



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# NÁVRH A ZÁSTAVBA AKTIVNÍCH ČLENŮ DO ŘÍZENÍ LETOUNU

HAPTIC FEEDBACK DEVICE DESIGN FOR AIRCRAFT CONTROL

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Dubnický

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Bc. Lukáš Dubnický**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Stavba letadel  
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh a zástavba aktivních členů do řízení letounu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhovaný systém bude zprostředkovávat haptickou zpětnou vazbu pilotovi, a tak varovat před přiblížením do nebezpečného režimu, případně informovat o neekonomickém způsobu pilotáže. Aktivní členy zpětné vazby budou realizovány jako nástavce na řídicí páku a pedály směrového řízení. Na základě funkčních vzorků testovaných na leteckém simulátoru budou navrženy aktivní členy pro zpětnou vazbu pro zvolený typ letounu. Bude stanoveno zatížení prvků, jejich konstrukce a zástavba.

### Cíle diplomové práce:

Návrh aktivních nástavců na pedály a řídicí páku vybraného typu letounu.  
Stanovení zatížení, pevnostní kontrola navrženého řešení.

### Seznam doporučené literatury:

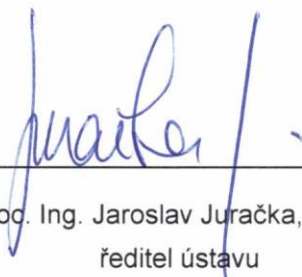
LETECKÁ AMATÉRSKÁ ASOCIACE ČR. UL2-I. Část: Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. 2002.

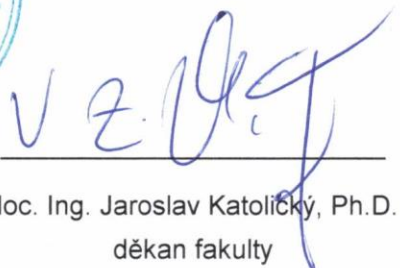
HATZFELD, Christian; KERN, Thorsten A. Engineering Haptic Devices. Springer London Limited, 2016.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 29. 10. 2018



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem nástavců pro řídicí páku a pedály. Nástavce jsou vybaveny aktivními členy, které poskytují haptickou zpětnou vazbu pilotovi letounu. Předkládaný návrh má za cíl umožnit prototypovou zástavbu pro provedení experimentů s haptickou zpětnou vazbou na vybraném typu letounu. Dále má ověřit použitá konstrukční řešení pro další vývojové verze, které mohou směřovat až k certifikaci celého navrhovaného systému haptické zpětné vazby pro letadla všeobecného letectví. Nástavce jsou vývojovým nástupcem varianty, která sloužila pro experimenty na letovém simulátoru. Návrh nástavců je proveden podle požadavků plynoucích z předpisů a výsledků předchozích experimentů. Tato diplomová práce popisuje konstrukční návrh od shromáždění požadavků po pevnostní zkoušku součástí zhotovených 3D tiskem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Haptická zpětná vazba, hmatová zpětná vazba, aktivní členy, řídicí páka, pedály, řídicí soustava letounu

## ABSTRACT

This master thesis is focused on design of control stick grip and rudder pedals extension. These components are equipped with active elements, which provide pilot with haptic feedback. The purpose of the introduced design is to allow prototype to be built into the aeroplane so that the proposed concept of haptic feedback can be tested onboard. It shall verify used technical solutions as well to allow for their application on following development stages that aim at certification of the proposed haptic feedback system to be used in general aviation aeroplanes. The designed components are the successors of prototypes used for experiments carried on flight simulator. The design process follows the requirements of legislation and outcomes of the previous experiments. This thesis follows the design process from setting of the design requirements to mechanical test of 3D printed prototypes.

## KEYWORDS

Haptic feedback, tactile feedback, active elements, control stick, rudder pedals, aircraft flight control system

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DUBNICKÝ, L. *Návrh a zástavba aktivních členů do řízení letounu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2019. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Zikmund, Ph.D. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117432>.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Zikmunda, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Lukáš Dubnický

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Pavlu Zikmundovi za cenné rady a připomínky, které přispěly ke zkvalitnění práce. Dále děkuji Ing. Miroslavu Červenkoví a Ing. Jiřímu Matějů za rady a čas, který věnovali konzultacím ať už této práce, nebo projektu haptické odezvy.



## OBSAH

Úvod .....	11
1 Zařazení práce v rámci řešeného projektu .....	12
2 Současné použití haptické odezvy v letadlech .....	13
3 Navrhovaný koncept haptické zpětné vazby .....	14
4 Konstrukce prototypů pro ověření na simulátoru .....	15
4.1 Řídicí páka .....	15
4.2 Technický popis současného nástavce řídicí páky.....	15
4.3 Pedály.....	16
4.4 Technický popis současného nástavce pedálů nožního řízení .....	17
5 Software pro ověření konceptu na simulátoru .....	18
6 Experiment prováděný na simulátoru.....	19
6.1 Zařazení v projektu .....	19
6.2 Popis experimentu.....	19
6.2.1 Část A .....	19
6.2.2 Část B .....	20
6.3 Vybrané výsledky experimentu .....	21
7 Zatížení navrhovaných nástavců .....	22
7.1 Nástavec řídicí páky.....	22
7.1.1 Zatížení od řídicích sil .....	22
7.1.2 Zatížení od sevření řídicí páky pilotem .....	22
7.2 Nástavce pedálů .....	23
8 Konstrukční úpravy prototypů.....	24
8.1 Požadavky na nástavec řídicí páky .....	24
8.2 Požadavky na nástavce pedálů.....	25
9 Nástavec řídicí páky .....	26
9.1 Konstrukční návrh nástavce řídicí páky.....	26
9.1.1 Celkové uspořádání .....	26
9.1.2 Ochrana před přetížením servomotorů .....	27
9.1.3 Hlavice řídicí páky.....	28
9.1.4 Aktivní člen .....	29
9.1.5 Referenční člen .....	29
9.2 Přenos sil v táhlovém mechanismu, volba magnetu a zkrutné pružiny .....	30
9.2.1 Situace 1 .....	32
9.2.2 Situace 2 .....	35
9.3 Volba vůlí táhel aktivního členu .....	36

9.4	Technický popis nástavce řídicí páky .....	36
9.4.1	Madlo .....	36
9.4.2	Ukotvení servomotorů.....	37
9.4.3	Pákový mechanismus .....	37
9.4.4	Kryty servomotorů .....	38
9.4.5	Hlavice .....	39
9.4.6	Kryt drážek.....	39
9.4.7	Kloubová spojení táhel.....	39
9.4.8	Uchycení nástavce řídicí páky .....	40
9.4.9	Spojovací materiál.....	41
10	Nástavce pedálů .....	42
10.1	Konstrukční návrh nástavců pedálů.....	42
10.2	Technický popis nástavců pedálů .....	42
11	Pevnostní kontrola.....	44
11.1	Kontrola táhla .....	44
11.2	Kontrola madla na smyk.....	44
12	Testovací 3D výtisk .....	46
13	Zkouška pro ověření pevnosti a deformací .....	47
13.1	Nástavec řídicí páky .....	47
13.1.1	Uspořádání zkoušky.....	47
13.1.2	Postup zatěžování.....	47
13.2	Nástavec pedálů .....	48
13.2.1	Uspořádání zkoušky.....	48
13.2.2	Postup zatěžování.....	49
13.3	Vyhodnocení zkoušky .....	49
14	Postup montáže nástavce řídicí páky .....	50
	Závěr .....	53
	Použité informační zdroje .....	54
	Seznam obrázků .....	56
	Seznam použitých zkratk .....	57
	Seznam příloh .....	58

## ÚVOD

Haptická informace je informace předávaná hmatem, tedy taktilním kontaktem. Taktilní kontakt pak může poskytovat informaci o tlaku, teplotě, vnímání bolesti nebo vibrací. Kombinací kontaktů nebo jejich změnou v čase jsme pak schopni získat složitější informace jako jsou struktura povrchu, tvar objektu nebo jeho konzistence. Haptickým vjemem se řídíme téměř neustále aniž bychom tomu věnovali zvláštní pozornost.

V současnosti řešený projekt Haptická odezva pro asistenční systémy zvyšující bezpečnost v letectví si klade za cíl návrh a experimentální ověření systému, který bude s použitím těchto principů pomáhat pilotovi při provádění jeho úkolů. Použití předání informace haptickou cestou je vedeno snahou odlehčit vytíženému zrakovému a sluchovému vjemu pilota. [1]

Z výše jmenovaných druhů haptické odezvy jsou již v současnosti některé přístupy v letounech používány. Pilot získává zpětnou vazbu ze sil v řídicích prvcích nebo z jejich vibrací. Ty mohou být buďto přirozeným chováním letounu, nebo mohou být do soustavy řízení uměle zavedeny, pokud letoun tyto projevy z nejrůznějších důvodů postrádá – umělý cit. Řešený projekt zakládá na podobných principech, avšak přichází s novým konceptem použití haptické zpětné vazby. Navíc spolu s použitím informací o tlaku a vibracích pracuje i s komplexnější informací o tvaru.

Úkolem řešeným v této práci je především návrh zdokonalené vývojové verze nástavce řídicí páky a pedálů směrového řízení s aktivními členy, které poskytnou dobrou platformu pro další výzkum haptické odezvy a umožní experimentální zástavbu do letounu pro ověření řešeného konceptu haptické odezvy v reálných podmínkách skutečného letounu.

## **1 ZAŘAZENÍ PRÁCE V RÁMCI ŘEŠENÉHO PROJEKTU**

Předmětem projektu je experimentální vývoj systému pro haptickou odezvu, který bude zvyšovat bezpečnost letu malých letadel a zároveň snižovat zatížení pozornosti pilota věnované řízení letounu. Klíčovým obsahem řešení projektu bude návrh aktivních členů řízení pro řídicí páku a pedály a ověření jejich přínosu na letovém simulátoru. [2]

Po provedení experimentů na letovém simulátoru je dalším vývojovým krokem možnost realizace základního ověření konceptu ve skutečném letounu. Jako letoun, pro který má být zhotoven návrh pro experimentální zástavbu, byl zvolen WT-9 Dynamic. Letoun je ve vlastnictví letecké školy VUT a představuje typický stroj předpokládané cílové kategorie pro navrhovaný systém haptické odezvy.

## 2 SOUČASNÉ POUŽITÍ HAPTICKÉ ODEZVY V LETADLECH

Samotné užití haptické odezvy v letadlech není novým přístupem. Použití shakerů na pákách a volantech ručního řízení je hojně rozšířeno a slouží společně s akustickým signálem k varování před blížícím se dosažením kritického úhlu náběhu pomocí vibrací. Toto užití vychází z běžné odezvy letounů, kdy proudění blízké kritickému úhlu náběhu vyvoluje vibrace v řídicí soustavě, a je tak chápáno jako intuitivní předání informace pilotovy v těch případech, kdy u konkrétního typu letounu není upozornění přirozenými vibracemi v řídicí soustavě letounu dostatečně intenzivní. Typicky pak u letounů se systémem fly-by-wire, kde neexistuje přímé mechanické propojení řídicích ploch a řídicí páky.

Méně rozšířené pro účely varování je užití vibrací na pedálech nožního řízení. Bylo použito u letounu A-7 Corsair II, u kterého se při přiblížení kritickému úhlu náběhu aktivovaly vibrace pravého pedálu s frekvencí cca 25 Hz. [3] Stejná funkce, opět pouze na pravém pedálu, se nachází už na letounu staršího data FJ-3 Fury. [4] Dalším letounem byl F11F Tiger, u kterého byly opět vibrace pedálů použity k varování před dosažením kritického úhlu náběhu. Systém však byl aktivní pouze s vysunutými přistávacími klapkami a deaktivován na zemi. Manuál však neuvádí, zda se jednalo o vibrace jednoho nebo obou pedálů. [5] Obdobný systém lze najít ještě na letounu F-111E. [6]

### 3 NAVRHOVANÝ KONCEPT HAPTICKÉ ZPĚTNÉ VAZBY

Systém haptické zpětné vazby navrhovaný v rámci projektu Haptická odezva pro asistenční systémy zvyšující bezpečnost v letectví má pilotovi poskytovat informaci o úhlu náběhu a úhlu vybočení letounu. Informace o úhlu náběhu má být pilotovi předávána nejen před dosažení kritického úhlu náběhu, ale spojitě od malých úhlů náběhu až po kritický. V blízkosti kritického úhlu náběhu pak bude pilotovi zprostředkovávat vjem odtrhávání proudění na křídle.

Podle zprávy Analýza nehod pro využití systému haptické odezvy [7] je jedna z hlavních příčin leteckých nehod ve sledovaném období chybná pilotáž. Pády letadel do počínajících nebo plně rozvinutých vývrtek tvoří ve sledovaném období osm případů, což je 15,7 % ze všech zkoumaných LN, z toho v šesti z těchto nehod došlo ke smrtelným zraněním. Lze říct, že pád byl příčinou smrtelné nehody v 66 % případů. Navrhovaný koncept haptické zpětné vazby pro pilota tedy míří z pohledu úmrtí při nehodách malých letadel a kluzáku ve sledovaném období na většinovou příčinu smrtelných nehod.

Předpokládá se realizace pomocí vibračních, nebo plynule se pohybujících členů, z nichž bude pilot dostávat informaci hmatem na ruku nebo chodidlech. Proto je prováděna experimentální zástavba do joysticků a pedálů nožního řízení. Předpokládá se, že způsob provedení varování, bude, pokud možno takový, aby současně naváděl pilota ke správné reakci, která mu pomůže opustit nebezpečný režim letu. [8] Vedle informace o úhlu náběhu má být pilotovi předávána také informace o úhlu vybočení. Let s neúmyslným vybočením je obecně nežádoucí kvůli zvýšenému aerodynamickému odporu, a tedy neekonomičnosti letu, a kvůli zvýšenému riziku pádu do vývrtky zejména při výkluzové zatáčce. [9]

Úhel náběhu a úhel vybočení budou snímány pomocí korouhviček. Data budou zpracována samostatným mikrokontrolerem. Podle zpracovaných dat pak budou aktivovány a řízeny funkce haptických prvků. Bližší rozpracování koncepčního řešení systému pro různá stadia vývoje je součástí související diplomové práce Systém pro haptickou odezvu a jeho spolehlivost. [10]

Mezi zjištěnými riziky takto navrhovaného systému varování/navádění pilota jsou především následující:

- Problematické rozlišení vibrační odezvy od vibrací letounu
- Neintuitivní nebo nejednoznačné směrové vedení vibracemi
- Otupení pilotova vnímání vibrací
- Reakční čas člověka a rozběh vibrací při rychlých změnách režimu letu [8]

Systém navíc předpokládá správné umístění ruky na řídicí pance a nohou na pedálech.

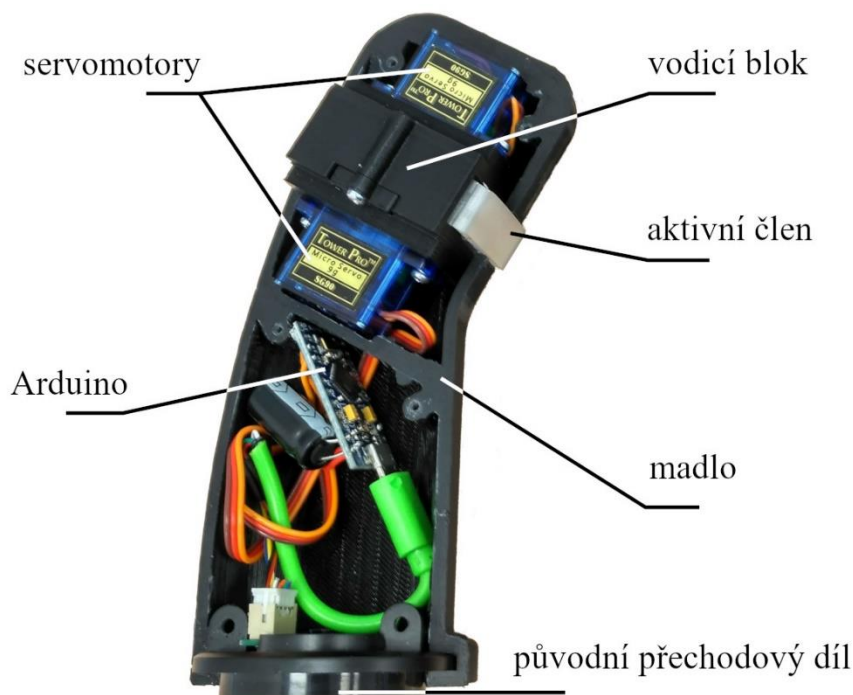
## 4 KONSTRUKCE PROTOTYPŮ PRO OVĚŘENÍ NA SIMULÁTORU

V této kapitole popisované konstrukce nástavců řídicí páky a pedálů nožního řízení byly zhotoveny pro uchycení na herní ovladače pro letecký simulátor. Protože experimentální ověření prototypů probíhá na leteckém simulátoru. Nástavec řídicí páky je uchycován k základně joysticku Mad Catz Pacific AV8R, nástavce pro pedály nožního řízení jsou zhotoveny pro uchycení k pedálům od Petra Šťastného. Více na stránkách výrobce [11].

### 4.1 ŘÍDICÍ PÁKA

Návrh aktivní řídicí páky proběhl postupně ve dvou fázích. První spočívala v návrhu madla joysticku se čtyřmi vibračními motorky do směrů vpřed, vzad, vpravo a vlevo. Vzhledem k závislosti vnímání odezvy na způsobu úchopu bylo od vibrací upuštěno. Druhá fáze návrhu aktivní řídicí páky byla směřována na možnost předávání informace změnou tvaru rukojeti. Tato změna tvaru byla realizována výsuvným členem, kterým pohybují dva servomotory umístěné v rukojeti. Souhlasným vysouváním členu lze zprostředkovávat úhel náběhu a nesymetrickým vysouváním členu je indikován úhel vybočení letounu. [12] Tento prototyp byl zhotoven Ing. Miroslavem Macíkem, Ph.D.

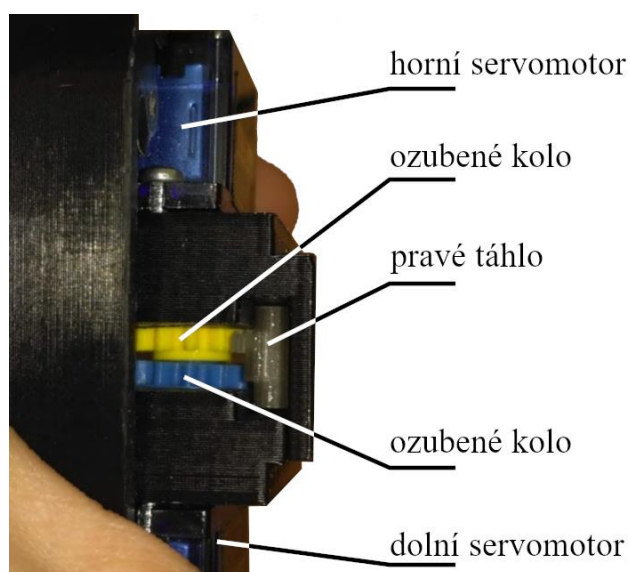
### 4.2 TECHNICKÝ POPIS SOUČASNÉHO NÁSTAVCE ŘÍDICÍ PÁKY



Obrázek 1: Vnitřní uspořádání současného nástavce ŘP

Mechanická část nástavce řídicí páky se skládá z madla, vodícího bloku, aktivního členu, 2 servomotorů a 2 ozubených kol. Vnitřní uspořádání je prezentováno na obrázku 1. Madlo je rozděleno svisle na 2 poloviny, pravou a levou, v sestaveném stavu jsou k sobě sešroubovány 6 vruty. Madlo je nosným prvkem celého nástavce, jeho vnitřní prostor je žebrem dělen na horní a dolní část. V horní části je vložen vodící blok. K tomuto vodícímu bloku jsou přišroubovány servomotory. Jeden servomotor je upevněn svrchu druhý zespodu a jsou orientována výstupními hřídelemi proti sobě. Vodící člen obsahuje 2 drážky pro aktivní člen. Aktivní člen má pravé a levé táhlo s ozubeným hřebenem, tato táhla jsou zasunuta do drážek

vodicího bloku. Na výstupních hřídelích servomotorů jsou osazena ozubená kola, ta zapadají každé do jednoho z ozubených hřebenů aktivního členu. Pohybové ústrojí je znázorněno na obrázku 2. Horní servo pohání hřebenovým převodem pravé táhlo, Dolní servo pohání hřebenovým převodem levé táhlo. Otáčením serva dochází k pohybu dané strany aktivního členu. Pracují-li serva ve stejném smyslu, člen se rovnoměrně vysouvá nebo zasouvá. Pokud serva pracují v opačném smyslu, mění sklon lišty aktivního členu. Řízení serv obstarává skript v programu Matlab pomocí mikrokontroléru Arduino. Ten je umístěn v dolní části madla. Aktivní člen je pohybem serv schopen dosáhnout vůči čelní hraně madla zasunutí cca 5 mm, vysunutí cca 5 mm a rozdílu mezi madly až 8 mm což odpovídá sklonu čelní lišty aktivního členu 22 °.



Obrázek 2: Pohybové ústrojí současného nástavce ŘP

Upevnění na základnu joysticku je provedeno pomocí dílu z původního průmyslového provedení joysticku, který je zastavěn a uchycen mezi obě poloviny madla viz obr. 1. Mechanické součásti jsou zhotoveny pomocí 3D tisku z PLA (Polylactic Acid).

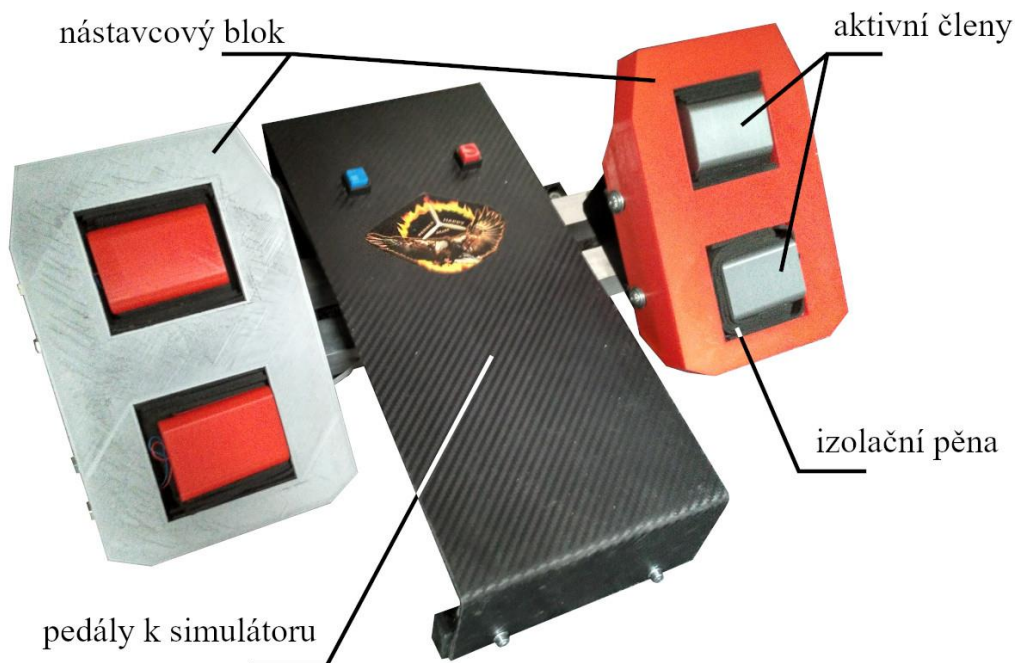
### 4.3 PEDÁLY

Stejně jako u řídicí páky vznikly postupně dvě verze nástavců na pedály. Obě verze pracují s vibračními členy. Na prvních prototypch aktivních prvků řízení byly provedeny základní experimenty mimo simulátor, při kterých se ověřovaly reakce lidí na haptickou odezvu. Experimenty zatím směřovaly k intuitivní reakci na vibrační signál bez napojení na letecký simulátor. Autory této první konstrukce nástavců na pedály jsou Vaidas Jazdauskas a Ing. Pavel Zikmund, Ph.D. [8] Druhá verze nástavců je lépe izolovaná, aby se zabránilo šíření vibrací z levého pedálu na pravý a naopak. [12] To se po provedení prvních experimentů mimo simulátor ukázalo jako hlavní konstrukční nedostatek. Zvolené řešení druhé verze nástavců pedálů proto obsahuje samostatně izolované vibrační členy. Aby se omezil vliv položení chodidla na pedál, jsou na každém pedálu umístěny dva vibrační členy po délce pedálu. Pilot tak cítí vibrace i v případě, kdy má na pedálu položenou pouze špičku nohy a patou je opřen o podlahu. Autorkou tohoto konstrukčního řešení je Bc. Michaela Horpatzká.



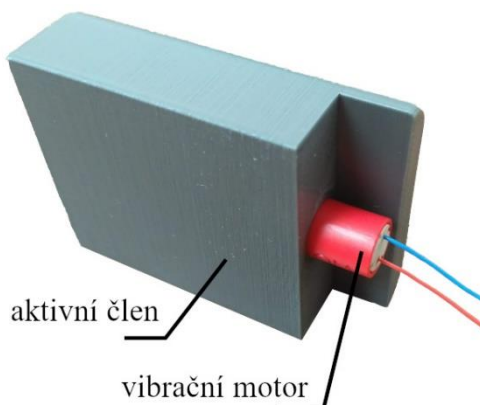
#### 4.4 TECHNICKÝ POPIS SOUČASNÉHO NÁSTAVCE PEDÁLŮ NOŽNÍHO ŘÍZENÍ

Provedení pedálů nožního řízení použité pro zkoušku na simulátoru je uzpůsobeno k montáži na plochu pedálu. Nástavce na pedály jsou zrcadlově symetrické pro levý a pravý pedál. Nástavec se skládá z nastavcového bloku, 2 vibračních členů, 2 vibračních motorků a izolačního materiálu, viz obrázek 3. Nástavcový blok je půdorysným tvarem uzpůsoben pedálu, na který je navržen. Po obou bocích má přesahy s otvory pro upevnění k samotnému pedálu nožního řízení. V ploše nastavcového bloku jsou 2 obdélníkové otvory pro vibrační členy, umístěny za sebou po délce nastavcového bloku.



Obrázek 3: Současná podoba pedálů s nástavci

Vibrační členy jsou přibližně kvádrového tvaru a obsahují každý po 1 vibračním motoru, který je zasunut ve válcovém horizontálním otvoru, viz obrázek 4. Kabeláž elektromotorů je vedena z aktivních členů ke zdírkám v nastavcovém bloku. Aktivní členy jsou v otvorech nastavcového bloku obloženy z 5 stran mikroporézní pryží, aby se omezilo šíření vibrací z nástavců pedálů.



Obrázek 4: Aktivní člen s vibračním motorem

## 5 SOFTWARE PRO OVĚŘENÍ KONCEPTU NA SIMULÁTORU

Software prvotního návrhu je tvořen simulátorem X-Plane 11 a programem Matlab, ve kterém se spouští skripty pro funkce varovacího systému. Skripty pro Matlab jsou vytvořeny přímo pro potřeby projektu, jsem jejich autorem. Simulátor X-Plane 11 je spuštěn na stolním PC, Matlab na notebooku. Simulátor pomocí UDP posílá vybraná letová data, Matlab je pomocí Instrument Control Toolboxu přijímá a spouštěný skript je zpracovává. Podle zpracovaných letových údajů následně pomocí 2 jednodeskových počítačů Arduino pohybuje s lištou na joysticku a spíná vibrace na pedálech. [8]

Toto prvotní řešení bylo později upraveno, aby nebylo nutné použít Instrument Control Toolbox, protože licence pro tento toolbox jsou k dispozici pouze 2 pro celé VUT a dostupnost se ukázala být velmi omezená. Současné řešení proto vkládá mezi simulátor a Matlab datový předavač (autorem je Ing. Miroslav Červenka), který přijímá data ze simulátoru v protokolu UDP a Matlabu je zpřístupňuje v protokolu TCP, pro který jsou k dispozici funkce již v základním Matlabu bez nutnosti použití dalších toolboxů. Posílání dat z Matlabu do simulátoru pak probíhá v obráceném pořadí, tedy nejprve v protokolu TCP do předavače a následně v protokolu UDP z předavače do simulátoru.

Lišta na joysticku se vysouvá v zadaném rozsahu vysunutí, podle aktuálního úhlu náběhu. Současně se může v zadaném rozsahu naklápět podle aktuálního úhlu vybočení. Pedály vibrují podle velikosti úhlu vybočení ve 2 různých módech vibrací, které se liší délkou pulzu. Vibruje vždy ten pedál, jehož sešlápnutí vyrovnává výchylku. Změny módů vibrací, jejich spouštění a vypínání jsou závislé na nastavení spouštěcích křivek a filtrů. Všechny 3 popsané funkce lze aktivovat nezávisle na sobě, navíc se aktivují a deaktivují s odpoutáním a dosednutím letounu na dráhu. [8]

## 6 EXPERIMENT PROVÁDĚNÝ NA SIMULÁTORU

Tato kapitola čerpá z interní zprávy LÚ Experimentální ověření prvků haptické odezvy na leteckém simulátoru, které jsem spoluautor. [13] Cílem experimentů na simulátoru bylo ověření funkce aktivních členů v řízení a získání poznatků pro vylepšení systému a pro návrh aktivních členů pro letové zkoušky.

### 6.1 ZAŘAZENÍ V PROJEKTU

Protože součástí projektu je ověření předkládaného návrhu haptické zpětné vazby v letovém simulátoru, byl navržen experiment. Ten měl potvrdit nebo vyvrátit hypotézu: Účastníci experimentu budou dosahovat menšího vybočení při letu se zapnutými haptickými prvky než při letu bez těchto prvků.

Dále se očekávalo, že při letech s aktivní haptickou zpětnou vazbou budou piloti hodnotit svou pracovní zátěž jako nižší než při letech bez této zpětné vazby. V případě krizové situace se očekávalo lepší zvládnutí situace těmi účastníky, kteří budou mít k dispozici haptickou zpětnou vazbu o úhlu náběhu oproti účastníkům bez této zpětné vazby. Úspěšné zvládnutí situace znamená, že se účastníkovi podaří přistát na letišti nebo blízké volné ploše bez poškození či zničení letounu a bez kolize s překážkami na zemi.

### 6.2 POPIS EXPERIMENTU

Před samotným experimentem byl účastníkům poskytnut čas na seznámení se simulátorem. Účastníci si vyzkoušeli ovládání letounu v prostředí simulátoru, jeho letové vlastnosti a výkony, případně i pádové vlastnosti. Současně dostali prostor seznámit se s rozhlížením pomocí pohybů hlavy. K dispozici byla i tréninková trať s brankami.

Samotný experiment pro ověření prvků haptické odezvy na leteckém simulátoru se skládal ze 2 částí. Pro účely sbírání zpětné vazby byl připraven online dotazník s otázkami. Jeho vyplňování probíhalo postupně v průběhu experimentu podle naplánovaného postupu. Během měřených letů byla v simulátoru zaznamenávána letová data pro další zpracování.

#### 6.2.1 ČÁST A

V první části bylo cílem zjistit vliv prvků haptické odezvy na pilotní výkon. Za tím účelem byla navržena trať, která měla charakter slalomu ve výšce 40–80 m nad zemí a v simulátoru byla umístěna na Novomlýnské nádrže. Účastníci experimentu tuto trať prolétali 3x, vždy s jinou zkoušenou variantou. Zkoušené varianty byly:

- a) let bez haptických prvků
- b) let se signalizací úhlu náběhu a úhlu vybočení na joysticku (pedály neaktivní)
- c) let se signalizací úhlu náběhu na joysticku a úhlu vybočení na pedálech (lišta joysticku se nenaklápí)

V celém souboru měřených dat bylo potřeba pokud možno zcela eliminovat vliv postupného zlepšování pilotního výkonu vlivem opakovaného prolétávání stejné tratě, aby zůstal pouze vliv zkoušených haptických prvků. Proto bylo stanoveno 6 kombinací, vždy s jiným pořadím variant popsanych výše podle teorie latinského čtverce. Kombinace byly:

- 1-2-3 (a-b-c)
- 1-3-2 (a-c-b)
- 2-1-3 (b-a-c)
- 2-3-1 (b-c-a)
- 3-1-2 (c-a-b)
- 3-2-1 (c-b-a)

Kombinace byly rozděleny mezi 12 účastníků, vždy 2 účastníci letěli stejnou kombinací.



Obrázek 5: Pohled z letounu na trať (simulátor)

Protože navrhovaný systém zpětné vazby představuje hlavní přínos v režimech letu s vyšším úhlem náběhu, než je typický pro cestovní rychlost, bylo rozhodnuto úkolovat účastníky k prolétávání tratě při rychlosti 65–70 kt. To představovalo v kombinaci s letem v malé výšce, vysokou hmotností letounu (blízka MTOW) a nutností prolétávat vytyčenou trať požadovanou pracovní zátěž. V případě sníženého soustředění účastníka experimentu a poklesu rychlosti na cca 60 kt (např. v důsledku ostré zatáčky) bylo možné se snadno dostat na kritický úhel náběhu.

## 6.2.2 ČÁST B

V druhé části experimentu bylo cílem zjistit použitelnost systému v krizové situaci. Úkolem účastníků bylo provést vzlet z letiště, pokračovat pravou zatáčkou a stoupat do stanovené výšky. Bylo jim řečeno, že další instrukce dostanou až po dosažení stanovené výšky. O krizové situaci nebyly informováni. Po vzletu ve výšce přibližně 150 m nad úrovní letiště dojde k selhání pohonné jednotky. Celá situace byla naplánována tak, aby bylo možné provést

při správném reakci návrat na VPD letiště. Polovina účastníků letěla tento let s aktivními haptickými prvky, druhá polovina s neaktivními.

### 6.3 VYBRANÉ VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Vyhodnocení experimentu sestává z vyhodnocení subjektivních názorů účastníků experimentu, které byly zachyceny v dotaznících a z vyhodnocení letových dat ze simulátoru. Pro účely této diplomové práce jsou stěžejní subjektivní hodnocení účastníků a omezíme se proto na ně. Kvantitativní výsledky budou publikovány v odborném časopise.

Vybraná zjištění subjektivních hodnocení jsou:

Člověk je schopen lépe zaznamenat probíhající změnu tvaru než pouze absolutní výsledek změny.

Rozpoznání přítomnosti hrany (schodku) na tělese, je z hlediska hmatu spolehlivější než stanovení míry vysunutí aktivního členu.

Stanovení míry vysunutí aktivního členu je navíc nepřesné i proto, že chybí reference pro zcela vysunutou polohu, která odpovídá kritickému úhlu náběhu. Účastníci postrádali možnost zjistit, jaká je zbytková rezerva.

Účastníci experimentu měli tendenci opírat se rukou o základnu joysticku a správné držení madla pro ně bylo nepohodlné.

## 7 ZATÍŽENÍ NAVRHOVANÝCH NÁSTAVCŮ

### 7.1 NÁSTAVEC ŘÍDICÍ PÁKY

Zatížení nástavce lze rozdělit na zatížení nástavce samotného, vycházející z jeho uchycení k řídicí páce a zatížení haptických prvků. Zatížení nástavce samotného je dáno nutností přenést řídicí síly z nástavce na řídicí páku v rozsahu požadovaném předpisy. Zatížení haptických prvků vzniká od sevření řídicí páky pilotem. Je třeba jej brát v úvahu s ohledem na možnosti servomotorů pohánějících aktivní člen. Vzhledem k umístění výsuvného tělesa na nástavci řídicí páky lze uvažovat také možnost, kdy pilot přitahuje řídicí páku k sobě čistě přes výsuvný člen. V tom případě působí na výsuvný člen stejná síla, kterou budeme uvažovat pro zatížení od řídicích sil.

Síly uváděné v následujících podkapitolách jsou síly požadované předpisy na dimenzování řídicích prvků, jedná se o provozní zatížení.

#### 7.1.1 ZATÍŽENÍ OD ŘÍDICÍCH SIL

Vychází z požadavků předpisů pro jednotlivé kategorie letounů na limitní řídicí síly a momenty. Jak pro ruční, tak pro nožní řízení byly zjištěny požadavky předpisů, a to pro kategorie letounů ULL, LSA, VLA a CS-23.

Předpis EASA CS-23 (amdt 4) hlava C odstavec 23.397 b) požaduje maximální sílu 298 N pro příčný pohyb páky (klonění) pro letouny do 2268 kg. Pro podélný pohyb páky (klopení) je pak požadována maximální síla 743 N pro letouny do 2268 kg. Přitom tyto předepsané síly se pak musí lineárně zvýšit až na 1,18násobek při návrhové hmotnosti 5670 kg a pro kategorii commuter pak musí být zvýšeny až na 1,35násobek při návrhové hmotnosti 8618 kg. [14]

Předpis EASA CS-VLA (amdt 1) část C odstavec 397 b) požaduje maximální sílu pro příčný pohyb 300 N a pro podélný pohyb 740 N. [15]

Předpis EASA CS-LSA (amdt 1) odkazuje v podčásti B na normu ASTM F2245-12d, která požaduje v odstavci 5.3.3.2 maximální sílu pro příčný pohyb páky (klonění) 180 N a v odstavci 5.3.3.1 maximální sílu pro podélný pohyb páky (klopení) 445 N. [16] [17]

Pro kategorii ULL byl použit předpis LAA UL-2, ten v kapitole C – pevnost požaduje zatížení silami od pilota pro příčný pohyb maximálně 150 N a pro podélný pohyb 200 N. [18]

Jako směrodatné pro účely návrhu řešeného v této práci byly vzaty požadavky předpisu CS-23, který klade největší nároky na přenesená zatížení silami od pilota pro dimenzování soustavy řízení.

#### 7.1.2 ZATÍŽENÍ OD SEVŘENÍ ŘÍDICÍ PÁKY PILOTEM

Podle způsobu uchopení páky se může zatížení lišit. Jako nejvyšší možné zatížení od sevření řídicí páky pilotem lze považovat stav, kdy pilot svírá knípl nejvyšší silou jedné ruky, kterou je schopen vyvinout.

V článku Hand Grip Strength: age and gender stratified normative data in a population-based study [19] lze nalézt nejvyšší ze středních sil stisku 47 kg, tzn. 461 N. V článku Grip and Pinch Strength: Normative Data for Adults [20] lze nalézt nejvyšší ze středních sil stisku

121,8 lb tzn. 55,25 kg tzn. 542 N. Podle dalších zdrojů pak může síla přesahovat i 57,5 kg [21] tzn. 564 N.

Při běžném způsobu uchopení páky má pilot na aktivním členu položen 1 maximálně 2 prsty. Síla stisku působící na aktivní člen je tedy menší, musíme však mít na paměti, že se jedná o ukazovák a prostředník, které lze považovat za důležitější pro celkovou sílu stisku než prsteník a malík. Nelze však mít na aktivním členu položeny 2 prsty plnou plochou. S uvážením výše popsaných souvislostí zavedeme předpoklad, že maximální síla na aktivní člen vycházející čistě ze síly stisku pilotovy ruky je 1/3 celkové síly (564 N) stisku tzn. 188 N.

## 7.2 NÁSTAVCE PEDÁLŮ

Vzhledem k navrženému provedení s vibračními členy, bez výsuvných mechanismů používajících pohon servomotory, nemusíme zvlášť uvažovat zatížení těchto prvků. Zatížení se tak skládá čistě ze zatížení od řídicích sil.

Předpis EASA CS-23 (amdt 4) hlava C odstavec 23.397 b) požaduje maximální sílu 890 N pro pedály směrového kormidla pro letouny do 2268 kg. Přitom předepsaná síla se pak musí lineárně zvýšit až na 1,18násobek při návrhové hmotnosti 5670 kg a pro kategorii commuter pak musí být lineárně zvýšeny až na 1,35násobek při návrhové hmotnosti 8618 kg. [14]

Předpis EASA CS-VLA (amdt 1) část C odstavec 397 b) požaduje identickou hodnotu pro pedály směrového kormidla jako předpis CS-23, tedy 890 N. [15]

Předpis EASA CS-LSA (amdt 1) odkazuje v podčásti B na normu ASTM F2245-12d, která požaduje v odstavci 5.3.3.3 sílu na pedály směrového řízení maximálně 580 N. [16] [17]

Pro kategorii ULL byl použit předpis LAA UL-2, ten v kapitole C – pevnost požaduje zatížení silami od pilota pro nožní řízení maximální sílu 300 N. [18]

Souhrnná tabulka sil (tabulka 1) obsahuje i početní zatížení, stanovená jako provozní zatížení vynásobená součinitelem bezpečnosti 1,5.

*Tabulka 1: Limitní síly od pilota požadované předpisy pro dimenzování soustavy řízení*

		Předpis			
		UL-2	CS-LSA	CS-VLA	CS-23 (do 2268 kg)
Zatížení		[N]	[N]	[N]	[N]
provozní	klopení	200	445	740	743
	klonění	150	180	300	298
	zatáčení	300	580	890	890
početní	klopení	300	667,5	1110	1114,5
	klonění	225	270	450	447
	zatáčení	450	870	1335	1335

## 8 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY PROTOTYPŮ

Na základě zpětné vazby od účastníků experimentu a zkušeností ze samotné přípravy a testování experimentu byly stanoveny požadavky, které má splňovat další vývojová verze nástavců na páku a pedály. Předkládaný návrh má poskytnout vhodnou platformu pro další experimenty s haptickou odezvou na simulátoru, umožnit provedení experimentů v reálném letounu a poskytnout možnost ověření technických řešení pro další vývojové verze, které mohou směřovat až k sériové výrobě a zástavbě zařízení do letadel všeobecného letectví. Návrh prototypů pro letovou zkoušku má zohledňovat výrobu pomocí 3D tisku z PLA.

### 8.1 POŽADAVKY NA NÁSTAVEC ŘÍDICÍ PÁKY

Návrh madla nové vývojové verze nástavce na řídicí páku, má pro zlepšení ergonomie vycházet z vhodnějšího tvaru, který bude možné pohodlněji uchopit. Rozměry madla prvotního návrhu byly diktovány volbou umístění servomotorů v samotném madle, tomu byl uzpůsoben i příčný průřez madla. Nový návrh má představovat vhodný kompromis.

Nový návrh má zachovávat možnost úchopu levou i pravou rukou bez omezení, což se osvědčilo při experimentu, kdy jeho účastníci volili úchop podle svého zvyku z letounů.

Na madle má být možnost odzkoušet použití hmatové reference pro vysunutou polohu aktivního členu. To znamená opatřit madlo vystouplou hranou nad aktivním členem, která umožní hmatem porovnat polohu aktivního členu vůči poloze plného vysunutí. V současné podobě lze podobné srovnání provést pouze pro zasunutou polohu.

Pohyb a provedení aktivního členu mají být zachovány. Stejně tak jeho pohon pomocí 2 servomotorů TowerPro SG90. To si vynutí zahrnutí ochrany motorů proti přetížení. Člověk je schopen silou stisku ruky překonat sílu servomotoru, opakované přetlačení servomotoru pak zvyšuje riziko nenávratného poškození. Přitom k přetlačení serva může dojít neúmyslně při obrazech. Další informace jsou v kapitole věnované konstrukčnímu návrhu nástavce řídicí páky.

V případě pokračujícího vývoje prototypu bude nutné přepracovat napojení hřebenových táhel aktivního členu na zbytek součásti. Současné řešení obsahuje kloub realizovaný elastickým ohybem výsuvného členu v místě zeslabené stěny. U tohoto řešení lze předpokládat postupné porušování kloubu a velmi omezenou životnost. Má být navržena i tato konstrukční úprava.

Pokračující vývoj si také vyžádá změnu hlavičky řídicí páky. Na tu mají být umístěna zpět 2 tlačítka pro obsluhu interní komunikace a rádiové komunikace.

Jako preferovaná možnost se ukázalo provést konstrukční návrh se zohledněním budoucího možného osazení na páku řízení a k němu doplnit díly, které umožní dočasné uchycení k řídicí páce letounu WT-9 Dynamic ve vlastnictví letecké školy VUT. Pro účely prvotních testů nového návrhu může být praktické zachovat možnost uchycení k základně joysticku počítačového simulátoru.

Uchycení nástavce k řídicí páce za účelem provedení experimentů nesmí vyžadovat jakýkoli zásah do původní konstrukce letounu!



## 8.2 POŽADAVKY NA NÁSTAVCE PEDÁLŮ

Předkládaný návrh má upravovat původní řešení tak, aby bylo možné nástavce osadit na trubkové pedály letounu WT-9 Dynamic ve vlastnictví letecké školy VUT. Pedály v letounu WT-9 Dynamic nejsou na rozdíl od leteckých pedálů pro simulátor řešeny jako pedály s plochými šlapkami. Jejich řešení odpovídá běžnému přístupu, který se používá na ULL letounech. Pedály tvoří trubky svařené ve tvaru písmene L, viz obrázek 6.

Návrh nástavců pedálů má umožňovat umístění tlumicí mikroporézní pryže a pokud možno zlepšit tlumení přenosu vibrací z jednoho pedálu na druhý.

Uchycení nástavce k pedálům za účelem provedení experimentů nesmí vyžadovat jakýkoli zásah do původní konstrukce letounu!



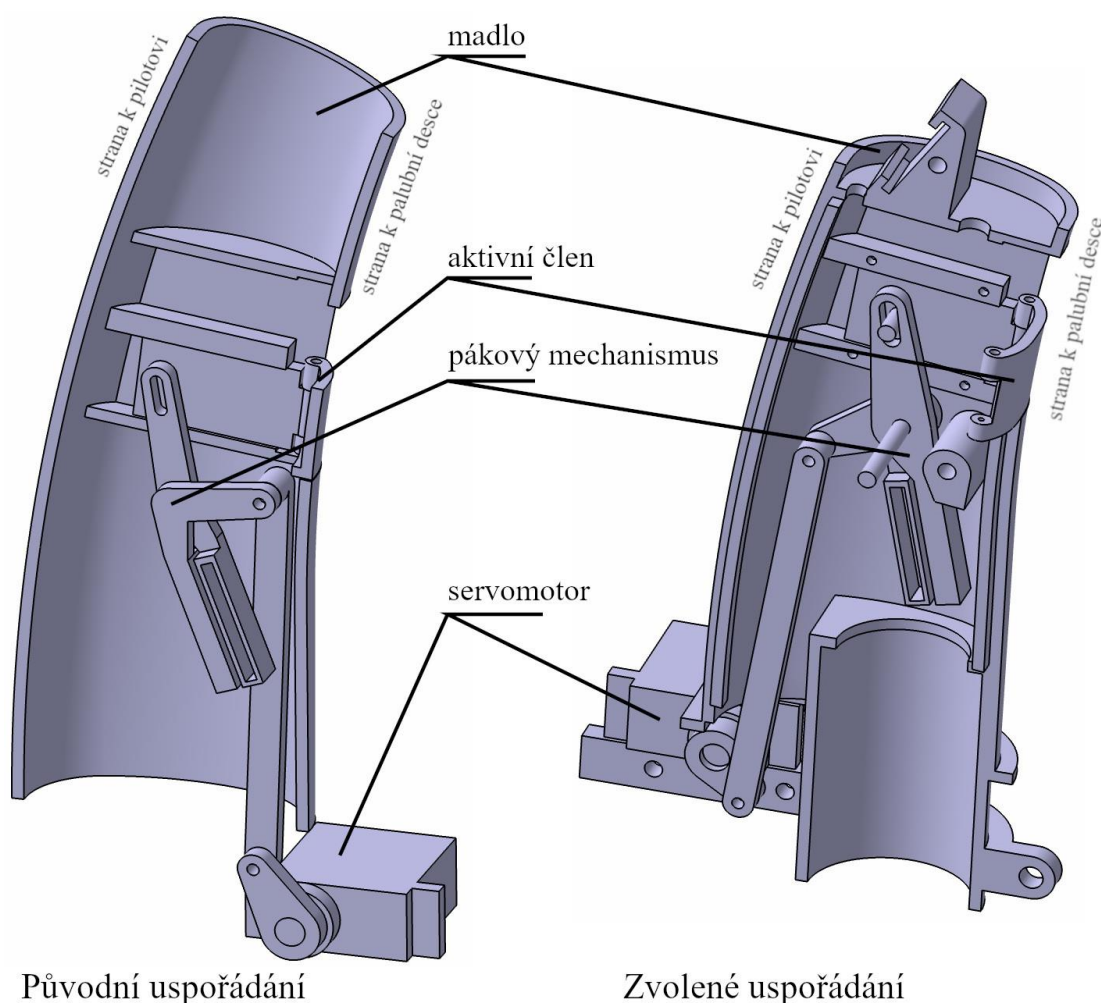
*Obrázek 6: Pedály letounu WT-9 Dynamic*

## 9 NÁSTAVEC ŘÍDICÍ PÁKY

### 9.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH NÁSTAVCE ŘÍDICÍ PÁKY

#### 9.1.1 CELKOVÉ USPOŘÁDÁNÍ

Pro výchozí tvar nosného madla nástavce řídicí páky byl zvolen tvar, který je použit na madle původního joysticku Mad Catz Pacific AV8R. Vzhledem k vnitřním rozměrům madla není možné umístit servomotory stejným způsobem, jako tomu bylo v případě prvotního návrhu. Servomotory jsou proto umístěny pod samotným madlem a jejich výchylka je na aktivní člen přenášena soustavou pák a táhel. Aby bylo možné nástavec vhodným způsobem uchytit, bylo nutné ponechat uvnitř prostor pro trubku řídicí páky. Servomotory jsou proto umístěny s vodorovnými osami proti sobě na spodní straně madla. Byla rozpracována varianta s umístěním servomotorů v přední části s ohledem na omezení prostorových nároků na přitažení řídicí páky. Vzhledem k prostorovým možnostem v letounu bylo následně přepracováno umístění servomotorů a dále bylo pokračováno ve variantě se servomotory v zadní části a uchycením nástavce k řídicí páce z přední strany. Obě varianty jsou k porovnání na obrázku 7. Umístění servomotorů na zadní straně navíc přináší výhodnější tvar krytu jejich úložného boxu. Zakrytování prostoru pro servomotory s tímto umístěním tak plní roli opěrky pro pilotovu ruku, čímž usnadňuje správné držení řídicí páky, které je podmínkou správného přijímání haptické zpětné vazby z aktivního členu.



Obrázek 7: Porovnání původního uspořádání se servomotorem vpředu a zvoleného uspořádání se servomotorem vzadu

S ohledem na omezený vnitřní prostor není použit vodící blok, místo něj jsou drážky pro táhla aktivního členu vytvořeny přímo v součástech obou polovin madla. Protože táhlový mechanismus má 2 symetrické větve, které se setkávají až připojením táhel na aktivní člen, nabízelo se řešení, kdy sestavování obou větví mechanismů bude probíhat vždy do jedné poloviny madla a následně dojde k propojení přes aktivní člen po složení obou mechanismů k sobě. To by v případě poruchy znamenalo nutnost rozebrání začínat opět u aktivního členu, ale jeho dostupnost v zasunuté poloze neumožňuje rozebrání kloubových spojení na táhla. Byl proto zvolen způsob, který umožňuje kompletní sestavení obou větví mechanismu do 1 poloviny madla včetně napojení aktivního členu a teprve následně dojde k uzavření vnitřního prostoru.

### 9.1.2 OCHRANA PŘED PŘETÍŽENÍM SERVO MOTORŮ

Servomotory TowerPro SG90 mají udávaný maximální moment 1,2 kg.cm tedy 117,7 N.mm. [21] Při předpokládaném rameni páky 10 mm je pak v táhlovém mechanismu s poměrem 1:1 schopen servomotor poskytnout sílu jen 11,77 N. Z analýzy zatížení od sevření řídicí páky vyplývá, že člověk je schopen 16 násobně překročit maximální sílu poskytovanou servomotorem.

Zavedení takových převodů, které by zvyšovaly sílu poskytovanou servomotorem, by znamenalo výrazné snížení výchylek aktivního členu na výstupu. Vysouvání aktivního členu pomocí šnekových převodů by naopak vyžadovalo jiné druhy servomotorů s násobně větším rozsahem otáčení. Proto bylo hledáno řešení, které umožní v případě přetížení rozpojit táhlovou cestu vysouvání aktivního členu. Toto řešení má chránit servomotor před přílišným tlakem na aktivní člen kvůli sevření pilotovi ruky kolem madla a přes aktivní člen. Preferované řešení je takové, u kterého po přerušení tlaku na aktivní člen dojde k samovolnému spojení táhlové cesty a obnovení správné funkce aktivního členu. V opačném případě při použití jednorázových pojistek by každé přetížení aktivního členu znamenalo rozebrání nástavce řídicí páky a výměnu ochranného prvku. To by výrazně komplikovalo užívání.

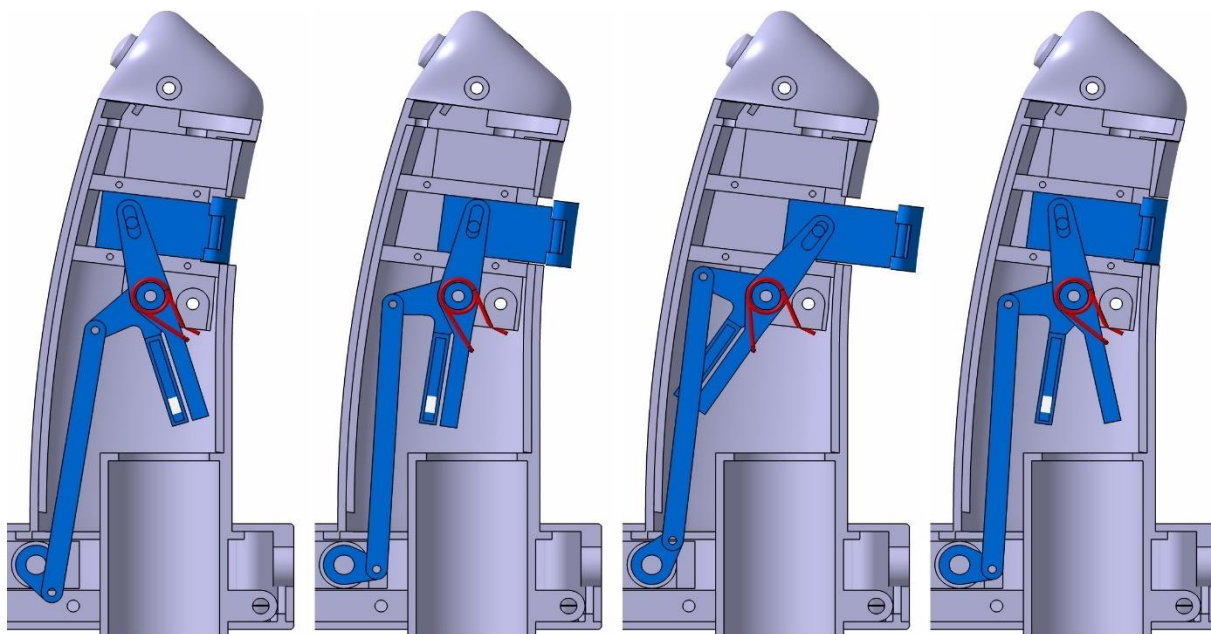
Jako možná řešení byla zvažována použití:

- elasticky se deformujícího členu
- mechanické západky dvou dílů
- spojení pomocí magnetů

Bylo zvoleno zařadit do táhlové cesty spojení pomocí magnetů, protože první dvě varianty mohou vyžadovat náročné a zdlouhavé odladování konstrukčního provedení pro rozpojení při požadované síle. Použití magnetů představuje riziko ovlivnění správného chování přístrojů v kokpitu. Intenzita magnetického pole však rychle klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje a konkrétní ovlivnění bude nutné posoudit přímo v letounu. Pro prvotní představu bylo zkoušeno chování kompasu v blízkosti magnetů. 4 neodymové magnety s přídržnou silou 0,8 kg byly ve spojeném stavu orientovány tak, aby magnetické siločáry procházely v místě kompasu kolmo na směr magnetických siločar zemského magnetického pole. K ovlivnění kompasu o 5° dochází ve vzdálenosti magnetů od osy střelky 240 mm. Sotva patrný pohyb střelky byl rozpoznán už ve vzdálenosti 400 mm. Ovlivnění 45° je dosaženo, pokud jsou magnety ve vzdálenosti 107 mm. Tedy intenzita magnetického pole permanentního magnetu je shodná s intenzitou magnetického pole Země, ve vzdálenosti 107 mm od magnetů. Zkoušená vzájemná poloha kompasu a magnetů představuje nejnepríznivější orientaci pro

výslednou chybu stočení strelky kompasu. Aby se minimalizovalo riziko případného ovlivnění, je cílem použít co nejslabší magnety, co nejefektivnějším způsobem, tedy pro přenos momentu volit slabší magnety na delších ramenech. Protože táhlové cesty se budou nacházet 2 vedle sebe, vzniká riziko ovlivnění od magnetů zařazených v cestě protějšího servomotoru, je tedy vhodné co nejvíce navýšit vzdálenost obou táhlových cest v tomto místě. Proto byla páková skupina během vývoje přestavěna, došlo k záměně polohy a tomu odpovídající úpravě tvaru 2 magnetových pák na hřídeli. Poloha pák ve zcela původní podobě je zachycena na obrázku 7 vlevo, srovnajte s podobou výsledného řešení prezentovanou na tomtéž obrázku vpravo.

Zvolené konstrukční řešení používá 2 páky s prodlouženými kapsami pro uložení magnetů. Prodloužené kapsy umožní přesnější nastavení přenášeného momentu, pomocí změny polohy a tím ramena síly magnetického spoje obou pák. Páky jsou orientované tak, aby vysouvání aktivního členu, probíhalo pomocí tahu hnací páky přenášeného na hnanou páku přes magnetický spoj. V případě tlaku na aktivní člen a překonání síly magnetického spoje dojde k rozpojení kontaktu obou pák a přerušení přenosu výchylky servomotoru na aktivní člen. Mechanismus do opětovného spojení vrací zkrutná pružina (v obrázku 8 vyznačena červeně).



Obrázek 8: Pohyb mechanismu, zleva: zcela zasunut, vysouvání, zcela vysunut, rozpojen při přetížení

Detailnější informace o součástech mechanismu jsou zařazeny v technickém popisu, kapitola 9.4.3 .

### 9.1.3 HLAVICE ŘÍDICÍ PÁKY

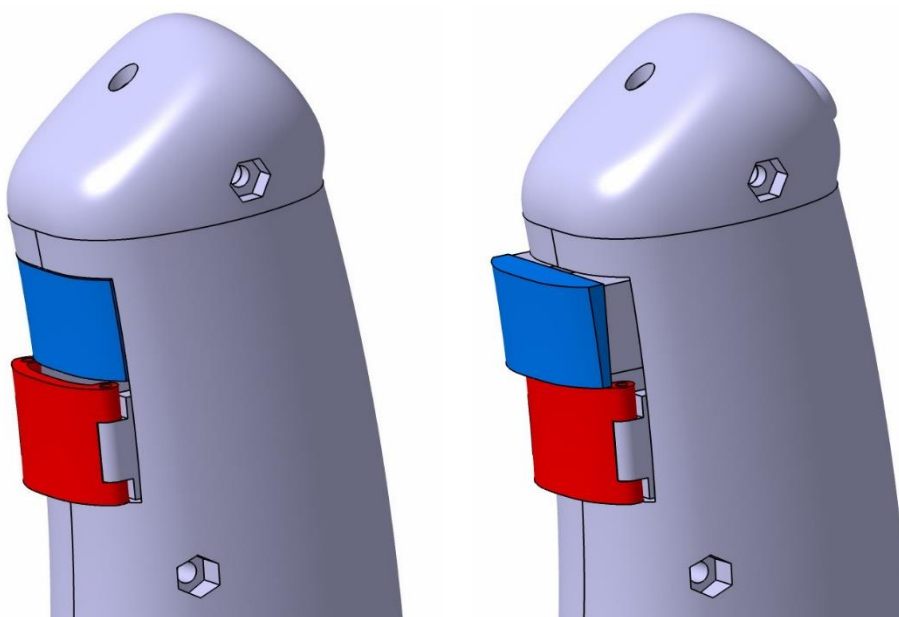
Na hlavici řídicí páky jsou vedle sebe umístěny 2 spínače. Jejich vnitřní řešení je inspirováno původním provedením z herního joysticku, kdy samotný mikrospínač je stláčen pružně zavěšeným tělesem tlačítka. Oba spínače jsou dostupné palcem. Případné další vývojové verze mohou vyžadovat úpravy provedení s ohledem na možnou výslednou zástavbu do letounu. V tomto návrhu bylo cílem ověřit možnost umístění vypínačů vzhledem k vnitřnímu prostoru nástavce řídicí páky.

#### 9.1.4 AKTIVNÍ ČLEN

Tvar aktivního členu odpovídá profilu madla v místě, kde je aktivní člen s mechanismem zasazen. Aktivní člen tak nemá ostré hrany na bocích. Ty byly některými účastníky experimentu označeny za přínosné a tvar aktivního členu tak může být v projektu samostatným předmětem k řešení. Napojení aktivního členu na táhla je nově provedeno panty a aktivní člen je tak možno měnit samostatně.

#### 9.1.5 REFERENČNÍ ČLEN

Nad aktivním členem je pro účely dalšího testování osazen referenční člen. Jeho vysunutí je nastavitelné. V drážce táhla referenčního členu je vložena matice a pod hlavici páky šroub přístupným otvorem v hlavici. Povolněním šroubu se táhlo uvolní a lze nastavit polohu



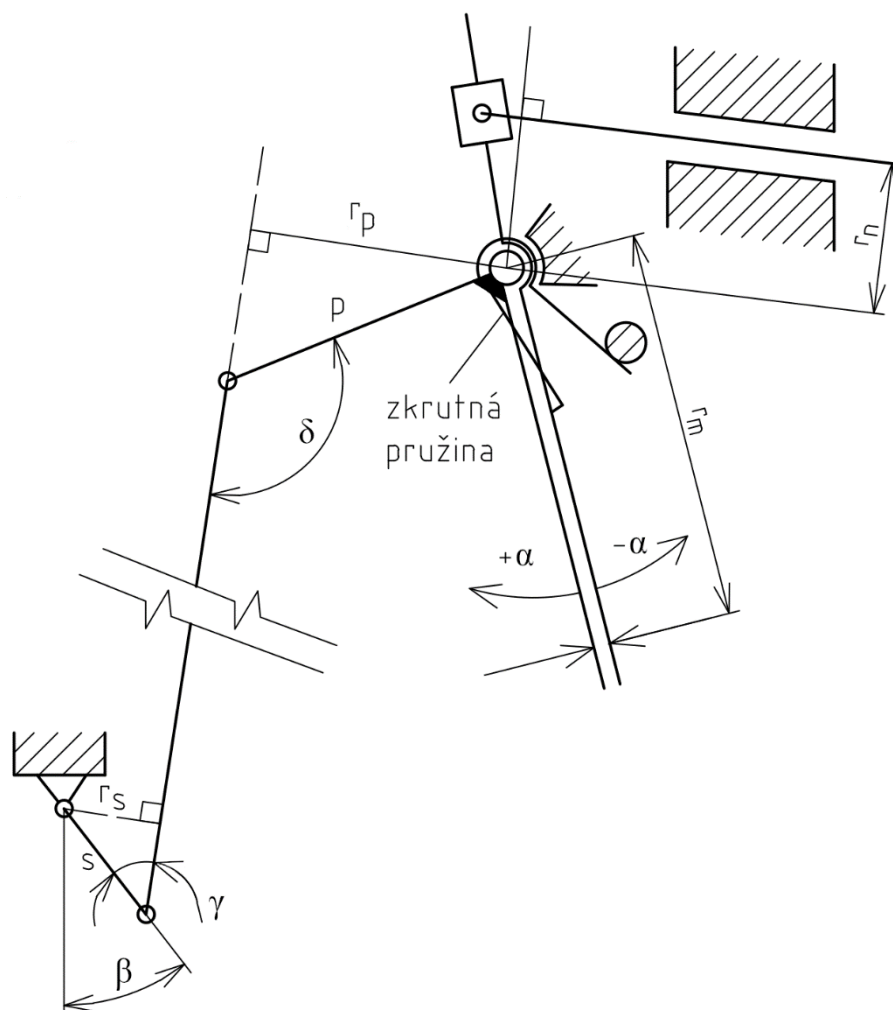
Obrázek 9: Horní část madla, aktivní člen červeně, referenční člen modře

referenčního členu, následně utažením šroubu dojde k sevření táhla k tělesu madla a referenční člen je držen v nastavené poloze. Na obrázku 9 vlevo je referenční člen zasunut, vpravo je pak v povysunuté poloze.

## 9.2 PŘENOS SIL V TÁHLOVÉM MECHANISMU, VOLBA MAGNETU A ZKRUTNÉ PRUŽINY

Předpokládá se použití zkrutných pružin, které budou v případě rozpojení vracet po odlehčení magnetové páky do opětovného spojení. To znamená, že zkrutné pružiny jsou orientovány tak, že pomáhají servomotoru vytlačet aktivní člen. Výsledná síla člověka, která povede k ochrannému rozpojení mechanismu je tak součtem tahu servomotoru a síly od zkrutné pružiny. Naopak servomotor musí být schopen tuto pružinu překonat při zasouvání aktivního členu, protože v tom případě pracují servomotor a zkrutná pružina proti sobě. Nelze tedy volit pružinu o příliš velké momentové tuhosti.

Pro ověření sil a momentů v navrženém mechanismu je proveden výpočet silových rovnohah pro jednu ze 2 symetrických větví mechanismu. Rozměrové veličiny jsou výsledné rozměry návrhu. Prodejci servomotoru uvádějí maximální moment servomotoru v kgf.cm, prodejci magnetů uvádějí přídržnou sílu v kgf. Jednotky jsou proto uvedeny a následně převedeny na jednotky SI. Úhel nulového zkroucení pružiny představuje úhel polohy magnetových pák  $\alpha$ , při které je pružina zcela uvolněna. Hodnota je zvolena tak, aby pružina vracela mechanismus do spojení v celém rozsahu pohybu. Mechanismus je na přiloženém kinematickém schématu.

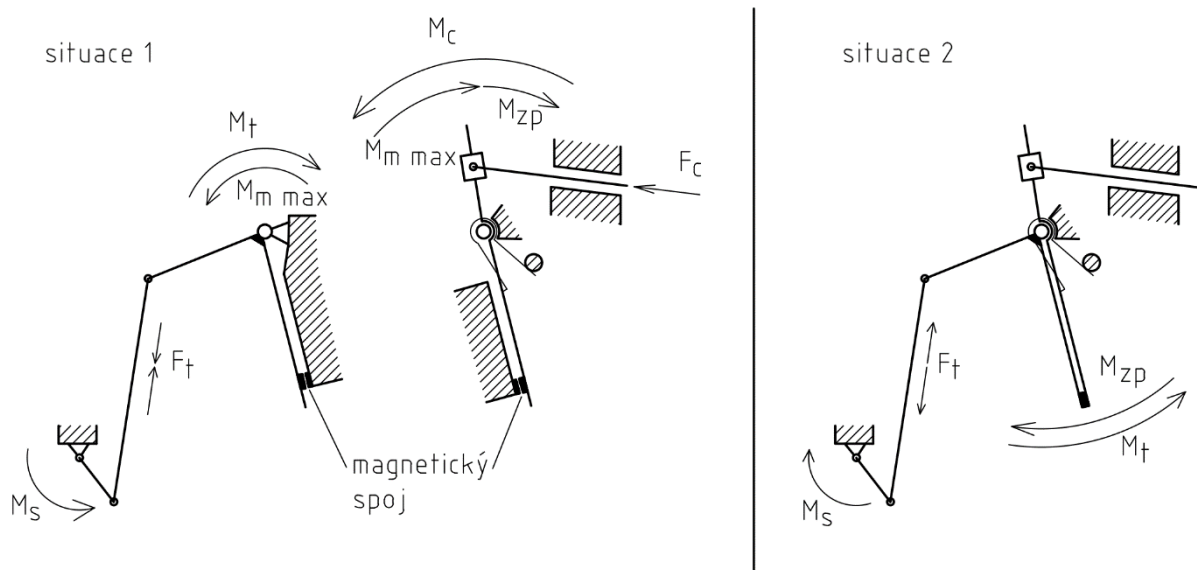


Obrázek 10: Kinematické schéma

Páka servomotoru	$s = 8 \text{ mm}$
Páka tažná	$p = 16 \text{ mm}$
Rameno táhla	$r_n = 18 \text{ mm}$
Rameno magnetu (nastavitelné)	$r_m = 25 \text{ mm}$
Maximální moment servomotoru [21]	$M_{s \max} = 1,2 \text{ kgf.cm} = 117,680 \text{ N.mm}$
Síla magnetového spoje	$F_m = 0,8 \text{ kgf} = 7,845 \text{ N}$
Momentová (úhlová) tuhost zkrutné pružiny	$k = 150 \text{ N.mm/rad} = 2,618 \text{ N.mm/deg}$
Úhel nulového zkroucení pružiny	$\alpha_0 = 45^\circ$
Zvolené max. poměrné zatížení servomotoru	$p = 0,85$

Výpočet je proveden pro 2 situace. Pro zjednodušení zanedbáváme třecí síly v kloubových spojích a suvných uloženích. Nejsou uvažovány vlivy tíhové síly na chod mechanismu ani přídatná zatížení od násobků za letu vzhledem k předpokládané povaze experimentálního ověřování ve skutečném letounu a možnostem použitých servomotorů.

Výpočtové situace vycházejí z 2 krajních případů zatížení mechanismu. První situace je okamžik rozdělení magnetových pák. Situace je u mechanismu vyvolána zablokováním tažené páky silou pilotovy ruky působící na aktivní člen. Zde je třeba stanovit moment na servomotoru a ověřit, že nepřekračuje maximální moment stanovený výrobcem. Dále je třeba stanovit, jaká síla na aktivní člen tuto situaci vyvolává. Z hlediska servomotoru můžeme daný stav řešit náhradní představou části mechanismu, ve které budeme zablokovanou taženou páku považovat za nehybné základní těleso. Problém pak přejde ve výpočet momentu servomotoru, který je nutný k odtrhnutí magnetového spoje na pákách. Náčrt situace je k dispozici na obrázku 11 v části pro situaci 1 vlevo. Z hlediska síly na aktivní člen použijeme podobný postup. Pokud jsme v předchozím kroku ověřili, že servomotor je schopen svým působením vyvolat rozpojení magnetů, potom je schopen při identické síle udržet mechanismus nehybný. Rozpojení magnetů pak realizuje člověk působením na aktivní člen. Použijeme proto opět odpovídající náhradní představu části mechanismu, ve které budeme servomotorem zablokovanou tažnou páku považovat za nehybné základní těleso. Problém pak přechází ve výpočet síly na aktivní člen, která je nutná k odtrhnutí magnetového spoje na pákách. K tažené páce je připojena zkrutná pružina, která společně s magnetovým spojem působí proti působení síly na aktivní člen. Náčrt situace je k dispozici na obrázku 11 v části pro situaci 1 vpravo.



Obrázek 11: Momentové rovnováhy obou výpočtových situací

Druhá výpočtová situace je chod odlehčeného mechanismu, tedy bez síly na aktivní člen. Magnetové páky jsou spojeny a můžeme je proto považovat za jednu součást. Moment vnášený do mechanismu zkrutnou pružinou závisí na poloze magnetových pák a působí ve většině rozsahu chodu mechanismu ve smyslu vytlačení aktivního členu. Polohu aktivního členu ale určuje servomotor a je proto potřeba ověřit, že při působení proti momentu od zkrutné pružiny není překročen maximální moment stanovený výrobcem. Náčrt situace je k dispozici na obrázku 11 v části pro situaci 2. Zatímco ve druhé situaci je táhlo spojovací páku servomotoru a páku magnetových pák namáháno tahem, v první situaci je toto táhlo namáháno tlakem a bude proto pevnostně ověřeno na mezní stav ztráty vzpěrné stability.

### 9.2.1 SITUACE 1

První situace je stav při zatížení aktivního členu silou od pilota, která vyvozuje takový moment na magnetových pákách, při kterém dochází k rozpojení magnetové pojistky. Nejprve je stanoven maximální moment, který jsou schopny přenést navržené magnety na daném rameni:

$$M_{m \max} = F_m \cdot r_m = 7,845 \cdot 25 = 196,133 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Aby mohlo dojít k rozpojení magnetových pák, musí být tento moment na tažnou páku přenesen servomotorem pomocí páky servomotoru a táhla. Tento účinek nesmí vyžadovat vyšší moment na hřídeli servomotoru, než je zvolené max. poměrné zatížení servomotoru, tedy 85 % maximálního momentu servomotoru. Další výpočet tedy směřuje ke stanovení odpovídajícího momentu na hřídeli servomotoru.

Tabulka č. 2 obsahuje další výpočet pro jednotlivé polohy magnetových pák  $\alpha$  s krokem  $5^\circ$ . Kladná orientace úhlu  $\alpha$  představuje vysouvání aktivního členu, záporná pak zasouvání. Jednotlivé úhly pák ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) pro výpočet ramen sil byly pro zjednodušení odměřeny z animací kinematiky modelu v programu Catia V5.

Rameno  $r_p$  v dané poloze spočteme:

$$r_p = p \cdot \sin(\delta) = 16 \cdot \sin(131,95) = 11,9 \text{ [mm]}$$



Síla v táhle je pak:

$$F_t = -\frac{M_{m \max}}{r_p} = -\frac{196,133}{11,9} = -16,481 \text{ [N]}$$

Mínus je zařazeno, aby byla dodržena běžná praxe, kdy tlak v prvku má záporné znaménko. Dále stanovíme rameno páky servomotoru:

$$r_s = s \cdot \sin(\gamma) = 8 \cdot \sin(37,30) = 4,848 \text{ [mm]}$$

Moment přenášený servomotorem je pak:

$$M_s = r_s \cdot F_t = 4,848 \cdot (-16,481) = -79,904 \text{ [N} \cdot \text{mm]} = -0,815 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]}$$

Tato hodnota je porovnána s maximálním momentem servomotoru:

$$\frac{M_s}{M_{s \max}} = \frac{-79,904}{117,680} \cdot 100 = -67,9 \text{ [%]}$$

Servomotor vyvíjí moment proti směru hodinových ručiček. Stejným způsobem je silová rovnováha spočtena pro celý rozsah poloh mechanismu. Při těchto vstupních hodnotách není nikde překročeno zatížení motoru 85 %. Další koeficient bezpečnosti nebyl zaveden proto, že se jedná o návrh pouze pro účely experimentu navíc jedno přetažení servomotoru neznamená nutně jeho okamžité zničení.

Tabulka 2: Stanovení zatížení servomotoru v okamžiku rozpojení mechanismu

$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	$\delta$ [°]	$r_p$ [mm]	$F_t$ [N]	$r_s$ [mm]	$M_s$ [N.mm]	$M_s$ [kgf.cm]	
-5	28,35	37,30	131,95	11,900	-16,481	4,848	-79,904	-0,815	-67,9
0	40,00	47,19	125,19	13,076	-15,000	5,869	-88,036	-0,898	-74,8
5	50,79	56,57	118,78	14,024	-13,986	6,677	-93,377	-0,952	-79,3
10	61,09	65,77	112,68	14,763	-13,285	7,295	-96,918	-0,988	-82,4
15	71,09	74,97	106,88	15,311	-12,810	7,726	-98,976	-1,009	-84,1
20	80,96	84,34	101,38	15,685	-12,504	7,961	-99,546	-1,015	-84,6
25	90,85	94,03	96,19	15,907	-12,330	7,980	-98,396	-1,003	-83,6
30	100,97	104,26	91,30	15,996	-12,261	7,753	-95,068	-0,969	-80,8
35	111,60	115,35	86,74	15,974	-12,278	7,230	-88,768	-0,905	-75,4
40	123,31	127,89	82,58	15,866	-12,362	6,313	-78,045	-0,796	-66,3
45	137,47	143,43	78,96	15,704	-12,489	4,766	-59,528	-0,607	-50,6
46	140,92	147,26	78,35	15,670	-12,516	4,326	-54,149	-0,552	-46,0

Z údajů v tabulce 2 můžeme navíc stanovit pracovní rozsah servomotoru, ten je spočten:

$$\beta_{\max} - \beta_{\min} = 140,92 - 28,35 \cong 112,5 \text{ [°]}$$

Nyní je třeba stanovit sílu na aktivním členu, která vyvolává rozpojení mechanismu a řešit tak od magnetových pák opačným směrem. Síla na aktivním členu překonává v daných podmínkách moment zkrutné pružiny a moment magnetového spoje. Výpočet je uveden v tabulce č. 3.

Moment zkrutné pružiny:

$$M_{zp} = (\alpha_0 - \alpha) \cdot k = (45 + 5) \cdot 2,618 = 130,9 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Celkový moment jako reakce k působení na aktivní člen:

$$M_c = M_{m \max} + M_{zp} = 196,133 + 130,9 = 327,033 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Síla na táhle aktivním členu je spočtena:

$$F_c = \frac{M_c}{r_n} = \frac{327,033}{18} = 18,168 \text{ [N]} = 1,853 \text{ [kgf]}$$

Síla se liší podle polohy. Při malých úhlech sklonu magnetové páky, tzn. malých vysunutích aktivního členu je síla nejvyšší – zkrutná pružina nejvíce pomáhá mechanismu vytlačet aktivní člen. Protože výpočet byl proveden pouze pro jednu větev mechanismu, je výsledná vnější síla na aktivní člen pro rozpojení obou větví mechanismu dvojnásobná (za předpokladu, že obě větve mechanismu rozepínají při stejném zatížení a síla se rozkládá do obou větví 1:1).

*Tabulka 3: Výpočet síly na aktivní člen v okamžiku rozpojení mechanismu*

$\alpha$ [°]	$M_{zp}$ [N.mm]	$M_c$ [N.mm]	$F_c$ [N]	$F_c$ [kgf]
-5	130,900	327,033	18,168	1,853
0	117,810	313,943	17,441	1,779
5	104,720	300,853	16,714	1,704
10	91,630	287,763	15,987	1,630
15	78,540	274,673	15,260	1,556
20	65,450	261,583	14,532	1,482
25	52,360	248,493	13,805	1,408
30	39,270	235,403	13,078	1,334
35	26,180	222,313	12,351	1,259
40	13,090	209,223	11,623	1,185
45	0,000	196,133	10,896	1,111
46	-2,618	193,515	10,751	1,096

### 9.2.2 SITUACE 2

Druhá výpočtová situace představuje stav, kdy na aktivní člen není vyvíjena vnější síla. V tomto případě jsou magnetové páky spojeny, síla je přes ně přenášena přímým kontaktem pák a servomotor v naprosté většině rozsahu pracuje proti zkrutné pružině. Je proto ověřit, jaký moment servomotoru je tak vyvozován. Výpočet je uveden v tabulce č. 4. Moment zkrutné pružiny  $M_{zp}$  a rameno  $r_p$  je spočteno stejně jak bylo uvedeno v předchozí podkapitole. Síla v táhle je spočtena:

$$F_t = \frac{M_{zp}}{r_p} = \frac{130,9}{11,9} = 11 \text{ [N]}$$

Táhlo je namáháno tahově. Rameno páky servomotoru  $r_s$  i moment servomotoru  $M_s$  jsou spočteny obdobně, jako v situaci 2:

$$M_s = r_s \cdot F_t = 4,848 \cdot 11 = 53,328 \text{ [N} \cdot \text{mm]} = 0,544 \text{ [kgf} \cdot \text{cm]}$$

To představuje procentuální zátěž servomotoru:

$$\frac{M_s}{M_{s \max}} = \frac{53,328}{117,680} \cdot 100 = 45,3 \text{ [%]}$$

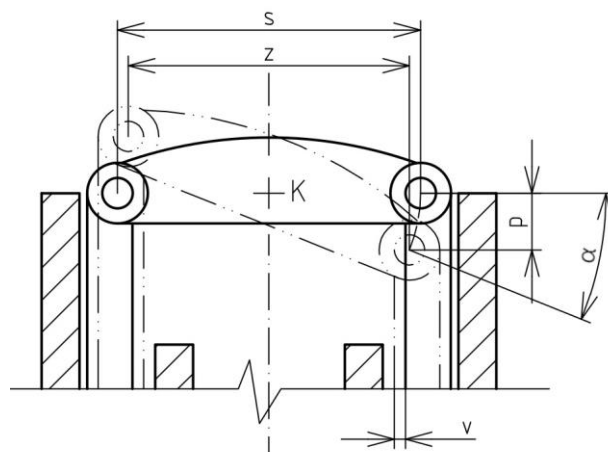
Současně se jedná o maximální moment po směru hodinových ručiček, který je po servomotoru při běžném fungování požadován a není tak překročena stanovená hodnota 85 % maximálního momentu servomotoru. Neuvažujeme situaci, při které by byl aktivní člen silou vytahován, před tímto zásahem rozpojovací mechanismus nechrání a nebyl na něj navržen.

Tabulka 4: Stanovení zatížení servomotoru při práci mechanismu bez zatížení aktivního členu

$\alpha$ [°]	$M_{zp}$ [N.mm]	$r_p$ [mm]	$F_t$ [N]	$r_s$ [mm]	$M_s$ [N.mm]	$M_s$ [kgf.cm]	[%]
-5	130,900	11,900	11,000	4,848	53,328	0,544	45,3
0	117,810	13,076	9,010	5,869	52,880	0,539	44,9
5	104,720	14,024	7,467	6,677	49,856	0,508	42,4
10	91,630	14,763	6,207	7,295	45,278	0,462	38,5
15	78,540	15,311	5,130	7,726	39,634	0,404	33,7
20	65,450	15,685	4,173	7,961	33,219	0,339	28,2
25	52,360	15,907	3,292	7,980	26,268	0,268	22,3
30	39,270	15,996	2,455	7,753	19,035	0,194	16,2
35	26,180	15,974	1,639	7,230	11,849	0,121	10,1
40	13,090	15,866	0,825	6,313	5,209	0,053	4,4
45	0,000	15,704	0,000	4,766	0,000	0,000	0,0
46	-2,618	15,670	-0,167	4,326	-0,723	-0,007	-0,6

### 9.3 VOLBA VŮLÍ TÁHEL AKTIVNÍHO ČLENU

Protože naklopením aktivního členu dochází ke zmenšení vzdálenosti obou táhel aktivního členu, musí být drážky táhel otočné, nebo musí být táhla uložena s dostatečnou vůlí, aby zůstal dostatečný prostor pro požadovaný pohyb. S ohledem na omezený vnitřní prostor nástavce řídicí páky bylo zvoleno řešení uložit táhla aktivního členu do drážek s dostatečnou příčnou vůlí. Pro výpočet je zaveden předpoklad, že táhla se v drážkách nestáčejí, zůstávají rovnoběžná.



Obrázek 12: Stanovení minimální nutné vůle táhel aktivního členu

Jako vyhovující byl stanoven vzájemný rozdíl poloh táhel aktivního členu 8 mm. Poloviční délka rozdílu  $p$  je tedy 4 mm. Šířka aktivního členu měřená k osám pantů je 20 mm. To odpovídá pootočení aktivního členu kolem bodu K:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{2p}{s}\right) = \arcsin\left(\frac{2 \cdot 4}{20}\right) = 23,58 [^\circ]$$

Vůle  $v$ , která je nutná na vnitřní straně každého táhla, pro tento případ je potom spočtena:

$$v = \frac{s}{2} - \frac{s}{2} \cos(\alpha) = \frac{20}{2} - \frac{20}{2} \cos(23,58^\circ) = 0,84 [mm]$$

Drážky pro táhla aktivního členu musí proto být navrženy s vůlí minimálně 0,84 mm na straně k ose symetrie.

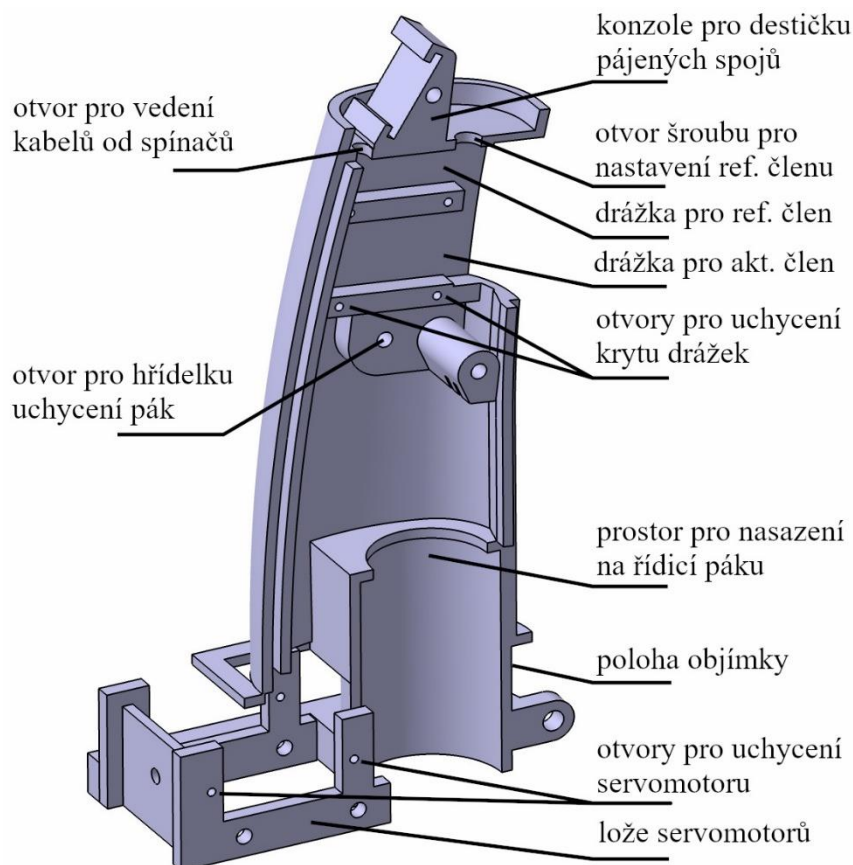
### 9.4 TECHNICKÝ POPIS NÁSTAVCE ŘÍDICÍ PÁKY

Pravá a levá polovina nástavce řídicí páky jsou symetrické s výjimkou vnitřní stavby, která byla podřízena požadavku na sestavitelnost vnitřních mechanismů před uzavřením madla.

#### 9.4.1 MADLO

Základní součástí nástavce je madlo, které plní funkci hlavní nosné části. Základ madla je skořepina o tloušťce 2 mm. Madlo je rozděleno ve svislé rovině na pravou a levou polovinu. Obě poloviny madla nejsou zcela symetrické ve vnitřním uspořádání. Levá polovina je hlavní, vkládají se do ní součásti táhlového mechanismu při sestavování nástavce. V horní části vnitřního prostoru jsou drážky pro uložení aktivního a referenčního členu, jsou skloněny od horizontální roviny o  $7^\circ$ . Nad nimi je vnitřní prostor uzavřen přepážkou, která nese konzolu

pro uchycení destičky pájených spojů s mikropsínači pro tlačítka. Ve střední části vnitřního prostoru madla je prostor pro táhlový mechanismus a pod ním madlo přechází do trubkového tvaru pro osazení na řídicí páku. V dolní části jsou vodorovné nosníky pro ukotvení servomotorů. Pro spojení obou polovin madla nebyly použity vruty ale šrouby s cílem zlepšit možnost opakovaného rozmontování a složení.



Obrázek 13: Madlo a lože servomotorů

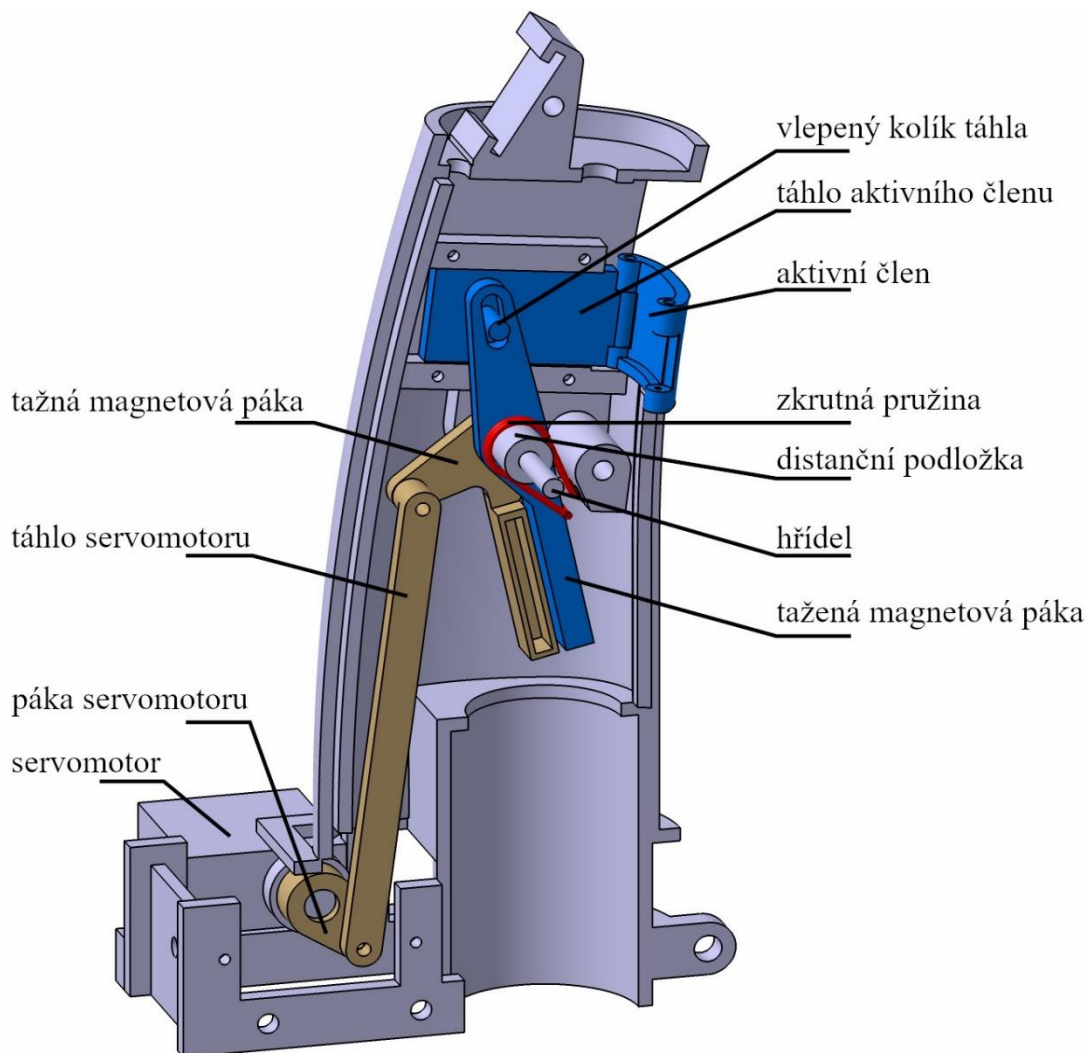
#### 9.4.2 UKOTVENÍ SERVOMOTORŮ

Kompletní sestavení obou větví pákového mechanismu vyžaduje, aby k levé polovině bylo možné uchytit před uzavřením také oba servomotory. Mezi nosníky je proto vloženo lože pro servomotory. To lze přišroubovat nejprve k levé části a osadit oběma servomotory pomocí vrutů. Po dokončení vnitřního mechanismu je pak nástavec uzavřen pravou polovinou, která se šroubuje k levé polovině a k loži servomotorů.

#### 9.4.3 PÁKOVÝ MECHANISMUS

Pákový mechanismus je tvořen dvěma symetrickými větvemi, každá pro jeden servomotor a jedno táhlo aktivního členu. Každá větev mechanismu je tvořena servomotorem, pákou servomotoru, táhlem servomotoru, tažnou magnetovou pákou, taženou magnetovou pákou a táhlem aktivního členu. Magnetové páky obou větví jsou uchyceny na společné hřídeli. Pohyb servomotoru je z tažné magnetové páky na taženou přenášen pouze do překročení síly magnetového spojení obou pák. Magnety jsou umístěny v protáhlých kapsách na každé páce. Kapsy jsou od hřídele vyvedeny směrem dolů, kvůli většímu prostoru v dolní části nástavce řídicí páky. Změnou polohy magnetu v kapse je možné upravit přenášený rozpojovací

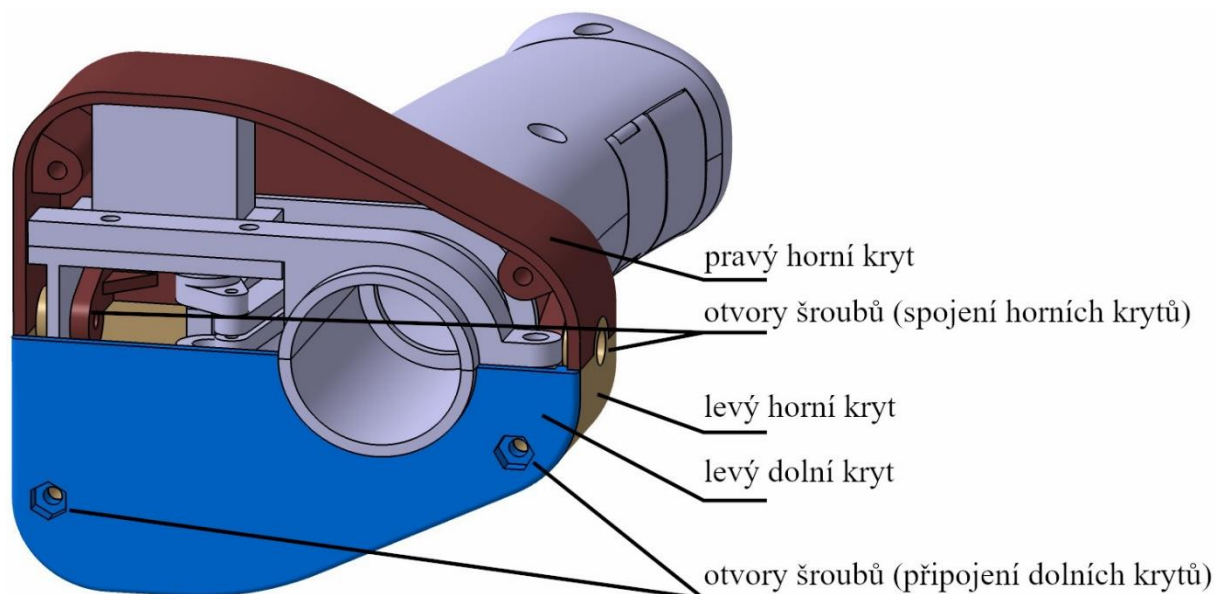
moment. Uspořádání táhel ve vnitřním prostoru bylo upraveno tak, aby se maximalizovala vzdálenost magnetových pák levé a pravé větve s cílem eliminovat možné vzájemné ovlivňování obou větví magnetovými spoji.



Obrázek 14: Levá větev pákového mechanismu a její součásti

#### 9.4.4 KRYTY SERVOMOTORŮ

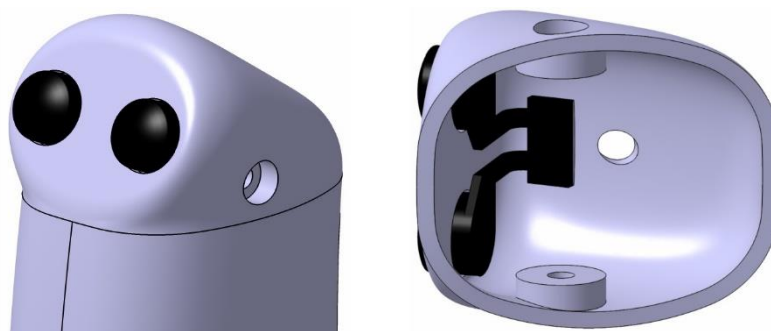
Zakrytování prostoru pro servomotory je rozděleno na 4 součásti. Dva horní kryty jsou k madlu přiloženy svrchu ze stran a následně jsou k sobě přišroubovány jedním šroubem vpředu a druhým vzadu. Matice předního šroubu je umístěna uvnitř tvarovaného zapuštění a není tak potřeba použít klíč. Zadní šroub spojuje oba kryty, a navíc i lože servomotorů. Šrouby jsou nasazovány z vnější strany a mají prostor pro zapuštění. Ze spodní strany je následně možné přiložit dolní kryty, ty jsou staženy vždy dvěma šrouby k horním krytům. Dolní kryty mají tvarovaná zapuštění matic. Dělení krytů je vykresleno na obrázku 15. Arduino podle navrhovaného konceptu nebude umístěno ve vnitřním prostoru joysticku, jak tomu bylo na variantě zkušební na letovém simulátoru. Má být součástí vnějšího kontrolního panelu ovládání systému haptické odezvy pro účely letových experimentů.



Obrázek 15: Kryty prostoru servomotorů před osazením pravého dolního krytu

#### 9.4.5 HLAVICE

Hlavice nástavce řídicí páky plní funkci krytu horní části madla. Na horní stěně jsou přilepena samotná tělesa tlačítek na pružných ramínkách. V horní stěně je navíc otvor, kterým lze i po osazení hlavice přistupovat ke šroubu pro nastavení referenčního členu. Na pravém boku hlavice je zapuštění pro šroub, na levém boku tvarové zapuštění pro matici. Šroubovým spojením jsou pak k sobě staženy obě poloviny madla i s hlavicí.



Obrázek 16: Hlavice, vlevo pohled od pilota, vpravo vlepění tlačítek

#### 9.4.6 KRYT DRÁŽEK

Drážky táhel aktivního členu jsou uzavřeny krytem z ohnutého plechu tloušťky 0,5 mm. Ten je uchycen pouze k levé polovině madla 4 vruty. Kryt navíc vede kabel od tlačítek pod hlavicí mimo táhlový mechanismus. Kryt drážek je na obrázku 27.

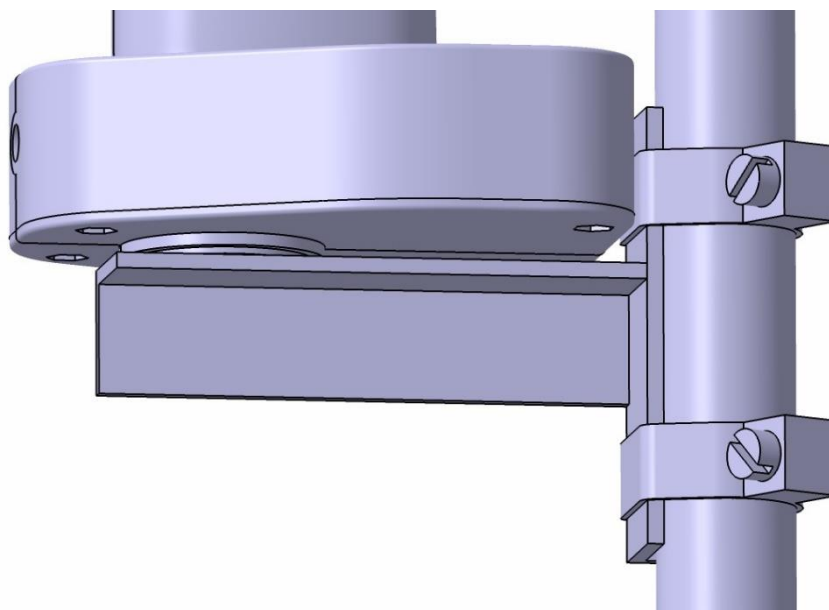
#### 9.4.7 KLOUBOVÁ SPOJENÍ TÁHEL

Navrženo je provedení kloubových spojení táhel a pák pomocí vrutů zašroubovaných do jedné z částí, nebo použití malých čepů s hlavou, které budou v jedné z pohyblivých částí zalisovány. S ohledem na předpokládanou povahu letových zkoušek také lze zvažovat zcela nahradit páku servomotoru a táhlo servomotoru modelářskými součástkami.

### 9.4.8 UCHYCENÍ NÁSTAVCE ŘÍDICÍ PÁKY

Nástavec je možné nasunout na trubkové zakončení řídicí páky, což je nejběžnější provedení u malých letounů. Uchycení pro účely testovací zástavby by takové řešení přímo nevyžadovalo, ale cílem bylo ověřit toto řešení pro případné další vývojové fáze projektu. Vnitřní prostor umožňuje nasunutí na trubku o průměru až 27 mm. Řídicí páka v letounu WT-9 Dynamic má změřen vnější průměr 21,2 mm, pro další vývojové verze byl tedy ponechán dostatečný prostor, se kterým mohou pracovat pro upevnění k řídicí páce konkrétního letounu. Nástavec může být následně upevněn kovovou objímkou, která sevře madlo nástavce v dolní části. Prostor pro objímku je popsán na obrázku 13.

Pro účely testovací zástavby do letounu je navržena svařovaná konzola. Ta je na jednom konci tvořena trubkou průměru 27 mm, na kterou bude nasazen nástavec řídicí páky. K trubce je přivařen L-profil 20x20x2,5 délky 80 mm. Na jeho konci poté vertikálně druhý profil stejného průřezu délky 70 mm, za který bude konzola přitažena dvěma objímkami k řídicí páce letounu, viz obrázek 17. Zvolený způsob uchycení vychází z doporučení pana doc. Jebáčka, vedoucího zkušebny letecké techniky na Leteckém ústavu.



Obrázek 17: Konzola a její uchycení k ŘP vpravo

Pro připevnění k základně joysticku pro letový simulátor je navržen přechodový díl. Ten je na jedné straně možné uchytit výše popsáním způsobem k nástavci. Na druhé straně se dvěma šrouby připevní ke spodnímu víku původního joystickového madla podobně, jako tomu bylo na předchozí variantě. Víko v sobě obsahuje závit pro přišroubování k joystickové základně. Snímek sestavy i s přechodovým dílem je součástí příloh.



### 9.4.9 SPOJOVACÍ MATERIÁL

Kryt drážek je uchycen 4 vruty, ostatní spoje jsou šroubové. Šrouby a matice jsou rozměrů M1,6; M3 a M4, přesněji v tabulce 5. Šrouby s vnitřním šestihranem lze nahradit šrouby s křížovou drážkou. Tabulka obsahuje i šrouby a matice pro nástavce pedálů.

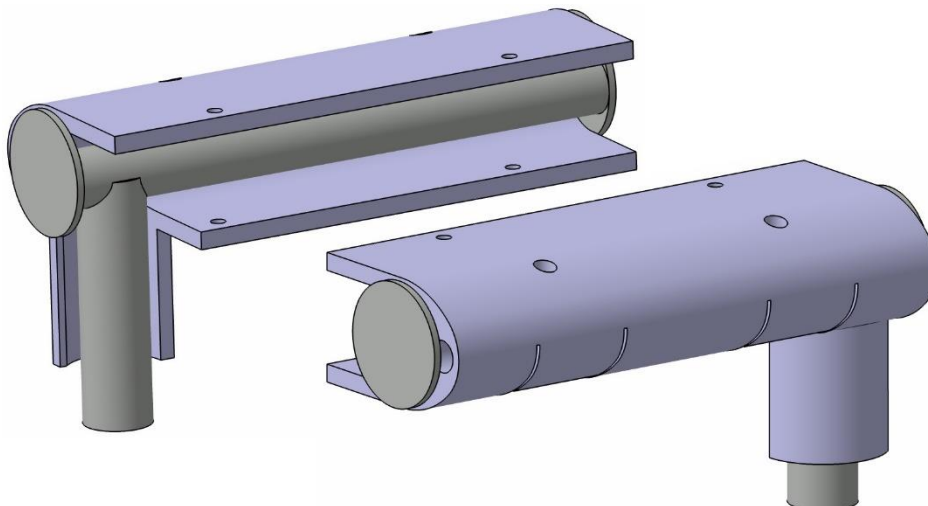
Tabulka 5: Seznam spojovacího materiálu

Šrouby	norma DIN	norma ISO	závit	délka	kusů
Šrouby drážkované s válcovou hlavou	DIN 84	ISO 1207	M1,6 x	10	4
Šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	DIN 912	ISO 4762	M3 x	12	6
Šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	DIN 912	ISO 4762	M3 x	25	4
Šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	DIN 912	ISO 4762	M3 x	30	6
Šrouby drážkované s válcovou hlavou	DIN 84	ISO 1207	M4 x	12	2
Šrouby drážkované s válcovou hlavou	DIN 84	ISO 1207	M4 x	35	2
Matice	norma DIN	norma ISO	závit	-	kusů
Šestihranné matice	DIN 934	ISO 4032	M1,6	-	4
Šestihranné matice	DIN 934	ISO 4032	M3	-	14
Šestihranné matice nízké se sražením	DIN 439 B	ISO 4035	M3	-	2
Šestihranné matice	DIN 934	ISO 4032	M4	-	4
Vruty	norma DIN	norma ISO	závit	délka	kusů
Vrut se zápustnou hlavou	DIN 7982C	ISO 7065	2,2 x	6,5	4

## 10 NÁSTAVCE PEDÁLŮ

### 10.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH NÁSTAVCŮ PEDÁLŮ

Rozdílné řešení pedálů v letounu WT-9 Dynamic si vyžádalo kompletní změnu konstrukčního návrhu. Nástavec je tvořen jedinou součástí, byly vypuštěny samostatné aktivní členy a vibrační motorky jsou umístěny přímo v dílu nástavce. První rozpracovaná varianta

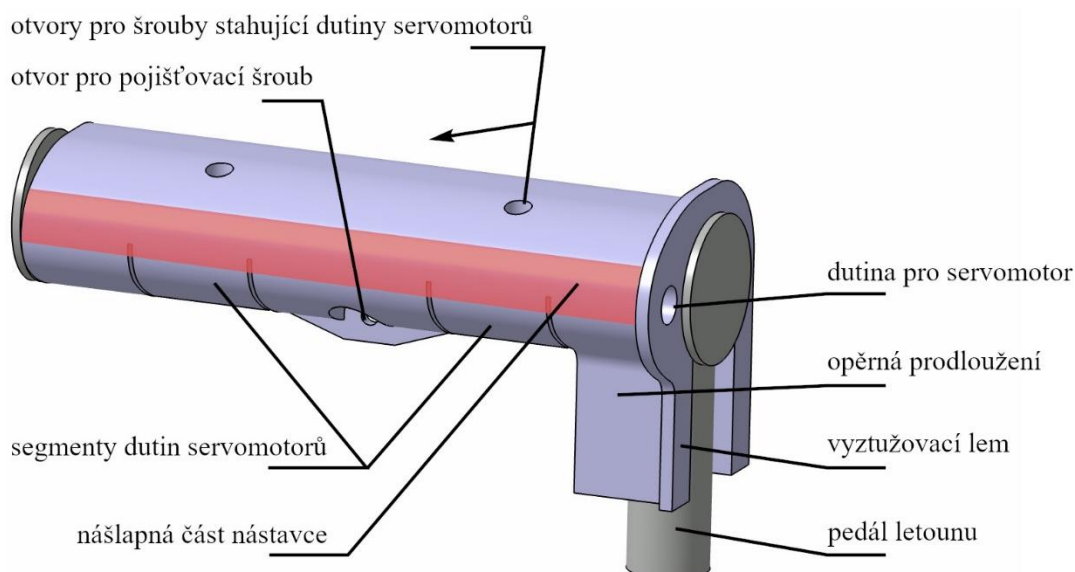


Obrázek 18: První návrh nástavce, pohledy: vpravo dole - od pilota, vlevo nahore - z opačné strany

předpokládala nasazení nástavce na řídicí pedál vodorovně od pilota, viz obrázek 18. Druhá varianta pak používá nasazování na řídicí pedál svrchu. Protože nasazení nástavce na řídicí pedál svrchu představuje jednodušší uchycení, při kterém není potřeba zvlášť pojišťovat pedál ke svislé trubce pedálů proti otočení a dojde k jednoduchému opření a tím zablokování rotace kolem pedálu, byla vybrána druhá varianta, ta je prezentována na obrázku 19.

### 10.2 TECHNICKÝ POPIS NÁSTAVCŮ PEDÁLŮ

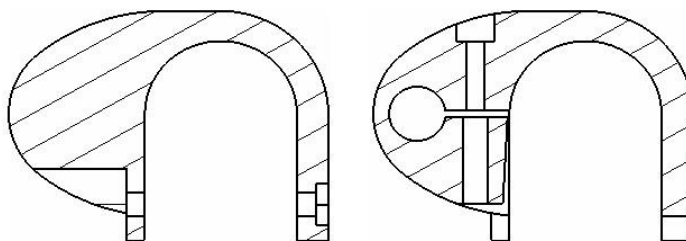
Základním tvarem nástavce je zaoblený U-profil. Ten tvoří dosedací plochu, kterou se svrchu nástavec nasadí na pedál. Pedál v letounu bude oblepen vrstvou mikroporézní pryže a na tu bude teprve osazen nástavec pedálu. Proto má dosedací plocha nástavce pedálu výrazně větší



Obrázek 19: Vybraný návrh nástavce - pohled pilota

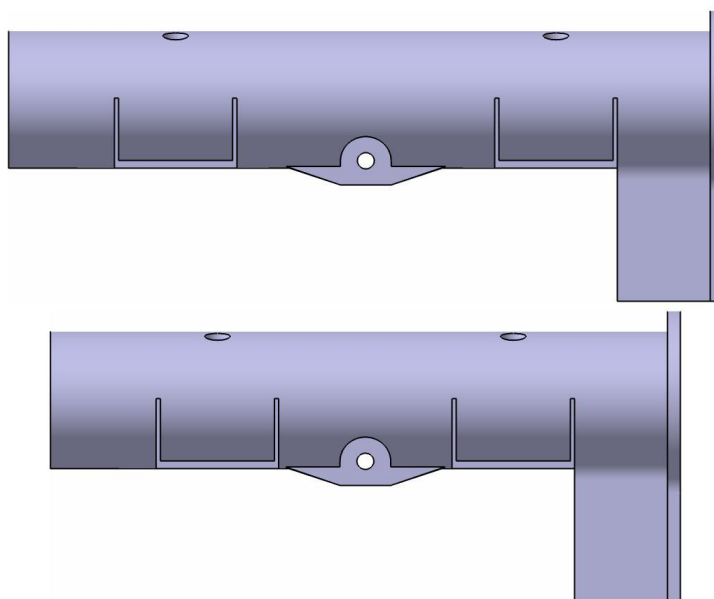
průměr (24 mm), než je průměr vodorovné trubky pedálu v letounu (16 mm). Aby se zamezilo otáčení nástavce pedálu, je opatřen prodlouženími, která se tak mohou opřít o svislou trubku pedálu. Prodloužení jsou vyztužena lemem, který současně tvoří zvětšení základny, na které se bude zahajovat 3D tisk. Po nasazení nástavce jej lze uchytit jedním šroubem M4 x 35 a pojistit tak proti vysunutí. Šroub se nasazuje z přední strany, na zadní straně je pro matici tvarové zhloubení a není tak potřeba pro utažení šroubu zajišťovat matici na druhé straně klíčem.

Na přední straně pod nohou pilota je základní tvar U-profilu rozšířen a opatřen dutinami pro umístění vibračních motorků. Vibrační motorky se do každé z dutin umísťují otvorem v bočních stěnách podobně, jako na návrhu použitém pro zkoušku na simulátoru. Bylo potřeba zabezpečit pevné uchycení vibračních motorků v dutině tak, aby bylo stále možné motorky z dutiny vyjmout a případně je vyměnit. Vnitřní část dutiny je proto rozdělena pouze na jedné straně na horní a dolní část. Obě části je možné stáhnout šroubem M3 x 30, tím dojde k deformaci dutiny a pevnému uchycení motorku. Na obrázku 20 jsou pro lepší představu o vnitřní stavbě součásti příčné řezy středem nástavce pedálu (vlevo) a otvorem pro šroubové stažení dutiny vibračního motorku (vpravo). Kabely pro napájení motorku jsou z dutiny vyvedeny vstupním otvorem pro motorek.



Obrázek 20: Příčné řezy nástavcem, zleva: středem pedálu, otvorem šroubu stahujícího dutinu

Návrh byl vytvořen pro pedály na levém pilotním místě. Levý i pravý pedál na tomto místě jsou shodné konstrukce, délka vodorovné trubky je však u levého pedálu 155 mm, u pravého pedálu 175 mm. 3D model byl vytvořen tak, aby byl univerzální pro oba pedály, mění se pouze jeden parametr šířky nástavce. K prodloužení součásti pak dochází v prostřední části, viz obrázek 21.



Obrázek 21: Nástavce pro levý pedál (dole) a pravý pedál (nahore)

## 11 PEVNOSTNÍ KONTROLA

Analytickým výpočtem byla provedena pevnostní kontrola táhla mechanismu a madla. Nástavce pedálů nebyly analytickým výpočtem kontrolovány, protože dominantní zatížení je tlakové.

### 11.1 KONTROLA TÁHLA

Táhlo přenášející sílu ze servomotoru na tažnou magnetovou páku je při vysouvání aktivního členu namáháno tlakem. Vzhledem k jeho velké štíhlosti přichází v úvahu ztráta vzpěrné stability. Vybočení předpokládáme v rovině příčné, tj. rovina procházející osami otvorů kloubů táhla. Uchycení obou konců táhla považujeme konzervativně za kloubové,  $\alpha = 1$ . Modul pružnosti materiálu PLA je,  $E = 3500$  MPa. [22] Délka táhla mezi klouby je z geometrie součásti  $l = 68$  mm. Kvadratický moment průřezu spočteme:

$$J_y = \frac{bh^3}{12} = \frac{5,2 \cdot 3^3}{12} = 11,7 \text{ [mm}^4\text{]}$$

Eulerovu kritickou sílu pak spočteme [23]:

$$F_{krit} = \frac{\alpha\pi^2 EJ_y}{l^2} = \frac{1\pi^2 3500 \cdot 11,7}{68^2} = 87,4 \text{ [N]}$$

Maximální tlaková síla v táhle je 16,481 N. Součinitel bezpečnosti pak lze stanovit:

$$\eta = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{87,4}{16,481} \cong 5,3$$

Součinitel bezpečnosti 5,3 – vyhovuje.

### 11.2 KONTROLA MADLA NA SMYK

Kontrola madla na smyk byla zařazena s ohledem na charakter zatěžování nástavce silami zaváděnými do řízení. Za kritický průřez byl stanoven horizontální řez nad koncem vnitřního nátrubku madla. Dvoudílné madlo bylo považováno pro výpočet za jednolitou součást. Tvar průřezu je považován za přibližně eliptický v daném řezu s následujícími parametry: délka hlavní poloosy elipsy  $a = 24,3$  mm, délka vedlejší poloosy elipsy  $b = 17,5$  mm, tloušťka eliptické trubky  $t = 2$  mm

$$a_i = a - t = 24,3 - 2 = 22,3 \text{ mm}$$

$$b_i = b - t = 17,5 - 2 = 15,5 \text{ mm}$$

Z geometrie změřené na modelu je spočtena plocha průřezu:

$$S = S_o - S_i = \pi ab - \pi a_i b_i = \pi \cdot 24,3 \cdot 17,5 - \pi \cdot 22,3 \cdot 15,5 = 250,07 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Zatěžující síla je maximální ze sil zjištěných pro řídicí páku podle předpisu CS-23, tedy zatížení v podélném směru (směr klopení). Toto zatížení je početní, je stanoveno z provozního vynásobením součinitelem bezpečnosti 1,5.

$$F_{poč} = F_{prov} \cdot \eta = 750 \cdot 1,5 = 1125 [N]$$

Smykové zatížení součásti je spočteno:

$$\tau = \frac{F_{poč}}{S} = \frac{1125}{250,07} = 4,499 [MPa]$$

Dovolené smykové napětí je spočteno jako polovina meze pevnosti materiálu. Mez pevnosti materiálu byla zjištěna na 50 MPa. [24]

$$\tau_{dov} = 0,5 R_m = 50 \cdot 0,5 = 25 [MPa]$$

Součinitel bezpečnosti je spočten:

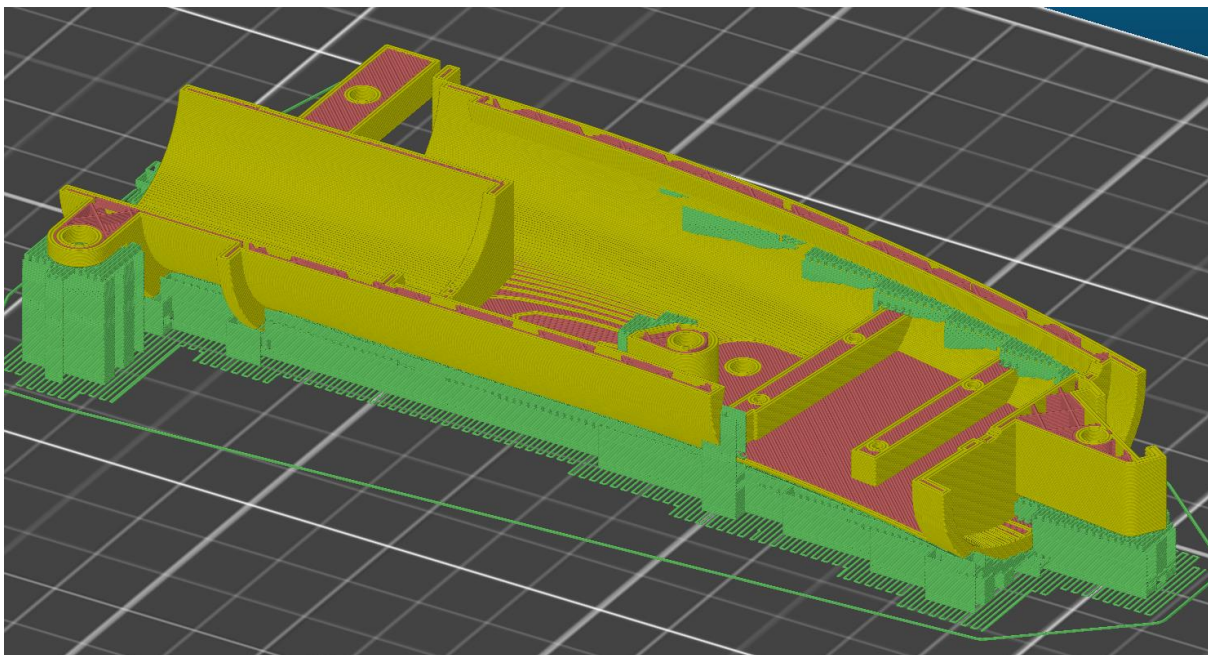
$$\eta = \frac{\tau_{dov}}{\tau} = \frac{25}{4,499} \cong 5,5$$

Součinitel bezpečnosti 5,5 – vyhovuje.

Vzhledem k omezenému rozsahu analytické pevnostní kontroly byla zařazena i pevnostní zkouška vzorků nástavců řídicí páky a pedálů nožního řízení. Pevnostní kontrola metodou konečných prvků nebyla provedena, vzhledem k povaze součástí a jejich zatížení byla shledána jako neúčelná. Její verifikace by sama vyžadovala pevnostní zkoušku na zhotovených součástech.

## 12 TESTOVACÍ 3D VÝTISK

Byl zhotoven testovací 3D výtisk hlavních nosných částí z filamentu PLA. Tento výtisk sloužil k ověření dosažených rozměrů pro korekci modelu, ověření zvolených tiskových poloh součástí a tvoří testovací sestavu pro zkoušku pevnosti. Modely byly vytištěny s použitím metody FDM na tiskárně Original Prusa i3 MK3. Pro vytvoření tiskové úlohy byl použit program Slic3r Prusa Edition 1.41.2., tloušťka vrstvy je 0,15 mm, tisková nastavení vychází z profilu 0,15 mm optimal MK3, množství výplně 20 %, podpory nastaveny na volbu: everywhere.



Obrázek 22: Náhled tisku levé poloviny madla, zelené - podpory, žluté - povrchy, červené - výplně

U madla byl nejdříve zvažován tisk ve svislé poloze. S ohledem na směr zatížení součásti a nutné dodržení rozměrů a struktury povrchu v drážkách aktivního a referenčního členu byla však zvolena výhodnější horizontální poloha s vnitřním prostorem nahoru, jak je zachyceno na obrázku 22.

Zhotovené 3D výtisky byly očištěny, smontovány pro zkoušku pevnosti a následně zváženy. Nástavec řídicí páky složený pro pevnostní zkoušku z obou polovin madla, lože servomotorů, šroubů, matic a objímky má hmotnost 109 g. Nástavec pedálu opatřený dvěma vibračními motorky, bez izolace má hmotnost 95 g.

## 13 ZKOUŠKA PRO OVĚŘENÍ PEVNOSTI A DEFORMACÍ

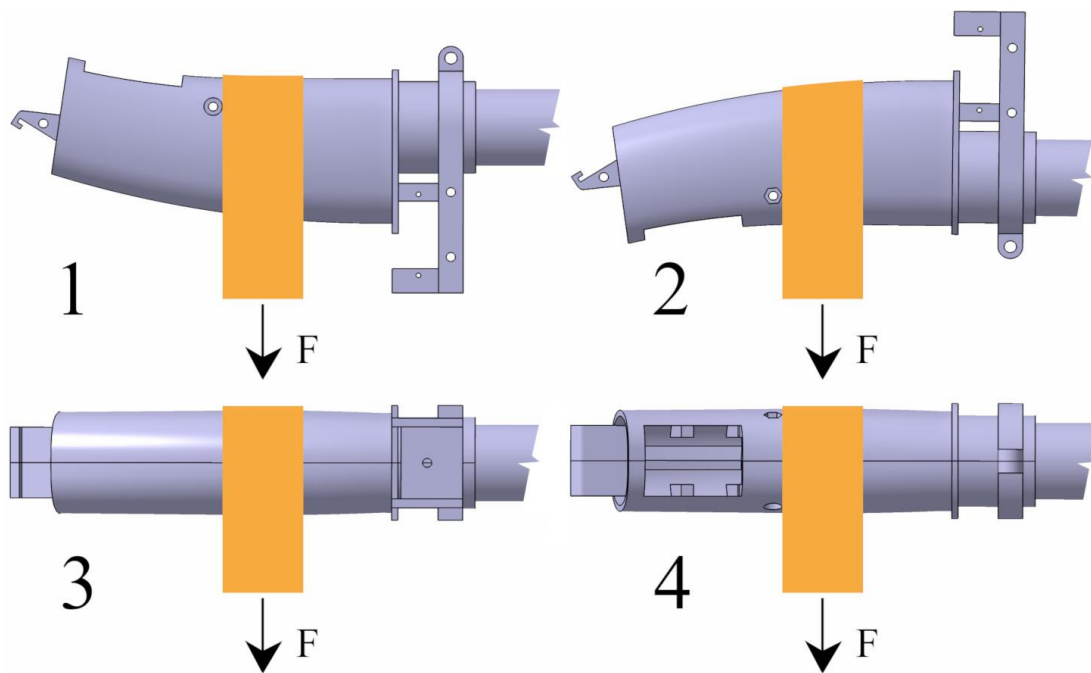
Zkouška pro ověření pevnosti sestává ze zkoušky nástavce řídicí páky a zkoušky nástavce pedálu. Zkoušení je prováděno při pokojové teplotě. Zkoušeno je provozní zatížení a následně početní zatížení obou součástí.

### 13.1 NÁSTAVEC ŘIDICÍ PÁKY

Cílem zkoušky je ověřit pevnost nosného celku nástavce řídicí páky, který musí přenést řídicí sílu z nástavce na řídicí páku letounu. Nosné součásti sestavy nástavce řídicí páky jsou pravá a levá polovina madla a lože pro uchycení servomotorů. Součásti jsou pro zkoušku vzájemně spojeny stejným způsobem, jaký je navržen výslednou sestavu nástavce.

#### 13.1.1 USPOŘADÁNÍ ZKOUŠKY

Nástavec řídicí páky je uchycen na trubce. Trubka má průměr 30 mm, na jednom konci ztenčení na 27,3 mm. Nástavec je na ztenčeném konci upevněn pomocí šroubu M4 x 12 s maticí a kovové objímky šířky 9 mm. Trubka je upevněna horizontálně. Přes střední část nástavce je ve výšce 70 mm od dolního konce nástavce (poloha prostředníčku ruky svírající madlo) převlečen popruh šířky 27 mm a za něj zavěšen koš na umístění zátěže. Zatěžování nástavce řídicí páky je realizováno zavěšováním hmot do koše. Pro testování zatížení v různých směrech je podle zvoleného směru zatížení otáčena trubka, viz obrázek 23.



Obrázek 23: Zkoušené polohy nástavce řídicí páky: 1 - zepředu, 2 - zezadu, 3 - zprava, 4 - zleva

#### 13.1.2 POSTUP ZATĚŽOVÁNÍ

Zatěžování probíhá do předepsaného zatížení předpisem CS-23 pro kategorii letounů do 2268 kg zvýšeného o součinitel bezpečnosti 1,5 to znamená: ve směru klopení 1125 N (750 x 1,5), ve směru klonění 450 N (450 x 1,5). Směr klopení je zkoušen na obě strany (přitahování řídicí páky i potlačení), kvůli nesymetrickému uspořádání nástavce řídicí páky kolem otvoru pro trubku v podélném směru. Směr klonění je zkoušen zatěžováním pravé i levé strany madla kvůli nesymetrickému uspořádání lemu na předělu obou polovin.

Pořadí zatěžování:

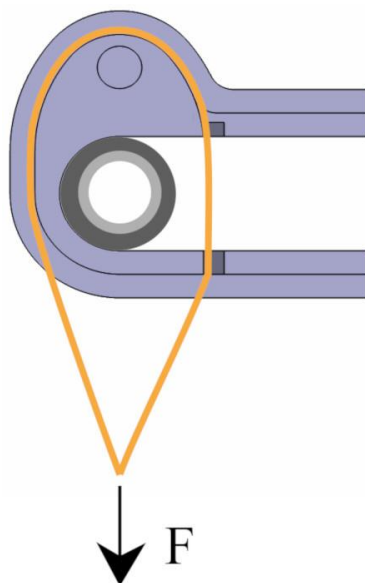
- |   |         |
|---|---------|
| 1. Zatížení ve směru klonění (zprava na řídicí páku) na   | 150 N.  |
| 2. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na  | 150 N.  |
| 3. Zatížení ve směru klonění (zleva na řídicí páku) na    | 150 N.  |
| 4. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na   | 150 N.  |
| 5. Zatížení ve směru klonění (zprava na řídicí páku) na   | 300 N.  |
| 6. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na  | 300 N.  |
| 7. Zatížení ve směru klonění (zleva na řídicí páku) na    | 300 N.  |
| 8. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na   | 300 N.  |
| 9. Zatížení ve směru klonění (zprava na řídicí páku) na   | 450 N.  |
| 10. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na | 450 N.  |
| 11. Zatížení ve směru klonění (zleva na řídicí páku) na   | 450 N.  |
| 12. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na  | 450 N.  |
| 13. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na | 600 N.  |
| 14. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na  | 600 N.  |
| 15. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na | 750 N.  |
| 16. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na  | 750 N.  |
| 17. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na | 900 N.  |
| 18. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na  | 900 N.  |
| 19. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na | 1050 N. |
| 20. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na  | 1050 N. |
| 21. Zatížení ve směru klopení (zepředu na řídicí páku) na | 1125 N. |
| 22. Zatížení ve směru klopení (zezadu na řídicí páku) na  | 1125 N. |

## 13.2 NÁSTAVEC PEDÁLŮ

Cílem zkoušky je ověřit pevnost součásti nástavce pedálu, která musí přenést řídicí sílu na pedál. Zkouší se pouze levý (menší pedál) kvůli shodné vnitřní stavbě v zatěžovaném místě.

### 13.2.1 USPOŘADÁNÍ ZKOUŠKY

Nástavec pedálu je uchycen na trubce průměru 16 mm. Trubka je upevněna horizontálně. Nástavec je na trubce navlečen přes 3 vrstvy mikroporézní pryže a pojištěn proti sklouznutí



Obrázek 24: Zkoušená poloha nástavce pedálu



šroubem M4 x 35 tak, jak tomu bude v letounu. Oba vibrační motorky jsou v dutinách, dutiny jsou staženy každá 1 šroubem M3 x 35. Přes střední část pedálu je převlečen popruh šířky 27 mm a za něj zavěšen koš na umístování zátěže. Zatěžování nástavce pedálu je realizováno zavěšováním hmot do koše. Směr síly je čelně na nášlapnou část pedálu, viz obrázek 24.

### 13.2.2 POSTUP ZATĚŽOVÁNÍ

Zatěžování probíhá do předepsaného zatížení předpisem CS-23 pro kategorii letounů do 2268 kg zvýšeného o součinitel bezpečnosti 1,5, to znamená: 1335 N (890 x 1,5). Přitěžujeme postupně tak, jak je to výhodné, ne však více než 100 N naráz.

### 13.3 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Zkouška byla provedena podle popsaného postupu, teplota při zkoušce 21,4°C. Přitěžování probíhalo pouze do početního zatížení, ke zničení vzorků nedošlo.

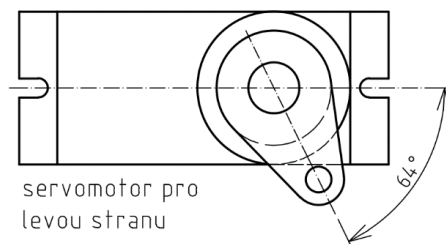
Nástavec řídicí páky přenesl požadovaná provozní i početní zatížení ve všech zkoušených polohách a bez trvalých deformací. Bylo však zjištěno, že od zatížení 450 N ve směru klopení dochází k výrazné elastické deformaci a vzájemnému rozvírání obou polovin madla na straně převlečení popruhu. Rozevření dosahuje na početním zatížení 1,5 mm při zatížení ve smyslu potlačení a 2,5 mm při zatížení ve smyslu přitahování. Ve směru příčném (klopení) dosahuje rozevření na početním zatížení nejvýše 1 mm. Rozvírání je pravděpodobně způsobeno vzpříčováním trubky představující řídicí páku, na které je nástavec osazen. Lze však předpokládat, že výrazný vliv na deformace měl způsobu zavedení síly. Popruh obepíná madlo v mnohem užším pruhu, než lidská ruka a vede sílu od zatížené strany rovnoměrně po obou bocích, zatímco lidská ruka bude uchopovat nástavec řídicí páky nesymetricky. Rozvírání obou polovin madla může představovat riziko při provádění experimentů. Pokud by pilot působil na řídicí páku touto nebo vyšší silou, může dojít ke skřípnutí pilotovy ruky mezi poloviny madla. Pokud by povaha letových zkoušek vyžadovala zatížení řídicí páky vyšší než 450 N, řešením může být úprava nosných součástí, zejména s cílem zvýšit tuhost napojení nástavce na trubku řídicí páky.

Nástavec pedálů přenesl požadované provozní i početní zatížení bez trvalých deformací. Zatěžovací síla byla zaváděna na plochu výrazně nižší, než kterou lze očekávat od nohy pilota a skutečné zatížení tak bude spíše příznivější. Součást tak vykazuje i přes použitý materiál a technologii známky předimenzování a její konstrukci by bylo při dalším vývoji možné odlehčit. Nebylo však zkoušeno zatížení směřující mimo střednici trubky pedálu. V takovém případě lze předpokládat přídavné namáhání opěrných prodloužení a vyztužovacího lemu. Pro první návrh bylo toto zatížení považováno za nevýznamné.

Fotodokumentace zkoušky je součástí příloh.

## 14 POSTUP MONTÁŽE NÁSTAVCE ŘÍDICÍ PÁKY

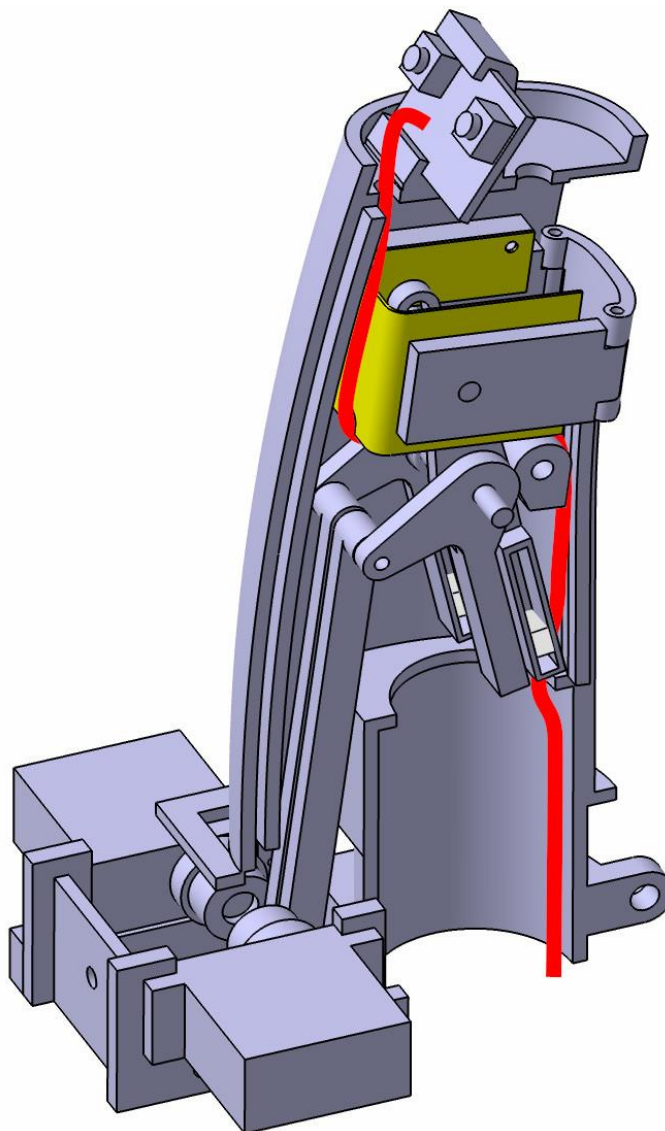
1. Montáž zahájíme na levé polovině madla, ke které připevníme dvěma šrouby M3 x 12 lože servomotorů. Hlavy šroubů zevnitř, matice zvnějšku.
2. Do otvoru v madle vložíme hřídelku průměru 3 mm (délka 32 mm).
3. Servomotor, který bude upevněn na levé straně, otočíme do krajní polohy po směru hodinových ručiček při pohledu na výstupní hřídel od volného konce. Následně na výstupní hřídel nasadíme páku servomotoru v úhlu 64° od vodorovné roviny a uchytneme šroubkem k hřídeli servomotoru. Polohu můžeme vidět na obrázku níže.



Obrázek 25: Poloha páky servomotoru při montáži

4. K páce servomotoru upevníme zalisováním čepu dlouhé táhlo.
5. K dlouhému táhlu upevníme zalisováním čepu tažnou magnetovou páku (s kruhovou dírou na páce).
6. Sestavenou skupinu od servomotoru po magnetovou páku vložíme do madla. Servomotor vkládáme do lože, tažnou magnetovou páku na hřídel. Servomotor šroubujeme dvěma šrouby M1,6 x 10 k loži.
7. Do levého táhla aktivního členu vlepíme kolík. Táhlo následně spojíme hřídelkou průměru 0,65 mm s aktivním členem a celek vložíme do drážky pro táhlo v madle.
8. Do tažné magnetické páky vložíme magnet. Pro odladění chování mechanismu magnety pouze vtlačíme do kapes. Pokud máme chování mechanismu ověřeno a zjištěnou nejvhodnější polohu magnetů v každé z kapes, vlepujeme je.
9. Do stejného místa vložíme magnet i na tažené magnetové páce, dbáme na orientaci magnetu, musí k sobě obě páky přitahovat.
10. Taženou magnetovou páku nasazujeme na hřídel a oválnou drážkou na kolík táhla aktivního členu.
11. Hřídel opatříme distančním kroužkem.
12. Následně osadíme zkrutnou pružinku, tu zapřeme rovným koncem o vybrání ve sloupcu pro šroub a zahnutým koncem zahákneme za taženou páku. Dále následuje obrácený postup pro pravou táhlovou skupinu.
13. Nejdříve nasadíme zkrutnou pružinu a zapřeme o sloupek pro šroub.
14. Do tažené páky vložíme magnet a páku nasadíme na hřídel, dbáme, aby zkrutná pružina byla zaháknutá o páku z přední strany (strana aktivního členu).
15. Servomotor, který bude upevněn na pravé straně, otočíme do krajní polohy proti směru hodinových ručiček při pohledu na výstupní hřídel od volného konce. Následně na výstupní hřídel nasadíme páku servomotoru v úhlu 64° od vodorovné roviny a uchytneme šroubkem k hřídeli servomotoru. Zrcadlově obrácený postup k bodu 4.
16. Opakujeme body 4, 5 pro pravou táhlovou cestu.
17. Do tažné magnetické páky vložíme magnet.
18. Sestavenou skupinu od servomotoru po magnetovou páku vložíme do madla. Servomotor vkládáme do lože, tažnou magnetovou páku na hřídel. Servomotor šroubujeme dvěma šrouby M1,6 x 10 k loži.
19. Kolem vzniklé skupiny nasadíme kryt drážek a 4 vruty 2,2 x 6,5 přichytíme k madlu.

20. Do pravého táhla aktivního členu vlepíme kolík. Táhlo následně spojíme hřídelkou průměru 0,65 mm s aktivním členem a přiklopíme na kryt drážek tak, aby kolík procházel oválným otvorem tažené páky.
21. Do drážky na horní straně madla vložíme destičku pájených spojů s mikrospínači pro tlačítka. Kabeláž vedeme připraveným vybráním v madle, kolem zadní stěny krytu drážek. Následně vybráním na spodní straně krytu dopředu nad zkrutnými pružinami a zepředu kolem sloupku pro šroub dolů podél přední stěny madla.



Obrázek 26: Vystrojený nástavec před uzavřením, kryt drážek žlutě, trasa kabelů červeně

22. Následuje uzavření madla. Pravou polovinu přiložíme k celku. Hřídelka, která nese magnetové páky musí zapadnout do otvoru v pravé polovině madla. Pravé táhlo aktivního členu musí dosednout do drážky v pravé polovině madla.
23. Oba díly k sobě připevníme šroubem M3 x 30 a nízkou maticí přes otvor pod aktivním členem.
24. Následně spojíme pravou polovinu madla s ložem pro servomotory pomocí 2 šroubů M3 x 12 s maticemi. Hlavy šroubů zevnitř, matice zvnějšku.
25. Slepíme k sobě táhlo referenčního členu a referenční člen samotný.

26. Do drážky táhla vložíme matici M4 a celek vložíme do drážky pro referenční člen v nástavci řídicí páky.
27. Do otvoru v přepážce na horní straně vložíme šroub M4 x 12 a přitážením matice v drážce upevníme referenční člen.
28. Na horní stěnu hlavice přilepíme tlačítka tak, aby volně procházela připravenými otvory.
29. Hlavici nasuneme na horní část spojených polovin madla a pojistíme šroubem M3 x 30 s nízkou maticí.
30. Nástavec nasadíme na řídicí páku, přechodový díl nebo trubku konzoly pro testovací uchycení. Stáhneme otvor v přední části šroubem M4 x 12 s maticí. Mezi obě osazení na řídicí páce vložíme kovovou objímku a zatáhneme ji.
31. Prostor pro servomotory zakryjeme. Nejprve horní kryty opatříme maticemi M3 do tvarových zapuštění. Následně nasadíme a upevníme 2 šrouby M3 x 12
32. Dolní kryty osadíme do tvarových zapuštění celkem 4 maticemi M3. Nasadíme a k horním krytům upevníme 4 šrouby M3 x 25.

## ZÁVĚR

Vypracovaný konstrukční návrh nástavců s aktivními členy pro řídicí páku a pedály nožního řízení představuje řešení nejrůznějších požadavků, které na návrh kladly výstupy prováděných experimentů na simulátoru, předpisy, možnosti zástavby pro letové zkoušky atd.

Změna vnějšího tvaru nástavce řídicí páky s sebou přinesla nutnost změny vnitřního uspořádání. Servomotory pro pohyb aktivního členu byly přesunuty zcela mimo vnitřní prostor madla a jejich pohyb je na aktivní člen přenášen pákovým mechanismem. Ten je složen ze dvou symetrických větví, pro každý servomotor jedna. Zjištěná zatížení aktivního členu vedla k zařazení pojistky proti přetažení servomotorů do každé větve pákového mechanismu. Z možných přístupů bylo zvoleno řešení používající sílu permanentních magnetů pro přenos momentu mezi pákami mechanismu. V případě, že vnější síla na aktivní člen přesáhne stanovenou hodnotu, dojde k rozpojení magnetové pojistky a přerušení přenosu síly na servomotory. Pro obnovení funkce bez nutnosti vnějšího zásahu vrací páky magnetové pojistky do opětovného spojení zkrutná pružina. Pro daný typ servomotoru byla navržena zkrutná pružina a výpočtově ověřeny síly v mechanismu.

Vedle samotného mechanismu pro pohyb aktivního členu byl do návrhu zařazen nastavitelný referenční člen, který bude pilotovy poskytovat možnost lepšího stanovení míry vysunutí aktivního členu. Hlavice nástavce byla opatřena tlačítky a vnitřní uspořádání nástavce bylo upraveno tak, aby bylo možné provést uchycení na trubkové zakončení řídicí páky.

Pro účely letových zkoušek je navrženo uchycení pomocí konzoly, v případě experimentů je možné nástavec uchytit k základně řídicí páky pro simulátor pomocí přechodového dílu.

Kompletní změnu přístupu oproti původní podobě si vyžádaly nástavce na pedály letounu zvoleného pro letové zkoušky. Samostatné aktivní členy byl vypuštěny a vibrační motorky jsou umístěny přímo v dílu nástavce. Zároveň bylo vyřešeno rozebíratelné upínání vibračních motorků.

Nosné součásti nástavce řídicí páky i nástavec pedálů byly vyrobeny 3D tiskem a jako vzorky posloužily pro pevnostní zkoušku. Z hlediska pevnosti přenesly oba nástavce požadované zatížení, u nástavce řídicí páky se při zatížení odpovídajícím polovině provozního začínaly objevovat deformace, kterým bude potřeba věnovat další pozornost, pokud budou takové zatížení letové zkoušky vyžadovat. Při navrženém způsobu uchycení pro letovou zkoušku zůstane použitelnost původní řídicí páky nedotčena.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ZIKMUND, Pavel, et al. Bio-inspired aircraft control. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2018, 90.6: 983-991.
- [2] Haptická odezva asistenčních systémů zvyšujících bezpečnost v letectví. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/vav/projekty/detail/28906>
- [3] UNITED STATES NAVY. LTV AEROSPACE CORPORATION. *A-7 Corsair II Pilot's Flight Operating Instruction*. 1973. ISBN 978-1-935327-41-7. NAVAIR 01-45AAE-1, N00019-71-C-0470. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=MTs75IKbFSIC>
- [4] UNITED STATES NAVY. *North American FJ-3 Fury Pilot's Flight Operating Instructions*. Revised 1 August 1957. Bureau of Aeronautics, 1957. ISBN 978-1-935327-37-0. Dostupné také z: [https://books.google.cz/books?id=HwrN3Lb\\_5MoC&pg](https://books.google.cz/books?id=HwrN3Lb_5MoC&pg)
- [5] UNITED STATES NAVY. *Grumman F11F Tiger Pilot's Flight Operating Instructions*. Bureau of Naval Weapons, 1960. ISBN 978-1-935327-46-2. NAVWEPS 01-85FGG-501. Dostupné také z: [https://books.google.cz/books?id=Bk\\_7eLUuPW4C&pg](https://books.google.cz/books?id=Bk_7eLUuPW4C&pg)
- [6] KNAACK, Marcelle. F-111E: Operational Problems. OFFICE OF AIR FORCE HISTORY. *Encyclopedia of US Air Force aircraft and missile systems: Volume I*. Washington D.C., 1978, s. 239-240. ISBN 978-1-428993-97-6. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=0jKTrdT9eIC>
- [7] HORPATZKÁ, Michaela. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, LETECKÝ ÚSTAV. *Analýza nehod pro využití systému haptické odezvy*. Brno, 2018. LU32-2018-HAP.PR.
- [8] DUBNICKÝ, Lukáš a Jakub MAŠEK. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, LETECKÝ ÚSTAV. *Návrh a modely chování systému haptické odezvy*. Brno, 2018. LU58-2018-HAP.PR.
- [9] DANĚK, Vladimír. Nesprávné zatáčky - skluzová a výkluzová zatáčka. *Mechanika letu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, s. 156. ISBN 978-80-7204-659-1.
- [10] HORPATZKÁ, M. *Systém pro haptickou odezvu a jeho spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2019. Vedoucí diplomové práce Ing. Luboš Janhuba, Ph.D. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117171>.
- [11] ŠŤASTNÝ, Petr. *Letecké pedály Happy/MZM* [online]. Šumperk, 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://pedaly-happy-mzm.webnode.cz/pedaly-popis/>
- [12] DOSTÁLOVÁ, Veronika a Pavel ZIKMUND. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, LETECKÝ ÚSTAV. *Odborná zpráva k projektu TJ01000122 za rok 2018*. Brno, 2019. LU01-2019-HAP.PR.
- [13] DUBNICKÝ, Lukáš, Michaela HORPATZKÁ a Pavel ZIKMUND. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, LETECKÝ ÚSTAV. *Experimentální ověření prvků haptické odezvy na leteckém simulátoru*. Brno, 2019. LU08-2019-HAP.PR.
- [14] EASA. *CS-23: Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes*. Amendment 4, 15 July 2015. Köln: EASA, 2015. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-23%20Amendment%204.pdf>

- [15] EASA. *CS-VLA: Certification Specifications for Very Light Aeroplanes*. Amendment 1, 5 March 2009. Köln: EASA, 2009. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-VLA%20%20Amdt%201%20combined.pdf>
- [16] EASA. *CS-LSA: Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Light Sport Aeroplanes*. Amendment 1, 29 July 2013. Köln: EASA, 2013. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Annex%20to%20ED%20Decision%202013-015-R.pdf>
- [17] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM F2245-12d: Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane*. 12d. West Conshohocken, PA, 2013. Dostupné také z: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [18] *UL 2 - I. Část: Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. Upravené znění ze dne 17.10.2002. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2002. Dostupné také z: <http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2-I.pdf>
- [19] MASSY-WESTROPP, Nicola M, Tiffany K GILL, Anne W TAYLOR, Richard W BOHANNON a Catherine L HILL. Hand Grip Strength: age and gender stratified normative data in a population-based study. *BMC Research Notes* [online]. 2011, **4**(1) [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1186/1756-0500-4-127. ISSN 1756-0500. Dostupné z: <https://bmcresearchnotes.biomedcentral.com/articles/10.1186/1756-0500-4-127>
- [20] MATHIOWETZ, Virgil, Nancy KASHMAN, Gloria VOLLAND, Karen WEBER, Mary DOWE a Sandra ROGERS. Grip and Pinch Strength: Normative Data for Adults. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* [online]. 1985, **66**, 6 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/70bb/13c8924c91c61c4c0141f4b45308d4e0f4ca.pdf>
- [21] BASELINE EVALUATION INSTRUMENTS. *Smedley Digital Hand Dynamometer: Manual, model 12-0286*. Ver 6. 2007, 6 s. Dostupné také z: [https://www.fab-ent.com/MEDIA/41\\_INSTRUCTIONS/12-0286\\_INST\\_VER6-07.PDF](https://www.fab-ent.com/MEDIA/41_INSTRUCTIONS/12-0286_INST_VER6-07.PDF)
- [22] SG90 9g mikroservo. *Pecka modelář* [online]. Praha, c2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/jix-sg90-1-9g-mini-servo-sg90>
- [23] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS. Dlouhé pruty centricky zatížené. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010, s. 231-233. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [24] Polylactic Acid (PLA, Polylactide). *MakeItFrom.com* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vnitřní uspořádání současného nástavce ŘP .....	15
Obr. 2: Pohybové ústrojí současného nástavce ŘP .....	16
Obr. 3: Současná podoba pedálů s nástavci .....	17
Obr. 4: Aktivní člen s vibračním motorem .....	17
Obr. 5: Pohled z letounu na trať (simulátor) .....	20
Obr. 6: Pedály letounu WT-9 Dynamic .....	25
Obr. 7: Porovnání původního ... a zvoleného uspořádání se servomotorem vzadu .....	26
Obr. 8: Pohyb mechanismu .....	28
Obr. 9: Horní část madla, aktivní člen červeně, referenční člen modře .....	29
Obr. 10: Kinematické schéma .....	30
Obr. 11: Momentové rovnováhy obou výpočtových situací .....	32
Obr. 12: Stanovení minimální nutné vůle táhel aktivního členu .....	36
Obr. 13: Madlo a lože servomotorů .....	37
Obr. 14: Levá větev pákového mechanismu a její součásti .....	38
Obr. 15: Kryty prostoru servomotorů před osazením pravého dolního krytu .....	39
Obr. 16: Hlavice, vlevo pohled od pilota, vpravo vlepění tlačítek .....	39
Obr. 17: Konzola a její uchycení k ŘP vpravo .....	40
Obr. 18: První návrh nástavce .....	42
Obr. 19: Vybraný návrh nástavce – pohled pilota .....	42
Obr. 20: Příčné řezy nástavcem, zleva: středem pedálu, otvorem šroubu stahujícího dutinu .	43
Obr. 21: Nástavce pro levý pedál (dole) a pravý pedál (nahore) .....	43
Obr. 22: Náhled tisku levé poloviny madla .....	46
Obr. 23: Zkoušené polohy nástavce řídicí páky .....	47
Obr. 24: Zkoušená poloha nástavce pedálu .....	48
Obr. 25: Poloha páky servomotoru při montáži .....	50
Obr. 26: Vystrojený nástavec před uzavřením, kryt drážek žlutě, trasa kabelů červeně .....	51

Prohlašuji, že všechny obrázky a fotografie jsou mojí původní tvorbou. Byly vytvořeny nebo upraveny v programech:

Laminar Research: X-Plane 11.25

Dassault Systèmes: Catia V5.20

Gimp 2.10.8

Autodesk AutoCAD 2010



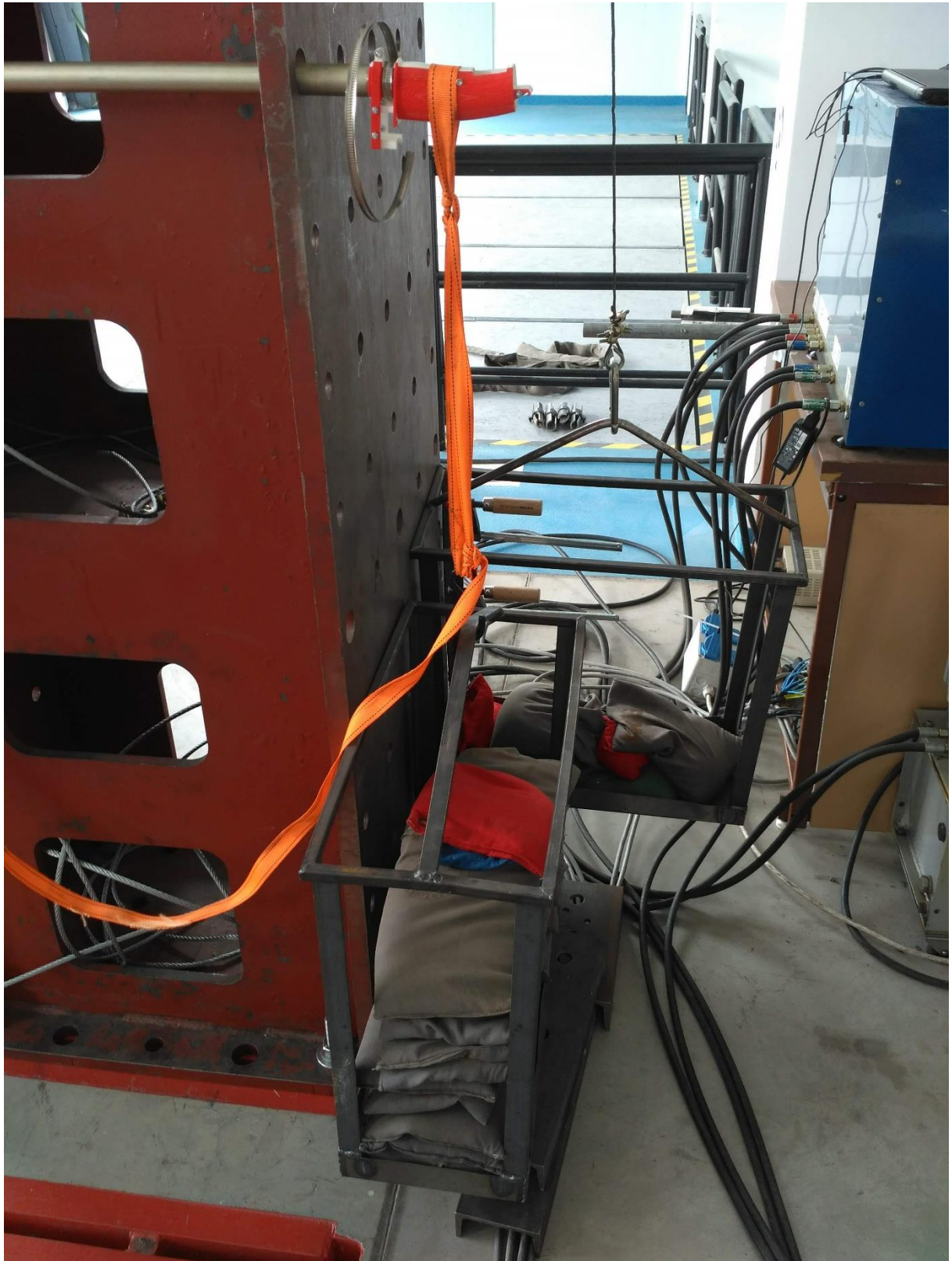
## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

U zkratek, které nevychází z češtiny je ekvivalent uveden pouze pokud bylo zhodnoceno, že se ve stejném významu překlad používá. Symboly použité pro výpočty jsou vysvětleny v odpovídajících kapitolách.

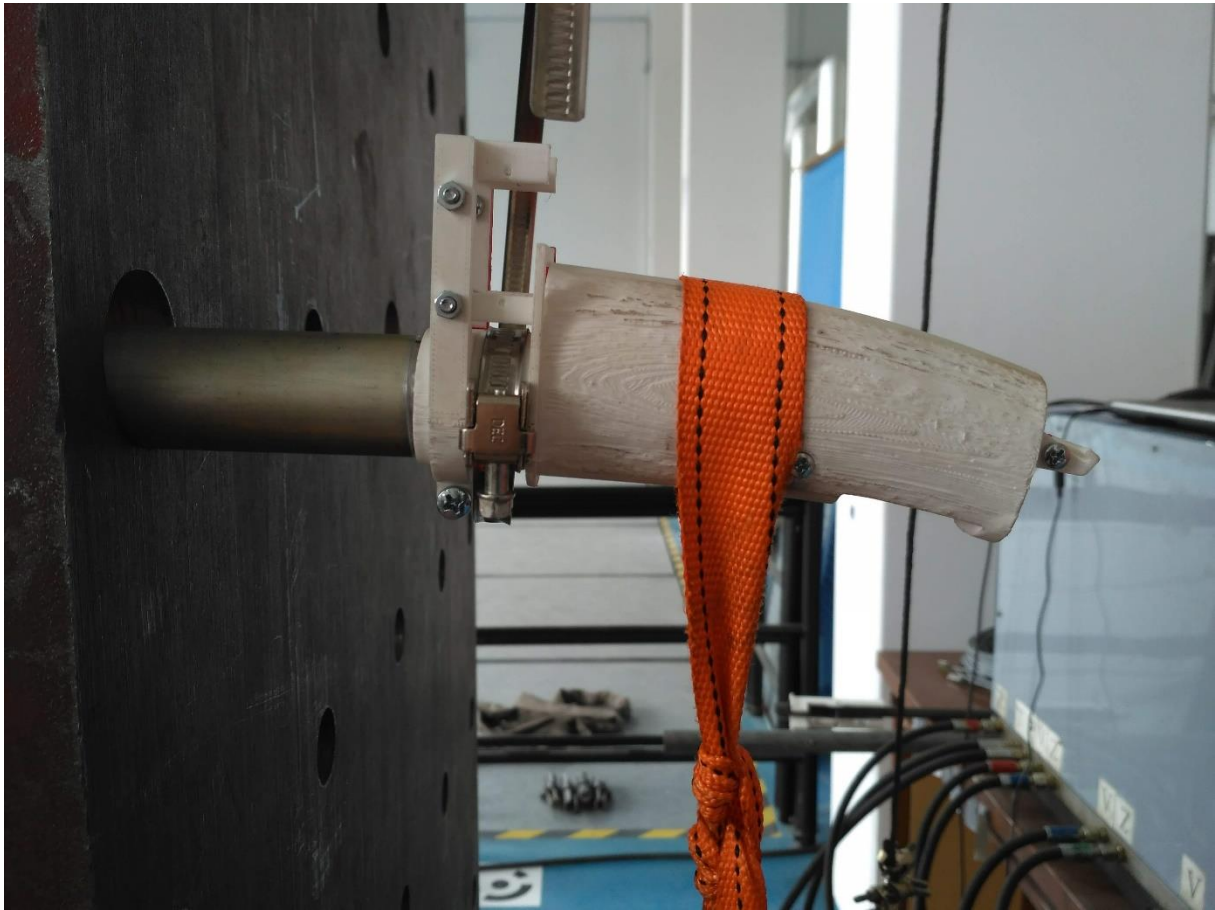
česky	zkratka	v původním jazyce
předpis EASA pro letouny kategorie normální, cvičná, akrobatická a pro sběrnou dopravu německá průmyslová norma	ASTM	American Society for Testing and Materials
	CS-23	Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Aeroplanes
	DIN	Deutsche Industrie-Norm
Evropská agentura pro bezpečnost letectví	EASA	European Aviation Safety Agency
Mezinárodní organizace pro normalizaci	FDM	Fuse deposition modeling
	ISO	International Organization for Standardization
Letecká amatérská asociace	LAA	
letecká nehoda	LN	
	LSA	light sport aircraft
maximální vzletová hmotnost	MTOW	maximum take off weight
kyselina polymléčná	PLA	Polylactic Acid
řídící páka	ŘP	
Mezinárodní systém jednotek	SI	Le Système International d'Unités
	TCP	Transmission Control Protocol
	UDP	User Datagram Protocol
ultralehké letadlo	ULL	ultra-light aircraft
	VLA	very light aircraft
vzletová a přistávací dráha	VPD	

## SEZNAM PŘÍLOH

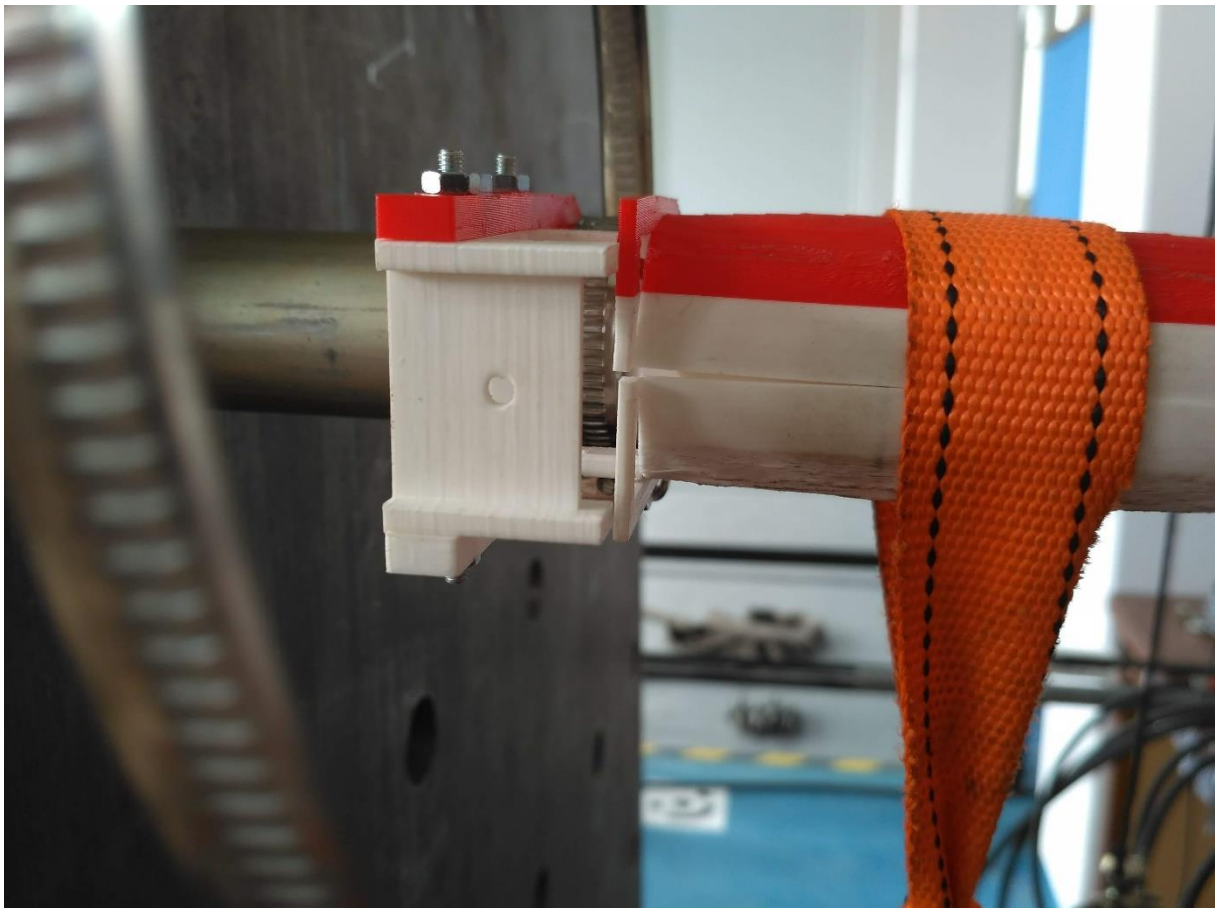
Foto 1: Zkouška nástavce ŘP, početní zatížení na přední stranu	P1
Foto 2: Zkouška nástavce ŘP, početní zatížení na zadní stranu	P2
Foto 3: Zkouška nástavce ŘP, početní zatížení na levou stranu	P2
Foto 4: Zkouška nástavce ŘP, rozevírání součástí při početním zatížení na přední straně	P3
Foto 5: Zkouška nástavce ŘP, rozevírání součástí při početním zatížení na zadní straně	P4
Foto 6: Zkouška nástavce pedálu, početní zatížení	P5
Foto 7: Zkouška nástavce pedálu, početní zatížení, detail	P6
Snímek 1: Nástavec ŘP, pohled zezadu	P7
Snímek 2: Nástavec ŘP, pohled zepředu	P8
Snímek 3: Nástavec ŘP a konzola pro zástavbu do letounu	P9
Snímek 4: Nástavec ŘP a přechodový díl pro použití na simulátoru	P10
Snímek 5: Pedál osazený nástavcem (bez izolace), pohled zespodu...	P11
Výkres sestavy nástavce řídicí páky: 1 x A3	
Kusovník výkresu sestavy: 2 x A4	



*Foto 2: Zkouška nástavce ŘP, početní zatížení na přední stranu*



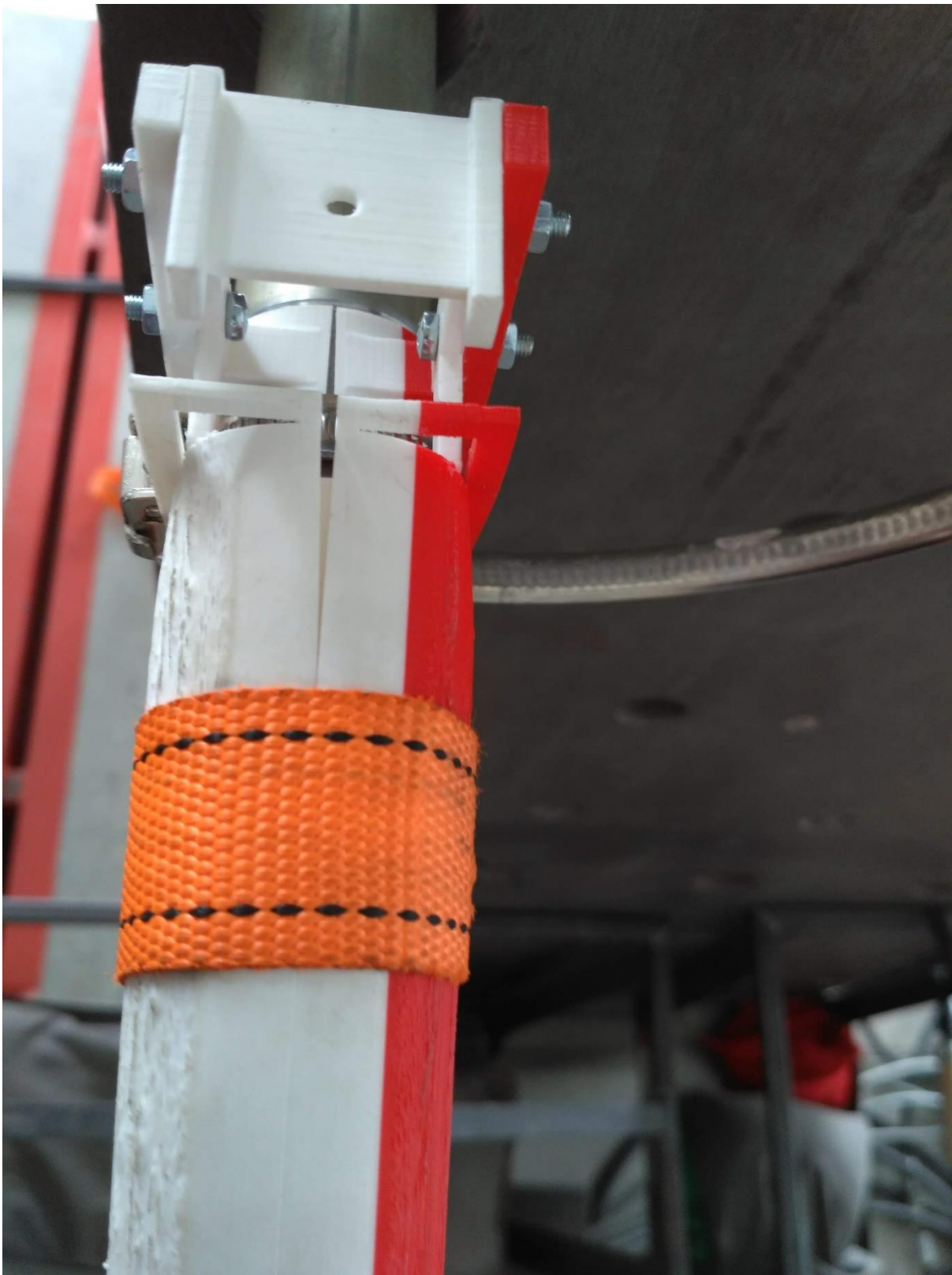
*Foto 3: Zkouška nástavce ŘP, početní zatížení na zadní stranu*



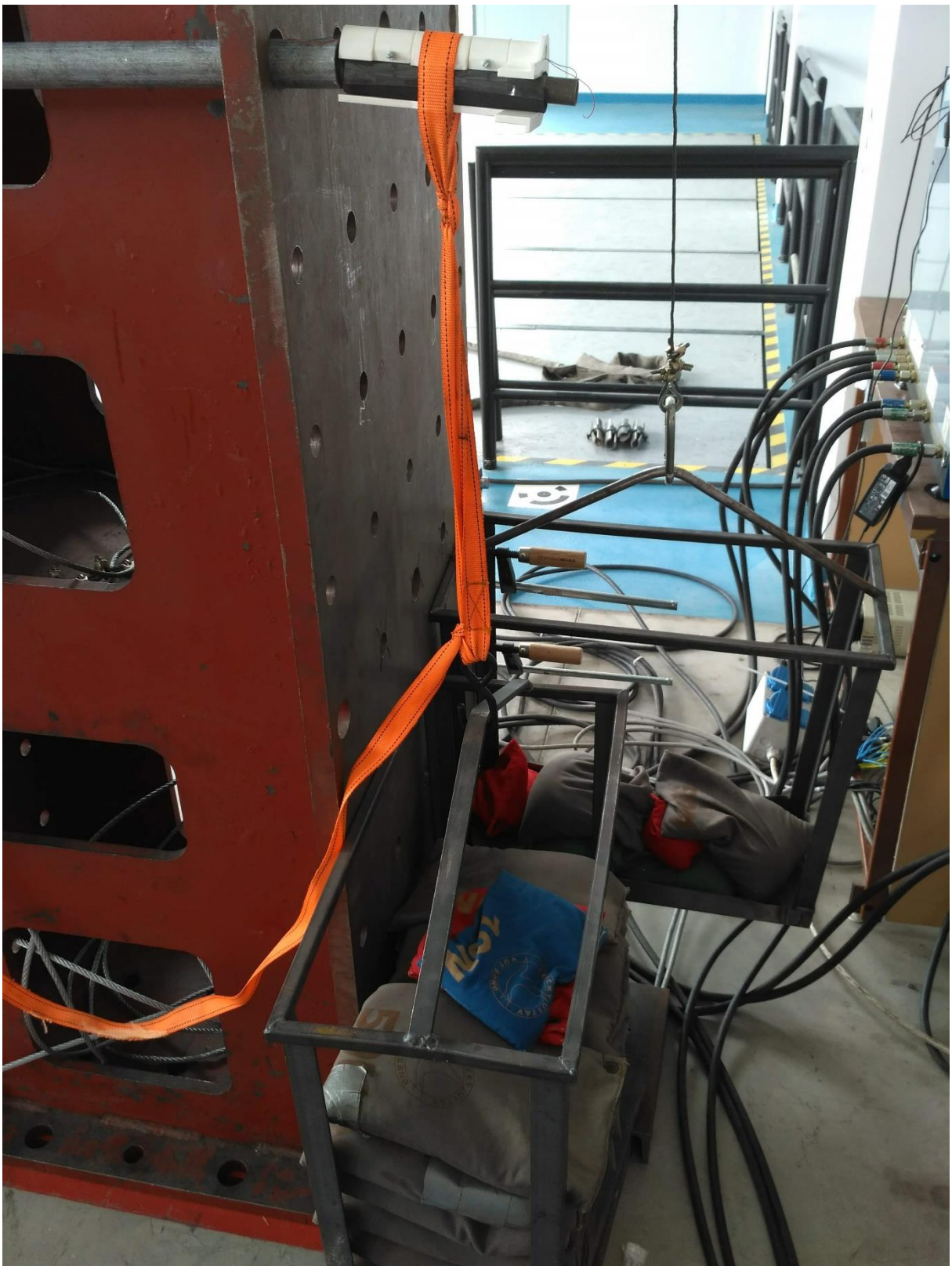
*Foto 4: Zkouška nástavce ŘP, početní zatížení na levou stranu*



*Foto 5: Zkouška nástavce ŘP, rozevírání součástí při početním zatížení na přední straně*



*Foto 6: Zkouška nástavce ŘP, rozevírání součástí při početním zatížení na zadní straně*

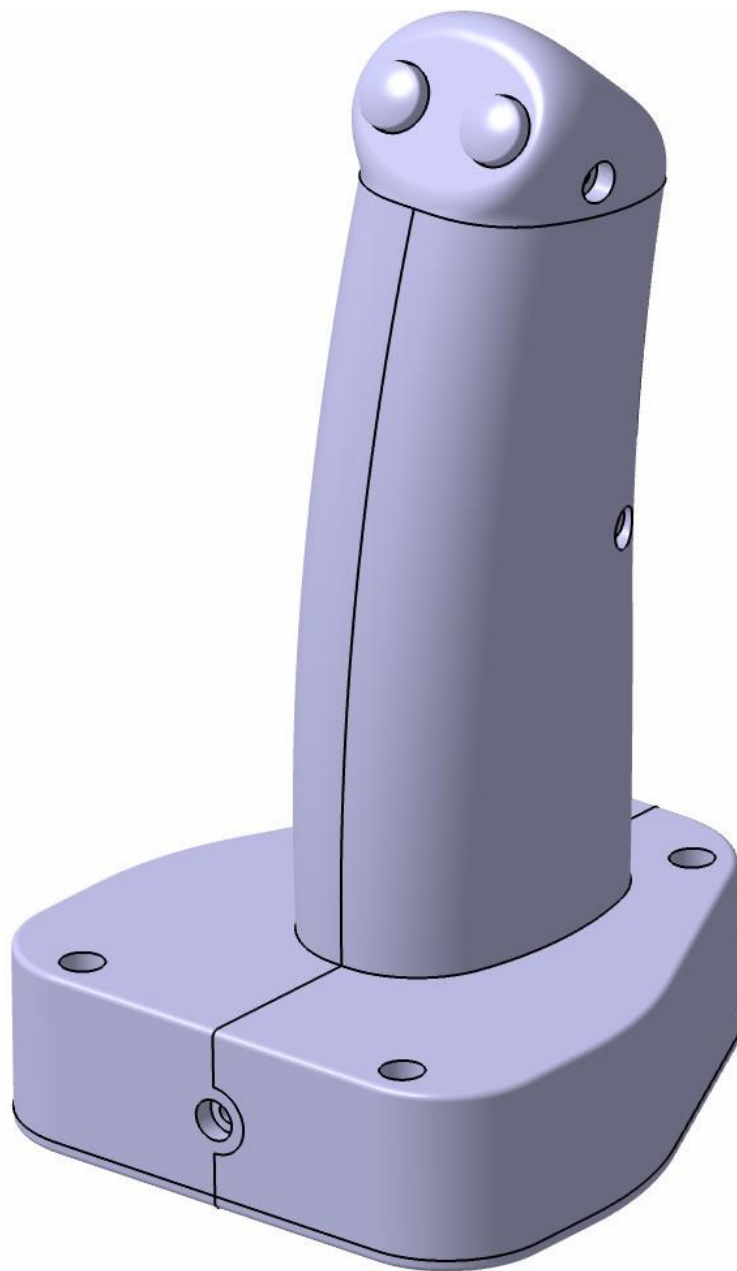


*Foto 7: Zkouška nástavce pedálu, početní zatížení*

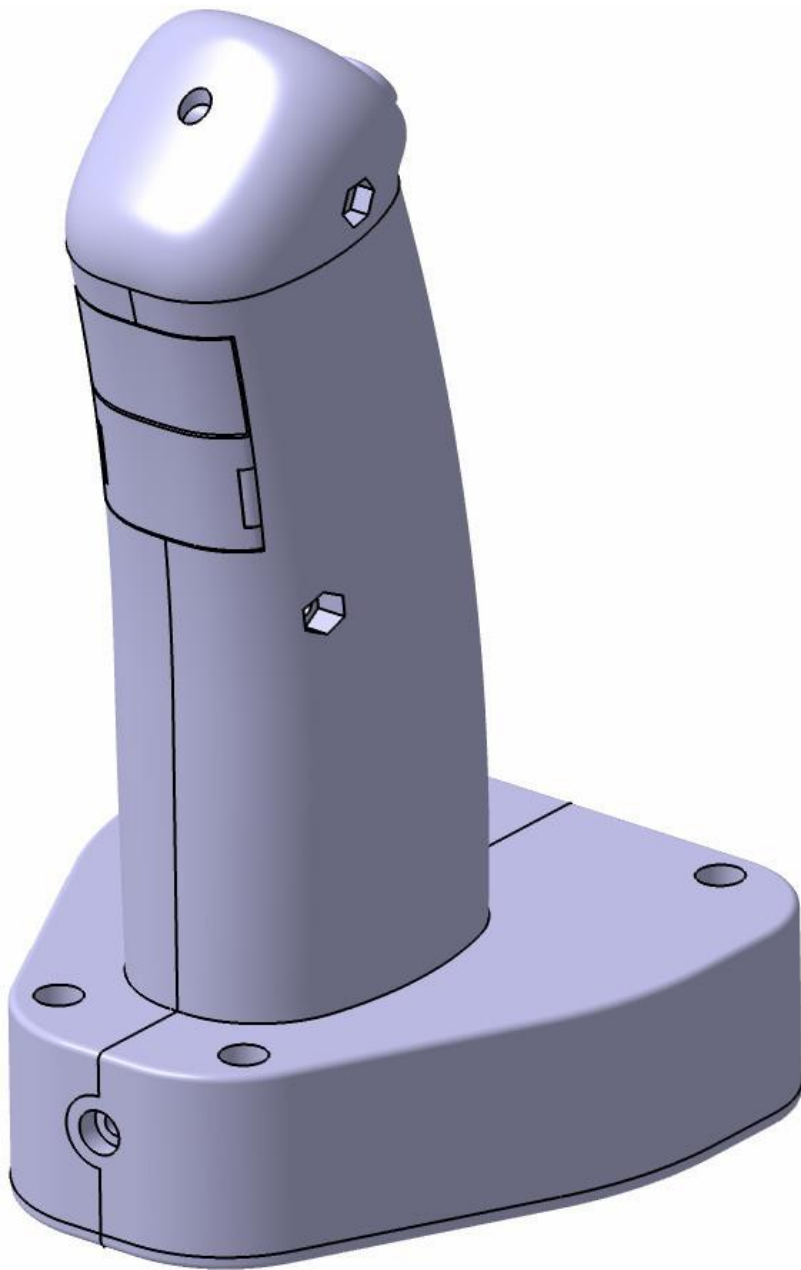


*Foto 8: Zkouška nástavce pedálu, početní zatížení, detail*

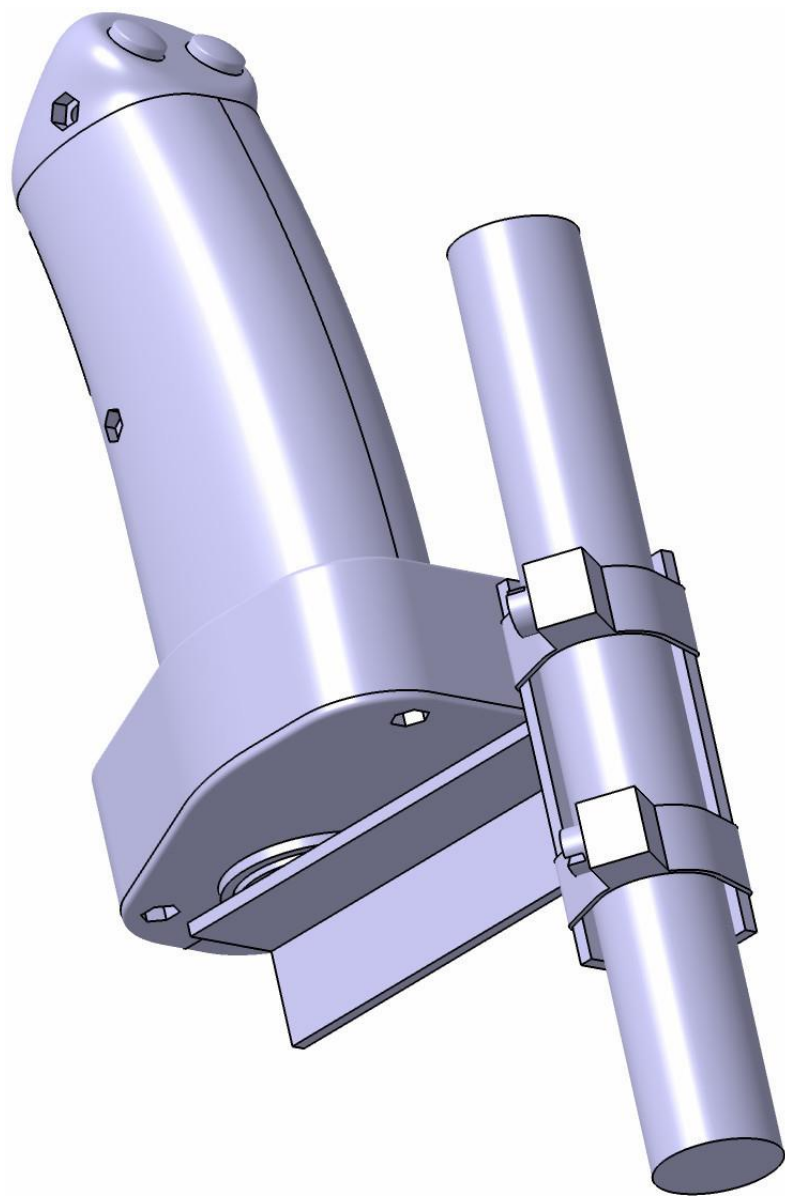




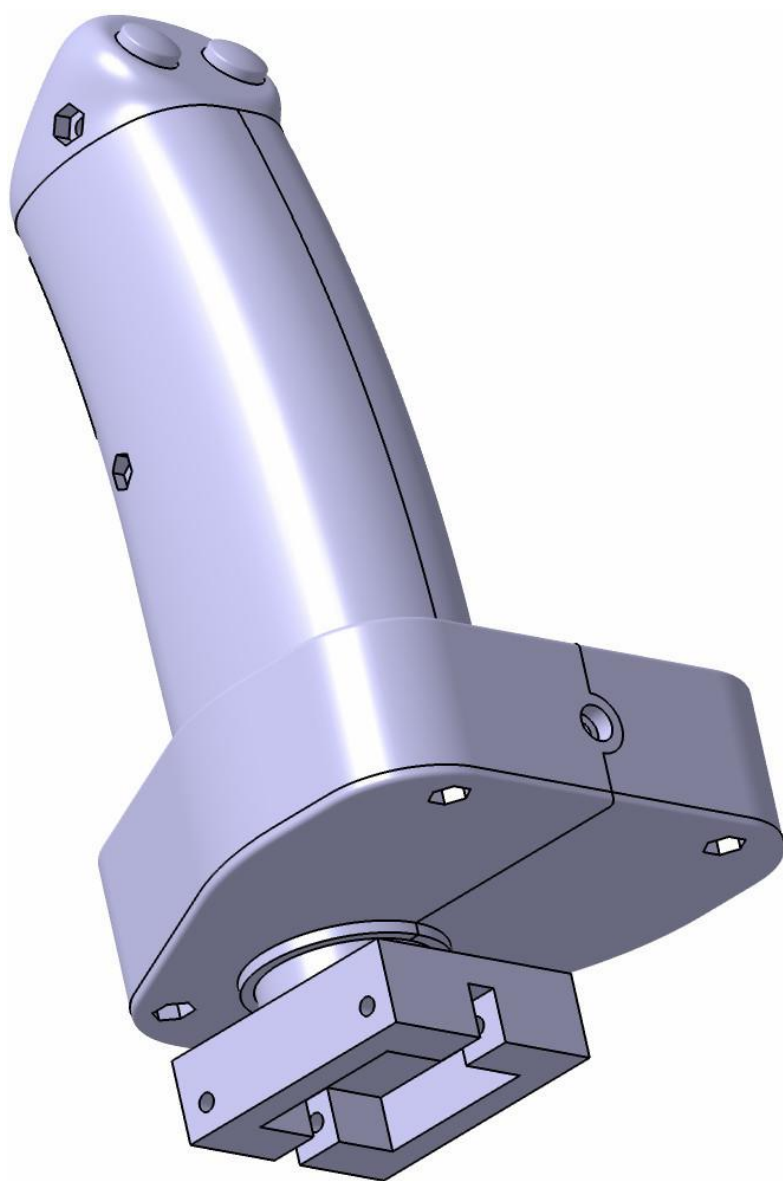
*Snímek 1: Nástavec ŘP, pohled zezadu*



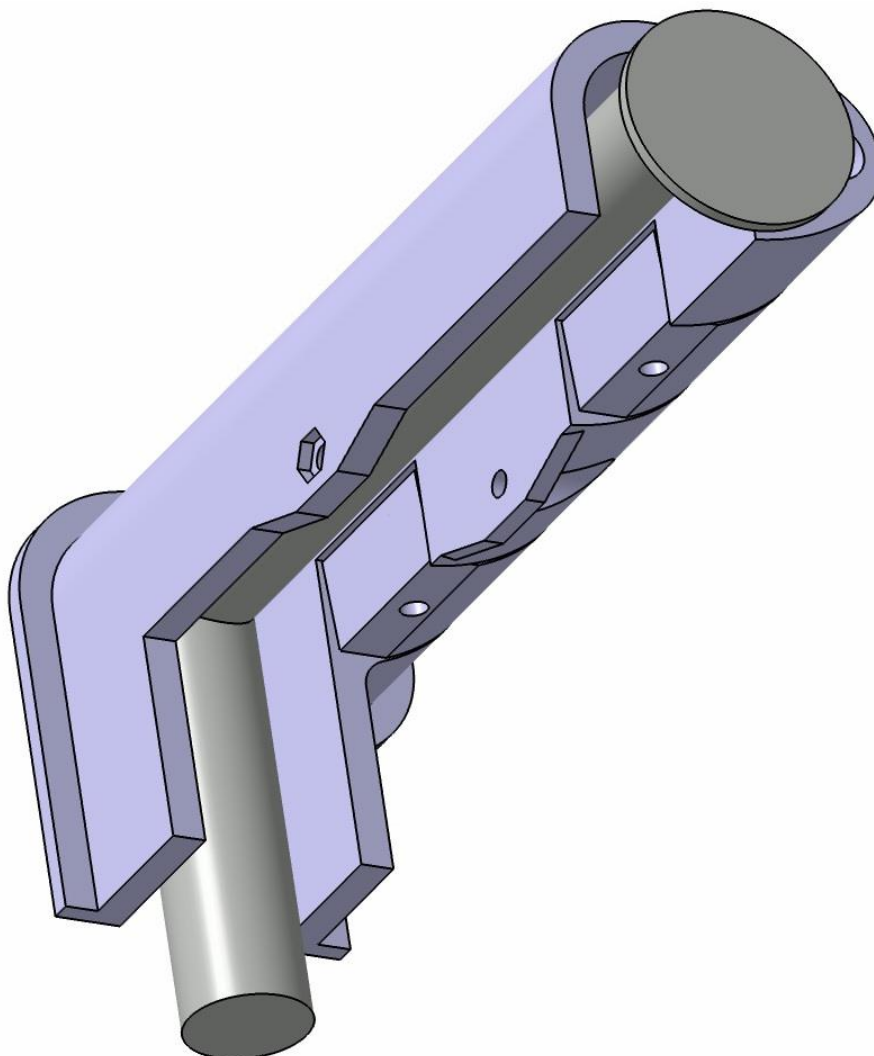
*Snímek 2: Nástavec ŘP, pohled zepředu*



*Snímek 3: Nástavec ŘP a konzola pro zástavbu do letounu*



*Snímek 4: Nástavec ŘP a přechodový díl pro použití na simulátoru*



*Snímek 5: Pedál osazený nástavcem (bez izolace), pohled zespodu na segmenty pro sevření dutin s vibračními motory*