



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

**Úprava systému řízení vozu Formula  
Student pro schopnost autonomní jízdy**

Adaptation of a Formula Student steering  
system for autonomous driving capability

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2023**

**Jindřich NOVOTNÝ**

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Pakosta, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Jindřich** Osobní číslo: **501535**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Úprava systému řízení vozu Formula Student pro schopnost autonomní jízdy.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Adaptation of a Formula Student steering system for autonomous driving capability.**

Pokyny pro vypracování:

BP bude tvořena z následujících částí:

- 1) Měření sil v řízení za účelem dimenzování komponent
- 2) Návrh konceptu úpravy řízení pro bezpilotní verzi
- 3) Popis volby nových komponent a potřebné úpravy stávajících
- 4) Vyhodnocení vhodného umístění nových komponent s ohledem na požadavky nových systémů
- 5) Popis průběhu montáže celého systému

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2023**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora:	Jindřich Novotný
Název práce:	Úprava systému řízení vozu Formula Student pro schopnost autonomní jízdy
Anglický název:	Adaptation of a Formula Student steering system for autonomous driving capability
Rozsah práce:	36 stran 39 obrázků 0 tabulek 3 grafy
Akademický rok:	2022/2023
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojího inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Pakosta, Ph.D.
Klíčová slova:	Řízení, eForce, Formula Student, Autonomní jízda
Key words:	Steering, eForce, Formula Student, Autonomous driving



## Abstrakt

Práce se zabývá mechanickou stránkou úpravy systému řízení vozu Formula Student pro tým eForce FEE Prague Formula. Část práce se zabývá popisem problému a následně změřením sil v řízení za účelem dimenzování komponent. Podle těchto požadavků je následně zvolen celkový koncept úpravy systému a je vyhodnocena nutnost úprav stávajících komponent a design nových. Jsou také vyhodnoceny potřebné parametry kupovaných součástí a díly vhodně zvoleny. Na závěr je popsán způsob montáže systému a integrace do monopostu FSE.12.

## Abstract

The thesis deals with the mechanical adaptation of the steering system of a Formula Student vehicle for the eForce FEE Prague Formula team. A part of the thesis describes the problem, followed by the measurement of steering forces for the sake of dimensioning the components. The overall concept of the adaptation is chosen with respect to these requirements, and necessary changes to existing components are evaluated and new ones are designed. Parts to be bought are then assessed with regard to the required parameters and suitably chosen. The thesis then describes the assembly process of the system and integration into the FSE.12 formula.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Úprava systému řízení vozu Formula Student pro schopnost autonomní jízdy” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: .....

.....

Jindřich Novotný



## Poděkování

Poděkování patří týmu eForce za poskytnutí zázemí a nástrojů potřebných k vývoji, a sponzorům týmu za ochotu při výrobě dílů. Dále bych chtěl speciálně poděkovat Ondřeji Velínskému za odbornou pomoc při návrhu konceptu. V neposlední řadě patří poděkování Ing. Jiřímu Pakostovi Ph.D. za to, že mi umožnil zpracování tohoto tématu.



## Obsah

1 Úvod.....	1
2 Základní požadavky pro systém řízení .....	2
3 Měření sil v řízení FSE.11 .....	3
3.1 Průběh testování .....	3
3.2 Výsledky měření .....	4
4 Výběr koncepce a umístění motoru řízení .....	6
4.1 Umístění nad úhlovým domkem .....	6
4.2 Přímé napojení na karbonovou tyč řízení.....	7
4.3 Prstencový motor na tyči řízení.....	7
4.4 Umístění pod hřebenovým domkem.....	7
5 Výběr kupovaných komponent .....	8
5.1 Motor a převodovka .....	8
5.1.1 Požadavek na výkon a točivý moment .....	8
5.1.2 Výběr konkrétního motoru a převodu.....	9
5.2 Kardanův hřídel .....	9
6 Návrh konceptu odpojování motoru řízení .....	10
6.1 Koncept zajišťování čepu řízení .....	11
6.2 Lokace a výběr senzoru natočení řízení.....	13
7 Konkrétní úpravy komponent.....	14
7.1 Úhlový domek.....	14
7.2 Domek hřebenového převodu .....	15
7.2.1 Připevnění úhlového domku .....	16
7.3 Klec pro připevnění motoru.....	17
7.4 Vertikální spojovací hřídel .....	19
7.5 Čep autonomního řízení a zámek .....	20
7.5.1 Princip operace zámku čepu řízení.....	20
7.6 Připevnění vnějšího hřebenu k monokoku.....	21
7.7 Horní uchycení tyče řízení .....	23
7.7.1 Podpůrná konstrukce horního uchycení .....	23
7.7.2 Vlastní struktura horního uchycení .....	24
7.8 Volant.....	24



8 Postup montáže systému .....	25
8.1 Hřebenová sestava .....	25
8.2 Sestava klece motoru .....	27
8.2.1 Vložení do monokoku .....	27
8.3 Sestava úhlového domku .....	28
8.4 Horní uchycení tyče řízení .....	29
8.5 Finální příprava systému řízení.....	30
9 Závěr .....	32
10 Seznam obrázků.....	33
11 Reference.....	34







## 1 Úvod

Téma této práce vychází z požadavku týmu eForce FEE Prague Formula na přepracování systému řízení pro použití v nadcházejícím monopostu FSE.12. V roce 2019 tento tým začal vyvíjet systém pro schopnost autonomní jízdy vozu Formula Student s ohledem na pravidla a požadavky soutěže v kategorii Formula Student Driverless. [1] Jako základ byl zvolen monopost FSE.07, sedmá generace pilotované formule, která při začátku vývoje již nemohla závodit v kategorii pilotovaných vozidel. Z tohoto monopostu se tak stalo DV.01, první bezpilotní vůz Formula Student v České republice, jenž závodil po boku nových pilotovaných monopostů FSE.X a FSE.11.

Pro nadcházející sezónu se však výrazně změnila pravidla FSG, podle kterých se řídí většina závodů organizovaných v Evropě. I v závodech pro pilotované monoposty je nyní možné získat body za účast a výkony v čistě bezpilotních disciplínách. [2] Tým eForce se tak v souladu s novými pravidly rozhodl v následujícím pilotovaném monopostu FSE.12 zakomponovat schopnost bezpilotní jízdy používající stejné systémy, jako již existující bezpilotní formule DV.01.

Kvůli této změně muselo několik systémů doznat výrazných změn. Oproti monopostu FSE.11, ze kterého nejnovější formule koncepčně vychází, musel být přidán senzor LIDAR a kamera, podle nichž bude vůz detekovat kužely a trať. Následně bylo nutné zahrnout výpočetní centrum ZOTAC, na kterém probíhá mimo jiné rozpoznávání kuželů pomocí umělé inteligence a vypočítávání ideální trajektorie a rychlostního profilu vozidla. Nové požadavky pro bezpilotní jízdu a její pravidla musely také zohlednit mimo jiné pedály s brzdami a řízení. Právě postupu vývoje systému řízení bude věnována tato práce, konkrétně mechanickému zakomponování motoru pro autonomní řízení a zdokonalení výchozího systému.



## 2 Základní požadavky pro systém řízení

Jedním ze základních pravidel pro systém řízení vozu Formula student je zákaz systémů koncepce “drive-by-wire”, tzn. řízení bez mechanického spojení volantů a předních kol. [2 – str. 25] Takový systém by pro samotné zahrnutí schopnosti autonomního ovládání byl mechanicky velice jednoduchým řešením, avšak kromě výslovného zákazu pravidly by bylo extrémně náročné takový systém řízení vyvinout a optimalizovat pro pilotovanou jízdu, již musí být nový monopost také bez výjimek schopný. Díky velice podobné koncepci monokoku mezi stávající a nadcházející generací formule, kdy prostorové limity se téměř nezměnily, tak bylo rozhodnuto, že řízení vozu FSE.12 bude pouze výraznou evolucí systému používaného v předchozí generaci FSE.11. (obr. 1)



obr. 1: Systém řízení FSE.11

Obecným požadavkem pro šrouby a jistící prvky kritických soustav vozidla, mezi které řízení spadá, je požadavek na “positive locking” [2 – str. 53], neboli zajištění šroubovaných spojů proti nežádoucímu povolání způsobenému vibracemi a jinými vlivy, a pojištění lepených spojů pomocí druhotného mechanického spoje.

Dle požadavku pro nenarušenou schopnost operace při pilotované jízdě by měl systém mít schopnost mechanického odpojení motoru. Dle pravidel musí být systém schopný operace i při připojeném motoru, avšak v takovém případě by motor stále působil parazitickými odpory a mohl by narušovat schopnost pilota cítit a reagovat na podněty v řízení. Pro takovýto mechanismus odpojení pravidla přikazují, že pro pilotovanou jízdu nesmí být žádná ze součástí vyjmuta z vozu, a také že při samotném odpojování motoru nesmí žádná ze součástí ani spojovacího materiálu během procesu odpojování ztratit kontakt s vozem [2 – str. 65], tudíž není možné například vyjmout součást a připevnit ji jinde.



### 3 Měření sil v řízení FSE.11

Za účelem dimenzování komponent a správného výběru kupovaných součástí byly na konci závodní sezóny předchozí generace během testování měřeny síly v řízení.

#### 3.1 Průběh testování

Kvůli přístupnosti, přesnosti a dostupnosti daného senzoru bylo rozhodnuto, že bude v jedné z tyčí řízení přidán tenzometrický tlakový load cell snímač. [3] Pro zabudování senzoru byly vyrobeny dva hliníkové nástavce se závity, které společně se senzorem nahradily karbonovou tyč řízení na pravé straně. (obr. 2) Užitý snímač zaznamenává pouze tlak, avšak pro tuto aplikaci je dostačující.

Testování proběhlo na ploše bývalého vojenského letiště v Milovicích. (obr. 3)

Společně s testováním sil v řízení byl testován vliv tlaku pneumatik na jejich teplotu, a tak s formulí bylo nejdříve jezděno s plynulými i skokovými vstupy řízení. Tento styl jízdy relativně přesně replikuje zatížení systému řízení v závodních podmínkách. Následně byla formule zastavena a bylo s řízením pomocí jednoho z kol manipulováno při nulové rychlosti. Společně se zahřátými pneumatikami a přítomností pilota ve voze bylo tak docíleno nejnáročnějšího typického scénáře pro řízení, kdy síly teoreticky dosahují absolutního maxima. Takovéto hodnoty jsou pro nadcházející systém autonomního řízení stěžejní, jelikož formule dle pravidel a dle požadavku na letmé zjištění funkčnosti systému musí být schopná samostatně manipulovat s řízením i při nulové rychlosti. [2 – str. 26]



obr. 3: Zapojení tenzometrického snímače



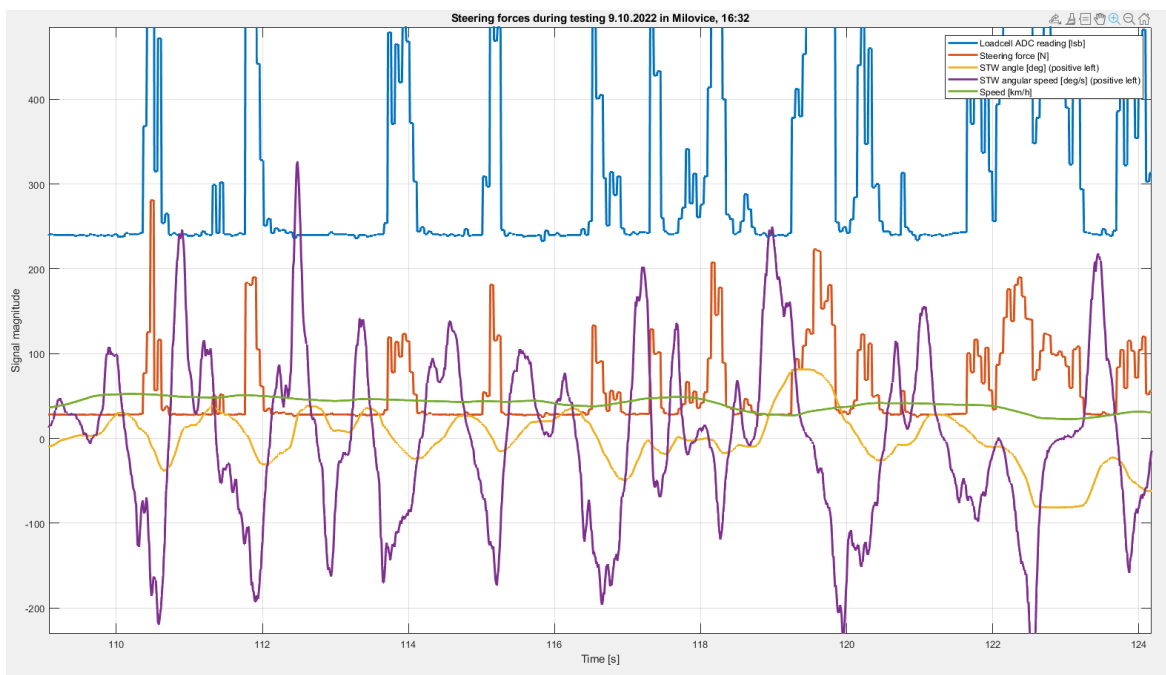
obr. 2: FSE.11 při testování v Milovicích

Po měření byla provedena kalibrace snímače pomocí známého zatížení. Výstup ze senzoru byl následně pomocí zjištěného koeficientu korekce převeden na sílu v [N].

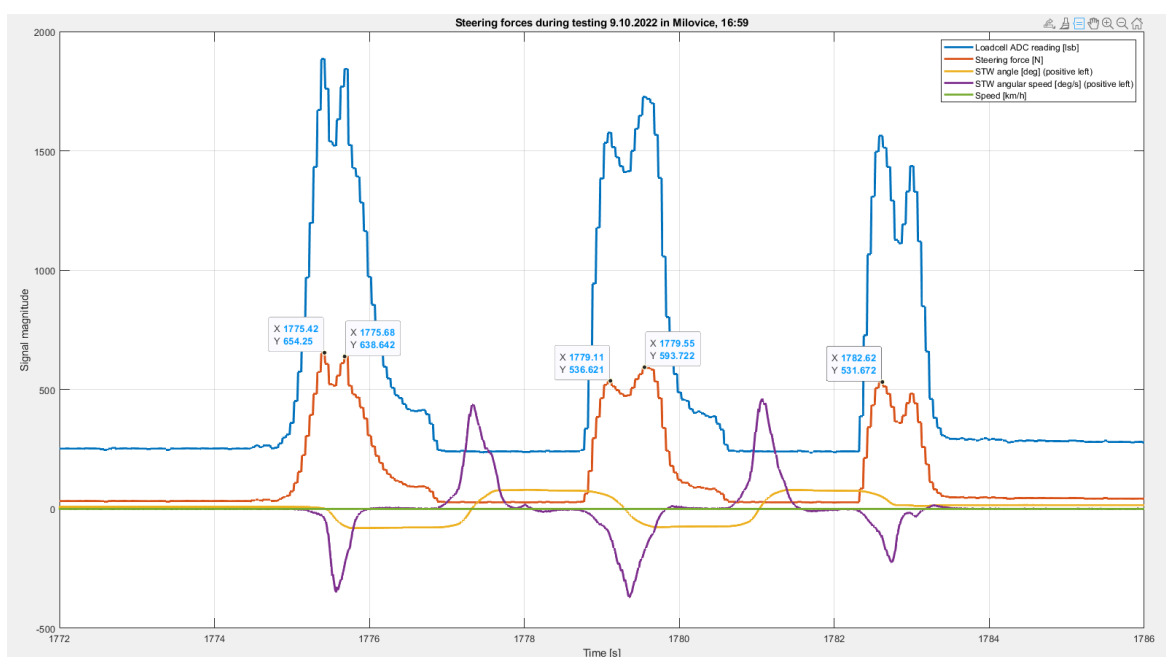


### 3.2 Výsledky měření

Výsledný průběh síly v místě tenzometrického měřiče byl zpracován pro typický příklad jízdy formule, kde se dynamicky mění rychlost a úhel natočení kol. (graf 1) Dále byla zpracována data pro případ, kdy byla formule zastavená a bylo pouze manipulováno s řízením ze strany na stranu, kde by síla měla být hypoteticky maximální dosažitelná. (graf 2)



graf 1: Naměřené síly během jízdy



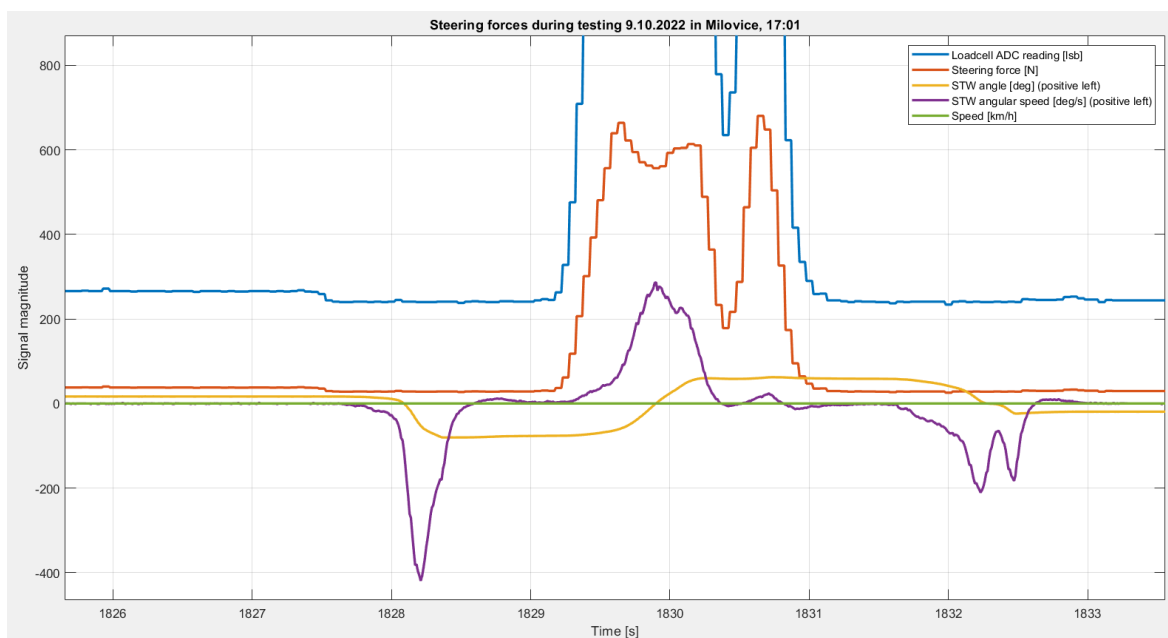
graf 2: Naměřené síly při nulové rychlosti (působení na pravé kolo)



Na uvedených grafech vidíme závislost měřených veličin na čase. Pro kompletní pochopení měření jsou kromě síly v tyči řízení (oranžová) vyneseny i aktuální rychlost formule (zelená), úhel natočení kol (žlutá), rychlost natáčení volantu (fialová) a data ze senzoru před korekcí (modrá).

Síla při jízdě nikdy nepřesáhla 300 N. Dle hypotézy síla při nulové rychlosti byla výrazně vyšší, dosáhla absolutního maxima **654,25 N**.

Je důležité připomenout, že používaný senzor je schopen měřit pouze tlak, tudíž naměřené hodnoty nikdy nezasahují do záporných hodnot. Bylo provedeno kontrolní měření, kdy bylo pro manipulaci s řízením u zastaveného vozidla použito protěžší kolo, tudíž byly de facto otočeny působící síly. Rozdíl mezi výsledky obou měření byl zanedbatelný. (fig. 3)

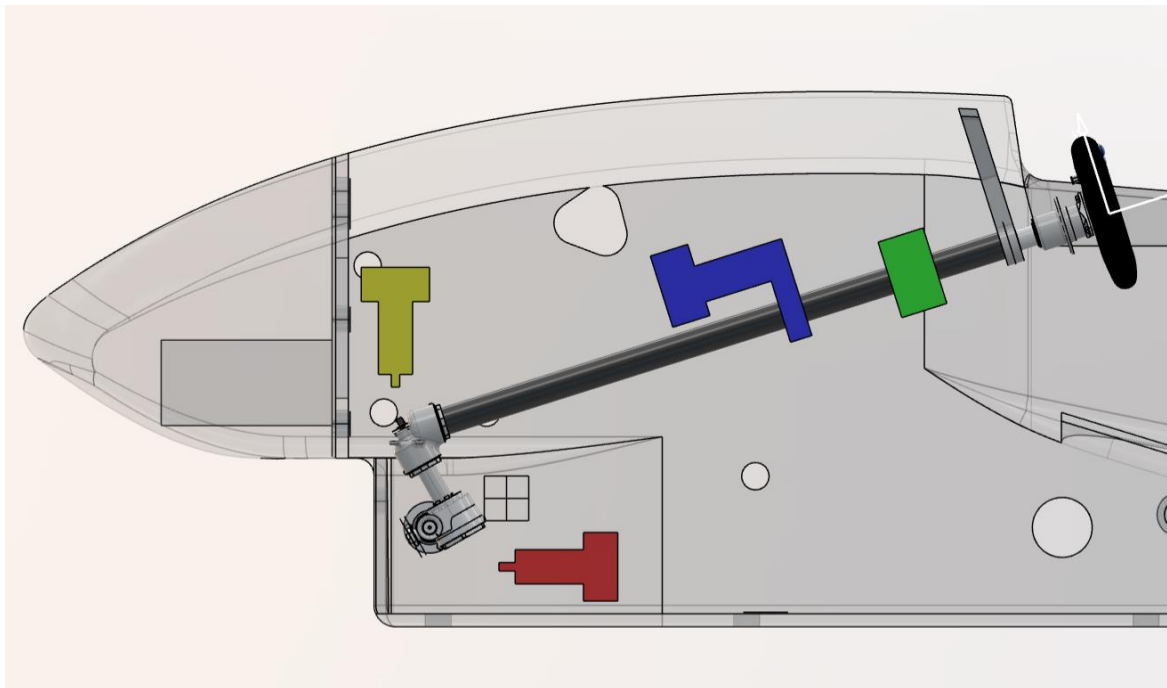


graf 3: Naměřené síly při působení na levé kolo



## 4 Výběr koncepce a umístění motoru řízení

Jedním z nejdůležitějších rozhodnutí při návrhu systému byla pozice motoru, jenž bude v autonomním režimu řízení ovládat. Pro umístění motoru se po konzultaci o prostorové náročnosti ostatních jednotek nabízely čtyři nevhodnější varianty. (obr. 4)



obr. 4: Vizualizace možností umístění motoru řízení v bočním pohledu; zobrazena FSE.11

### 4.1 Umístění nad úhlovým domkem

První možností umístění motoru je pozice nad úhlovým domkem řízení (obr. 4 – žlutá). Toto umístění by umožňovalo velice snadný přístup k motoru pomocí servisního okénka, které se nachází v přední části monokoku. Motor by musel být k propojovací hřídeli připojen pomocí převodu či hřídele s kardanovým koloubem; přímé připojení není možné, jelikož by docházelo k interferenci motoru a struktury předního deformačního prvku a nebylo by splněno pravidlo prikazující 25 mm prostoru za rovinou přepážky deformačního prvku [2 – str. 39].

Takovéto umístění bylo ve výsledku zamítnuto z několika důvodů. Jedním z nich by byla výrazně zhoršená přístupnost k pedálům a dalším systémům, jež vyžadují přední přístup. Přední servisní okénko by bylo z velké části blokováno motorem, což by znamenalo nutnost motor odstranit pro velké množství rutinních servisních úkonů. Dalším problémem by byla samotná prostorová dotace a nutnost rozšíření vzdálenosti pedálů, což by mělo za následek výrazné zhoršení ergonomie.



#### 4.2 Přímé napojení na karbonovou tyč řízení

Konstrukčně nejjednodušší možností umístění motoru by bylo napojení na tyč řízení (obr. 4 – modrá). Toto umístění by nevažadovalo žádnou úpravu původního systému kromě umístění řetězového, řemenového či ozubeného převodu na karbonovou tyč řízení. Samotné připevnění motoru by bylo také velice jednoduché, jelikož by bylo možné připevnit pomocí svařované konstrukce k horní části monokoku.

Takovéto řešení bylo taktéž zamítnuto, jelikož by opět byla výrazně zhoršena ergonomie pilota a pravděpodobně by nemohlo být splněno pravidlo na průchod tvaru, jež simuluje pilotovy nohy [2 – str. 39]. Zároveň by tato koncepce měla nevyhnutelně vyšší vůli ve spojení mezi samotným motorem a hřebenem řízení, což má za následek nepřesnost ovládání a vznik oscilací v důledku prodlevy korekce řídicím algoritmem.

#### 4.3 Prstencový motor na tyči řízení

Prstencový motor na karbonové tyči řízení (obr. 4 – zelená) by byl rovněž velice jednoduchým řešením. Prstencové motory jsou obecně více než adekvátní alternativa ke konvenčním motorům. [4]

Toto řešení však sdílí prostorové nevýhody s řešením popsaném v kapitole 4.2, a stále by byla do systému vnesena nežádoucí vůle při přenosu kuželovým převodem. Další nevýhodou byl nedostatek zkušeností s danými motory a malý výběr. Tento koncept byl také zamítnut.

#### 4.4 Umístění pod hřebenovým domkem

Umístění motoru řízení pod hřebenovým domkem (obr. 4 – červená) by vyžadovalo největší množství konstrukčních úprav a znamenalo by zhoršenou přístupnost k motoru samotnému. Kvůli prostorovým limitacím by opět nemohl být motor napojen přímo a bylo by nutné použití převodu či kardanova kloubu. Mělo by však za následek nejmenší vůle mezi motorem a hřebenem řízení, a jako jediné nezvyšuje těžiště monopostu. Motor se s dostatečnou vůlí vejde před akumulátor a tento systém by tak nevyžadoval výrazné úpravy ostatních jednotek a sestav, jako pedálů a akumulátoru.

Tato možnost umístění byla zvolena jako vyhovující.

Pro propojení motoru s hřebenovým kolem řízení byl zvolen dvojitý Kardanův kloub. Byl zvolen primárně pro jeho homokineticitu, dostupnost a dostatečnou životnost. [5] Nebylo možné použít jednoduchý Kardanův kloub, jelikož by nedovoloval dostatečný rozsah úhlu [6] a byl by výrazně nehomokinetický, což by způsobovalo podstatné rozdíly mezi natočením motoru a skutečným natočením předních kol. Další alternativou byl kuželový převod vlastního návrhu, jenž by byl potenciálně ještě spolehlivější, avšak výrazně dražší a komplikovanější na výrobu, tudíž byl také zamítnut.





## 5 Výběr kupovaných komponent

Po finalizaci konceptu je nutné vybrat konkrétní kupované komponenty. Podle jejich požadavků na prostor a možností připevnění budou následně navrhovány komponenty vlastní.

### 5.1 Motor a převodovka

Výběr motoru vycházel z velké míry ze zkušeností z minulých sezón s řídicím motorem Kar Tek použitým v monopostu DV.01, který je původně určen jako posilovač řízení do písečných bugyn. [7] (obr. 5) Nedostatky tohoto motoru byly především vysoká hmotnost, nízká účinnost a značná prostorová náročnost.



obr. 5: Motor Kar Tek použitý v monopostu DV.01 [7]

#### 5.1.1 Požadavek na výkon a točivý moment

Ze zkušeností z minulých sezón vzešel jasný požadavek na schopnost rychlosti řízení, kolem 180 stupňů za sekundu. Díky měření sil je nyní znám požadavek na výkon; víme, že motor musí být schopen vyvinout 654,25 N na obou koncích hřebene řízení. Není nutné tuto hodnotu násobit bezpečnostním koeficientem, jelikož při měření síly seděl ve formuli pilot a při operaci autonomního řízení bude vůz o tuto hmotnost lehčí – reálná síla potřebná k operaci řízení tak bude nižší, odpovídající koeficientu bezpečnosti přibližně  $k = 1,2$ . Tuto hodnotu vynásobíme poloměrem hlavní hrušnice použitého hřebenového kola a dostaneme tak požadovaný točivý moment motoru.

$$M_{pož} = 2 \cdot F_{pož} \cdot r_{hk} = 2 \cdot 654,25 \cdot 0,0235 = \mathbf{30,75 Nm} \quad (1)$$



### 5.1.2 Výběr konkrétního motoru a převodu

Mezi dalšími požadavky na motor jsou práce na 24 V napětí, schopnost komunikace a ovládání přes CAN a integrovaný měnič s dostatečnou rezervou. Ze závodů a vzájemné komunikace tým ví, že ostatní týmy pro motor autonomního řízení využívají převážně produkty od firmy Maxon.

Pro dané parametry vyšla jako jednoznačně nejlepší kombinace motoru Maxon EC 90 Flat 220 W [8] (obr. 6) a převodovky Maxon GP 52 C [9] (obr. 7) s převodovým poměrem 43:1. Tato kombinace vyhovuje všem výše uvedeným požadavkům bez zbytečného předdimenzování, a zároveň prostorově vychází do místa pro ni určeného.



obr. 6: Maxon EC 90 Flat [8]



obr. 7: Maxon GP 52 C [9]

### 5.2 Kardanův hřídel

Při výběru dvojitého kardanu byl upřednostňován výrobce SKF, jelikož jeho dodavatel je jedním ze sponzorů týmu eForce. Dalším důvodem pro výběr tohoto výrobce je možnost dodání již obrobeného kardanu dle požadavku. Pro naši aplikaci je nutné na jednom konci mít díru o průměru 12 mm s drážkou pro pero, jelikož takový standard se objevuje na výstupu použité planetové převodovky.

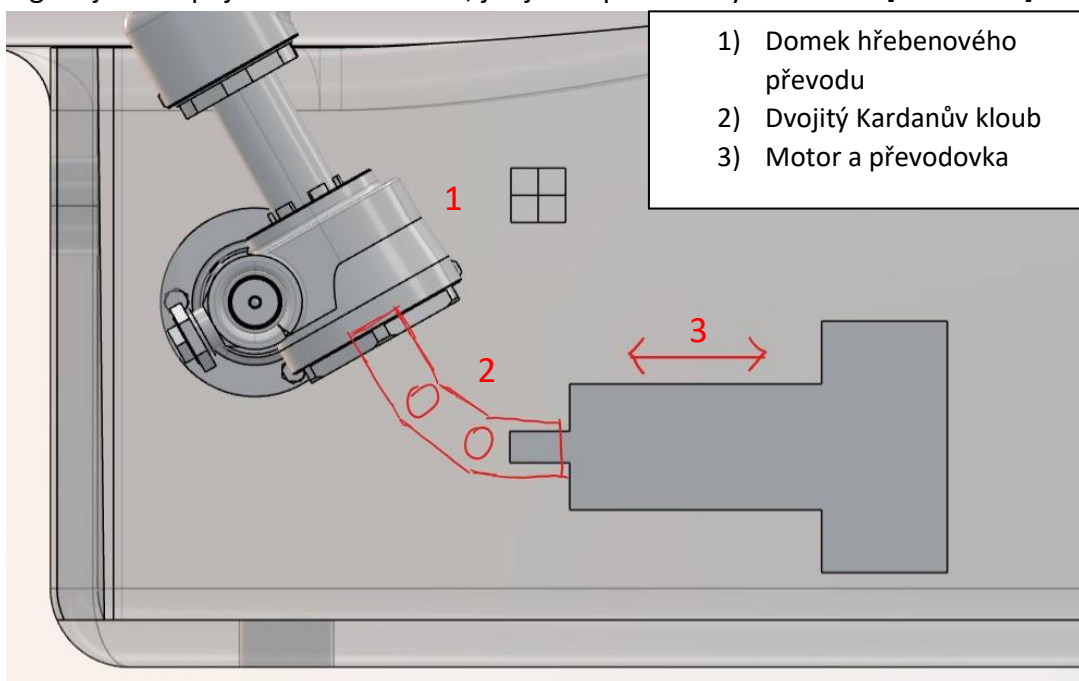
Bylo vybíráno mezi třemi možnostmi: SKF UJMB16, UJMB20 a UJMB25. Jak název napovídá, jedná se o dvojité kardanové klouby o průměru 16 mm, 20 mm a 25 mm. Typ SKF UJMB16 nevyhovuje požadavku na velikost díry 12 mm, kdy takto velká díra by s drážkou přesahovala průměr kardanu [10]. Typ UJMB25 je již výrazně předdimenzován; dovoluje spojitě zatížení až 180 Nm [11], což je přibližně 6-krát větší než točivý moment, jehož je v daném místě možné dosáhnout. Vybrán tak byl dvojitý Kardanův kloub SKF UJMB20. Tento kloub je s únosností 88 Nm [12] stále předdimenzován, avšak tato dimenzace může výrazně oddálit či eliminovat eventuelní vznik vůlí v kloubu.



## 6 Návrh konceptu odpojování motoru řízení

Jedním ze základních požadavků pro nový systém řízení je možnost odpojení motoru pro autonomní řízení od zbytku systému. Toto odpojení zajistí, že pro disciplíny, kde bude muset být formule pilotována, nebude systém autonomního řízení klást nevyžádaný odpor a způsobovat tak překážku pro pilotův cit, a ve výsledku nebude překážkou při dosahování nejlepších možných výsledků v pilotovaných disciplínách.

Jelikož motor s převodovkou z firmy Maxon přijde jako námi navolený celek, nepřichází v úvahu odpojování motoru od převodovky. Jednou ze zvažovaných možností odpojování byla možnost posunu motoru vzad, a tudíž vysunutí kardanu z převodovky či kardanu z hřebenového kola. (obr. 8) Tato možnost se však kvůli prostorovým omezením neukázala jako proveditelná, jelikož několik centimetrů za motorem se nachází ochranná přepážka akumulátoru. Při takovémto provedení by také bylo velice komplikované zajistit "positive locking" zajištění spojovacího materiálu, jež je dle pravidel vyžadováno. [2 – str. 53]



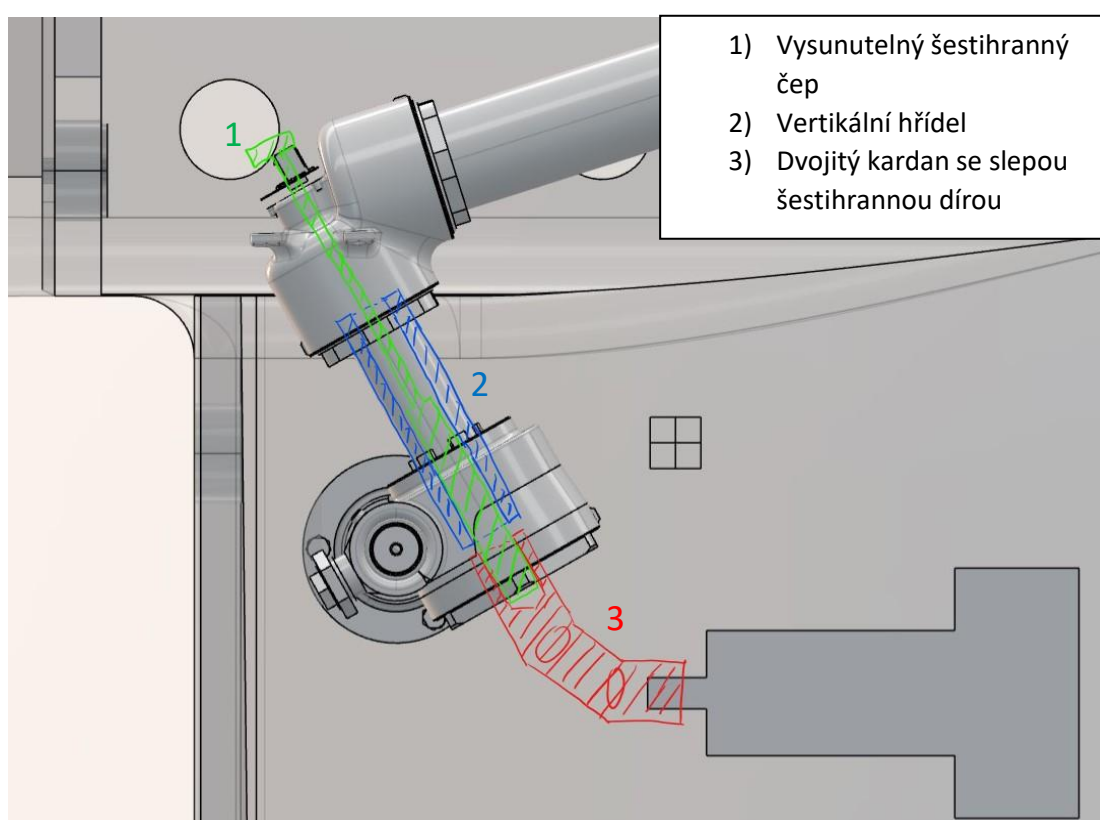
obr. 8: Prvotní náčrt konceptu odpojování posunem motoru (Zobrazena FSE.11)

Další možností je přerušování schopnosti přenosu točivého momentu mezi kardanem a hřebenovým kolem. Původně byl jako řešení zamýšlen stavěcí šroub, jenž by se zašrouboval skrz závitovou díru v boku hřebenového kola a dokázal by tak přenášet točivý moment. Takovéto řešení by nevyžadovalo příliš výrazné změny zbytku systému a bylo by relativně jednoduché a přímočaré na konstrukci. Velkou nevýhodou by však byla složitost samotné operace. Bylo by nutné při každé změně konfigurace demontovat část systému pedálů, a přesto by bylo extrémně komplikované skrz servisní otvor v přední části monokoku s daným šroubem pracovat.



Jednodušší operaci by zaručoval koncept vyvedení vysunutelného čepu k vrcholu domku kuželového převodu. Ve vertikální hřídeli a v horním členu Kardanovy hřídele by byl šestihřanný otvor, mezi kterými by točivý moment přenášel šestihřanný čep. Tento čep by částečným vytažením ztratil kontakt s vrchním členem kardanu, a odpojil by tak motor s převodovkou od zbytku systému. (obr. 9) Vysunutí kardanu by bylo možné i z vrchní části úhlového domku, kam by byl jednoduchý přístup skrze přední servisní okénko monokoku.

Tato koncepce by vyžadovala výrazné konstrukční úpravy a oproti výše zmíněným možnostem bude mít vyšší hmotnost. Jednoduchost používání však bude mít nesrovnatelně vyšší pozitivní dopad na konkurenceschopnost vozu při závodech vlivem servisovatelnosti a spolehlivosti než mírné ušetření hmotnosti.



obr. 9: Prvotní návrh odpojování motoru vysunutelným čepem (Zobrazena FSE.11)

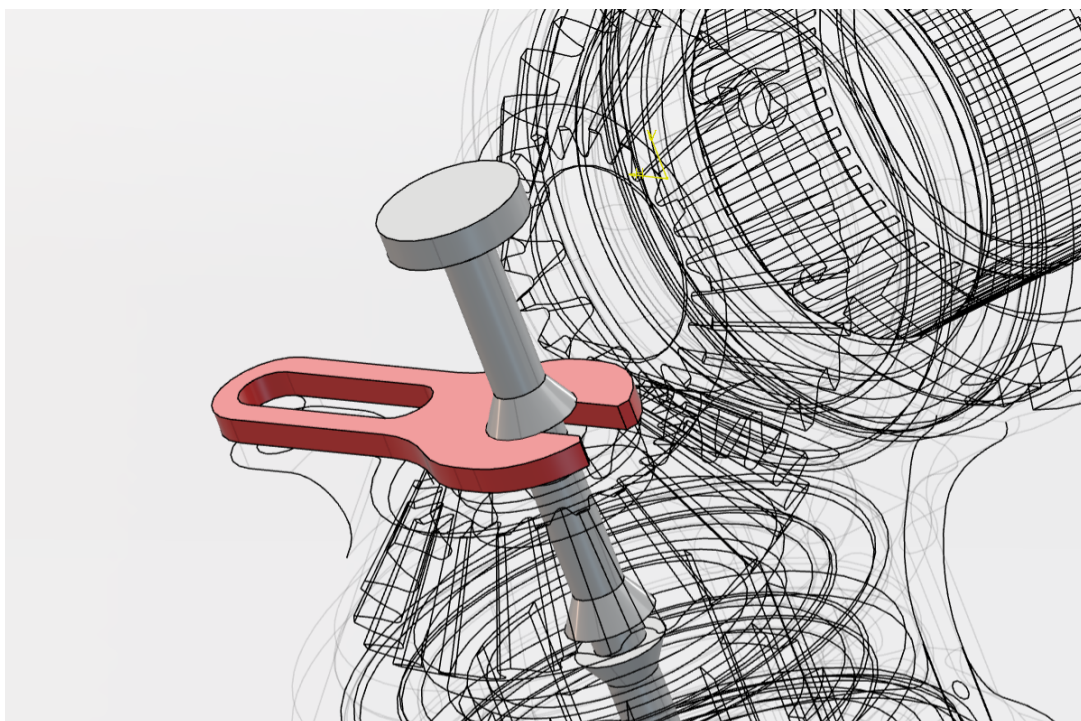
### 6.1 Koncept zajišťování čepu řízení

Z koncepce připojování motoru pro autonomní řízení vychází požadavek na možnost zajištění čepu ve dvou pozicích; v konfiguraci, kde je vyžadováno řízení motorem, musí být čep pln zasunutý, a v konfiguraci, kde motor nemá být připojen, musí být čep zajištěn v pozici o několik desítek milimetrů vyšší. V obou z těchto pozic musí být dle pravidla T 14.8 [2 – str. 65] čep “securely locked”, tzn. měl by být bez hrozby samovolného pohybu, který by v extrémním případě mohl nevyžádaně odpojit či připojit motor.



Podle pravidla T 14.8 také v procesu odpojování motoru od zbytku systému nesmí žádný z dílů použitých v systému ztratit kontakt se zbytkem systému. Jeho znění výslovně říká, že je platné i pro spojovací materiál jako šrouby, podložky a ostatní. Toto pravidlo tak prakticky zakazuje možnost vyšroubování jakékoli části systému a připevnění na jiné místo ve voze, což v mnoha způsobech způsobilo komplikace při návrhu. Bylo zváženo mnoho koncepcí, kde buď nebylo splněno pravidlo T 14.8 v případě jedné nebo více komponent, systém zajišťování by způsoboval výrazné nevyžádané třecí odpory v řízení, nebo by bylo velice komplikované systém operovat.

Koncepce, jež se nakonec ukázala jako vyhovující ve všech ohledech, pracuje s vysunutelnou hliníkovou jisticí destičkou, fungující jako zámek pro čep. (obr. 10) Pro tento zámek jsou v čepu řízení vyrobeny dva zářezy ve vhodné výšce.



obr. 10: Čep řízení (šedá) a jisticí destička - zámek (červená)

V případě takto zvoleného jištění čepu vznikají pouze zanedbatelné pasivní síly, jelikož systém nabízí dostatečné vůle. Je také v porovnání s alternativami relativně jednoduchý na výrobu a velice dobře přístupný a servisovatelný. Nabízí také možnost použití spojovacího materiálu, který splňuje podmínky “positive locking” [2]. Pravidla odpojení motoru tuto podmínku jasně nedefinují; není uvedeno, že systém odpojení motoru musí tuto podmínku splňovat, avšak je možné, že rozhodčí při přejímkách na ni bude trvat podle pravidla T 10.1.1 [2 – str. 53], jež nekonkrétně uvádí, že všechen spojovací materiál na systému řízení je kritický. V případě nutnosti je výměna matky za samojistnou otázka několika minut. Další výhodou tohoto systému zamykání je fakt, že destička svou plochou částečně chrání samotný kuželový převod uvnitř úhlového domku před vnikem nečistot a prachu.



## 6.2 Lokace a výběr senzoru natočení řízení

Jelikož čep řízení a jeho pojistný mechanismus nyní zabírají místo nad úhlovým domkem, kde byl původně umístěn senzor natočení řízení, bylo nutné pro něj najít jiné vhodné umístění. Původní senzor využíval desku s obvodem vlastního návrhu, jež zjišťovala natočení pomocí Hallova snímače a magnetu umístěného ve vertikálním ozubeném kole kuželového převodu. (obr. 11) Pro přesnost odečtu je vhodné umístit lineární snímač polohy na unašec hřebenu řízení, nebo prstencový senzor na vertikální spojovací hřídel.

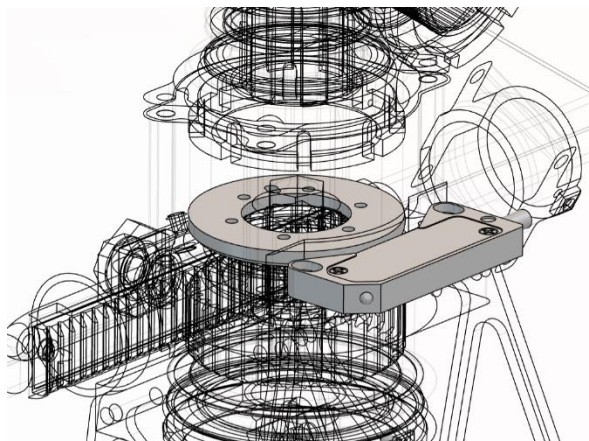


obr. 11: Vlastní senzor natočení řízení v monopostu FSE.11

Po zvážení prostorových možností, rozsahu měření a ostatních parametrů byl vybrán prstencový senzor RLS MHAD01\_10 [13] (obr. 12), který téměř dokonale splňuje všechny dané požadavky. Senzor měří absolutní hodnoty, tudíž bude zachovávat hodnotu i po pohybu s řízením při vypnutém napájení vozu a nebude vyžadovat časté kalibrace. Využívá obdobný komunikační protokol a vyžaduje stejné napájecí napětí jako vlastní senzor v monopostu FSE.11. Jeho nevýhodou je vnitřní průměr 25 mm, kvůli němuž bude za účelem smontovatelnosti vyžadována úprava drážkování na vertikální hřídeli oproti systému použitému v monopostu FSE.11, kde vnější průměr drážkování byl 26 mm. Původní drážkování bylo v tomto ohledu však značně předimenzováno, tudíž úprava nepředstavuje významný problém. Tělo senzoru bude umístěno na hřebenovém domku. (obr. 13)



obr. 12: Senzor RLS MHAD01\_10 [13]



obr. 13: Umístění senzoru nad hřebenovým domkem



## 7 Konkrétní úpravy komponent

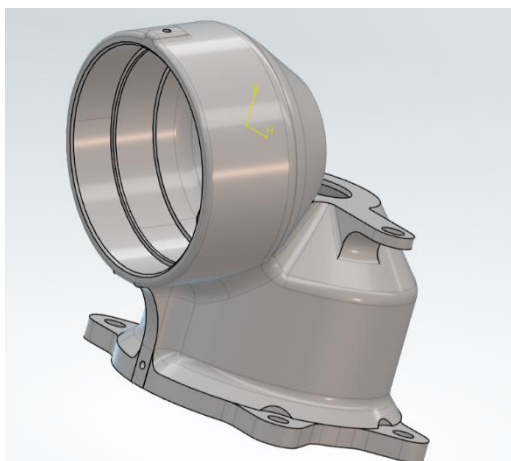
Množství významných komponent se muselo oproti předchozímu systému změnit, buď kvůli koncepci a provedení součástí autonomního řízení, nebo kvůli řešení známých nedostatků z minulé sezóny.

### 7.1 Úhlový domek

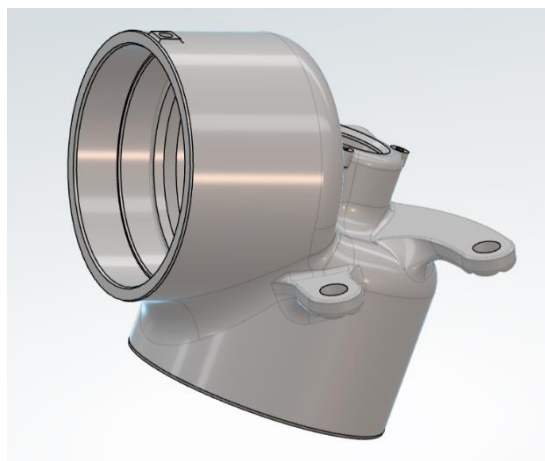
V případě úhlového domku byla nutná kompletní změna z důvodu lokace čepu řízení a přesunu bodů připevnění k vozu. Tuto strukturu již není možné připevnit k tzv. “poličce”, karbonové ploše, která v předchozí generaci vozu propojovala monokok a pedály s řízením. Úhlový domek tak bude muset být připevněn pomocí adaptéru k domku hřebenového převodu, tudíž je nutnost přesunout díry na šrouby k základně domku. (obr. 14)

Průchod čepu řízení znamená nemožnost použití ložiska nad vertikálním kuželovým kolem, jak tomu bylo v předchozí generaci. (obr. 15) Toto ložisko bylo nutné za účelem kompenzace ohybového momentu způsobeného radiální silou vznikající v kuželovém ozubení. V nejnovější generaci je toto ložisko nahrazeno přidáním ložiska ve spodní části kuželového kola, které tak dokáže v kombinaci s druhým ložiskem moment kompenzovat. Ložiska jsou obdobně jako v předchozím provedení axiálně zajištěny maticemi vlastního návrhu, jenž jsou samy pojištěny utažením stavěcího šroubu do jejího závitu za účelem splnění “positive locking” požadavku [2 – str. 53]. Matice mají jemný závit M45x1. Uložení horního ložiska zůstalo nezměněné; v tomto případě není nutnost moment kompenzovat dvěma ložisky, jelikož horizontální kuželové kolo je pevně spojeno s karbonovou tyčí řízení.

Kvůli mechanismu jistění čepu řízení byl na bok domku přidán výstupek s průchozí dírou na šroub. Ač je to nepravděpodobné, existuje možnost, že na domek při neobvyklých manévrech bude působit ohybový moment mezi osou vertikálního a horizontálního kuželového kola, tudíž bylo přidáno žebro na zvýšení pevnosti v tomto směru. V případě obrábění by toto žebro výrazně zvýšilo technologickou náročnost, avšak díky podpoře firmy MISAN je tento domek sintrovaný a až následně jsou obrobny funkční plochy.



obr. 14: Úhlový domek monopostu FSE.12



obr. 15: Úhlový domek monopostu FSE.11

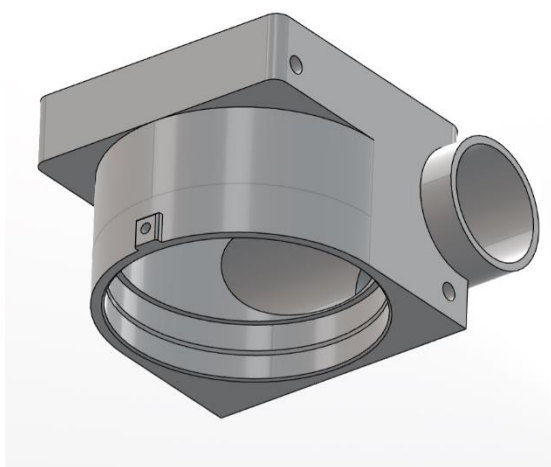


## 7.2 Domek hřebenového převodu

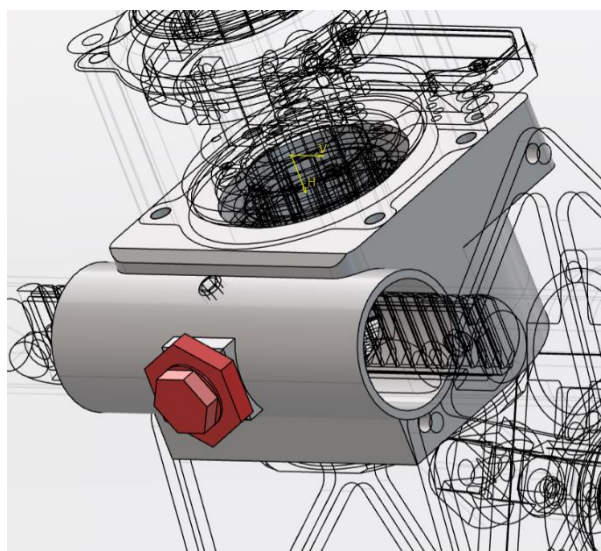
Domek hřebenového převodu se musel oproti předchozí generaci výrazně změnit z několika důvodů. Prvním je nutnost připevnění úhlového domku a vybraného senzoru natočení řízení k vrchní části dílu, a dalším důvodem je přidání míst na připevnění klece pro uchycení motoru na bocích hřebenového domku. (obr. 16) V důsledku těchto požadavků bude muset mít tělo dílu tvar kvádru, a proto bylo rozhodnuto, že se domek hřebenového převodu bude vyrábět pouze obráběním hliníku, oproti minulé generaci, kde byl tento díl sintrován a až následně byly obrobena funkční plochy na ložiska a ostatní. Výroba dílu obráběním s sebou také nese výhodu nižší ceny; jelikož sponzoři týmu většinou poskytují určitý rozpočet na svoje vlastní služby, tento rozpočet bude moct být využitý na ostatní díly, kde je sintrování nutností. Na technologii třískového obrábění z kvádrového polotovaru bude muset být brán zřetel při návrhu dílu, a díl tak nebude moct být efektivně optimalizován pro dané napětí. V případě tohoto dílu by však další tvarová optimalizace nepřinesla výrazné výhody, a obráběný díl tak bude mít pouze zanedbatelně vyšší hmotnost oproti případnému dílu optimalizovanému pro technologii sintrování.

Díky použití stejného hřebenového převodu, stejného unašeče hřebenu a stejného vnějšího hřebenu se samotná vnitřní struktura nezměnila. Zůstalo též stejné uložení ložisek i matice k jejich axiálnímu zajištění, která je opět zajištěna pomocí stavěcího šroubu pro splnění “positive locking” podmínky [2 – str. 53].

Po zkušenostech z minulé sezóny byl v přední části hřebenového domku přidán speciální šroub na vymezování vůle v uzubení. Tento šroub při utažení působí na přední rovnou plochu unašeče hřebenu řízení a tlačí tak hřeben k ozubenému kolu. Ve šroubu je vložen teflonový váleček, aby bylo minimalizováno způsobené tření. (obr. 17)



obr. 16: Hřebenový domek - zadní pohled



obr. 17: Umístění hřebenového domku, vymezovací šroub (červená)



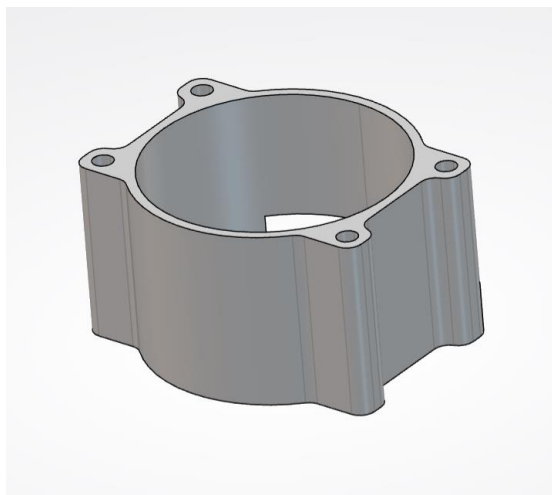


### 7.2.1 Připevnění úhlového domku

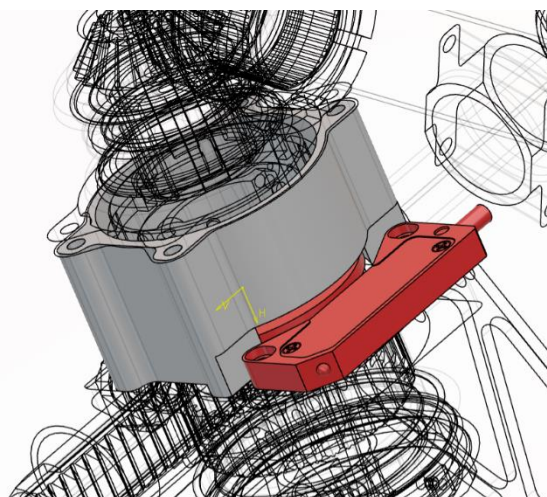
Kvůli nemožnosti uchycení úhlového domku přímo k monokoku bylo nutné vyvinout způsob připevnění k hřebenovému domku. K tomuto účelu bude sloužit relativně jednoduchý díl, který se připevní mezi hřebenový a úhlový domek pomocí čtyř šroubů. (obr. 18) Kvůli přístupnosti a servisovatelnosti vedou šrouby DIN 912 M4x50 skrze průchozí díry v úhlovém domku, průchozí díry v prostředním dílu a šroubují se do závitových děr v hřebenovém domku. Díky faktu, že těchto šroubů je sudý počet a dvojice jsou relativně blízko u sebe, může být nenáročně splněn požadavek „positive locking“ [2 – str. 53] pomocí drátů protažených vyvrtnými dírami v hlavách šroubů, které spojují dva šrouby tak, že není možné bez odstranění drátku šrouby otočit v povoleném směru.

Kvůli faktu, že úhlový domek nebude sám o sobě zajištěn v monokoku, je nutné kompenzovat ohybový moment, jež bude vznikat v důsledku otáčení volantem. Hrozí, že by tento moment výrazně vychyloval úhlový domek do stran. Tato ztráta pevnosti systému by měla za následek pro pilota „gumový“ pocit v řízení, a výsledná ztráta citu by znamenala, že v pilotovaných disciplínách by bylo náročnější dosáhnout optimální trakce na předních pneumatikách. Kvůli tomuto byl díl rozšířen a šrouby byly posunuty do stran. Pevnost vůči ohybovému momentu v dopředném směru není nutné výrazně kompenzovat, jelikož moment při provozu bude mít zanedbatelnou velikost, a případná malá elasticita systému v tomto směru nebude mít výrazný efekt na říditelnost vozu.

Kvůli poloze senzoru natočení řízení bylo nutné v zadní části dílu vytvořit výřez. (obr. 19) Tento výřez umožní také správné polohování prstence senzoru v závislosti na těle senzoru při montáži, a to díky poskytnutému jednoúčelovému plastovému nástroji [13].



obr. 18: Díl pro připevnění úhlového a hřebenového domku



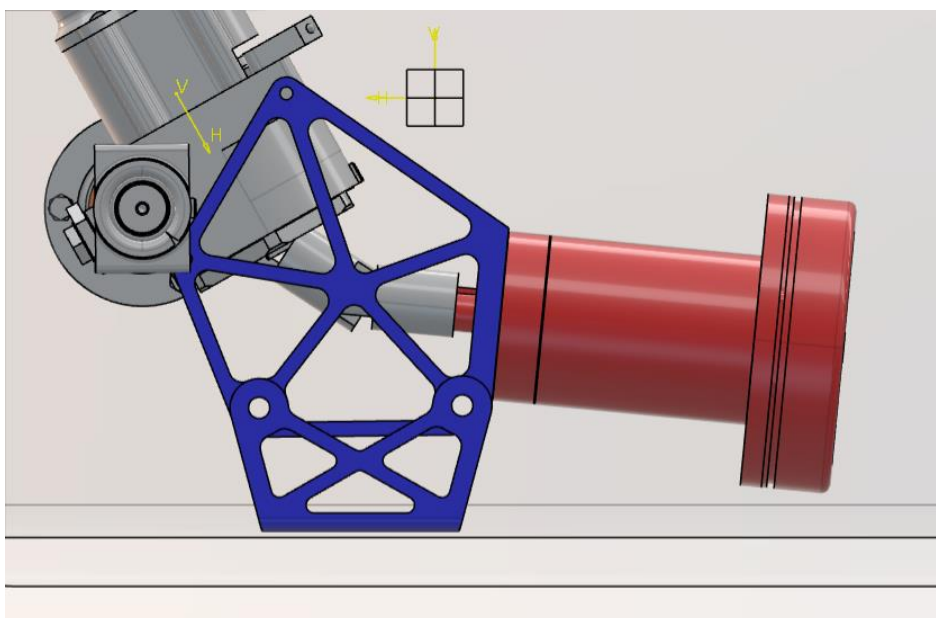
obr. 19: Umístění dílu v systému (šedá), poloha vůči senzoru natočení (červená)



### 7.3 Klec pro připevnění motoru

Pro připevnění motoru a zároveň zvýšení pevnosti systému bylo nutné vyvinout klec, která bude pojit všechny součásti dohromady. Klec musí být velice pevná, jelikož musí odolávat točivému momentu vyvinutého motorem, musí být dostatečnou oporou pro motor s převodovkou vážící 1,4 kg [8,9] v provozu s výrazným přetížením a vibracemi, a měla by poskytovat dodatečnou oporu pro nižší část systému.

V průběhu návrhu bylo zjištěno, že díky vzniklému prostoru u podlahy je možné motor připevnit pod úhlem, a tudíž blíže podlaze. (obr. 20) Tento způsob připevnění motoru je výhodný, jelikož znamená menší úhel ohnutí kardanu, a tudíž menší ztrátu homokineticity v případě nevyhnutelných nepřesností ve výrobě. Nižší pozice motoru také bude znamenat nepatrné snížení těžiště vozidla.



obr. 20: Připevnění sestavy motoru řízení (červená) pod úhlem

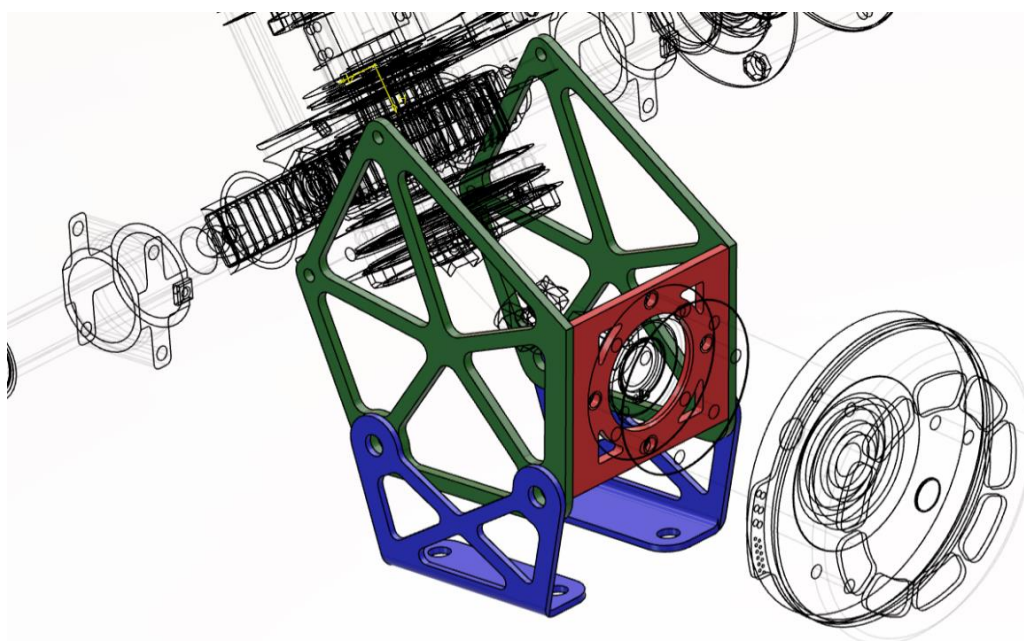
Kvůli vyžadované pevnosti a zároveň jednoduchosti výroby bylo rozhodnuto, že tato klec se bude skládat z několika svařovaných ocelových plechů, jež byly předem vyřezány do požadovaného tvaru laserem. Tato možnost výroby je pro tým finančně zdaleka nejvýhodnější, jelikož samotné plechy jsou dodávány sponzorsky firmou Alfun, řezání laserem je vyhotoveno sponzorsky firmou Trumpf a svaření je možné přímo studenty na dílně. Pro pevnost v několika směrech byly zvoleny dva boční ocelové díly o tloušťce 3 mm, jeden zadní díl pro připevnění převodovky o tloušťce 3 mm, a dva spodní ohýbané díly o tloušťce 2 mm pro připevnění k monokoku. Boční díly budou svařeny dohromady se zadní částí, a spodní díly budou k této konstrukci připevněny šrouby. Toto šroubové připevnění umožňuje lepší přístup a servisovatelnost systému, a zároveň dokáže kompenzovat nepřesnosti při výrobě monokoku - jelikož forma monokoku je negativ vnějšího tvaru, a do této formy jsou následně vrstveny karbonové nástřihy a jádra, je pravděpodobné, že vnitřní



tvár a rozměry výsledného monokoku budou o několik milimetrů rozdílné od původního návrhu.

Nižší část systému řízení se připevňuje dvěma způsoby – lepeným spojem a náseldným přišroubováním vnější hřebenové struktury k nosníkům pedálů, a touto klecí motoru řízení. Pro smontovatelnost je tudíž nutné, aby mezi těmito místy byla možnost montážní vůle. Této vůle je dosaženo právě ve spoji horních a spodních částí klece motoru, kde jsou vytvořeny díry o průměru 6 mm, ale budou použity dohromady čtyři šrouby M4 s podložkami a samojistnými maticemi. Bude tak zajištěna montážní vůle 1 mm v jakémkoli směru, jež může být případně dodatečně rozšířena díky dostatečnému přebytku materiálu kolem děr pro šrouby. (obr. 21)

Spodní podpory klece motoru budou k monokoku připevněny pomocí kombinace čtyř šroubů M6 skrze monokok a dvousložkového lepidla Loctite EA 9466 [14].



*obr. 21: Klec pro připevnění motoru. Svařované zadní (červená) a boční (zelená) části, šroubované spodní části (modrá)*

Výsledný systém pro připevňování motoru mohl být lépe optimalizován. Použití 3 mm tlustého ocelového plechu v dané aplikaci je předimenzováním, a i přes požadavek nejvyšší možné pevnosti tohoto dílu by pravděpodobně šlo ušetřit více než 100 g při zachování dostatečných vlastností. V příští generaci bude na tuto zkušenost při návrhu brán zřetel. Tuto sezónu bude však použitý popsáný extrémně pevný díl.

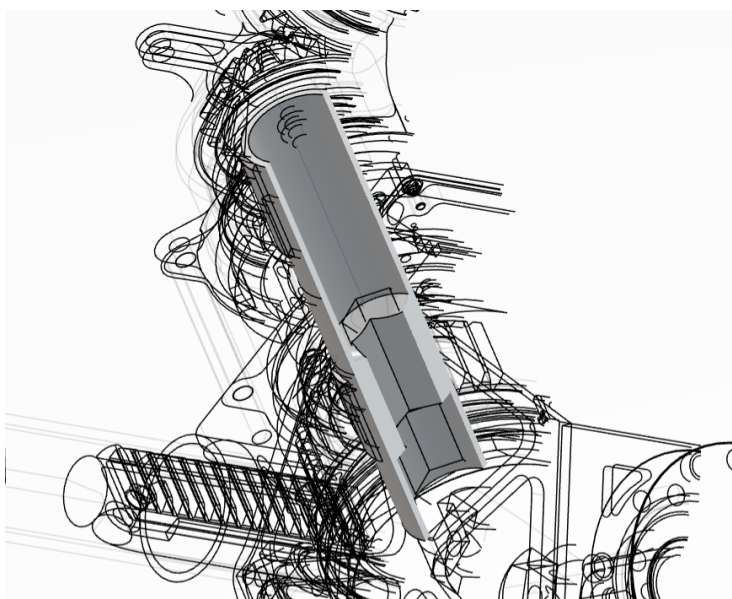


#### 7.4 Vertikální spojovací hřídel

Kvůli novému konceptu bezpilotního řízení musela projít změnami i vertikální spojovací hřídel, tzn. hliníková hřídel, která spojuje a přenáší točivý moment z vertikálního kužekového kola do kola hřebenového. Jednou z hlavních změn bylo prodloužení spodní části hřídele za účelem držení konce dvojitého kardanu v pozici i v případě vysunutého čepu řízení. Hřídel tak pokračuje pod drážkami hřebenového kola jako tenkostěnná trubka, jež má vnitřní průměr 20 mm podle vnějšího průměru vybraného kardanu SKF UJMB 20 [12].

Výraznou změnou oproti hřídeli použité v předchozí generaci systému je vnitřní šestihran pro přenos momentu pomocí čepu řízení. (obr. 22) Tento šestihran navazuje na šestihrannou díru v horním členu dvojitého Kardanova hřídele, a jeho horní plocha je kónická za účelem zjednodušení montáže a zasouvání čepu při běžné operaci. Další nutnou změnu oproti předchozí generaci způsobuje inkluze senzoru natočení řízení právě na vertikální spojovací hřídeli. Kvůli vnitřnímu průměru prstence senzoru musel být mírně změněn vnější poloměr rovnobokého drážkování na nestandardní hodnotu 25 mm, avšak tato změna byla bezpečně možná, jelikož dané rovnoboké drážkování bylo opět jednou z předdimenzovaných součástí minulého systému. (obr. 23)

Dané konstrukční úpravy, jako rovnoboké drážkování vymykající se tabulkovým hodnotám a vnitřní šestihran, je možné vyrobit s velice malými tolerancemi díky použité technologii elektroerozivního drátového řezání. [15] Právě nízká hodnota tolerance vnitřního šestihranu, a tudíž výsledná malá vůle, má přímý pozitivní vliv na odezvu a schopnost reakce systému autonomního řízení. V případě velkých vůlí, a tudíž rozdílu mezi požadovaným natočení řízení a skutečnými naměřenými hodnotami, by v systému začaly vznikat oscilace, kterým by bylo extrémně složité softwarem a regulátorem předejít.



obr. 23: Podélný řez umístění vertikální spojovací hřídele



obr. 22: Vertikální spojovací hřídel předchozí generace FSE.11

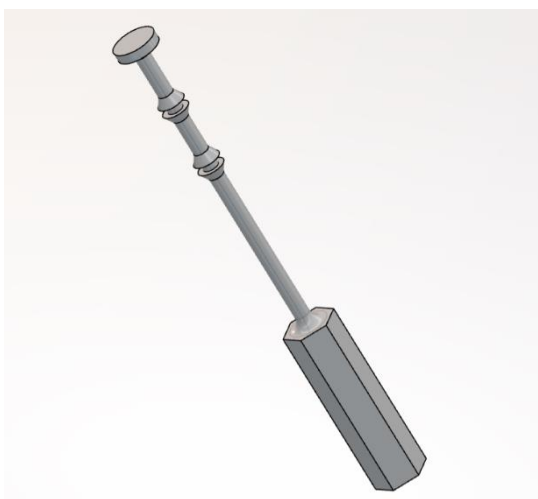


## 7.5 Čep autonomního řízení a zámek

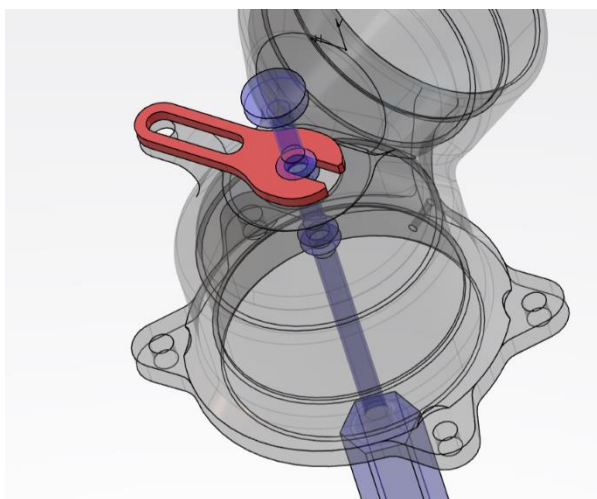
Přenos točivého momentu mezi dvojitým Kardanovým hřídelem a zároveň možnost odpojení motoru autonomního řízení poskytuje čep autonomního řízení. (obr. 24) Nejdůležitějším prvkem tohoto čepu je šestihranný hranol ve spodní části, díky kterému přenos točivého momentu probíhá. Tento ocelový hranol je možné vyrobit s velice nízkými tolerancemi díky možnosti jednoduchého upnutí a broušení na stolní brusce; nutnost malých tolerancí v této oblasti byla popsána v kapitolách 4.2 a 7.4.

Hranol může být vytahován díky tenké vystupující tyči, jež je zakončená vytahovacím úchytem. Návaznost hranolu a vystupující tyče byla navržena s rádiusem, aby byla minimalizována koncentrace napětí a byla zajištěna odolnost vůči nesprávné manipulaci. Na tyči jsou v příslušných výškách vytvořeny výstupky, do nichž se může s vůlí zasunout zámek čepu řízení a zajistit tak čep proti pohybu ve vertikálním směru.

Díky konceptu zajišťování čepu řízení může být samotný zámek pouze laserem vyřezaný díl z 2 mm tlustého hliníkového plechu. Díl má podlouhlou díru pro šroub, která pro splnění pravidla T14.8 [2 – str. 65] dovoluje změnu konfigurace řízení bez úplného odstranění šroubu a matky. Kolem zářezu pro čep řízení je zámek rozšířený, což mimo zvýšené pevnosti poskytuje určitou ochranu kuželového a hřebenového převodu proti prachu. (obr. 25)



obr. 25: Vytahovatelný čep řízení



obr. 24: Zámek (červená) čepu řízení (modrá) kryje otvor v úhlovém domku (šedá)

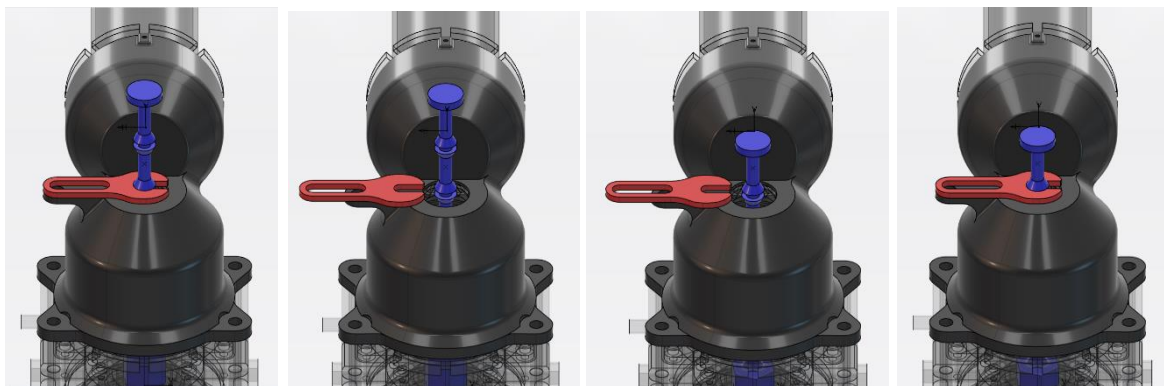
### 7.5.1 Princip operace zámku čepu řízení

Díky využití konceptu popsaného v kapitole 6.1 je změna konfigurace řízení relativně rychlou a dobře přístupnou záležitostí. Pro přechod z čistě pilotovaného (obr. 26 - 1) do autonomního režimu je nutné povolit šroub, který zajišťuje zámek čepu proti pohybu. Zámek čepu je následně vysunut až do krajní polohy (obr. 26 - 2) a je zasunut čep řízení tak, že zapadne do díry v kardanu (obr. 26 - 3). Pro tento krok může být nutné mírné otočení



volantem. Následně je zámek čepu zasunut zpět tak, že jistí čep řízení ve zvolené poloze (obr. 26 - 4) a je utažena matice se zvoleným způsobem jejího zajišťování.

Pro přístup k vytažení čepu, a tudíž změně konfigurace řízení, je nutné pouze sundání předního křídla a odstranění špičky a deformačního prvku formule, což představuje jednoduché úkony, které jsou standardně prováděny při jakémkoliv servisu vozu.



obr. 26: Průběh změny z pilotované na bezpilotní konfiguraci

## 7.6 Připevnění vnějšího hřebenu k monokoku

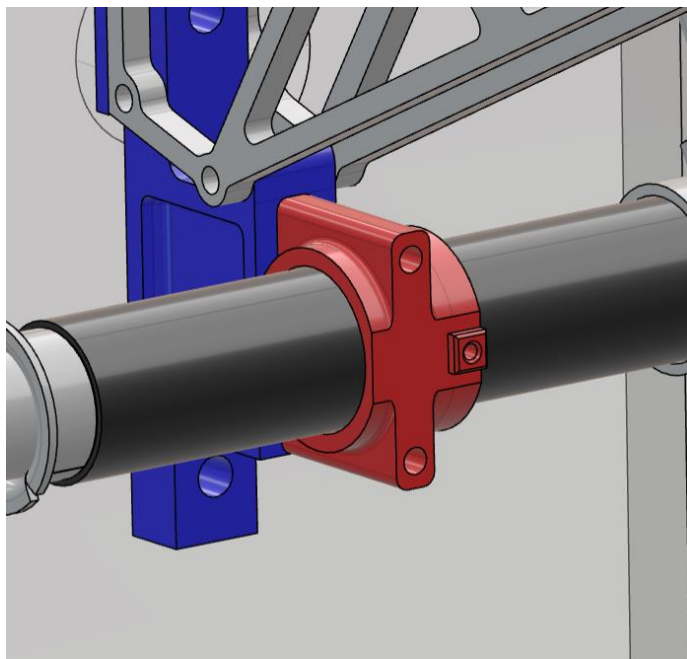
Další změnou oproti minulému systému je samotné uchycení sestavy v oblasti hřebenu řízení. V minulé generaci bylo řešením přímé lepení a šroubování do monokoku na koncích karbonové trubky, která funguje jako vnější vodič a kryt unašeče hřebenu řízení. Jelikož byly zároveň přepracovány a změněny pedály, naskytla se možnost spojit uchycení řízení a pedálů ve dvou dílech, které se samy o sobě šroubují a lepí k přední části monokoku. K přišroubování k těmto společným adaptérům na každé straně spouží objímky, jež se nasunou na karbonový vnější hřeben a ve správné pozici se k vnějšímu hřebenu přilepí dvousložkovým lepidlem Loctite 9466 [14]. Dané řešení také lépe odolává krouticímu momentu v karbonovém vnějším hřebenu, který může vzniknout v důsledku chybného samostatného uchytení úhlového domku k monokoku.

Jednou z úvah při návrhu bylo, zda udělat objímku jako jeden celý díl či jako dva protikusy. Rozdělná objímka by byla jednodušší z hlediska smontovatelnosti, jelikož by byla jednodušší aplikace epoxidu a bylo by umožněno provést celkovou kompletaci uvnitř monokoku. Ve výsledku bylo však rozhodnuto, že objímka se vyrobí jako jeden celý díl. Hlavním důvodem bylo, že na kompozitové trubce není vhodné působit koncentrovaným tlakem v radiálním směru. Takový tlak by v případě rozdělené objímky v případě sešroubování nastal, což by v extrémním případě mohlo mít za následek praskání trubky. Dalším důvodem je přesná kontrola nad vzniklou vůlí mezi trubkou a objímkou, kde byla pro rovnoměrné rozetření epoxidu ponechána vůle 0,5 mm. Fakt, že není objímka rozdělná, nebude mít po kompletaci vliv na servisovatelnost, jelikož při nutnosti vyjmutí



vnějšího hřebenu je velice jednoduché vyjmout objímku společně s vnějším hřebenem. Odstranění objímky z karbonové trubky by kvůli lepení epoxidem nebylo možné ani v jednom případě.

Jelikož se dle pravidel jedná o kritický spoj, bylo nutné lepený spoj pojistit druhotným šroubovaným spojením. V zadní části objímky byla tak přidána závitová díra, kde bude při montáži zašroubován stavěcí šroub. (obr. 27)



*obr. 27: Objímka (červená) a společné připevnění  
brzdového pedálu a řízení (modrá)*

Tato změna uchycení oproti systému minulé generace, ač jednodušší na výrobu a s menší závislostí na přesných vnitřních rozměrech monokoku, se bohužel neukázala jako nejlepší řešení. Hlavním problémem je snížená tuhost v bočním směru; při řešení minulé generace byly konce vnějšího hřebenu lepeny a šroubovány přímo k bokům monokoku, což systému v daném směru dodávalo téměř absolutní tuhost. V novém systému je karbonová trubka připevněna přes dva lepené a jeden šroubovaný spoj k přední části monokoku, což nevyhnutelně vede k určité elasticitě v příčném směru, která má za následek nepatrně snížený cit v řízení. V příští generaci, pokud bude použita obdobná koncepce řízení, bude vnější hřeben opět připevněn přímo k monokoku.



## 7.7 Horní uchycení tyče řízení

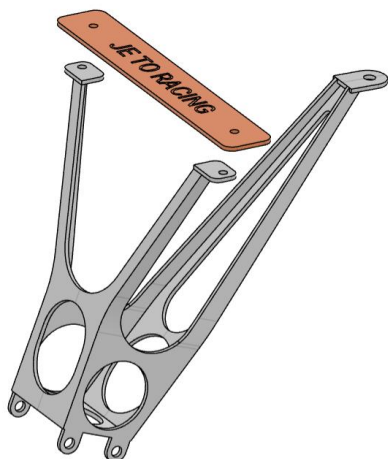
Čistě z hlediska přestavby systému pro schopnost bezpilotní jízdy nebyla změna horního uchycení tyče řízení nutná, avšak bylo pro ní rozhodnuto kvůli náročnosti na výrobu předchozího systému a možnosti přidání axiální výztuhy hřídele, která může být nutná kvůli chybějící podpoře úhlového domku řízení. Výztuha by spočívala v přídatné matici na ose rychloupínací spojky volantu. V prvotní verzi systému matice nebude přítomna, jelikož v tomto směru by řízení nemělo být výrazně zatěžováno a pro zachycení vznikající síly by mělo stačit nalisování ložiska na osu rychloupínáku. Bylo by také nutné vyřešit pojištění matice kvůli pravidlu “positive locking” [2 – str. 53], jehož splnění by v daném místě bylo relativně náročné. Samotná existence matice by tak mohla prodloužit přejímky, či v extrémním případě znemožnit účast na závodě. Přidání zmíněné matice avšak bude případy možné a nenáročné kdykoli v sezóně.

Kvůli modularitě, konstrukci a výrobě bylo rozhodnuto, že se nové horní uchycení bude skládat ze dvou hlavních částí.

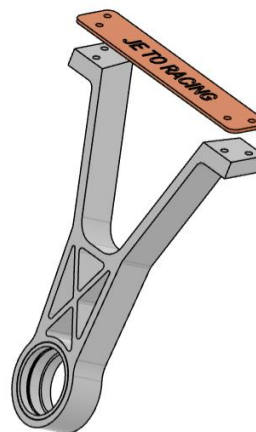
### 7.7.1 Podpůrná konstrukce horního uchycení

Samotná konstrukce horního uchycení se bude skládat z 2 mm ocelových plechů, které byly do požadovaného tvaru vyřezány laserem. Následně jsou plechy na dílně ohnuty a svařeny do požadované konstrukce, jelikož vlastní svařování v tomto případě nabízí dostatečnou přesnost. Díky nově přidané zadní podpoře horního uchycení je nový systém výrazně tužší v dopředném směru. (obr. 28)

Šrouby této podpůrné konstrukce prochází monokokem na velmi viditelném místě před pilotem, tudíž byla vyrobena vlastní hliníková podložka se satirickým nápisem “JE TO RACING”, která úsměvným způsobem odkazuje na práci a kompromisy nutné v soutěžním prostředí. Podložka je velice a jednoduchá na výrobu a výměnu, tudíž je možnost na každé závody vytvořit vlastní. Obdobná podložka byla již použita v minulých letech. (obr. 29)



obr. 29: Svařovaná ocelová podpora horního uchycení řízení a podložka „JE TO RACING“



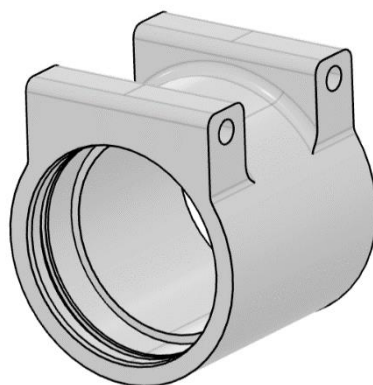
obr. 28: Hliníková konstrukce horního uchycení předchozí generace FSE.11





### 7.7.2 Vlastní struktura horního uchycení

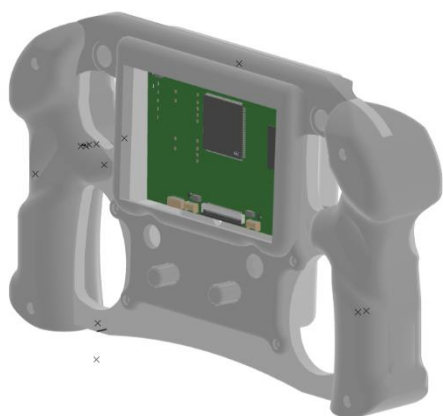
Díky použití svařované podpůrně konstrukce může být vlastní struktura horního uchycení výrazně menší jednodušší díl, který obstarává pouze uložení ložiska a jeho axiální pojištění. (obr. 30) Oproti minulé generaci je tak levnější na výrobu, a podstatně jednodušší na poptání.



obr. 30: Uložení ložiska horního uchycení tyče řízení

### 7.8 Volant

Kompletní změna volantu taktéž nebyla nutná z hlediska funkčnosti bezpilotního řízení, avšak byla žádoucí z hlediska ergonomie pilota a možnosti uložení nové elektroniky s novým displejem a změněnými ovládacími prvky. Konstrukce volantu se skládá z ploché strukturní desky z karbonu s kevlarovým jádrem, na níž jsou připevněny úchopy, které jsou 3D tištěny z plastu. (obr. 31) Úchopy volantu byly modelovány během několika evolucí a průběžně konzultovány s piloty formule. V případě předchozího volantu byly úchopy přímo součástí hlavní karbonové struktury, tudíž neumožňovaly příliš specifické tvarování z důvodu jednoduchosti laminace. (obr. 32) Nové 3D tištěné úchopy díky oddělené konstrukci také umožní další průběžnou evoluci jak v průběhu sezóny, tak při vývoji volantu příští generace.



obr. 31: Kompletně nový volant monopostu FSE.12



obr. 32: Původní volant monopostu FSE.11

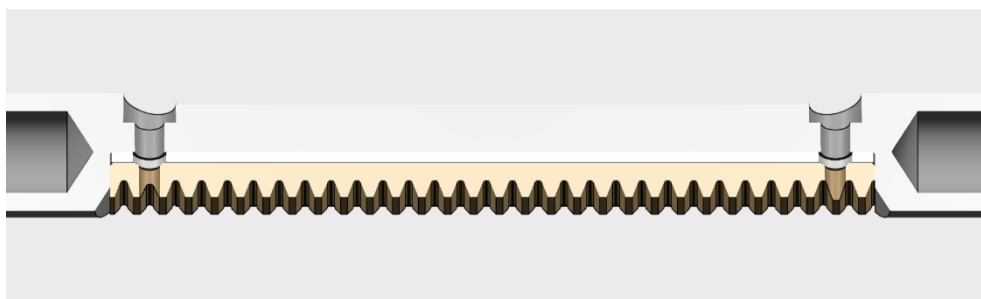


## 8 Postup montáže systému

Po obdržení obrobených dílů, kontrole správnosti výroby a vlastní výrobě ostatních přichází na řadu samotné složení, smontování a slepení systému. Část tohoto procesu je možná vně vozu, avšak pro samotnou instalaci a některé upravení dílů je nutné mít již hotový monokok vozu, což výrazně snižuje časovou dotaci na kompletaci systému.

### 8.1 Hřebenová sestava

Prvním krokem při montáži hřebenové sestavy je kompletace hřebenu a jeho unašeče. Do unašeče je vložena hliníková destička o tloušťce 2mm, jenž byla do požadovaného tvaru vyřezána laserem ve společnosti Trumpf. Na destičku je následně vložen samotný hřeben, ve kterém jsou na koncích vyrobeny závity. Hřeben je připevněn dvěma šrouby, které prochází skrze destičku a unašeč. (obr. 33)



obr. 33: Podélný řez hřebenu, vymežovací destičky a unašeče

Dalším krokem je úprava karbonové trubky o vnějším průměru 25 mm, kterou dodala společnost Compotech. Trubka je uříznuta na požadovanou délku, aby také působila jako doraz řízení, který je v tomto místě požadován pravidlem T2.7.3 [2 – str. 26]. Následně je ve středu uříznuté trubky vytvořeno kruhové vybrání pro hřebenové kolo, a na opačné straně je vyvrtána díra o průměru 15 mm, kterou bude následně procházet šroub pro vymezení vůle hřebenu. Ostré hrany trubky a otřepy vzniklé řezáním a vrtáním jsou zabroušeny. Je také mírně zbroušena vnější plocha kolem středu trubky o délce 75 mm za účelem zvýšení povrchové drsnosti pro správnou adhezi epoxidu. Při provádění těchto operací vzniká karcinogenní prach, tudíž je nutné, aby byly prováděny v dobře větraném prostředí a byla použita adekvátní ochrana dýchacích cest. [16]

Na předem zbroušenou část vnější plochy je nanášeno dvousložkové lepidlo Loctite 9466 a trubka je vložena do hřebenového domku. Vytlačенý přebytečný epoxid je před vytvrzením odstraněn ubrouskem. Následuje úplné vytvrzení epoxidu, tudíž 24 hodin není možná další manipulace s hřebenovým domkem [14].

Do hřebenového domku je po vytvrzení epoxidu nalisováno horní ložisko SKF 61806, a na hřebenové kolo je nalisováno spodní ložisko SKF 61809. Sestava hřebenu a unašeče je následně vsunuta do karbonové tyče a hřebenové kolo se spodním ložiskem je také

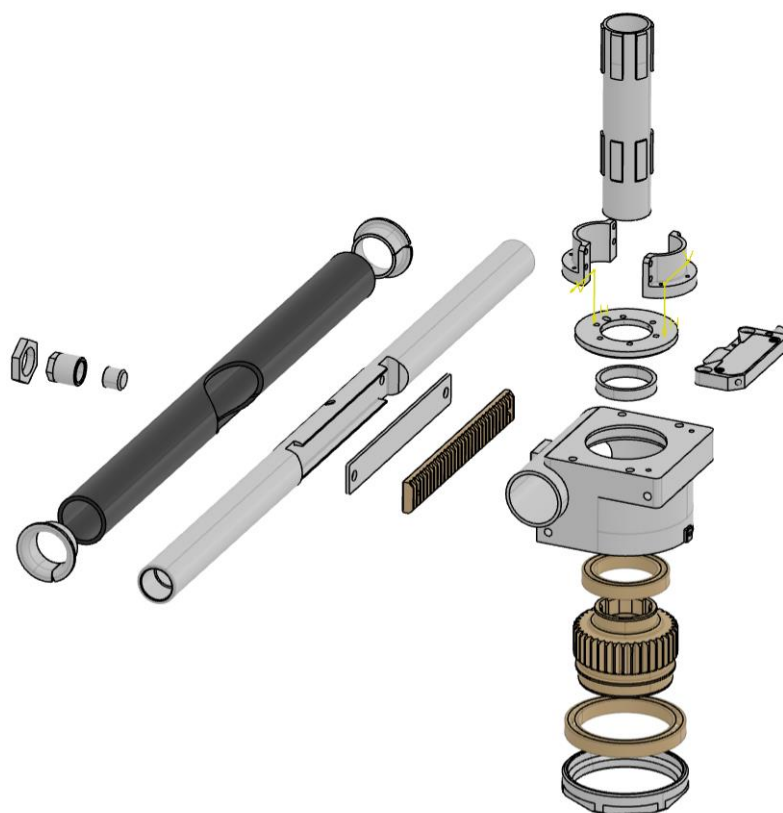


nalísováno do hřebenového domku. Pro axiální zajištění hřebenového kola je zašroubována spodní jisticí matice, a pro pojištění matice je z boku našroubován stavěcí šroub. Na konce tyče jsou nalepena kluzná ložiska SKF PCMF 202311.5. [17]

Do vymezovacího šroubu je vložen válec PTFE o správné velikosti a vymezovací šroub je našroubován do hřebenového domku a zajištěn vlastní maticí. V tuto chvíli je pro aretaci systému při montáži vymezovací šroub utážen výrazně více, než jak tomu bude při provozu formule.

K hřebenovému domku je pomocí dvou šroubů připevněno tělo senzoru natočení řízení.

Na vertikální spojovací hřídel je volně přimontován držák kruhu senzoru natočení, a samotný kruh senzoru je nasunut na hřídel a připevněn k držáku. Pod kruh senzoru je nasunuta distanční trubka mezi kruh senzoru a hřebenové kolo, která byla uříznuta na hodnotu mírně větší než modelovou. Hřídel je zasunuta do rovnobokého drážkování v hřebenovém kole, a následně je díky dodanému jednoúčelovému nástroji na zajištění vůle v senzoru [13] zjištěna přesná poloha kruhu senzoru na hřídeli. Hřídel je následně vyjmuta a podle velikosti vůle zjištěné nástrojem je přesně upravena délka distanční trubky. Hřídel je opět zasunuta do hřebenového kola a opět je kontrolována vůle, a pokud je vyhovující, jsou utáženy šrouby držáku kruhu senzoru. (obr. 34)



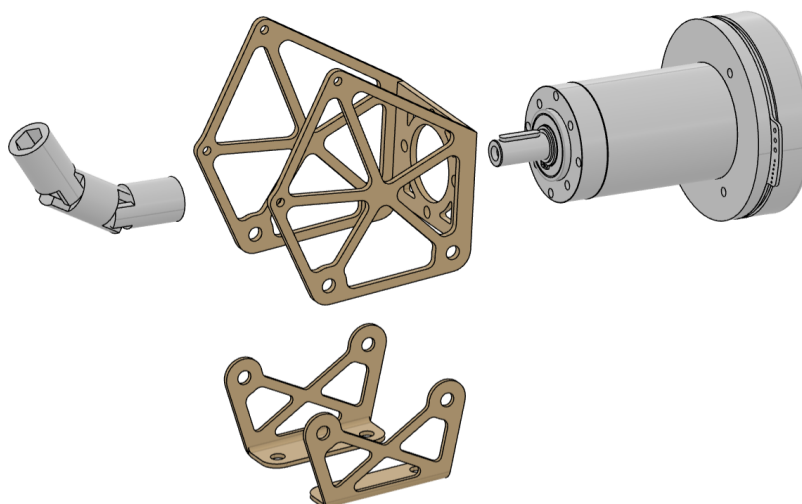
obr. 34: Rozpad sestavy hřebene řízení



## 8.2 Sestava klece motoru

Hlavním členem spodního uchycení je klec, která spojuje hřebenový domek a motor řízení. Plechy pro tuto klec byly vyřezány firmou Trumpf, a jsou svařeny do požadovaného tvaru. Ke svařené struktuře kleci je čtyřmi šrouby s provrtanými hlavami připevňena sestava motoru a převodovky, a dvojice šroubů jsou vzájemně drátkovány pro splnění požadavku “positive locking” [2 – str. 53]. Na výstupní hřídel převodovky je nasunutý dvojitý kardan. (obr. 35)

Dalším krokem je ohnutí spodních podpor klece. Tyto podpory jsou opět dodány jako laserem vyřezaný plech, a jsou následně ohnuty do úhlu 90°. Podpory jsou společně s klecí motoru řízení a hřebenovou sestavou zkušebně vloženy do monokoku, a opět vyjmuty ven. V případě, že se díly od sebe výrazně odchyľují, jsou spodní podpory dále upraveny dalším mírným ohybem či odpovídajícím upravením děr pro šrouby. Spodní plocha spodních podpor je zbrušena pro získání vyšší povrchové drsnosti a společně s adhezivní plochou v monokoku očištěna acetonem. Na spodní plochu spodních podpor je naneseo dvousložkové lepidlo Loctite 9466, díly jsou umístěny do monokoku a je odstraněno přebytečné lepidlo. Spodní podpory jsou pro správné vytvrzení epoxidu pevně přišroubovány k monokoku. Pro správné vytvrzení epoxidu není možné dalších 24 hodin pokračovat v montáži [14].



obr. 35: Rozpad sestavy klece motoru

### 8.2.1 Vložení do monokoku

Pro správnou adhezi epoxidu je ve správných místech zbrušena a vyčištěna karbonová trubka hřebenové sestavy, a je na ní aplikováno lepidlo Loctite 9466. Na trubku jsou nasunuty objímky pro připevnění k pedálové soustavě a přední části monokoku, a hřebenová sestava společně se sestavou klece motoru jsou připevněny v monokoku.



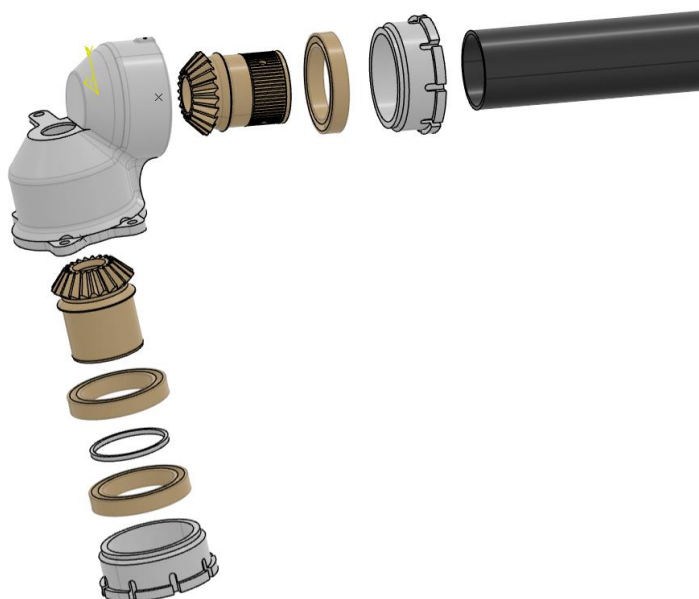
Pro spojení klece motoru se spodními podporami jsou využity šrouby se samojistnými maticemi, a pro připevnění hřebenového domku s klecí motoru jsou drátkovány dvojice šroubů.

Díky době vytvrzení dvousložkového lepidla Loctite 9466 [14] je možné s pozicí lepených dílů po nanesení epoxidu krátkou dobu manipulovat. Objímky jsou tak pozicovány a přišroubovány k nosníkům pedálové soustavy, a po ujištění správnosti polohy je odstraněn přebytečný vytlačený epoxid a proběhne jeho plné vytvrzení.

### 8.3 Sestava úhlového domku

Montáž sestavy úhlového domku začíná kompletací tyče řízení. Firmou Compotech byla dodána karbonová tyč o vnitřním průměru 29,5 mm, která je zkrácena na požadovaný rozměr. Při každém konci tyče jsou ve stěně vyvrtány 3 otvory pro nýty. Do konců hřídele je nanášeno dvousložkové lepidlo Loctite 9466 a je na jedné straně vsunuto horizontální kuželové kolo s nalisovaným ložiskem, a na druhé straně je vsunuta hřídel rychloupínacího mechanismu volantu. Oba kusy jsou vsunuty tak, že díry v dílech odpovídají dírám v karbonové tyči. Přebytečný epoxid je odstraněn a jsou instalovány nýty, jež zajišťují dodržení pravidla o kritických spojích [2 – str. 53]. Kuželové kolo na konci tyče je s ložiskem zasunuto do úhlového domku, a je orientačně zašroubována matice axiálního pojištění.

Na vertikální kolo je nalisováno ložisko SKF 61806, a je nasunuta distanční trubka, která byla dříve obrobena na požadovaný rozměr. Následně je nalisováno druhé ložisko. Vertikální kuželové kolo s ložisky je nalisováno do úhlového domku, a pomocí matic axiálního pojištění jsou vymezeny vůle v ozubení. Matice jsou dále pojištěny proti otočení pomocí stavěcích šroubů. (obr. 36)



obr. 36: Rozpad sestavy úhlového domku

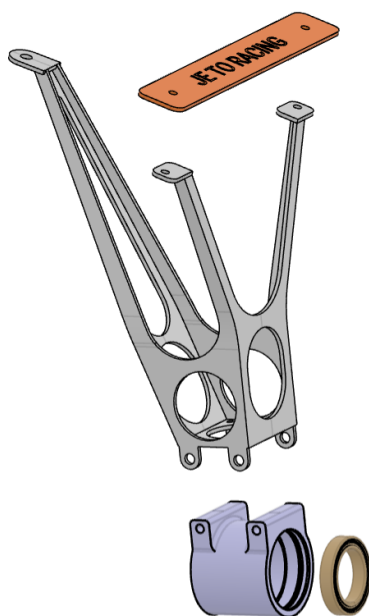


Po kompletaci je sestava úhlového domku vložena do monokoku. Rovnoboké drážkování vertikálnímu kuželovému kola je nasunuto na hřídel, a úhlový domek je přes prostřední díl zašroubován do hřebenového domku. Je letmo ověřena dosavadní funkčnost systému a následně jsou drátkovány dvojice šroubů. Tyč řízení je v horní části krátkodobě zajištěna proti pohybu.

#### 8.4 Horní uchycení tyče řízení

V případě horního uchycení jsou opět firmou Trumpf dodány laserem vyřezané ocelové plechy. Dva boční díly je nutné před svařením ohnout do požadovaného tvaru v místech. Pro jednoduchost ohýbání je mimo jiné optimalizován tvar, kdy při připevnění hlavní struktury dílu do svěráku a působení silou na konec plechu je maximalizován ohybový moment přímo v místě, kde je žádoucí ohyb provést. Ohýbání je opět prováděno v několika krocích, kde je průběžně kontrolována správnost ohybu s protikusem. Po ohybu bočních částí je možné svařit hlavní strukturu dílu. V horní části struktury jsou dále přivařeny malé výstupky, díky kterým je možné strukturu připevnit k monokoku.

Ke svařené struktuře horního uchycení je připevněn hliníkový díl uložení ložiska, a šrouby jsou zajištěny pomocí samojistných matic pro splnění pravidla o kritickém spojovacím materiálu [2 – str. 53], a do dílu je nalisováno ložisko a zajištěno pomocí pojistného kroužku. Sestava horního uchycení je následně nasunuta na tyč řízení, a je připevněna pomocí tří šroubů k horní části monokoku. Jako podložka je použita destička „JE TO RACING“, a šrouby jsou pro splnění pravidel zajištěny pomocí samojistných matic. (obr. 37)



obr. 37: Rozpad sestavy horního uchycení tyče řízení

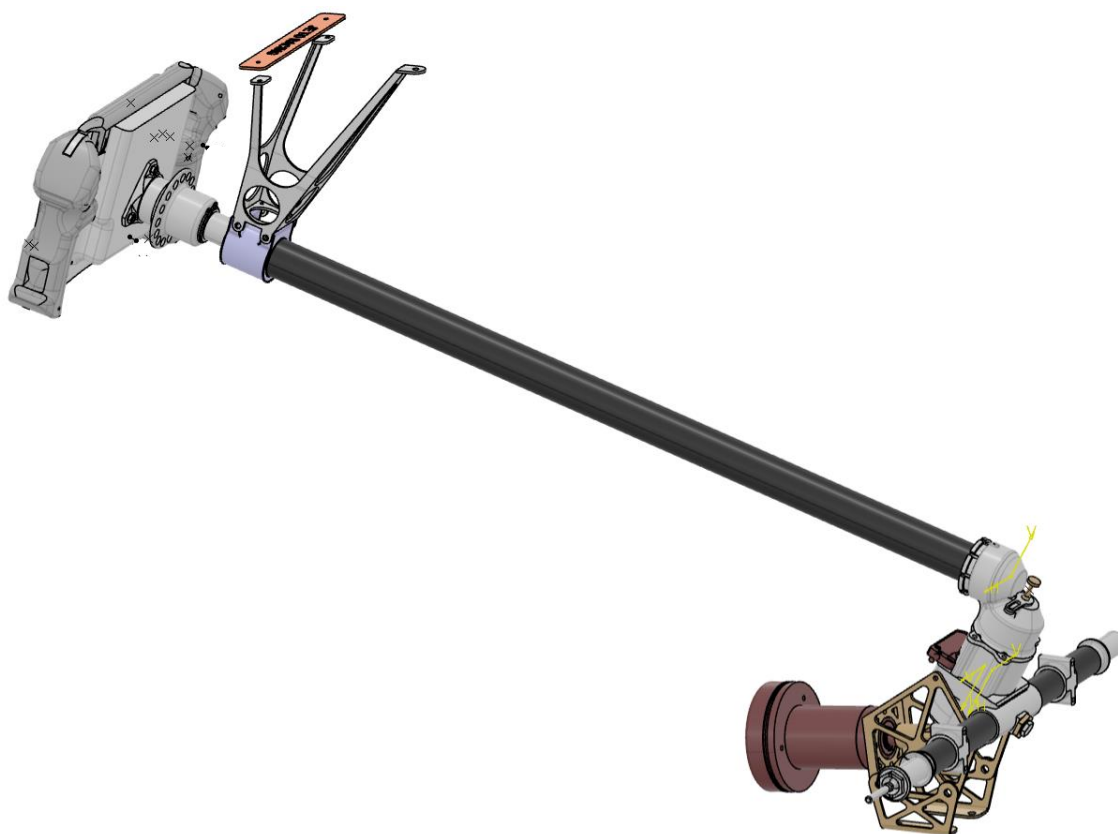


## 8.5 Finální příprava systému řízení

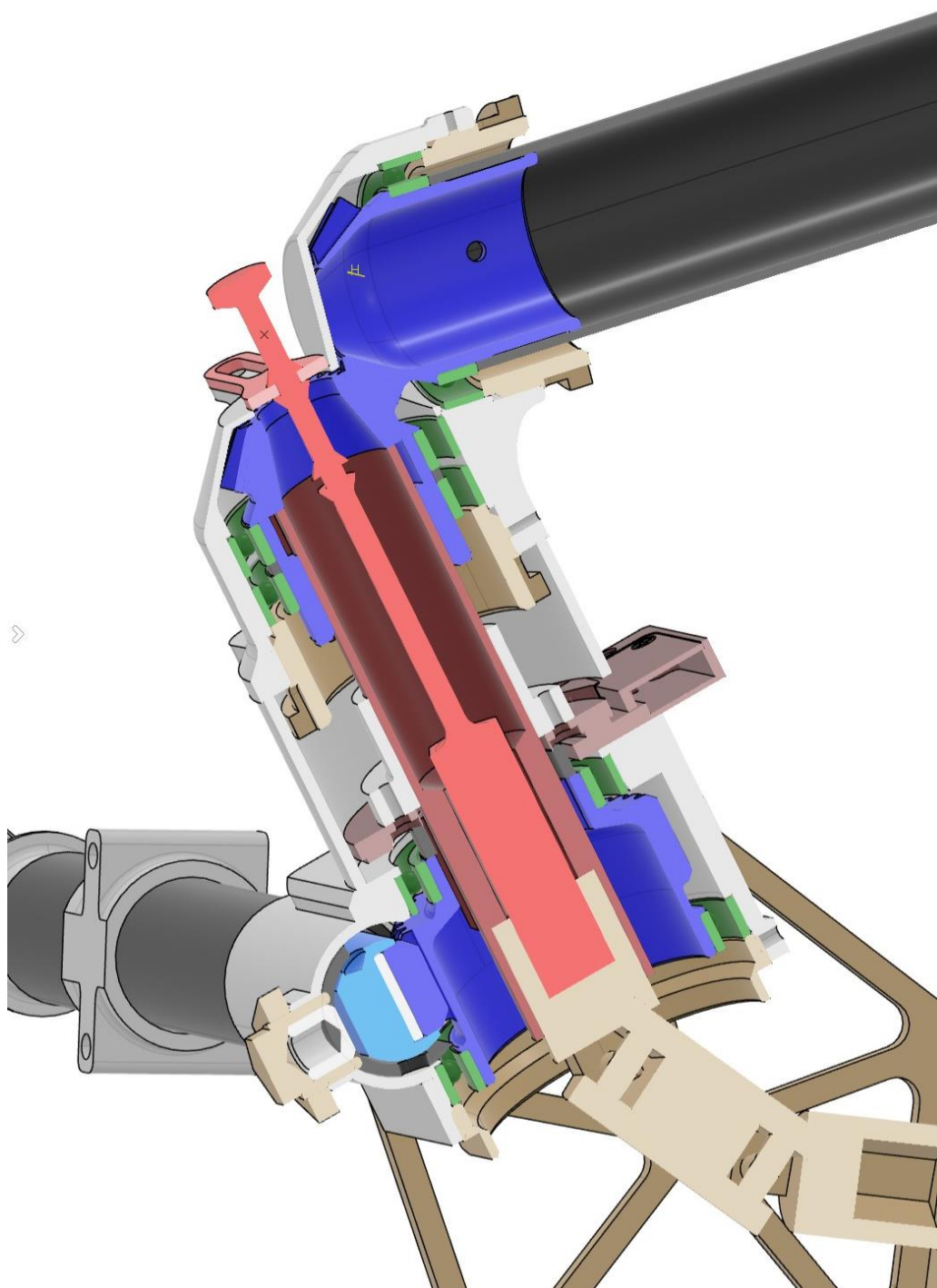
Pro dokončení systému je nutné napojení unašeče hřebenu na tyčky řízení, které spojují unašeč s předními těhlicemi. Do konce unašeče je vložena kruhová podložka a zadní opora kulového čepu. Následně je vložen samotný kulový čep a je přišroubováno pouzdro, které je dále zajištěno dvěma stavěcími šrouby. Kulový čep je poté zašroubován do tyčky řízení, a stejný postup opakován na druhé straně.

Ve hřebenovém domku je upraveno utažení šroubu, který vymezuje vůli v hřebenovém převodu. Skrze úhlový domek je zasunutý čep autonomního řízení a je pojištěn zámkem.

Po nasazení volantu je systém řízení kompletní. (obr. 38, obr. 39) Dalším krokem je testování funkčnosti celého systému bez zatížení, kdy jsou kola vozu ve vzduchu, a se zatížením, kdy formule stojí na kolech.



obr. 38: Kompletní systém řízení vozu eForce FSE.11



obr. 39: Řez kompletním hřebenovým a úhlovým domkem





## 9 Závěr

Cílem práce bylo vyvinout mechanicky funkční systém řízení s možností autonomního ovládní pro vůz eForce FSE.12, který díky pouze malé mezigenerační změně rozložení monopostu může vycházet z čistě pilotovaného systému předchozí generace. Nejdříve byly vyloženy a zváženy požadavky a limitace, které se na nadcházející systém vztahují. Pro správnou dimenzaci komponent byly dále změřeny síly působící na systém řízení při typické operaci a jízdě vozu, a také při nulové rychlosti, kde se potvrdila hypotéza, že dané síly jsou maximální právě u zastaveného vozu.

Jedním z nejdůležitějších rozhodnutí, které ovlivnilo celý vývoj systému, se týkalo umístění motoru a z něj vycházející koncepce přenosu výkonu. Navzdory konstrukční náročnosti jako nejlépe vyhovující vyšla koncepce nízko umístěného motoru a vysunutelného čepu, přístupného předním servisním okénkem monokoku. Dle požadavků byl vybrán adekvátní motor řízení s převodovkou, Kardanův kloub pro přenos točivého momentu a zcela odlišný senzor natočení řízení. Pro správnou funkci systému byly nutné výrazné změny většiny komponent, které byly provedeny s ohledem na odlišné možnosti připevnění a nedostatky původního systému. V poslední kapitole byl shrnutý postup samotné kompletace systému a montáže do monokoku nové formule FSE.12.

Jelikož se v dané konfiguraci jedná o systém první generace, byl při návrhu a konstrukci kladen důraz na spolehlivost a servisovatelnost, spíše než na hmotnost. Během nadcházející sezóny budou sbírána data a zkušenosti ohledně jednotlivých součástí systému tak, aby systém příští generace mohl být v příslušných místech optimalizován. Pro účely této sezóny by se však mělo jednat o adekvátní systém s dostatečným potenciálem.

Již teď jsou však patrné dvě oblasti, ve kterých má navržený systém řízení mírné nedostatky. První oblastí je uchycení vnějšího vodiče hřebenu řízení, které je sice konstrukčně jednodušší, ale nenabízí stejnou boční tuhost jako řešení minulé generace. Další oblastí je klec pro uchycení motoru řízení, která byla za účelem tuhosti vyrobena z 3 mm silné oceli, avšak ukázalo se, že byla výrazně předdimenzována a mohlo být v této oblasti ušetřeno více než 100 g.

Systém bude dále validován a testován během nadcházející závodní sezóny.



## 10 Seznam obrázků

obr. 1: Systém řízení FSE.11 .....	2
obr. 3: FSE.11 při testování v Milovicích .....	3
obr. 2: Zapojení tenzometrického snímače .....	3
obr. 4: Vizualizace možností umístění motoru řízení v bočním pohledu; zobrazena FSE.11 .....	6
obr. 5: Motor Kar Tek použitý v monopostu DV.01 [7] .....	8
obr. 6: Maxon EC 90 Flat [8].....	9
obr. 7: Maxon GP 52 C [9] .....	9
obr. 8: Prvotní náčrt konceptu odpojování posunem motoru (Zobrazena FSE.11) .....	10
obr. 9: Prvotní návrh odpojování motoru vysunutelným čepem (Zobrazena FSE.11) ..	11
obr. 10: Čep řízení (šedá) a jistící destička - zámek (červená) .....	12
obr. 11: Vlastní senzor natočení řízení v monopostu FSE.11 .....	13
obr. 12: Senzor RLS MHAD01_10 [13] .....	13
obr. 13: Umístění senzoru nad hřebenovým domkem .....	13
obr. 14: Úhlový domek monopostu FSE.12 .....	14
obr. 15: Úhlový domek monopostu FSE.11 .....	14
obr. 16: Hřebenový domek - zadní pohled .....	15
obr. 17: Umístění hřebenového domku, vymezení šroub (červená) .....	15
obr. 18: Díl pro připevnění úhlového a hřebenového domku .....	16
obr. 19: Umístění dílu v systému (šedá), poloha vůči senzoru natočení (červená).....	16
obr. 20: Připevnění sestavy motoru řízení (červená) pod úhlem .....	17
obr. 21: Klec pro připevnění motoru. Svařované zadní (červená) a boční (zelená) části, šroubované spodní části (modrá) .....	18
obr. 22: Vertikální spojovací hřídel předchozí generace FSE.11.....	19
obr. 23: Podélný řez umístění vertikální spojovací hřídele.....	19
obr. 24: Zámek (červená) čepu řízení (modrá) kryje otvor v úhlovém domku (šedá) ..	20
obr. 25: Vytahovatelný čep řízení .....	20
obr. 26: Průběh změny z pilotované na bezpilotní konfiguraci .....	21
obr. 27: Objímka (červená) a společné připevnění brzdového pedálu a řízení (modrá) .....	22
obr. 28: Hliníková konstrukce horního uchycení předchozí generace FSE.11 .....	23
obr. 29: Svařovaná ocelová podpora horního uchycení řízení a podložka „JE TO RACING“ .....	23
obr. 30: Uložení ložiska horního uchycení tyče řízení.....	24
obr. 31: Kompletně nový volant monopostu FSE.12 .....	24
obr. 32: Původní volant monopostu FSE.11 .....	24
obr. 33: Podélný řez hřebene, vymezení destičky a unašeče .....	25
obr. 34: Rozpad sestavy hřebene řízení.....	26
obr. 35: Rozpad sestavy klece motoru.....	27
obr. 36: Rozpad sestavy úhlového domku.....	28
obr. 37: Rozpad sestavy horního uchycení tyče řízení.....	29
obr. 38: Kompletní systém řízení vozu eForce FSE.11 .....	30
obr. 39: Řez kompletním hřebenovým a úhlovým domkem .....	31



## 11 Reference

- [1] eForce DV.01 [online]. 2020 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/en/dv-01-2020/>
  
- [2] Formula Student Rules 2023, version 1.1, Rev-44c3679 [online]. 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/rules/FS-Rules\\_2023\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf)
  
- [3] Load Cells & Force Sensors [online]. 2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/load-cells>
  
- [4] ŠPAČEK, Kryštof. *Princip a použití prstencových motorů v průmyslových aplikacích* [online]. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24879/F3-BP-2014-Spacek-Krystof-prace.pdf>
  
- [5] BIANCOLINI, M.E., C. BRUTTI, E. PENNASTRI a P.P. VALENTINI. Dynamic, mechanical efficiency, and fatigue analysis of the double Cardan homokinetic joint. *International Journal of Vehicle Design* [online]. 2003, **32**(3/4) [cit. 2023-05-11]. ISSN 0143-3369. Dostupné z: doi:10.1504/IJVD.2003.003559
  
- [6] SKF PHE UJMA20 Single universal joint coupling [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.skf.com/uk/productinfo/productid-PHE%20UJMA20>
  
- [7] Kar Tek 220 Watt 12 Volt Sand Rail, Dune Buggy, Baja Bug, Manx, Or UTV Universal Electric Power Steering Kit [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.kartek.com/parts/220-watt-12-volt-sand-rail-dune-buggy-baja-bug-manx-or-utv-universal-electric-power-steering-kit.html>
  
- [8] Maxon EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 220 W, with Hall sensors [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ecflat/ecflat90/607942>



- [9] Maxon Planetary Gearhead GP 52 C Ø52 mm, 4 - 30 Nm, Ceramic Version [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/gear/planetary/gp52/223089>
- [10] SKF PHE UJMB16 Double universal joint coupling [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.skfptp.com/CategoryDetails?productId=367427&languageId=1>
- [11] SKF PHE UJMB25 Double universal joint coupling [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.skfptp.com/CategoryDetails?productId=367429&languageId=1>
- [12] SKF PHE UJMB20 Double universal joint coupling [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.skfptp.com/CategoryDetails?productId=367428&languageId=1>
- [13] RLS MHAD01\_11 AksIM™ off-axis rotary absolute encoder [online]. 2019 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.rls.si/eng/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FMHAD01\\_11\\_EN\\_data\\_sheet.pdf](https://www.rls.si/eng/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FMHAD01_11_EN_data_sheet.pdf)
- [14] LOCTITE® EA 9466™ Technický list [online]. 2019 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-EA-9466-cs\\_CZ.pdf](https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-EA-9466-cs_CZ.pdf)
- [15] JABLONS Joshua. Wire EDM Cutting Pros and Cons [online]. 2018-2020 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://metalcutting.com/knowledge-center/wire-edm-cutting-pros-and-cons/>
- [16] Carbon fibre composites - OHS information sheet [online]. 2021 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.monash.edu/ohs/info-docs/chemical-management/carbon-fibre-composites-ohs-information-sheet>



- [17] SKF PCMF 202311.5 E PTFE composite flanged bushing [online]. [cit. 2023-05-17].  
Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCMF%20202311.5%20E>