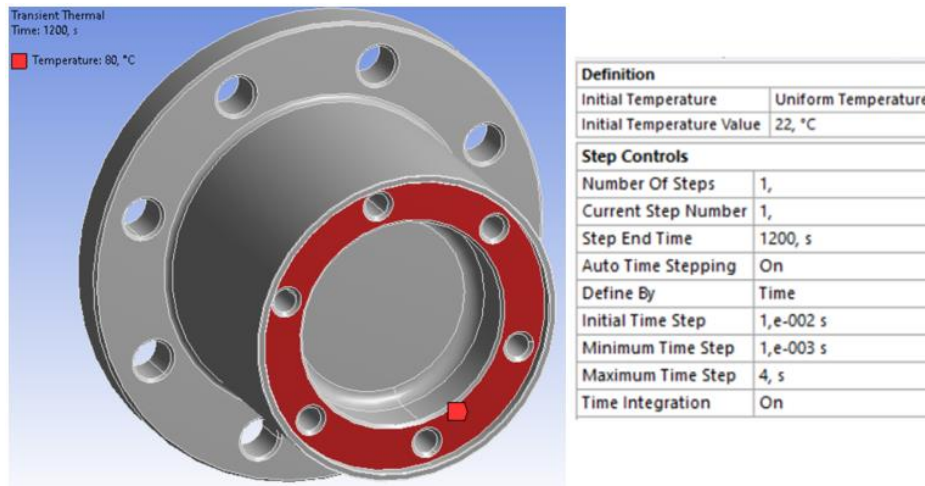
Problematika sítování byla vyřešena stejným způsobem jako u přechozího případu, tedy elementy typu „tetrahedrons“ o velikosti 3 mm.



Obrázek 80: Síť nově navržené příruby

Okrajové podmínky

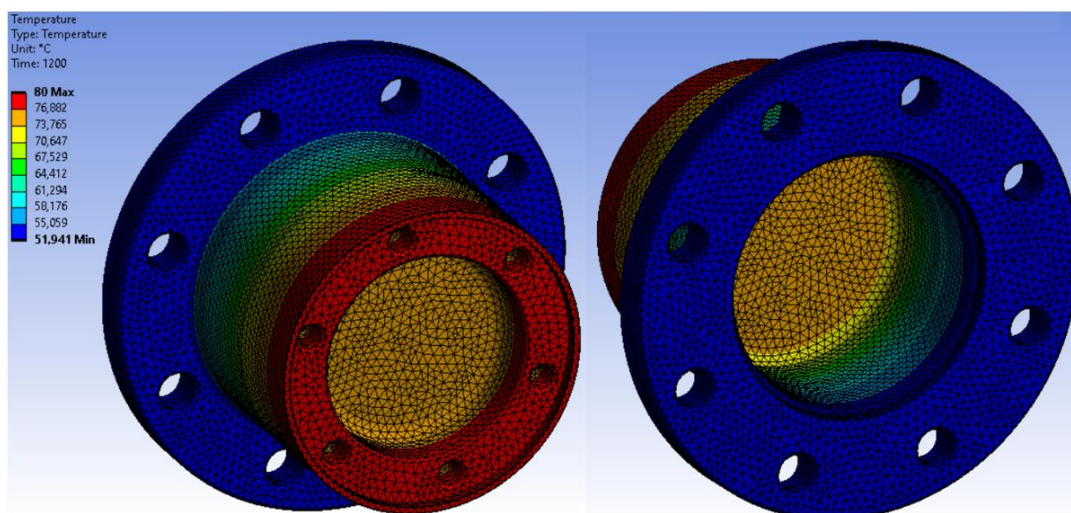
Jak již bylo dříve napsáno, analytický systém „Transient Thermal“ je používán pro porovnávání výsledků různých simulací se stejnými počátečními podmínkami, a proto i u tohoto modelu jsou okrajové podmínky shodné s přechozím případem.



Obrázek 81: Okrajové podmínky teplotní analýzy – nově navržená příruba

Výsledky teplotní analýzy

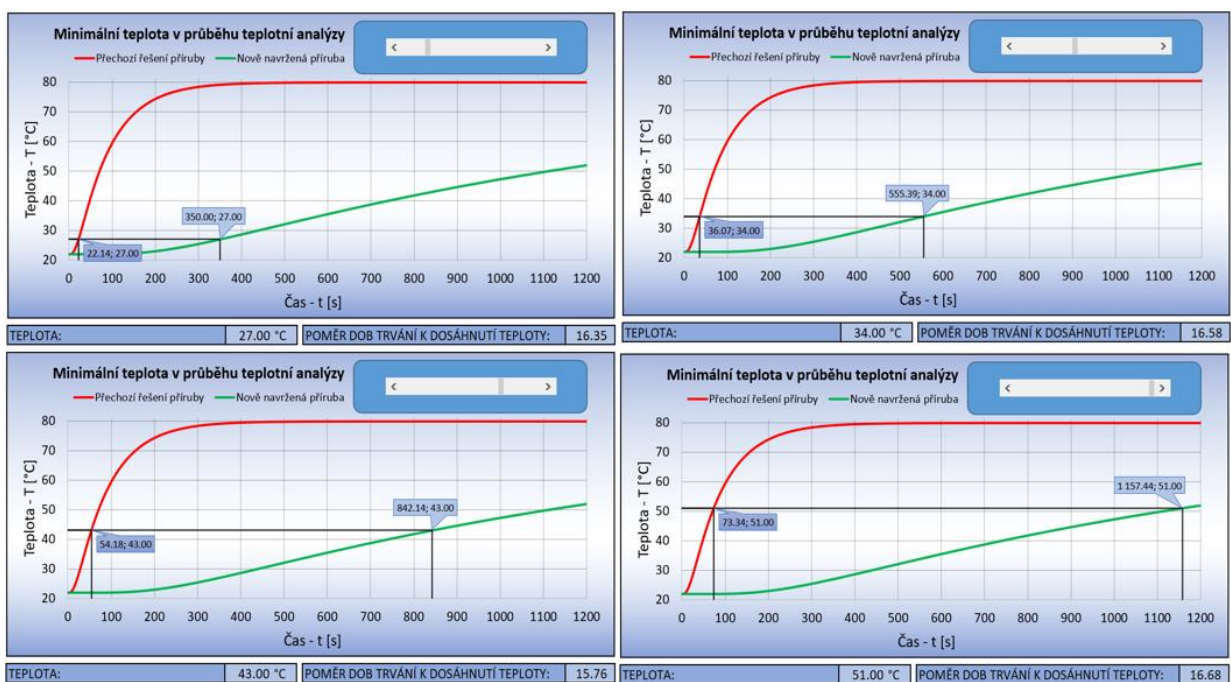
Po prozkoumání výsledků zobrazených na obrázku 82 je na první pohled patrné, že teplo se dílem šíří mnohem pomaleji než u předchozího případu, neboť rozdíl maximální a minimální teploty je 28 °C po 1200 sekundách.



Obrázek 82: Výsledek teplotní analýzy – nově navržená příruba

Porovnání výsledků simulací je možné pozorovat na obrázku 83, kde lze vidět grafy zobrazující průběh minimální teploty na obou přírubách v čase. Z grafů lze také určit poměr dob trvání potřebných k dosažení určité minimální teploty. Na základě vypočítaných hodnot

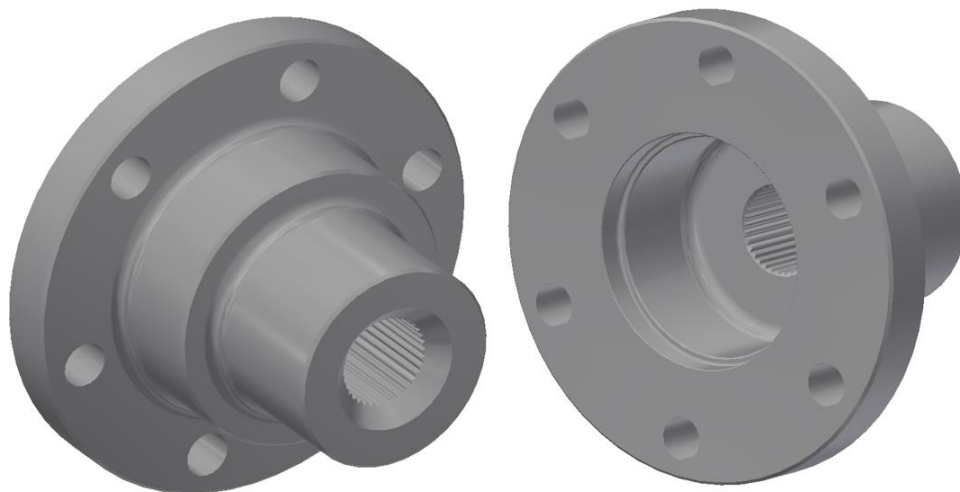
Ize usoudit, že v průběhu simulace, po překročení části grafu s dopravním zpožděním, nově navržená příruba vykazuje přibližně 15 až 18 krát lepší izolační vlastnosti než součást přechozího řešení. Tato vlastnost je vylepšena skutečností spojenou s prostupem tepla z přírub do hřídele dynamometrů, kdy teploty na ploše čelící dynamometru ASD S200 u nové příruby jsou téměř stejné, naopak je tomu u dílu přechozího řešení, kdy je minimální teplota pouze na okrajové části plochy a směrem ke střední ose roste, viz obrázky 78 a 82. Schopnost snížit vedení tepla do hřídele dynamometru je u nové příruby ještě navýšena větším celkovým povrchem dílu, kdy v průběhu skutečné zkoušky dochází k přirozené a nucené konvekci tepla, jejíž vliv se rostoucím povrchem zvětšuje.



Obrázek 83: Průběh minimální teploty na přírubách v čase

7.2.2 Spojovací díl – strana pneumatika

Druhým navrženým dílem v této kapitole se stala ocelová příruba, viz obrázek 84, spojující drážkovanou část kloubového hřídele se stejnsměrným dynamometrem SDS 200, což reprezentuje propojení kloubového hřídele s kolovou jednotkou vozidla (podrobný výkres dílu je přiložen jako příloha závěrečné práce).



Obrázek 84: Příruba pro kloubový hřídel – strana pneumatika

Propojení navržené součásti s kloubovým hřídelem je řešeno tvarovým spojem realizovaným speciálně vyrobeným drážkováním v přírubě, které přesně zapadá do drážkování vytvořeného na hřídeli, středění součástí je dosaženo boky zubů. Axiální zajištění dílů zprostředkovává šroubový spoj, jenž je tvořený volnou maticí s podložkou a závitem M20x1,5 vyrobeným na kloubovém hřídeli.

Tvar opačné strany součásti je navržen na propojení dílu s dynamometrem. Cíle je dosaženo třecím přírubovým spojem, realizovaným šesti šrouby M14 na průměru $D = 121,5 \text{ mm}$. Ke středění je použit vnitřní průměr $d = 75 \text{ mm}$. Připojovací rozměry jsou voleny tak, aby korespondovali s připojovacími rozměry příruby hřídele dynamometru SDS 200.



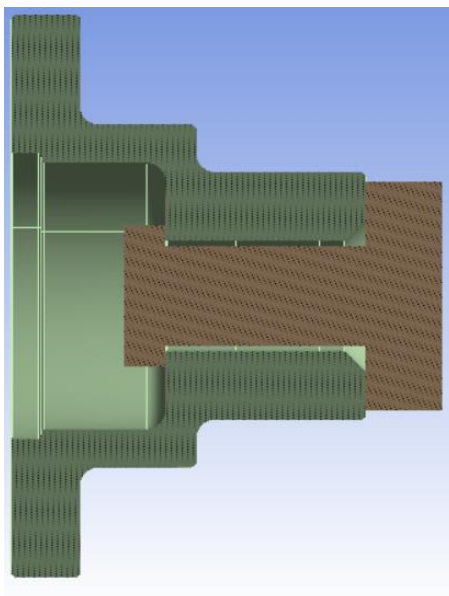
Obrázek 85: Propojení kloubového hřídele – strana pneumatika

Spojení přípojovacích částí součásti je realizováno segmentem dílu připomínající válcovou trubku o průměru $d = 90 \text{ mm}$ s tloušťkou stěny 10 mm , jejíž rozměry jsou voleny tak, aby izolační vlastnosti obou navržených přírub byly obdobné.

7.2.2.1 Pevnostní analýza navrženého dílu

Model

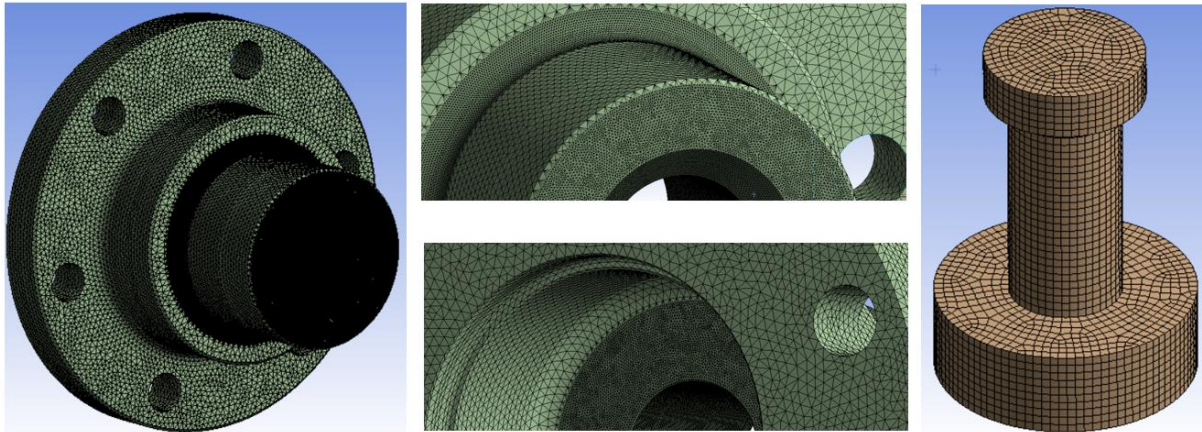
Importovaný model nově navržené příruby byl z hlediska náročnosti výpočtu a tvorby sítě zjednodušen, kde byl komplikovaný tvar vytvořeného drážkování nahrazen válcovou dírou, jejíž průměr je shodný s průměrem patní kružnice drážkování. Vlastnosti korozivzdorné oceli byly převzaty z předešlé simulace. Do modelu byl také vložen zjednodušený díl představující šroubový spoj, přes který je do simulace vložena okrajová podmínka reprezentující předpětí šroubu.



Obrázek 86: Řez modelem pevnostní analýzy příruby

Sítování

Globálním elementem sítování příruby byl opět vybrán typ „tetrahedrons“ o velikosti 2 mm , který byl na předpokládaných místech výskytu maxima napětí a na působištích okrajových podmínek zjemněn pomocí funkce „face sizing“ na velikost $0,5 \text{ mm}$, viz obrázek 87. K sítování modelu šroubového spoje byla využita metoda sítování „multizone“ o velikosti elementů 2 mm , která preferuje elementy typu „hexahedron“ tam, kde je to možné a poté vyplní složitější části dílu nestrukturovanými elementy. Použitím této metody sítování bylo dosaženo velmi kvalitní sítě.



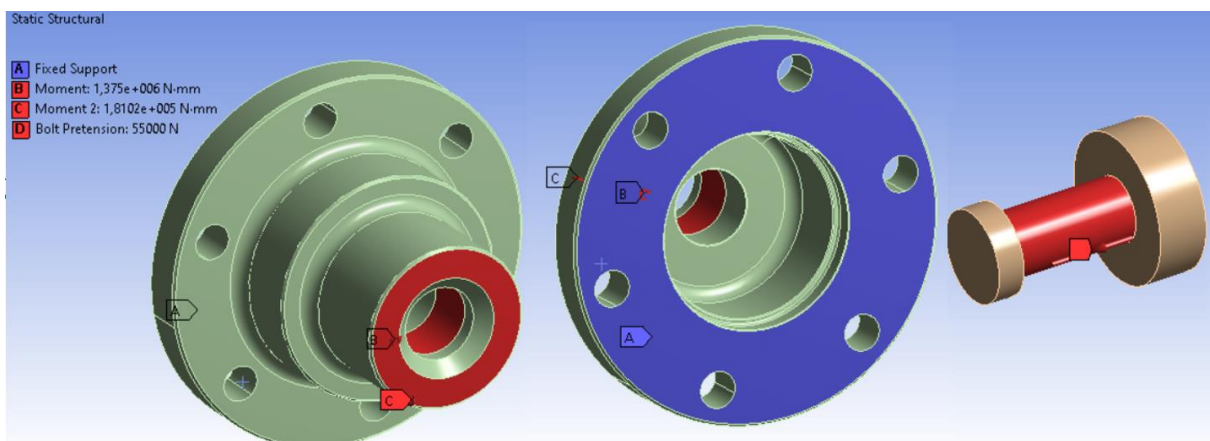
Obrázek 87: Síťování modelu pevnostní analýzy

Okrajové podmínky

K zavedení okrajových podmínek (zátěžných momentů) do simulačního modelu bylo využito ploch, na kterých dochází ke styku kloubového hřídele s nově navrženou přírubou. Prvním zástupcem této kategorie je přesně definovaná plocha, která odpovídá funkční délce drážkování, kde dochází k přenosu kroutícího momentu, a proto zde byl umístěn kroutící moment $M_{krut} = 1\,375\text{ N} \cdot \text{m}$. Druhou plochou, kam byl zaveden ohybový moment $M_{ohyb} = 181,02\text{ N} \cdot \text{m}$, se stala plocha čelící homokinetickému kloubu, viz obrázek 88, (obdobu předešlé pevnostní analýzy).

Do simulačního výpočtu bylo také zavedeno předpětí ze šroubového spoje o velikosti $F = 55\text{ kN}$, které odpovídá utahovacímu momentu $200\text{ N} \cdot \text{m}$ [34], tvořeného závitem M20x1,5 a šestihrannou maticí, neboť (na rozdíl od předešlé simulace) očekávané místo koncentrace napětí leží poblíž zóny ovlivněné předpětím tohoto spoje.

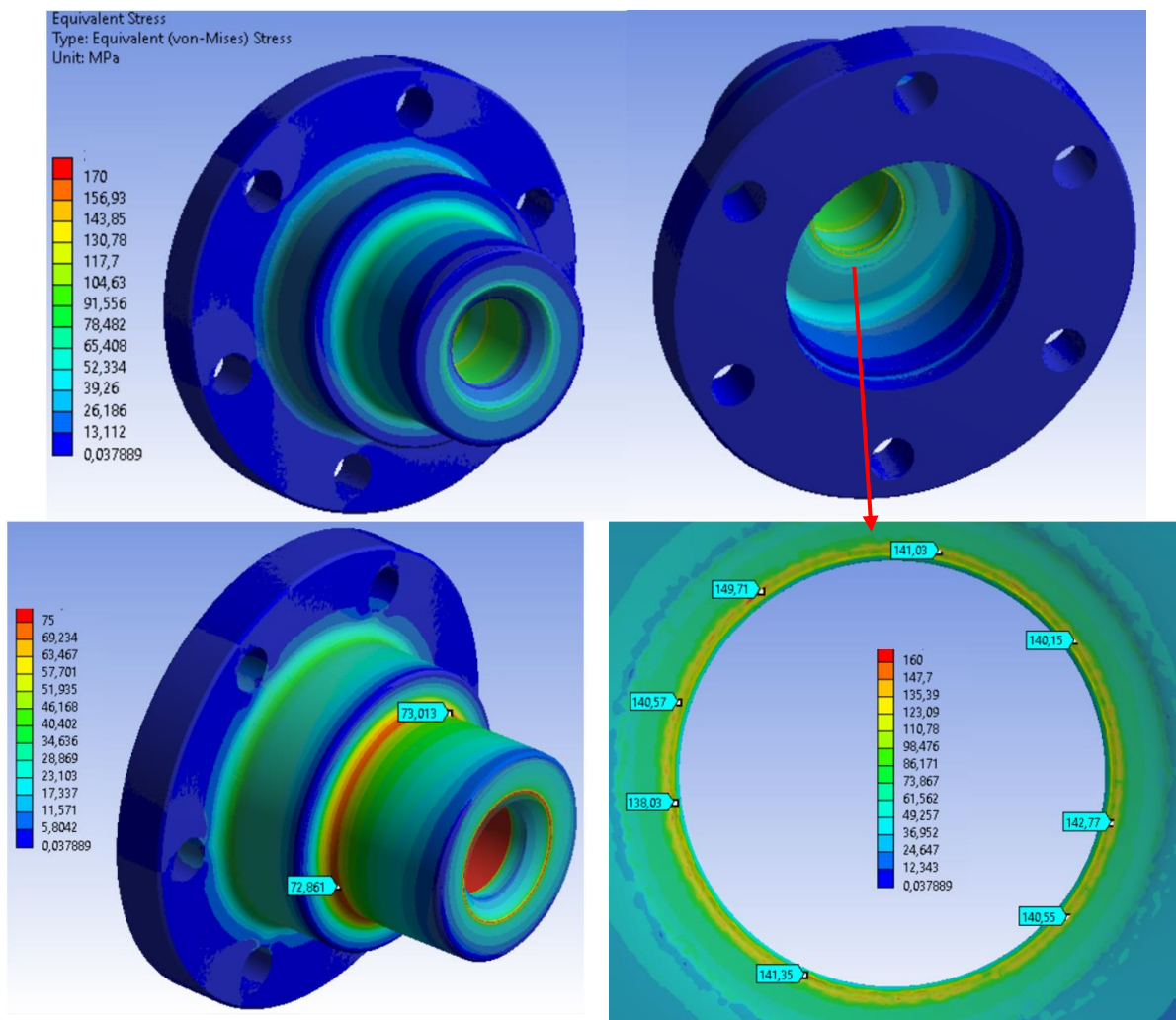
K uložení součástky je opět použita funkce „fixed support“, která je přiřazena ploše čelící dynamometru SDS 200.



Obrázek 88: Okrajové podmínky pevnostní analýzy příruby – strana pneumatika

Výsledek pevnostní analýzy

Výsledky pevnostní analýzy, které je možné vidět na obrázku 89, lze pro lepší porozumění rozdělit do dvou kategorií. První skupina, kde se maximální hodnoty napětí pohybují mezi $120 \div 150 \text{ MPa}$, viz pravá spodní část obrázku, je tvořena výsledky, jejichž vznik je spjatý s předpětím šroubového spoje a v průběhu zkoušky je lze považovat za konstantní. Druhou kategorií je možné přiřadit výsledkům, jejichž vznik je ovlivněn nejen předpětím šroubového spoje, ale zároveň je způsoben ohybovým a kroutícím momentem. Místo, které je těmito zátěžnými silami nejvíce namáháno, je zaoblení R5 na poloměru $d = 65 \text{ mm}$, kde maximální napětí dosahuje hodnoty 73 MPa , viz levá spodní část obrázku. V průběhu zkoušky působí přídavného ohybového momentu rotuje vůči pevnému souřadnicovému systému příruby a dochází tak k periodickému střídání maxima a minima napětí na zaoblení R5, kde je potřeba porovnat maximum napětí s mezí únavy materiálu $\sigma_c = 240 \text{ MPa}$, kdy vychází bezpečnost $k \doteq 3,288$.



Obrázek 89: Výsledky pevnostní analýzy příruby – strana pneumatika

7.2.2.2 Teplotní analýza navrženého dílu

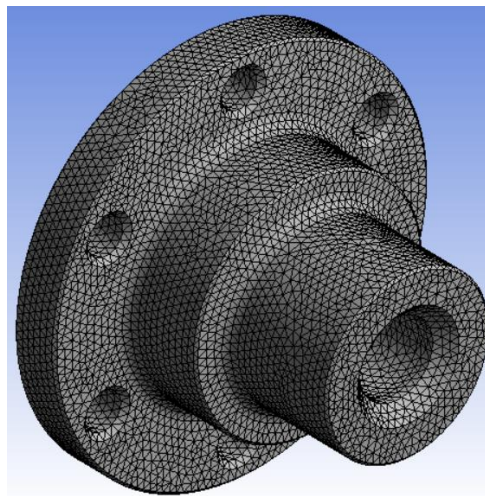
V návrhové fázi tvorby dílu bylo dbáno na skutečnost, aby obě nově navržené příruby měly podobné izolační vlastnosti, čímž se docílí stejného odvodu tepla z obou konců kloubového hřídele a úloha bude symetrická. Cíle je dosaženo, jak již bylo dříve zmíněno, segmentem dílu připomínající válcovou trubku, jejíž délka byla měněna a pomocí simulací v analytickém systému „Transient Thermal“ se sledovala odezva systému na danou změnu. V následující části závěrečné práce bude rozebrána teplotní analýza finální verze příruby.

Model

Z hlediska náročnosti výpočtu a tvorby sítě byl znovu použit zjednodušený model vytvořený pro pevnostní analýzu, kterému byly nadefinovány vlastnosti korozivzdorné oceli potřebné pro teplotní analýzu, viz obrázek 79.

Sítování

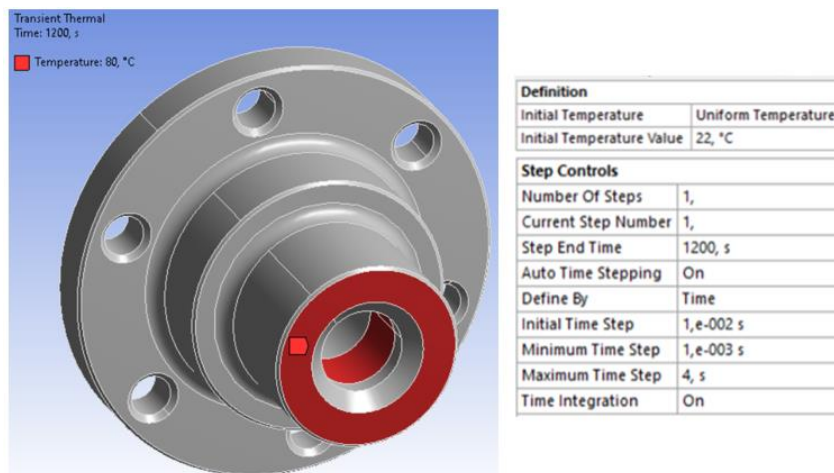
Problematika sítování byla vyřešena stejným způsobem jako u všech již provedených teplotních analýz, tedy použitím globálního elementu typu „tetrahedrons“ o velikosti 3 mm.



Obrázek 90: Sít nově navržené příruby

Okrajové podmínky

Stálá podmínka této diplomové práce, která požaduje shodnost počátečních podmínek u všech provedených teplotních analýz, platí i u této simulace. Rozdíl spočívá pouze v umístění teploty 80°C, reprezentující dotyk ohřátého kloubového hřídele s přírubou *, kde k samotnému styku součástí dochází na ploše reprezentující funkční délku drážkování a čelní ploše příruby, viz obrázek 91.

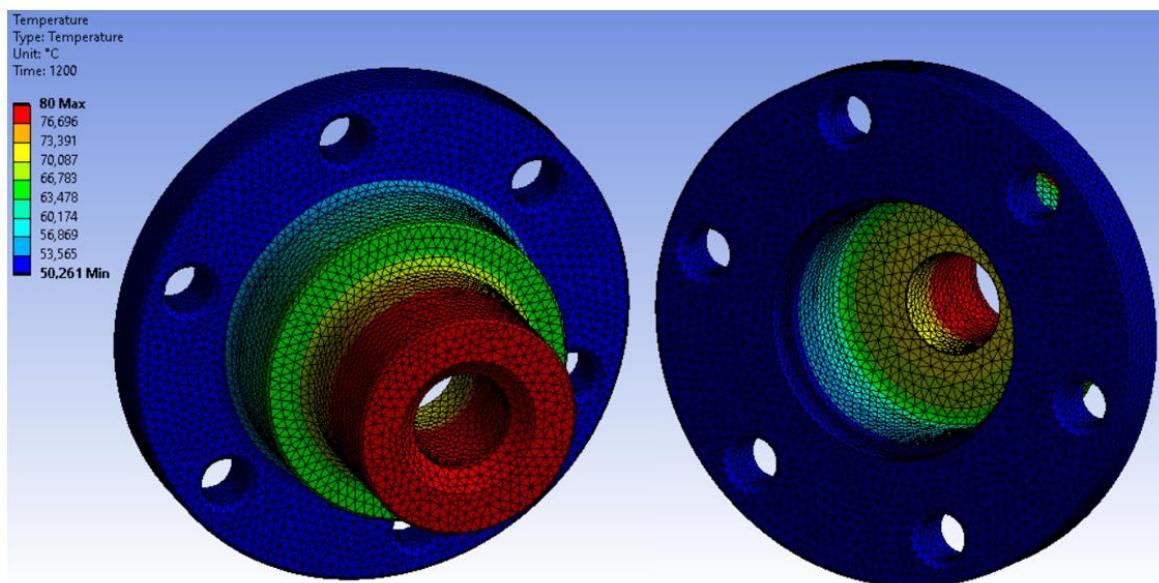


Obrázek 91: Okrajové podmínky – příruba – strana pneumatika

* Pro účely simulace je předpokládáno, že teplota obou kontaktních ploch kloubového hřídele je stejná, z důvodu vysoké hodnoty součinitele tepelné vodivosti materiálu hřídele.

Výsledky teplotní analýzy

Po prozkoumání výsledku zobrazených na obrázku 92 lze vidět, že příruba pro dynamometr SDS 200 má velmi podobné izolační vlastnosti jako příruba spojující kloubový hřídel se strojem ASD S200, neboť rozdíl maximální a minimální teploty je téměř 30 °C po 1200 sekundách. Lepší izolační vlastnosti tohoto dílu byly navrženy z důvodu kompenzace menšího celkového povrchu dílu, který způsobí menší odvod tepla přirozenou a nucenou konvekcí.



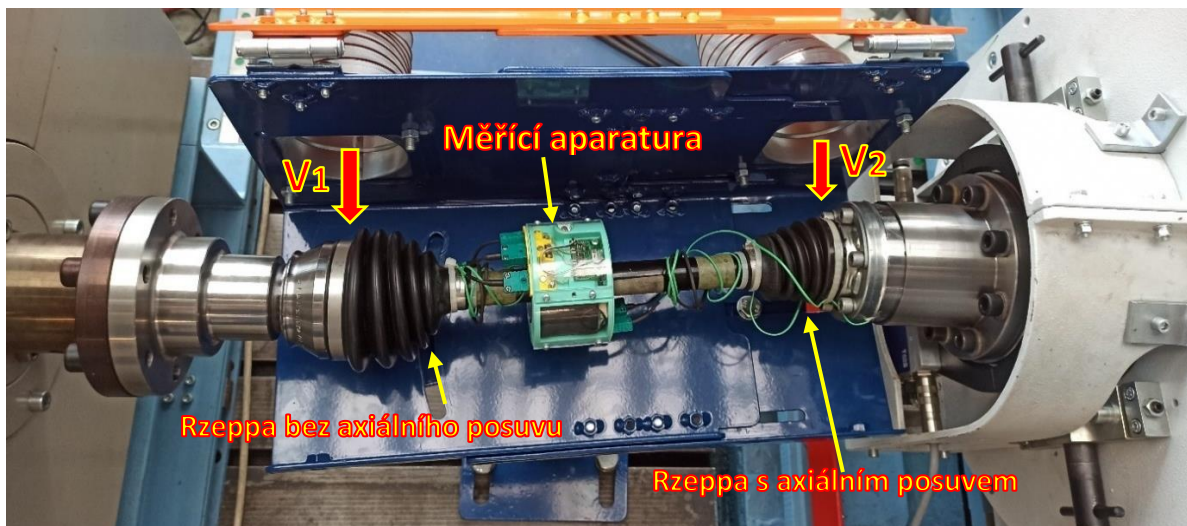
Obrázek 92: Výsledek teplotní analýzy – příruba – strana kolo

8. Kontrolní měření na modernizovaném zkušebním stanovišti

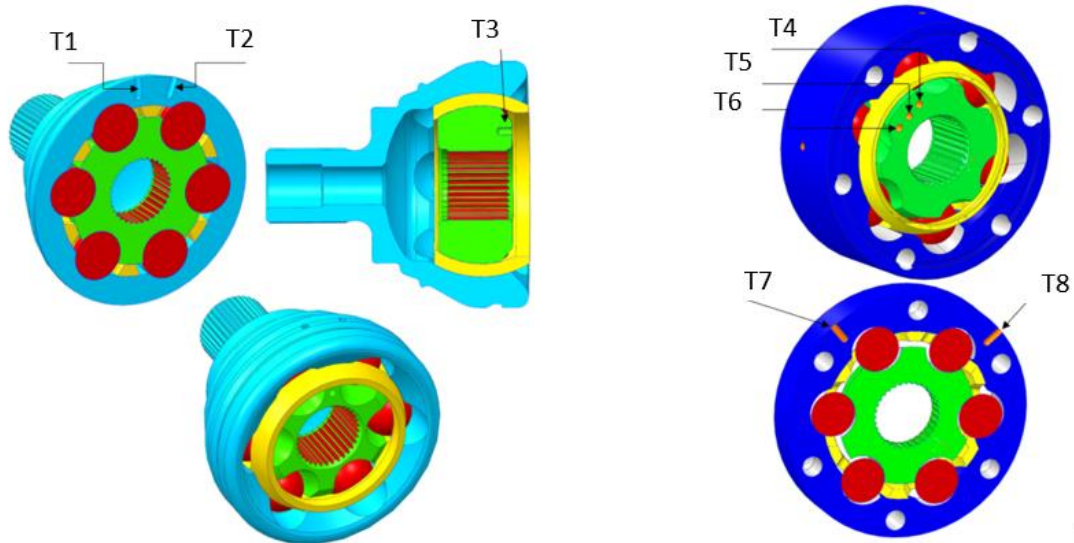
Jedním z cílů této diplomové práce bylo řešení problematiky spjaté s modernizací otevřeného zkušebního stavu pro testování kloubových hřídelů na Julisce, již byly věnovány předešlé kapitoly, kde byly navrženy nové spojovací příruby, ochranný kryt a ventilační trať. Za účelem ověření funkčnosti všech těchto komponent se přešlo k následující fázi projektu, kdy se kloubový hřídel zapojil již do sestaveného modernizovaného stanoviště společně se zapojenou měřicí aparaturou, (která je řešena v diplomové práci „Měřicí aparatura a akvizice dat na zkušebním stanovišti kloubových hřídelů v laboratořích na Julisce“) sloužící pro měření teplot uvnitř homokinetických kloubů a byl naměřen průběh teplot při různém úhlu zalomení kloubového hřídele.

8.1 Konfigurace měření

Na obrázku 93 je možné vidět nově navržené příruby zhotovené z austenitické oceli, které propojují kloubový hřídel s dynamometry ASD S200 a SDS 200 a měřicí aparaturu EHL. Samotný vysílací modul je v této konfiguraci uzpůsoben na spojení se šesti termočlánky přítomnými v homokinetických kloubech, viz obrázek 94.



Obrázek 93: Konfigurace experimentálního měření



Obrázek 94: Umístění tenzometrů v homokinetických kloubech [7]

Parametry zkoušky (zatěžující moment $M_z = 112 \text{ N} \cdot \text{m}$ a otáčky kola $n_k = 976,4 \text{ 1/min}$), které se zadávají do řídicího systému dynamometrů, byly vypočítány z podélné dynamiky vozidla pohybujícího se konstantní rychlostí 120 km/h po rovinné ploše při uvažování valivého odporu pneumatik a odporu vzduchu. Parametry simulovaného vozidla byly zvoleny na základě obvyklých hodnot vozidel střední třídy, viz tabulka 5.

Hmotnost vozidla:	$1\,400 \text{ kg}$	Dynamický poloměr pneumatiky:	$0,326 \text{ m}$
Čelní plocha vozidla:	2 m^2	Součinitel odporu vzduchu:	0,3
Hustota vzduchu:	$1,25 \text{ kg/m}^3$	Součinitel odporu valení:	0,02

Tabulka 5: Parametry simulovaného vozidla

Posledním krokem před samotným experimentem bylo nastavení rychlosti chladícího vzduchu v obou ramenech ventilační tratě. Na straně pneumatiky byla kvalifikovaným odhadem zvolena rychlost $v_1 = 23,3 \text{ m/s}$ odpovídající 70 % simulované rychlosti vozidla. Na straně rozvodovky byla rychlost vzduchu snížena na $v_2 = 11,7 \text{ m/s}$ (35 %). Hodnoty rychlostí vzduchu jsou nižší než simulovaná rychlost vozidla, neboť u reálného vozidla, jak již bylo dříve napsáno, se homokinetické klouby nacházejí v zákrytu vůči proudícímu vzduchu.

Modernizované otevřené zkušební stanoviště se v tomto okamžiku nacházelo v připraveném stavu, kdy se v rámci jednotlivých zkoušek měnil úhel zalomení kloubového hřídele a ochranného krytu.

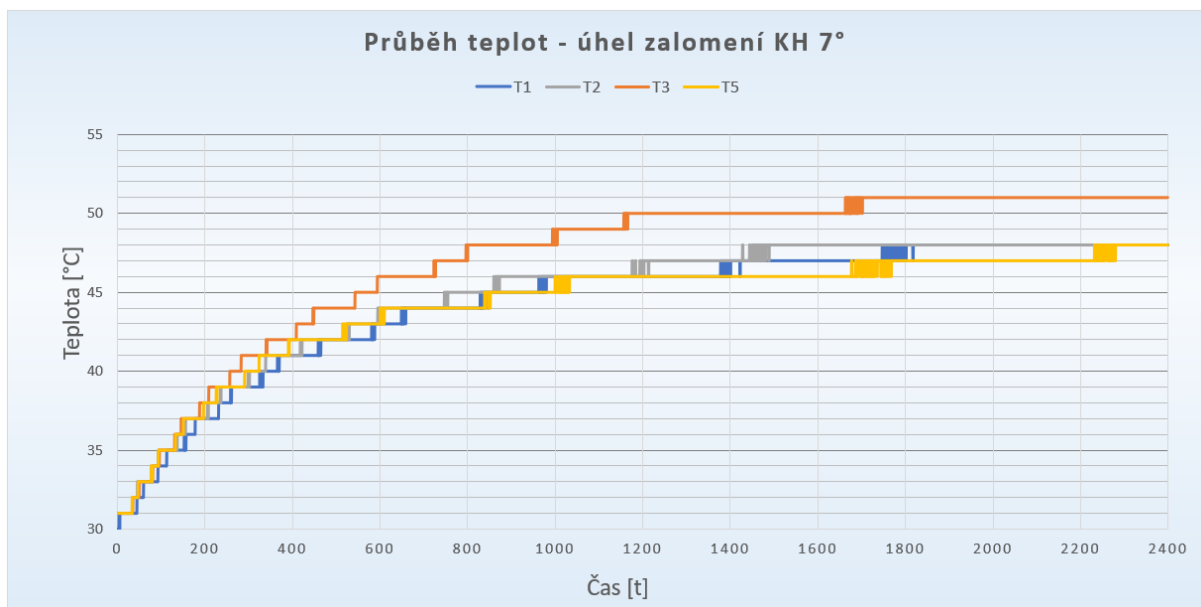
Pro určení okamžiku zastavení jednotlivých měření byla použita funkce vyhodnocení ustálené teploty.

8.2 Vyhodnocení naměřených dat

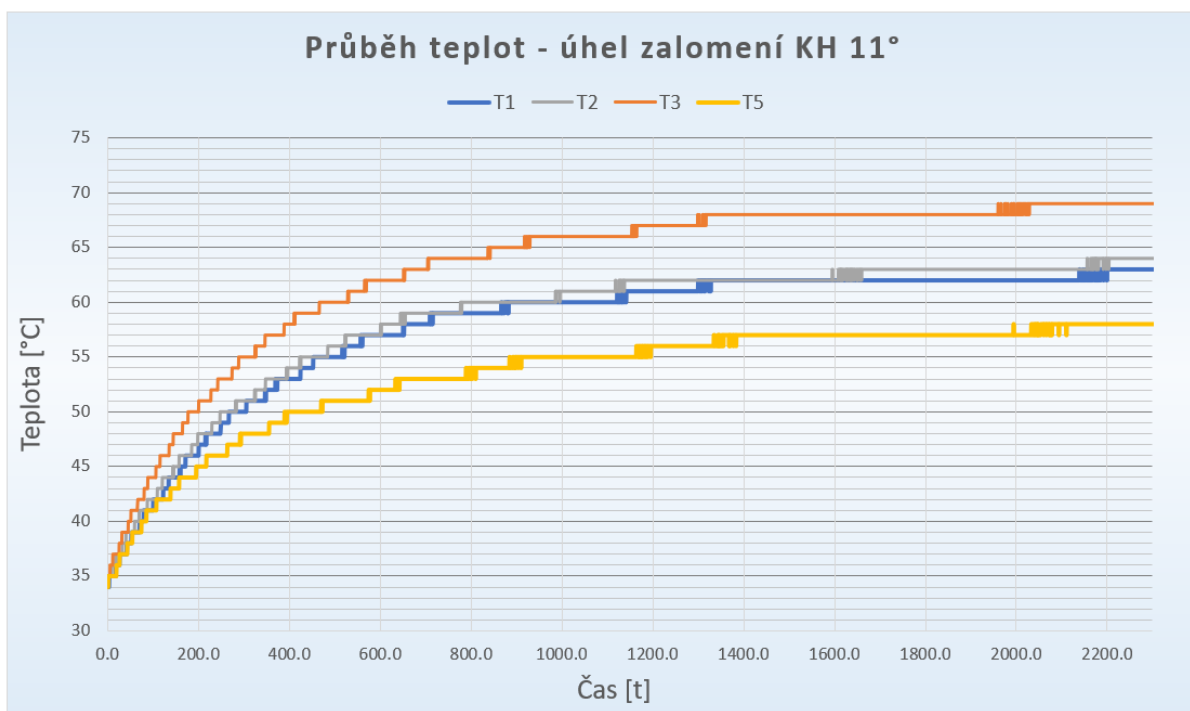
K ověření funkčnosti současného zkušebního stanoviště proběhly v laboratořích dva experimenty, které se lišili v úhlu zalomení kloubového hřídele. U první zkoušky se nastavil úhel zalomení kloubového hřídele na 7° , ve druhém testu se úhel zvýšil na 11° . Výsledné průběhy teplot naměřených čtyřmi termočládky lze vidět na obrázcích 95 a 96, zbylé dva termočládky, jejichž průběhy nejsou zobrazeny, vykazovaly při experimentu známky přerušení vodičů termočládku.

Porovnáním průběhu teplot T1, T2 a T3 lze dojít k závěru, že simulované proudění chladícího vzduchu funguje podle očekávání, neboť přítomná nucená konvekce odebírá teplo z povrchu kloubů a termočládky umístěné ve vnější části součásti mají ve stejném časovém okamžiku nižší teplotu než termočládek zavedený do vnitřního elementu homokinetického kloubu.

Z grafů vyplývá také zajímavý poznatek, že homokinetický kloub Rzeppa s axiálním posuvem se zahřívá méně než stejný typ kloubu, který neumožňuje tento pohyb, neboť teplota na termočládku T5 je ve daném časovém okamžiku nižší než na zbylých čidlech (rozdíl teplot je více patrný na obrázku 96). Tento jev je nejspíše způsoben menším přesahem uložení valivých elementů v daném kloubu.

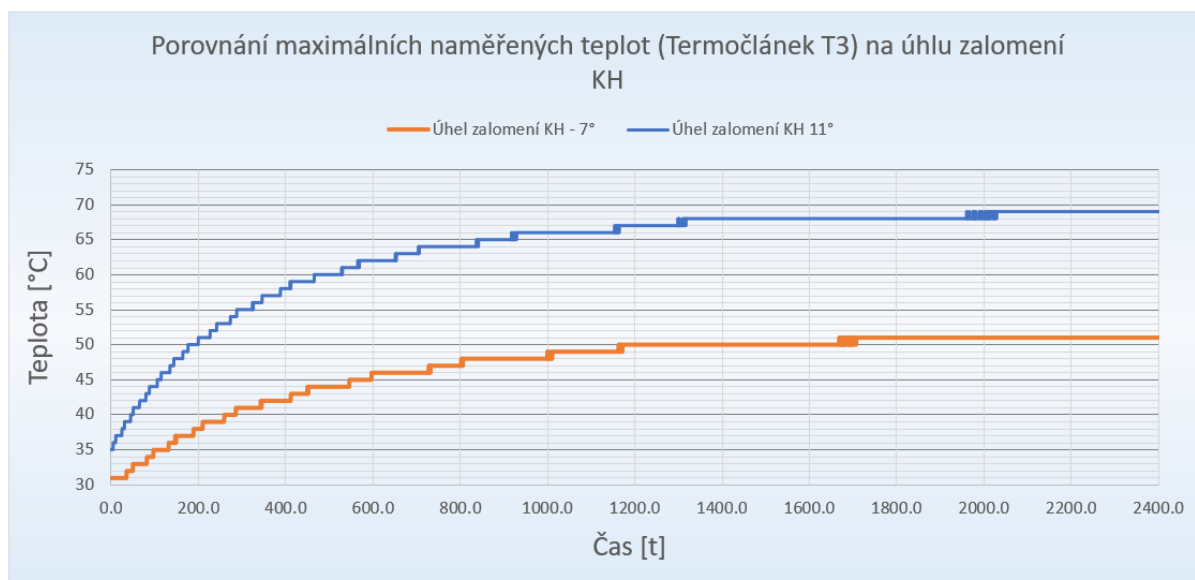


Obrázek 95: Průběh teplot naměřených termočládky – úhel zalomení kloubového hřídele 7°



Obrázek 96: Průběh teplot naměřených termočláanky – úhel zalomení kloubového hřídele 11°

Porovnáním naměřených teplot na termočláanky T3 z obou experimentů, viz obrázek 97, lze také potvrdit skutečnost, že zvýšení úhlu zalomení kloubového hřídele zvětší celkové mechanické ztráty a sníží celkovou účinnost přenosu kroutícího momentu, neboť vyšší maximální naměřená teplota indikuje větší disipaci mechanické energie.



Obrázek 97: Porovnání maximálních teplot (Termočlánek T3) na úhlu zalomení KH



8.3 Závěr kontrolního měření na modernizovaném zkušebním stanovišti

Na základě popsaného experimentu byly naměřeny průběhy teplot homokinetických kloubů v závislosti na úhlu zalomení zkoušeného kloubového hřídele. Výsledné průběhy i maximální teploty odpovídali předpokladům a proběhlé rešerši, viz obrázek 13, kde maximální teplota obdobného zátěžného stavu dosahuje podobné hodnoty.

Po proběhlém experimentu byla také ověřena izolační vlastnost austenitické oceli, kdy byla dotykovou sondou proměřena teplota na opačných koncích nově vyrobených přírub a naměřené hodnoty se výrazně lišily.



9. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo provést rozbor dosavadního stavu otevřeného zkušebního stanoviště pro testování kloubových hřídelů v laboratořích na Julisce, navrhnout technickou modernizaci stavu a následně navržené úpravy přenést do skutečného světa.

K dosažení daných cílů bylo nejdříve nutné se seznámit s problematikou spjatou s kloubovými hřídeli. Z tohoto důvodu jsem zpracoval rešerši, ve které je na začátku vysvětleno, pro jaký účel jsou kloubové hřídele vyráběny a používány, následně jsou v práci představeny a popsány různé varianty provedení kloubových hřídelů a na konci rešerše je vysvětleno jaké veličiny se při experimentálním testování zpravidla měří a jakými faktory jsou výsledky ovlivňovány.

Následující kapitola závěrečné práce je věnována rozboru dosavadního otevřeného stavu zkušebního stanoviště, kde je představena konfigurace zkušebny a jednotlivé její díly jsou popsány. V téže kapitole je také popsán průběh testování kloubových hřídelů v minulosti a jeho nedostatky.

Jakmile jsem získal všechny tyto znalosti, mohl jsem se již věnovat modernizaci zkušebního stavu, kdy jsem ke každému předem zmíněnému nedostatku navrhl vlastní řešení a posléze jej i uskutečnil. Následující kapitoly diplomové práce jsou tedy již zasvěceny těmto jednotlivým řešením.

V první z těchto kapitol je představen teleskopický bezpečnostní kryt, který má za úkol, mimo jiné, chránit předměty, stroje a personál v blízkém okolí stanoviště v průběhu zkoušek. V další kapitole je popsána problematika spjatá se simulací vzduchového proudění v laboratorních podmínkách, jenž je vyřešena postavením ventilační tratě, kterou lze připojit k teleskopickému ochrannému krytu, kdy spojením těchto dílčích sestav lze dosáhnout nezávislého ofukování jednotlivých homokinetických kloubů. Poslední z těchto kapitol je věnována problematice spjaté s tepelným ovlivněným měření, jenž je způsobeno zahříváním hřídelů dynamometrů teplem vznikajícím v homokinetických kloubech v průběhu zkoušek. Problém je vyřešen novými spojovacími díly, propojující dynamometry s kloubovým hřídelem, které jsou navrženy na principu tepelného izolantu a snižují kondukcii tepla.

V závěru diplomové práce jsou zobrazeny výsledky měření teploty homokinetických kloubů při různém úhlovém zalomení, které proběhly na již modernizovaném stanovišti.



10. Seznam použitých zdrojů

- [1] ACHTENOVÁ, Gabriela a Vojtěch KLÍR. Převodná ústrojí motorových vozidel: Kloubové hřídele. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05129-0.
- [2] SEHERR-THOSS, Hans-Christoph, Friedrich SCHMELZ a Erich AUCTIONER. Universal Joints and Driveshafts: Analysis, Design, Applications. 2nd edition. New York: Springer, 2006. ISBN 3540301690.
- [3] U. S. Navy. Construction Mechanic Basic, Volume 2 [online]. May 1999 Edition. NAVEDTRA [cit. 2021-6-21]. ASIN: B07MP7FZSS. Dostupné z: <https://www.militarynewbie.com/wp-content/uploads/2013/11/US-Navy-course-Construction-Mechanic-Basic-Volume-2-NAVEDTRA-142731.pdf>
- [4] O'Connor, B., Jacobs, R., and Jacoby, F., "A Method to Assess Grease Temperature Response in CVJ Applications," SAE Technical Paper 2005-01-2177, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-2177>.
- [5] Schultze, A., Lienkamp, M. Potential of an improved energy efficiency in the chassis. Automot. Engine Technol. 1, 15–25 (2016). <https://doi.org/10.1007/s41104-016-0009-x>
- [6] TASDEMIR, WAKAYAMA, TOKOROYAMA, KOUSAKA, UMEHARA, MABUCHI, HIGUCHI. The effect of oil temperature and additive concentration on the wear of non-hydrogenated DLC coating [online]. September 2014 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X14001479>
- [7] Pakosta, Jiří & Achtenova, Gabriela. (2017). Joint Shaft Test Stand. Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 15. 10.1515/mecdc-2017-0003.
- [8] Spojovací a kloubové hřídele [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: http://www.lowlevel.cz/log/files/04_Hridele.pdf
- [9] Kloubový hřídel [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <http://m.ang-autoparts.com/news/cv-joint-inside-26226483.html>
- [10] Zavěšení McPherson [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.motori.it/glossario/macpherson>
- [11] Klouby Rzeppa [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.sszepreprov.cz/dum/mov/VY_32_INOVACE_MOV_3ROC_21.pdf
- [12] Kloub Tripod [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: http://old.kvm.tul.cz/studenti/texty/Kdms1/3-Hnaci_hridele.pdf
- [13] Lícování – terminologie [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3754511/>
- [14] Průtok vzduchu ventilátoru [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/test-nejlevnejsich-ventilatoru-model-za-100-kc-prekvapil?chapter=3>
- [15] Rychlost vzduchového proudění [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/recenze-enermax-twister-storm-a-pressure-vykon-a-ticho/40321-3>
- [16] Kovová příruba [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.cz/kovova-priruba-s-rameckem-o-100-mm-x1582?fbclid=IwAR3iGmHwil4RbdeflgtzurCjzNGQKiBpPsNi8NG8PdUWeFCywPsFu1VTaYk>
- [17] Regulační klapka RKKM [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.net/rkkm-200.html>



- [18] Regulační klapka RKKM se servopohonem [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.mandik.cz/produktova-rada/regulacni-technika/rkkm>
- [19] Uživatelský manuál frekvenčního měniče [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <http://elektro.fs.cvut.cz/dokument/TECO/7300%20CV%20leden%202007.pdf>
- [20] Symetrická rozbočka [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.vzduchotechnika-ventilace.cz/web-data/92/files/product/odbocka-y.pdf>
- [21] Příruba PR CZ 315 [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.ventilatory.net/pr-cz-315.html?__SID=S
- [22] Vent lisovaný oblouk [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.ventilatory.net/b-200-30.html?__SID=S
- [23] Přechod osový [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.ventishop.cz/pro-200-100-prechod-osovy/?gclid=Cj0KCQjw9_mDBhCGARIsAN3PaFMLN0CJaa9fWF21LFOLpHvLf5N3QQ4iE6aQzZYHw7eG1IeJDclzSmIaAjtEALw_wcB
- [24] Vnější spojka [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.ventilatory.net/mf-200.html?__SID=S
- [25] Montáž vzduchotechniky [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.vzduchotechnika-ventilace.cz/novinky/3-montaz-vzduchovodu.html>
- [26] Hadice FLEXADUR [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.net/flexadur-pvc-1n-o-100-mm.html?web=1&wdLOR=cC9C1BB3C-F881-4F77-8BF2-C69DD57F5D7E>
- [27] Vrtulkové anemometry [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/vrtulkove-anemometry/vrtulkove-anemometry-bez-pripojeni-k-smartphonu/c/air-flow-anemometer-vane-without-smartphone-operation>
- [28] Pružná spojka [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.tyma.cz/produkty/tnm-normex-e-67-pruzny-element-82-shore-a/?gclid=Cj0KCQjw8laGBhCHARIsAGIRRYqH0Dx6ngo0y6Cb9a3WSz4-V0ldcAulcoiYzqxPYPSXvxq1Wwp07IoaAksuEALw_wcB
- [29] Součinitel tepelné vodivosti [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: Součinitel tepelné vodivosti [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2020/09/Thermal-Properties-of-Materials-3.png>
- [30] Materiálové vlastnosti oceli 1.4305 [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-14305-303-Bar_107.ashx
- [31] Materiálové vlastnosti oceli 1.4305 [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.valbrunandordic.se/wp-content/uploads/2014/10/EN_1_4305_-1408_Valbruna_Nordic_english.pdf
- [32] Torque Flange HBM T40B [online]. [cit. 2021-6-22]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/B03406.pdf>
- [33] Mez únavy oceli 1.4305 [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=IT&NM=282>
- [34] Předpětí a utahovací momenty šroubového spoje [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://media.bossard.com/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/cz/f_047_cz.pdf



11. Seznam obrázků

Obrázek 1: Kloubový hřídel [9]	3
Obrázek 2: Zavěšení McPherson [10].....	4
Obrázek 3: Vyosení a změna délky	5
Obrázek 4: Kloub Rzeppa s axiálním posuvem [11].....	6
Obrázek 5: Kloub Rzeppa bez axiálního posuvu [11]	6
Obrázek 6: Weissův kloub [3].....	7
Obrázek 7: Kloub Tripod [12]	8
Obrázek 8: Závislost koeficientu tření na teplotě různých druhů maziv [6]	9
Obrázek 9: Typy uložení [13]	10
Obrázek 10: Schéma pro výpočet mechanické účinnosti.....	11
Obrázek 11: Mechanická účinnost v zavilosti na úhlu zalomení kloubového hřídele [5]	12
Obrázek 12: Průběh teploty v zavilosti na úhlu zalomení kloubového hřídele [7]	13
Obrázek 13: Závislost maximální teploty na použitém mazivu [4].....	13
Obrázek 14: Prostorové rozpoložení dynamometrů zkušebního stavu	14
Obrázek 15: SDS 200	14
Obrázek 16: 2VD 100.....	14
Obrázek 17: ASD S200	15
Obrázek 18: Změna polohy dynamometru ASD S200 vůči zbylým strojům	15
Obrázek 19: Drážkovaný konec KH.....	16
Obrázek 20: Konec KH s přírubou.....	16
Obrázek 21: Průběh testování kloubových hřídelů na stanovišti v minulosti [7].....	17
Obrázek 22: Odvod tepla z homokinetických kloubů.....	20
Obrázek 23: Ochranný kryt pro kloubový hřídel	21
Obrázek 24: Spodní plechový díl 1	23
Obrázek 25: Spodní plechový díl 2	23
Obrázek 26: Horní plechový díl 1	24
Obrázek 27: Horní plechový díl 2	24
Obrázek 28: Ocelová vložka a její umístění – tloušťka 4 mm	25
Obrázek 29: Ocelový stojan.....	26
Obrázek 30: Horní deska stojanu – tloušťka plechu 10 mm	26
Obrázek 31: Spodní deska stojanu – tloušťka plechu 15 mm	26
Obrázek 32: Délkové a úhlové rozptyly zkoušených kloubových hřídelů	27



Obrázek 33: Minimální délka krytu	28
Obrázek 34: Maximální délka krytu.....	28
Obrázek 35: Těsnící dvířka – tloušťka 4 mm.....	29
Obrázek 36: Utěsnění otvoru těsnícími dvířky	29
Obrázek 37: Minimální úhel zalomení + minimální délka krytu.....	30
Obrázek 38: Maximální úhel zalomení + maximální délka krytu.....	30
Obrázek 39: Zjednodušený vzhled jednotlivých konceptů – půdorys.....	32
Obrázek 40: Naměřený průtok vzduchu v závislosti na otáčkách ventilátoru [14].....	34
Obrázek 41: Naměřená rychlost vzduchového proudění (stopy za minutu) v závislosti na otáčkách ventilátoru [15].....	34
Obrázek 42: Kovová příruba – vyráběná	36
Obrázek 43: Plechový díl 1 – tloušťka 2 mm	36
Obrázek 44: Plechový díl 2 - tloušťka 1 mm	36
Obrázek 45: Plechový díl 3 - tloušťka 1 mm	36
Obrázek 46: Kovová příruba – kupovaná [16].....	37
Obrázek 47: Úprava rovinného plechové dílu	38
Obrázek 48: Nastavení úrovně škrčení průřezu	39
Obrázek 49: Regulační klapka RKKM S .01 [17].....	39
Obrázek 50: Regulační klapka RKKM s ovládním pomocí servopohonu [18].....	41
Obrázek 51: Charakteristické rozměry axiálního ventilátoru.....	42
Obrázek 52: Dělení objemového průtoku symetrickou rozbočkou	43
Obrázek 53: TECO INVERTER 7300 CV [19]	44
Obrázek 54: Zapojení měniče série BE – trojfázové napájení 3 x 400 V/50 Hz [19].....	45
Obrázek 55: Základní parametry symetrické rozbočky [20].....	46
Obrázek 56: Rozměry příruby PR CZ 315 [21]	47
Obrázek 57: Úprava tvaru ocelové příruby PR CZ 315	47
Obrázek 58: Vent lisovaný oblouk B 200 30° [22]	48
Obrázek 59: PRO 200/100 Přejchod osový [23]	48
Obrázek 60: Vnější spojka MF 200 [24],[25]	49
Obrázek 61: Hadice FLEXADUR PVC-1N [26]	49
Obrázek 62: Sestrojená finální verze ventilační trati	50
Obrázek 63: Lopatkové sondy od firmy TESTO [27]	51
Obrázek 64: Fourierův zákon – jednoduchá rovinná stěna.....	52
Obrázek 65: Pružná spojka s pryžovým elementem [28]	53



Obrázek 66: Zvýšení stupňů volnosti systému použitím pružných spojek	54
Obrázek 67: Součinitele vybraných kovových materiálů [29]	54
Obrázek 68: Příruba pro kloubový hřídel – strana rozvodovka	55
Obrázek 69: Propojení kloubového hřídele – strana rozvodovka	56
Obrázek 70: Momentový snímač HBM T40B jímž je zakončen hřídel dynamometru ASD S200 [32] ...	57
Obrázek 71: Vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4305 potřebné pro pevnostní analýzu	58
Obrázek 72: Síťování modelu příruby	58
Obrázek 73: Okrajové podmínky pevnostní analýzy	59
Obrázek 74: Výsledek pevnostní analýzy – napětí dle hypotézy MMH	59
Obrázek 75: Vlastnosti materiálu příruby přechozího řešení potřebné pro teplotní analýzu	60
Obrázek 76: Síťování modelu příruby přechozího řešení	61
Obrázek 77: Okrajové podmínky teplotní analýzy – příruba předchozího řešení	61
Obrázek 78: Výsledek teplotní analýzy příruby přechozího řešení	62
Obrázek 79: Vlastnosti materiálu nově navržené příruby potřebné pro teplotní analýzu	62
Obrázek 80: Síť nově navržené příruby	62
Obrázek 81: Okrajové podmínky teplotní analýzy – nově navržená příruba	63
Obrázek 82: Výsledek teplotní analýzy – nově navržená příruba	63
Obrázek 83: Průběh minimální teploty na přírubách v čase	64
Obrázek 84: Příruba pro kloubový hřídel – strana pneumatika	65
Obrázek 85: Propojení kloubového hřídele – strana pneumatika	65
Obrázek 86: Řez modelem pevnostní analýzy příruby	66
Obrázek 87: Síťování modelu pevnostní analýzy	67
Obrázek 88: Okrajové podmínky pevnostní analýzy příruby – strana pneumatika	67
Obrázek 89: Výsledky pevnostní analýzy příruby – strana pneumatika	68
Obrázek 90: Síť nově navržené příruby	69
Obrázek 91: Okrajové podmínky – příruba – strana pneumatika	70
Obrázek 92: Výsledek teplotní analýzy – příruba – strana kolo	70
Obrázek 93: Konfigurace experimentálního měření	71
Obrázek 94: Umístění tenzometrů v homokinetických kloubech [7]	72
Obrázek 95: Průběh teplot naměřených termočlánky – úhel zalomení kloubového hřídele 7°	73
Obrázek 96: Průběh teplot naměřených termočlánky – úhel zalomení kloubového hřídele 11°	74
Obrázek 97: Porovnání maximálních teplot (Termočlánek T3) na úhlu zalomení KH	74