

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2021**

**DANIEL  
VYSOCKÝ**



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav letadlové techniky**

**Návrh primárního řízení sportovního  
letounu**

**Design of racing airplane primary  
control system**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2021**

**Daniel VYSOCKÝ**

**Studijní program:** B2341 STROJÍRENSTVÍ

**Studijní obor:** 3901R051 Konstruování podporované počítačem

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Brabec, Ph.D

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vysocký** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **456168**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh primárního řízení sportovního letounu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of racing airplane primary control system**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Návrh konstrukce
- 2) Stanovení zatížení
- 3) Předběžné dimenzování
- 4) Hmotový rozbor

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jiří Brabec, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

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

Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh primárního řízení sportovního letounu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřím Brabcem Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne.....

Podpis .....

## **Poděkování**

V první řadě bych zde chtěl poděkovat mé rodině za dlouhou a neúnavnou absolutní podporu v celém mém studiu i životě. Obrovský vděk patří mému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Brabcovi Ph.D. za jeho rady, rychlou a vstřícnou komunikaci, vedení a ochotnou spolupráci při tvorbě této bakalářské práce.

Jméno autora: Daniel VYSOCKÝ  
Název BP: Návrh primárního řízení sportovního letounu  
Rok: 2021  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Obor studia: 3901R051 Konstruování podporované počítačem  
Ústav: Ústav letadlové techniky  
Vedoucí BP: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran	45
počet obrázků	55
počet tabulek	20
počet příloh	1

Klíčová slova: Primární řízení, sportovní letoun, UL-2, táhlo, zatížení

Anotace: Cílem této bakalářské práce je navrhnout primární řízení sportovního letounu. Začátek práce se zabývá popisem daného letounu, výběrem stavebního předpisu a obecným popisem řízení letounu. Práce popisuje různé způsoby konstrukce trasy řízení.

Pro daný letoun je v této práci navržena trasa příčného, podélného a směrového řízení včetně konstrukce modelu v programu Autodesk Inventor. Práce obsahuje stanovení zatížení prvků řízení a jejich předběžné dimenzování. Na konci práce je zpracován hmotový rozbor.

Author: Daniel VYSOCKÝ  
Bachelor thesis title: Design of racing airplane primary control system  
Year: 2021  
Study programme: B2341 Strojírenství  
Field of study: 3901R051 Konstruování podporované počítačem  
Department: Ústav letadlové techniky  
Supervisor: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

Bibliographic data:	Number of pages	45
	Number of pictures	55
	Number of tables	20
	Number of attachments	1

Keywords: Primary control, racing airplane, UL-2, rod, load

Annotation: The target of this bachelor thesis is to design primary control system of racing airplane. At the beginning thesis deals with the description of the airplane, the selection of building regulations and general description of aircraft control systems. The thesis describes various ways of aircraft control systems construction.

In the thesis, the route of transverse, longitudinal and directional is designed, including model construction made in Autodesk Inventor software. The thesis contains load determination of control elements and their preliminary dimensioning. At the end of the thesis is processed mass analysis.

# Obsah

Seznam obrázků.....	3
Seznam tabulek.....	4
Přílohy .....	4
Použitý software .....	4
1. Úvod .....	5
2. Popis současného stavu .....	6
2.1. Popis letadla .....	6
2.1.1. Základní definice.....	6
2.1.2. Kategorie soutěže.....	6
2.2. Výběr stavebního předpisu a kategorie .....	6
2.3. Řízení letounu .....	7
2.4. Požadavky na konstrukci systému řízení .....	9
2.4.1. Přesná a správná funkce .....	9
2.4.2. Síly v řízení.....	9
3. Způsoby konstrukce primárního řízení .....	10
3.1. Řídící orgány .....	10
3.1.1. Způsoby ručního řízení .....	10
3.1.2. Způsoby nožního řízení .....	11
3.2. Převody řízení.....	12
3.3. Součásti převodu řízení .....	13
4. Návrh konstrukce.....	15
4.1. Současný stav řídicích ploch .....	15
4.1.1. Výškové kormidlo.....	15
4.1.2. Křídélka .....	15
4.1.3. Směrové kormidlo.....	16
4.2. Předpis UL – 2.....	16
4.2.1. Všeobecné požadavky podle předpisu.....	16
4.2.2. Síly od pilota dle předpisu UL – 2 .....	17
4.2.3. UL 2 § 303 Součinitel bezpečnosti.....	17
4.2.4. UL 2 § 395 Soustavy řízení.....	18
4.2.5. UL 2 § 397 Zatížení silami od pilota .....	18
4.2.6. UL 2 § 411 Tuhost a deformace řídicí soustavy.....	18
4.3. Čárový návrh trasy řízení.....	19
4.3.1. Čárový návrh řídicí páky .....	19
4.3.2. Čárový návrh trasy příčného řízení .....	19
4.3.3. Čárový návrh trasy podélného řízení .....	20



4.3.4.	Čárový návrh trasy směrového řízení .....	21
4.4.	Počtení návrh převodových pák.....	22
4.4.1.	Návrh pák pro příčné řízení .....	22
4.4.2.	Návrh pák pro podélné řízení.....	23
4.4.3.	Návrh převodu směrového řízení.....	24
5.	Stanovení zatížení .....	26
5.1.	Stanovení reakčních sil táhel a pák.....	26
5.2.	Stanovení reakční síly v laně směrového řízení .....	27
6.	Předběžné dimenzování .....	29
6.1.	Dimenzování táhel na vzpěr.....	29
6.2.	Kontrola řídicí páky .....	31
6.3.	Kontrola pedálů směrového řízení .....	32
6.4.	Výběr a dimenzování lana a kladky.....	33
6.5.	Výběr ložisek převodových pák.....	33
6.6.	Vlastní konstrukční řešení.....	34
6.6.1.	Součásti převodu řízení .....	34
6.6.2.	Řídicí páka a její uložení.....	36
6.6.3.	Pedály a jejich uložení .....	37
6.6.4.	Model trasy směrového řízení.....	38
6.6.5.	Model trasy příčného řízení .....	38
6.6.6.	Model podélného řízení .....	39
7.	Hmotový rozbor .....	40
7.1.	Stanovení hmotnosti sestav převodových pák .....	40
7.2.	Stanovení hmotnosti sestav táhel .....	40
7.3.	Stanovení hmotnosti sestavy řídicí páky .....	41
7.4.	Stanovení hmotnosti trasy směrového řízení .....	41
8.	Závěr .....	42

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1. MUŠKA LETOUNU [2].....	5
OBRÁZEK 2.: PŘEHLED ŘÍZENÍ LETOUNU [3].....	7
OBRÁZEK 3.: ŘÍZENÍ VÝŠKOVÉHO KORMIDLA [3] .....	7
OBRÁZEK 4.: ŘÍZENÍ SMĚROVÉHO KORMIDLA [3] .....	8
OBRÁZEK 5.: ŘÍZENÍ KŘIDÉLKY [3] .....	8
OBRÁZEK 6.: SCHÉMA ŘÍZENÍ RUKOJETÍ [4] .....	10
OBRÁZEK 7.: SCHÉMA ŘÍZENÍ VOLANTEM [4] .....	10
OBRÁZEK 8.: SCHÉMA KLUZNÉHO NOŽNÍHO ŘÍZENÍ [4].....	11
OBRÁZEK 9.: SCHÉMA POSUVNÉHO NOŽNÍHO ŘÍZENÍ [4] .....	11
OBRÁZEK 10.: SCHÉMA OHEBNÉHO ŘÍZENÍ LETOUNU [4] .....	12
OBRÁZEK 11.: SCHÉMA TUHÉHO ŘÍZENÍ LETOUNU [4].....	12
OBRÁZEK 12.: SCHÉMA OHEBNÉHO ŘÍZENÍ SMĚROVÉHO KORMIDLA [5] .....	13
OBRÁZEK 13.: ZPŮSOBY UCHYCENÍ KONCOVEK TÁHEL [4] .....	13
OBRÁZEK 14.: JEDNORAMENNÁ PÁKA [4] .....	14
OBRÁZEK 15.: DVOJRAMENNÁ PÁKA [4] .....	14
OBRÁZEK 16.: ZPŮSOB ZAVĚŠENÍ VÝŠKOVÉHO KORMIDLA [7] .....	15
OBRÁZEK 17.: POHLED V ŘEZU ZAVĚŠENÍ U KOŘENE KŘIDÉLKA [6] .....	15
OBRÁZEK 18.: VNĚJŠÍ POHLED NA ZÁVĚSNÉ ČEPY A ČEP ŘÍZENÍ [6] .....	16
OBRÁZEK 19.: KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZAVĚŠENÍ SMĚROVÉHO KORMIDLA S ČEPY PRO ŘÍZENÍ [8] .....	16
OBRÁZEK 20.: ČÁROVÝ NÁVRH RUKOJETI.....	19
OBRÁZEK 21.: ČÁROVÝ NÁVRH PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ – POHLED SHORA .....	20
OBRÁZEK 22.: ČÁROVÝ NÁVRH PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ – POHLED ZEPŘEDU .....	20
OBRÁZEK 23.: ČÁROVÝ NÁVRH PODÉLNÉHO ŘÍZENÍ – POHLED ZBOKU .....	20
OBRÁZEK 24.: ČÁROVÝ NÁVRH SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ – POHLED SHORA .....	21
OBRÁZEK 25.: ČÁROVÝ NÁVRH SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ – POHLED ZBOKU .....	21
OBRÁZEK 26.:SCHÉMATA NAVRŽENÝCH PÁK 1 A 2 PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	23
OBRÁZEK 27.: SCHÉMATA NAVRŽENÉ PÁKY 3 A ŘÍDICÍ PÁKY PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	23
OBRÁZEK 28.: SCHÉMA NAVRŽENÉ PÁKY A ŘÍDICÍ PÁKY PODÉLNÉHO ŘÍZENÍ .....	24
OBRÁZEK 29.:SCHÉMA PEDÁLU .....	25
OBRÁZEK 30.: SCHÉMA SIL V RUKOJETI PRO PŘÍČNÉ ŘÍZENÍ .....	26
OBRÁZEK 31.: SCHÉMA SIL V PÁCE 1 PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	27
OBRÁZEK 32.:SCHÉMA SIL V PEDÁLU SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ .....	27
OBRÁZEK 33.: SCHÉMA SIL PRO KONTROLU.....	31
OBRÁZEK 34.: SCHÉMA SIL PEDÁLU PRO KONTROLU NA OHYB A KRUT .....	32
OBRÁZEK 35.: SCHÉMA SIL PEDÁLU.....	32
OBRÁZEK 36.: TÁHLA 1 PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	34
OBRÁZEK 37.: DOMEK KONCOVKY.....	34
OBRÁZEK 38.: ULOŽENÍ KONCOVKY VE TVARU VIDLIČKY .....	34
OBRÁZEK 39.: ULOŽENÍ KONCOVKY VE TVARU OKA.....	34
OBRÁZEK 40.: KLOUBOVÉ LOŽISKO [16].....	35
OBRÁZEK 41.: PÁKA 1 PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	35
OBRÁZEK 42.: PÁKA 2 PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	35
OBRÁZEK 43.: PÁKA 3 PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ .....	36
OBRÁZEK 44.: PÁKA PODÉLNÉHO ŘÍZENÍ .....	36
OBRÁZEK 45.: ŘÍDICÍ PÁKA .....	36
OBRÁZEK 46.: DETAIL ŘÍDICÍ PÁKY .....	36
OBRÁZEK 47.: NÁVRH PEDÁLŮ SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ .....	37
OBRÁZEK 48.: DETAIL ZAJIŠTĚNÍ LANA K PEDÁLU .....	37
OBRÁZEK 49.: OČNICE LANA [18].....	37
OBRÁZEK 50.: MODEL TRASY SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ – POHLED Z BOKU .....	38
OBRÁZEK 51.: MODEL TRASY SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ – POHLED ZEPŘEDU.....	38
OBRÁZEK 52.: PŘÍČNÉ ŘÍZENÍ – DETAIL ULOŽENÍ U ŘÍDICÍ PÁKY .....	39
OBRÁZEK 53.: PŘÍČNÉ ŘÍZENÍ POHLED SHORA .....	39
OBRÁZEK 54.: PODÉLNÉ ŘÍZENÍ .....	39
OBRÁZEK 55.: MODEL PRIMÁRNÍHO ŘÍZENÍ SPORTOVNÍHO LETOUNU.....	43

## Seznam tabulek

TABULKA 1.: KATEGORIE SOUTĚŽE[1] .....	6
TABULKA 2.: MAXIMÁLNÍ HODNOTY SIL OD PILOTA [10] .....	17
TABULKA 3.: SOUČINITELÉ BEZPEČNOSTI [10].....	17
TABULKA 4.: ZATÍŽENÍ SILAMI OD PILOTA [10].....	18
TABULKA 5.: ZAVEDENÉ SÍLY PRO KONTROLU TUHOSTI [10].....	18
TABULKA 6.: ZVOLENÉ ÚHLY NATOČENÍ ŘÍDÍCÍCH PLOCH .....	22
TABULKA 7.: PŘEVODOVÉ POMĚRY A ROZMĚRY RAMEN PŘEVODOVÝCH PÁK PŘÍČNÉHO ŘÍZENÍ.....	22
TABULKA 8.: PŘEVODOVÉ POMĚRY A ROZMĚRY RAMEN PŘEVODOVÝCH PÁK PODÉLNÉHO ŘÍZENÍ .....	23
TABULKA 9.: PŘEHLED NAVRŽENÝCH POSUVŮ.....	25
TABULKA 10.: VLASTNOSTI MATERIÁLŮ [11].....	26
TABULKA 11.: REAKČNÍ SÍLY V OSE OTÁČENÍ.....	28
TABULKA 12.: SÍLY V TÁHLECH A LANĚ .....	28
TABULKA 13.: DÉLKY TÁHEL .....	29
TABULKA 14.: PŘEHLED PRŮMĚRŮ A HMOTNOSTI TÁHEL .....	30
TABULKA 15.: ROZMĚRY A VLASTNOSTI LOŽISKA SKF – 629 [17].....	33
TABULKA 16.: ROZMĚRY KLOUBOVÉHO LOŽISKA [16] .....	35
TABULKA 17.: HMOTNOST PŘEVODOVÝCH PÁK.....	40
TABULKA 18.: HMOTNOST TÁHEL.....	40
TABULKA 19.: HMOTNOST KOMPONENTŮ TRASY SMĚROVÉHO ŘÍZENÍ .....	41
TABULKA 20.: PŘEHLED HMOTNOSTÍ TRAS ŘÍZENÍ.....	41

## Přílohy

Příloha 1: CAD model soustavy primárního řízení

## Použitý software

Autodesk Inventor Professional 2020

Microsoft Office Word 2013

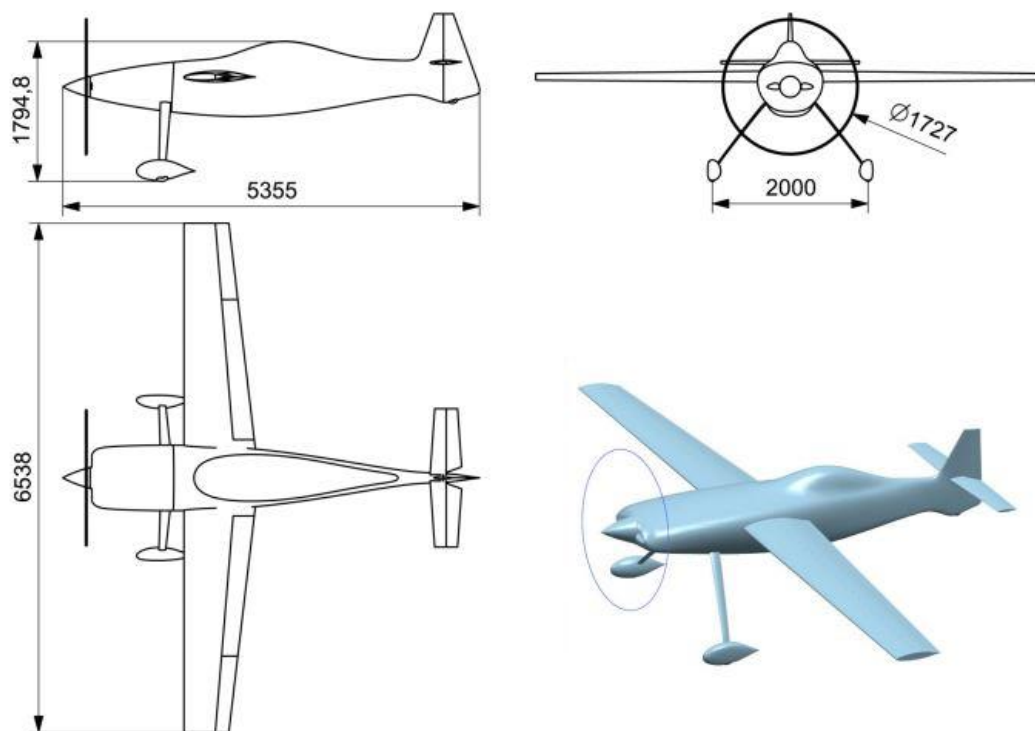
Microsoft Office Excel 2013

# 1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh primárního řízení sportovního letounu, který je nyní ve vývoji na Ústavu letadlové techniky fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze. Práce se bude zabývat konstrukčním řešením a návrhem řízení směrového kormidla, výškového kormidla a křidélek.

Motivací pro vývoj nového sportovního letounu je pokoření světového rychlostního rekordu v dané kategorii podle Mezinárodní letecké federace FAI.

Souběžně s nárůstem zájmu veřejnosti o sportovní letectví stoupá zájem o ultralehká sportovní letadla. Tyto letadla mají specifické požadavky na vlastnosti a různá konstrukční omezení dané předpisem UL – 2 vydaným v roce 2019. Předpis oproti starším vydáním povoluje maximální hmotnost letounu na 600 kg a maximální pádovou rychlost na 83 km/h. Tímto se konstrukce ultralehkých sportovních letadel stává do jisté míry specifickou. Tato bakalářská práce bude vycházet z diplomové práce Bc. Jakuba Valenty – Koncepční návrh rychlostního letounu a bakalářských prací: Lukáše Hofrichtera – Návrh výškového kormidla rychlostního letounu, Tomáše Rubánka – Návrh křídélka pro rychlostní letoun a Jiřího Němce – Návrh směrového kormidla sportovního letounu.



Obrázek 1. Muška letounu [2]

## 2. Popis současného stavu

### 2.1. Popis letadla

#### 2.1.1. Základní definice

Aerodyn – letoun těžší než vzduch, který za letu získává vztlak primárně z aerodynamických sil. [1]

Aeroplane – aerodyn s pevným křídlem s propulsním pohonem. [1]

Jetlift – letoun schopný vzletu, udržení vznášejícího se nebo dopředného letu a přistání s pomocí vztlaku vzniklého přímo z tahu jednoho nebo více proudových motorů, které jsou integrovány do letounu. Tyto motory nevyžadují vztlak způsobený vnějšími plochami během vzletu a přistání a také mohou zajistit dopředný tah letounu. [1]

#### 2.1.2. Kategorie soutěže

Letouny se řadí do mnoha kategorií dle kritérií v následujících tabulkách:

Třídy:	C	Aeroplanes
	H	Jetlift
Třída C - přistání	C-1	Landplanes (pevninské)
	C-2	Seaplanes (hydroplány)
	C-3	Amphibians (obojživelné)
Typy pohonu	Group I	Internal combustion (s vnitřním spalováním)
	Group II	Turboprop (turbovrtulový)
	Group III	Jet (proudový)
	Group IV	Rocket and rocket assisted (raketový)
	Group V	Scramjet (náporový)
	Group VI	Electric (elektrický)

Tabulka 1.: Kategorie soutěže[1]

### 2.2. Výběr stavebního předpisu a kategorie

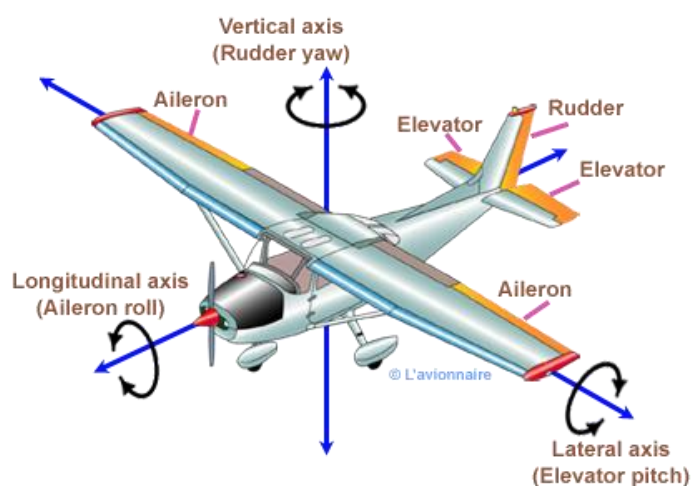
„Kategorie Aeroplanes nerozděluje hmotnostní třídy podle MTOM, ale podle maximální hmotnosti, kterou letoun během závodního letu dosáhne, přičemž pádová rychlost není vůbec definována. Bylo tedy rozhodnuto, že navrhovaný letoun bude certifikován podle nového znění předpisu UL-2 [10] a bude soutěžit v kategorii Aeroplanes. Myšlenka je taková, že se navrhne letadlo s MTOM vyšší než 300 kg, přičemž kratší tratě, na jejichž zdolání je potřeba méně paliva a hmotnost letounu bude pod 300 kg, se poletí v kategorii C-1a/o. Delší tratě se poletí v kategorii C-1a s tím, že množství potřebného paliva bude větší a maximální hmotnost letounu během letu bude vyšší než 300 kg.“ [2]

## 2.3. Řízení letounu

Letadla mohou být řízeny buď změnou polohy těžiště vzhledem k pevné poloze výsledné aerodynamické síly letadla – v tomto případě mluvíme o inerčním řízení nebo přemisťováním polohy výsledné aerodynamické síly vzhledem k pevné poloze těžiště letadla – v tomto případě mluvíme o aerodynamickém řízení. U některých nadzvukových letadel a letadel se svislým startem se případně používá vektorové řízení, které používá ke změně vyváženého stavu vychylování proudu výtokových plynů za motorem. [9]

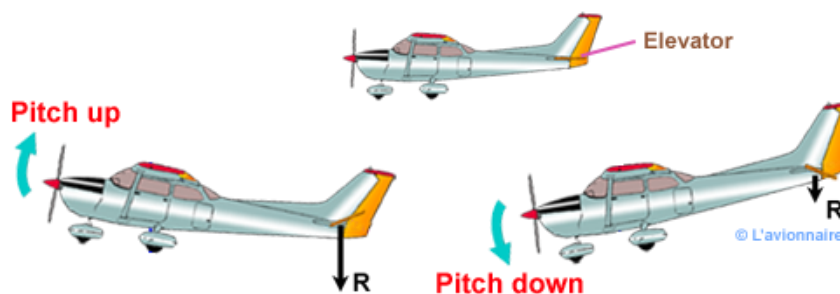
Řízení kormidel se dá rozdělit na dvě nezávislé soustavy - na ruční řízení a nožní řízení, kde ručním řízením ovládáme řízení křídélek a výškového kormidla. Nožním řízením ovládáme směrové kormidlo. [4]

Na obrázku 2 jsou oranžovou barvou znázorněné jednotlivé řídicí plochy: křídélka (aileron), výškové kormidlo (elevator) a směrové kormidlo (rudder), modrou barvou jsou vyznačeny vztažné osy.



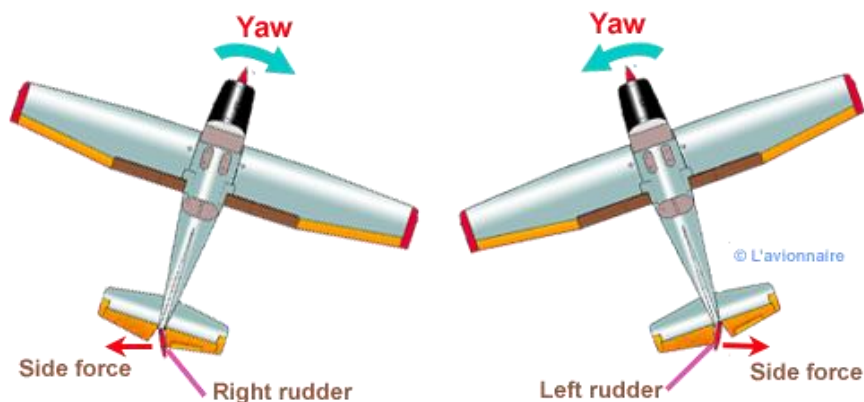
Obrázek 2.: Přehled řízení letounu [3]

Řízení letounu odpovídá lidským reflexům kde se pohyby rukou a nohou snaží pilot dosáhnout rovnováhy. Při pohybu ruky k tělu se výškové kormidlo vychýlí nahoru a nos letounu se zvedá, letadlo začíná stoupat (Obrázek 3 - levá vizualizace). Při pohybu ruky od těla se výškové kormidlo vychýlí dolů a nos letadla klesá (Obrázek 3 - pravá vizualizace). [4]



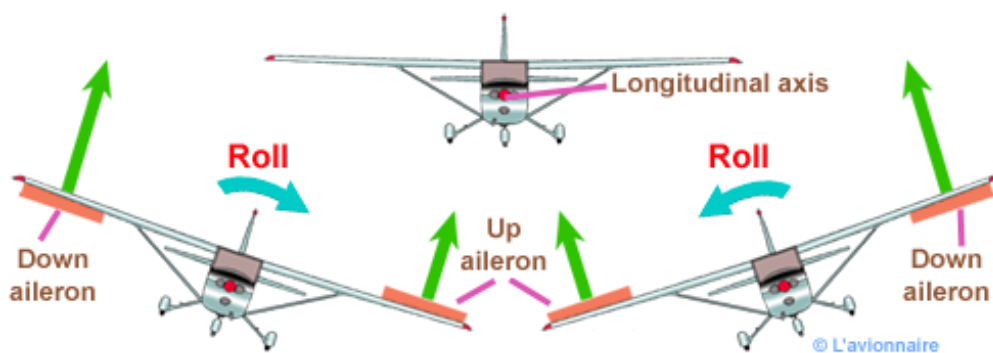
Obrázek 3.: Řízení výškového kormidla [3]

V případě směrového kormidla se pro vychýlení směrovky doprava a zatáčení letounu doprava pohne pravá noha dopředu (Obrázek 4 – levá vizualizace). Pro zatočení vlevo se použije opačný způsob a to pohnutí levé nohy dopředu (Obrázek 4 - pravá vizualizace). [4]



Obrázek 4.: Řízení směrového kormidla [3]

Naklonění nebo rotaci letounu dosáhneme pohyby rukou doleva nebo doprava, v tomto případě se pohybují křídélka na obou křídlech. Pro naklonění na levé křídlo se ruka pohne doleva, levé křídélko se vychýlí nahoru a pravé křídélko dolů (Obrázek 5 - levá vizualizace). Naklonění letadla na pravé křídlo dosáhneme pohnutím ruky doprava. V tomto případě se pravé křídélko vychýlí nahoru a levé dolů (Obrázek 5 - pravá vizualizace). [4]



Obrázek 5.: Řízení křídélky [3]

## 2.4. Požadavky na konstrukci systému řízení

### 2.4.1. Přesná a správná funkce

Požadavek na přesnou funkci řízení letounu znamená, že ve stejné konfiguraci a při stejném režimu letu bude mít letoun na povel pilota vždy stejnou odezvu.

Předpokladem pro přesnou funkci řízení letounu je dokonale pracující kinematika všech tras řízení, která umožní dosažení:

- všech požadovaných výchylek kormidel.
- lineárního nebo požadovaného převodu podél výchylky řízení s ohledem na průběh sil.
- toho, že v žádné poloze řízení nedojde k směšování funkce mezi jednotlivými trasami.
- toho, že vliv deformací draku, transmisí řízení a ovládacích pák pod zatížením na výchylky kormidel je omezen na přijatelnou míru s ohledem na říditelnost a stabilitu letounu. [9]

Správně fungující řízení je takové řízení, kde jsou vyloučeny nebo potlačeny všechny vlivy, které by mohly ohrozit bezpečnost letu nebo omezit způsobilost řízení.

Požadavky na správně fungující řízení:

- V jakékoliv poloze řízení nesmí části řízení přijít do kontaktu s drakem letounu, částmi jiných systémů, interiérem pilotní kabiny a plné výchylky nesmí být omezeny tělem pilota.
- Při změně smyslu maximální síly od pilota by neměl součet vůlí a netuhostí celého řetězce řízení přesáhnout 10% výchylky bez zatížení.
- Parazitní síly a tření musí být omezeny na přijatelnou míru. [9]

### 2.4.2. Síly v řízení

System řízení je zatěžován:

1. Vzdušnými silami, které působí na řídicí plochy, respektive momenty těchto sil působící na osu otáčení dané řídicí plochy.
2. Silami od pilota na řídicí páky. Zde patří síly posilovačů a nezávislých zdrojů. [9]

*„Vzdušné síly a momenty musí být vyváženy reakcemi v závěsech a silou na páce řídicí plochy, kterou je řídicí plocha připojena ke koncovému bodu transmise řízení.“ [9]*

Povolené síly od pilota jsou dány jednotlivými předpisy. V tomto případě se bude jednat o předpis UL - 2 vydaný v roce 2019. Tyto síly budou blíže popsány v kapitole: 4.2.



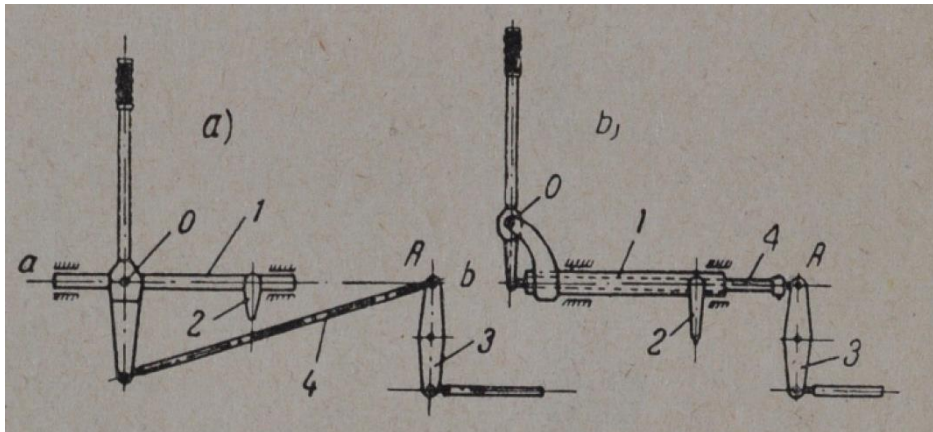
### 3. Způsoby konstrukce primárního řízení

#### 3.1. Řídicí orgány

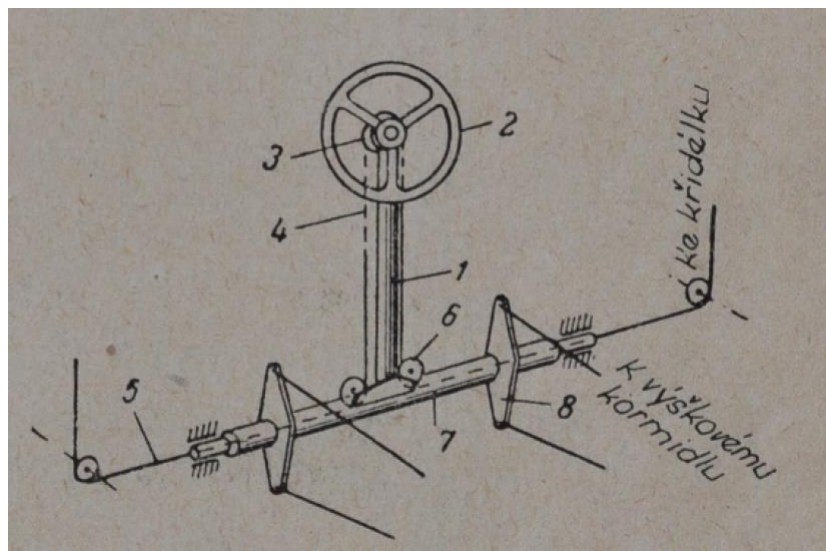
##### 3.1.1. Způsoby ručního řízení

Ruční řízení lze rozdělit na:

- Řízení rukojetí nebo řídicí pákou – obrázek 6. Jedná se o svisle umístěnou páku se dvěma stupni volnosti. Díky dolnímu kloubovému uložení je možné vychylovat páku vpřed a vzad pro řízení výškového kormidla a také napravo a nalevo pro řízení křidélek. [4]



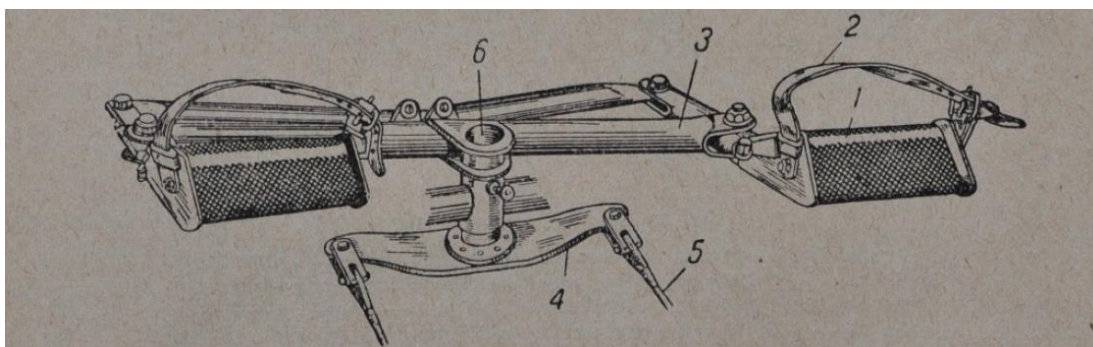
- Volantem – obrázek 7. Řízení se skládá ze stojanu a volantu tak zařízeného, že se může stojan vychylovat vpřed a vzad pro řízení výškového kormidla. Řízení křidélek je zajištěno otáčením volantu. [4]



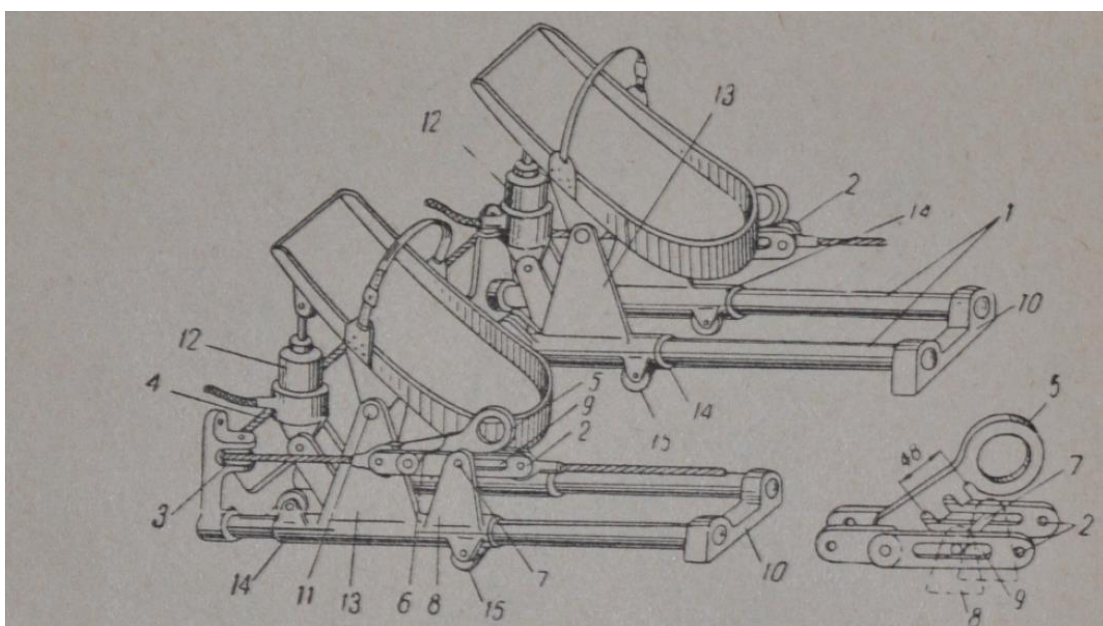
- Rukojetí na stojanu – jedná se o kombinaci rukojeti a volantu. Rukojeť se v určité vzdálenosti od horního konce lomí a v dolní části je spojena kloubem. Horní část se tak pohybuje vlevo a vpravo pro řízení křidélek. Dolní část rukojeti se může vychylovat jen vpřed a vzad pro ovládání výškového kormidla. Toto řešení není příliš rozšířené. [4]

### 3.1.2. Způsoby nožního řízení

Směrové řízení se řeší pomocí pohybu pedálů. Rozdělit je lze podle pedálů s kluzným řízením (viz Obrázek 8) nebo s posuvným řízením (viz Obrázek 9). [4]



Obrázek 8.: Schéma kluzného nožního řízení [4]



Obrázek 9.: Schéma posuvného nožního řízení [4]

## 3.2. Převody řízení

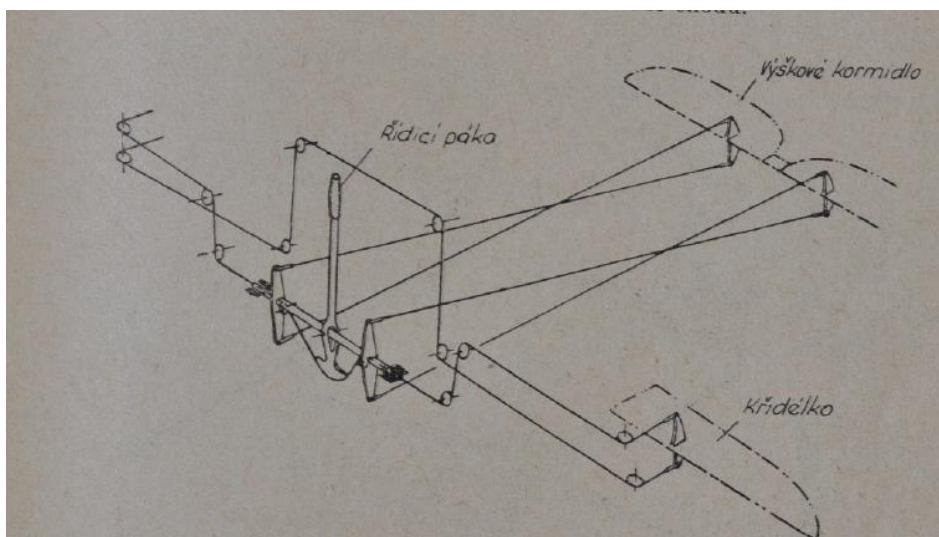
Převody řízení lze rozdělit na:

- Ohebné
- Tuhé
- Smíšené

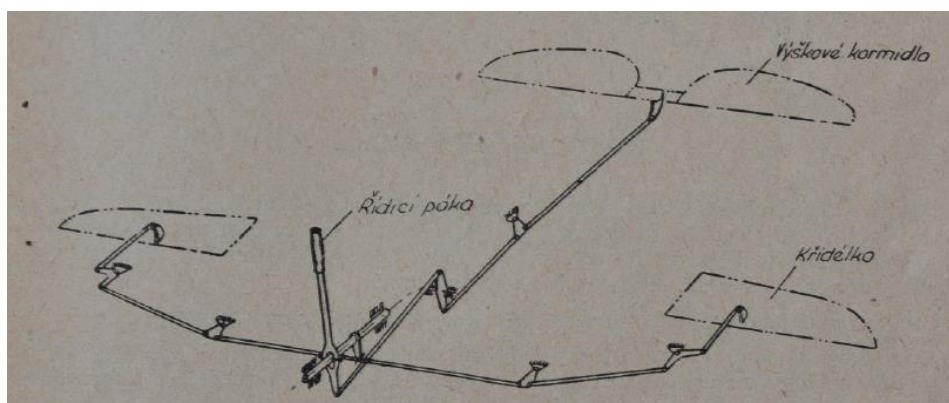
Ohebnými převody bývají lana. Pomocí kladek se u lan dá měnit náhle směr převodu a vést převod v konstrukčně nejvýhodnějších místech. Výhodou ohebného převodu je nízká hmotnost. Nevýhodou je tření v místech ohybu lan a protahování lana. Může dojít také k pružné deformaci lana, která způsobí mrtvý chod na páce – pohyb rukojeti bez vychýlení kormidla. Ohebný převod se nejčastěji používá pro nožní řízení – řízení směrového kormidla. [4]

Výhodou tuhého převodu je vyšší trvanlivost, menší tření v kloubech, nemá mrtvý chod a nepruží. Je citlivější než lanový převod. Tuhý převod je nejčastěji navrhován z táhel vyráběných z tenkostěnných duralových trubek. [4]

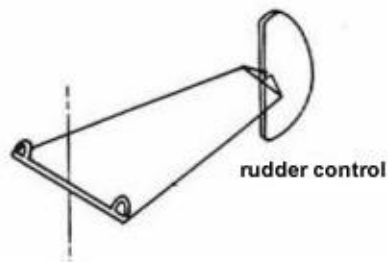
Smíšený převod je kombinace ohebného převodu a tuhého převodu. Převod se v kabině a poblíž kormidel navrhuje z táhel a ve zbylé části se používá lano. [4]



Obrázek 10.: Schéma ohebného řízení letounu [4]



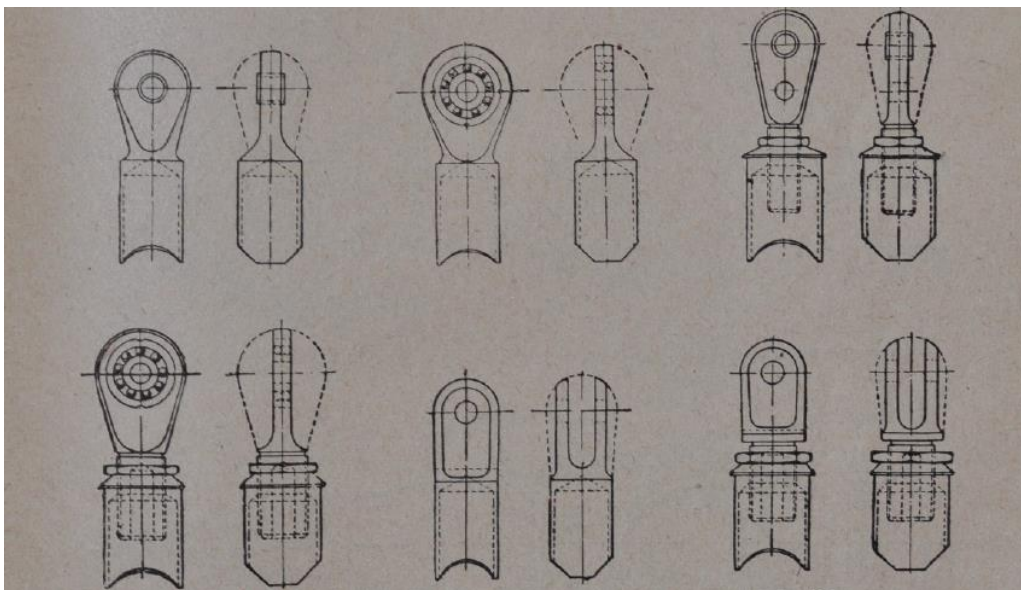
Obrázek 11.: Schéma tuhého řízení letounu [4]



Obrázek 12.: Schéma ohebného řízení směrového kormidla [5]

### 3.3. Součásti převodu řízení

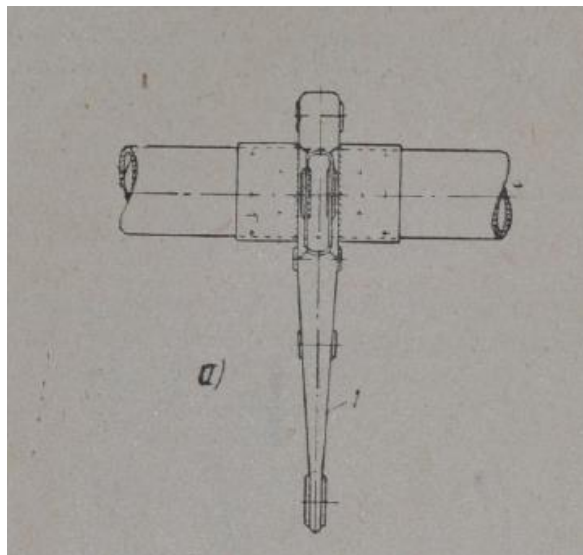
Mezi součásti převodového řízení patří táhla, lana, páky, vodítka, kladky a ložiska. Táhla se v drtivé většině případů volí duralová. V krajních případech ocelová a to výhradně pro malé délky. Táhla nesmějí být velmi dlouhá z důvodů možných vibrací – nepoužívají se delší než 2 m. Na koncích táhel jsou koncovky pro kloubové spoje. Koncovky jsou ve tvaru oka nebo vidlice (viz Obrázek 13). [4]



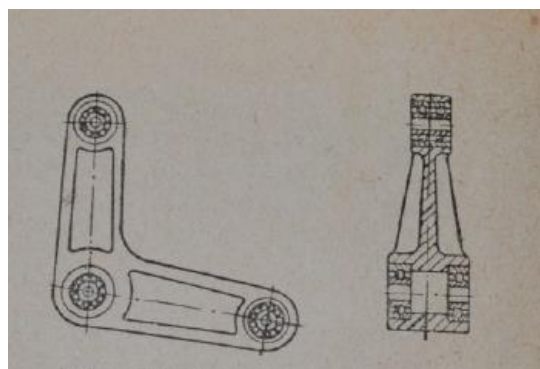
Obrázek 13.: Způsoby uchycení koncovek táhel [4]

## Způsoby konstrukce převodových pák

Páky jsou konstruovány jako jednoramenné (Obrázek 14), nebo dvojramenné (Obrázek 15). V ose otáčení jsou umístěny kuličková ložiska a na koncích ramen jsou nalisována ložiska kloubová.



Obrázek 14.: Jednoramenná páka [4]



Obrázek 15.: Dvojramenná páka [4]

## 4. Návrh konstrukce

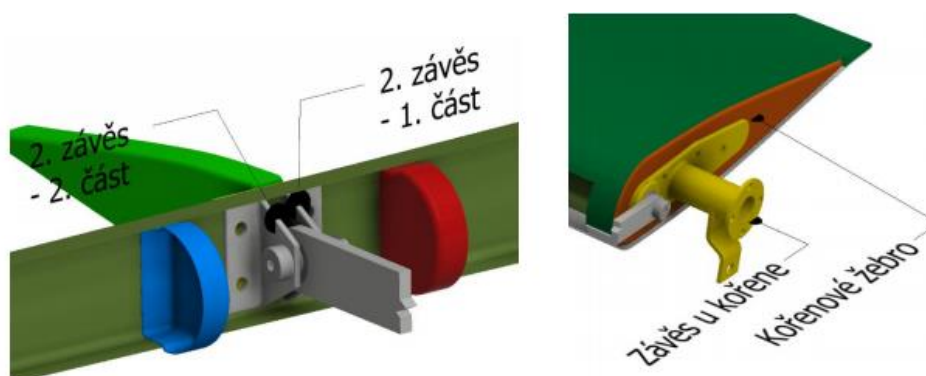
Cílem této kapitoly je navrhnout trasy řízení v letounu a výpočet potřebných posuvů pák a pedálů. Na základě navržené trasy se stanoví délky táhel a zvolí se délky ramen převodových pák, z kterých vyplynou převodové poměry pák.

### 4.1. Současný stav řídicích ploch

V této části jsou zobrazeny již navržené řídicí plochy, ke kterým bude navrhována a napojena trasa řízení.

#### 4.1.1. Výškové kormidlo

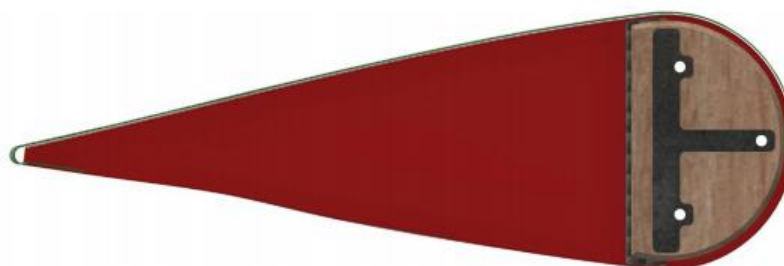
Řízení výškového kormidla je řešeno pomocí páky náhonu přivažené k trubce z materiálu AISI 4130. [7]



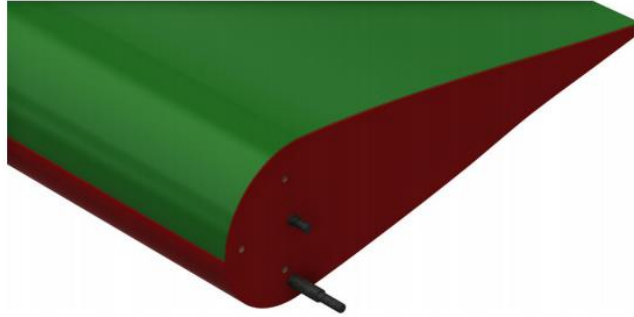
Obrázek 16.: Způsob zavěšení výškového kormidla [7]

#### 4.1.2. Křídélka

Křídélka jsou konstruována se třemi žebry, dvě krajní a jedno v místě druhého závěsu. Zavěšení ke křídlu je řešeno pomocí dvou závěsů, jeden u kořene křídélka a druhý umístěný tak, aby namáhání křídélka bylo co nejmenší. Ovládání křídélka je zamýšleno u kořene v podobě tuhého táhla. [6]



Obrázek 17.: Pohled v řezu zavěšení u kořene křídélka [6]



Obrázek 18.: Vnější pohled na závěsné čepy a čep řízení [6]

### 4.1.3. Směrové kormidlo

Spodní závěs vyrobený z konstrukční oceli AISI 4130 obsahuje dva čepy pro uchycení řízení. Tyto čepy jsou vzdálené 35 mm od osy otáčení. Na středový čep je umístěno ložisko. Závěs je přichycen šroubovým spojením ke kořenovému žebrou. [8]

Řízení směrového kormidla je zamýšleno pomocí lanového převodu.



Obrázek 19.: Konstruktivní řešení zavěšení směrového kormidla s čepy pro řízení [8]

## 4.2. Předpis UL – 2

### 4.2.1. Všeobecné požadavky podle předpisu

Letoun musí být bezpečně říditelný a manévrování schopný při:

- Vzletu s maximálním vzletovým výkonem
- Stoupání
- Vodorovném letu
- Klesání
- Přistání s motorem v chodu i s motorem vypnutým
- Náhlém vysazení motoru

„Letoun musí být schopen provádět za všech pravděpodobných letových podmínek plynulý přechod z jedné letové polohy do druhé (včetně zatáček, pokud jsou na základě konfigurace možné) bez mimořádných nároků na pilotní dovednost, pohotovost a sílu pilota

a bez nebezpečí překročení provozních násobků při každé přípustné změně výkonu motoru nebo jeho náhlému vysazení. Mírné odchylky od doporučených postupů nesmí vést k nebezpečné letové situaci.“ [10]

#### 4.2.2. Síly od pilota dle předpisu UL – 2

Síly od pilota nesmí překročit maximální hodnoty uvedené v následující tabulce:

	Výškové řízení	Příčné řízení	Směrové řízení	Vztlakové klapky, podvozek
	[daN]	[daN]	[daN]	[daN]
Krátkodobá činnost	20	10	40	10
Dlouhodobější činnost	2	1,5	10	

Tabulka 2.: Maximální hodnoty sil od pilota [10]

##### Výškové řízení:

Při rychlostech nižší než  $1,3 V_{S1}$  musí být možné činností výškového řízení změnit sklon podélné osy tak aby letoun opět rychle získal rychlost  $1,3 V_{S1}$ . [10]

##### Příčné a směrové řízení:

Při odpovídající činnosti řízení musí být možné přejít ze zatáčky s  $30^\circ$  náklonem do zatáčky opačného smyslu a to během 5 sekund při rychlosti  $1,3 V_{S1}$  při vysunutém podvozku a s vysunutými vztlakovými klapkami. [10]

##### Síla do výškového řízení při manévru:

„Letoun musí prokázat takové síly do výškového řízení, které rostou v zatáčce nebo při vybírání obratu s ustálenou rychlostí úměrně násobku a to při všech rychlostech, při kterých může být dosaženo požadovaného normálního zrychlení bez přetažení a to současně se zasunutými vztlakovými klapkami a tam, kde je použit i se zataženým podvozkem.“ [10]

#### 4.2.3. UL 2 § 303 Součinitel bezpečnosti

Pokud není uvedena jiná hodnota, musí se použít součinitel bezpečnosti 1,5. [10]

Součinitel bezpečnosti je nutno vynásobit doplňkovým součinitelem bezpečnosti pokud je uveden v následující tabulce:

Aplikace	Doplňkový součinitel bezpečnosti	Výsledný součinitel bezpečnosti
Spoje s vůlí zatížené rázovým namáháním nebo vibracemi	2	3
Závěsy kormidel (mimo valivých a kloubových ložisek)	4,44	6,67
Ložiska (klouby) v řízení táhly	2,2	3,3
Ložiska (klouby) v lanovém řízení	1,33	2
Odlitky	2	3

Tabulka 3.: Součinitelé bezpečnosti [10]



#### 4.2.4. UL 2 § 395 Soustavy řízení

„Všechny části soustavy řízení mezi dorazem a řídicí plochou musí být navrženy zatížení odpovídající minimálně 125 % zatížení řídicích ploch podle bodů UL 2 § 423 a UL 2 § 441 a UL 2 § 455 dostupné z předpisu UL-2 z roku 2019.“ [10]

#### 4.2.5. UL 2 § 397 Zatížení silami od pilota

„Všechny řídicí soustavy letounu a všechny místa jejich uchycení nebo podepření musí být navrženy až po dorazy na provozní zatížení, která jsou definována v následující tabulce sil od pilota.“ [10]

Řízení	Působící síla [daN]	Způsob zavedení sil (předpokládá se použití jednoduché řídicí páky)
Výškové řízení	35	Tahem a tlakem na řídicí páku
Příčné řízení	20	Boční příčný pohyb řídicí páky
Směrové řízení a řízení ovládaná nohama	90	Tlak směrem dopředu na pedál (směrového řízení)

Tabulka 4.: Zatížení silami od pilota [10]

#### 4.2.6. UL 2 § 411 Tuhost a deformace řídicí soustavy

Rozsah pohybu řídicích ploch, který může použít pilot, nesmí být v žádném případě nebezpečně zmenšen pružnou deformací řídicího obvodu.

Při zavedeném zatížení (viz Tabulka 5), se nemá žádná část soustavy řízení prodloužit nebo zkrátit o více než 25 %. [10]

Poměrná deformace je definovaná jako:

$$D = 100 * \frac{a}{A} [\%] [10]$$

a = pohyb ovladače řízení v kabině při zavedení síly od pilota při zablockované odpovídající řídicí ploše v neutrální poloze.

A = možný kladný (záporný) pohyb ovladače řízení v kabině měřený od neutrální polohy platný pro uvolněné řízení. [10]

Řízení	Síla	Zavedení síly
Výškové	12	Táhnout, tlačit na rukojeť
Příčné	8	Pohyb rukojeti do strany
Směrové	15	Tlačit na pedál

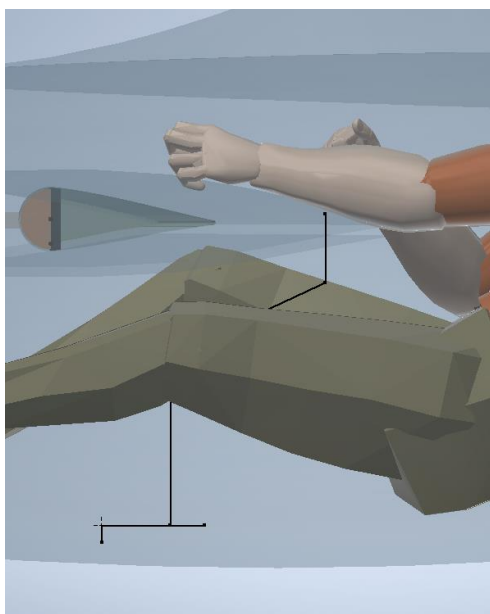
Tabulka 5.: Zavedené síly pro kontrolu tuhosti [10]

### 4.3. Čárový návrh trasy řízení

V této části jsou vytvořeny čárové návrhy pro jednotlivá řízení, na základě kterých se následně navrhne velikosti pák a délky táhel. Cílem této podkapitoly je vytvořit předběžný návrh tras řízení tak, aby plnila bez problému svou správnou funkci a nekolidovala s pilotem nebo s konstrukcí letounu. Při návrhu je nutné uvažovat veškeré posuvy pák, táhel a rukojetí v kabině pilota. Je nutné přibližně určit, ve kterých místech bude umístěna řídicí páka pro příčné a podélné řízení a pedály směrového řízení tak, aby měl pilot zajištěné snadné ovládání letounu.

#### 4.3.1. Čárový návrh řídicí páky

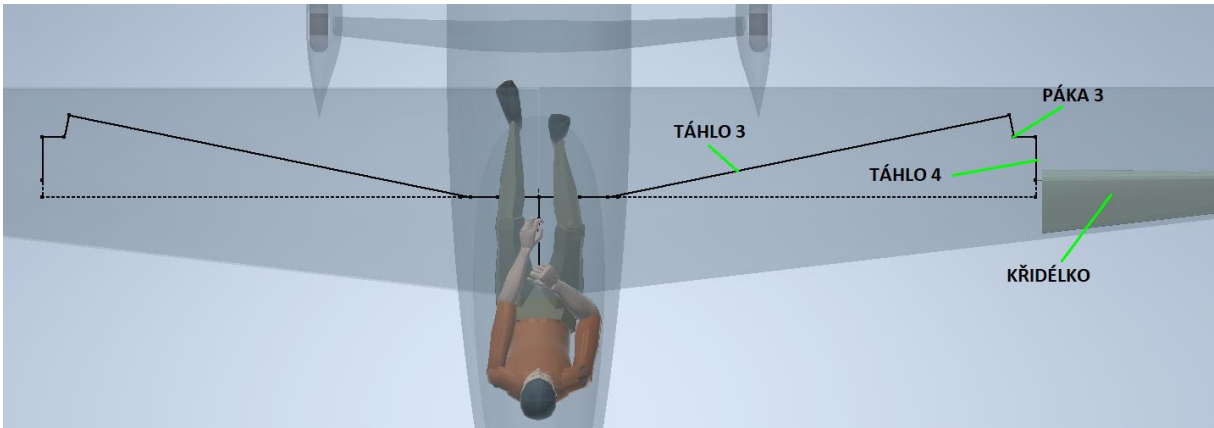
Umístění řídicí páky je navrženo tak, aby mohla být snadno vychylována. Uložení rukojeti je zamýšleno na torzní trubce, ve které bude umístěno táhlo podélného řízení. Řízení příčného řízení bude zajištěno pomocí jednoramenné páky umístěné na předním konci jdoucí směrem pod torzní trubku.



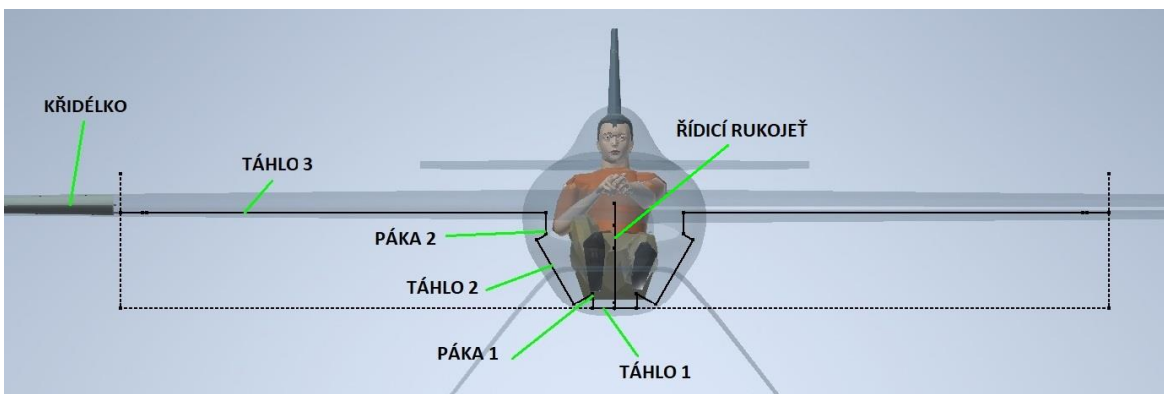
Obrázek 20.: Čárový návrh rukojeti

#### 4.3.2. Čárový návrh trasy příčného řízení

Pro ovládání jednoho křídélka je navržena trasa obsahující tři převodové dvojramenné páky. Dvě páky jsou umístěny v pilotní kabině. Poslední páka je umístěna v křídle před křídélkem. V trase jsou navržena 4 táhla. Táhlo 1 spojuje první páku s řídicí rukojetí. Táhlo 2 spojuje páky 1 a 2. Táhlo 3 je nejdelší a je umístěné v křídle letounu. Táhlo 3 spojuje páky 2 a 3. Táhlo 4 pak spojuje páku 3 s křídélkem. Celkově pak celá trasa příčného řízení obsahuje šest pák a osm táhel. Táhlo 1 je připojeno k navržené jednoramenné páce, která je součástí návrhu řídicí páky.



Obrázek 21.: Čárový návrh příčného řízení – pohled shora

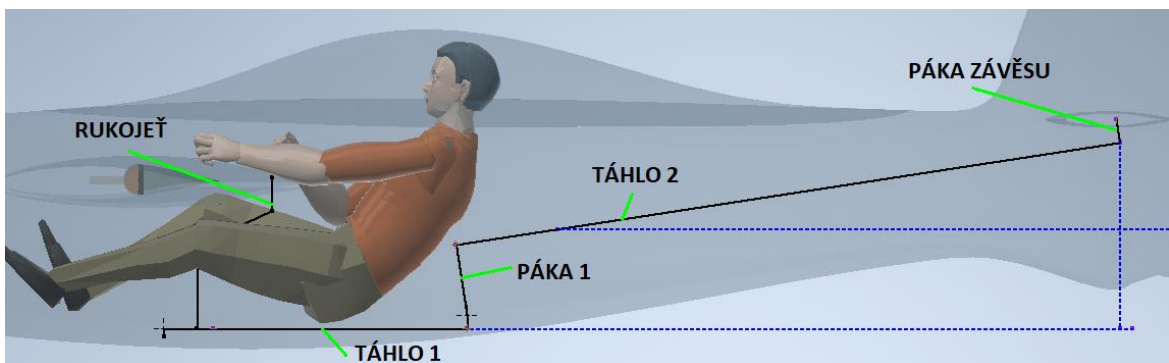


Obrázek 22.: Čárový návrh příčného řízení – pohled zepředu

### 4.3.3. Čárový návrh trasy podélného řízení

Pro řízení výškového kormidla je navržena trasa ze dvou táhel a jedné převodové dvouramenné páky umístěné za pilotem. Táhlo 1 umístěné v torzní trubce řídicí páky spojuje řídicí páku s převodovou pákou a táhlo 2 spojuje páku s navrženým závěsem výškového kormidla.

Páka závěsu výškového kormidla je již navržena v bakalářské práci: Návrh výškového kormidla rychlostního letounu. [7]

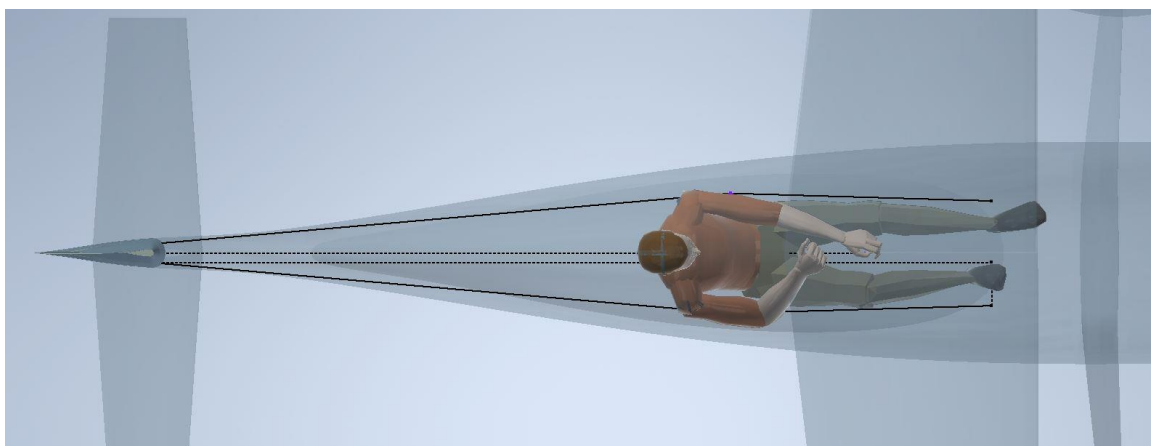


Obrázek 23.: Čárový návrh podélného řízení – pohled z boku

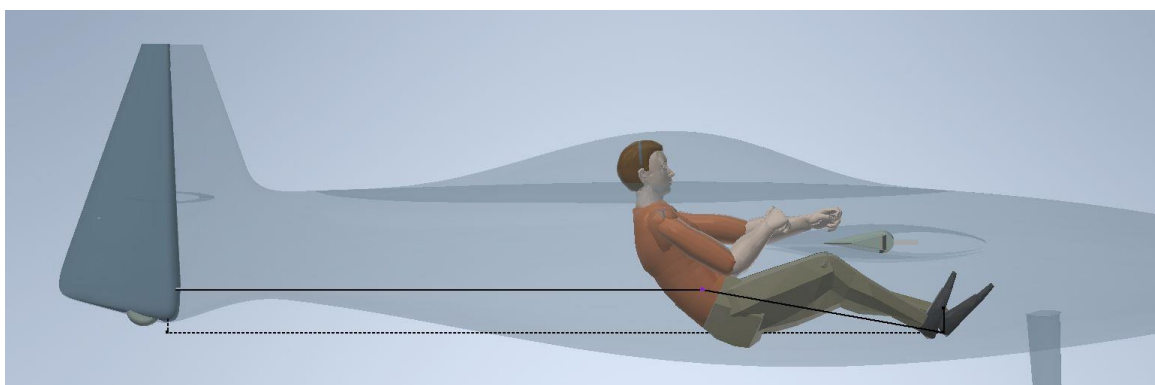
#### 4.3.4. Čárový návrh trasy směrového řízení

Řízení směrového kormidla je navrženo jako ohebný – lanový převod. Trasa směrového řízení je navržena pomocí lana tak, aby lano nekolidovalo s ostatními navrženými trasami, pilotem a drakem letounu. V trase je zamýšlena jedna kladka umístěna v prostoru kabiny pilota tak, aby byla snadno dostupná k pravidelné kontrole.

Uchycení lana u kormidla je zamýšleno na již navrženém závěsu kormidla z bakalářské práce: Návrh směrového kormidla sportovního letounu. [8]



Obrázek 24.: Čárový návrh směrového řízení – pohled shora



Obrázek 25.: Čárový návrh směrového řízení – pohled z boku

## 4.4. Početní návrh převodových pák

V této části je nutné zvolit maximální úhlové natočení řídicích ploch a maximální pohyb řídicí páky u pilota. Na jejich základě poté zvolit délky ramen jednotlivých pák, respektive určit převodové poměry tak, aby posuv táhla u řídicí plochy byl vyšší nebo roven posuvu táhla potřebného k natočení řídicí plochy.

Zvolené maximální úhly natočení řídicích ploch jsou v následující tabulce:

Řídicí plochy	Úhel natočení	
Křídélko	±25°	
Výškové kormidlo	30°	20°
Směrové kormidlo	±23°	

Tabulka 6.: Zvolené úhly natočení řídicích ploch

Pro maximální chod rukojeti pro podélné i příčné řízení je zvolená stejná vzdálenost a to  $x_p = 80 \text{ mm}$  na obě strany.

### 4.4.1. Návrh pák pro příčné řízení

Výpočet potřebného posuvu táhla u křídélka bude vycházet z kosinové věty:

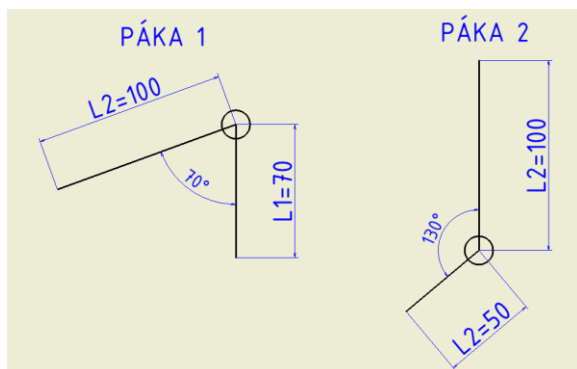
$$x_{K_{min}} = \sqrt{d^2 + d^2 - 2 \cdot d^2 \cdot \cos(\alpha)} = \sqrt{36^2 + 36^2 - 2 \cdot 36^2 \cdot \cos(25)} = 15,58 \text{ mm}$$

Kde  $d$  je vzdálenost řídicího čepu od osy otáčení křídélka navržený v bakalářské práci: Návrh křídélka pro rychlostní letoun [5]. A úhel  $\alpha$  je zvolený úhel natočení řídicí plochy (viz Tabulka 6).

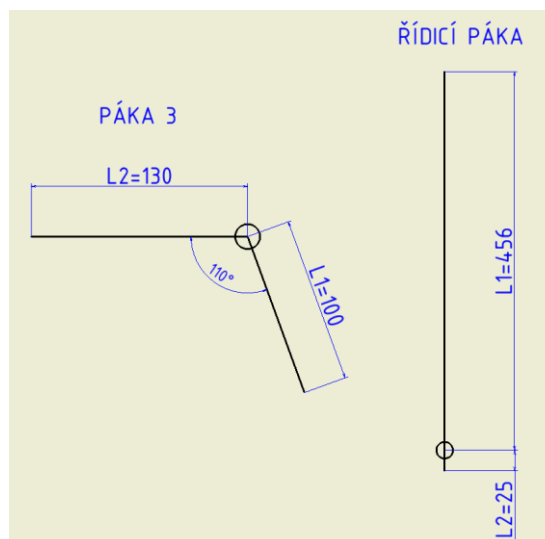
Převodový poměr je vypočten dle následujícího vzorce:  $i = \frac{L_2}{L_1}$

Příčné řízení					
		Délka ramene [mm]		Svíraný úhel ramen [°]	Převodový poměr
Páka	1	L1	70	70	1,43
		L2	100		
	2	L1	50	130	2
		L2	100		
	3	L1	100	110	1,3
		L2	130		
Řídicí páka	L1	456	180	0,055	
	L2	25			

Tabulka 7.: Převodové poměry a rozměry ramen převodových pák příčného řízení



Obrázek 26.: Schémata navržených pák 1 a 2 příčného řízení



Obrázek 27.: Schémata navržené páky 3 a řídicí páky příčného řízení

Na základě zvolených převodových poměrů a zvoleného maximálního posuvu řídicí páky u pilota se vypočítá navrhovaný posuv táhla ke křídélku:

$$x_K = x_p \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot i_4 = 80 \cdot 0,055 \cdot 1,3 \cdot 2 \cdot 1,43 \cong \mathbf{16,4 \text{ mm}} \geq x_{K_{min}}$$

Kde  $x_p$  je zvolený chod páky z kapitoly: 4.4 a  $i_n$  je převodový poměr páky (viz Tabulka 7).

#### 4.4.2. Návrh pák pro podélné řízení

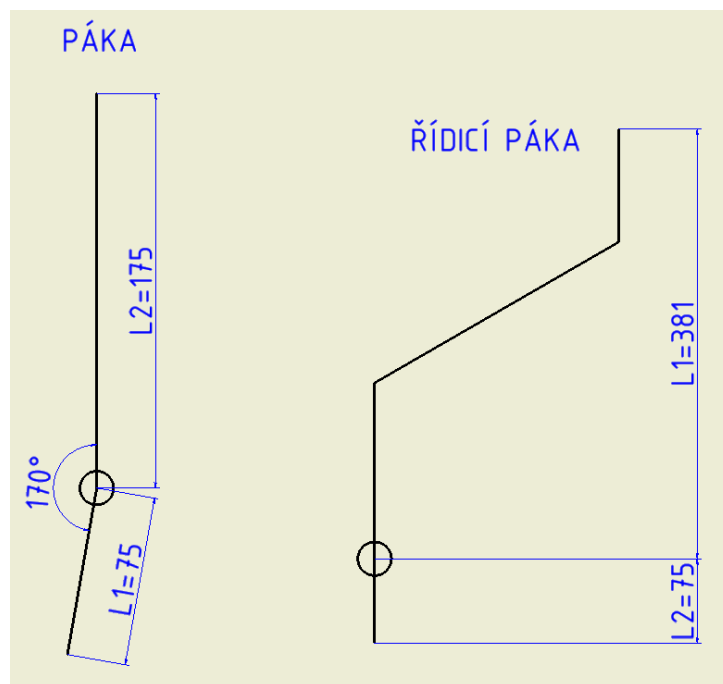
Pro návrh páky podélného řízení lze postupovat obdobně jako u výpočtu pro příčné řízení. Délka páky závěsu u kormidla musela být zvolena vyšší než navržená v bakalářské práci: Návrh výškového kormidla sportovního letounu [7] a to na 70 mm proto, aby převodový poměr převodové páky byl co nejnižší.

Potřebný posuv táhla u výškového kormidla pro vyšší zvolený úhel (viz Tabulka 6), což je v tomto případě 30° je pak:

$$x_{V_{min}} = \sqrt{70^2 + 70^2 - 2 \cdot 70^2 \cdot \cos(30)} = \mathbf{36,23 \text{ mm}}$$

Podélné řízení			
	Délka ramene [mm]		Převodový poměr
Páka	L1	75	2,33
	L2	175	
Řídicí páka	L1	381	0,197
	L2	75	

Tabulka 8.: Převodové poměry a rozměry ramen převodových pák podélného řízení



Obrázek 28.: Schéma navržené páky a řídicí páky podélného řízení

Obdobně jako pro výpočet u křídélka vychází navržený posuv táhla k výškovému kormidlu:

$$x_V = x_p \cdot i_1 \cdot i_2 = 80 \cdot 0,197 \cdot 2,33 \cong 36,7 \text{ mm} \geq x_{V_{min}}$$

#### 4.4.3. Návrh převodu směrového řízení

Směrové řízení je řízeno pomocí lana a proto, se zde nenachází žádné převodové páky, nicméně je nutné vypočítat potřebný posuv lana pro zvolený úhel natočení směrového kormidla a výšku připojení lana na pedálech. Pro výpočet jsou zanedbány ztráty vlivem tření na kladce.

Dále je nutné zvolit maximální chod pedálu v obou směrech:  $x_{pedalu} = 50 \text{ mm}$

Potřebný posuv lana se vypočítá z kosinové věty obdobně jako pro podélné a příčné řízení:

$$x_{S_{min}} = \sqrt{35^2 + 35^2 - 2 \cdot 35^2 \cdot \cos(23)} = 13,96 \cong 14 \text{ mm}$$

Výpočet výšky připojení lana na pedálech bude vycházet z podobnosti trojúhelníků a kosinové věty:

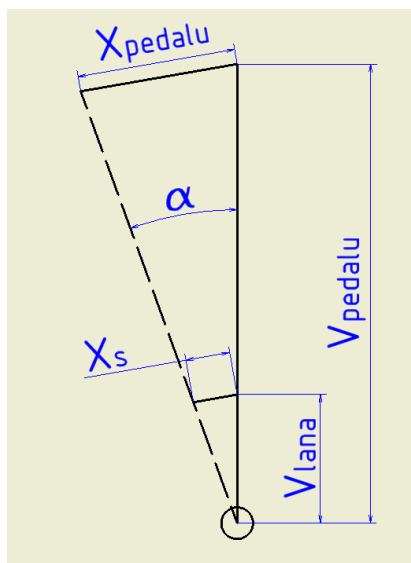
Nejdřív je potřeba vypočítat úhel velkého trojúhelníku:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{x_{pedalu}^2 - 2 \cdot V_{pedalu}^2}{-2 \cdot V_{pedalu}^2}\right) = \arccos\left(\frac{50^2 - 2 \cdot 145^2}{-2 \cdot 145^2}\right) = 19,86^\circ$$

Kde  $V_{pedalu}$  je zvolená výška pedálu od osy otáčení pedálu:  $V_{pedalu} = 145 \text{ mm}$

Výška uchycení lana od osy otáčení pedálu je poté:

$$V_{lana} = \sqrt{\frac{x_{smin}^2}{(1 + 1 - 2 \cdot \cos \alpha)}} = \sqrt{\frac{14^2}{(1 + 1 - 2 \cdot \cos 19,86)}} = 40,6 \text{ mm}$$



Obrázek 29.:Schéma pedálu

### Rekapitulační tabulka důležitých rozměrů:

Řízení	Navrhované posuvy k řídicí ploše [mm]	Odpovídající úhel
Příčné	16,4	26,3°
Podélné	36,7	30,4°
Směrové	14	23,1°
Posuv pedálů	50	19,9°
Posuv řídicí páky	80	*10°/12°
Uložení lana v pedálu	40,5	

Tabulka 9.: Přehled navržených posuvů

\*Úhly řídicí páky jsou uvedeny dva: 10° pro příčné řízení a 12° pro podélné. Rozdílnost úhlů je dána různými vzdálenostmi os otáčení řídicí páky.



## 5. Stanovení zatížení

Délky jednotlivých táhel budou vycházet z čárových návrhů. Nejdříve bude nutné vybrat materiál táhel. Na táhla se v letectví používají převážně duralové slitiny: 6061T6 nebo 2024T3. Vlastnosti těchto materiálu jsou sepsány (viz Tabulka 10). Dále je nutné vypočítat síly v táhlech, na základě kterých zvolíme požadované průměry táhel z kontroly na vzpěr. V tabulce je také uvedena ocel AISI 4130, která je dobře svařitelná a velmi často se používá v letectví právě pro svařované díly. (Pro ocel AISI 4130 jsou uvedené hodnoty po jejím tepelném zpracování).

Materiál	E [GPa]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
6061T6	68,9	276	310
2024T3	72,4	345	485
AISI 4130		780	883

Tabulka 10.: Vlastnosti materiálů [11]

Materiál táhel je vybrán 6061T6 převážně z důvodu cenové dostupnosti a pro dostačující vlastnosti. Pro vyšší pevnost je pro převodové páky zvolen materiál 2024T3. Řídicí páka a pedály budou vyrobeny z oceli AISI 4130.

### 5.1. Stanovení reakčních sil táhel a pák

Výpočet sil v jednotlivých táhlech proběhne na základě rovnováhy sil. Nejdřív se určí síla v prvním táhle vzniklá působením síly od pilota daná předpisem UL-2 (viz Tabulka 4). Vypočtená síla se následně použije pro výpočet síly v druhém táhle. Postupně se tak vypočítají všechny síly v táhlech a reakce v uložení pák a rukojeti. Délky navržených jednotlivých ramen pák potřebných pro výpočet sil byly zvoleny v kapitolách: 4.4.1 a 4.4.2.

**Výpočet síly vzniklé v prvním táhle příčného řízení dle schématu (viz Obrázek 30):**

$$x: R_x + F_{pilot} - F_1 = 0 \rightarrow R_x = F_1 - F_{pilot}$$

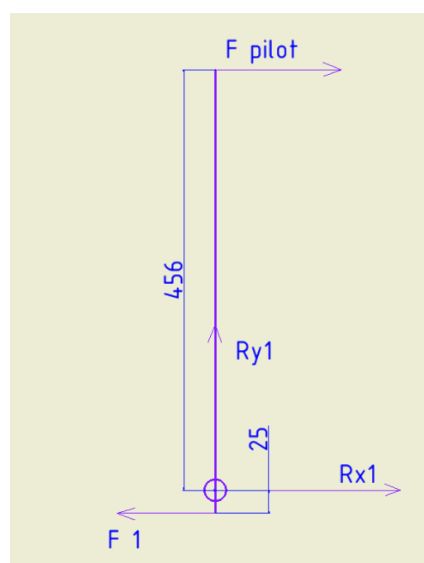
$$y: R_y = 0$$

$$M_R: -F_{pilot} \cdot 0,456 - F_1 \cdot 0,025 = 0$$

$$F_1 = -F_{pilot} \cdot \frac{0,456}{0,025} = -200 \cdot \frac{0,456}{0,025} = -3\ 648\ \text{N}$$

$$R_x = -3648 - 200 = -3\ 848\ \text{N}$$

$$R_c = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(-3848)^2 + 0^2} = 3\ 848\ \text{N}$$



Obrázek 30.: Schéma sil v rukojeti pro příčné řízení

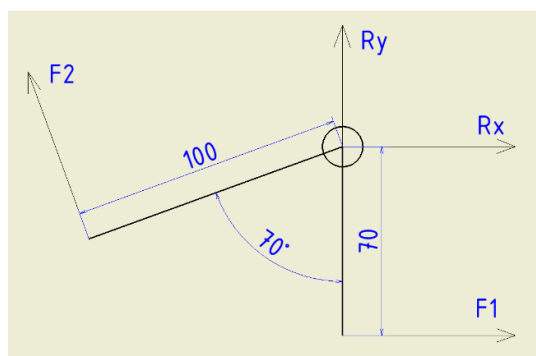
### Výpočet síly vzniklé v druhém táhlu příčného řízení dle schématu (viz Obrázek 31):

$$x: R_x + F_1 - F_2 \cdot \cos(70^\circ) = 0$$

$$y: R_y + F_2 \cdot \sin(70^\circ) = 0$$

$$M_R: F_1 \cdot 0,07 - F_2 \cdot 0,1 \cdot \sin(70^\circ) - F_2 \cdot 0,1 \cdot \cos(70^\circ) = 0$$

$$F_2 = -\frac{-(-3648) \cdot 0,07}{0,1 \cdot (\sin(70) + \cos(70))} = -1\,992,3\,N$$



Obrázek 31.: Schéma sil v páce 1 příčného řízení

$$R_x = F_2 \cdot \cos(70) - F_1 = -1992,3 \cdot \cos(70) - (-3648) \cong 2\,966,6\,N$$

$$R_y = -F_2 \cdot \sin(70) = 1992,3 \cdot \sin(70) = 1\,872,2\,N$$

$$R_c = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(2966,6)^2 + 1872,2^2} = 3\,507,9\,N$$

Obdobným způsobem proběhne výpočet sil působících na zbylá táhla příčného i podélného řízení. V tabulkách (Tabulka 11 a Tabulka 12) jsou sepsány reakční síly v převodových pákách a síly působící v táhlech.

## 5.2. Stanovení reakční síly v laně směrového řízení

Obdobně jako pro výpočet sil v táhlech a v převodových pákách se vypočítá síla působící v laně od pilota. Síla od pilota je zde rovněž dána předpisem UL-2 (viz Tabulka 4). Vzdálenost umístění lana je dána výpočtem v kapitole: 4.4.3.

$$x: R_x + F_{pilot} - F_{lano} = 0 \rightarrow R_x = F_{lano} - F_{pilot}$$

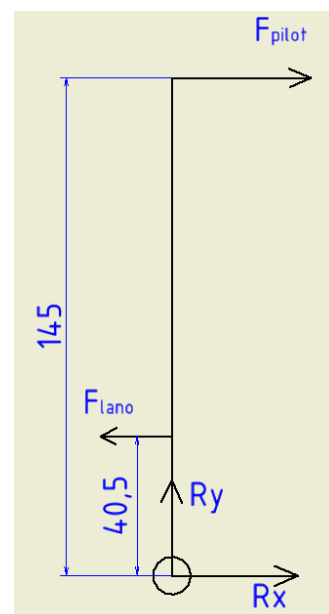
$$y: R_y = 0$$

$$M_R: F_{pilot} \cdot 0,145 - F_{lano} \cdot 0,0405 = 0$$

$$F_{lano} = \frac{900 \cdot 0,145}{0,0405} = 3\,222,2\,N$$

$$R_x = F_{lano} - F_{pilot} = 3222,2 - 900 \cong 2\,322,2\,N$$

$$R_c = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(2322,2)^2 + 0^2} = 2\,322,2\,N$$



Obrázek 32.: Schéma sil v pedálu směrového řízení

## Přehledové tabulky vypočtených sil:

Síly v ose otáčení							
	Příčné řízení				Podélné řízení		Směrové řízení
	Rukojeť	Páka 1	Páka 2	Páka 3	Rukojeť	Páka 1	Pedál
Rx [N]	-3848	2966,6	1958,22	1199,8	1428	1120,2	2322,2
Ry [N]	0	1872,2	-1872,2	-1695,5	0	-104,2	0
Rc [N]	3848	3507,9	2709,2	2077,1	1428	1125	2322,2

Tabulka 11.: Reakční síly v ose otáčení

Síly v táhlech a laně		
Příčné řízení	F1 [N]	-3648,0
	F2 [N]	-1992,3
	F3 [N]	1276,8
	F4 [N]	1258,8
Podélné řízení	F1 [N]	1778
	F2 [N]	666
směrové řízení	F lana [N]	3222,2

Tabulka 12.: Síly v táhlech a laně

## 6. Předběžné dimenzování

V této kapitole bude provedeno dimenzování táhel na vzpěr. Kontrola na krut a ohyb pedálů směrového řízení. Kontrola řídicí páky na ohyb a krut. Předběžný výběr ložisek pro převodové páky. Výběr a kontrola navrženého lana a návrh průměru kladky pro lano. Volba profilů součástí řízení a jejich kontrola je důležitým dílem návrhu konstrukce, veškeré navržené profily musí být navrženy tak, aby odolaly působícím silám s ohledem na bezpečnost. Jakékoliv poškození, ztráta stability a další možné nežádoucí jevy mohou způsobit špatné fungování řízení nebo také úplnou ztrátu kontroly řízení, což by zapříčinilo fatální následky. V letectví se navrhuje konstrukce převážně na mez pevnosti volených materiálů.

### 6.1. Dimenzování táhel na vzpěr

Pro kontrolu táhel na vzpěr je nutné znát délku táhel, síly v táhlech a vlastnosti materiálu. Délky táhel jsou určeny na základě navrženého čárového modelu.

Pro výpočet bude postupováno podle Eulerova vztahu pro druhý případ vzpěru.

Délky táhel				
	Táhlo			
	1	2	3	4
Příčné řízení	100	342	1900	200
Podélné řízení	800	1975		

Tabulka 13.: Délky táhel

Pro výběr průměru trubky bude postupováno dle následujícího vztahu pro výpočet minimálního kvadratického momentu průřezu:

$$J_{min} = \frac{F_{kr} \cdot k \cdot l^2}{n \cdot \pi^2 \cdot E} \leq J_{profilu}$$

Kde  $F_{kr}$  je síla v táhle (viz Tabulka 12),  $k$  je součinitel bezpečnosti daný předpisem,  $l$  je délka táhla (viz Tabulka 13)  $n$  je součinitel typu vzpěru,  $E$  je modul pružnosti v tahu zvoleného materiálu (viz Tabulka 10) a  $J_{profilu}$  je kvadratický moment průřezu navrženého profilu.

**Výpočet třetího táhla příčného řízení:**

$$J_{min_3} = \frac{1276,8 \cdot 1,5 \cdot 1900^2}{1 \cdot \pi^2 \cdot 68900} = 10167,2 \text{ mm}^4$$

Nyní je nutné najít nejbližší vyšší kvadratický moment průřezu dostupných trubek.

Kvadratický moment průřezu se vypočítá pomocí vzorce:

$$J_{profilu} = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}$$

Rozměry nabízených trubek jsou dostupné na webových stránkách prodejce Aircraft Spruce [14].

Rozměr pro nejbližší vyšší kvadratický moment průřezu vychází pro trubku nabízenou v palcích: 1-1/4 x 0,035.

$$J_{profilu} = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (31,75^4 - 29,97^4)}{64} = 10269,6 \text{ mm}^4$$

$$J_{min} \leq J_{profilu} \rightarrow \text{profil vyhovuje}$$

Obdobným způsobem budou vybrány průměry trubek zbylých táhel v příčném i podélném řízení.

V následující tabulce jsou vypsány vybrané rozměry trubek pro táhla. Při výběru byla také uvážena hmotnost daných trubek. Pro táhla: 1, 2 a 4 příčného řízení jsou vybrány stejné rozměry pro zjednodušení konstrukce a kompletace s koncovkami táhel a také pro zjednodušení případného nákupu. Vzhledem k malé délce táhla 1 příčného řízení bude toto táhlo vyrobeno z tyče stejného profilu, jako je navržená trubka. Na koncích trubky budou vytvořeny koncovky ve tvaru vidliček.

Řízení	Táhlo	Rozměry v palcích		Rozměry v [mm]		Porovnání J		Hmotnost
		D	d	D	d	J min	J profilu	kg/m
Příčné	1	0,5	0,402	12,7	10,21	80,5	743,4	0,122
	2	0,5	0,402	12,7	10,21	514,0	743,4	0,122
	3	1,25	1,18	31,75	29,97	10167,2	10269,6	0,238
	4	0,5	0,402	12,7	10,21	111,1	743,4	0,122
Podélné	1	0,875	0,805	22,225	20,45	2510,1	3396,7	0,162
	2	1	0,902	25,4	22,91	5730,5	6906,9	0,261

Tabulka 14.: Přehled průměrů a hmotnosti táhel

## 6.2. Kontrola řídicí páky

Na základě vypočtených sil bude zkontrolován navržený profil řídicí páky na ohyb a krut.

Nejdřív je vypočten krouticí moment vzniklý silou od pilota působící pro příčné řízení:

$$M_k = F_{pilot} \cdot 227 = 200 \cdot 227 = \mathbf{45\,400\, N \cdot mm}$$

Dále je nutné spočítat maximální ohybový moment. V tomto případě je největší moment vzniklý silou od pilota působící v podélném řízení:

$$M_o = F_{pilot} \cdot 381 = 350 \cdot 381 = \mathbf{133\,350\, N \cdot mm}$$

Na základě krouticího momentu a ohybového momentu je spočten redukovaný moment podle teorie:  $\tau_{max}$  kde  $\alpha = 2$

$$M_{red} = \sqrt{M_o^2 + \left(\frac{\alpha}{2} \cdot M_k^2\right)} = \sqrt{133350^2 + \left(\frac{2}{2} \cdot 45400^2\right)} = \mathbf{140\,866,5\, N \cdot mm}$$

Redukované napětí se vypočítá na základě vypočteného redukovaného momentu vynásobeného bezpečností a modulu průřezu v ohybu následujícím vztahem:

$$\sigma_{red} = \frac{M_{red} \cdot k}{W_0} = \frac{140\,866,5 \cdot 1,5}{614} = \mathbf{344\, MPa}$$

Modul průřezu v ohybu je vypočten na základě zvoleného profilu trubky – pro trubku o zvoleném rozměru 25x22 mm je modul průřezu:

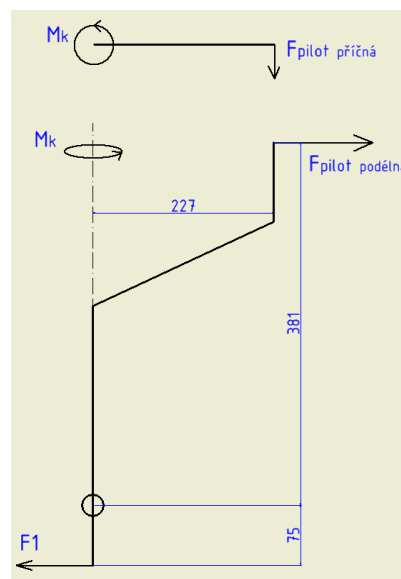
$$W_0 = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{25^4 - 22^4}{25} = \mathbf{614\, mm^3}$$

Pro kontrolu jestli zvolený průřez vyhovuje, musí být redukované napětí nižší než napětí dovolené:

$$\sigma_{red} \leq \sigma_D$$

$$344 \leq 883$$

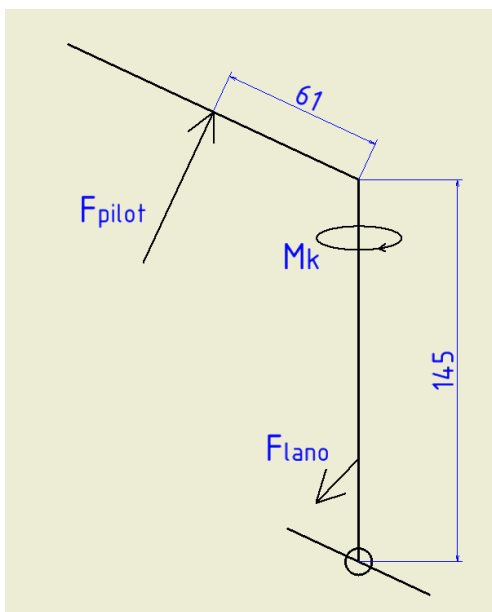
Pro materiál AISI 4130 je stanovena mez pevnosti  $R_m = 883\, MPa$  (viz Tabulka 10). Navržený profil tedy vyhovuje.



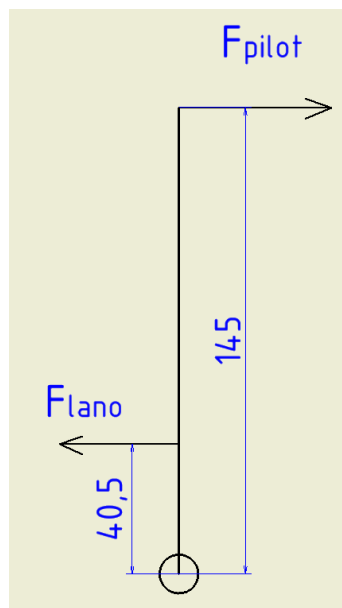
Obrázek 33.: Schéma sil pro kontrolu na ohyb a krut

### 6.3. Kontrola pedálů směrového řízení

V této části bude provedena kontrola navržených trubek pedálů na ohyb a krut.



Obrázek 34.: Schéma sil pedálu pro kontrolu na ohyb a krut



Obrázek 35.: Schéma sil pedálu na ohyb a krut

Obdobně jako v kapitole: 6.2 je nejdřív vypočten krouticí moment v pedálu vzniklý silou od pilota:

$$M_k = F_{pilot} \cdot 61 = 900 \cdot 61 = \mathbf{54\,900\, N \cdot mm}$$

Dále je spočítán maximální ohybový moment:

$$M_o = F_{pilot} \cdot (145 - 40,5) = 900 \cdot 104,5 = \mathbf{94\,050\, N \cdot mm}$$

Na základě krouticího momentu a ohybového momentu je spočten redukovaný moment:

$$M_{red} = \sqrt{M_o^2 + \left(\frac{\alpha}{2} \cdot M_k^2\right)} = \sqrt{94050^2 + \left(\frac{2}{2} \cdot 54900^2\right)} = \mathbf{108\,900,9\, N \cdot mm}$$

Redukované napětí s bezpečností pak vychází:

$$\sigma_{red} = \frac{M_{red} \cdot k}{W_o} = \frac{108\,900,9 \cdot 1,5}{195,6} = \mathbf{835\, MPa}$$

Modul průřezu v ohybu je vypočten na základě zvoleného profilu trubky – pro trubku o rozměru 15x12 mm je modul průřezu:

$$W_o = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{15^4 - 12^4}{15} = \mathbf{195,6\, mm^3}$$

Pro kontrolu jestli zvolený průřez vyhovuje, musí být redukované napětí nižší než napětí dovolené:

$$\sigma_{red} \leq \sigma_D$$

$$835 \leq 883$$

Pro materiál AISI 4130 je stanovená mez pevnosti  $R_m = 883 \text{ MPa}$ . (viz Tabulka 10). Navržený profil tedy vyhovuje.

## 6.4. Výběr a dimenzování lana a kladky

Lano pro směrové řízení je vybráno: **LANO Ø3,15 ČSN 02 4322.23**.

Jmenovitý průměr drátku lana je 0,2 mm a jmenovitá únosnost lana je až 7,019 kN. [12]

Z výpočtu reakce v laně z kapitoly: 5.2 je reakční síla působící v laně stanovena na 3222,2 N. Tuto sílu je nutné vynásobit bezpečnostním součinitelem, který je pro lanové převody stanoven na 2.

Výsledná jistota navrženého lana Ø3,15 je:

$$k_{lana} = \frac{7019}{3222,2 \cdot 2} \cong 1,1$$

### Návrh kladky:

Pro lano je nutné navrhnout průměr kladky. Minimální průměr kladky bude vypočítán pomocí následujícího vztahu:

$$D = (550 - 700) \cdot d_{dratku} \text{ [13]}$$

Minimální průměr kladky je tedy:

$$D = 550 \cdot 0,2 = \mathbf{110 \text{ mm}}$$

## 6.5. Výběr ložisek převodových pák

Na základě vypočtených hodnot reakčních sil (viz Tabulka 11) jsou zvolena ložiska jednořadá kuličková: **SKF – 629**, která budou umístěna ve dvojici v ložiskových domcích, které budou snýtovány k jednotlivým převodovým pákám. Pro jednoduchost je pro všechny páky zvolen jeden typ ložiska, tak aby mohl být použit stejný domek ložiska.

Rozměry a vlastnosti ložiska jsou sepsány v následující tabulce:

Rozměry [mm]			Únosnost [kN]		Hmotnost [kg]
D	d	B	Dynamická	Statická	
26	9	8	4,75	1,96	0,02

Tabulka 15.: Rozměry a vlastnosti ložiska SKF – 629 [17]



## 6.6. Vlastní konstrukční řešení

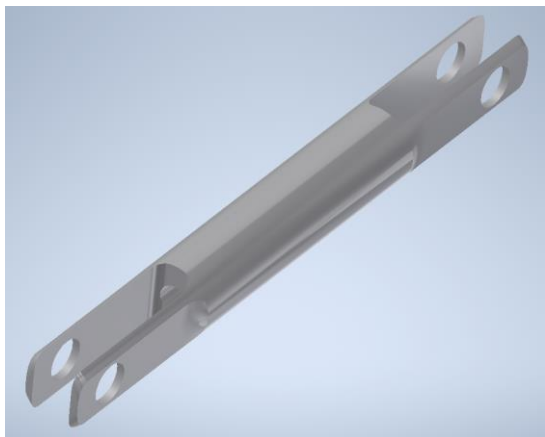
V této kapitole bude popsáno vlastní konstrukční řešení tras řízení a jejich komponentů. Konstrukce je navrhována v programu Autodesk Inventor 2020.

### 6.6.1. Součásti převodu řízení

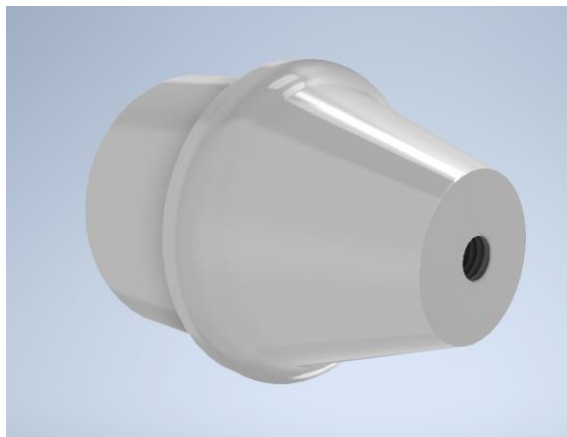
Táhlo 1 příčného řízení (viz Obrázek 36) je navrženo z tyče na jejíž koncích budou vytvořeny koncovky ve tvaru vidliček. Skrz táhlo je vytvořena díra pro odlehčení.

Zbylá táhla jsou ve tvaru trubek o zvolených rozměrech (viz Tabulka 14). Na koncích trubek jsou zamýšleny domky koncovek (viz Obrázek 37), které budou vloženy a následně snýtovány k táhlu. V těchto domcích jsou navrženy závity pro koncovky. Koncovky táhel jsou ve tvaru vidliček nebo ok. Uložení koncovek jsou zobrazeny na obrázcích (viz Obrázek 38 a Obrázek 39).

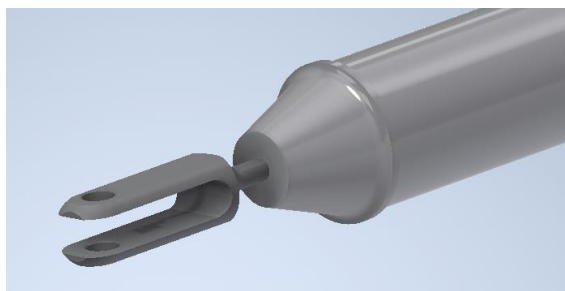
Pro koncovky jsou zvoleny **stavitelné vidlice: 5x7x8 ONL 3774**



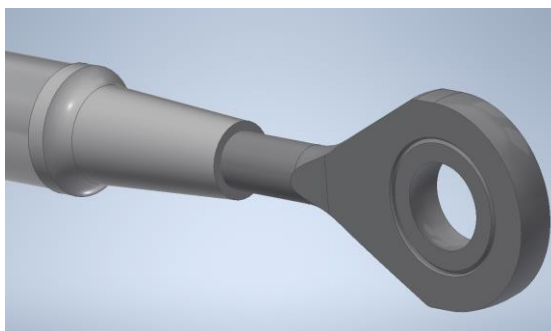
Obrázek 36.: Táhlo 1 příčného řízení



Obrázek 37.: Domek koncovky



Obrázek 38.: Uložení koncovky ve tvaru vidličky



Obrázek 39.: Uložení koncovky ve tvaru oka

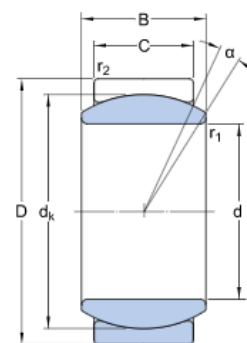
## Převodové páky:

Převodové páky jsou vymodelovány dle rozměrů pák (viz Tabulka 7 a Tabulka 8). Materiál pák je zvolen pro vyšší pevnost: 2024T3. Tloušťka pák je 5 mm. V každé páce jsou navrženy dle možností odlehčující díry. Ke všem pákám je navržen stejný domek ložiska pro ložisko SKF – 629. Toto ložisko je v domcích umístěno z obsahového centra programu Autodesk Inventor 2020. K páce jsou symetricky z obou stran přínýtovány domky ložiska pomocí šesti nýtů Ø3,2.

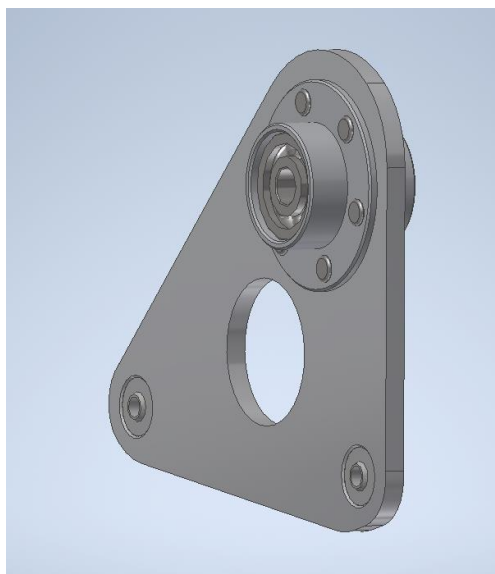
Nýty jsou zamýšleny: Arcus: Serie 1691 [15]. Na koncích ramen převodových pák jsou nalisovány kloubová ložiska. Kloubová ložiska jsou zamýšlena **SKF GE 5 E** o rozměrech (viz Tabulka 16).

d [mm]	D [mm]	B [mm]	C [mm]
5	14	6	4

Tabulka 16.: Rozměry kloubového ložiska [16]



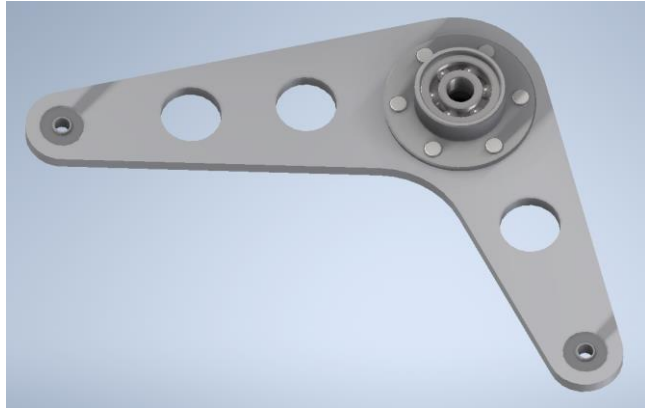
Obrázek 40.: Kloubové ložisko [16]



Obrázek 41.: Páka 1 příčného řízení



Obrázek 42.: Páka 2 příčného řízení



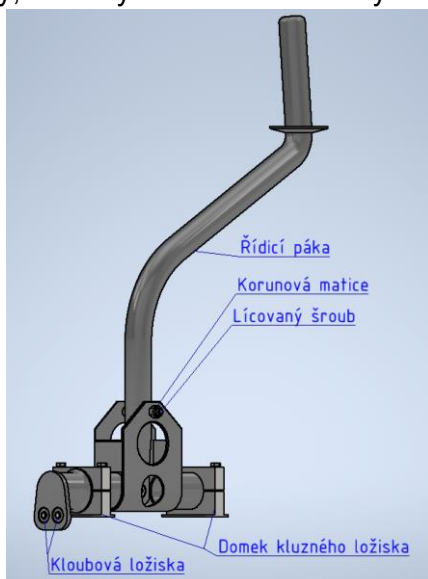
Obrázek 43.: Páka 3 příčného řízení



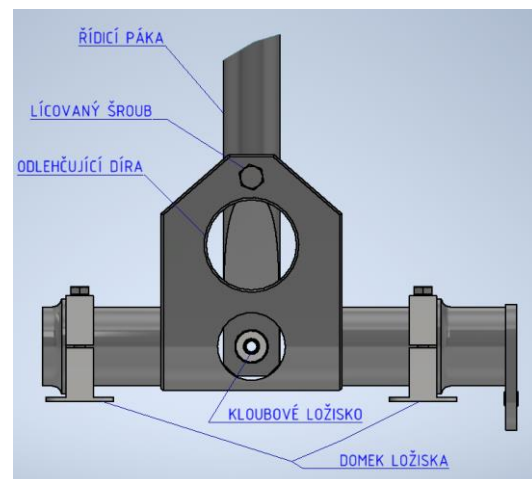
Obrázek 44.: Páka podélného řízení

### 6.6.2. Řídicí páka a její uložení

Uložení řídicí páky je navrženo pomocí torzní trubky, na kterou bude přivařen plechový domek. V plechovém domku je navržena díra pro lícovaný šroub M6, který je zajištěný korunovou maticí. Tento šroub bude osou otáčení řídicí páky pro řízení výškového kormidla. Zároveň je domek opatřen odlehčující dírou a dírou pro montáž koncovky táhla 1 podélného řízení k řídicí páce. Ovládání trasy příčného řízení je zajištěno otáčením torzní trubky, na jejímž konci je přivařená jednoramenná převodová páka, ve které jsou nalisována kloubová ložiska. K těmto ložiskům budou připojena táhla 1 příčného řízení. Otáčení torzní trubky je zamýšleno pomocí kluzných ložisek v ložiskových domcích, které jsou v modelu naznačeny. Pro zamezení vodorovného pohybu torzní trubky jsou na trubce navrženy příruby, ke kterým dosednou domky ložiska.



Obrázek 45.: Řídicí páka

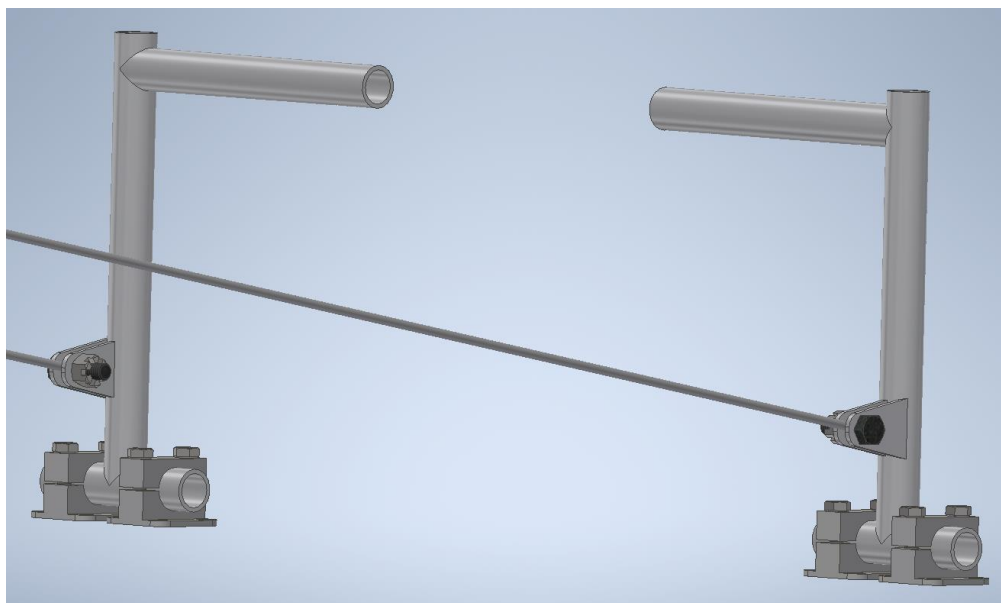


Obrázek 46.: Detail řídicí páky

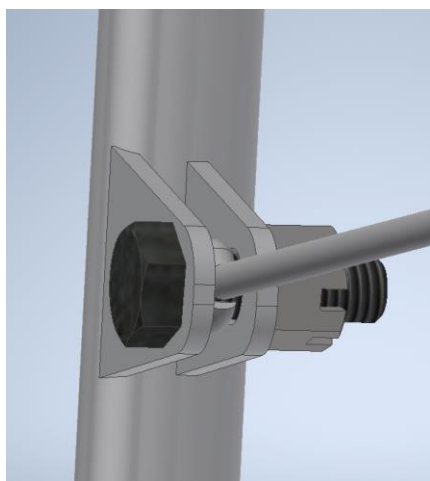
### 6.6.3. Pedály a jejich uložení

Pedály jsou navrženy ze tří svařovaných trubek 15x1,5 mm. Materiál trubek je navržen AISI 4130. Uchycení lana je navrženo pomocí dvou plechů s dírou pro šroub přivařených k svislé trubce. Mezi tyto plechy se vloží očnice lana a zajistí se lícovaným šroubem s korunovou maticí. Výška umístění plechů k uchycení lana je vypočtena v kapitole: 4.4.3. V modelu je očnice lana pouze naznačena a šroub umístěný v modelu je pouze pro vizualizaci. Zamýšlený šroub je lícovaný šroub ONL 3120. Očnice lana je zamýšlena jako nakupovaný díl (viz Obrázek 49).

Uložení pedálů je zamýšleno na kluzných ložiscích umístěných v domcích. V modelu jsou tyto domky orientačně navrženy.



Obrázek 47.: Návrh pedálů směrového řízení



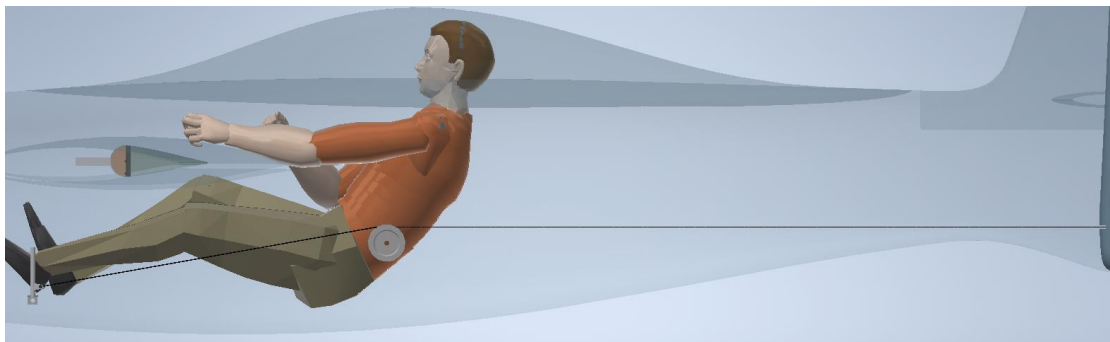
Obrázek 48.: Detail zajištění lana k pedálu



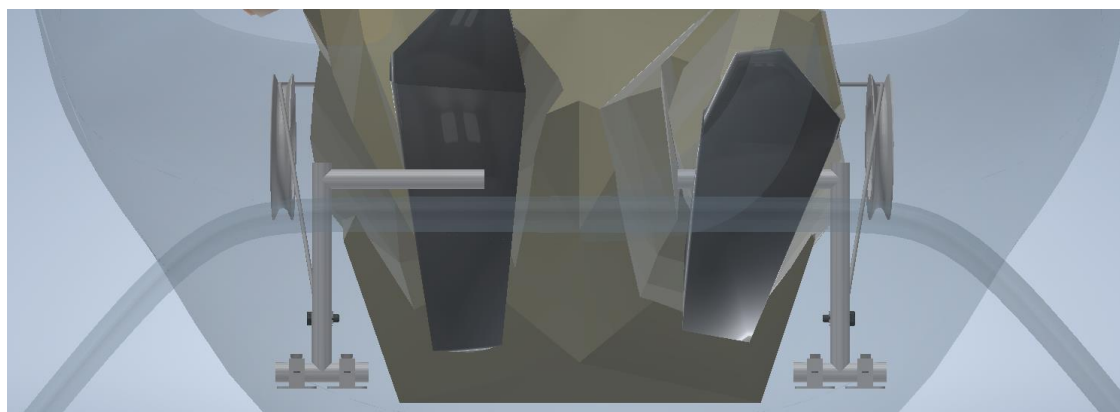
Obrázek 49.: Očnice lana [18]

#### 6.6.4. Model trasy směrového řízení

Model trasy je vytvořen dle navrženého lana a kladky z kapitoly: 6.4 a na základě čárového modelu. Trasa směrového řízení se skládá z pedálů blíže popsanych v kapitole: 6.6.3. Lano je navrženo  $\varnothing 3,2$  a koncovky lana jsou zamýšleny jako očnice. V trase směrového řízení jsou také orientačně navrženy kladky  $\varnothing 110$ . Kladky jsou navrženy tak, aby byly snadno dostupné pro kontrolu a případnou údržbu v pilotní kabině.



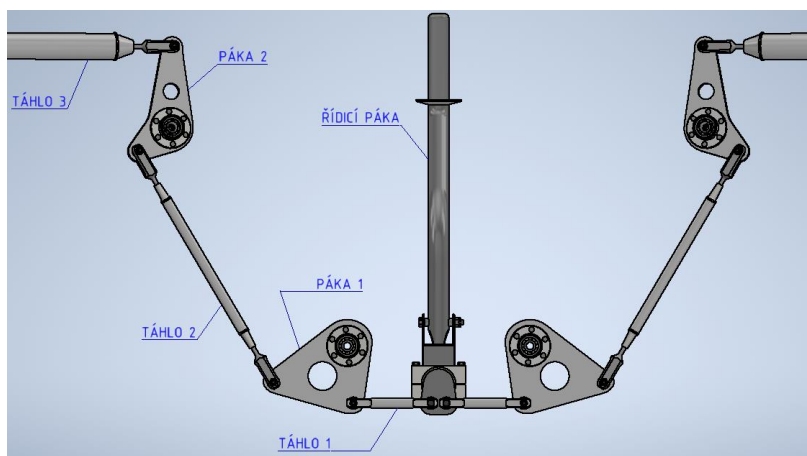
Obrázek 50.: Model trasy směrového řízení – pohled z boku



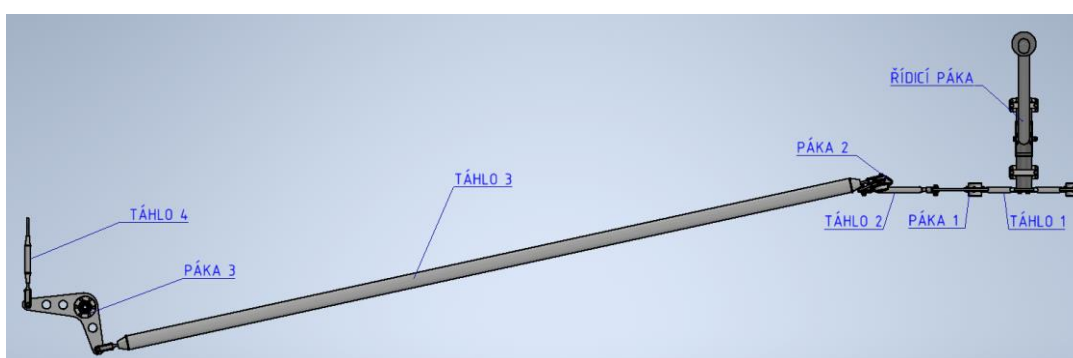
Obrázek 51.: Model trasy směrového řízení – pohled zepředu

#### 6.6.5. Model trasy příčného řízení

Na základě navržených rozměrů jsou vymodelované převodové páky a táhla zkompletovány do jedné sestavy. Spojovacím materiálem pro připojení koncových vidliček táhel k převodovým pákám je zamýšlen lícovaný šroub ONL 3120 zajištěný korunovou maticí. V modelu je tento šroub pouze naznačen. Koncovka pro připojení táhla 4 k čepu řízení křídélka je zamýšlena ve tvaru oka (viz Obrázek 39).



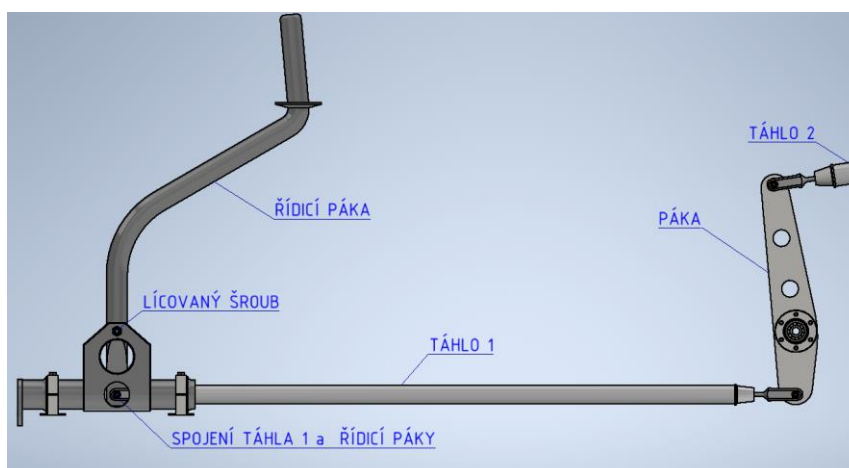
Obrázek 52.: Příčné řízení – detail uložení u řídicí páky



Obrázek 53.: Příčné řízení pohled shora

### 6.6.6. Model podélného řízení

Příčné řízení je sestaveno ze dvou táhel a jedné převodové páky. Řízení výškového kormidla je zajištěno pohybem řídicí páky. Osu otáčení pro pohyb řídicí páky zajišťuje lícovaný šroub ONL 3120, který je umístěn v plechovém domku řídicí páky a zajištěn korunovou maticí. Spojení řídicí páky a táhla 1 je umístěno v torzní trubce řídicí páky. Spojení táhel s převodovou pákou je zamýšleno pomocí lícovaných šroubů ONL 3120 zajištěných korunovou maticí. Koncovka k připojení táhla 2 k závěsu výškového kormidla je zamýšlena v podobě vidlice.



Obrázek 54.: Podélné řízení

## 7. Hmotový rozbor

V této kapitole bude proveden hmotový rozbor navržených komponentů všech tras řízení.

Stanovení hmotnosti je v leteckém průmyslu velice důležitá, a proto je vždy nedílnou součástí návrhů leteckých konstrukcí.

### 7.1. Stanovení hmotnosti sestav převodových pák

Hmotnost pák je stanovena na základě výpočtu v programu Autodesk Inventor 2020. Pro jednoduchost bude uvedena hmotnost celé sestavy paky - ve výpočtu bude zahrnuta hmotnost domků ložisek, hmotnost navržených ložisek a nýtů spojující ložiskové domky s pákou.

	Páka	Hmotnost [kg]	Počet
Příčné řízení	1	0,19	2
	2	0,158	2
	3	0,192	2
Podélné řízení	1	0,218	1

Tabulka 17.: Hmotnost převodových pák

### 7.2. Stanovení hmotnosti sestav táhel

Pro stanovení hmotnosti táhel bude použita hmotnost udávaná prodejcem Aircraft Spruce [14]. Pro přehlednost je uvedena hmotnost celé sestavy táhla – součet hmotností samotného táhla, domků koncovek, koncovky v podobě vidliček nebo ok a spojovacího materiálu. Hmotnosti domků koncovek a samotných koncovek je stanoveno pomocí programu Autodesk Inventor 2020.

	Táhlo	Hmotnost [kg]	Počet
Příčné řízení	1	0,032	2
	2	0,122	2
	3	0,600	2
	4	0,105	2
Podélné řízení	1	0,265	1
	2	0,639	1

Tabulka 18.: Hmotnost táhel

### 7.3. Stanovení hmotnosti sestavy řídicí páky

Ve stanovení hmotnosti sestavy řídicí páky je zahrnuta hmotnost řídicí páky, domku řídicí páky včetně torzní trubky, předběžně navržených domků kluzných ložisek, spojovacího materiálu a kloubových ložisek umístěných v jednoramenné páce vedoucí k příčnému řízení a v řídicí páce vedoucí k podélnému řízení. Hmotnost celé soustavy byla stanovena pomocí programu Autodesk Inventor 2020 na 1,718 kg.

### 7.4. Stanovení hmotnosti trasy směrového řízení

V hmotnosti trasy směrového řízení je zahrnuta hmotnost pedálů včetně předběžně navržených domků pro ložiska, spojovacího materiálu, lana a kladek. Hmotnost lana je stanovena dle strojnických tabulek, kde pro lano Ø3,2 mm je hmotnost 0,033 kg/m. Délka lana je dle modelu stanovena přibližně na 6,2 m. Hmotnost sestavy pedálu a kladky je stanovena dle modelu v programu Autodesk Inventor 2020.

	Hmotnost [kg]
Sestava pedálů	0,602
Lano	0,41
Kladky	1

Tabulka 19.: Hmotnost komponentů trasy směrového řízení

**Přehledová tabulka hmotností tras řízení:**

	Hmotnost [kg]
Trasa příčného řízení	2,797
Trasa podélného řízení	1,121
Trasa směrového řízení	2,011
Řídicí páka	1,718
<b>Součet</b>	<b>7,648</b>

Tabulka 20.: Přehled hmotností tras řízení



## 8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout konstrukční řešení primárního řízení sportovního letounu vycházejícího z návrhu letounu z diplomové práce Jakuba Valenty: Koncepční návrh sportovního letounu. Letoun je vyvíjen pro pokošení dosavadního rychlostního rekordu v kategorii Aeroplanes, a zároveň byl vybrán předpis, dle kterého bude letoun konstruován.

V této bakalářské práci byl v úvodu popsán princip řízení letadla a požadavky na konstrukci komponentů primárního řízení. Součástí návrhu konstrukce byly představeny již navržené řídicí plochy z bakalářských prací Lukáše Hofrichtera – Návrh výškového kormidla rychlostního letounu, Tomáše Rubánka – Návrh křídélka pro rychlostní letoun a Jiřího Němce – Návrh směrového kormidla sportovního letounu, na které bylo řízení tras napojeno.

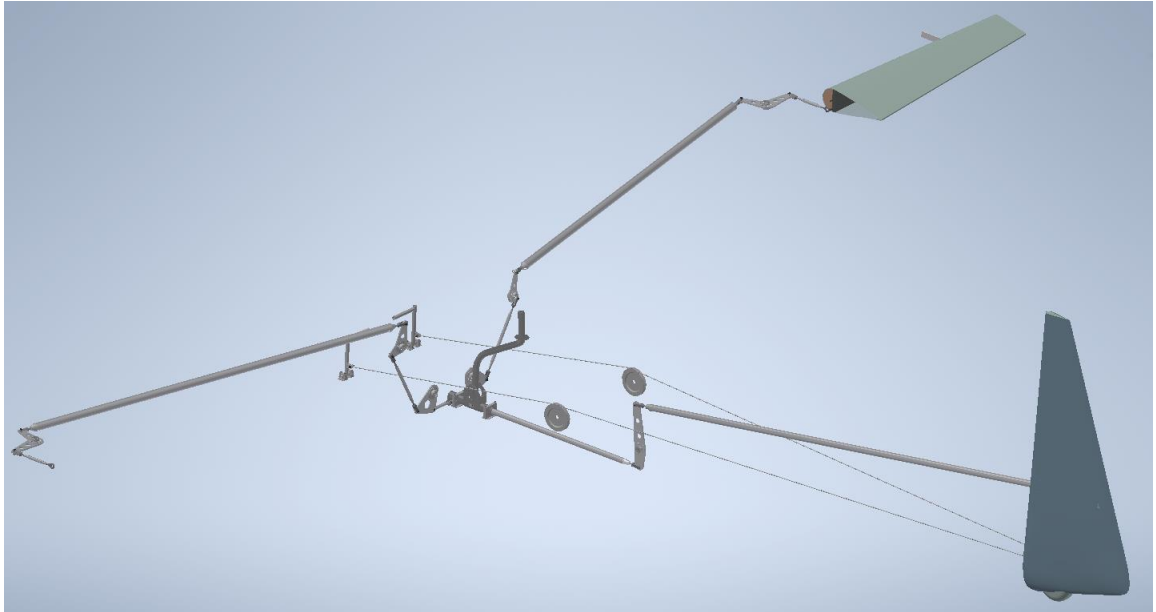
V návrhu konstrukce byl na základě koncepčního návrhu letounu navržen čárový model tras řízení, na kterém se stanovily délky táhel. Délky ramen převodových pák, z kterých vyplývá převodový poměr pák, byly stanoveny na základě vypočtených potřebných posuvů táhel pro zvolené maximální úhly natočení řídicích ploch a zvoleného chodu řídicí páky u pilota.

V kapitole stanovení zatížení byly stanoveny síly působící v táhlech, uložení pák a v laně směrového řízení vznikající silami působícími od pilota dané předpisem UL-2.

V předběžném dimenzování byl pro táhla vybrán materiál 6061T6 a byly vybrány profily táhel na základě dimenzování na vzpěr. Pro převodové páky byl vybrán materiál 2024T3. Pro všechny převodové páky byl z materiálu 2024T3 navržen stejný domek pro ložisko SKF – 629. Ložisko bylo předběžně navrženo na základě výpočtu reakčních sil v uložení pák. Spojení domků ložisek k převodovým pákám je zajištěno pomocí nýtů Ø3,2 mm Arcus: Serie 1691. Pro připojení táhel bylo v koncích ramen převodových pák navrženo kloubové ložisko SKF GE 5 E. Jako koncovky táhel byly zvoleny vidlice 5x7x8 ONL 3774, tyto vidlice jsou uloženy v navržených domcích koncovek. Kompletace domků koncovek je zamýšlena vložením do konců táhel a následným snýtováním. Řídicí páka je navržena jako trubka o rozměru 25x1,5 mm ze snadno svařitelného materiálu AISI 4130, často používaného v letectví. Navržená řídicí páka byla zkontrolována na ohyb a krut. Stejně jako u řídicí páky byly na ohyb a krut zkontrolovány pedály směrového řízení navržené z materiálu AISI 4130, které jsou navržené ze tří svařených trubek o rozměrech 15x1,5 mm. Jako součást směrového řízení bylo navrženo lano Ø3,2 mm a kladky Ø110 mm.

Jako spojovací materiál je navržen lícovaný šroub ONL 3120 zajištěný korunovou maticí. Návrh obsahuje pouze naznačené domky kluzných ložisek pro uložení řídicí páky a pedálů.

V závěru práce byl vypracován hmotový rozbor, kde byla stanovena s pomocí dostupných zdrojů a výpočtů v programu Autodesk Inventor výsledná hmotnost celé soustavy primárního řízení na 7,65 kg.



Obrázek 55.: Model primárního řízení sportovního letounu

Pro finální dokončení návrhu primárního řízení bude nutné zkontrolovat pevnost převodových pák, ideálně pomocí metody MKP, vyřešit diferencování výchylky křidélek a navrhnout dorazy pro maximální výchylky řídicí páky a pedálů. Pro pedály bude nutné navrhnout jejich propojení tak, aby se zajistila jejich stabilita v nezátíženém stavu. Dále lze uvážit zjednodušení konstrukce příčného řízení prodloužením torzní trubky řídicí páky dopředu. Toto prodloužení by posunulo páky 1 a 2 společně s táhly 1 a 2 a zároveň by mělo vliv na umístění táhla 3 v křídle. Tímto by došlo ke zkrácení táhla 3. To by pravděpodobně zajistilo možnost zvolit menší průměr táhla a snížení hmotnosti. Zároveň by bylo vhodné zkontrolovat táhla na ohyb vlivem jejich vlastní váhy.

## Seznam použité literatury:

- [1] FAI Sporting code: Section 2 – Aeroplanes [online]. Lausanne – Switzerland: FEDERATION AERONAUTIQUE INTERNATIONALE, 2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.fai.org/documents>
- [2] VALENTA, Jakub. *Koncepční návrh rychlostního letounu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84757>. Magisterská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jiří Brabec.
- [3] LEXIQUE EN ANGLAIS: FLIGHT CONTROLS. In: *Lavionnaire* [online]. [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.lavionnaire.fr/VocableFlightControl.php>
- [4] ŠULŽENKO, M. N. *Konstrukce letadel*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.
- [5] Primary flight controls. In: [Http://www.pilotfriend.com/](http://www.pilotfriend.com/) [online]. [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: [http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/primary.htm](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/primary.htm)
- [6] RUBÁNKO, Tomáš. *NÁVRH KŘIDÉLKA PRO RYCHLOSTNÍ LETOUN* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90406>. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jiří Brabec.
- [7] HOFRICHTER, Lukáš. *Návrh výškového kormidla rychlostního letounu* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90368>. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jiří Brabec.
- [8] NĚMEC, Jiří. *Návrh směrového kormidla sportovního letounu* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90384>. Bakalářská práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jiří Brabec.
- [9] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3338-4.
- [10] UL-2 Část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ [online]. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: <https://www.laacr.cz/Stranky/Predpisy/default.aspx>
- [11] Slitiny Hliníku/Oceli [online]. 4. října. 2013 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet.html>
- [12] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [13] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. Praha: SNTL, 1968. Řada strojírenské literatury.
- [14] Aircraft Spruce [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [https://www.aircraftspruce.com/catalog/mepages/alumtube\\_6061t6.php](https://www.aircraftspruce.com/catalog/mepages/alumtube_6061t6.php)
- [15] ARCUS ENGINEERING [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [http://www.avdel.eu/trhaci\\_nyty.html](http://www.avdel.eu/trhaci_nyty.html)
- [16] SKF [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/radial/productid-GE%205%20E>

- [17] Valivá ložiska. SKF [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/rolling-bearings>
- [18] MONTECO [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.monteco.cz/shop/>
- [19] ŘEZNÍČEK, Jan a Jitka ŘEZNÍČKOVÁ. *Pružnost a pevnost v technické praxi: příklady III*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03947-2.