

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Měřící aparatura a akvizice dat na zkušebním stanovišti kloubových
hřídelí v laboratořích na Julisce**

Autor:

Bc. Vasile Vlas

Vedoucí práce:

Ing. Pakosta Jiří, Ph. D.

Rok:

2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vlas** Jméno: **Vasile** Osobní číslo: **465541**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Měřicí aparatura a akvizice dat na zkušebním stanovišti kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce

Název diplomové práce anglicky:

Data Measurement and Acquisition Equipment for Drive Shaft Test Bench at Juliska Laboratories

Pokyny pro vypracování:

Pro zkušební stanoviště kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce zprovozněte dostupné měřicí aparatury sloužící pro získávání potřebných fyzikálních veličin důležitých z hlediska nadefinovaných testů. Jedná se o měření teplot na rotujících součástech s bezkontaktním přenosem signálu a o měření axiální síly potřebné pro délkovou kompenzaci kloubového hřídele za rotace. Pro sběr dat preferujte otevřené grafické vývojové prostředí měřicího systému LabView.

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. Vasile Vlas
Název práce:	Měřicí aparatura a akvizice dat na zkušebním stanovišti kloubových hřídelí v laboratořích na Julisce
Anglický název:	Data Measurement and Acquisition Equipment for Drive Shaft Test Bench at Juliska Laboratories
Rozsah práce:	
	Počet stran 92
	Počet obrázků 73
	Počet tabulek 5
	Počet příloh 11
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, kloubový hřídel, homokinetický kloub, Rzeppa, Tripod, termočlánek, měření teploty kloubového hřídele, měřicí aparatura, akvizice, LabVIEW
Key words:	Diploma thesis, joint shaft, constant velocity joint, Rzeppa, Tripod, thermocouple, joint shaft temperature measurement, measuring device, Acquisition, LabVIEW

Abstrakt

Diplomová práce se v úvodu zabývá kloubovými hřídeli s homokinetickými klouby a jejich problematikou v kontextu zkušebního stanoviště a měřených veličin. Dále se zabývá aktuálním stavem měřící aparatury EHL, návrhem konstrukce nového vysílacího modulu EHL a dovybavením stanoviště o další měřící aparatury, Dx Telemetry a Manner. Nakonec je vytvořen program v LabVIEW sloužící k akvizici dat z měřících aparatur a realizován experiment ověřující funkčnost programu.

Abstract

At the beginning, this diploma thesis deals with joint shafts with constant velocity joints and their problems in context to the test stand and measured quantity. It also deals with the current state of the EHL measuring device, the design of new EHL transmitter module and the retrofitting of the test bench with additional measuring devices, Dx Telemetry and Manner. Finally, a LabVIEW program is developed to acquire data from the measuring devices and an experiment is carried out to verify the functionality of the program and data acquisition.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pakosty Jiřího, Ph. D. a s použitím uvedené literatury.

V Praze dne 11.7.2021

Bc. Vasile Vlas

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jiřímu Pakostovi, Ph. D. za cenné rady, pomoc, ochotu a trpělivost při zpracování diplomové práce. Rovněž chci velice poděkovat své rodině za duševní i finanční podporu během celého studia.



Obsah

1	Úvod	1
2	Kloubové hřídele	2
2.1	Kloubový hřídel se stejnoběžnými klouby.....	2
2.2	Stejnoběžné klouby	4
2.2.1	Kuličkový kloub (Rzeppa)	6
2.2.2	Tříramenný kloub (Tripod).....	8
3	Aktuální stav zkušebního stanoviště.....	9
4	Měření teploty	10
4.1	Rozdělení teploměrů	10
4.1.1	Dotykové teploměry	10
4.1.2	Bezdotykové teploměry	11
4.2	Elektrické teploměry	11
4.3	Termočlánek.....	12
4.3.1	Měření termoelektrického napětí	13
4.3.2	Kompenzace studeného konce termočlátku	14
4.3.3	Převod termoelektrického napětí na teplotu	15
4.3.4	Typy termočláneků	16
4.3.5	Přechodová charakteristika termočlátku.....	16
5	Realizace měření teploty homokinetických kloubů hřídele	18
6	Měřicí aparatura Dx Telemetry.....	21
6.1	Vysílací modul SCT.....	21
6.2	Přijímací jednotka.....	23
7	Sběrnice dat CAN	25



7.1	Databázový soubor CAN.....	26
8	Měřicí aparatura EHL	27
9	Aparatura MANNER pro měření axiální síly kloubového hřídele	29
10	Konstrukční návrh těla vysílacích modulů aparatury EHL	30
10.1	Požadavky na nové konstrukční provedení těla vysílacích modulů aparatury EHL ...	31
10.2	Návrh měřicího půlměsíce	33
10.3	Návrh aretačního půlměsíce.....	37
10.4	Montáž vysílacích modulů na kloubovém hřídeli.....	40
10.5	Realizace šroubových spojů.....	41
10.6	MKP analýza krycího plexiskla	42
10.6.1	Model	42
10.6.2	Kontaktní vazby.....	43
10.6.3	Okrajové podmínky.....	44
10.6.4	Zatížení	44
10.6.5	Výsledek výpočtu	48
10.7	Konfigurace 3D tisku a volba materiálu.....	50
11	Problematika realizace měření axiální síly a požadavky na měřitelnost	54
12	Ovládání klapky vzduchovodu	58
13	Návrh měřicího řetězce.....	61
13.1	CompactDAQ	61
13.1.1	Šasi CompactDAQ	61
13.2	Akvizice dat z měřicí aparatury Dx Telemetry	62
13.3	Modul pro CAN	62
13.4	Modul pro měření napěťového vstupu	64



13.5	Modul pro napěťový výstup	65
14	LabVIEW program pro akvizici dat měřených na kloubovém hřídeli	66
14.1	Čelní panel	66
14.1.1	Ukládání dat	67
14.1.2	Měření teploty	68
14.1.3	Vyhodnocení ustálení teploty	69
14.1.4	Měření axiální síly	71
14.1.5	Nastavení rychlosti vzduchu	71
14.2	Blokový diagram	73
14.2.1	Smyčka ovládání.....	73
14.2.2	Smyčka akvizice dat CAN.....	74
14.2.3	Smyčka zobrazení a uložení dat CAN	76
14.2.4	Smyčka vyhodnocení ustálení teploty	78
14.2.5	Smyčka akvizice dat Manner.....	80
14.2.6	Smyčka ovládání klapek	82
15	Experimentální stanovení průběhů teplot kloubového hřídele	84
15.1	Konfigurace měření	84
15.2	Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	86
15.3	Závěr experimentu	87
16	Závěr.....	88
17	Použitá literatura	90



1 Úvod

Kloubový hřídel je součást trvale přenášející mechanickou energii mezi dvojicí hřídelů, které jsou vůči sobě nesouosé nebo mění svojí relativní polohu. Rozšíření konceptu vozidla s motorem napříč a poháněnou říditelnou přední nápravou si vyžádal použití kloubových hřídelů se stejnoběžnými klouby. Návrh kloubového hřídele se stejnoběžnými klouby a jeho optimalizace je náročný proces, zpravidla kvůli složité kinematice a tribologii valivých elementů. Kloubový hřídel je součástí pohonného řetězce automobilu a přímo ovlivňuje jeho účinnost. Vzhledem k trendu zvyšování účinnosti, životnosti a zlepšování výrobní technologie je význam návrhu a optimalizace vlastností kloubového hřídele umocněn.

Problematika kloubového hřídele s homokinetickými klouby je obsáhlá a lze měřit široké spektrum veličin. Jednou z měřených veličin je např. teplota kloubů při provozu, která by neměla dosáhnout kritické hodnoty. Příliš vysoká teplota může změnit rozměry tolerancí v uložení jednotlivých komponent, mazací vlastnosti maziva nebo poškodit krycí pryžovou membránu kloubu sloužící k utěsnění vnitřních částí kloubu. Následný únik maziva a vniknutí nečistot do kloubu je fatální a znamená servisní zásah. Již z tohoto důvodu je nezbytné znát hodnoty teplot kloubů za provozu a je důležité použít vhodnou pryž pro krycí membránu kloubu.

Ve své diplomové práci se zabývám měřicími aparaturami a jejich akvizicí dat na zkušebním stavu v halových laboratořích ČVUT na Julisce. K dispozici jsou tři měřící zařízení s bezdrátovým přenosem dat. V případě dvou z nich, EHL a Manner, se jedná o jednoúčelové měřící aparatury, které umožňují měření teploty homokinetických kloubů (aparatura EHL) a měření tenzometry (aparatura Manner), např. axiální odporovou sílu homokinetického kloubu s axiálním posuvem. Třetí měřící aparatura (Dx Telemetry) se vyznačuje univerzálním použitím a je možné připojit různé typy sensorů.

Na začátku diplomové práce je čtenář seznámen s pojmy kloubový hřídel a homokinetický kloub ve spojení s automobily a měřenými veličinami. Dále jsou představeny měřící aparatury a je navržen měřící řetězec a akvizice dat do počítače spolu s programem v LabVIEW. Na závěr se zabývám experimentálním stanovením průběhu teplot homokinetických kloubů kloubového hřídele s cílem ověřit funkčnost měřícího řetězce, akvizice dat a navrženého programu.

Cílem práce je rozšířit zkušební stanoviště o nové měřící aparatury a akvizici dat v kontextu měření teploty kloubů a axiální síly potřebnou pro délkovou kompenzaci kloubového hřídele.

2 Kloubové hřídele

Kloubové hřídele jsou převodová ústrojí určené k trvalému přenosu mechanické energie rotačního pohybu, zpravidla s převodovým číslem rovným jedné. Nacházejí své uplatnění v případě potřeby spojit dvojici součástí jejichž výstupní prvky mají takovou polohu, že jejich spojení, např. pomocí ozubení, je příliš nákladné nebo obtížné. Dalším typickým případem, kdy jsou použity kloubové hřídele, je spojení mezi prvky, které za provozu mění svoji polohu vůči sobě. Kloubové hřídele představují dostupné a spolehlivé řešení využitelné pro různé hodnoty přenášeného kroutícího momentu. Dle velikosti je možné kloubové hřídele využít, jak pro malé momenty, tak i pro největší momenty. Díky tomu jsou dnes velice využívány v mnoha strojních odvětvích, např. automobilový průmysl, kolejová vozidla, zemědělské stroje, hospodářské stroje atd. Podle účelu použití a požadavků na kloubový hřídel se liší typem kloubu, který je použit a také samotnou konstrukcí hřídele. Stanoviště pro testování kloubových hřídelí, kterému se věnuji ve své diplomové práci je určeno především pro příčné automobilové kloubové hřídele se stejnoběžnými klouby, viz obrázek 1, a nadále se budu zabývat pouze tímto typem kloubových hřídelů.[1][2]



Obrázek 1: Kloubový hřídel se stejnoběžnými klouby

2.1 Kloubový hřídel se stejnoběžnými klouby

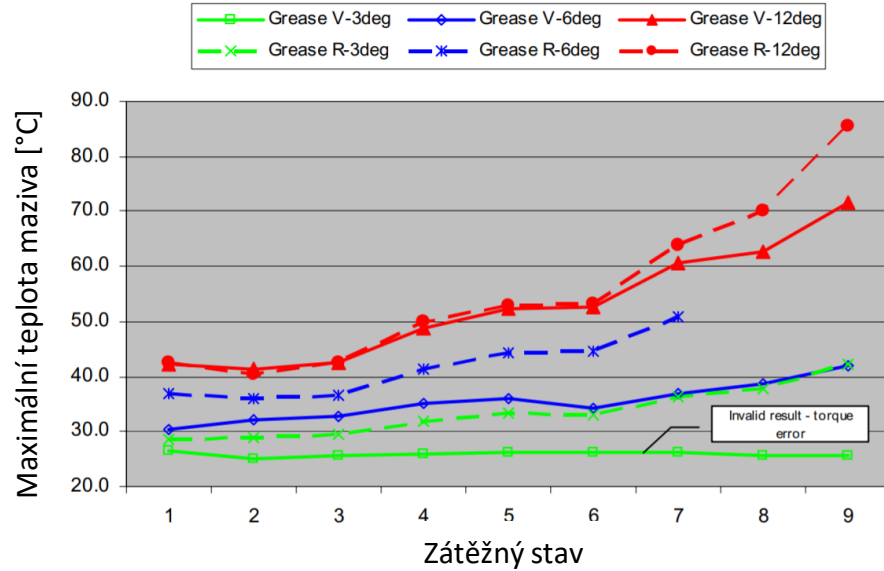
Vývoj kloubových hřídelů se stejnoběžnými klouby je úzce spjat s konstrukcí vozidla s pohonem předních kol, neboť tato konstrukce kladla nároky, které kloubový hřídel s křížovými klouby nemohl splnit. Typické uspořádání přední nápravy, kde se používá tento kloubový hřídel vidíme na obrázku 2. Jedná se o nápravu typu McPherson, která je dnes v segmentu levnějších automobilů často používaným řešením.[1]

Právě z důvodu možného rozdílného úhlu zalomení obou kloubů nebyl křížový kloub vhodný pro spojení kola a rozvodovky, neboť by u něho docházelo k nerovnoměrnému chodu, tedy ke zpomalování a zrychlování hnacích kol v důsledku kinematiky kloubu. To by mělo významný vliv na funkčnost a jízdní pohodlí vozidla. [1][3]

2.2 Stejnoběžné klouby

Pod pojmem stejnoběžný kloub lze uvažovat mechanismus, který má na výstupním hřídeli stejné otáčky jako na vstupním, bez ohledu na úhel zalomení. Existuje několik typů stejnoběžných kloubů, ale dnes jsou u kloubových hřídelů osobních automobilů nejpoužívanější kuličkové klouby (Rzeppa), viz obrázek 5, a tříramenný kloub (Tripod), viz obrázek 7. U obou těchto typů kloubů dochází při zalomení za provozu k pohybu valivých elementů v drážkách v důsledku rotace. Pohyb těchto elementů doprovází vznik tření. Toto tření je značným zdrojem ztrát a mechanická energie se mění v tepelnou energii, která se akumuluje do dílů kloubu a maziva, a dále se odvádí do okolí. Je zřejmé, že tření ve stejnoběžném kloubu přímo ovlivňuje výslednou účinnost stejnoběžného kloubu a také účinnost pohonného ústrojí vozidla. [1][3]

Volba správného maziva je pro stejnoběžné klouby klíčová, jelikož tím lze ovlivnit tření uvnitř kloubu a s tím spojené zahřívání a účinnost. Ve stejnoběžných kloubech se používají speciální plastická maziva. Příklad závislosti teploty v kloubu Rzeppa na volbě maziva je zobrazen na obrázku 4. V obrázku je zobrazen průběh maximálních dosažených teplot v závislosti na dvou typech maziv ve variantě R a V a pro tři úhly zalomení v jednotlivých zátěžných stavech 1-9, viz. tabulka 1. [3]



Obrázek 4: Průběh teploty v kloubu pro různá maziva a různé zatěžující stavy [3]

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: Zatěžující stavy stejnoběžného kloubu [3]

Z obrázku 4 je patrná závislost teploty ve stejnoběžném kloubu na volbě maziva, ale také závislost teploty na otáčkách, přenášeném momentu a úhlu zalomení kloubového hřídele. Za provozu stejnoběžného kloubu dochází k výraznému nárůstu teploty oproti klidovému stavu. Teplota ve stejnoběžném kloubu stoupá se zvyšujícími se otáčkami, přenášeným momentem a úhlem zalomení.

Velice důležité je následné utěsnění maziva uvnitř kloubu a také ochrana před vniknutím nečistot do kloubu. Z tohoto důvodu se na tělo kloubu navléká pryžová manžeta, která musí odolat působení vnějších podmínek, jak v zimě, tak i v létě a také zvýšené teplotě v kloubu. [3]

Jednou z motivací pro měření teploty kloubového hřídele může být znalost teploty kloubů za účelem výběru správného materiálu manžety tak, aby odolala zvýšeným teplotám a nedošlo k degradaci materiálu v důsledku dlouhodobého působení zvýšené teploty, např. při

nadměrném přenášeném výkonu nebo jízdou v členitém terénu s velkým množstvím zatáček. Dalšími důvody mohou být např. změna rozměrů tolerancí v uložení, optimalizace chlazení homokinetického kloubu a výsledné snížení teploty nebo porovnání a volba optimálního maziva.

Další měřenou veličinou na zkušebním stavu v souvislosti s homokinetickými klouby je odporová síla kloubového hřídele proti prodloužení. Měření této síly je podstatné v kontextu s uložení valivých elementů uvnitř kloubu Rzeppa s axiálním posuvem. Elementy lze uložit s vůlí, přechodně, nebo s přesahem a odporová axiální síla závisí na druhu uložení i na míře přesahu. Ve spojení s měřením teploty lze vyhodnotit vliv uložení na maximální hodnotu teploty v homokinetických kloubech. V případě kloubů Tripod se díky třecím silám a kinematice kloubu za provozu generuje periodická axiální síla přispívající zvýšenému hluku, či zvýšeným vibracím. Velice se tato síla projevuje při prudkém zrychlování vozidla a považuje se za důležitý parametr pro hodnocení dynamických vlastností systému hnacího hřídele. [4]

Lze předpokládat, že axiální síla je funkcí zalomení kloubového hřídele, otáček, přenášeného momentu a je také velice ovlivněna použitým mazivem. Dále pak mohou být naměřeny rozdílné hodnoty síly za rotace a za klidu, jelikož v případě klidu se uplatňují pasivní odpory závislé na adhezním koeficientu, jehož hodnota se liší od třecího koeficientu. [4]

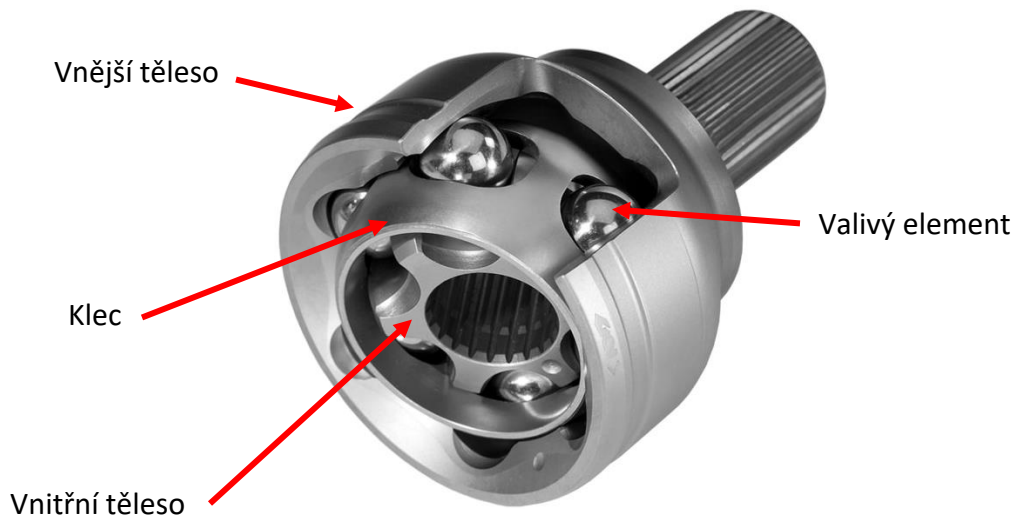
Z výše uvedených důvodů je žádoucí měřit axiální sílu kloubového hřídele a snažit se její hodnotu co nejvíce optimalizovat.

2.2.1 Kuličkový kloub (Rzeppa)

Kuličkový kloub, patří mezi nejpoužívanější klouby a byl patentován již v roce 1929. Valivými elementy jsou kuličky, které jsou umístěny v kleci a při změně úhlu zalomení kloubu se pohybují v oválných drážkách. Hnací moment se přenáší z vnějšího tělesa na vnitřní, a naopak, skrze kuličky opřením se. Při úhlu zalomení 8° se dosahuje účinnosti přenosu mechanické energie až 99 %, ale s rostoucím úhlem zalomení účinnost klesá, pro 40° je účinnost zhruba 93 %. [1]

Je možné narazit na provedení, jak bez axiálního posuvu, tak i s axiálním posuvem. Provedení bez axiálního posuvu, viz obrázek 5, se v praxi používá u kloubového hřídele na straně kola. Toto provedení umožňuje větší úhel zalomení, standartně 47° a s upravenou konstrukcí až 52° . Velikého úhlu zalomení je dosaženo zakřivením drážek pro klučičky na vnějším

tělese kloubu. Zakřivení zajistí dostatečný kontakt mezi kuličkou a drážkou i při vysokém úhlu zalomení. [1]



Obrázek 5: Kloub Rzeppa bez axiálního posuvu

Provedení s axiálním posuvem je znázorněno na obrázku 6. Tento typ kloubu se používá typicky na straně převodovky. K posuvu dochází v axiálním směru vnějšího tělesa kloubu a tento pohyb je realizován pomocí odvalu kuliček v kloubu. Z principu musí být drážky přímé a tím je také omezeno i maximální zalomení tohoto kloubu. Kloub umožňuje posuv v axiálním směru až 50 mm a maximální úhel zalomení 22°. [1]



Obrázek 6: Kloub Rzeppa s axiálním posuvem

2.2.2 Tříramenný kloub (Tripod)

Tříramenný kloub, viz obrázek 7, je často používán u kloubového hřídele, určeného pro osobní automobily, na straně rozvodovky. Řadí se mezi stejnoběžné klouby, přestože jeho chod není zcela rovnoměrný. Otáčky výstupu v závislosti na vstupu mají tři maxima a tři minima během jedné otáčky vstupu. Rozdíl maxima a minima je ale velmi malý a kloub se chová téměř jako stejnoběžný. Další nevýhodou tohoto kloubu je pohyb středu trojice čepů během otáčení vůči ose součásti s kulisami. Střed trojice čepů opisuje elipsu s mírnou výstředností. Pohyb středu vyvolá odstředivé síly vedoucí k přidavnému namáhání kloubu. [1][5]

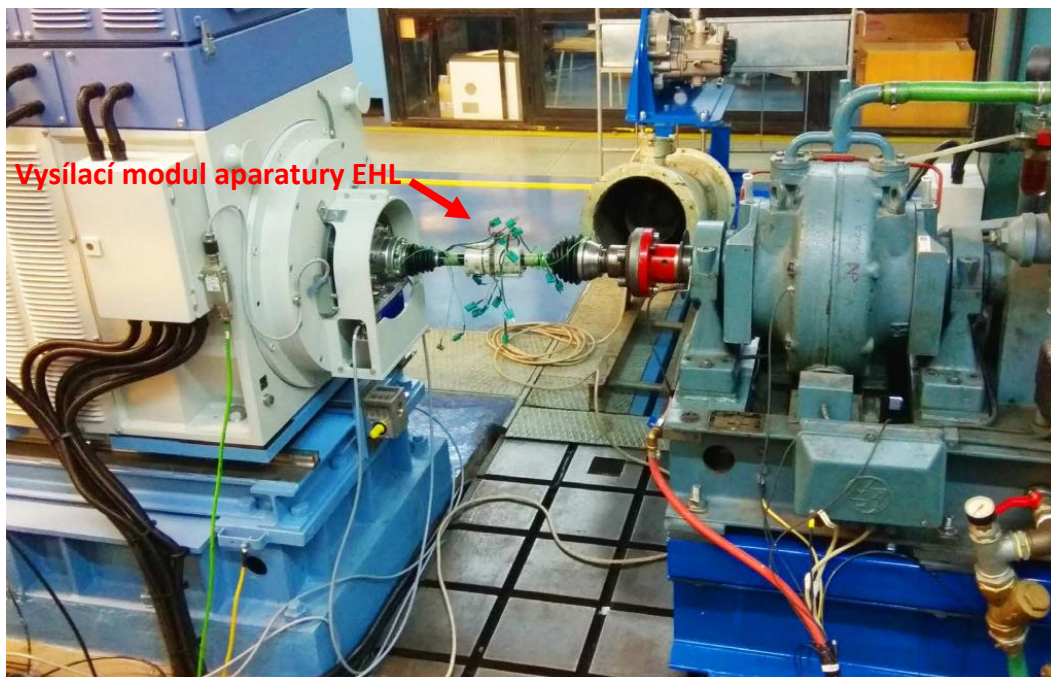
Tříramenný kloub umožňuje maximální úhel zalomení až 25° a posuv do 50 mm. Při úhlu zalomení 20° je schopen kloub Tripod přenášet mechanickou energii s účinností až 99 %. To je vzhledem k maximálnímu úhlu zalomení výhodné. Další výhodou jsou kompaktní rozměry kloubu, nízká hmotnost, spolehlivost a snadná montáž. [1]



Obrázek 7: Kloub Tripod

3 Aktuální stav zkušebního stanoviště

V halových laboratořích Juliska ČVUT se pro účely testování kloubových hřídelů používá zkušební stav s otevřeným výkonovým okruhem, sestávající ze dvou dynamometrů, kde jeden dynamometr je hnací a druhý představuje zátěž, viz obrázek 8. Dynamometry jsou uloženy ve vodících drážkách umožňující posuv v určitém směru a tím je umožněné jak nastavení úhlu zalomení kloubového hřídele, tak i posuv v axiálním směru (rovnoběžný s osou hřídele dynamometru).



Obrázek 8: Zkušební stanoviště na Julisce

Zatím byla na zkušebním stanovišti používána pouze měřící aparatura EHL, umožňující měření teploty homokinetických kloubů. Akvizice dat do počítače je realizována skrze USB konektor a příslušným programem v počítači. U vysílacích modulů této aparatury, přidělavající se na kloubový hřídel a umožňující bezdrátový přenos dat k přijímacímu modulu v blízkosti počítače, se v průběhu let projeví nedostatky, které vedly k znehodnocení aparatury a problémům při měření. Nedostatky budou přesněji rozebrány v kapitole 10, a dále bude za účelem zlepšení měření a odstranění nedostatků navrženo a vyrobeno nové provedení držáku sloužící k montáži měřících komponent, který je v diplomové práci také nazýván jako tělo vysílacího modulu.

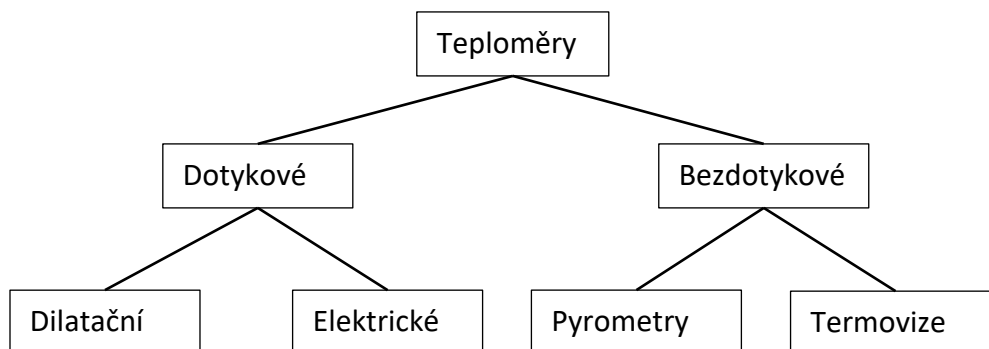
4 Měření teploty

Jelikož navrhnu nový držák měřících karet pro aparaturu EHL, ve kterém se musí zapojit spojovací vedení termočládku, je vhodné se seznámit s problematikou měření teploty a termočládku. Následující kapitola se zabývá okrajově typy teploměrů, a dále podrobněji termočládku, které jsou v mém případě použity pro měření teploty homokinetických kloubů.

Teplota je stavová veličina, kterou používáme k popisu všech tepelných dějů. Přestože dokážeme vnímat teplotu pomocí smyslů, není její přímé měření možné. V praxi se musíme spolehnout na nepřímé metody, kdy teplotu měříme pomocí jiné fyzikální veličiny, která je na teplotě závislá. Zařízení, kterým měříme teplotu obecně nazýváme teploměr. [6]

4.1 Rozdělení teploměrů

Teploměry dělíme do dvou základních skupin podle způsobu, jakým je měřena fyzikální veličina závislá na teplotě a dále v rámci každé skupiny je můžeme rozdělit podle principu jejich funkce, viz obrázek 9. [6]



Obrázek 9: Základní rozdělení teploměrů

4.1.1 Dotykové teploměry

Dotykové teploměry jsou nejpoužívanějším a nejstarším typem teploměrů. Nacházejí své uplatnění jak v profesionální, tak i neprofesionální oblasti použití. Dotykové teploměry můžeme rozdělit do dvou skupin, podle principu jejich činnosti na dilatační teploměry a elektrické teploměry. [6]

Principem dilatačních teploměrů je objemová nebo délková tepelná roztažnost kapalin nebo tuhých látek. Jakékoliv zaznamenávání průběhu měřené hodnoty, či dálkový přenos měřené hodnoty je u tohoto typu teploměrů těžko realizovatelný. [6]



Elektrické teploměry využívají ke své funkci závislosti elektrických veličin na teplotě. Tyto teploměry jsou oproti dilatačním vhodné k záznamu průběhu měřené hodnoty a také k dálkovému přenosu měřené hodnoty. [6]

4.1.2 Bezdotykové teploměry

Bezdotykové teploměry využívají tepelného záření k měření teploty. Můžeme je rozdělit podle různých hledisek, ale základní dělení je na pyrometry a termovize. Bezdotykové teploměry se nehodí pro aplikaci v případě měření teploty kloubového hřídele, jelikož měří především teplotu na povrchu tělesa, se kterým mají vizuální kontakt. Vzhledem k velikosti současných bezdotykových teploměrů, přestože se jejich velikost neustále zmenšuje, není možné měřit teplotu uvnitř kloubu. Z tohoto důvodu se těmito typy teploměrů dále ve své diplomové práci zabývat nebudu. [6]

4.2 Elektrické teploměry

Detailněji se budu zabývat pouze elektrickými teploměry a především termočlánek. Měření a odečítání naměřených hodnot dilatačním teploměrem by bylo, vzhledem k rotaci hřídele, velice těžko realizovatelné a složité, ne-li nemožné. Pro měření teploty kloubového hřídele jsou tedy elektrické teploměry nejvíce vhodné. V současnosti se nejvíce používají tři typy elektrických teploměrů: [6][7]

- Termočlánek
- Kovový odporový teploměr
- Termistor

Kovový odporový teploměr i termistor využívají k měření teplotní závislosti elektrického odporu materiálu a liší se použitým materiálem. Kovové odporové teploměry jsou vyrobeny z čistého kovu, konkrétněji např. platina, měď nebo nikl, ale nejčastěji se používá platinový odporový teploměr. V případě termistorů je použita polovodičová součástka. [6][7]

Termočlánek pracuje na základě termoelektrického jevu a detailněji bude termočlánek představen v následující kapitole. [6]

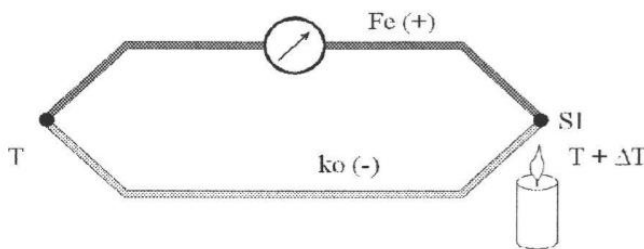
Každý typ výše zmíněných teploměrů má své výhody i nevýhody a je třeba na ně brát zřetel při výběru teploměru. Přehled některých výhod a nevýhod je zobrazen v tabulce 2.

	Termočlánek	Kovový odporový teploměr	Termistor
Výhody	<p>Nepotřebuje napájení</p> <p>Jednoduchost</p> <p>Nízká cena</p> <p>Odolnost</p> <p>Snadná dostupnost</p> <p>Široký rozsah teplot</p>	<p>Nejlepší stabilita</p> <p>Nejvyšší přesnost</p> <p>Lepší linearita</p>	<p>Krátká časová odezva</p> <p>Nízká cena</p>
Nevýhody	<p>Nelinearita signálu</p> <p>Nízké napětí</p> <p>Znalost referenční teploty</p> <p>Nízká stabilita</p>	<p>Vyšší cena</p> <p>Nutný zdroj proudu</p> <p>Větší rozměry</p> <p>Delší časová odezva</p>	<p>Nelinearita</p> <p>Malý pracovních rozsah</p> <p>Nutný zdroj proudu</p>

Tabulka 2: Výhody a nevýhody elektrických teploměrů [6]

4.3 Termočlánek

Termočlánek je elektrické zařízení sloužící k nepřímému měření teploty. Principem jeho funkce je Seebeckův jev, který byl objeven německým fyzikem Thomasem Johnem Seebeckem v roce 1821. Tento jev nastane, pokud spojíme dva vodiče různého materiálu na obou koncích a oba konce mají rozdílnou teplotu, viz obrázek 10. [6][7]



Obrázek 10: Termoelektrický obvod

V takovém případě vzniká termoelektrický obvod, kterým protéká stejnosměrný proud. Termoelektrické napětí v tomto obvodu je pak funkcí rozdílu teplot na obou koncích a materiálu vodičů. Měření toho napětí (také nazývané Seebeckovo napětí) je možné zpětně vypočítat teplotu v měřeném místě. [6][7]

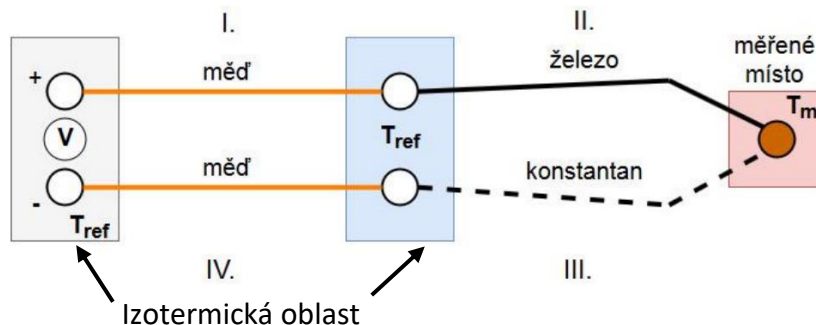
4.3.1 Měření termoelektrického napětí

K měření termoelektrického napětí se používá voltmetr s dostatečným rozlišením, jelikož generované napětí v termoelektrickém obvodu je v řádech milivoltů a změna teploty o jeden stupeň je v řádech mikrovoltů v závislosti na použitém typu termočlánku. Například Seebeckův koeficient pro termočlánek typu K má hodnotu $\alpha = 39,48 \mu V/^{\circ}C$ při $0^{\circ}C$. Při měření voltmetrem neměříme přímo termoelektrické napětí U , ale v důsledku úbytků napětí v obvodu hodnotu u , která je závislá na odporu obvodu termoelektrického článku r_o a na vnitřním odporu voltmetru R . Tento vztah lze zapsat vzorcem:

$$U = u \cdot \frac{R + r_o}{R}. \quad (4.3.1)$$

S rostoucím vnitřním odporem voltmetru R , při konstantním odporu obvodu termoelektrického článku r_o , se měřená hodnota na voltmetru u blíží hodnotě termoelektrického napětí U . V případě číslicových voltmetrů s vysokým vnitřním odporem lze tedy předpokládat, že $u = U$. [6][7]

Typické zapojení používané v běžných měřicích zařízeních je zobrazeno na obrázku 11.



Obrázek 11: Schéma termočlánku [8]

V rámci měřicího přístroje jsou používány měděné vodiče a tím dojde ke vzniku větví I a IV. Tyto větve mohou také vzniknout při použití prodlužovacího vedení z mědi, jelikož je termočlánek vyroben ze vzácných kovů a prodloužení jeho vodičů by bylo nákladné. V takových případech se spoje mezi vodiči termočlánku a měděným vedením chovají jako další termočlánek a měřené napětí je zvýšené o parazitní napětí. To by zkomplikovalo měření a bylo by nutné měřit teplotu v oblastech označených šedou a modrou barvou v obrázku 11. Toho se lze vyvarovat, pokud jsou tyto oblasti tzv. izotermické oblasti a spoje obou větví leží v těchto oblastech. Poté je přírůstek napětí ve větvi I a IV stejný a dojde k jeho odečtení. Následně se



měří napětí, které přísluší pouze vlastnímu termočlátku. Pro vyhodnocení teploty je pak dostačující zjištění referenční teploty jen v modré oblasti, kterou nazýváme studený konec a tento proces nazýváme kompenzace studeného konce. [6][7][8]

4.3.2 Kompenzace studeného konce termočlátku

Za účelem kompenzace studeného konce termočlátku se nejčastěji používají dvě metody:

- 1) Použití ledové lázně, do které se ponoří referenční bod. Ledová lázeň udrží referenční bod velmi přesně na teplotě 0 °C. To je výhodné i pro převod měřeného termoelektrického napětí na teplotu, kdy se používají tabulky a polynomy z normy ČSN EN 60584-1 ED.2, které jsou pro referenční teplotu 0 °C. [6][7][8]
- 2) Druhý v současnosti často používaným způsobem je tzv. softwarová kompenzace studeného konce. Spočívá v přítomnosti jiného typu teploměru, např. polovodičový teploměr, v izotermické oblasti studeného konce, který změří referenční teplotu. Dále se tato referenční teplota převede na ekvivalentní termoelektrické napětí příslušného termočlátku. Toto napětí se poté sečte s měřeným termoelektrickým napětím termočlátku a výsledné termoelektrické napětí odpovídá referenční teplotě 0 °C. Pro převod měřeného termoelektrického napětí na teplotu se opět použijí tabulky a polynomy z normy ČSN EN 60584-1 ED.2. Důležité je správné určení referenční teploty, jelikož chyba při tom vzniklá se přenáší na výslednou měřenou teplotu. [6][7][8]

4.3.3 Převod termoelektrického napětí na teplotu

Průběh teploty v závislosti na termoelektrickém napětí generované termočlánkem je obecně nelineární závislost. K aproximaci tohoto průběhu používáme polynomy vyššího řádu:

$$T = a_0 + a_1 \cdot u + a_2 \cdot u^2 + \dots + a_n \cdot u^n, \quad (4.3.2)$$

kde u je měřené termoelektrické napětí, T zjišťovaná teplota a a_0 až a_n jsou koeficienty pro příslušný termočlánek. Jednotky měřeného termoelektrického napětí a měřené teploty se odvíjejí od jednotek dosazovaných koeficientů a_0 až a_n . Tyto koeficienty jsou uvedeny v normě ČSN EN 60584-1 ED.2. [6][7]

Je také možné použít převodní tabulky, viz obrázek 12. Koeficienty pro polynomy i převodní tabulky jsou pro referenční teplotu 0 °C. [6][7]

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397	0
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798	10
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163	1,203	20
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571	1,612	30
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982	2,023	40
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395	2,436	50
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810	2,851	60
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225	3,267	70
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640	3,682	80
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055	4,096	90
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468	4,509	100
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879	4,920	110
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288	5,328	120
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694	5,735	130
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098	6,138	140
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500	6,540	150
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901	6,941	160
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300	7,340	170
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699	7,739	180
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099	8,138	190
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499	8,539	200
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900	8,940	210
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302	9,343	220

Obrázek 12: Převodní tabulka pro termočlánek typu K

4.3.4 Typy termočlánků

Různou kombinací materiálů (často slitiny) vodičů tvořící termočlánek, získáme termočlánky s rozdílnými vlastnostmi a odlišnou aplikací. Od materiálu se odvíjí cena, rozsah měřitelných teplot, míra nelinearity, přesnost měření a další vlastnosti. Jednotlivé typy termočlánků jsou označeny různými písmeny a také charakteristickou barvou, která se řídí normou ČSN EN 60584-3. Přehled typů termočlánků spolu se základními informacemi a barevným označením dle zmíněné normy je zobrazen v tabulce 3. [6][7]

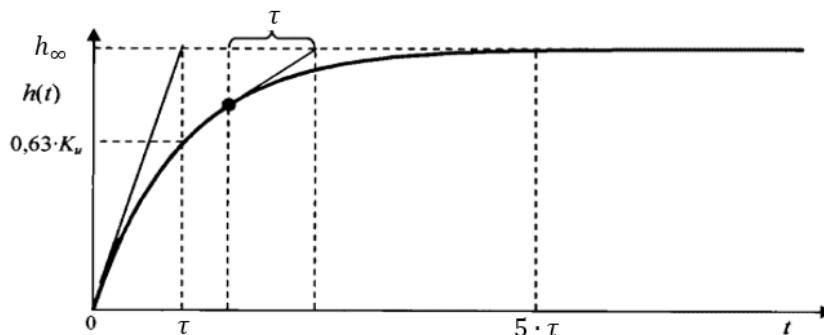
Typ	Materiál		Měřicí rozsah [°C]	Přesnost měření Standart
	+	-		
B	Platina – rhodium 30 %	platina – rhodium 6 %	870 – 1700	$\pm 0,5 \%$
E	nikl – chrom	měď – nikl	-270 – 0	$\pm 1,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 1,0 \%$
			0 – 870	$\pm 1,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 0,5 \%$
J	železo	měď – nikl	0-760	$\pm 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 0,75 \%$
K	nikl – chrom	nikl – hliník	-200 – 0	$\pm 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2 \%$
			0 – 1260	$\pm 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 7,5 \%$
N	nikl – chrom – křemík	nikl – křemík – hořčík	0 – 1260	$\pm 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 0,75 \%$
R	platina – rhodium 13 %	platina	0 – 1480	$\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 0,25 \%$
S	platina – rhodium 10 %	platina	0 – 1480	$\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 0,25 \%$
T	měď	měď – nikl	-200 – 0	$\pm 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 1,5 \%$
			0 – 370	$\pm 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebo $\pm 0,75 \%$

Tabulka 3: Přehled termočlánků [9]

4.3.5 Přejchodová charakteristika termočlánku

Odezva termoelektrického napětí termočlánku na změnu teploty měřeného prostředí není vlivem tepelné setrvačnosti a kapacity termočlánku, dané hmotou spoje, okamžitá. Při měření v prostředí s proměnlivou teplotou je nezbytné tento fakt neopomenout. Obecně odezvu přístroje a snímače na skokovou změnu vstupní veličiny nazýváme přechodovou charakteristikou. Experimentálně bylo zjištěno, že přechodová charakteristika termočlánku je

popísána diferenciální rovnicí prvního řádu. Průběh takovéto charakteristiky je zobrazen na obrázku 13.



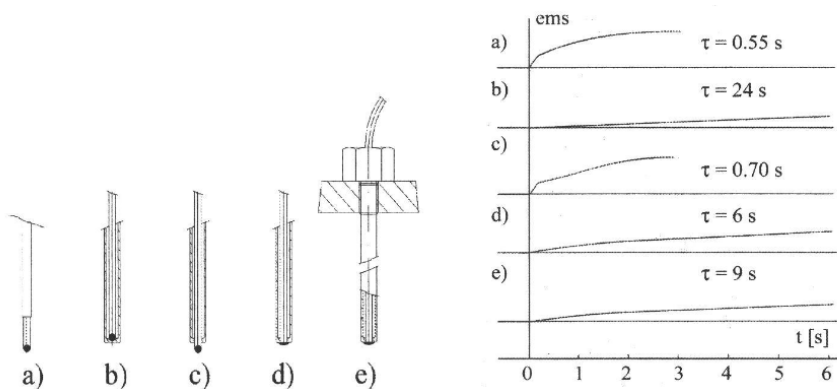
Obrázek 13: Přechodová charakteristika 1. řádu

Odezva termočláneku na skokovou změnu měřené teploty odpovídá rovnici exponenciály:

$$h(t) = h_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (4.3.3)$$

kde h_{∞} je konečná hodnota a τ časová konstanta, jež se obecně definuje jako doba, za kterou dosáhne výstupní veličina 63,2 % konečné hodnoty h_{∞} při skokové změně vstupní veličiny. Časová konstanta tedy určuje rychlost, s jakou se údaj snímače blíží konečné hodnotě. [5,6]

Na obrázku 14 jsou zobrazeny některé způsoby uložení termočláneků a vliv tohoto uložení na časovou konstantu. Z obrázku je patrné, že nejrychleji se na konečné hodnotě ustálí holý termočlánek. Běžně se termočláneky vkládají do pouzder, aby bylo samotné tělo termočláneku chráněno proti mechanickému poškození. V takovém případě se hodnota časové konstanty výrazně zvyšuje.



Legenda:

- a) holý termočlánek
- b) vsunutý do pouzdra
- c) vložený do otvoru ve dnu pouzdra
- d) svařený s pouzdrům
- e) termočlánek podle d) zašroubovaný do ocelové desky.

ems = napětí termočláneku

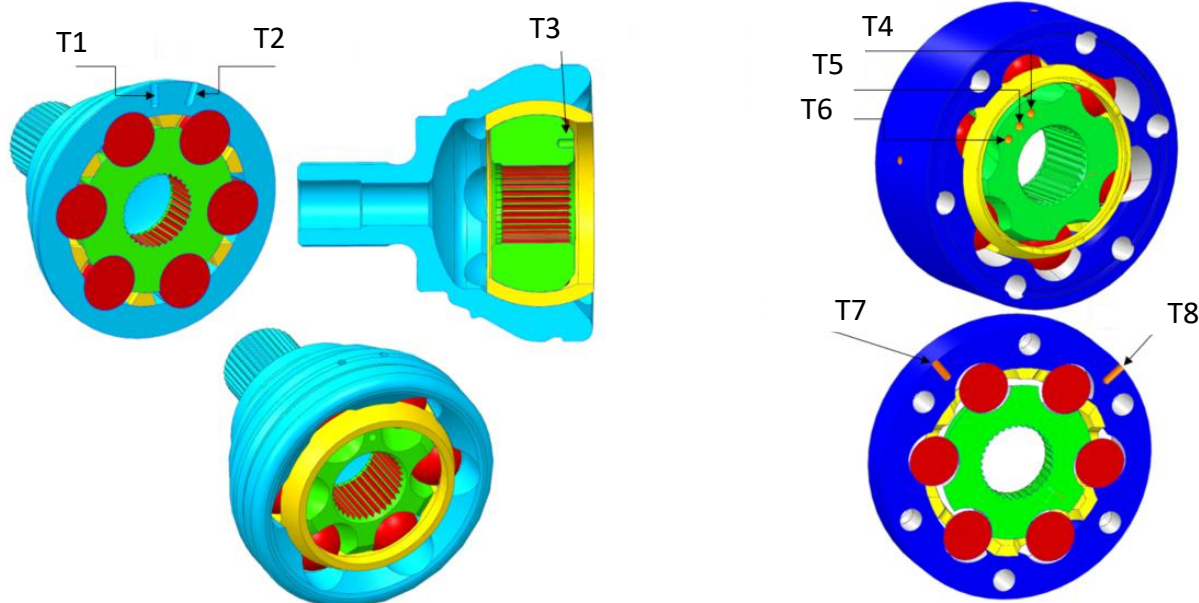
Obrázek 14: Vliv způsobu vložení termočláneku

5 Realizace měření teploty homokinetických kloubů hřídele

Za účelem měření teploty jsou do kloubů navrtány válcové díry, které slouží k zasunutí teploměrů. Velikost otvorů nesmí být příliš veliká, aby se nenarušila únosnost kloubu a také nedošlo k výraznému ovlivnění rozložení teplotního pole v kloubu. To klade rozměrové požadavky na teploměry, které musí být dostatečně malé, aby šly zasunout do otvorů.

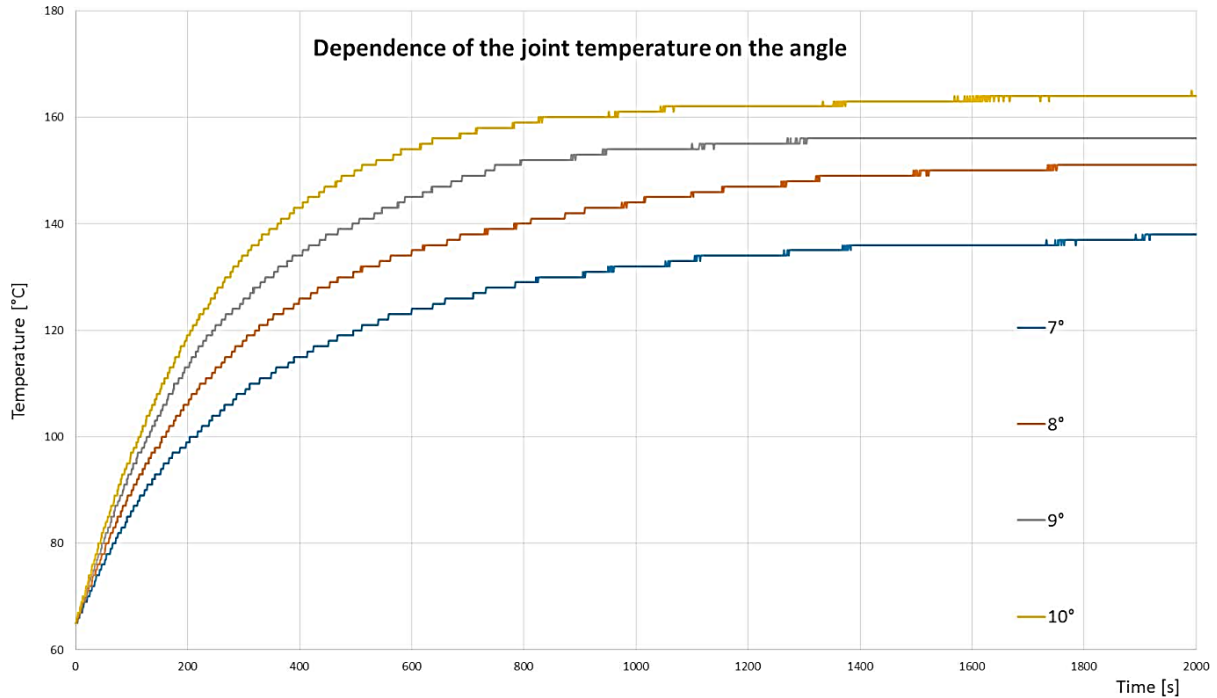
Na zkušebním stanovišti jsou zkoušeny kloubové hřídele dodané společností Škoda auto a.s. Dodané kloubové hřídele jsou předem osazeny termočlánky a byly použity termočlánky typu K. Umístění termočlánků ve stejnoběžných kloubech je zobrazeno na obrázku 15. Celkem je do kloubového hřídele navrtáno 8 otvorů. Do kuličkového kloubu bez axiálního posuvu, levá část v obrázku 15, jsou navrtány 3 otvory. Ve vnějším tělese (světle modrá brava) jsou vyvrtány dva otvory pro termočlánky. Jeden je na zátěžné straně drážky pro kuličky a druhý je na odlehčené straně drážky pro kuličky. Teoreticky by mohla být vzhledem k zatížení měřena rozdílná teplota na protějších stranách drážky vnějšího tělesa. Třetí termočlánek je umístěn do vnitřního tělesa kloubu.

V případě kloubu na straně převodovky (v pravé části na obrázku 15) je použit kuličkový kloub s axiálním posuvem. Opět jsou dva termočlánky umístěny ve vnějším tělese obdobným způsobem jako v případě kuličkového kloubu u kola. Ve vnitřním tělese jsou na obrázku zobrazeny 3 otvory pro umístění termočlánků, opět pro měření zatížené a odlehčené strany drážky, ale v případě dodaného kloubového hřídele je termočlánek osazen pouze jeden otvor.



Obrázek 15: Umístění teploměrů v kloubech, Škoda auto a.s.

Z předchozích měření realizovaných na zkušebním stavu byla naměřena závislost teploty v kloubech na čase pro různá zalomení, viz obrázek 16. Z tohoto obrázku je možné si všimnout podobnosti s přechodovou charakteristikou prvního řádu zmíněné v kapitole 4.3.5. Měřené teploty kloubů se asymptoticky blíží skutečné hodnotě a nastane tedy okamžik, kdy je z ekonomických důvodů možné měřenou teplotu považovat za ustálenou. Vzhledem k relativně dlouhé době měření v jednom zátěžném stavu a potenciálně velikému množství zátěžných stavů se jeví možnost automatizace měření teploty kloubového hřídele jako námět k dalšímu vývoji zkušebního stanoviště. V takovém případě je informace o ustálení teploty stěžejní pro ukončení měření a přechodu na jiný, předem definovaný zátěžný stav.



Obrázek 16: Průběh teploty kloubů kloubového hřídele, naměřeno na Julisce

Při měření proměnlivé teploty je třeba brát ohled i na časovou konstantu samotného termočláčku. Skutečná teplota je měřena s jistým časovým zpožděním v závislosti na provedení termočláčku a je nutné posoudit, jestli je toto zpoždění dostatečně malé vzhledem k rychlosti ustálení teploty v kloubech pro daný zátěžný stav. Termočláčky jsou do otvorů vsunuty holé a zajištěny lepidlem, či tmelem, čímž je zajištěna tepelná vodivost. Lze předpokládat, že časová konstanta termočláčku má velmi nízkou hodnotu, viz obrázek 14 případ a). Časová konstanta stejnoběžného kloubu má hodnotu v řádech stovek sekund, viz obrázek 16, a je možné tedy prohlásit, že vliv časové konstanty termočláčku na měření je velice malý a není nutné při vyhodnocení ustálení teploty kloubu brát v úvahu zpoždění způsobené časovou konstantou termočláčku.

6 Měřicí aparatura Dx Telemetry

Aparatura Dx Telemetry je měřicí telemetrický systém vyroben firmou Caemax technologie. Tato měřicí aparatura se skládá z vysílacích modulů a přijímací jednotky. Nabízí praktické řešení měření na rotující součásti díky své bezdrátové technologii přenosu měřeného signálu a bezdrátovému napájení vysílacích modulů, připevněných na rotující součásti. Umístěním vysílacího modulu blízko sensorů a bezdrátovým přenosem měřeného signálu lze výrazně snížit délka spojovacích vodičů a zároveň dochází k brzké digitalizaci měřeného signálu. Tím se výrazně snižuje riziko ovlivnění měřeného signálu okolními jevy působícími na spojovací vodiče.

Měřicí aparatura se vyznačuje svojí univerzálností, kdy lze na přijímací moduly připojit různé sensory a je tedy vhodná pro různé aplikace. U výrobce lze dokoupit příslušenství ulehčující montáž a také komplexní jednotky pro konkrétní aplikaci.

6.1 Vysílací modul SCT

Standartní provedení vysílacího modulu je zobrazeno na obrázku 17. Jedná se o velice kompaktní modul se zvýšenou odolností splňující certifikaci IP68 a použitelný v teplotním rozsahu $-40 - +85$ °C. Je tedy vhodný pro použití jak v laboratoři, tak i ve venkovním prostředí za reálného provozu, např. při měření teploty kloubových hřídelů namontovaných přímo na automobilu. [10][11][12]



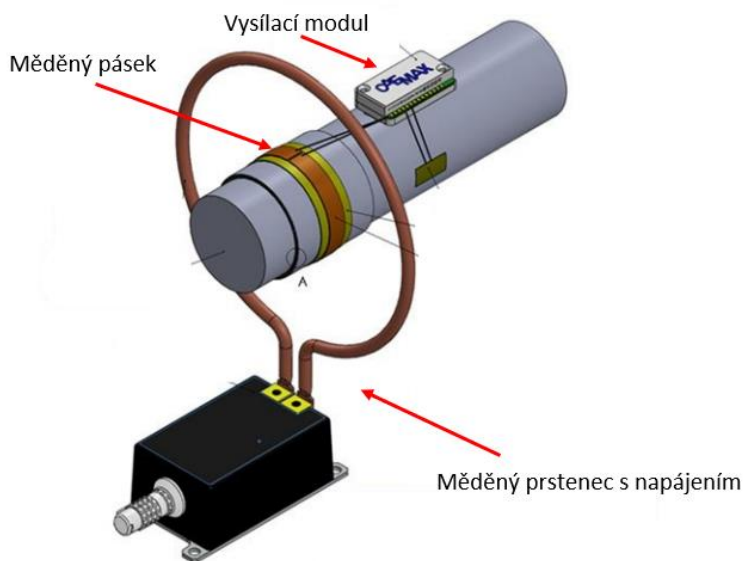
Obrázek 17: Standartní vysílací modul

Na vysílací modul lze připojit různé napěťové signály na příslušné konektory dle rozsahu. Konektory pro nízkonapěťový signál mají rozsah ± 2 mV – ± 2 V a slouží k připojení snímačů jako jsou tenzometry a termočlánky, které generují velice malé hodnoty napětí. U tenzometrů

je maximální počet měřených kanálů vysílacím modulem dán typem zapojení, zda se jedná o plný můstek, či půl můstek. Vysílací modul je schopen měřit najednou dva plné můstky nebo čtyři půl můstky. Maximální počet měřených termočlánků je dán rovněž způsobem zapojení, zda se jedná o diferenční zapojení nebo o single-ended zapojení. V prvním případě může modul měřit 2 termočlánky zároveň a v druhém 4 termočlánky zároveň. Schéma obou typů zapojení pro termočlánky je zobrazeno v příloze 1. [10][11][12]

Dále je vysílací modul vybaven konektory pro vysokonapěťové signály v rozsahu $\pm 0,2 V - \pm 22 V$ na které lze připojit např. snímače tlaku, snímače posuvu, akcelerometry atd. Přímo do vysílacího modulu je navíc integrován snímač teploty, napájecího napětí a otáček. Kombinací různých senzorů umožňuje vysílací modul najednou měřit maximálně až 6 senzorů. Bližší technické informace o vysílacím modulem jsou obsaženy v technickém listě, viz příloha 2. [10][11][12]

Vysílací modul se napájí z baterie připevněné spolu s modulem na měřené součásti nebo pomocí principu magnetické indukce zobrazeném na obrázku 18. Na měřenou součást je nalepen měděný pásek s vodiči a kolem měděného pásku je umístěn měděný prstenec s napájením. Měděný prstenec je zdrojem proměnlivého magnetického pole a indukuje napětí v měděném pásku na součásti. Tím se zajistí nepřetržité napájení vysílacího modulu na součásti bez potenciálního rizika přerušení napájení, které hrozí v případě použití baterie a následného vybití baterie.



Obrázek 18: Napájení vysílacího modulu na hřídeli

6.2 Přijímací jednotka

Přijímací jednotka je zobrazena na obrázku 19. Čelní panel je vybaven LCD displejem a tlačítky, sloužící k orientaci v menu, ve kterém lze spárovat přijímací jednotku s vysílacími moduly, nakonfigurovat měřené veličiny nebo zobrazit měřené veličiny na displeji po zahájení měření. Přijímací jednotku je také možné konfigurovat v počítači pomocí ethernetového připojení. Konfigurace se ukládají na SD kartu, která je vložena do přijímací jednotky. [10][11][12]



Obrázek 19: Přijímací jednotka Dx Telemetry

Přijímací jednotka umožňuje najednou připojit až 4 vysílací moduly. K akvizici dat z přijímací jednotky slouží buď 6 analogových výstupů na čelní straně, viz obrázek 19, nebo je možné použít sběrnici dat CAN. Každému analogovému výstupu lze přiřadit jeden měřený kanál a napětí těchto výstupů má rozsah $\pm 10 V$. Komunikace pomocí sběrnice dat CAN, v přijímací jednotce Dx Telemetry, je definována specifikací CAN 2.0B a řídí se normou ISO 11898. Příslušným konektorem se nachází na zadní straně přijímací jednotky a jedná se o 9-ti pinový D-SUB konektor. V nastavení přijímací jednotky lze vybrat měřené kanály, jejichž signál se odešle skrze komunikační síť CAN do počítače, či jiného zařízení. Za tímto účelem je přijímací jednotka schopna vygenerovat databázový soubor CAN, o jehož funkci se detailněji zmíním v kapitole 7.1. Pro přenos měřených dat z přijímací jednotky do počítače bude použita sběrnice dat CAN a důvody tohoto rozhodnutí budou blíže přiblíženy v kapitole 14.2. [10][11][12]

Maximální vzorkovací frekvence měřící aparatury Dx Telemetry závisí na počtu připojených vysílacích modulů SCT a na počtu měřených kanálů. Tato závislost je zobrazena v obrázku 20. Další technické informace o přijímací jednotce jsou obsaženy v technické listě, viz příloha 3. [10][11][12]

Počet modulů SCT	Počet kanálů/modul	Max. vzorkovací frekvence [Hz]
1	1	4800
	2	2400
	3	1600
	4	1200
2	1	3600
	2	1800
	3	1200
	4	800
3 or 4	1	1000
	2	400
	3	200
	4	200

Obrázek 20:Vzorkovací frekvence Dx Telemetry

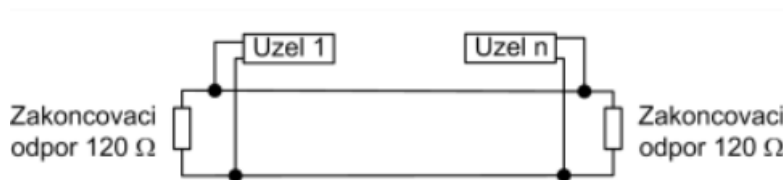
7 Sběrnice dat CAN

Jak již bylo zmíněno dříve, pro přenos dat z měřících aparatur Dx Telemetry a EHL bude použita sběrnice dat CAN a v této kapitole budou zmíněny základní vlastnosti této sběrnice.

CAN (Controller Area Network) je sériová komunikační síť vyvinutá firmou Bosch v roce 1985. Rychlé rozšíření v automobilovém a průmyslovém použití vedlo ke standardizaci této sběrnice dat v normě označené ISO 11898. Zařízení připojená v komunikační síti CAN, také nazývané uzly, si mezi sebou posílají data v tzv. rámcích (anglicky frames) nebo zprávách (anglicky messages). Teoreticky může být ke sběrnici připojen libovolný počet uzlů, ale prakticky je, s ohledem na zatížení sběrnice, počet omezen na 64 uzlů. [12][13]

Rozlišuje se několik typů zpráv: datové zprávy, žádost o data, zpráva o chybě a zpráva o přetížení. Každá zpráva je uvozena identifikátorem, který je unikátní a udává její význam a prioritu. V případě kolize dvou zpráv je doručena přednostně zpráva s vyšší prioritou a dále na základě identifikátoru lze zajistit, aby zprávu přijalo pouze zařízení, kterého se týká. Sběrnice dat CAN používá dva typy zpráv dle specifikace CAN 2.0A a CAN 2.0B. Rozdíl mezi těmito dvěma specifikacemi je pouze v délce identifikátoru zprávy. V každé zprávě je vyčleněna datová oblast, ve které jsou obsažena odesílaná data. Maximální velikost této oblasti je 64 bitů. Každá zpráva dále obsahuje kontrolní pole obsahující 15-ti bitový cyklicky redundantní kód (CRC) sloužící k detekování chyb při přenosu dat v síti. [13][14]

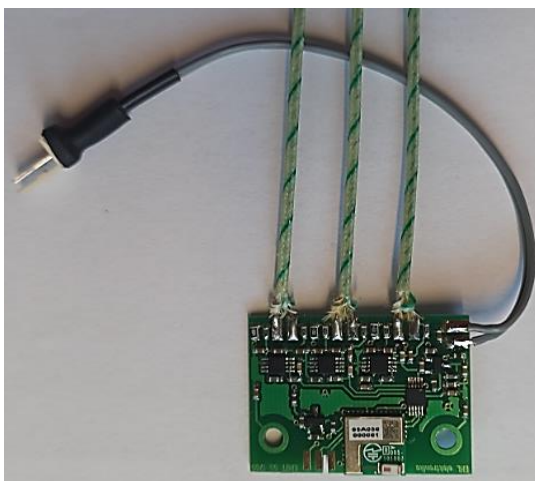
Fyzická vrstva obsažená v normě ISO 11898 blíže specifikuje, jak se po sběrnici přenášejí signály. Nejpoužívanější fyzickou vrstvou je v současnosti High-Speed CAN (ISO 11898-2). Sběrnice tvoří dvojice vodičů označovanými CAN_H a CAN_L. Úroveň na sběrnici pak nabývá dvou hodnot, dominant či recessive, které jsou zobecněným ekvivalentem logických úrovní. Konkrétní hodnota je dána rozdílem napětí mezi těmito dvěma vodiči. V normě se pro úroveň recessive definuje napětí mezi příslušnými vodiči $U_{diff} = 0 V$, a pro úroveň dominant $U_{diff} = 2 V$. Za účelem eliminace odrazů na vedení jsou normou pro High-Speed CAN definovány zakončovací odpory o velikosti $R = 120 \Omega$, které musí být připojeny na obou koncích, viz obrázek 21. [13][14]



Obrázek 21: Fyzické uspořádání sítě CAN podle ISO 11898 [13]

8 Měřicí aparatura EHL

Měřicí aparatura EHL je telemetrický systém určený k měření teploty pomocí termočlánků typu K. Skládá se z měřících karet, obrázek 24, baterie pro napájení měřící karty a přijímacího modulu s anténou, obrázek 25. Na jednu měřící kartu je možné připojit maximálně 3 termočlánky.



Obrázek 24: Měřící karta EHL

Měřená data jsou z měřící karty bezdrátově odesílána do přijímacího modulu, ze kterého jsou dále odeslána do počítače již převedená na teplotu. Přijímací modul, viz obrázek 25, disponuje výstupem v podobě USB konektoru, který lze snadno připojit do počítače a spárovat modul s měřícím softwarem EHL navrženým pro účely měření teploty na zkušebním stavu.



Obrázek 25: Přijímací modul EHL s anténou

V softwaru EHL je zobrazen stav připojení modulu k měřícím kartám a lze tím zkontrolovat správné připojení měřících karet k přijímacímu modulu. Dále software nabízí možnost nastavit



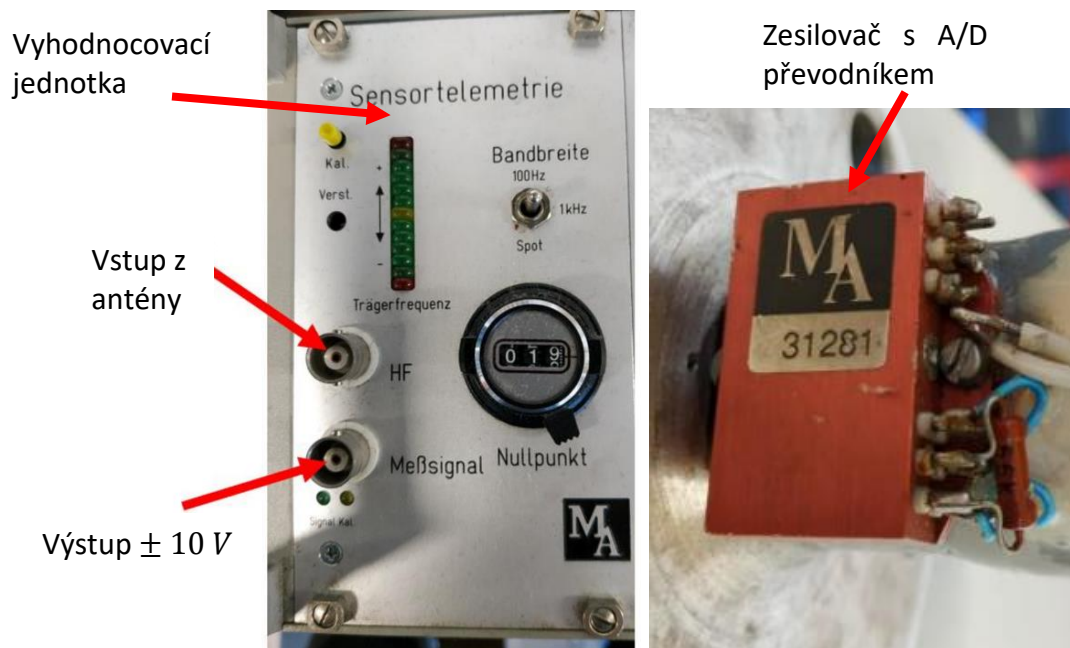
frekvenci dat, buď 1 Hz nebo 10 Hz. Frekvence 1 Hz je docílena zanedbáním některých naměřených hodnot v softwaru, jelikož signál z termočlánků je vzorkován a poslán do přijímacího modulu frekvencí 10 Hz. Měřená data se zobrazují v grafu a dále je možné jejich ukládání do textového souboru ve formátu .txt. V softwaru EHL je také implementována funkce vyhodnocení teploty. Principem je nastavení změny měřené teploty a doby, po kterou měřená teplota nevykáže změnu vyšší, než byla stanovena. Pokud je tato podmínka splněna, teplota se vyhodnotí jako ustálená. Kromě USB výstupu disponuje přijímací modul ještě D-SUB konektory pro sběrnici dat CAN. Sběrnice je v modulu naprogramována jen pro čtení zpráv. Po konzultaci s firmou EHL byla do přijímacího modulu doprogramována i funkce odesílání zpráv a následně jsem vytvořil příslušný databázový soubor formátu .dbc. Díky tomu lze měřená data z této měřicí aparatury odesílat po sběrnici CAN do počítače a dále zpracovat v LabVIEW programu. Tím se zároveň docílí unifikace akvizice dat z měřících aparatur Dx Telemetry a EHL. Také je umožněno použití funkce vyhodnocení teploty, která je implementována v mnou navrženém LabVIEW programu, jako jeden z rozhodovacích parametrů pro případ automatizace zkušebního stanoviště a přechodu na další zátěžný stav, jelikož ovládání dynamometru se realizuje právě skrze LabVIEW.

Aby bylo možné novou měřicí aparaturu EHL použít na zkušebně pro měření teploty na kloubovém hřídeli, musel jsem navrhnout, vyrobit a zkompletovat unikátní držáky, do kterých se namontují měřící karty spolu s napájením a budou sloužit k montáži měřících karet na kloubovém hřídeli. Zkompletované držáky měřících karet dále v diplomové práci označuji jako vysílací moduly aparatury EHL a samotné držáky jako tělo vysílacího modulu. Návrhem těla vysílacího modulu EHL se podrobněji zabývám v kapitole 10.

9 Aparatura MANNER pro měření axiální síly kloubového hřídele

Pro měření axiální síly kloubových hřídelů je použit telemetrický systém od výrobce MANNER Sensortelemetrie, který je zobrazen v obrázku 26. K měřicí aparatuře se připojují sensory jako jsou tenzometry, odporové teploměry a termočlánky. Nevýhodou této aparatury je schopnost měřit pouze jeden kanál. Z tohoto důvodu se používá právě pro měření odporové axiální síly použitím tenzometrů ve vhodném můstkovém zapojení. [16]

Můstek se připojuje k zesilovači signálu, jenž napájí tenzometry a obsahuje i 14-ti bitový A/D převodník převádějící signál do digitální podoby, ve které je přenášen z rotorové části na statorovou. Citlivost zesilovače lze měnit připájením rezistorů dle tabulky v technickém listě. Zesilovač je na hřídeli napájen skrze anténu na základě principu magnetické indukce a zároveň tato anténa slouží k přenosu digitálního signálu využitím frekvenční modulace. Statorová anténa je připojena k vyhodnocovací jednotce, ve které se signál dále zpracovává. Výstupem z vyhodnocovací jednotky je analogový signál v rozsahu $0 - \pm 10 V$. Kalibrační křivka má lineární průběh a je nastavena určením nulové polohy a následným zatížením pro hodnotu výstupního signálu $10 V$. K tomu slouží dvojice šroubků na čelní straně. [16][17]

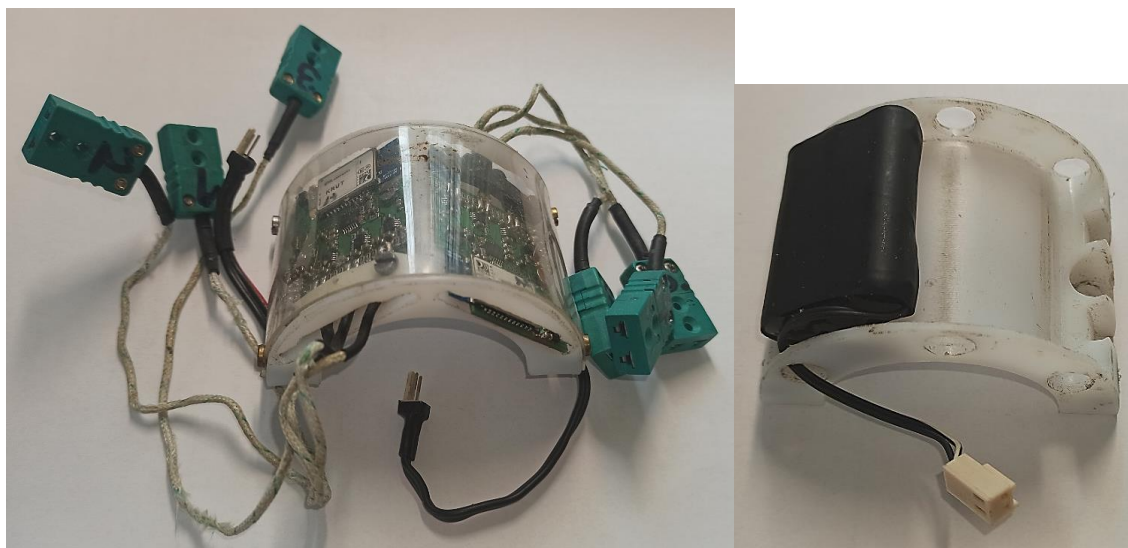


Obrázek 26: Měřicí aparatura Manner pro měření axiální síly

10 Konstrukční návrh těla vysílacích modulů aparatury EHL

V této kapitole se budu zabývat konstrukčním návrhem a výrobou těla vysílacího modulu EHL, které zajišťuje připevnění měřících karet a baterie sloužící k napájení na kloubový hřidel.

Při konstrukčním návrhu nových vysílacích modulů jsem vycházel ze starého provedení u starší verze aparatury EHL, viz obrázek 27.



Obrázek 27: Starý vysílací modul aparatury EHL

Velikosti šroubů i základní rozměry budou při návrhu odvozeny od starého konstrukčního provedení. Není tedy potřeba navrhnout nové šroubové spoje, jelikož byly již testovány v průběhu let a nedošlo k žádným potížím. Od začátku návrhu je brána v potaz technologie výroby těla modulů. Vysílací moduly staré měřící aparatury jsou vyrobeny z plastového materiálu kombinací výrobní technologie soustružení a frézování. Pro výrobu nových vysílacích modulů jsem zvolil technologii 3D tisku z plastu. Tato technologie je dostupná, levná a jednoduchá. Nevýhodou je výrobek s anizotropií v důsledku technologie výroby. Tato problematika a vhodná orientace výrobku při tisku bude blíže rozebrána v kapitole 10.6. Bližší pevnostní rozbor těla vysílacího modulu a případná MKP simulace namáhání je náročná vzhledem k anizotropii materiálu a není přímo předmětem této diplomové práce. V případě volby tloušťky stěn, především dna a bočnic, zesílím stěny oproti původnímu řešení vysílacího modulu a zvolím vhodnou orientaci, aby byla příznivě orientována plastová vlákna vzhledem k zatížením, blíže v kapitole 10.6.

10.1 Požadavky na nové konstrukční provedení těla vysílacích modulů aparatury EHL

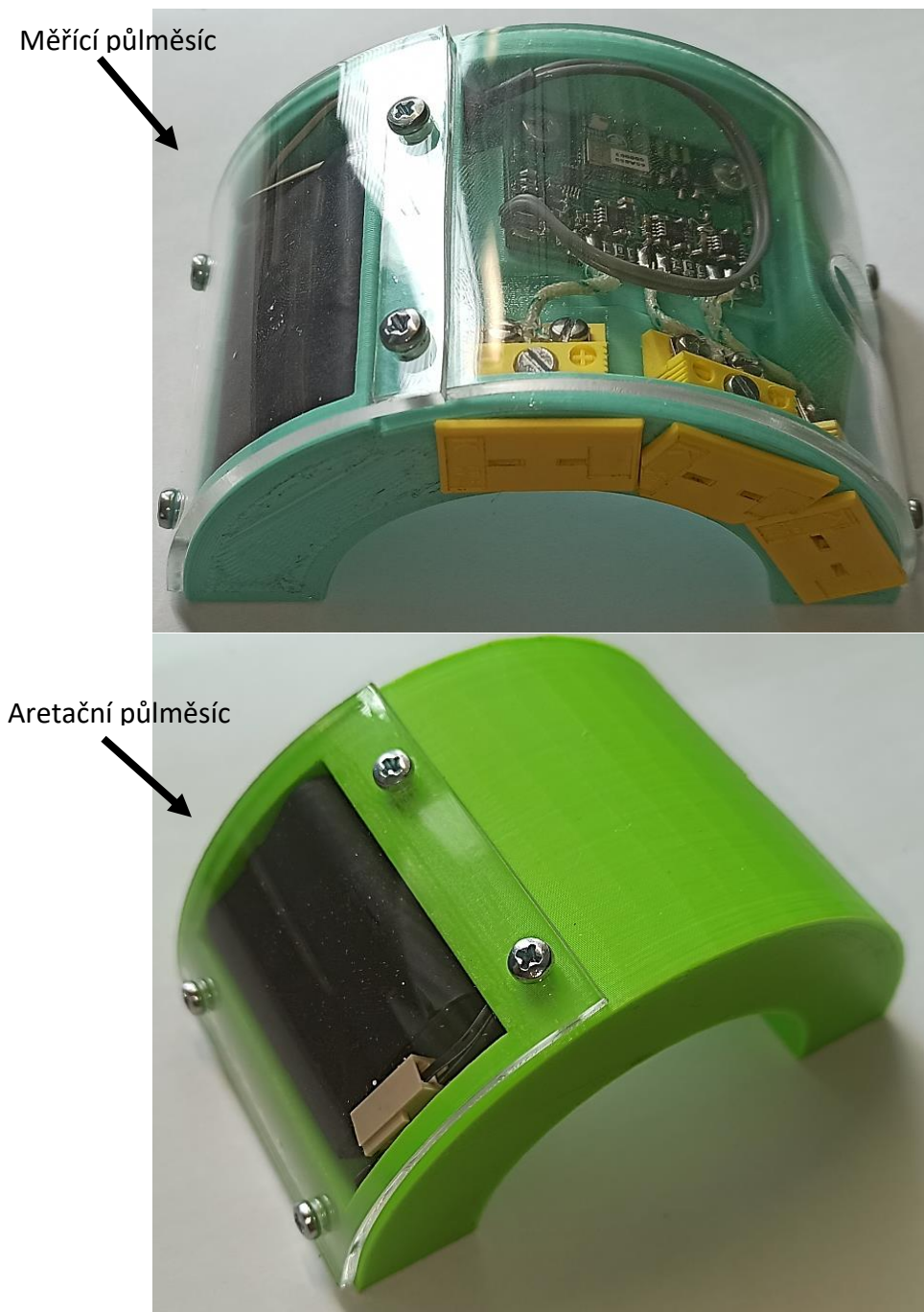
Jak již bylo zmíněno dříve, u starých vysílacích modulů se projevíly některé nedostatky, související hlavně se spojovacími vodiči termočlánků a konektory. Konektory pro termočlánky nejsou integrovány v těle vysílacího modulu, a to při měření vyžaduje jejich přichycení k měřené součásti, aby nedošlo k nežádoucímu namáhání vodičů odstředivou silou, polétávání za rotace a případnému odtržení konektoru. Přichycením a následným uvolněním konektorů dochází k ohýbání spojovacích vodičů a po čase k jejich přerušení, čímž je měřicí aparatura znehodnocena a vyžaduje servisní zásah.

Při konstrukčním návrhu držáku pro nové vysílací moduly dbám na splnění těchto požadavků, které vyplynuly z předchozího používání starých modulů aparatury EHL:

- Montáž na hřídel mezi homokinetickými klouby kloubového hřídele od minimálních průměrů až do maximálního průměrů 60 mm (zpravidla duté provedení hřídele)
- Možnost měřit tříkanálově i šestikanálově na kloubovém hřídeli
- Zabezpečit měřicí karty spolu s napájením a konektory pro termočlánky na kloubovém hřídeli
- Zakomponovat do těla měřicí aparatury konektory pro termočlánky
- Možnost měřit 6 termočlánků zároveň
- Umožnit snadnou a rychlou výměnu baterie
- Jednoduchá a levná výroba

Pro splnění požadavků na tělo vysílacího modulu jsem navrhl a vyrobil 4 součástí a budu je nadále rozlišovat jako měřicí půlměsíce, viz obrázek 28 horní část, a aretační půlměsíce, viz obrázek 28 dolní část. Do měřicího půlměsíce je namontována měřicí karta s příslušnými konektory pro termočlánky. Tím lze předejít problému s přerušením vodičů a znehodnocení vysílacích modulů opakovaným používáním, jak bylo popsáno výše v případě starých vysílacích modulů. Dále je v půlměsíci vyčleněn prostor pro montáž baterie sloužící k napájení měřicí karty. Jeden měřicí půlměsíc je pak schopen měřit až 3 termočlánky zároveň. Aretační půlměsíc slouží jako protikus k měřicímu půlměsíci, aby bylo možné sestavu namontovat na hřídel pomocí svěrného spoje. V aretačním půlměsíci je vyčleněn prostor pro umístění protizávaží

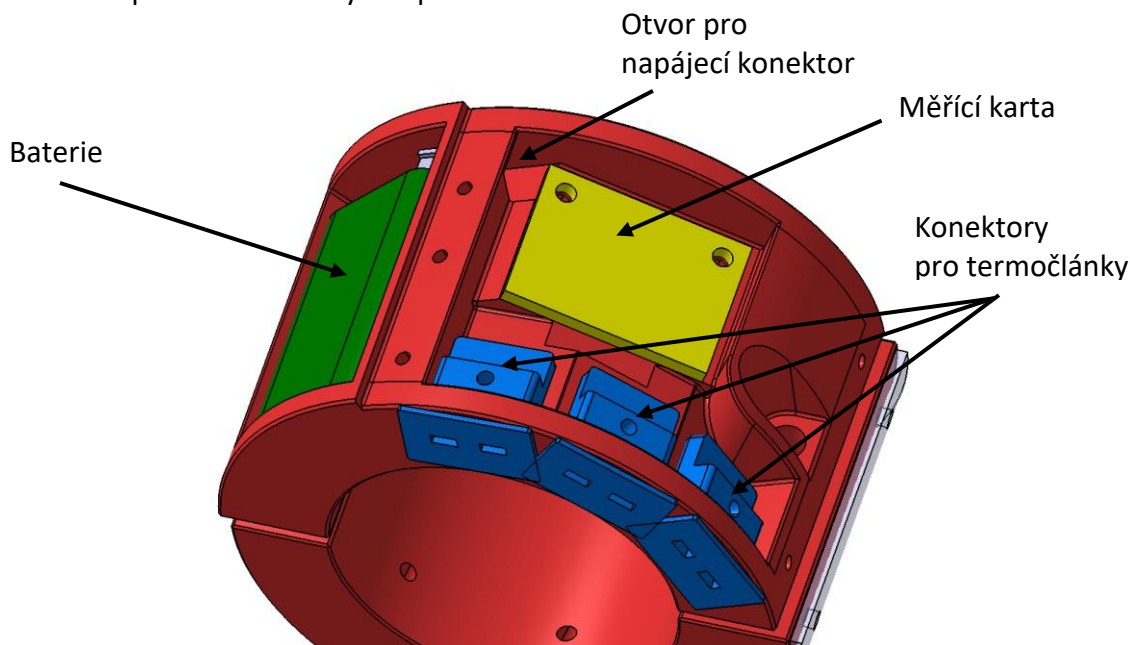
umožňující vyvážení baterie měřícího půlměsíce. Kombinací měřících a aretačních půlměsíců je docíleno univerzálnosti vysílacích modulů, kdy lze vytvořit buď jeden vysílací modul schopný měřit najednou až 6 termočlánků (spojení dvou měřících půlměsíců) nebo dva vysílací moduly, které jsou schopny měřit po 3 termočlánkách zvlášť (spojení měřícího a aretačního půlměsíce). To se může využít např. při montáži vysílacích modulů přímo na kloubové hřídele v automobilu a měřit levý i pravý kloubový hřídel vozidla zároveň.



Obrázek 28: Měřící a aretační půlměsíc

10.2 Návrh měřícího půlměsíce

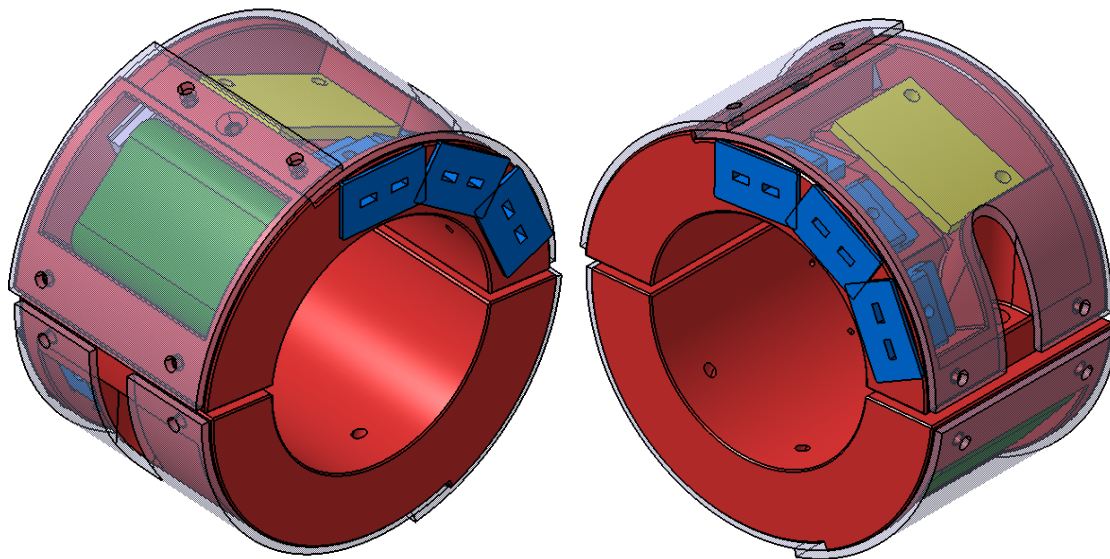
Do měřícího půlměsíce se musí namontovat měřící karta, 3 konektory a baterie. Zároveň nesmí dojít k výraznému nárustu vnějších rozměrů vysílacího modulu oproti předchozímu modelu. Prostor měřícího půlměsíce jsem rozdělil do dvou částí, viz obrázek 29. První část slouží pro namontování měřící karty, 3 konektory a spojovacího vedení mezi konektory a měřící kartou. Druhá část je poté od první oddělena přepážkou a je zde vyhrazen prostor pro umístění baterie. Toto oddělení je výhodné, aby byl zamezen zásah obsluhy v přímé blízkosti měřící elektroniky a nedošlo k nechtěnému poškození měřící karty, či spojovacího vedení mezi konektory a měřící kartou při výměně baterie. V přepážce jsem navrhl otvor sloužící k prostrčení konektoru napájení z prostoru měřící karty do prostoru pro baterii. Dále táto přepážka slouží k přišroubování krycích plexiskel.



Obrázek 29: Měřící půlměsíc

K zakrytí vnitřních komponent jsem použil dvojici krycích plexiskel (materiál Polymethylmethakrylát), viz obrázek 30, které se k tělu měřící aparatury přichytí pomocí šroubového spoje. Plexisklo nebrání přenosu Bluetooth signálu z měřící karty a zároveň umožňuje vizuální kontrolu, zda nedošlo k poruše. V plexiskle určenému k zakrytí prostoru pro měřící kartu musí být vyříznut otvor pro šroub sloužící k aretaci měřící aparatury na kloubovém hřídeli. Plexisklo nad prostorem pro baterii zároveň slouží k zafixování baterie v tomto prostoru. U původní aparatury byl použit k zafixování baterie tenký kousek ocelového plechu,

ale v mém případě jsem pro vizuální kontrolu zapojení a stavu baterie zvolil plexisklo. Jelikož na plexisklo za rotace působí baterie odstředivou silou a není použit ocelový plech jako v původním řešení, rozhodl jsem se zkontrolovat napětí v plexiskle pomocí pevnostní MKP analýzy, blíže v kapitole 10.5 Plexisklo v oblasti baterie je k tělu měřícího půlměsíce přišroubováno pomocí 4 šroubů. Tento návrh vychází ze starého měřícího půlměsíce, kde byly použity 4 šrouby k zafixování dvou baterií. V mém případě se tedy jedná o bezpečnější řešení.



Obrázek 30: Měřící půlměsíce s krycími plexiskly v konfiguraci pro měření 6 termočlánků

Po obvodu měřícího půlměsíce jsem navrhl u přepážky osazení, které umožňuje překrytí plexiskel, viz obrázek 30, a je tím možné použít dvojici šroubů k přitáhnutí obou plexiskel místo čtyř. Díky tomu se sníží šířka přepážky. V opačném případě by muselo dojít k nárustu vnějšího poloměru měřícího půlměsíce a vytvoření více místa v přepážce na díry pro šrouby.

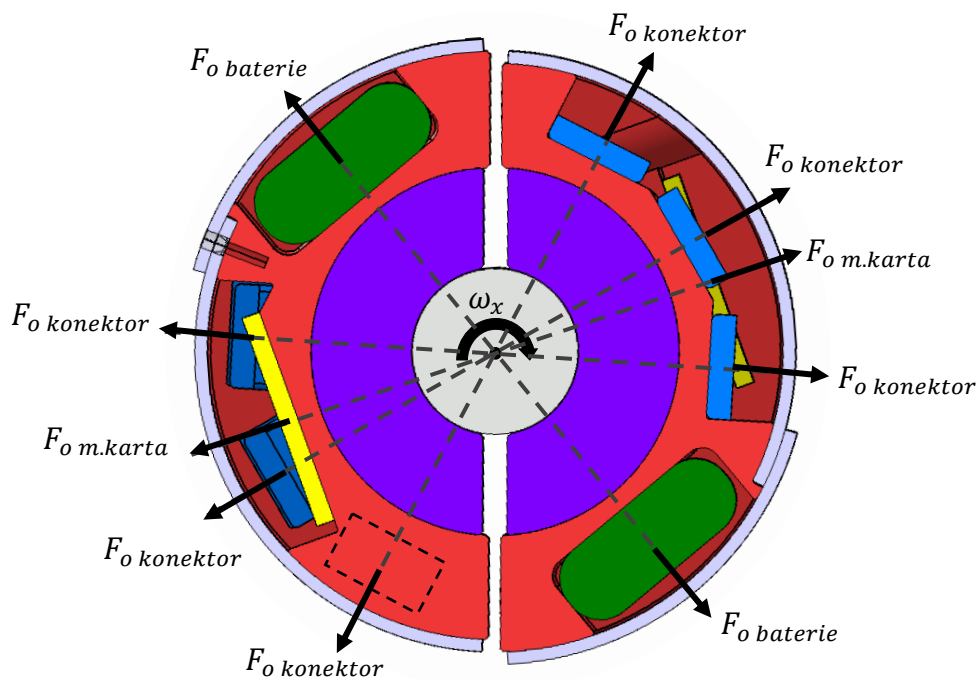
Za účelem usnadnění výroby plexiskel ve smyslu určení polohy pro vyvrtání děr a vyříznutí otvoru pro aretační šroub, byly v programu Catia V5 vygenerovány rozviny do rovinné plochy, viz příloha 5. Tyto rozviny jsou vyříznuty vodním paprskem z tabule plexiskla a následně ohnuty do požadovaného poloměru.

Při výměně baterie je odšroubováno a odstraněno příslušné krycí plexisklo. Tím se zároveň uvolní i jedna strana plexiskla nad prostorem pro měřící kartu. Aby nedošlo k případnému odchlípení a následnému zachycení a odtržení tohoto plexiskla při manipulaci, navrhl jsem v přepážce ještě jednu závitovou díru, do které se pomocí šroubu se zápusťnou hlavou přišroubuje krycí plexisklo a při výměně baterie zůstane toto plexisklo stále

přišroubované. Tento šroub je zapuštěn do plexiskla a lze přes něj namontovat druhé plexisklo. Velikost šroubů pro přišroubování plexiskel jsem přejal ze staré měřicí aparatury a jedná se o šrouby se závitem velikosti M3. Stejně šrouby jsou použity i pro přišroubování měřicí karty.

Vyvážení měřících půlměsíců na kloubovém hřídeli

Obecně lze prohlásit, že přítomnost nevyvážků na rotující součásti je nežádoucí, a proto při návrhu vysílacího a aretačního půlměsíce se snažím minimalizovat vliv těchto součástí na vyváženost kloubového hřídele z hlediska bezpečnosti, i z hlediska minimalizace vlivu měřicí aparatury na měření. Za rotace na vysílací modul působí odstředivá síla. Tato odstředivá síla působí na každé rotující těleso a má působiště v těžišti jednotlivých těles. Směr odstředivé síly je kolmý na osu otáčení, viz obrázek 31.



Obrázek 31: Působení odstředivé síly na komponenty vysílacího modulu

Z obrázku 31 je patrné, že je možné rozmístit komponenty tak, aby se odstředivé síly odečetly a výsledná síla, působící na kloubový hřídel v důsledku odstředivých sil, byla nulová. Tohoto stavu však nelze vždy dosáhnout. Pokud by výsledná síla, působící na kloubový hřídel v důsledku namontování vysílacího modulu, byla příliš vysoká, může v důsledku jejího přídavného zatížení kloubů dojít k ovlivnění měření a odklonění se od stavu v reálném provozu, kde vysílací modul na kloubovém hřídeli namontován není.

Velikost odstředivé síly je možné vypočítat dle vzorce:

$$F_{odstř} = m \cdot r \cdot \omega^2, \quad (10.2.1)$$

kde m je hmotnost tělesa, r vzdálenost těžiště tělesa od osy kloubového hřídele a ω je úhlová rychlost otáčení kloubového hřídele. Těžiště komponentů namontovaných v měřicím půlměsíci se nacházejí zhruba na stejném poloměru od osy otáčení. Výrazněji se však liší svou hmotností. Zdaleka nejtěžší je baterie, a proto je nutné vyvážit především baterií. Ostatní komponenty mají hmotnost nižší a případná nevykompenzovaná odstředivá síla by neměla tak veliký účinek. Při návrhu měřicího půlměsíce jsem komponenty rozmístil tak, aby při konfiguraci, kdy jsou použity oba měřicí půlměsíce došlo ke vzájemné kompenzaci odstředivých sil, viz obrázek 31. Z důvodu nutnosti mít k dispozici 3 termočláňkové konektory, u kloubu na straně kola i u kloubu na straně převodovky, jsou komponenty ve směru osy x (*osa rotace*) vůči sobě posunuté. Toto posunutí je malé, hlavně u baterie, a výsledný moment, který v důsledku toho následně vzniká je také malý. Z hlediska vyvážení na kloubovém hřídeli došlo oproti předchozímu vysílacímu modulu k posunu, jelikož dvojice baterií byla umístěna pouze v jednom půlměsíci a v druhém se nacházeli obě měřicí karty. Vysílací modul se pak stal zdrojem nevyvážení kloubového hřídele.

Termočláňkový konektor

Na trhu se nabízí široký sortiment konektorů pro termočláňky s rozdílnými rozměry, konstrukcí i odolností. K dosažení, co nejmenších rozměrů měřicího půlměsíce, je nutné zvolit, co nejmenší termočláňkové konektory. Při výběru je nutné také dbát na typ termočláňku, pro který je konektor určen. V mém případě se jedná o typ K. Do měřicího půlměsíce jsem vybral miniaturní panelové konektory ze série MPJ od výrobce Omega^[18], viz obrázek 33.



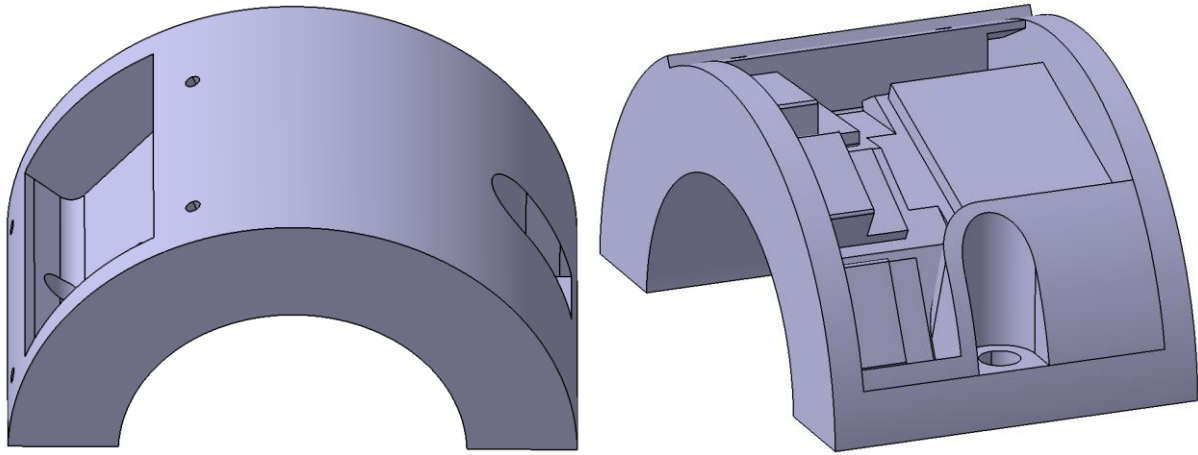
Obrázek 32: Termočláňkový konektor Omega MPJ [18]

Tyto konektory se vyznačují svou kompaktností a dále je uprostřed konektoru otvor, kterým lze konektor přišroubovat. Toho využijí při montáži konektoru do měřicího půlměsíce, pomocí šroubu se závitem o velikosti M2,5. Alternativou je přilepení konektoru do měřicího půlměsíce.

Použití šroubu je ovšem výhodnější v případě poškození konektoru a jeho výměny. Dále si lze možné všimnout, že konektor má na čelní straně zvětšené čelo oproti zbytku jeho těla. To je velice výhodné pro moji aplikaci. Při zastrčení a vytažení konektorů se musí vyvinout jistá síla. V případě rozpojení konektorů je nutné překonat třecí sílu, která vzniká při smyku vidličky po kovovém plíšku uvnitř konektoru. Při zapojení konektorů je překonávána stejná třecí síla, ale po spojení může dojít k opření čel konektorů a následné zatlačení na konektor v měřícím půlměsíci. Použitím panelových termočláňkových konektorů se zvětšeným čelem, viz obrázek 33, lze tuto sílu vznikající po spojení konektorů roznést jak skrze třecí sílu působící na spodní straně konektoru, tak i opřením čela o bok těla vysílacího modulu a tím se vyhnout případnému přílišnému zatížení šroubu.

10.3 Návrh aretačního půlměsíce

Aretační půlměsíc slouží jako protikus k měřicímu půlměsíci, aby byla možná montáž na kloubový hřídel pro konfiguraci v tříkanálovém měření. Kromě aretace měřicího půlměsíce na kloubovém hřídeli je na aretační půlměsíc kladen další požadavek, a to co nejlepší kompenzace odstředivých sil měřicího půlměsíce. Z tohoto důvodu je tělo aretačního půlměsíce identické s tělem příslušného měřicího půlměsíce. Jelikož se termočláňkové konektory vyrábějí z plastu, jsou v aretačním půlměsíci také vymodelovány a při 3D tisku budou vytvořeny z plastu uvnitř aretačního půlměsíce. Obdobným postupem bude vytvořena v aretačním půlměsíci i měřicí karta a krycí plexisklo nad prostorem pro měřicí kartu, viz obrázek 34. Na levé straně obrázku je celkový vzhled a na pravé straně je v CADu deaktivován objem překrytí pro umožnění náhledu do části pro měřicí kartu.



Obrázek 33: Tělo aretačního půlměsíce

Jelikož je baterie těžší než ostatní komponenty, nestačí pro kompenzaci použít plast, ale v prostoru pro baterii bude umístěn kus kovu, s obdobnou hmotností a stejnou polohou těžiště jako baterie, aby došlo ke vzájemnému odečtení odstředivých sil a docílení lepšího vyvážení na kloubovém hřídeli. Tento kus kovu je k aretačnímu půlměsíci přidělán pomocí šroubu o velikosti závitu M3. Eventuelně lze pro vyvážení použít identickou baterii, která je vložena do měřicího půlměsíce. Dále je prostor pro baterii zakryt stejným krycím plexisklem jako v případě měřicího půlměsíce.

Výpočet protizávaží aretačního půlměsíce

V této části se zaměřím na výpočet rozměrů protizávaží, které vložím do aretačního půlměsíce. Baterie, která je použita k napájení měřicí karty je vyrobena ze tří sérově spojených dobíjecích akumulátorů typu NiMH velikosti AAA. Hmotnost jednoho takového akumulátoru je dle zdroje ^[19] zhruba 14 g. Celkovou hmotnost baterie, tedy vyjádřím jako:

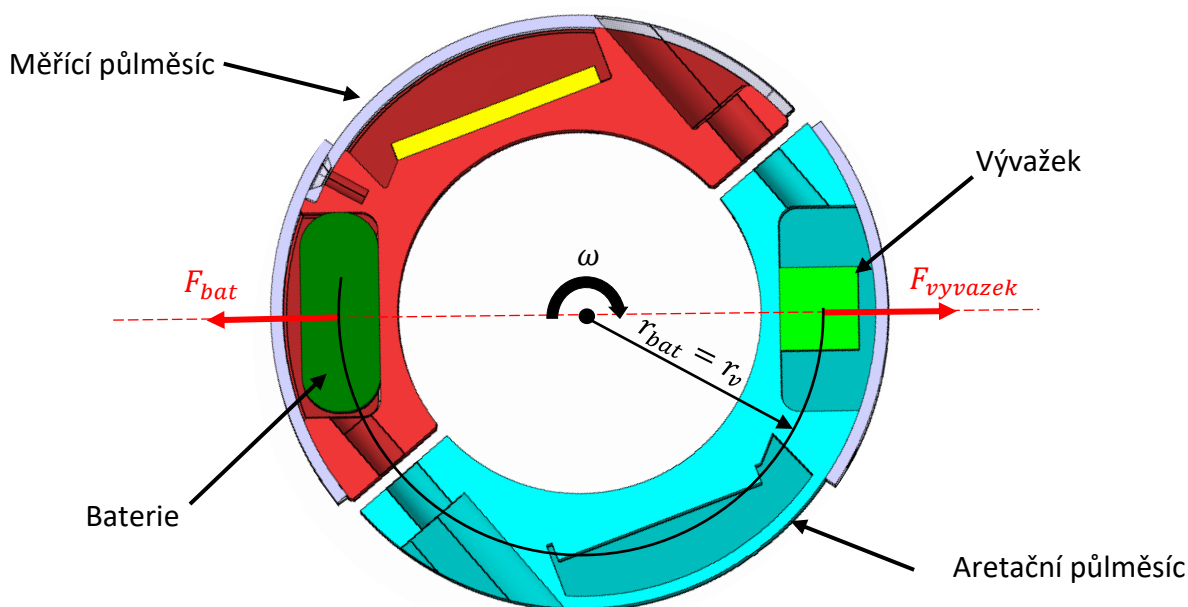
$$m_{bat} = 3 \cdot 14 = 42 \text{ g} = 0,042 \text{ kg}. \quad (10.3.1)$$

Vzhledem k uspořádání akumulátorů a celkovému tvaru baterie, viz obrázek 35, lze předpokládat, že těžiště se nachází uprostřed tělesa. V takovém případě jsem z CAD modelu odečetl vzdálenost těžiště od středu otáčení $r_{bat} = 0,0395 \text{ m}$.



Obrázek 34: Baterie pro měřící karty aparatury EHL

Pokud do prostoru pro baterii v aretačním půlměsíci vložím kus kovu, jehož hmotnost m_v bude rovna hmotnosti baterie m_{bat} a jeho těžiště má od osy kloubového hřídele stejnou vzdálenost r_{vyv} jako je vzdálenost baterie r_{bat} , bude odstředivá síla tohoto kusu kovu stejně veliká jako odstředivá síla baterie, opačného směru a ležící na společné nositelce, viz obrázek 36. Vliv těchto sil na kloubový hřídel se pak minimalizuje.



Obrázek 35: Vyvážení aretačním půlměsícem

Aby leželo těžiště vývažku na poloměru r_v , musí být výška vývažku v_v shodná s výškou baterie v_{bat} , tedy:

$$v_v = v_{bat} = 13 \text{ mm} \quad (10.3.2)$$

Dále je nutné vypočítat zbylé rozměry vývažku: délku d_v a šířku s_v . Tyto rozměry jsou závislé na hustotě materiálu vývažku. V mém případě uvažuji klasickou ocel, jejíž hustotu předpokládám: $\rho_o = 7\,850\text{ kg/m}^3$. Z definičního vztahu pro hustotu si určím objem vývažku V_v jako:

$$V_v = \frac{m_v}{\rho_o}. \quad (10.3.3)$$

Po dosažení požadované hmotnosti vývažku $m_v = 0.042\text{ kg}$ a výše zmíněné hustoty pro ocel získám objem vývažku:

$$V_v = \frac{0.042}{7850} = 5,35 \cdot 10^{-6}\text{ m}^3 = 5\,350\text{ mm}^3. \quad (10.3.4)$$

Po vydělení objemu V_v výškou vývažku v_v získám obsah, který je součinem délky d_v a šířky s_v :

$$S_v = \frac{V_v}{v_v} = \frac{5\,350}{13} = 411,54\text{ mm} = d_v \cdot s_v. \quad (10.3.5)$$

Zvolím si jednoho rozměru (d_v nebo s_v) mohu následně dopočítat druhý. Pro svůj vývažek si volím délku $d_v = 30\text{ mm}$ a poté lze vypočítat šířku s_v jako:

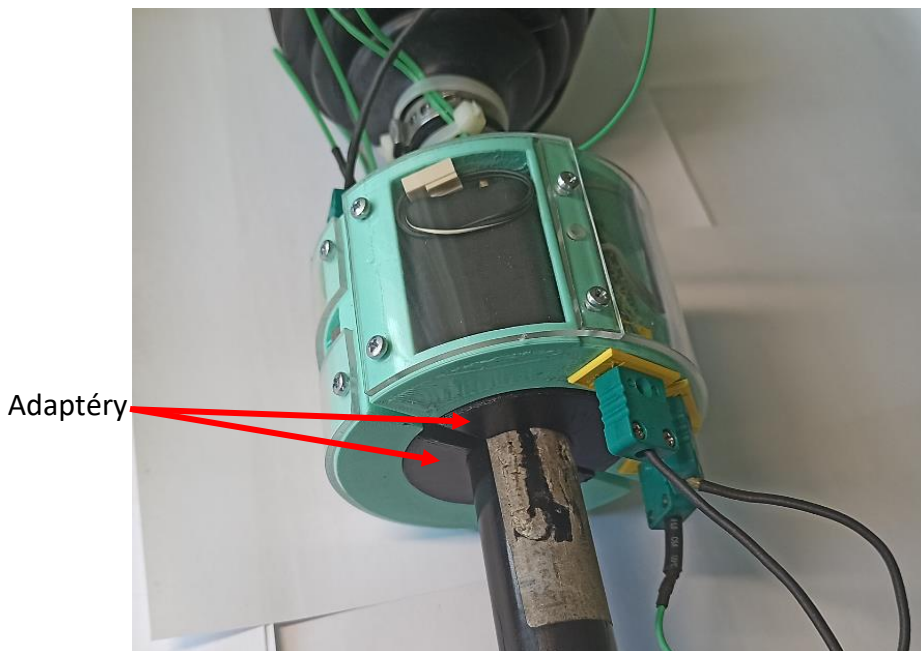
$$s_v = \frac{S_v}{d_v} = \frac{411,54}{30} \doteq 13,7\text{ mm}. \quad (10.3.6)$$

Výsledný rozměr vývažků je:

$$d_v = 30\text{ mm}, s_v = 13,7\text{ mm}, v_v = 13\text{ mm}.$$

10.4 Montáž vysílacích modulů na kloubovém hřídeli

Aretace vysílacího modulu na kloubovém hřídeli je dosaženo svěrným spojem, viz obrázek 36. Na obrázku jsou černou barvou zobrazeny adaptéry, které slouží k přizpůsobení vysílacího modulu danému průměru kloubového hřídele. Tyto adaptéry jsou také vyrobeny pomocí technologie 3D tisku a lze je tedy kdykoliv vytisknout s požadovaným průměrem. Na obrázku je možné si také všimnout nutnosti montážní vůle mezi jednotlivými půlměsíci i adaptéry, aby byla zajištěna správná funkce svěrného spoje.



Obrázek 36: Vysílací modul aparatury EHL namontován na kloubovém hřídeli

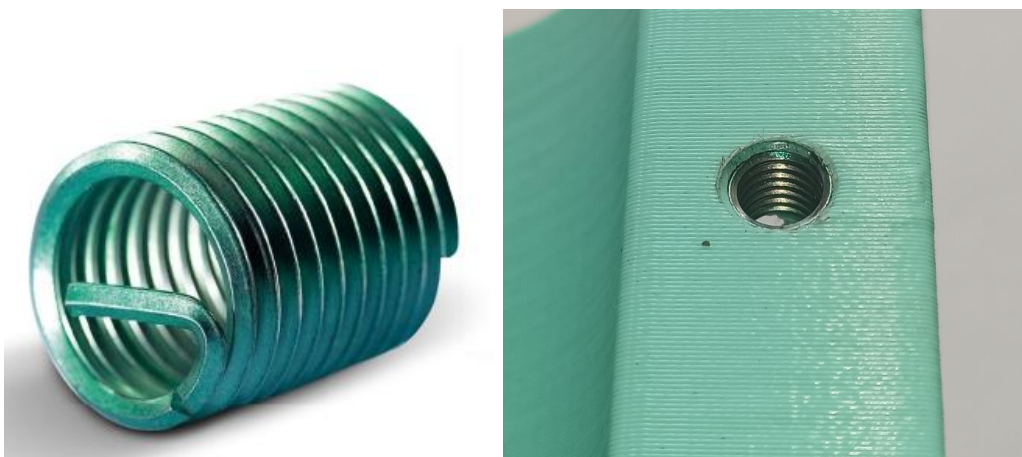
Půlměsíce jsou k sobě přitaženy dvojicí šroubů o velikosti závitu M6. Velikost šroubu byla přejata z původního vysílacího modulu. V každém půlměsíci je vytvořena díra pro šroub a také otvor určený k vyřezání závitu a montáži závitové vložky. Otvory i výsledná poloha šroubu je souměrná podle osy rotace kloubového hřídele a je tedy automaticky kompenzována odstředivá síla šroubů.

10.5 Realizace šroubových spojů

Montáž komponentů jako měřící karta, termočlávkové konektory, krycí plexiskla ale i samotná montáž vysílacího modulu na kloubovém hřídeli je realizována šroubovým spojem, kdy závity jsou vyřezány v plastovém těle jednotlivých půlměsíců. Lze předpokládat, že odstředivé síly, které šroubové spoje namáhají nebudou příliš veliké, jelikož jsou hmotnosti jednotlivých komponent relativně malé, stejně tak i poloměr a otáčky, viz v kapitole 10.5.4, kde bude vypočtena odstředivá síla baterie. Závit v plastu není obecně příliš odolný a také v případě opětovného odšroubování a zašroubování ocelového šroubu do díry s plastovým závitem dochází vlivem tření k rychlému opotřebení plastového závitu a dalšímu zhoršení jeho vlastností. Za účelem zlepšení únosnosti závitu a snížení opotřebení se používají různé závitové vložky, viz příloha 6, nebo je možné integrovat klasické matice. Obě tyto metody jsou náročné na prostor a při jejich použití dojde k výraznému nárůstu vnějšího průměru vysílacího modulu.

Na trhu jsou dále dostupné šrouby určené k použití do plastu, ale nevhodné k mnohonásobnému odšroubování a zašroubování, kdy dochází opět k opotřebení vyřezaného závitu.

Ke zlepšení vlastností závitů jsem zvolil alternativu v podobě závitových vložek Helicoil, viz obrázek 37. Při zašroubování šroubu dochází k působení třecích sil mezi závitovou vložkou a šroubem a nedochází tak k opotřebení plastového závitu. Únosnost plastového závitu je také zvýšena, jelikož dojde k nárůstu rozměrů plastového závitu ve smyslu průměru. Díky flexibilní vlastnosti závitových vložek v podélném směru, rozkládají rovnoměrněji zatížení v závitech, viz příloha 6, a teoreticky tím lze také zlepšit únosnost šroubového spoje realizovaném do plastu.



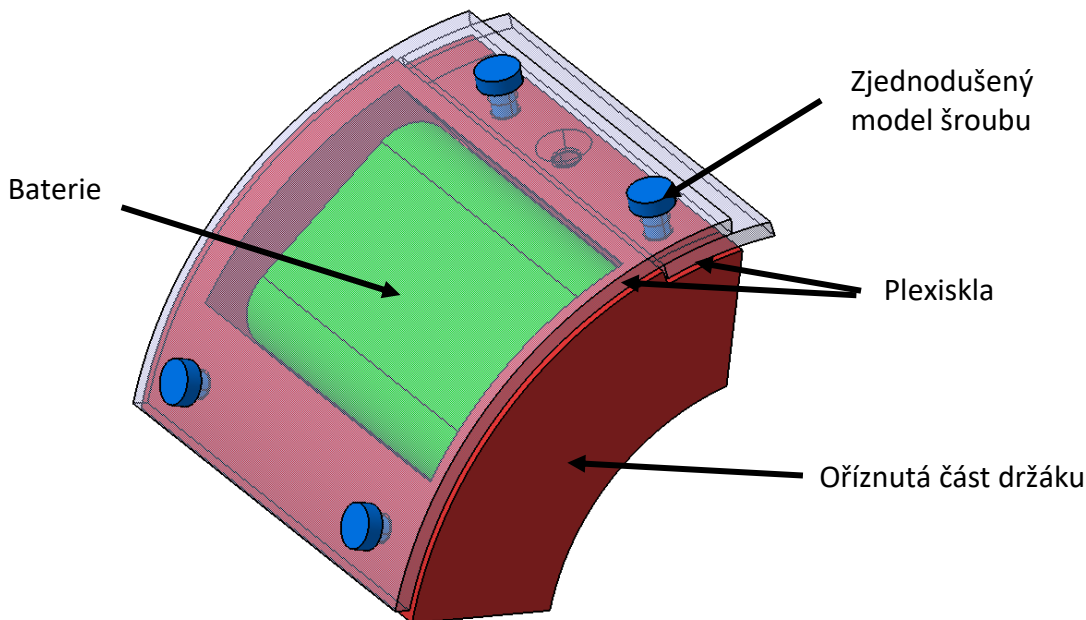
Obrázek 37: Závitová vložka namontována v těle vysílacího modulu

10.6 MKP analýza krycího plexiskla

Jak již bylo zmíněno v kapitole 10.1, je baterie v příslušném prostoru za rotace přidržována krycím plexisklem. Vzhledem k odlišnosti v použitém materiálu oproti starému vysílacímu modulu, jsem se rozhodl ověřit pomocí pevnostní MKP analýzy, zda je mé řešení vyhovující z hlediska pevnosti. K výpočtu jsem použil program ANSYS 2019 Mechanical.

10.6.1 Model

Model měřícího půlměsíce určený pro MKP analýzu vznikl oříznutím modelu měřícího půlměsíce, kdy byl ponechám pouze prostor pro baterii, viz obrázek 38. Použitím komplexnějšího modelu s více díly jsem schopen lépe nasimulovat kontaktní místa baterie a krycího plexiskla. Dále mi to umožní nadefinovat předpětí ve šroubech, které stlačují plexisklo.



Obrázek 38: CAD model pro MKP analýzu

Všem dílům jsem v programu přiřadil elastické modely materiálů odpovídající materiálu jednotlivých součástí. Pro šrouby a baterii jsem zvolil předem definovanou konstrukční ocel (Příloha 7) z knihovny programu Ansys. V případě plexiskel jsem materiál také vybral z knihovny programu Ansys Mechanical. Jedná se přímo o materiál PMMA (Polymethylmethakrylát), vlastnosti viz Příloha 8. Materiál, ze kterého je vyroben držák (PETG) jsem v knihovně nenalezl, a proto jsem ho zjednodušeně nadefinoval jako izotropní elastický materiál (Příloha 9).

10.6.2 Kontaktní vazby

Mezi jednotlivými součástmi je definována kontaktní vazba zohledňující i tření mezi součástmi. U spojovacího materiálu, jsem použil kombinaci pevné a třecí vazby. Pevná vazba je definována mezi šrouby a příslušnými válcovými dírami v držáku, aby bylo dosaženo simulace předpětí šroubů. Pro třecí vazby je v závislosti na zvoleném materiálu dílů, které jsou v kontaktu, použit příslušný součinitel tření. Součinitele tření pro jednotlivé kontakty:

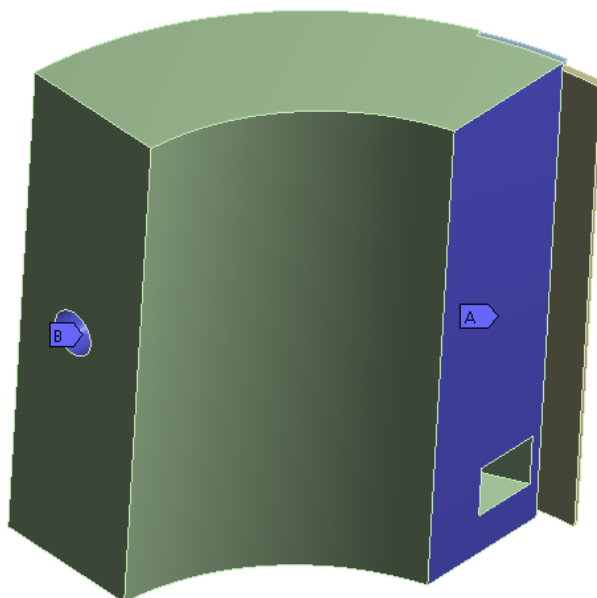
- plexisklo s ocelí $\mu = 0,45$ ^[20]
- plexisklo s plexisklem $\mu = 0,8$ ^[20]
- plexisklo s tělem držáku (materiál PETG) $\mu = 0,8$ ^[20]

Přesné hodnoty součinitele tření pro kombinaci s PETG se mi nepodařilo nalézt, použil jsem tedy orientačně koeficient tření pro dva polymerní materiály (plasty), mezi které patří jak

PETG, tak plexisklo (PMMA) a lze předpokládat, že tím nebude citelně ovlivněn výsledek výpočtu.

10.6.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky úlohy jsem nadefinoval pro plexisklo nepřímo, skrze oříznutou část těla vysílacího modulu. Kontaktními vazbami jsou pak definovány okrajové podmínky plexiskla. Na oříznutou část držáku jsem přiřadil vetknutí v místě zašroubování šroubu (plocha označena B na obrázku 40), který sevře dvojici půlměsíců kolem hřídele a dále v místě, kde došlo k oříznutí držáku (plocha označena A na obrázku 39).



Obrázek 39: Přiřazení okrajových podmínek v programu Ansys

10.6.4 Zatížení

Krycí plexisklo je zatěžováno odstředivou silou baterie a předpětím od šroubů, které fixují krycí plexisklo. Působení odstředivé síly na plexisklo bylo zanedbáno, jelikož je hmotnost plexiskla nízká a toto zatížení je velice malé v porovnání s ostatními. Dle vztahu 10.1.1 je odstředivá síla baterie přímo úměrná hmotnosti baterie, kolmé vzdálenosti těžiště od osy rotace a úměrná druhé mocnině úhlové rychlosti. Hmotnost baterie a kolmá vzdálenost těžiště jsou konstantní. Při zkoušení dochází pouze ke změně úhlové rychlosti pro různé zátěžné stavy. Na plexisklo pak působí maximální odstředivá síla při maximální úhlové rychlosti hřídele, resp. otáčkách. Jelikož nebyly předem stanoveny maximální otáčky, při kterých budou kloubové

hřídele zkoušeny, použiji ke stanovení těchto otáček technické parametry vozu z nabídky výrobce automobilů Škoda Auto a.s., jehož kloubové hřídele budou zkoušeny. Za tímto účelem jsem vybral automobil Škoda Octavia 4. generace s maximální rychlostí pro vybranou konfiguraci:

$$v_{max} = 224 \text{ km/h} \doteq 62,2 \text{ m/s}^{[21]}. \quad (10.6.1)$$

Vztah mezi úhlovou rychlostí kola a rychlostí posuvného pohybu (jízdy) je uveden v rovnici 10.5.2:

$$\omega_{kmax} = \frac{v_{max}}{r_v}, \quad (10.6.2)$$

kde r_v je valivý poloměr kola (konstanta úměrnosti mezi úhlovou rychlostí kola ω_k a rychlostí jízdy). Pro zjednodušení použiji místo valivého poloměru r_v , jmenovitý poloměr kola r_j , který lze na rozdíl od valivého poloměru jednoduše vypočítat ze základních parametrů pneumatiky. Jelikož se tyto dva poloměry při klasickém provozním stavu výrazně neliší, nedejde tímto zjednodušením k výraznějšímu ovlivnění výsledku. Nejvyšší úhlové rychlosti kola se dosáhne při použití kola s nejmenším jmenovitým rozměrem, které je na autě povoleno. V mém případě se jedná o pneumatiku s rozměry 205/60 R16, které odpovídá jmenovitý poloměr:

$$r_j = 0,326 \text{ m}. \quad (10.6.3)$$

Po dosazení známých hodnot do vzorce 11.5.2 získám maximální úhlovou rychlost kola:

$$\omega_{kmax} = \frac{62,2}{0,326} \doteq 191 \text{ rad/s}. \quad (10.6.4)$$

Dále po přepočtu na otáčky:

$$n_{kmax} = \frac{30 \cdot \omega_{kmax}}{\pi} = \frac{30 \cdot 191}{\pi} \doteq 1824 \frac{1}{min}. \quad (10.6.5)$$

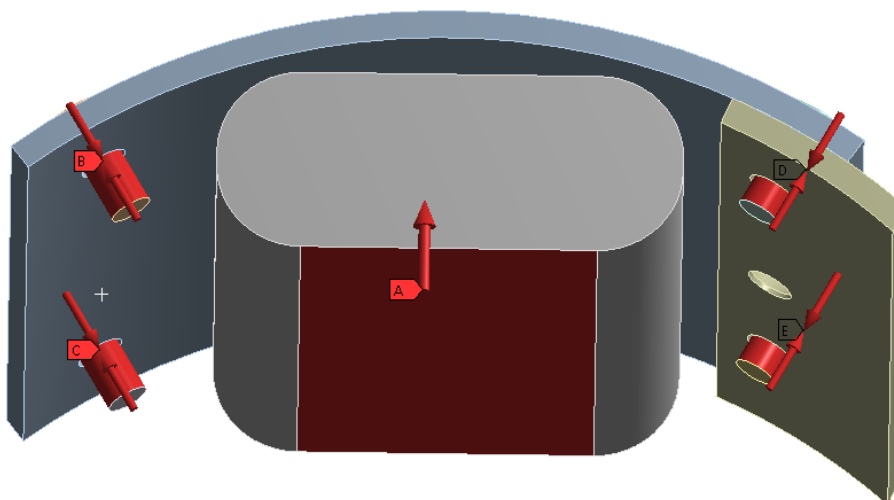
Pro další výpočet odstředivé síly budu uvažovat maximální otáčky, které mohou být použity při měření:

$$n_{max} = 2000 \frac{1}{min} \rightarrow \omega_{max} = 209,44 \text{ rad/s}. \quad (10.6.6)$$

Měřicí aparatura EHL je při měření umístěna na hřídeli spojující oba klouby. Jelikož se jedná o kloubový hřídel se stejnoběžnými klouby, je úhlová rychlost tohoto hřídele rovna úhlové rychlosti dynamometru. Odstředivá síla, kterou působí baterie na krycí plexisklo je pak rovna:

$$F_{bat} = m_{bat} \cdot r_{bat} \cdot \omega_{max}^2 = 0,042 \cdot 0,0395 \cdot 209,44^2 = 72,77 \text{ N}. \quad (10.6.7)$$

Působíště této síly jsem v programu Ansys definoval na spodní plochu baterie (označeno písmenem A v obrázku 40). Dále je v obrázku zobrazeno i přiřazení osových sil ve šroubech (písmena B – E v obrázku 40), které je aplikováno na válcové plochy zjednodušených modelů šroubů za použití příslušné funkce (Bolt pretension) programu Ansys.



Obrázek 40: Zavedení odstředivé síly na baterii a osových sil ve šroubech

Výpočet osových sil ve šroubech

Pro mé provedení šroubového spoje se mi nepodařilo nalézt referenční hodnotu maximální osových sil šroubu takové, aby nedošlo ke stržení závitu. Z tohoto důvodu jsem, alespoň pro orientační stanovení osových sil zatěžující plexisklo použil utahovací moment plastového šroubu s metrickým závitem (materiál Polyamid 6.6) z katalogu výrobce Bossard. Tento moment reflektuje použití plastového závitu a mohu jej použít pro svůj orientační výpočet osových sil. V katalogu je uveden utahovací moment na klíči pro plastový šroub M3 [22]:

$$M_{kk} = 0,1 Nm. \quad (10.6.8)$$

Utahovací moment na klíči je součtem momentu v závitu M_z , jehož důsledkem je osová síla a třecího momentu pod hlavou šroubu M_{tH} , který je nutné překonat při utahování šroubu [23]:

$$M_{kk} = M_z + M_{tH}. \quad (10.6.9)$$

Moment v závitu M_z lze stanovit dle vzorce [23]:

$$M_z = Q_0 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi'), \quad (10.6.10)$$



kde Q_0 je osová síla v závitu, d_2 střední průměr závitu, γ úhle stoupání závitu a φ' úhle tření v závitu.

Pro výpočet třecího momentu pod hlavou šroubu slouží vzorec ^[23]:

$$M_{tH} = Q_0 \cdot \rho_H \cdot f_H, \quad (10.6.11)$$

kde Q_0 je opět osová síla v závitu, ρ_H rameno působíště třecí síly a f_H třecí součinitel pod hlavou šroubu. V katalogu není uvedeno, jaký materiál je pod hlavou šroubu při utahování uvažován, zda plast nebo ocel a z tohoto důvodu volím koeficient tření pod hlavou šroubu takový, aby výsledkem výpočtu osově síly byla větší hodnota. Hodnota třecího šroubu pod závitem je pak $f_H = 0,4$, jedná se tedy o kontakt polyamid 6.6 – ocel ^[24]. Dosazením rovnic 10.5.10 a 10.5.11 do rovnice 10.5.9 získám po úpravě vztah závislosti osově síly na utahovacím momentu:

$$Q_0 = \frac{M_{kk}}{\frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') + \rho_H \cdot f_H}. \quad (10.6.12)$$

Hodnota středního průměru metrického závitu M3 lze nalézt ve strojnických tabulkách ^[25]:

$$d_2 = 2,675 \text{ mm} = 0,002675 \text{ m}. \quad (10.6.13)$$

Úhel stoupání závitu γ se vypočítá dle vztahu ^[23]:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} \right), \quad (10.6.14)$$

kde p je rozteč závitu a pro šroub M3 má hodnotu $p = 0,5 \text{ mm}$ (hrubá rozteč). Po dosazení do rovnice 10.5.14 je úhel stoupání závitu γ roven:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{0,5}{\pi \cdot 2,675} \right) = 3,4049^\circ. \quad (10.6.15)$$

Před výpočtem úhlu tření v závitu φ' se musí nejprve vypočítat úhel β_n ^[23]:

$$\begin{aligned} \beta_n &= \operatorname{arctg} (\operatorname{tg}(\beta) \cdot \cos(\gamma)) = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg}(30) \cdot \cos(3,4049)) = \\ &= 29,9562^\circ, \end{aligned} \quad (10.6.16)$$

kde úhel β je normalizován a pro metrický závit má hodnotu $\beta = 30^\circ$.

Nyní již mohu vypočítat úhel tření v závitu φ' dosazením do vzorce ^[23]:

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \left(\frac{\varphi}{\cos(\beta_n)} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{0,14}{\cos(29,9562)} \right) = 9,1789^\circ. \quad (10.6.17)$$

φ je v tomto případě koeficient tření v závitu, jehož hodnotu jsem zvolil 0,14. [23]

Poslední konstantou, kterou musím vypočítat před dosazením do vzorce pro osovou sílu je rameno působíště třecí síly ρ_H . Jeho hodnota se přibližně vypočte dle následujícího vzorce [23]:

$$\rho_H = 0,8 \cdot d_2 = 0,8 \cdot 0,002675 = 0,00214 \text{ m.} \quad (10.6.18)$$

Nyní mohu dosadit do rovnice 10.5.12 za všechny proměnné a zjistit velikost osové síly polyamidového šroubu M3:

$$Q_0 = \frac{M_{kk}}{\frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') + \rho_H \cdot f_H} =$$
$$= \frac{0,1}{\frac{0,002675}{2} \cdot \operatorname{tg}(3,4049 + 9,1789) + 0,00214 \cdot 0,4} = 86,61 \text{ N} \quad (10.6.19)$$

Hodnotu osové síly pro ocelové šrouby M3, kterou použiji v MKP analýze jsem zvolil s ohledem na předešlý výpočet:

$$F_o = 90 \text{ N.} \quad (10.6.20)$$

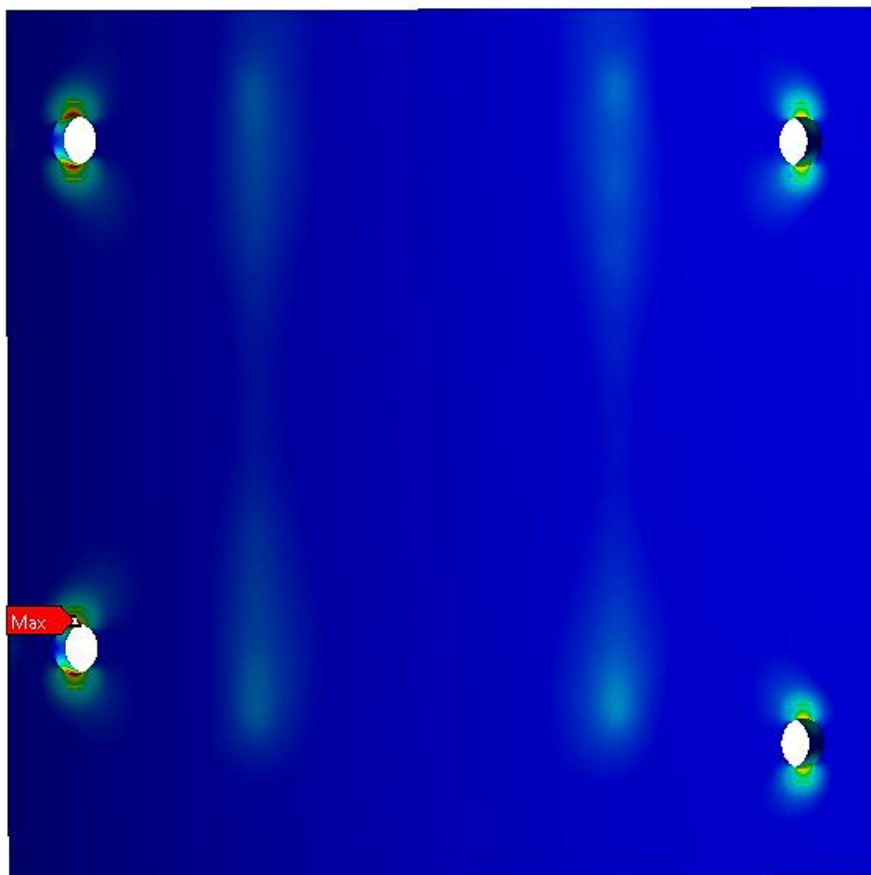
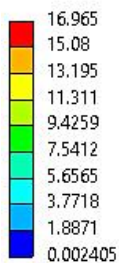
10.6.5 Výsledek výpočtu

Výsledky pevnostní MKP analýzy jsou zobrazeny na obrázcích níže. Maximální vypočítané redukované napětí σ je zaokrouhleně $17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ a nachází se v místě pod šrouby, viz obrázky 41 a 42. Krycí plexisklo je určeno především pro zadržení baterie v příslušném prostoru držáku za rotace. K nesplnění tohoto požadavku by mohlo dojít v případě plastizace krycího plexiskla a následného vzniku a šíření trhliny v důsledku namáhání. Z tohoto důvodu porovnám výsledek pevnostní MKP analýzy s mezí pevností v tahu pro PMMA, $\sigma_p = 73 \text{ N/mm}^2$ [26]. Výsledná bezpečnost vůči mezi pevnosti v tahu má pak hodnotu:

$$k = \frac{\sigma_p}{\sigma} = \frac{75}{17} = 4,41 > 1. \quad (10.6.21)$$

C: Static Structural

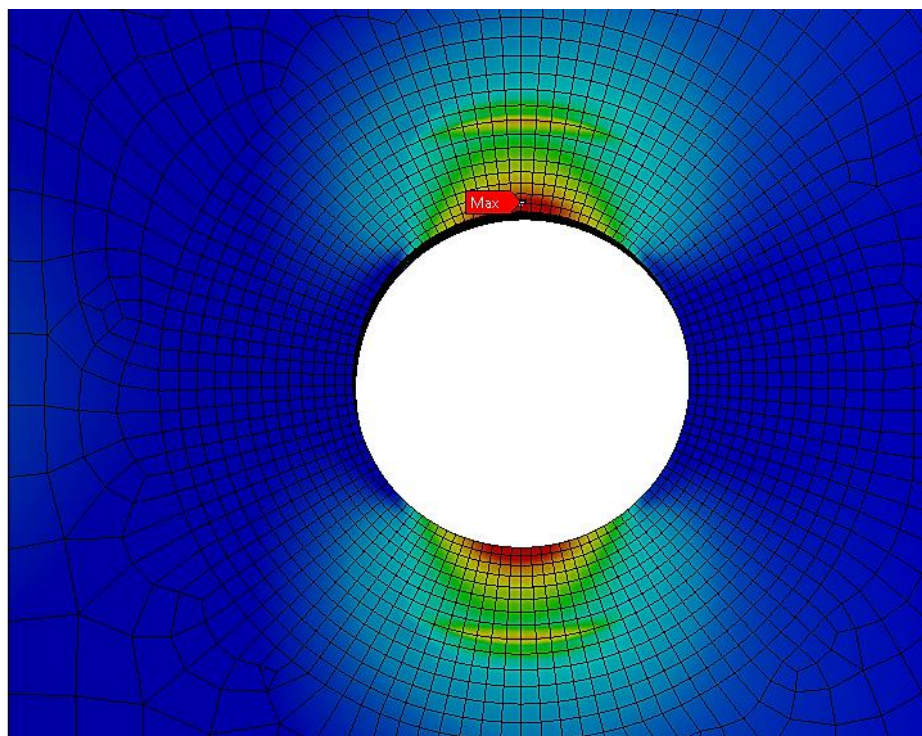
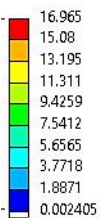
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2
Custom
6/28/2021 8:09 PM



Obrázek 41: Napětí plexiskla při zatížení předpětím šroubu a odstředivou silou baterie

C: Static Structural

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2
Custom
6/28/2021 8:07 PM



Obrázek 42: Detail napětí v okolí díry pro šroub

Krycí plexisklo je v průběhu své životnosti zatěžováno periodicky, přesněji při každém měření se zatíží odstředivými silami a při každém dobití baterie dochází k odlehčení v místě zašroubování a opětovnému zatížení po výměně baterie. Toto periodické zatěžování může mít vliv na životnost součásti z hlediska únavy materiálu. Počet zátěžných cyklů do 10^2 lze považovat za statické zatěžování a není nutné navrhovat součást s ohledem na únavu. Vzhledem k předpokládanému nízkému počtu měření v průběhu roku, vysoké hodnotě bezpečnosti vzhledem k mezi pevnosti, míjivému charakteru zatěžování a pouze lokální hodnotě maximálního napětí, které vzniká v kontaktu zakřivené plochy plexiskla a rovinné plochy hlavy šroubu, lze předpokládat, že z hlediska únavy je časovaná životnost krycího plexiskla dostačující, bez nutnosti ověření výpočtem.

10.7 Konfigurace 3D tisku a volba materiálu

Tělo vysílacího modulu je vyrobeno technologií 3D tisku z plastu. Alternativou je výroba třískovým obráběním, která by eliminovala problematiku anizotropie, ale zároveň se jedná o nákladnější, náročnější a časově hůře dostupnou formu výroby, vzhledem k přítomnosti 3D tiskárny v laboratoři.

V laboratoři jsou k dispozici dva typy filamentů (vlákno, kterým se tiskne) pro 3D tiskárnu: PLA a PETG. Tyto materiály se mírně liší svými mechanickými vlastnostmi a tiskovými vlastnostmi. Některé základní mechanické vlastnosti, pro testovací vzorek s horizontálním směrem tisku (Příloha 10), sloužící k porovnání obou filamentů jsou zobrazeny v tabulce 4.

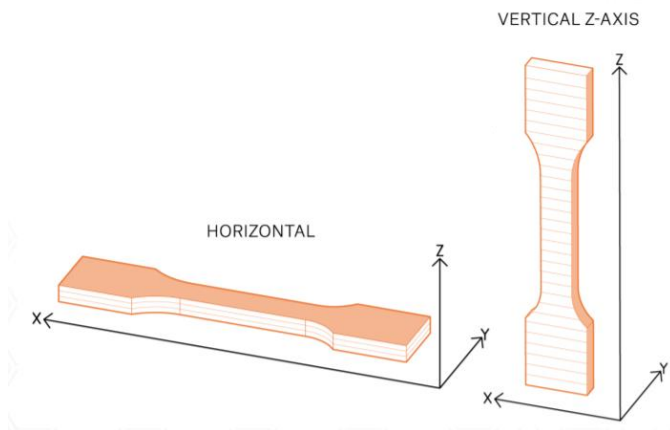
	PLA	PETG	Metoda
Mez kluzu [N/mm^2]	$50,8 \pm 2,4$	47 ± 2	ISO 527-1
Youngův modul [kN/mm^2]	$2,2 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	$2,9 \pm 0,3$	$5,1 \pm 0,1$	ISO 527-1

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti filamentů [27][28]

Z hodnot v tabulce lze stanovit, že PLA má vyšší mez kluzu než PETG a vydrží tedy vyšší namáhání. Také má vyšší hodnotu Youngova modulu a s tím související nižší hodnotu prodloužení na mezi kluzu, jedná se tedy o pevnější, ale křehčí materiál. PETG je pružnější, méně křehký a také tepelně odolnější. Mechanické vlastnosti PLA se prudce zhoršují již při teplotě nad 50°C . Z tohoto hlediska je výhodnější PETG, jelikož ztrácí své mechanické vlastnosti

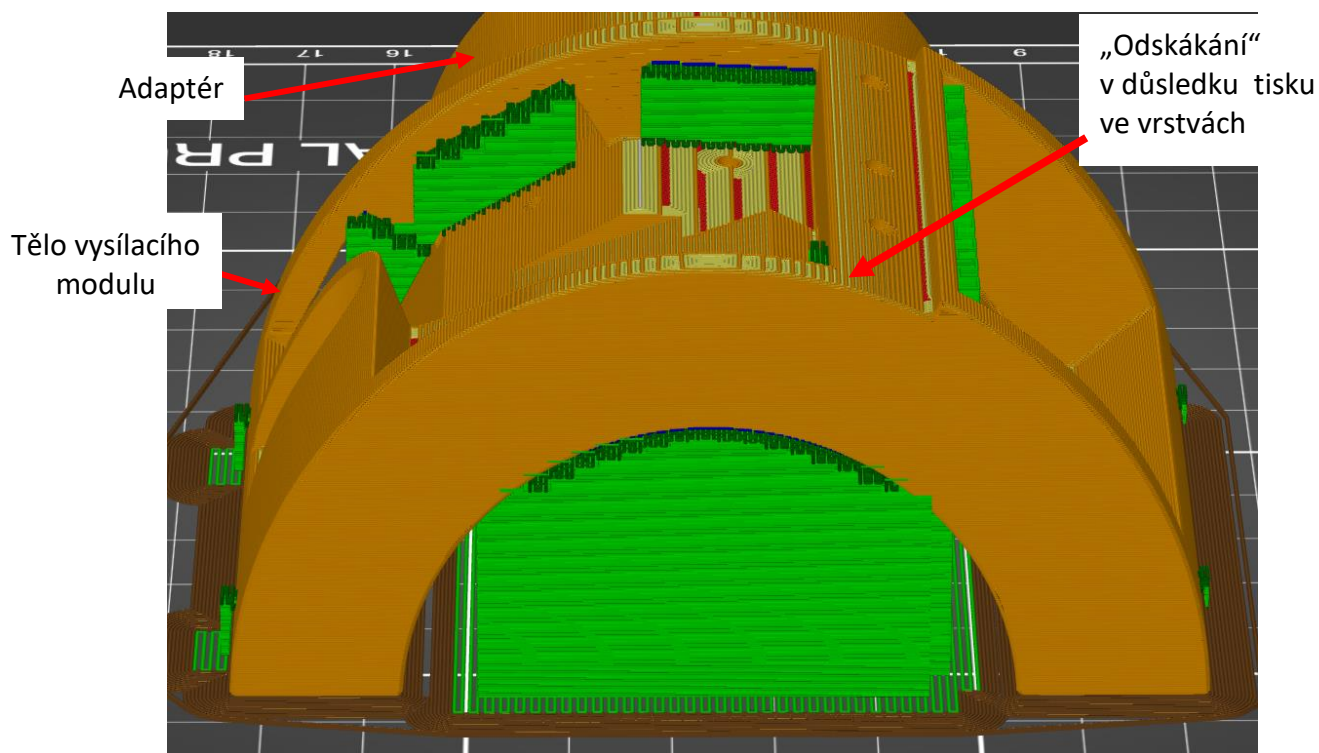
až při teplotách okolo 80°C. Při zkoušení kloubového hřídele se homokinetické klouby zahřívají na teploty přes 100 °C a hřídel je ještě umístěn v polouzavřeném bezpečnostním krytu. Klouby jsou v krytu ochlazovány vzduchem, který je vháněn do krytu pomocí průmyslového ventilátoru. Teplota vzduchu v krytu se pak v takovém případě nebude příliš lišit od okolní teploty. Může ale nastat situace, kdy nebude ventilátor zapnut a v kombinaci s horkým letním počasím se může teplota vzduchu v krytu výrazně zvýšit. Navíc je vysílací modul skrze adaptéry při měření v kontaktu s hřídelí spojující homokinetické klouby, jejíž teplota stoupá v důsledku kondukce tepla z homokinetického kloubu. Tato kondukce představuje další zdroj tepla, který může přispět k ohřátí adaptérů a vysílacího modulu. Vzhledem k možným vyšším teplotám vzduchu v bezpečnostním krytu a vlivu kondukce tepla jsem se rozhodl použít pro 3D tisk bezpečnější materiál a to PETG. Jeho tepelná odolnost je výrazně vyšší než u PLA a z hlediska meze kluzu není rozdíl tak výrazný.

K tisku byla použita 3D tiskárna Prusa Original i3 (Mk2.5) a software PrusaSlicer od stejného výrobce. Mechanické vlastnosti vytisknutého výrobku jsou silně závislé na orientaci vláken a tím související orientace výrobku na vyhřívané podložce tiskárny. Tato skutečnost je patrná z technického listu pro filament PETG od firmy Prusa Research. Pro dva zkušební vzorky (obrázek 43) vytištěné s různou orientací se naměřila rozdílná mez kluzu. Levý vzorek byl vytištěn v horizontální poloze a spoje mezi jednotlivými vrstvami jsou rovnoběžné se směrem zatížení. Přestože je výplň uvnitř vzorku orientována náhodně, jsou v tomto případě vhodně orientovány krajní vlákna (perimetr). Pravý vzorek je vytištěn ve svislé poloze a spoje mezi jednotlivými vrstvami jsou pak orientovány kolmo na směr zatížení. Právě tyto spoje mezi vlákny vykazují horší mechanické vlastnosti a v důsledku toho dojde při zatížení vzorku k odtržení v místě spoje mezi vrstvami. Pro levý vzorek je udávána mez kluzu $\delta_{kl} = 47 \text{ N/mm}^2$ a pro pravý vzorek $\delta_{kp} = 30 \text{ N/mm}^2$. Špatnou orientací tištěné součásti lze tedy dosáhnout výrazně nižší pevnosti součásti. [28]



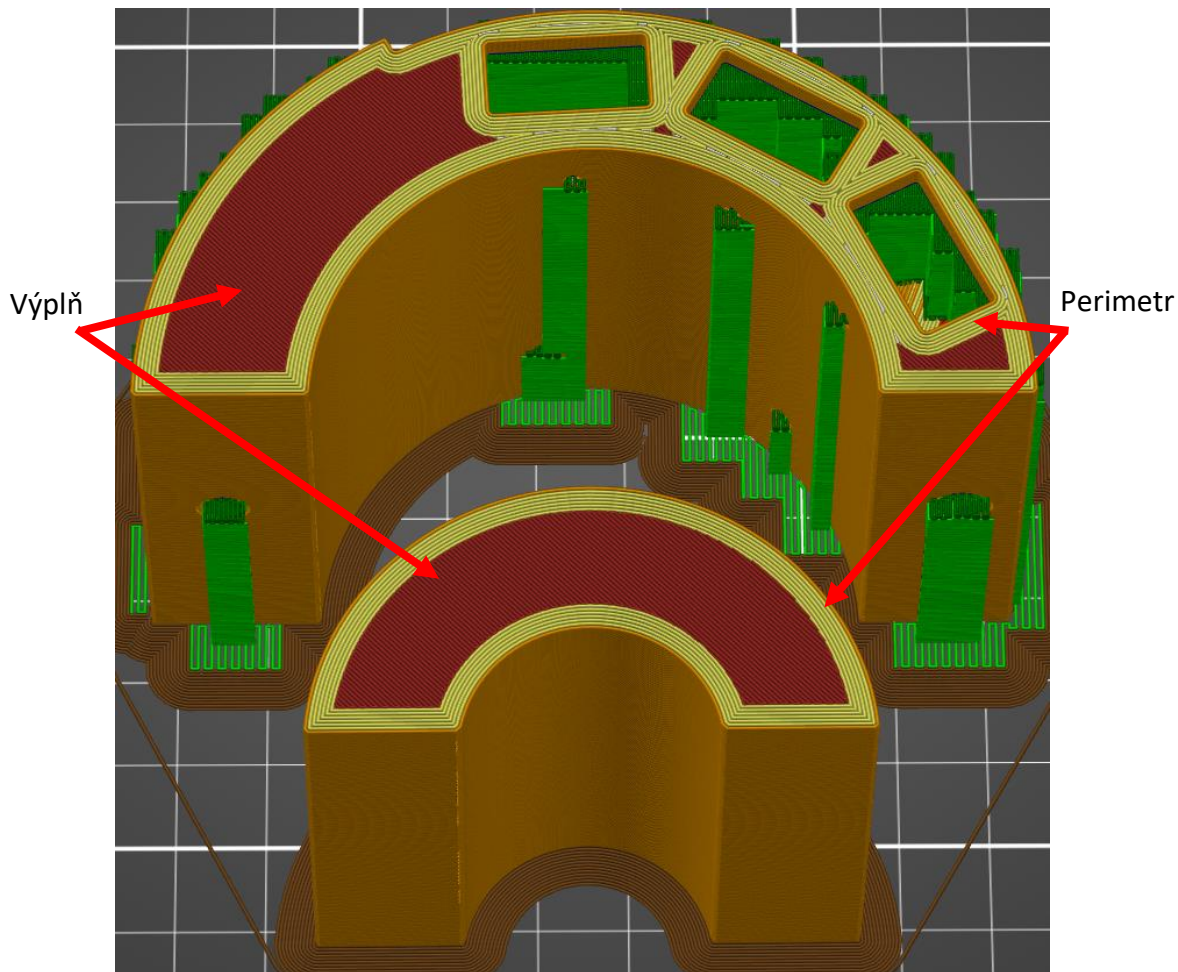
Obrázek 43: Orientace zkušebních vzorku při 3D tisku [20]

V mém případě se nabízejí dvě možnosti orientace těla vysílacího modulu a adaptéru. První z nich je zobrazena na obrázku 44. V tomto případě je patrné, že se nejedná o příliš příznivou orientaci. Již dotahováním svěrného spoje při montáži na hřídeli jsou namáhány spoje mezi jednotlivými vrstvami v oblasti šroubů a z výše zmíněných poznatků se jedná o méně únosný případ orientace. Zvolením této orientace těla vysílacího modulu a adaptéru je také zhoršena kvalita povrchu kontaktní plochy na nejmenším poloměru v důsledku „odskákání“ vrstev. Tento jev je dobře pozorovatelný na vrchní straně součásti.



Obrázek 44: 1. možnost orientace těla a adaptéru na podložce 3D tiskárny

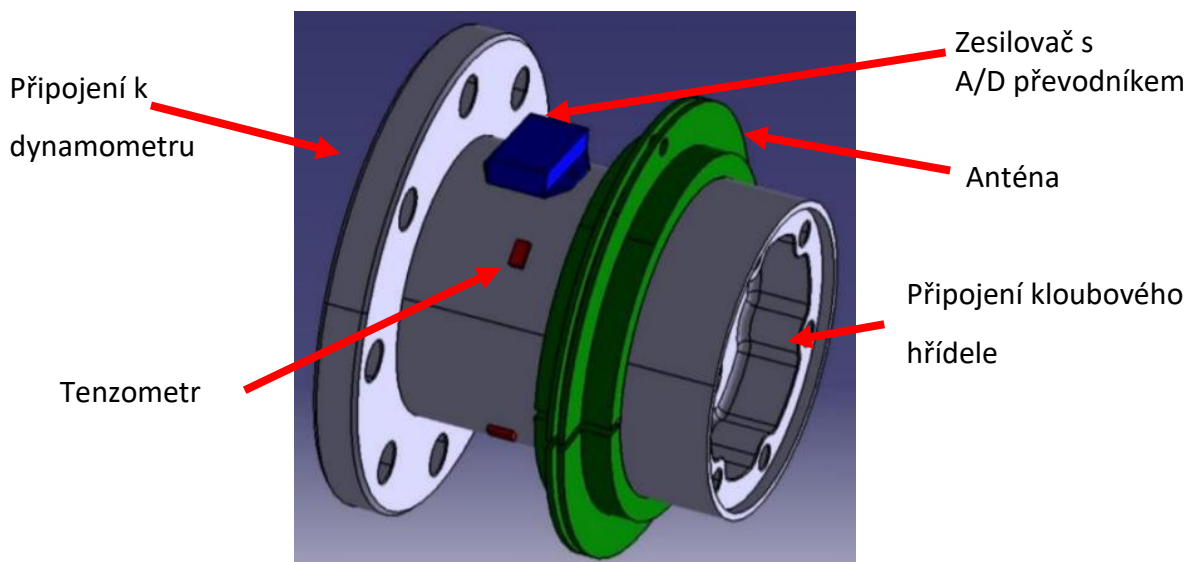
Druhá možnost, jak orientovat tělo vysílacího modulu a adaptér, je zobrazena na Obrázku 45. V tomto případě si lze všimnout, že perimetr je příznivě orientován vzhledem k možnému zatížení a celkově zvyšuje únosnost součásti. Rádus vnitřní kontaktní plochy je přesněji vytištěn, s lepší kvalitou povrchu, a lze předpokládat lepší smontovatelnost vysílacího modulu s adaptéry na kloubovém hřídeli. Z těchto důvodů bylo tělo vysílacího modulu (měřící a aretační půlměsíce) a adaptéry vytištěny v této orientaci.



Obrázek 45: 2. možnost orientace těla a adaptéru na podložce 3D tiskárny

11 Problematika realizace měření axiální síly a požadavky na měřitelnost

Na měřícím stanovišti se plánuje nasazení měřící aparatury Manner pro měření axiální síly kloubového hřídele. Cílem je měřit odporovou sílu, kterou klade kloubový hřídel proti změně jeho délky za rotace s různými hodnotami zátěžného momentu a při různém zalomení. K tomuto účelu bylo nejprve uvažováno využít přírubu sloužící k připojení kloubového hřídele a dynamometru. Konstrukcí této příruby se souběžně zabýval kolega Bc. Oldřich Suchánek a bylo tak možné optimalizovat konstrukci pro umístění tenzometrů a vysílací modul s anténou aparatury MANNER. Předpokládané umístění tenzometrů spolu s měřící aparaturou na přírubě je zobrazeno na obrázku 46.



Obrázek 46: Příruba s tenzometry a rotorovou částí aparatury Manner

V části, kde jsou umístěny tenzometry má příruba profil mezikruží. Při působení axiální odporové síly je tato část příruby namáhána na tah, resp. tlak a lze vhodnou orientací tenzometrů určit velikost této síly. Zároveň, ale musí být tato část příruby nadimenzována tak, aby byla schopna přenášet kroutící moment, přídatný zátěžný moment vznikající v důsledku zalomení kloubového hřídele a zatížení od tíhy kloubového hřídele. Z principu funkce tenzometru, (mechanické napětí měříme prostřednictvím deformace na povrchu součásti) požadavek přenesení kroutícího momentu omezuje minimální měřitelnou axiální sílu. Jestliže je součást v místě nalepení tenzometrů příliš tuhá, vzhledem k velikosti měřené síly, nemusí

být tato síla měřitelná. Kloubového hřídele přenášejí na zkušebním stavu momenty ve stovkách Newtonmetrů, ale odporová axiální síla kloubu Tripod se pohybuje v řádech desítek Newtonů a kloubu Rzeppa v řádech stovek Newtonů. Hodnoty relativního prodloužení, které jsou za běžných podmínek tenzometry měřitelné se pohybují v desítkách mikrometrů ^[29]. Hodnota jednoho mikrometru je z důvodu chyb měření (šum, statistická chyba) těžko měřitelná.

Po prvotním návrhu příruby kolegy Suchánka byly stanoveny hodnoty průřezu v místě nalepení tenzometrů:

$$d_{vnitřní} = 84 \text{ mm} \quad (11.1)$$

$$d_{vnější} = 90 \text{ mm} \quad (11.2)$$

Plochá mezikruží má pak hodnotu:

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi (d_{vnější}^2 - d_{vnitřní}^2) = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (90^2 - 84^2) \doteq 820 \text{ mm}^2 \quad (11.3)$$

Pro výpočet relativního prodloužení ε v místě nalepení tenzometrů předpokládám teoreticky velikost axiální síly:

$$F_{ax} = 800 \text{ N} \quad (11.4)$$

Relativní prodloužení pro tah/tlak lze pak vypočítat ze vzorce:

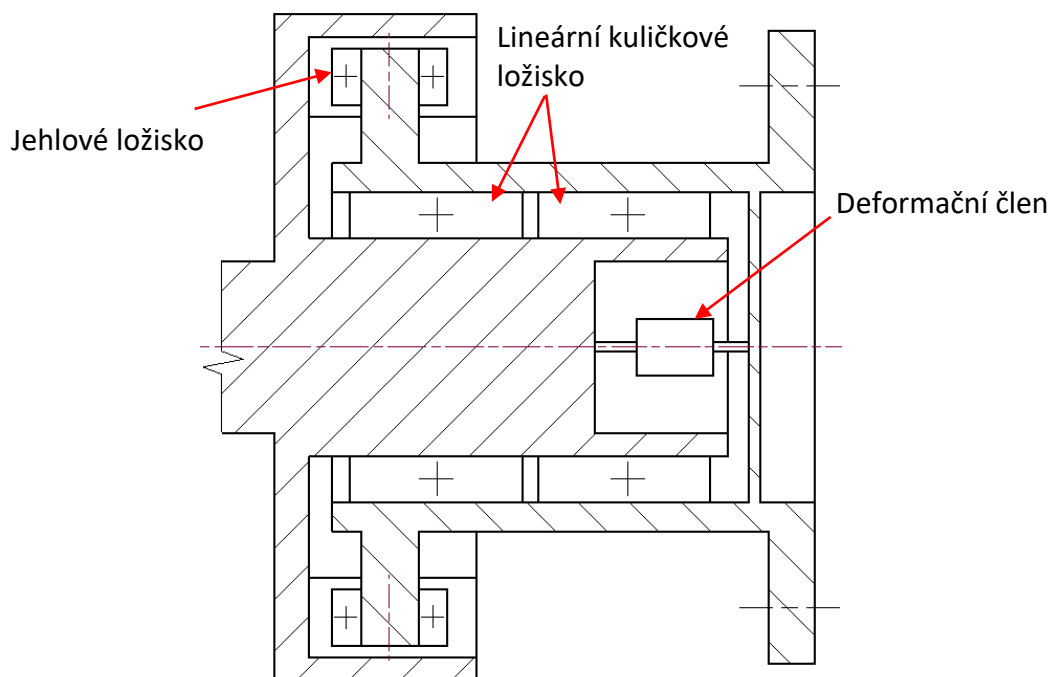
$$\varepsilon = \frac{F_{ax}}{S \cdot E} = \frac{800}{820 \cdot 193\,000} = 5,06 \cdot 10^{-6}, \quad (11.5)$$

kde E je Youngův modul a jeho hodnota pro zvolený materiál příruby (ocel 1.4305) je $E = 193\,000 \text{ N/mm}^2$. Vypočítaná hodnota relativního prodloužení ε je malá i při uvažování relativně vysoké axiální síly. Z tohoto důvodu by nebyly měřitelné klouby typu Tripod a ani některé nastavení kloubu Rzeppa. Po opakovaných pokusech se nepodařilo najít vhodný kompromis rozměrů příruby, který by zajistil dostatečnou únosnost, měřitelnost dostatečně malé axiální síly a také vyrobitelnost (např. požadavek na minimální tloušťku stěny trubkového profilu, aby šla součást soustružit). Použití stěny příruby pro měření axiální síly a zároveň přenosu kroutícího momentu se nejvíce jeví jako vhodné řešení této problematiky.

Možným řešením této problematiky je použít mechanismus, který umožňuje přenášet kroutící moment, ale zároveň má jeden stupně volnosti v podobě axiálního posuvu a následně tento stupeň volnosti odebrat použitím deformačního členu. Působení odporové axiální síly při zatáhnutí za kloubový hřídel by namáhalo deformační člen a tím lze tuto sílu měřit. V případě tohoto řešení vzniká požadavek na co nejmenší pasivní odporové síly, které působí v měřící

součásti proti axiálnímu posuvu. Část odporové axiální síly se přenáší do místa připojení sestavy k dynamometru pasivními odpory měřící součásti a část deformačním členem. Lze předpokládat, že se odporová axiální síla nejprve přenesou pasivními odpory a poté se začne přenášet deformačním členem. V takovém případě je možné experimentálně určit pasivní odpory měřící součásti, které představují minimální měřitelnou hodnotu a poté k nim přičíst naměřenou sílu v deformačním členu za účelem určení axiální odporové síly homokinetického kloubu s axiálním posuvem. Z požadavku nízké pasivní odporové síly měřící součásti lze předpokládat, že použití kluzného spoje v podobě drážkování, který se typicky používá u kloubových hřídelů s kardanovým kloubem pro kompenzaci změny délky, nebude také příliš vhodný pro měření obou typů kloubů (Tripod a Rzeppa), jelikož v místě přenosu kroutícího momentu vzniká velká třecí síla.

Jedno z možných konstrukčních řešení měřící součásti, které má teoreticky dostatečně nízké axiální pasivní odpory, je schématicky zobrazeno na obrázku 47.



Obrázek 47: Schéma součásti pro měření axiální síly

Konstrukce je částečně inspirována kloubem Tripod, především způsob přenosu momentu, kdy je použita obdobná trojnožka, která opřením v drážkách přenáší kroutící moment a pro zajištění nízkých pasivních odporů v místě přenosu kroutícího momentu jsou na trojnožce nasazena ložiska. Radiální zajištění se realizuje použitím lineárních kuličkových ložisek, které



kromě rotačního pohybu umožňují i axiální posuv. Z popisu vyplývá, že tato konstrukce umožňuje přenos kroutícího momentu a zároveň má jeden stupeň volnosti v axiálním směru, který lze odebrat deformačním členem.

Nejjednodušším řešením problematiky měření odporové axiální síly je pořízení měřící součásti, která by umožnila požadované měření, například víceosý snímač měřící síly a kroutícího momentu podél různých os a využít pouze měření axiální síly. Takový snímač je ale finančně velice nákladný, a proto by měl být volen spíše jako poslední možnost.

Z výše zmíněných poznatků je patrné, že problematika přenosu vysokého kroutícího momentu a zároveň měření nízké axiální síly je složitější, než se na první pohled zdá. Představený koncept možného řešení vyžaduje detailní rešerši, studii proveditelnosti a také obsáhlý konstrukční návrh. Vzhledem k rozsahu diplomové práce a časovým možnostem se nebudu dále zabývat návrhem zmíněné měřící součásti, ale pouze akvizicí dat z měřící aparatury Manner. Dovybavení zkušebního stanoviště součástí, umožňující měření axiální síly, je ponecháno jako námět pro další závěrečnou práci.

12 Ovládání klapek vzduchovodu

Na zkušební stanovišti je k dispozici ventilátor s rozvodem vzduchu sloužícím k simulaci chlazení homokinetických kloubů v reálném provozu, viz obrázek 48. Z ventilátoru vedou dvě větve, na jejichž začátku je namontována škrťací klapka určená k regulaci rychlosti vzduchu v jednotlivých větvích. U vozidla je rychlost protékajícího vzduchu u kloubu na straně kola rozdílná oproti rychlosti vzduchu na straně rozvodovky v důsledku zakrytování a tímto řešením lze tento jev napodobit.



Obrázek 48: Ventilátor a rozvod vzduchu

Škrťací klapky jsou koupeny v manuálním provedení, ale je možná jejich úprava pro připojení servomotoru, či pořídit provedení určené pro servomotor v případě automatizace zkušebního stanoviště nebo potřeby měřit dynamicky proměnné stavy a tomu přizpůsobit i nastavení rychlosti vzduchu.

V této kapitole bude z hlediska řízení přiblížen výběr servomotoru, který je vhodný pro ovládání klapek vzduchovodu a zároveň je použit k naprogramování řídicí smyčky klapek v akvizičním programu. Servomotor je možné vybrat s několika typy řízení. První typ využívá dvoubodového řízení a má pouze dva stavy: směr otáčení 1 a směr otáčení 2, resp. směr zavřít klapku a směr otevřít klapku. Tříbodové řízení umožňuje kromě těchto dvou stavů i možnost zastavení pohonu mezi krajními polohami, kdy není přesně definována pozice klapky. Nastavení úhlu klapky by pak muselo být počítáno z úhlové rychlosti servomotoru, pokud není použito zpětnovazební řízení. Dále existuje provedení s proporcionálním řízením. U tohoto typu servopohonu se používá napěťový nebo proudový signál, popř. existují další možnosti, pro plynulé nastavení polohy klapky, kdy určitému úhlu nastavení odpovídá určitá úroveň

řídícího signálu. Servomotor s tímto řízením ještě disponuje napěťovým výstupem, jehož hodnota je závislá na aktuální poloze nastavení výstupního hřídele servomotoru a poskytuje tedy informaci o poloze klapky a zda je klapka nastavena v požadované poloze. Provedení s proporcionálním řízením je finančně nákladnější, ale vzhledem k jednodušší aplikaci, přesnějšímu nastavení, zpětné vazbě o poloze klapky a potenciálně širším možností využití je v porovnání s cenovým rozdílem výhodnější právě varianta s proporcionálním řízením, jako například Servomotor Belimo LM 24 A-SROV, jehož parametry jsou zobrazeny v příloze 11. Tento servomotor bude uvažován při naprogramování ovládání klapek v LabVIEW programu.

Pro správné nastavení klapek, tak aby bylo docíleno požadované rychlosti vzduchu v jednotlivých větvích je vhodné použití zpětnovazebního řízení klapek. To vyžaduje měření rychlosti vzduchu za klapkami, které by bylo možné porovnat s požadovanou rychlostí a zajistit patřičnou reakci servopohonu, resp. klapky. Toto řešení je nákladné, jelikož vyžaduje pořízení průtokoměrů a z tohoto hlediska je příznivé použití jiného řešení této problematiky.

Jednou z možností, jak se vyhnout pořízení průtokoměrů je využití přenosného anemometru od firmy TESTO, který je v laboratoři dostupný a pomocí něho proměřit dvourozměrné pole jehož prvky jsou hodnoty nastavení obou klapek, viz obrázek 49.

v_1 [km/h] \ v_2 [km/h]	20	30	...	130
20	$[\alpha_{1,20,20}, \alpha_{2,20,20}]$	$[\alpha_{1,20,30}, \alpha_{2,20,30}]$	$[\alpha_{1,i,j}, \alpha_{2,i,j}]$	$[\alpha_{1,20,130}, \alpha_{2,20,130}]$
30	$[\alpha_{1,30,20}, \alpha_{2,30,20}]$			
...	$[\alpha_{1,i,j}, \alpha_{2,i,j}]$			
130	$[\alpha_{1,130,20}, \alpha_{2,130,20}]$			$[\alpha_{1,130,130}, \alpha_{2,130,130}]$

Obrázek 49: Dvourozměrné pole nastavení klapek

V případě manuálního provedení se jedná o hodnoty úhlu, které je ale možné převést na hodnoty napětí pro řídicí signál v případě ovládání servomotorem. Toto pole s hodnotami napětí lze vložit do LabVIEW programu a použít k ovládání servomotorů z prostředí LabVIEW. Nastavitelné rychlosti jsou zvoleny v rozsahu 20 km/h až 130 km/h a krok po 10 km/h. Ventilační potrubí je navrženo i na vyšší rychlosti, ale vzhledem k použitému typu ventilátoru, který byl v laboratoři k dispozici, je možná maximální rychlost proudění vzduchu 130 km/h.

Jelikož je použit pouze jeden ventilátor, ze kterého jsou vytvořeny dvě větve pomocí potrubní rozbočky tvaru Y, dochází ke vzájemnému ovlivnění proudění vzduchu, pokud je

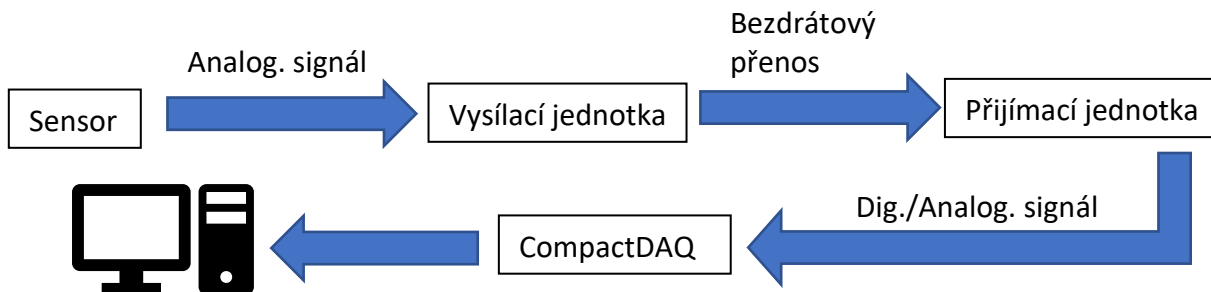


v jedné větvi přenastavena poloha klapky. Z tohoto důvodu je nutné správné nastavení klapek pro dosažení požadované rychlosti zjišťovat iteračním procesem, kdy se postupně nastavuje poloha obou klapek, dokud není anemometrem v obou větvích změřena požadovaná rychlost. Tvar i délka obou větví jsou téměř shodné, a lze proto teoreticky měřit pouze polovinu kombinací rychlostí. Tato metoda není tak přesná jako použití zpětnovazebního měření a také může dojít vlivem opotřebení k odchýlení od prvotního naměřeného 2D pole, vedoucí k potřebě znovu přeměřit pole nastavení klapek. I přes nedostatky této metody je uvažováno její použití, zejména kvůli nízkým nárokům na finance a absence požadavku na přesné nastavení rychlosti vzduchu.

13 Návrh měřicího řetězce

Tato kapitola se věnuje způsobu akvizice dat z měřících aparatur a výběru potřebných komponent k tomuto účelu. K akvizici dat je využito vývojové prostředí programu LabVIEW společnosti National Instruments spolu s hardwarovými prvky od téže společnosti. National Instruments nabízí široký výběr produktů vyznačující se svou univerzálností, spolehlivostí, kompatibilitou a dobrým poměrem cena/výkon. Produkty této společnosti jsou v laboratoři na Julisce dlouhodobě používané a vysloužily si pozitivní ohlas.

Na obrázku 50 je schematicky znázorněn obecný akviziční řetěz znázorňující akvizici dat z měřících aparatur EHL, Dx Telemetry a Manner. Ze sensoru je analogový signál přiveden do vysílacího modulu, který bezdrátově odesílá měřená data do přijímací jednotky. Přijímací jednotka je připojena k příslušnému modulu zapojeným v šasi CompactDAQ, které je následně připojeno k počítači.



Obrázek 50: Schéma akvizičního řetězce

13.1 CompactDAQ

CompactDAQ je platforma určená k snadné realizaci datových vstupů a výstupů ve spolupráci s vývojovým prostředím LabVIEW. Systém se skládá z šasi, do kterého je možné najednou zapojit určitý počet modulů NI C Series, dle konkrétního modelu šasi. Moduly se liší svou funkcí i provedením a běžně jsou dostupné moduly jak pro analogové, tak i digitální vstupy a výstupy.

13.1.1 Šasi CompactDAQ

V laboratoři Juliska je dostupné šasi cDAQ – 9178 umožňující připojení až 8 modulů a disponující připojením k počítači skrze vysokorychlostní rozhraní USB 2.0. V případě analogového vstupu je vzorkovací frekvence závislá na použitém modulu. Pro účely zkušební

stanoviště budou použity maximálně 3 moduly a počet slotů v šasi je tedy dostačující. Výběrem jednotlivých modulů se budu přesněji zabírat v dalších kapitolách.



Obrázek 51: Šasi cDAQ - 9178

13.2 Akvizice dat z měřící aparatury Dx Telemetry

Měřící aparatura Dx Telemetry disponuje napětovým analogovým výstupem nebo digitálním výstupem v podobě sběrnice dat CAN. K přiřazení měřených kanálů slouží pouze 6 analogových výstupů, a to je vzhledem k celkovým schopnostem měřící aparatury nedostačující. Z tohoto hlediska je výhodnější využít digitální výstup CAN. Ten umožňuje přenášet maximální počet měřených kanálů, tedy 24. Použití napětového analogového výstupu by navíc kladlo požadavky na rozlišovací schopnosti příslušného modulu NI C Series. V případě digitálního výstupu CAN je pro jeden měřený kanál ve zprávě standardně vyhrazeno 16 bitů. To odpovídá rozlišení vysílacího modulu, který disponuje 16-ti bitovým A/D převodníkem. Použití analogového výstupu může potenciálně zkreslit měřená data.

Z výše zmíněných důvodů jsem se rozhodl pro přenos dat z měřící aparatury Dx Telemetry použít sběrnici dat CAN.

13.3 Modul pro CAN

National Instruments má ve své nabídce moduly NI C Series určené přímo ke komunikaci pomocí sběrnice dat CAN a kompatibilní se softwarovou nadstavbou XNET, která jej zprostředkovává v LabVIEW. Pro moji aplikaci jsem vybral modul NI-9862, viz obrázek 52. Modul je kompatibilní s oběma typy zpráv CAN 2.0A i CAN 2.0B a k přenosu signálu po sběrnici používá fyzickou vrstvu High-Speed CAN (ISO 11989-2). Tyto specifikace odpovídají specifikacím měřících aparatur EHL a Dx Telemetry a je tím zajištěna správná funkce přenosu dat. Pro kontrolu bylo ještě v technických dokumentacích ověřeno souhlasné přiřazení pinů D–

SUB konektorů pro úrovně CAN_L a CAN_H. Ukončovací odpor je softwarově zapínatelný na straně modulu a není jej potřeba na tomto konci řešit hardwarově. [30]



Obrázek 52: Modul NI 9862

Modul je nutné napájet externím zdrojem napětí v rozsahu $+9\text{ V}$ až $+30\text{ V}$ skrze příslušné piny D-SUB konektoru. Měřící aparatury EHL a Dx Telemetry nedisponují touto funkcí a z tohoto důvodu byl vybrán speciální připojovací kabel (obrázek 53), který umožňuje připojení externího zdroje napětí pomocí svorkovnice na D-SUB konektoru. Na druhém konci je v konektoru integrován ukončovací odpor, jelikož aparatury EHL a Dx Telemetry nemají zabudovaný ukončovací odpor a při připojení je nutné ukončení na obou koncích. [31]



Obrázek 53: Připojovací kabel DB9F-PT2F-DB9F CAN Cable

13.4 Modul pro měření napětového vstupu

Modul určený k měření napětového vstupu je použit pro měření napětového výstupu z měřicí aparatury Manner v rozsahu $\pm 10\text{ V}$. Za tímto účelem byl vybrán modul NI 9205, který disponuje až 16 kanály pro diferenční zapojení a 32 kanály pro Single-Ended zapojení. Vzorkovací frekvence modulu je 250 kHz pro jeden měřený kanál a tato frekvence klesá úměrně s rostoucím počtem měřených kanálů. [32]

Měřicí aparatura MANNER má konektory typu BNC na svém výstupu. Pro připojení k modulu NI 9205 je nutné použít přechodku z BNC konektoru na svorkovnici a následně pomocí klasické kroucené dvoulinky propojit svorkovnice v diferenčním zapojení.

Tento modul nabízí dostačující počet kanálů, který je pro mou aplikaci předimenzován, ale nabízí prostor pro připojení dalších měřících aparatur. Alternativou by byl modul 9215, který disponuje pouze 4 kanály pro diferenční zapojení a přímo BNC konektory. V případě tohoto modulu je díky BNC konektoru připojení měřicí aparatury jednodušší než v případě modulu 9205. Vzhledem k univerzálnějšímu využití modulu 9205 oproti modulu 9215, jsem se rozhodl vybrat o trochu dražší modul 9205, který je zároveň levnější v porovnání s dalšími dostupnými moduly s podobnou konfigurací a z dlouhodobého hlediska se jeví jako lepší volba.



Obrázek 54: Modul NI 9205

13.5 Modul pro napěťový výstup

Za účelem ovládní servomotorů klapky vzduchovodu prostřednictvím LabVIEW jsem vybral modul NI 9263, viz obrázek 55. Výstupem z modulu jsou 4 napěťové kanály s rozsahem napětí $\pm 10\text{ V}$, rozlišením 16 bitů a maximální obnovovací frekvencí 100 kHz pro jeden měřený kanál (klesá s rostoucím počtem kanálů). Počet napěťových výstupů je dostačující pro ovládní dvou servomotorů a zbylé dva kanály je možné použít pro jiné účely. Modul je vybaven svorkovnicí, která zajišťuje rychlé a jednoduché zapojení vodičů. Výhodou tohoto modulu je nízká pořizovací cena v porovnání s jinými modely ze stejné kategorie. [33]



Obrázek 55: Modul NI 9263

14 LabVIEW program pro akvizici dat měřených na kloubovém hřídeli

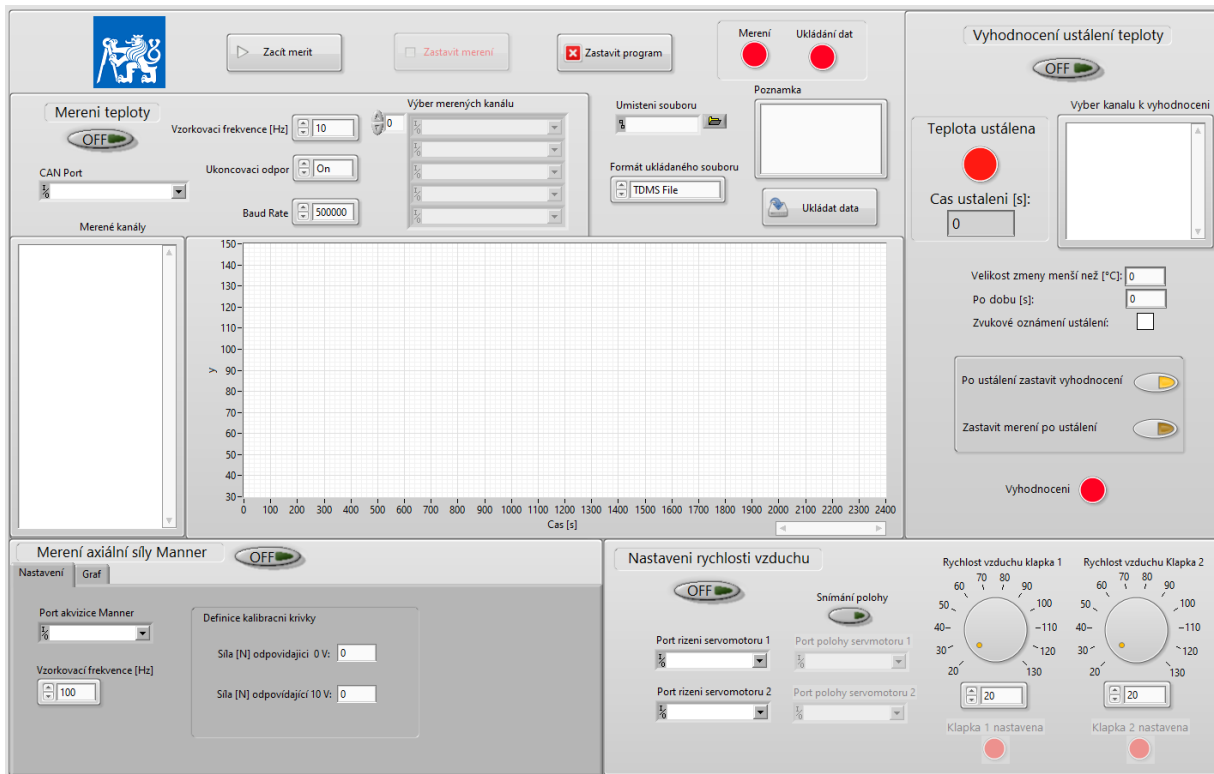
Tato kapitola se zabývá popisem ovládání, funkce a vlastností aplikace navržené v LabVIEW, která je určena pro zobrazení a uložení dat ze zmíněných měřících aparatur a k ovládání klapky přívodu vzduchu do bezpečnostního krytu. Zároveň tato kapitola může sloužit jako návod k obsluze a také k pochopení funkce programu pro případ nutnosti dalšího rozšíření.

Do programu byla předem naprogramována funkce ovládání klapky pomocí servomotorů a akvizice dat z měřící aparatury MANNER určené pro měření axiální síly, jelikož se předpokládá dovybavení zkušebního stavu těmito funkcemi.

14.1 Čelní panel

Obsluha ovládá program skrze čelní panel v LabVIEW, který je zobrazen na obrázku 56. Ve vrchní části se nacházejí tři hlavní tlačítka sloužící ke spuštění měření, zastavení měření a nouzové tlačítko („Zastavit program“) okamžitě ukončující program. Pro opakovaná měření není nutné zastavovat program, ale lze pouze zastavit měření a poté jej znovu spustit bez nutnosti spouštět celý program znovu. V takovém případě jsou zachovány veškeré konfigurace, které byly nastaveny před měřením. Ve vrchní části se dále nachází dvojice indikačních ledek signalizující měření a ukládání dat. Barva ledek se řídí běžnou logikou, kdy červená barva signalizuje nečinnost a zelená barva průběh příslušné činnosti. Dále je čelní panel rozdělen do několika oblastí, které jsou na první pohled patrné orámečkováním a přítomností názvu oblasti. Při chodu programu je příslušná oblast funkční pouze v případě, že je stisknuto tlačítko „Začít měřit“ a zároveň je přepínač v blízkosti názvu oblasti ve stavu „ON“. Následně jsou prvky sloužící ke konfiguraci měření deaktivovány a již není nadále možná konfigurace měření. Ukončení funkce dané oblasti bez nutnosti zastavit měření je možné přepnutím příslušného přepínače do stavu „OFF“. Takto lze vypnout jednotlivé oblasti nezávisle na sobě a v případě potřeby je znovu nakonfigurovat bez nutnosti zastavit měření. Stisknutím tlačítka „Zastavit měření“ je zastavena funkce oblastí akvizice dat a vyhodnocení. Nastavení klapky je zapnuto pouze přepínačem a funguje nezávisle na tlačítkách „Začít měřit“ a „Zastavit měření“.

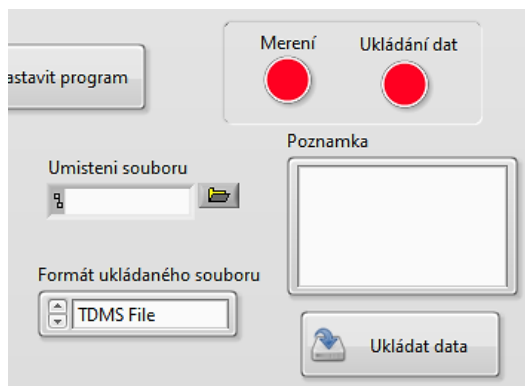
V následujících podkapitolách budou rozebrány funkce jednotlivých oblastí, včetně možnosti konfigurace parametrů.



Obrázek 56: Čelní panel programu v LabVIEW včetně zvýrazněných sekcí

14.1.1 Ukládání dat

Na hlavní ovládací tlačítka navazuje oblast ukládání dat, jejíž konfigurace je společná pro všechna měřená data.



Obrázek 57: Prostředí ukládání dat

Je zde možné zvolit umístění souboru s daty, formát ukládaného souboru a do políčka s názvem „Poznámka“ zapsat libovolný text, který bude zapsán do ukládaného souboru. To by mohlo být využito například pro zápis údajů o konfiguraci měření jako zátěžný moment, otáčky nebo



zalomení kloubového hřídele. V případě, že není zvoleno umístění souboru a je vznesen požadavek ukládání dat, je obsluha upozorněna hláškou vybízející ke zvolení umístění souboru. Toho je docíleno kliknutím na ikonku složky vedle příslušného okna a následně se volí složka v paměti počítače nebo externího uložení, do kterého budou uloženy soubory. Název souborů je generován automaticky a data se ukládají do dvou souborů. Do prvního souboru jsou uložena data z oblasti „Měření teploty“, která zároveň slouží pro obecné měření sběrnice CAN. V druhém souboru se ukládají data z oblasti „Měření axiální síly Manner“ sloužící pro měření axiální síly kloubového hřídele.

Program nabízí možnost volby formátu souboru mezi CSV a TDMS. Oba tyto soubory lze k dalšímu zpracování otevřít přímo v programu MS Excel. Je doporučeno používat spíše formát TDMS, jelikož ukládání do tohoto souboru méně zpomaluje chod programu a zároveň zabírá méně místa v uložení oproti CSV souboru.

Požadavku ukládání dat je docíleno stisknutím tlačítka „Ukládat data“, které se přepne to stavu TRUE a rozsvítí se oranžově. Přestože je vznesen požadavek, k ukládání a vytvoření souboru dojde až v případě spuštění akvizice dat. Na to je uživatel upozorněn změnou barvy LEDky, „Ukládání dat“. Ukládání se automaticky zastaví stisknutím tlačítka „Zastavit měření“, deaktivováním příslušné oblasti, z níž jsou ukládána data nebo opětovným stisknutím tlačítka „Ukládat data“, jenž nabude stavu FALSE a barva se změní zpět na šedou.

14.1.2 Měření teploty

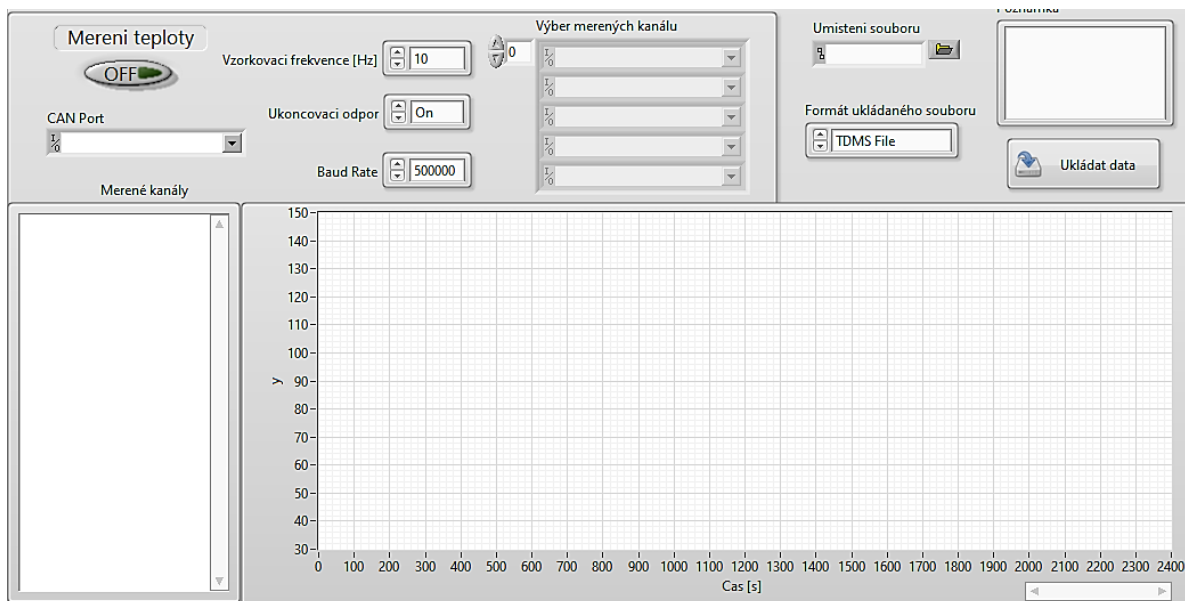
Tato část čelního panelu slouží pro konfiguraci sběrnice dat CAN a následnému vykreslení měřených hodnot do grafu. Před začátkem měření je potřeba zvolit správný port, ke kterému je měřící aparatura připojena, nastavit vzorkovací frekvenci a také Baud rate. Vzorkovací frekvence udává frekvenci načítání dat ze sběrnice. Hodnota vzorkovací frekvence je volena dle uvážení uživatele. Pro měření teploty je vhodná například frekvence 1 Hz nebo 10 Hz, jelikož proces zahřívání kloubů je pomalý a nepředpokládá se výrazná změna v průběhu teplot. Lze ale volit i daleko větší vzorkovací frekvenci, např. 4 kHz, což je nejvyšší frekvence, jaké může dosáhnout aparatura DX Telemetry. Baud rate je nastaven v závislosti na měřící aparatuře, která je k portu připojena. V případě měřící aparatury EHL je nutné použít standardní hodnotu 500 kbaud. U aparatury Dx Telemetry je nastavená hodnota stejná, jako hodnota použitá při konfiguraci CANu v měřící aparatuře. Výrobce doporučuje také standardní

hodnotu 500 kbaud. Dále je možné zapnout a vypnout ukončovací odpor, který je integrován v modulu NI 9862 a není tedy nutné ho řešit externě. [34]

Před začátkem se musí nahrát databázový soubor a vybrat měřené kanály, které se zobrazí v grafu a případně uloží do souboru. K tomu slouží rozklikávací okna umístěná nad grafem. Pokud uživatel nevybere žádný měřený kanál, je na to upozorněn.

V této oblasti čelního panelu se dále nachází graf, který zobrazuje průběhy dat z měřených kanálů v závislosti na čase. Během měření se v grafu vykresluje průběh pouze jednoho měřeného kanálu. Vykreslený kanál je vybírán v okně nacházející se nalevo od grafu. Naměřená data zůstávají po zastavení měření v paměti programu a průběhy vybraných měřených kanálů lze nadále zobrazit. Při opětovném spuštění měření se v grafu vymažou naměřené průběhy z předchozího měření.

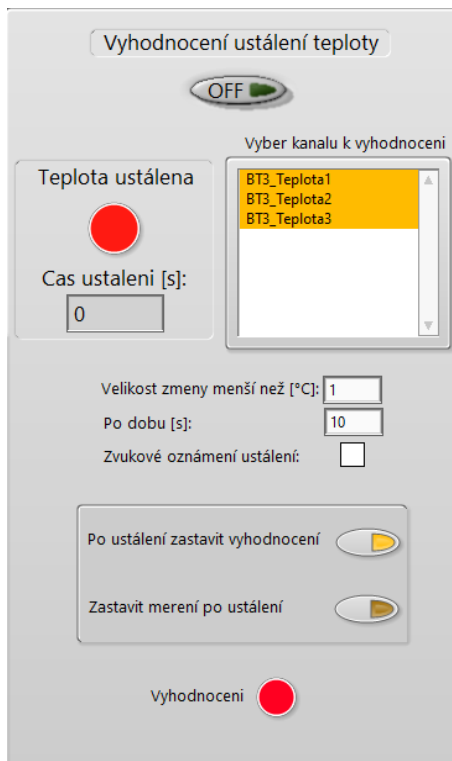
Akvizice dat pomocí sběrnice dat CAN je uživatelsky ovládána z této části programu. Přestože je primárně určena pro měření teploty, je možné měřit jakýkoliv vstup, který podporuje měřicí aparatura Dx Telemetry a EHL.



Obrázek 58: Oblast čelního panelu pro měření teploty

14.1.3 Vyhodnocení ustálení teploty

Vyhodnocení ustálení teploty pracuje s daty měřených kanálů z části měření teploty. Uživatelské prostředí vyhodnocení ustálení teploty je zobrazeno na obrázku 59. Proces vyhodnocení se spustí pouze pokud dojde k inicializaci měření sběrnice CAN.



Obrázek 59: Oblast vyhodnocení ustálení teploty

Před zapnutím vyhodnocení se musí vybrat kanály, které jsou použity k vyhodnocení. Pokud se nevyberou, uživatel je upozorněn textovou zprávou. Seznam těchto kanálů je přejat ze sekce měření teploty. Uživatel může ze seznamu vybrat libovolný počet kanálů, ale pro správnou funkci vyhodnocení by měly být zvoleny pouze kanály obsahující hodnoty teploty, jejichž průběh je podobný přechodové charakteristice 1. řádu. V jiném případě není zaručena správná funkce vyhodnocení. Při výběru více vyhodnocovaných kanálů než jeden, se měření vyhodnotí jako ustálené, pokud je podmínka splněna pro všechny vybrané kanály zároveň.

Dalšími vstupními parametry jsou velikost změny a doba, po kterou musí být splněna podmínka. Program zvolí časový okamžik, od kterého kontroluje, zda se teplota za zvolenou dobu nezmění o větší hodnotu, než byla nadefinována.

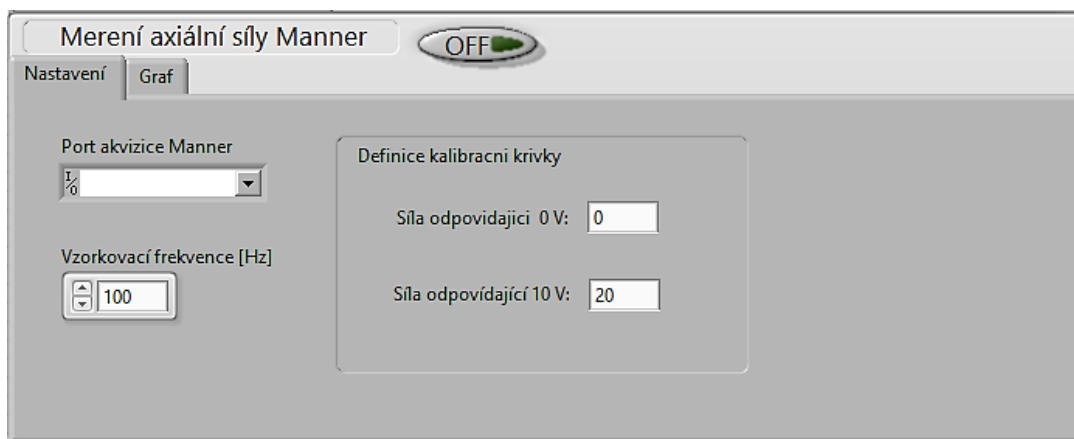
Pokud program vyhodnotí teplotu ve zvolených kanálech za ustálenou, upozorní uživatele změnou barvy příslušné ledky na zelenou, informativním časem ustálení, zvukovým signálem, pokud byla tato funkce zvolena, a patřičnou reakcí, kterou je možné vybrat v nabídce. Výchozí nastavení je zastavení vyhodnocení po ustálení. V takovém případě je uživatel pouze upozorněn a měření pokračuje dále, včetně případného ukládání dat. Další možností je zastavení měření, které má stejnou reakci jako stisk tlačítka „Zastavit měření“.

14.1.4 Měření axiální síly

Tato část čelního panelu je určena ke spolupráci s aparaturou Manner určenou pro měření axiální síly kloubového hřídele. Zde je opět před měřením nezbytné vybrat port modulu NI 9205, ke kterému je připojena měřící aparatura, a vzorkovací frekvenci. Je možné zvolit vzorkovací frekvenci 100 Hz nebo 1 kHz, ale musí se shodovat se vzorkovací frekvencí, která je nastavena na měřící aparatuře (možnost nastavit také 100 Hz nebo 1kHz).

Následně se v záložce s názvem nastavení nachází ještě dvojice oken sloužící k definování kalibrační křivky. Zde je nutné zadat síly, které byly použity pro kalibraci měřící aparatury a které odpovídají napětí signálu 0 V a 10 V. V grafu a při ukládání do souboru se napětí přepočítává na odpovídající axiální sílu. Pokud by uživatel chtěl získat přímo výstupní napětí z měřící aparatury bez přepočtu na sílu, je možné zadat v okénku pro sílu odpovídající 10 V hodnotu 10.

Překliknutím na druhou záložku s názvem graf se během měření zobrazí graf s průběhem síly v závislosti na čase. Data z grafu jsou smazána opětovným spuštěním měření axiální síly.

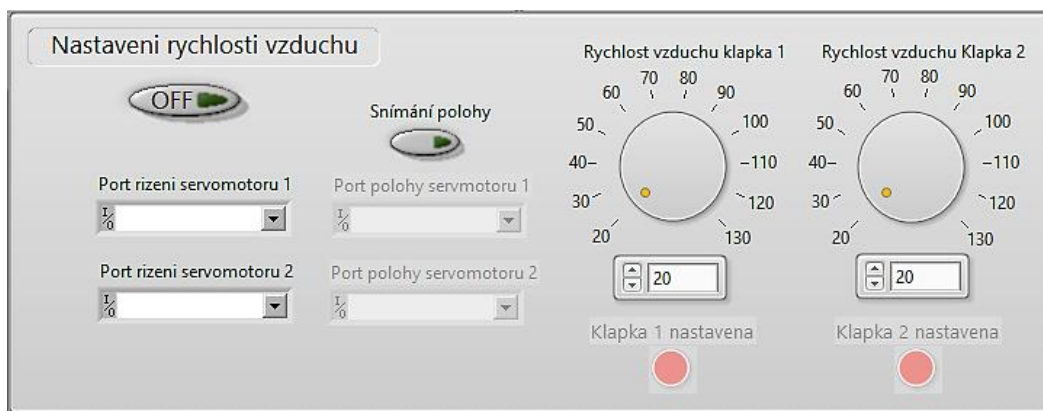


Obrázek 60: Část čelního panelu pro měření axiální síly

14.1.5 Nastavení rychlosti vzduchu

V pravé dolní části čelního panelu se nachází prvky sloužící k nastavení rychlosti chladícího vzduchu. Funkce je aktivována změnou hodnoty přepínače na „On“. Zároveň musí být vybrány porty pro řízení obou servomotorů a dále lze připojit i snímání polohy, kdy je poskytnuta zpětná vazba o poloze klapky, pokud se tato funkce aktivuje přepínačem. Přítomnost klapky v požadované poloze, a tím dosažení požadované rychlosti vzduchu, je indikováno rozsvícením příslušné ledky.

Nastavení rychlosti vzduchu v jednotlivých rozvodech je docíleno zadáním požadované rychlosti nebo otočením ovládacího prvku. Minimální rychlost je 20 km/h, maximální 130 km/h, a možné hodnoty v tomto rozmezí jsou násobkem deseti, což odpovídá proměřenému poli nastavení klapek, které bylo zmíněno v kapitole 12.



Obrázek 61: Nastavení rychlosti vzduchu

14.2 Blokový diagram

V této kapitole jsou představeny jednotlivé části blokového diagramu, včetně popisu realizace výše představených funkcí programu a návazností pro orientaci v blokovém diagramu. Přestože je v textu pár obrázků realizace některých funkcí, je spíše doporučeno vyhledání příslušných oblastí v celkovém diagramu (dostupný na přiloženém CD) nebo případně využít přímo LabVIEW k zobrazení blokového diagramu programu (dostupné na přiloženém CD) a možnosti procházet stavy stavového automatu. Tento text může navíc sloužit jako podklad pro případné úpravy a doplnění programu o další funkce, které budou pro měření vyžadovány.

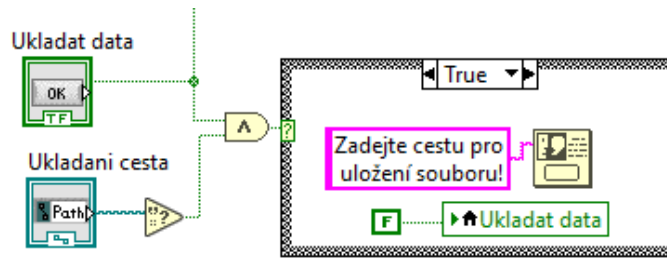
Rozdělení čelního panelu na oblasti odpovídá rozdělení blokového diagramu do vícero nezávislých smyček, aby bylo docíleno lepšího využití jader procesoru.

14.2.1 Smyčka ovládání

Čtení všech vstupů čelního panelu se děje ve smyčce ovládání představující While cyklus, ve kterém jsou obsaženy VI (virtuál instruments, bloky s určitou funkcí) pro ovládací prvky. Ve smyčce je vložena Event struktura reagující na stisknutí tlačítka „Zastavit měření“. Pokud je tlačítko stisknuto, jsou do příslušných lokálních proměnných zapsány náležité hodnoty pro iniciaci zastavení měření v měřících smyčkách. Event struktura zároveň určuje periodu celé smyčky čekáním na definovanou událost ve stavu Timeout. Zvolil jsem periodu 50 ms, která zbytečně nezatěžuje procesor počítače a zároveň nabízí dostatečně rychlou reakci na ovládací prvky.

Dále se v této smyčce nachází upozornění na zahájení ukládání dat bez zvolení cesty pro uložení souboru. To je realizováno pomocí Case struktury, viz obrázek 62, se dvěma stavy TRUE a FALSE. Hláška se zobrazí v případě, že je z ovládacího prvku načtena hodnota TRUE a funkce detekující prázdný řádek cesty nabude hodnoty TRUE. Program v takovém případě upozorní uživatele a vypne tlačítko ukládání dat.

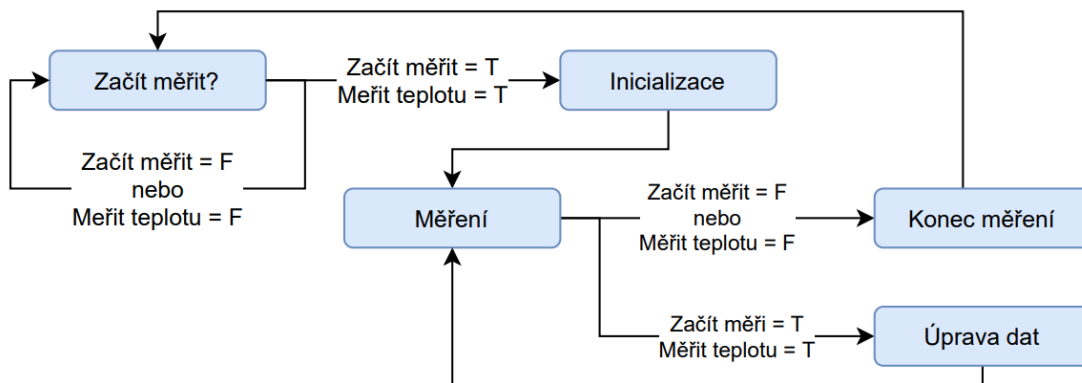
Ve smyčce jsou přítomny další dvě case struktury, které ale slouží pouze k aktivaci a deaktivaci některých ovládacích prvků, zejména ty, sloužící ke konfiguraci měření. Tím se při zahájení měření a následném měření předejde možným chybám a nežádoucím konfiguracím vzniklým změnou parametrů.



Obrázek 62: Upozornění na nevyplněný řádek cesty souboru

14.2.2 Smyčka akvizice dat CAN

Čtení dat ze sběrnice CAN je realizováno v samostatném While cyklu. Ve smyčce je použit stavový automat, jehož stavy, návaznosti a přechodové podmínky jsou schématicky zobrazeny na obrázku 63.



Obrázek 63: Schéma stavového automatu ve smyčce akvizice dat sběrnici CAN

Case struktura, představující stavový automat, zůstává ve stavu „začít měřit“ a periodicky kontroluje, zda nejsou splněny podmínky pro přechod do stavu „inicializace“. Pokud se tak stane, dojde ještě k vynulování grafu a vymazání průběhů dat z předchozího měření, jestliže se nejedná o první měření. V „inicializaci“ je vytvořen a spuštěn tzv. XNET session, nastaveny parametry pro CAN komunikaci a uloženy názvy měřených kanálů spolu s jednotkami z databázového souboru do příslušných sdílených proměnných, umožňující předávání dat mezi While smyčkami a paralelní chod ostatních smyček využívající tyto data. Následně přechází case struktura do stavu „měření“, ve kterém se nachází funkce XNET read. Pro akvizici dat pomocí funkcí XNET jsem vybral režim umožňující využití vyrovnávací paměti, přesněji Signal Waveform. Díky tomu je možné měřit s vysokou vzorkovací frekvencí bez rizika ztráty dat. Jednou z nevýhod tohoto režimu je duplikace dat, jestliže je použita vzorkovací frekvence vyšší, než je vzorkovací frekvence aparatury. Použití vysoké vzorkovací frekvence není u měření



teploty homokinetických kloubů vyžadováno, jelikož prohrátí kloubu a ustálení teploty je relativně pomalý děj trvající desítky minut a nepředpokládají se prudké změny teploty vyžadující vysoké vzorkovací frekvence. Tento program může být ovšem použit také pro měření jiných veličin, které by vyžadovali vzorkovací frekvence v řádech kHz, umožněné právě měřicí aparaturou DX telemetry. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl použít již dříve zmíněný režim pro XNET session, přestože představuje obtížnější zpracování dat pro zobrazení, či uložení a potenciální duplikací dat.

Ve stavu „měření“ se navíc kontroluje, zda má být měření zastaveno nebo pokračovat. Splněním podmínky pro ukončení (proměnná „začít měřit“ je FALSE nebo proměnná „měřit teplotu“ je FALSE) přechází stavový automat v další iteraci smyčky do stavu „konec měření“, kde je zastaven a vymazán XNET session. Poté následuje přechod do počátečního stavu „začít měřit“, jehož funkce byla již popsána.

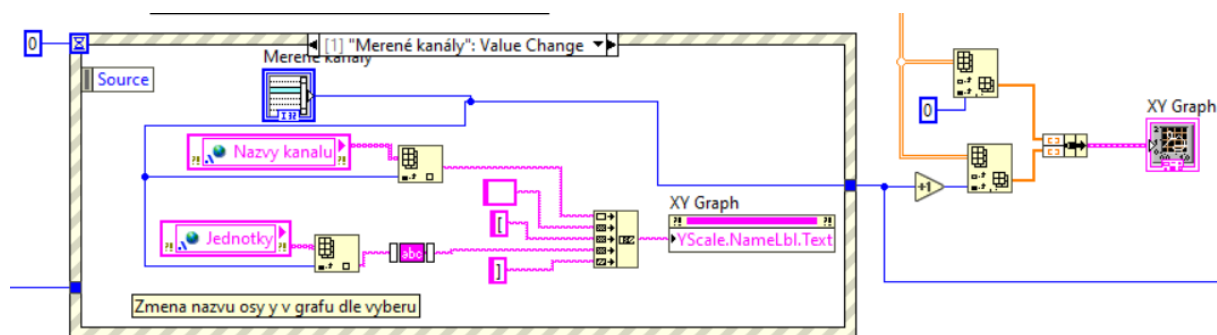
Jestliže není vznesen požadavek na ukončení měření, pokračuje stavový automat do stavu „úprava dat“. V tomto stavu jsou upravena a předána data pro další zpracování. Datovým výstupem z funkce XNET read je 1D pole jehož prvky jsou typu waveform (datový typ tvořený clusterem v němž je obsažen: časový údaj začátku měřeného signálu, číslo popisující rozdíl v sekundách mezi dvěma vzorky signálu a 1D pole obsahující hodnoty měřeného signálu) a pro další zpracování ve smyčce zobrazení a uložení dat CAN je žádoucí zapsat tyto data do 2D pole, kde v prvním sloupci je relativní čas vztažený k začátku měření a v dalších sloupcích jsou naměřená data příslušící zvoleným kanálům. Počet řádku 2D pole je závislý na vzorkovací frekvenci a na frekvenci smyčky. Počáteční hodnota relativního času je zpravidla větší než 0 z důvodu prodlevy mezi stavy měření a inicializace, kde je načten počáteční čas sloužící k odečtu od časové stopy měřeného signálu a výsledku v podobě relativního času od začátku měření. Tento převod a přepoččet se děje ve stavu úpravy dat a také je zde 2D pole uloženo do tzv. fronty, sloužící ke sdílení dat s While smyčkami zobrazení a uložení dat CAN a vyhodnocení ustálení teploty. Při měření je stavový automat zacyklen ve stavech „měření“ a „úprava dat“

Ve smyčce akvizice dat CAN je vložena funkce Wait, zpomalující chod smyčky, aby nedošlo k nadměrnému zatížení procesoru. Perioda jedné iterace smyčky je nastavena na 100 ms.

14.2.3 Smyčka zobrazení a uložení dat CAN

Jak již název kapitoly napovídá v této části programu je naprogramováno zobrazení dat v grafu nacházejícího se v sekci měření teploty (kapitola 14.1.2) a také ukládání těchto dat do souboru. K tomuto účelu je vytvořena samostatná While struktura, do které jsou data předávány ze smyčky „akvizice dat CAN“ pomocí fronty. Funkce Dequeue Element odebere z fronty jeden element (2D pole). Pokud ve frontě není přítomen žádný element, tato funkce čeká určitou dobu, zda ve frontě nedetekuje element. v mém případě jsem nastavil 100 ms, aby byla hodnota shodná s frekvencí smyčky „akvizice dat“ a nedocházelo ke kumulování elementů ve frontě. Pokud po tuto dobu není element detekován, proběhne po uplynutí doby jedna iterace while struktury a výstupem z funkce Dequeue element je prázdné 2D pole. Díky této vlastnosti je tato funkce použita zároveň ke snížení frekvence smyčky.

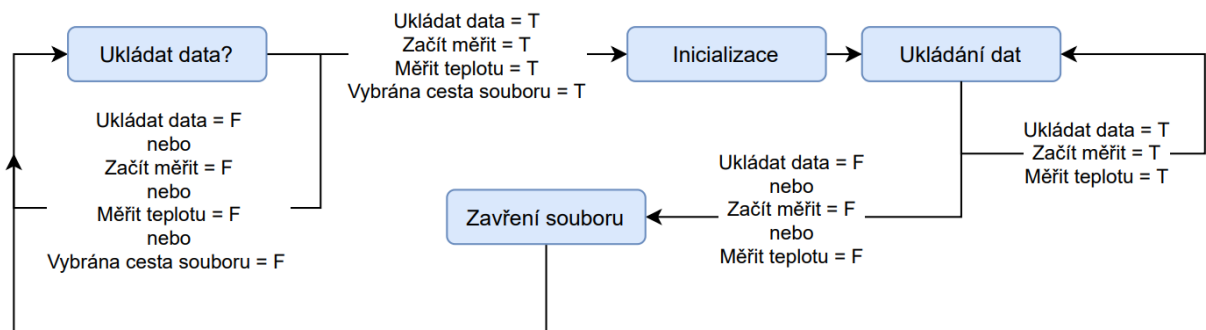
Elementy (2D pole) odebrané z fronty jsou připojeny ke 2D poli obsažené v shift registru (funkce sloužící ke zpřístupnění dat z předešlé iterace smyčky) a tím vzniká 2D pole obsahující průběhy měřených veličin od začátku měření, které je možné zobrazit v XY grafu. Výběr měřeného kanálu zobrazený v grafu je realizován pomocí Event struktury reagující na změnu hodnoty prvku listbox (seznam obsahující názvy měřených kanálů a dle výběru je v blokovém diagramu celočíselný výstup), viz obrázek 64. Výstupní hodnota prvku listbox nastaví popisky osy Y, které byly načteny ve stavu inicializace smyčky akvizice dat CAN a vybere příslušný sloupec z 2D pole naměřených dat.



Obrázek 64: Event struktura sloužící ke změně zobrazovaného kanálu v grafu

Ukládání dat je realizováno stavovým automatem, který je schematicky zobrazen v obrázku 65. Pro spuštění inicializace a následného ukládání je nutná podmínka aktivace ukládání dat, měření teploty, požadavku začít měřit a vybrat cestu pro uložení souboru. Po splnění podmínek je nejprve ve fázi „inicializace“ vytvořen soubor a zapsáno záhlaví dat

obsahující poznámku, informaci o vzorkovací frekvenci a názvy měřených kanálů spolu s jednotkami, pokud jsou definovány v databázovém souboru. Následně stavový automat přechází do stavu „ukládání dat“, kdy jsou jednotlivé elementy (2D pole) z funkce Dequeue element ukládány při každé iteraci smyčky.

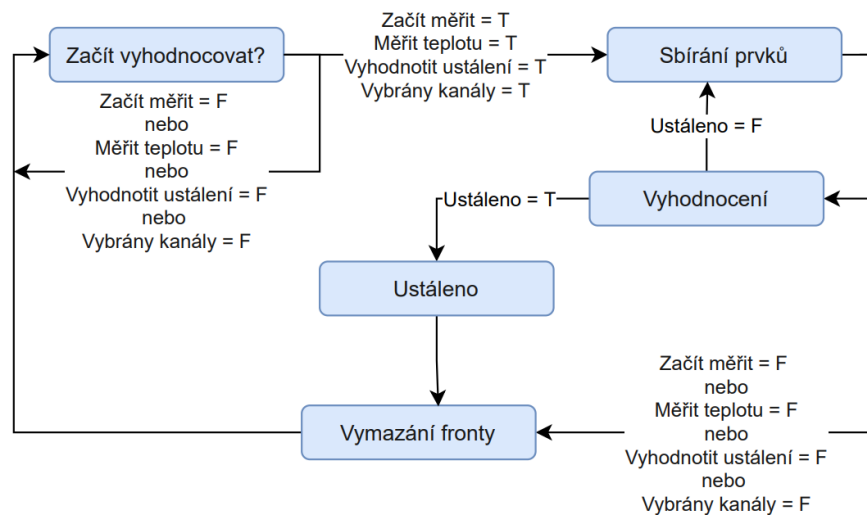


Obrázek 65: Stavový dat ukládání dat ve smyčce Zobrazení a ukládání dat CAN

Zápis dat je ukončen v případě opětovného stisknutí tlačítka „Ukládat data“, deaktivací přepínače „Měření teploty“, zastavením měření nebo zastavením programu. Stavový automat přechází do stavu „Zavření souboru“, ve kterém je soubor uzavřen a je možné jej otevřít, přestože program stále běží. Následuje přechod do počátečního stavu „Ukládat data?“, který byl již popsán.

14.2.4 Smyčka vyhodnocení ustálení teploty

V této smyčce je naprogramováno vyhodnocení ustálení teploty a s tím související funkce. Je použita samostatná While smyčka, do které jsou data ze smyčky akvizice dat přiváděny stejným způsobem jako do smyčky „Zobrazení a uložení dat CAN“, tedy použitím front. Pro implementování rozhodovacích funkcí byla opět použita struktura stavového automatu, jehož stavy a přechody jsou zobrazeny v obrázku 66.



Obrázek 66: Schéma stavového automatu ve smyčce vyhodnocení ustálení teploty

Stavový automat je po spuštění programu, obdobně jako v ostatních smyčkách, zacyklen v počátečním stavu, „Začít vyhodnocovat“, ve kterém setrvává, dokud není splněna vhodná kombinace proměnných. Perioda smyčky v tomto stavu je řízena funkcí Wait a je nastavena na 100 ms. Před přechodem do následujícího stavu se zkontroluje, zda jsou vybrány kanály k vyhodnocení. Jestliže tomu tak není, je přepínač vyhodnocení ustálení teploty deaktivován, čímž se předejde přechodu do dalšího stavu a uživatel je vyzván, aby provedl výběr vyhodnocených kanálů.

Ve stavu „sbírání prvků“, jsou načteny elementy (2D pole) z funkce Dequeue element a zároveň je tato funkce použita ke zpomalení cyklu (obdobně jako ve smyčce Zobrazení a uložení dat CAN), ve kterém dochází ke sběru prvku a vyhodnocení, za účelem snížení zatížení procesoru. První sloupec 2D pole obsahuje časovou stopu a každý další sloupec odpovídá vždy jednomu měřenému kanálu. K dalšímu zpracování se předává první sloupec 2D pole, představující čas, a pouze ty sloupce 2D pole, náležející vybraným kanálům pro vyhodnocení.



Reakce na požadavek ukončení měření je ošetřena v tomto stavu pomocí Case struktury, kdy stav FALSE této struktury vede ke stavu ukončující vyhodnocení a návrat do počátečního stavu.

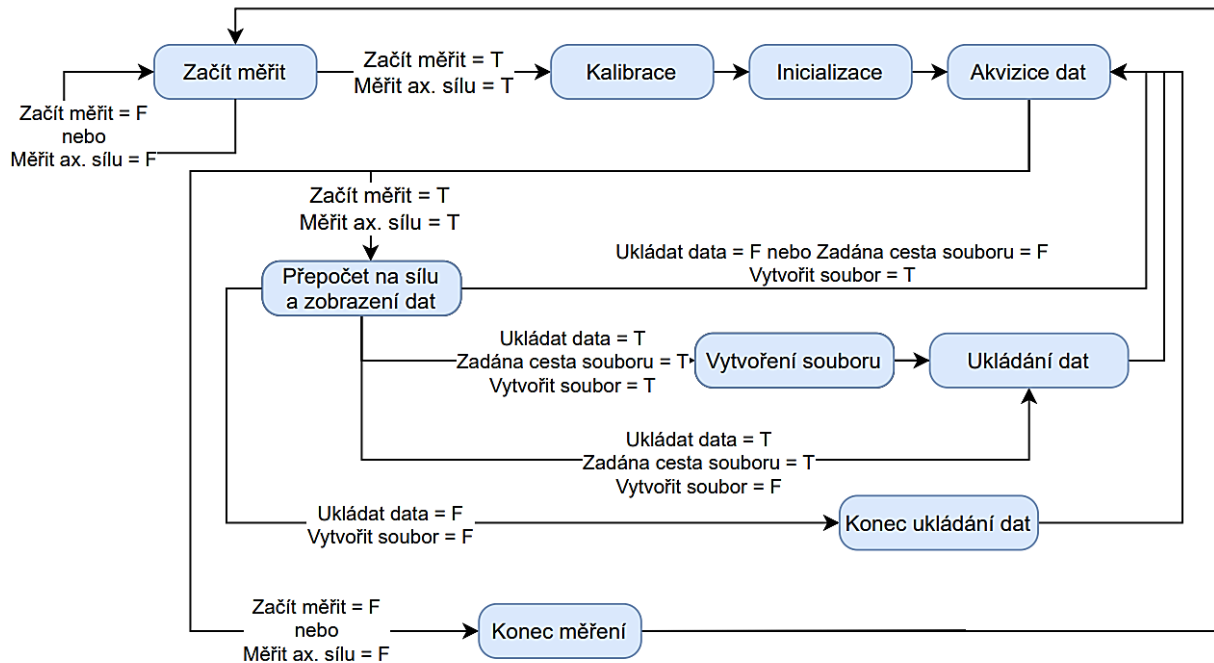
Samotné vyhodnocení se děje ve stavu s obdobným názvem, „vyhodnocení“. Do tohoto stavu je vložena další Case struktura nabývající hodnot True a False. V případě, kdy struktura nabude hodnoty True, je z 2D pole získán počáteční bod, jako první řádek pole a od tohoto bodu je měřen rozdíl hodnot a doba, po kterou musí být absolutní hodnota rozdílu menší než stanovená hodnota definovaná skrze čelní panel. Absolutní hodnota je použita pro měření v prakticky ustáleném stavu, kdy může rozdíl nabýt záporných hodnot v důsledku statistických chyb měření, či šumu. Ze statistických chyb a šumu také vyplývá požadavek na volbu velikosti změny za určitý časový interval, která by neměla být příliš malá.

Ve druhém stavu struktury, False, je kontrolováno, zda výsledek rozdílu každého prvku v každém sloupci, nově získané sady dat, s příslušnou hodnotou počátečního bodu je menší než zadaná hodnota velikosti změny. Pokud je tato podmínka splněna po zadanou dobu, je měření vyhodnoceno jako ustálené. Podmínka se vyhodnocuje v každé iteraci cyklu vyhodnocování (stavy „sbírání prvků“ a „vyhodnocení“) a jestliže není splněna, dojde k volbě nového počátečního bodu, od kterého je podmínka kontrolována.

Pokud je měření vyhodnocené za ustálené, přechází stavový automat do stavu „po ustálení“ ve kterém zareaguje, dle volby na čelním panelu, vypne ledku a v další iteraci smyčky přejde do stavu „vymazání fronty“. Jak již název napovídá, zde je vymazána fronta, pokud v ní zbyla nějaká data, aby nedošlo k jejich odebrání při zahájení dalšího vyhodnocení a vzniku chyby. Poté následuje počáteční stav, který byl již zmíněn dříve.

14.2.5 Smyčka akvizice dat Manner

Funkce akvizice dat z měřicí aparatury Manner je pro zrychlení běhu programu realizována samostatným While cyklem. V této smyčce je také použit stavový automat, jehož jednotlivé stavy a rozhodovací mechanismy jsou zobrazeny na obrázku 67.



Obrázek 67: Schéma stavového automatu ve smyčce akvizice dat z aparatury Manner

Po spuštění programu se spustí While cyklus a Case struktura představující stavový automat setrvává ve stavu „začít měřit“, dokud se z lokálních proměnných Začít měřit a Měřit ax. sílu nenačtou hodnoty TRUE. Ještě před přechodem do dalšího stavu, dojde k vynulování shift registru pro případ, že v něm jsou obsažena data z minulého měření.

Následuje přechod do stavu kalibrace, kde jsou načteny kalibrační hodnoty z čelního panelu. Je předpokládáno použití lineárních tenzometrů pro zjištění axiální síly a následně je i průběh kalibrační křivky lineární. Směrnice K kalibrační křivky se zjistí z následující rovnice:

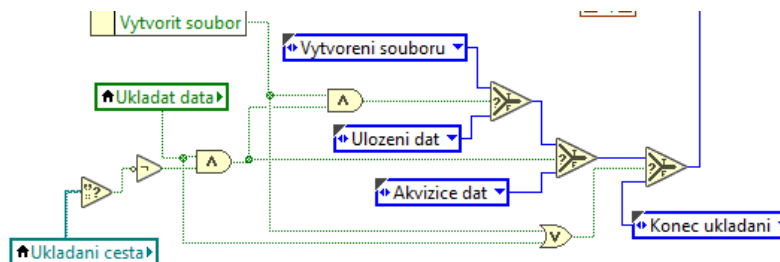
$$K = \frac{F_{10} - F_0}{U_{10} - U_0}, [K] = \left[\frac{N}{V} \right], \quad (14.2.1)$$

kde F_{10} je síla odpovídající napětovému výstupu z aparatury $U_{10} = 10 V$ a F_0 je síla odpovídající napětovému výstupu, $U_0 = 0 V$. Pro výpočet směrnice je použita funkce Formula node umožňující jednoduchý řádkový zápis požadované matematické operace.

Samotná akvizice je realizována sadou funkcí NI DAQmx a probíhá ve stavu „inicializace“ a „akvizice dat“, který se cyklicky opakuje. Z funkce DAQmx Read jsou přežaty hodnoty napětí spolu s časovým údajem ve formátu Waveform a předány k dalšímu zpracování do stavu „Přepočtu na sílu a zobrazení dat“. V tomto stavu se průběh napětí převádí na sílu aplikováním rovnice 14.2.2 na každý prvek vektoru naměřených dat a pak jsou tyto data vykreslena do grafu.

$$F = K \cdot U_M + F_0. \quad (14.2.2)$$

Dále je zde naprogramována rozhodovací sekvence, viz obrázek 68, určující následující stav, zda budou data uložena nebo ne. Kombinace proměnných pro přechod do jednotlivých stavů byly zobrazeny v obrázku 68.



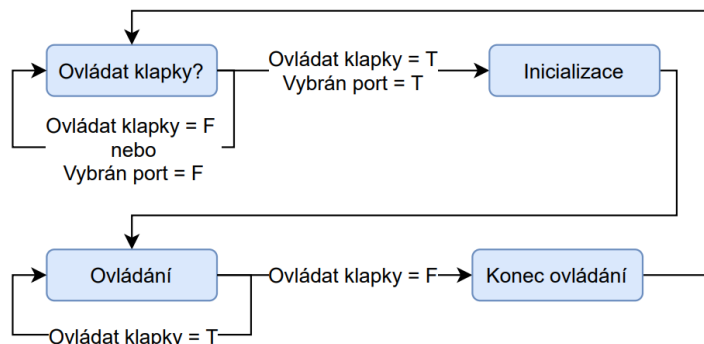
Obrázek 68: Rozhodovací sekvence

Požadavek zastavení měření je kontrolován při akvizici dat. Jestliže se z proměnné Začít měřit nebo Měřit. ax. sílu načte hodnota FALSE, dojde k přepsání následujícího stavu na Konec měření, ve kterém se ukončí DAQmx task a zavře se TDMS soubor, pokud byl vytvořen.

Perioda while smyčky je zpomalena funkcí wait na 50 ms. Frekvence smyčky je dostačující pro akvizici dat frekvencí 1 kHz díky použití vyrovnávací paměti a také je zajištěna dostatečně rychlá reakce na požadavek ukončení měření. Zároveň toto zpomalení snižuje nároky na procesor počítače.

14.2.6 Smyčka ovládání klapky

Poslední část blokového diagramu slouží k ovládání servomotorů klapky vzduchovodu. Pro tento účel je rovněž vytvořena samostatná While smyčka z obdobných důvodů, které byly již zmíněny, ale také pro osamostatnění a nezávislý chod smyčky. Funkce je zajištěna opět stavovým automatem, jehož jednotlivé stavy a podmínky pro přechody jsou zobrazeny v následujícím obrázku.



Obrázek 69: Schéma stavového automatu ve smyčce ovládání klapky

Do stavového automatu je z clusteru při spuštění programu načten stav „ovládat klapky?“, ve kterém je zacyklen, dokud nejsou splněny nutné podmínky pro přechod do stavu „inicializace“. Přepínač na čelním panelu musí být přepnut do polohy ON (hodnota proměnné ovládat klapky se nastaví na TRUE) a zároveň musí být vybrány porty pro řízení, resp. porty pro řízení i snímání polohy, pokud je tato funkce zapnuta. Splněním těchto podmínek dojde k inicializaci, kde jsou vytvořeny příslušné DAQmx task (soubor konfiguračních parametrů pro další DAQmx funkce) a následnému přechodu do stavu „ovládání“. V tomto stavu je nastaveno výstupní napětí a zároveň čtena poloha servomotoru, pokud je tato funkce aktivována. Hodnoty výstupního napětí jsou zapsány ve 2D poli, jehož řádky a sloupce odpovídají možným kombinacím požadovaných rychlostí v jednotlivých větvích. Každý prvek tohoto 2D pole je tvořen clusterem, do kterého je vloženo dvouprvkové 1D pole, obsahující hodnoty napětí pro oba servomotory. Indikátory v podobě ledek se aktivují (rozsvítí se zeleně) v případě, že napětí signálu aktuální polohy odpovídá napětí, které je v danou chvíli vybráno ve 2D poli. Tyto dvě napětí se nemusí přesně rovnat ve všech desetinných místech a následkem toho může dojít k případu, kdy se ledky nerozsvítí. Z tohoto důvodu je použit rozdíl těchto dvou hodnot a pokud je velikost rozdílu menší než 0.1 V, je poloha považována za nastavenou a dojde k aktivaci



ledek. Rozdíl 0,1V odpovídá úhlu $1,1875^\circ$ pro zvolený servomotor. Ledka se tedy rozsvítí o něco dříve, než dojde k ustálení polohy klapky, ale jedná se o malý časový okamžik.

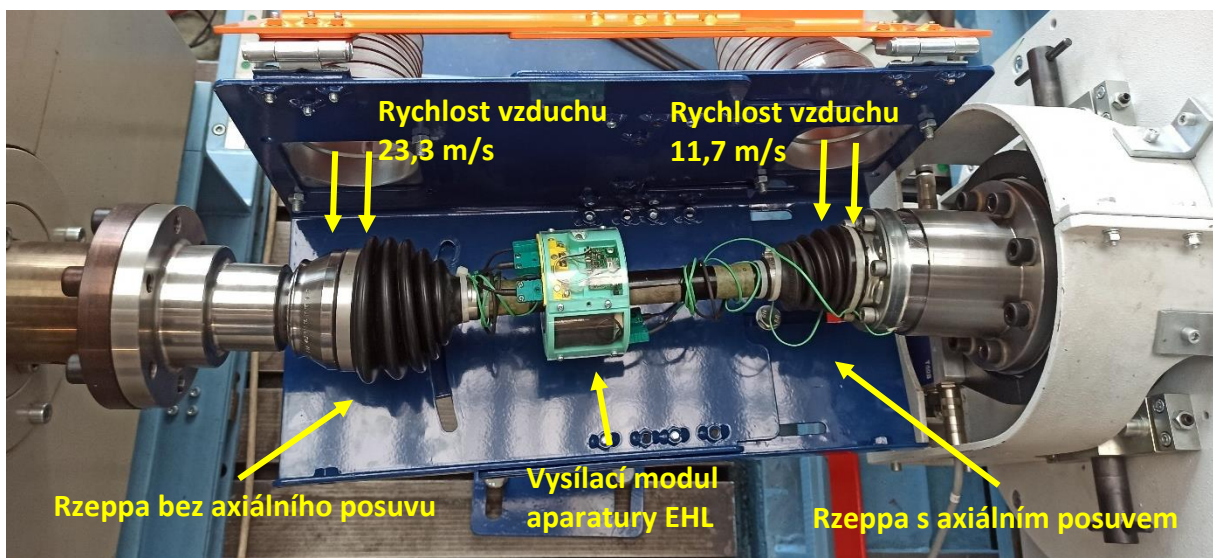
Iterace smyček jsou zpomaleny funkcí Wait s periodou 100 ms. Opět to pomáhá snížit zatížení procesoru a zároveň umožňuje plynulou a rychlou reakci na ovládací prvky čelního panelu.

15 Experimentální stanovení průběhů teplot kloubového hřídele

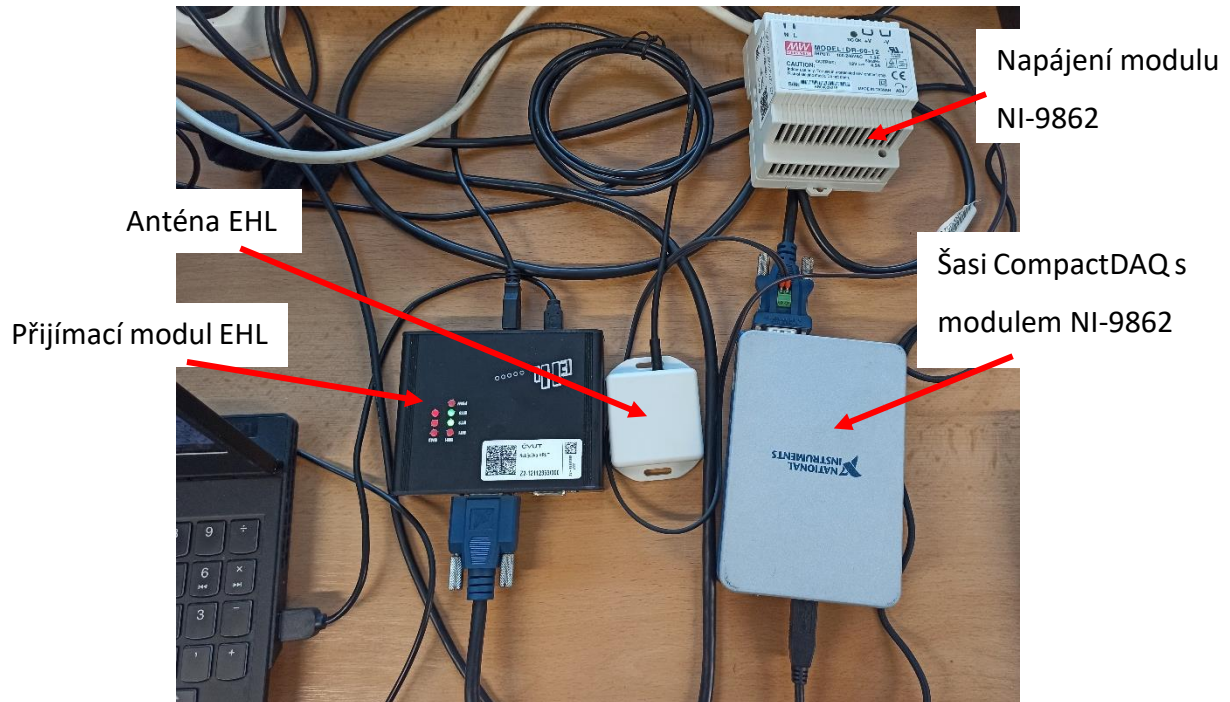
Za účelem ověření funkčnosti nového držáku měřících karet na kloubovém hřídeli, měřícího řetězce a akvizičního programu byl na otevřeném zkušebním stanovišti změřen průběh teplot kloubového hřídele při různém úhlu zalomení homokinetických kloubů.

15.1 Konfigurace měření

Měření bylo realizováno na zkušebním stanovišti, které je zmíněno a zobrazeno v kapitole 3. Na kloubový hřídel s dvěma klouby typu Rzeppa byl namontován vysílací modul aparatury EHL v konfiguraci pro měření 6 termočlánků, viz obrázek 70. Přijímací modul EHL byl připojen pomocí kabelu DB9F-PT2F-DB9F CAN (obrázek 53) k modulu NI-9862 v jednoslotovém šasi CompactDAQ, viz obrázek 71.



Obrázek 70: Vysílací modul a kloubový hřídel při experimentu



Obrázek 71: Připojení měřící aparatury k počítači

Pro stanovení parametrů zkoušky byla použita simulace jízdy vozidla konstantní rychlostí 120 km/h. Zatěžující moment M_{zt} kloubového hřídele byl stanoven z podélné dynamiky vozidla při uvažování valivého odporu pneumatik a odporu vzduchu:

$$M_{zt} = 112 \text{ Nm}, \quad (15.1.1)$$

Parametry pro výpočet podélné dynamiky, viz tabulka 5, byly zvoleny pro vozidla střední třídy, u kterých je tento typ kloubového hřídele velice často používán.

Hmotnost vozidla	1 400 kg	Čelní plocha	2 m ²
Dynamický poloměr pneumatiky	0,326 m	Součinitel odporu vzduchu	0,3
Hustota vzduchu	1,25 kg/m ³	Součinitel odporu valení	0,02

Tabulka 5: Konstanty pro podélnou dynamiku

Této rychlosti odpovídají otáčky kola při použití pneumatiky zmíněné v kapitole 10.5.4:

$$n_{zt} = 983 \text{ 1/min} \quad (15.1.2)$$

Kvalifikovaným odhadem se nastavila rychlost chladícího vzduchu na straně kola $v_{vz,kolo} = 23,3 \text{ m/s}$ a na straně rozvodovky $v_{vz,rozvodovka} = 11,7 \text{ m/s}$. Hodnoty rychlosti jsou nižší, než je relativní rychlost automobilu a okolního prostředí z důvodu částečného zakrytí kloubového hřídele v podvozku automobilu.

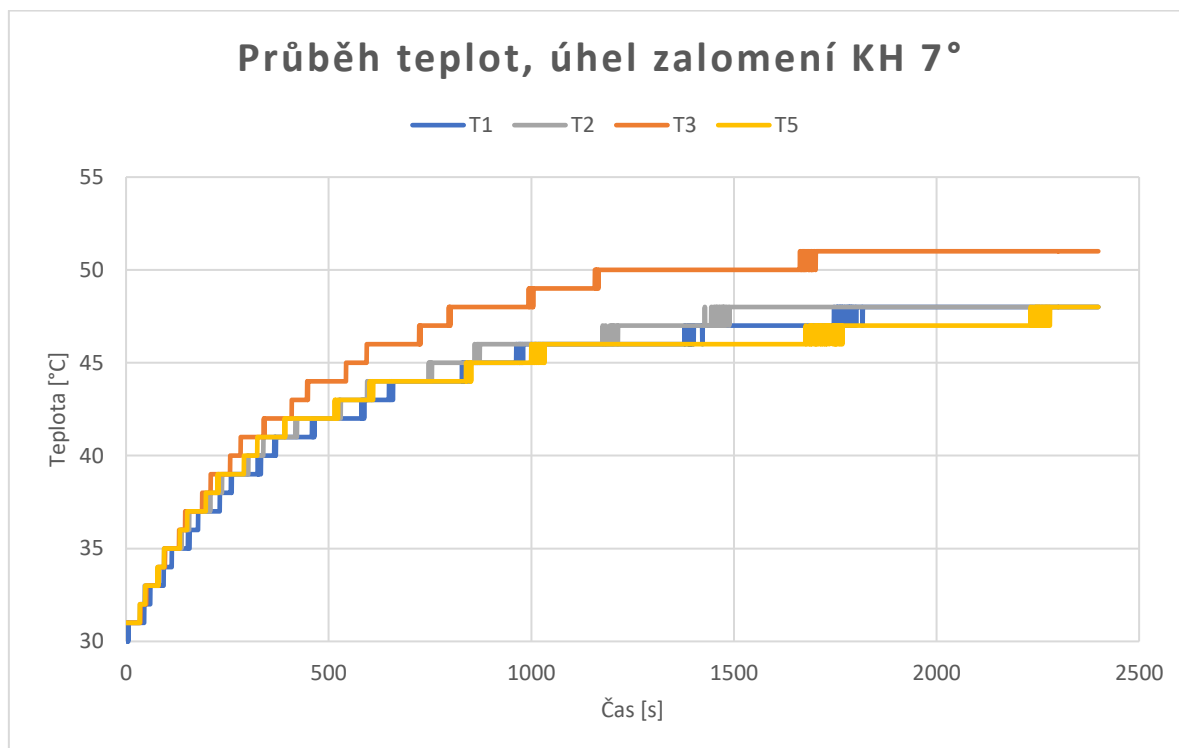
Po prvním měření s úhlem zalomení 7° byl kloubový hřídel ochlazen proudem vzduchu a následně se realizovalo druhé měření s úhlem zalomení 11° .

15.2 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

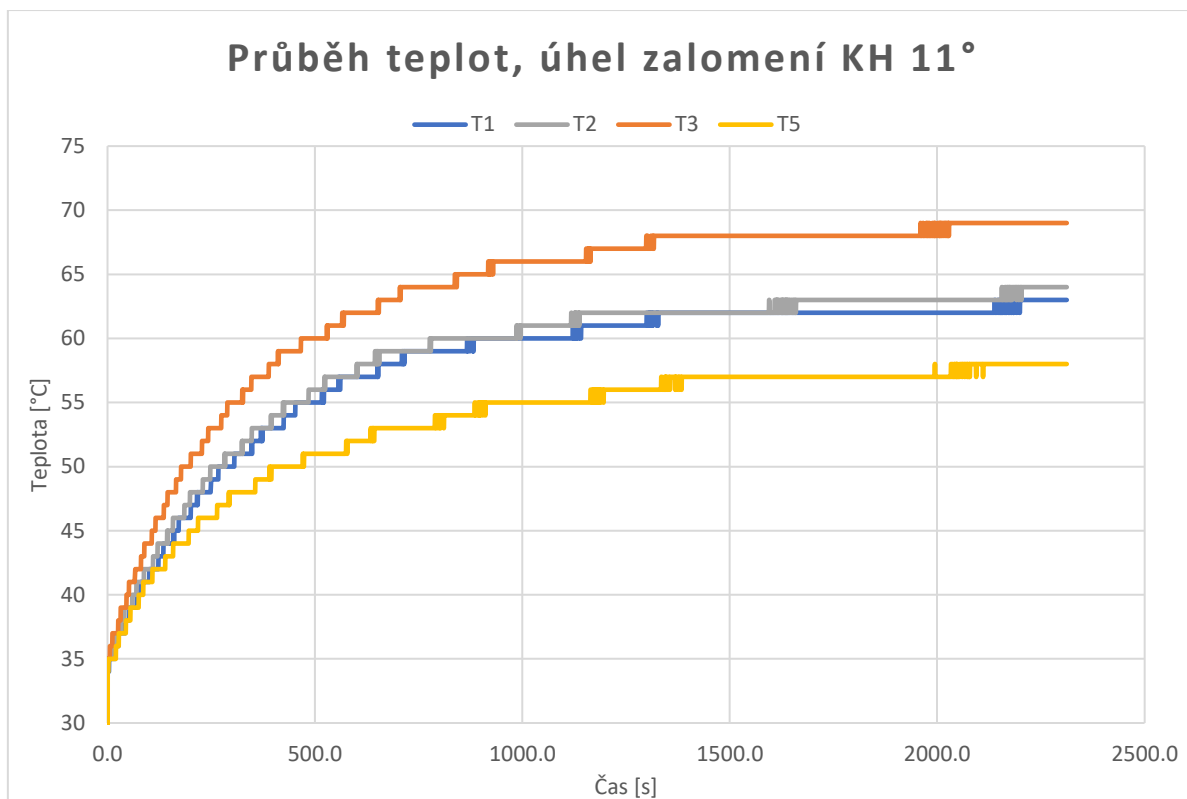
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny grafy závislosti teploty na čase, které byly vykresleny z dat uložených do TDMS souboru akvizičním programem. Označení termočlánků v legendě odpovídá označením v obrázku 15. V grafech jsou zobrazeny průběhy ze 4 termočlánků, neboť zbylé dva vykazovaly známky poruchy. Kloubový hřídel byl v minulosti používán k měření a vodiče jsou z četností měření pravděpodobně již poškozeny. Z porovnání obrázku 72 a 73 je patrná závislost maximální teploty kloubu na úhlu zalomení.

Z maximálních dosažených teplot termočlánků T1, T2 a T3 lze usoudit, že vnitřní část homokinetického kloubu se zahřívá více než vnější. Toto chování je dle očekávání a lze vysvětlit prouděním vzduchu a ochlazováním vnějšího tělesa kloubu nucenou konvekcí.

Dále při porovnání maximální dosažené teploty T3 kloubu Rzeppa bez axiálního posuvu a teploty T5 kloubu s axiálním posuvem, lze stanovit, že kloub s axiálním posuvem se za stejnou dobu zahřál méně než kloub bez axiálního posuvu. To může být způsobeno uložením valivých elementů, kdy v kloubu s axiálním posuvem je menší přesah.



Obrázek 72: Naměřený průběh teplot v závislosti na čase pro úhel zalomení 7°



Obrázek 73: Naměřený průběh teplot v závislosti na čase pro úhel zalomení 11°

15.3 Závěr experimentu

Na základě experimentu byly naměřeny průběhy teplot v závislosti na čase a maximální dosažené teploty pro dva úhly zalomení zkoušeného kloubového hřídele při konstantním zatížení. V grafech jsou vykresleny průběhy ze 4 termočlánků. Zbylé dva připojené termočlánky, které nejsou zobrazeny, vykazovaly známky přerušení vodičů termočlánku.

Uspokojivé průběhy vykazují jednoznačně tvar přechodové charakteristiky prvního řádu, jak bylo předpokládáno. Zároveň nedošlo během měření ke ztrátě signálu. Naměřené maximální teploty odpovídají přibližně hodnotám maximálních teplot z obrázku 4 pro obdobný zátěžný stav. Z hlediska konstrukce vysílacího modulu, návrhu měřicího řetězce a akvizice dat lze experiment považovat za úspěšný. Data byla ukládána s požadovanou frekvencí, funkce vyhodnocení ustálení teploty odhadla konec měření a nedošlo k žádným chybám v programu.

16 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo rozšíření zkušebního stanoviště pro testování kloubových hřidelů o další dvě telemetrické měřicí aparatury a vybavení stanoviště programem pro akvizici dat z nových měřících aparatur. Doposud byla na zkušebním stanovišti používána pouze telemetrická měřicí aparatura EHL sloužící k měření teploty kloubů. Nové měřicí aparatury, Dx Telemetry a MANNER, nabízí připojení dalších typů senzorů, čímž se umožní měření různých veličin a většího rozsahu experimentů při testování kloubových hřidelů.

Nejprve jsem se věnoval rešerši týkající se základním popisem a problematikou kloubových hřidelů a homokinetických kloubů, které jsou na zkušebním stanovišti zkoušeny. Následně byl proveden rozbor dosavadního stavu měřicí aparatury na zkušebním stanovišti a také přehled základních informací o nových měřících aparaturách, Dx Telemetry a MANNER.

Po rozboru používané měřicí aparatury EHL na zkušebním stanovišti jsem zjistil některé nedostatky v konstrukci vysílacích modulů připevňujících se na kloubový hřidel, především znehodnocení spojovacích vodičů konektorů termočlánků a měřících karet v důsledku jejich zaaretování na kloubovém hřideli. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl pro návrh a výrobu nového těla vysílacího modulu, jehož hlavní výhodou je integrace konektorů do prostoru vysílacího modulu a již tedy není nutná následná aretace konektorů na kloubovém hřideli. Při návrhu byl také kladen důraz na zlepšení vyvážení vysílacího modulu na kloubovém hřideli z důvodu ovlivnění měřených veličin přídavným zatížením.

V další části práce jsem se zaměřil na návrh měřícího řetězce a výběru potřebných komponent pro připojení měřících aparatur k počítači. Vybral jsem moduly pro realizaci přenosu dat sběrnici CAN (aparatury EHL a Dx Telemetry) a měření napětového signálu (aparatura MANNER). Vybrané moduly jsou od společnosti National Instruments z nabídky systému CompactDAQ. Kromě samotné akvizice bylo navrženo i ovládání klapky přívodu chladícího vzduchu ke kloubovému hřideli pomocí servomotorů.

Následně jsem se zabýval naprogramováním akvizičního programu ve vývojovém prostředí LabVIEW. Program umožňuje grafické zobrazení průběhů měřených veličin v závislosti na čase a uložení dat do souboru. Dále implementována funkce vyhodnocení ustálení teplota která, jak již název napovídá, vyhodnotí okamžik ustálení měřené teploty s kloubového hřidle s definovanou chybou a zastaví měření.



V závěru diplomové práce bylo provedeno měření teploty homokinetických kloubů kloubového hřídele při různém úhlu zalomení kloubů, konstantním momentu a otáčkách. V průběhu měření byla ověřena funkčnost navrženého měřícího řetězce, konstrukce nových vysílacích modulů aparatury EHL a sběr dat novým měřícím programem, spolu s vyhodnocením ustálení teploty. Naměřená data odpovídají předpokladům, program splňuje stanovené požadavky a lze tedy experiment a akvizici dat vyhodnotit jako úspěšnou.

17 Použitá literatura

- [1] ACHTENOVÁ, Gabriela. Převodná ústrojí motorových vozidel. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN isbn978-80-01-05129-0.
- [2] Ing. KOTLÍK, Radek. Simulační odhad provozní spolehlivost strojních systémů. Disertační práce. VŠB. Fakulta strojní. Katedra částí a mechanismů strojů. 2014-4 [cit. 2021-6-28]. Dostupné z:
http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/105762/KOT187_FS_P2301_2302V019_2014_autoreferat.pdf?sequence=2&isAllowed=n
- [3] 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, Dostupné z:
<https://doi.org/10.4271/2005-01-2177>.
- [4] FENG, Huayuan, Subhash RAKHEJA a Wen-Bin SHANGGUAN. Analytical and experimental analysis of axial force generated by a drive shaft system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics [online]. 2020, 234(4), 691-706 [cit. 2021-6-28]. ISSN 1464-4193. Dostupné z: doi:10.1177/1464419320943396
- [5] URBINATI, Fabrizio a Ettore PENNESTRÌ. Multibody System Dynamics [online]. 2(4), 355-367 [cit. 2021-6-28]. ISSN 13845640. Dostupné z: doi:10.1023/A:1009734924787
- [6] REMEK, Branko, Petr HATSCHBACH a Jiří VÁVRA. Experimentální metody a měření v dopravní technice. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04921-1.
- [7] VOLF, Jaromír a Josef JENČÍK. Technická měření. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02138-6.
- [8] Ing. KOVÁŘ, Martin. Ovládání a akvizice dat na zkušebním stavu převodových ústrojí motorových vozidel. Diplomová práce. ČVUT. Fakulta strojní. Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. 2019-9-10 [cit. 2021-6-28]. Vedoucí diplomové práce: Ing. PAKOSTA, Jiří Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/86289>
- [9] Technické informace [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
http://www.ardatech.cz/technicke_informace/
- [10] Manual Dx Telemetry systém; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
www.sensorika.com/ru/support/doc/imc-messsysteme-gmbh-3/dx-telemetry-system/78-manual-dx-telemetry-system/file/
- [11] Brožura CAEMAX Dx telemetry [online], [cit. 2021-6-28]; dostupné z:
<https://www.caemax.de/en/dx-telemetry/>
- [12] Technický list CAEMAX Dx telemetry [online], dostupné z:
<https://www.caemax.de/en/dx-telemetry/>



- [13] Controller Area Network (CAN) Overview [online]; 2020-09-01 [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/06/controller-area-network--can--overview.html#section--82389185>
- [14] Ing. POLÁK, Karel; Sběrnice CAN [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03021/index.html>
- [15] CAN DBC File Explained – A simple Intro [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://www.csselectronics.com/screen/page/can-dbc-file-database-intro>
- [16] MANNER Radio Sensortelemetry; katalog [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://www.luchsinger.it/contents/products/data-sheet-sistema-telemetria-radio.pdf>
- [17] Sensor Signal Amplifier Type 4b; technický list [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: http://www.imajteknik.net/uploads/ssv_4b.pdf
- [18] Miniaturní panelové konektory Série MPJ [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/MPJ.html>
- [19] Baterie AAA [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <http://www.baterie-clanky.cz/baterie/velikost/aaa/>
- [20] KRATINA, Jakub; Součinitel tření plexisklo-ocel a plexisklo – plexisklo; 2013-16-04 [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [21] ČERVENKA, Jiří; Škoda Octavia IV (2020): Technické údaje všech motorizací [online]; 2019-11-11 [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/skoda-octavia-iv-2020-technicke-udaje-vsech-motorizaci/>
- [22] Katalog Bossard, Předpětí a utahovací momenty [online]; 2019-05 [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: https://media.bossard.com/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/cz/f_047_cz.pdf
- [23] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN; Části strojů; Vyd. 5.; přeprac. (v SNTL 1. vyd.); Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury; 1989 [cit. 2021-6-28]; Technický průvodce. ISBN 80-03000-46-7.
- [24] FULLER, Dudley D.; Coefficients of friction; Columbia University; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/aip/aip-handbook-section2d.pdf>
- [25] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA; Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření; 5., upr. Vyd; Úvaly: Albra; 2011 [cit. 2021-6-28]; ISBN 978-80-7361-081-4
- [26] Polymethylmethakrylát [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z: <https://www.polyplasty.cz/polymethylmethakrylat.html>



[27] Technický list Prusament PLA [online]; 2018-09-20 [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_CZE.pdf

[28] Technický list Prusament PETG [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
https://shop.prusa3d.com/fotky/PETG_TechSheet_CZE.pdf

[29] Practical Strain Gage Measurements [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
https://www.omega.co.uk/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf

[30] NI-9862 Datasheet [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
<https://www.ni.com/cs-cz/shop/hardware/products/c-series-can-interface-module.html>

[31] DB9F-PT2F-DB9F CAN Cable Datasheet [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
<https://www.ni.com/cs-cz/shop/accessories/products/can-and-lin-cable.html>

[32] NI-9205 Datasheet [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
<https://www.ni.com/cs-cz/shop/hardware/products/c-series-voltage-input-module.html>

[33] NI-9263 Datasheet [online]; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
<https://www.ni.com/cs-cz/shop/hardware/products/c-series-voltage-output-module.html?modelId=122200>

[34] Manuál NI XNET; [cit. 2021-6-28]; Dostupné z:
<https://www.ni.com/pdf/manuals/372840l.pdf>

Zdroje obrázků

Obrázek 1: <https://www.summitracing.com/parts/gna-ncv82999>

Obrázek 2:

https://www.researchgate.net/publication/245314826_Development_of_an_Apparatus_to_Investigate_Friction_Characteristics_of_Constant-Velocity_Joints

Obrázek 4: Pakosta, Jiří & Achtenova, Gabriela. (2017). Joint Shaft Test Stand. Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 15. 10.1515/mecdc-2017-0003; Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322347144_Joint_Shaft_Test_Stand

Obrázek 5: <https://www.gknautomotive.com/en/insights/countertrack/>

Obrázek 6: <https://www.gknautomotive.com/de/insights/7-series-mass-reduction/>

Obrázek 7: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174539

Obrázek 8: Pakosta, Jiří & Achtenova, Gabriela. (2017). Joint Shaft Test Stand. Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 15. 10.1515/mecdc-2017-0003; Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322347144_Joint_Shaft_Test_Stand

Obrázek 10: [6]

Obrázek 11: [8]

Obrázek 12:

https://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_teploty/referencni_tabulky/termoclanek-k-nicr-nial.html

Obrázek 13: [6]

Obrázek 14: [6]

Obrázek 16: Pakosta, Jiří & Achtenova, Gabriela. (2017). Joint Shaft Test Stand. Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 15. 10.1515/mecdc-2017-0003; Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322347144_Joint_Shaft_Test_Stand

Obrázek 17: <https://www.caemax.de/en/dx-telemetry/>

Obrázek 18: [10]

Obrázek 19: [10]

Obrázek 20: [10]

Obrázek 21: [13]

Obrázek 22: <https://www.csselectronics.com/screen/page/can-dbc-file-database-intro>

Obrázek 32: [18]

Obrázek 37: <https://www.helicoil.cz/cs/system-helicoil-plus/a-1/>

Obrázek 43: [20]



Obrázek 51: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/hardware/products/compactdaq-chassis.html>

Obrázek 52: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/hardware/products/c-series-can-interface-module.html>

Obrázek 53: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/accessories/products/can-and-lin-cable.html>

Obrázek 54: <https://itestsystem.com/2016/08/24/itm-adds-ni-9205-compatibility-to-itestsystem/>

Obrázek 55: <https://cz.farnell.com/ni/783740-01/analog-output-module-16bit-100ksps/dp/3622497>



Seznam obrázků

Obrázek 1: Kloubový hřídel se stejnoběžnými klouby.....	2
Obrázek 2: Náprava McPherson.....	3
Obrázek 3: Zalomení kloubového hřídele	3
Obrázek 4: Průběh teploty v kloubu pro různá maziva a různé zatěžující stavy [3].....	5
Obrázek 5: Kloub Rzeppa bez axiálního posuvu	7
Obrázek 6: Kloub Rzeppa s axiálním posuvem	7
Obrázek 7: Kloub Tripod	8
Obrázek 8: Zkušební stanoviště na Julisce.....	9
Obrázek 9: Základní rozdělení teploměrů	10
Obrázek 10: Termoelektrický obvod	12
Obrázek 11: Schéma termočlánu [8]	13
Obrázek 12: Převodní tabulka pro termočlánek typu K	15
Obrázek 13: Přejímací charakteristika 1. řádu	17
Obrázek 14: Vliv způsobu vložení termočlánu	17
Obrázek 15: Umístění teploměrů v kloubech, Škoda auto a.s.	19
Obrázek 16: Průběh teploty kloubů kloubového hřídele, naměřeno na Julisce	20
Obrázek 17: Standardní vysílací modul	21
Obrázek 18: Napájení vysílacího modulu na hřídeli	22
Obrázek 19: Přijímací jednotka Dx Telemetry	23
Obrázek 20: Vzorkovací frekvence Dx Telemetry.....	24
Obrázek 21: Fyzické uspořádání sítě CAN podle ISO 11898 [13]	25
Obrázek 22: CAN zpráva zapsána v hexadecimální soustavě.....	26
Obrázek 23: Syntaxe databázového souboru.....	26
Obrázek 24: Měřicí karta EHL	27
Obrázek 25: Přijímací modul EHL s anténou	27
Obrázek 26: Měřicí aparatura Manner pro měření axiální síly	29
Obrázek 27: Starý vysílací modul aparatury EHL.....	30
Obrázek 28: Měřicí a aretační půlměsíc	32



Obrázek 29: Měřící pŕlměsíc	33
Obrázek 30: Měřící pŕlměsíce s krycími plexiskly v konfiguraci pro měření 6 termočlánků	34
Obrázek 31: Pŕsobení odstředivé síly na komponenty vysílacího modulu	35
Obrázek 32: Termočlánkový konektor Omega MPJ [18]	36
Obrázek 33: Tělo aretačního pŕlměsíce	38
Obrázek 34: Baterie pro měřící karty aparatury EHL.....	39
Obrázek 35: Vybážením aretačním pŕlměsícem	39
Obrázek 36: Vysílacím modul aparatury EHL namontován na kloubovém hřídeli	41
Obrázek 37: Závitová vložka namontována v těle vysílacího modulu.....	42
Obrázek 38: CAD model pro MKP analýzu	43
Obrázek 39: Pŕiřazením okrajových podmínek v programu Ansys.....	44
Obrázek 40: Zavedení odstředivé síly na baterii a osové síly ve šroubech	46
Obrázek 41: Napětím plexiskla pŕi zatížení pŕedpětím šroubu a odstředivou silou baterie	49
Obrázek 42: Detail napětím v okolí díry pro šroub.....	49
Obrázek 43: Orientace zkušebních vzorku pŕi 3D tisku [20]	52
Obrázek 44: 1. možnost orientace těla a adaptéru na podložce 3D tiskárny	52
Obrázek 45: 2. možnost orientace těla a adaptéru na podložce 3D tiskárny	53
Obrázek 46: Pŕíruba s tenzometry a rotorovou částím aparatury Manner	54
Obrázek 47: Schéma součásti pro měření axiální síly	56
Obrázek 48: Ventilátor a rozvod vzduchu	58
Obrázek 49: Dvourozměrné pole nastavením klapky	59
Obrázek 50: Schéma akvizitního řetězce	61
Obrázek 51: Šasi cDAQ - 9178	62
Obrázek 52: Modul NI 9862.....	63
Obrázek 53: Pŕipojovací kabel DB9F-PT2F-DB9F CAN Cable	63
Obrázek 54: Modul NI 9205.....	64
Obrázek 55: Modul NI 9263.....	65
Obrázek 56: Čelním panel programu v LabVIEW včetně zvýrazněných sekcím	67
Obrázek 57: Pŕostředím ukládání dat	67
Obrázek 58: Oblast čelním panelu pro měření teploty	69



Obrázek 59: Oblast vyhodnocení ustálení teploty	70
Obrázek 60: Část čelního panelu pro měření axiální síly.....	71
Obrázek 61: Nastavení rychlosti vzduchu	72
Obrázek 62: Upozornění na nevyplněný řádek cesty souboru	74
Obrázek 63: Schéma stavového automatu ve smyčce akvizice dat sběrníci CAN.....	74
Obrázek 64: Event struktura sloužící ke změně zobrazovaného kanálu v grafu	76
Obrázek 65: Stavový dat ukládání dat ve smyčce Zobrazení a ukládání dat CAN	77
Obrázek 66: Schéma stavového automatu ve smyčce vyhodnocení ustálení teploty	78
Obrázek 67: Schéma stavového automatu ve smyčce akvizice dat z aparatury Manner	80
Obrázek 68: Rozhodovací sekvence	81
Obrázek 69: Schéma stavového automatu ve smyčce ovládání klapky.....	82
Obrázek 70: Vysílací modul a kloubový hřídel při experimentu	84
Obrázek 71: Připojení měřící aparatury k počítači	85
Obrázek 72: Naměřený průběh teplot v závislosti na čase pro úhel zalomení 7°	86
Obrázek 73: Naměřený průběh teplot v závislosti na čase pro úhel zalomení 11°	87



Seznam tabulek

Tabulka 1: Zatěžující stavy stejnoběžného kloubu [3].....	5
Tabulka 2: Výhody a nevýhody elektrických teploměrů [6]	12
Tabulka 3: Přehled termočlánků [9]	16
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti filamentů [27][28]	50
Tabulka 5: Konstanty pro podélnou dynamiku	85



Seznam zkratek a symbolů

Označení	Název veličiny	Jednotka
α	Seebeckův koeficient	$[\mu V/^{\circ}C]$
α_1	úhel nastavení klapky 1	$[^{\circ}]$
α_2	úhel nastavení klapky 2	$[^{\circ}]$
γ	úhel stoupání závitu	$[^{\circ}]$
ε	relativní prodloužení	$[-]$
μ	součinitel tření	$[-]$
ρ_o	hustota oceli	$[kg/m^3]$
ρ_H	rameno působíště třecí síly pod hlavou šroubu	$[m]$
φ'	úhel tření v závitu	$[^{\circ}]$
σ	redukované napětí	$[N/mm^2]$
σ_k	mez kluzu	$[N/mm^2]$
σ_p	mez pevnosti	$[N/mm^2]$
τ	časová konstanta	$[s]$
ω	úhlová rychlost	$[1/s]$
ω_{kmax}	maximální úhlová rychlost kola vybraného vozu	$[1/s]$
d_2	střední průměr závitu	$[m]$
d_v	délka vývažku	$[m]$
E	Youngův modul	$[N/mm^2]$
F_{10}	síla při výstupu 10 V	$[N]$
F_0	síla při výstupu 0 V	$[N]$
F_{bat}	odstředivá síla baterie	$[N]$
F_o	osová síla šroubu	$[N]$
$F_{odstř}$	odstředivá síla	$[N]$
f_H	třecí součinitel pod hlavou šroubu	$[-]$
K	směrnice kalibrační křivky	$[N/V]$
k	součinitel bezpečnosti	$[-]$
M_{kk}	utahovací moment na klíči	$[Nm]$
M_{tH}	třecí moment pod hlavou šroubu	$[Nm]$
M_z	moment v závitu	$[Nm]$
M_{zt}	zátěžný moment kloubového hřídele	$[Nm]$
m	hmotnost tělesa	$[kg]$
m_{bat}	hmotnost baterie	$[kg]$
m_v	hmotnost vývažku	$[kg]$
n_{kmax}	maximální otáčky kola vybraného vozu	$[1/min]$
n_{zt}	zátěžné otáčky kloubového hřídele	$[1/min]$



p	rozteč závitu	[mm]
Q_0	osová síla v závitu	[N]
U	termoelektrické napětí	[V]
U_{diff}	napětí mezi vodiči CAN	[V]
U_M	výstupní napětí z aparatury Manner	[V]
u	napětí obvodu termočlánků	[V]
r	vzdálenost těžiště tělesa od osy kloubového hřídele	[m]
r_{bat}	vzdálenost těžiště baterie od osy kloubového hřídele	[m]
r_j	jmenovitý poloměr pneumatiky	[m]
r_0	odpor termočlánku	[Ω]
r_v	valivý poloměr pneumatiky	[m]
r_{vyv}	vzdálenost těžiště vývažku od osy kloubového hřídele	[m]
R	odpor voltmetru	[Ω]
R_{uo}	ukončovacího odpor CAN	[Ω]
S_v	plocha vývažku	[m^2]
s_v	šířka vývažku	[m]
T	teplota	[$^{\circ}C$]
t	čas	[s]
V_v	objem vývažku	[m^3]
v_{bat}	výška baterie	[m]
v_{max}	maximální rychlost vybraného vozidla	[m/s]
v_v	výška vývažku	[m]
$v_{vz,kolo}$	rychlost vzduchu na straně kola	[m/s]
$v_{vz,rozvodovka}$	rychlost vzduchu na straně rozvodovky	[m/s]