



**ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

Ústav letadlové techniky

**Návrh říditelné ostruhy pro sportovní
letounu**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Praha 2019

RICHARD ŠIROKÝ

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: bez oboru
Vedoucí práce: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Široký** Jméno: **Richard** Osobní číslo: **465911**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh říditelné ostruhy pro sportovní letoun

Název bakalářské práce anglicky:

Design of steerable tail gear for LSA airplane

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerši způsobu ovládní ostruhového podvozku
- 2) Konstrukční návrh ostruhy
- 3) Stanovení zatížení ostruhy
- 4) Dimenzování ostruhy

Seznam doporučené literatury:

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: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.08.2019**

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 oškaně(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

| | |
|----------------|--|
| Jméno autora: | Richard Široký |
| Název BP: | Návrh říditelné ostruhy pro sportovní letounu |
| Rok: | 2019 |
| Ústav: | Ústav letadlové techniky |
| Vedoucí BP: | Ing. Jiří Brabec, Ph.D. |
| Rozsah BP: | 47 str., 29 obr., 4 tab. |
| Klíčová slova: | Ostruhové kolo, Podvozek letadla, Konstrukce, Zatížení, Dimenzování |
| Anotace: | Tato bakalářská práce se zabývá návrhem ostruhy malého sportovního letounu. Po teoretické části práce, zabývající se podvozky a konstrukčním řešením ostruhy, následuje samotná konstrukce konkrétní ostruhy. Dále se zabývá stanovením zatížení a následně dimenzováním konstrukce. Konec práce je věnován hmotovému rozboru. |

Annotation sheet

Author: Richard Široký

Title of BT: Design of steerable tail gear for LSA airplane

Academic year: 2019

Department: Department of Aerospace Engineering

Supervisor: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Extend: 47 pg., 29 fig., 4 tab.

Keywords: Tailwheel, Landing Gear, Load, Dimensioning, Construction

Annotation: This bachelor thesis describes the design of a small sport aircraft tailwheel. The theoretical part dealing with landing gears and construction solution of tailwheel is followed by the solution of the specific tailwheel construction. It also deals with a load definition and construction dimensioning. End of the thesis deals with the mass analysis.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh říditelné ostruhy pro sportovní letounu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Brabce, Ph.D. a s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použitých zdrojů.

V Praze

.....

podpis

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady v průběhu vypracování bakalářské práce. Chtěl bych poděkovat svému kolegovi Jiřímu Halamkovi za pomoc při zacházení s programem SIMULIA Abaqus. Rád bych poděkoval své rodině za podporu v průběhu celého studia na Fakultě strojní na ČVUT v Praze.

Obsah

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Koncepce ostruhového podvozku..... | 2 |
| 2.1 | Uspořádání podvozku a jeho základní typy..... | 2 |
| 2.2 | Obecné parametry ostruhového podvozku | 6 |
| 2.3 | Historický vývoj a konstrukce ocasních přístávacích zařízení | 8 |
| 3 | Konstrukční návrh ostruhy..... | 12 |
| 3.1 | Volba ostruhového kola..... | 12 |
| 3.2 | Konstrukční návrh vidlice | 13 |
| 3.3 | Spojení kola s vidlicí..... | 13 |
| 3.4 | Mechanismus řízení ostruhy | 14 |
| 3.5 | Celková sestava..... | 16 |
| 4 | Výpočet zatížení ostruhy | 17 |
| 4.1 | Stanovení provozního násobku..... | 18 |
| 4.2 | Stanovení maximální reakce z analýzy | 19 |
| 4.3 | Stanovení maximální reakce při dosednutí „na ostruhu“ | 20 |
| 4.4 | Stanovení maximální statické reakce..... | 21 |
| 5 | Dimenzování ostruhy..... | 23 |
| 5.1 | Kontrola vidlice..... | 23 |
| 5.2 | Kontrola ložiska..... | 25 |
| 5.3 | Kontrola nábojového dílu | 26 |
| 5.4 | Kontrola čepu kola – šestihranného lícovaného šroubu..... | 28 |
| 5.5 | Kontrola kolíku | 30 |
| 5.6 | Kontrola ramen | 32 |
| 6 | Hmotový rozbor | 34 |
| 7 | Závěr | 36 |
| 8 | Použité zdroje..... | 37 |

Seznam obrázků:

- Obr. 1. Základní typy podvozků podle schématu uspořádání. [1]
- Obr. 2. Průběh momentů při vychýlení vnějším působením. [11]
- Obr. 3. McDonnell Douglas AV-8B. [12]
- Obr. 4. Vozíkový podvozek Antonov An-225 Mriya. [13]
- Obr. 5. Český dvoumístný kluzák HPH 304TS. [14]
- Obr. 6. Geometrické parametry podvozku s ocasním kolem. [3]
- Obr. 7. Rozložení silových účinků pro ostruhové uspořádání podvozku. [2]
- Obr. 8. Ostruha s gumovým prstencovým tlumičem a ostruha s hydraulicko-pneumatickým tlumičem. [3]
- Obr. 9. Jeden z prvních návrhů řídicích mechanismů. [3]
- Obr. 10. Konstrukční provedení ocasního kola letounu Sling 2. [15]
- Obr. 11. Jeden ze způsobů řízení ostruhy. [7]
- Obr. 12. Další ze způsobů řízení ostruhy. [5]
- Obr. 13. Ostruhové kolo TWNP-6, 6" [8]
- Obr. 14. Zobrazení vidlice před a po svaření
- Obr. 15. Konstrukční návrh spojení kola s vidlicí
- Obr. 16. Schématická sestava celého mechanismu řízení ostruhy
- Obr. 17. Konstrukční návrh mechanismu řízení
- Obr. 18. Zobrazení celkové sestavy se základními rozměry
- Obr. 19. Dodatečné síly při bočním zatížení. [9]
- Obr. 20. Dodatečné síly během brzdění. [9]
- Obr. 21. Síly působící na ocasní kolo. [9]
- Obr. 22. Průběh napětí pro první způsob zatížení
- Obr. 23. Způsob zavedení silových poměrů
- Obr. 24. Ložiskové spojení a zobrazení průběhu tlaků
- Obr. 25. Průběh napětí pro první způsob zatížení
- Obr. 26. Způsob zavedení silových poměrů
- Obr. 27. Schéma spojení zahrnující rozměry potřebné pro výpočty
- Obr. 28. Schéma kolíku zahrnující rozměry potřebné pro výpočty
- Obr. 29. Rameno zobrazené jako vetknutý nosník
- Obr. 30. Zobrazení souřadnicového systému

Seznam tabulek:

- Tabulka 1: Analytický výpočet sil pro normální tricykl při základních případech přistání dle předpisu UL 2 [9]
- Tabulka 2: Vybrané koeficienty bezpečnosti pro některé dílce konstrukce dle předpisu UL 2 [9]
- Tabulka 3: Hmotové vlastnosti normalizovaných součástí
- Tabulka 4: Hmotové vlastnosti nenormalizovaných součástí

Seznam příloh:

- Příloha 1. 3D model sestavy ostruhy vytvořený v programu Autodesk Inventor
- Příloha 2. Soubory s výpočty průběhu napětí ve vidlici v programu SIMULIA Abaqus
- Příloha 3. Soubory s výpočty průběhu napětí v nábojové součásti v programu SIMULIA Abaqus

1 Úvod

Ostruhový podvozek, je takový podvozek, který se skládá z dvou hlavních podvozkových kol a jednoho menšího kola pomocného umístěného na zádi letounu. Dnes je tento podvozek používaný jen velmi zřídka. Své využití nachází pouze v případě stavby malých letadel používaných mimo jiné i v letecké akrobacii.

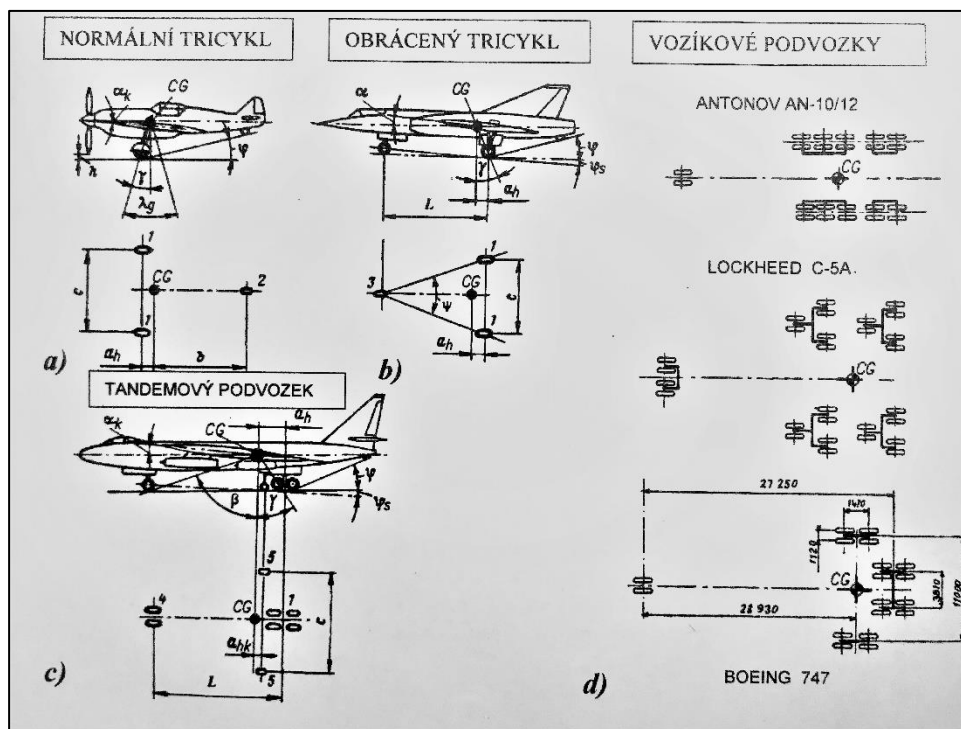
Tato práce se věnuje návrhu ostruhy, což je název pro zadní kolo ostruhového podvozku, pro malý sportovní letoun. Toto letadlo podléhá stavebnímu předpisu pro ultralehké letouny UL2 - I. Část. Z tohoto předpisu jsou také čerpány podmínky pro většinu výpočtů v této práci. Nejprve jsou v teoretické části rozebrány obecné parametry a požadavky týkající se ostruhového podvozku. Poté je v této části rozebírána samotná ostruha. Jsou popsány její jednotlivé funkční části a možné koncepty jejího řízení. Další část se týká samotné konstrukce letounu. Důležitým výstupem této části je 3D model, který lze nalézt jako součást Přílohy 1. Jsou v ní voleny normalizované součásti a navrženy části nenormalizované. Také obsahuje popis konstrukce a principu řídicího mechanismu. V následující části je počítáno zatížení působící na samotnou ostruhu. Toto zatížení je důležité hlavně pro další kapitulu této práce, která se věnuje dimenzování ostruhy, tedy pevnostním kontrolám jednotlivých částí a spojů celkové sestavy ostruhy. Pro tuto část je využíváno jednak zjednodušených výpočtů. Pro součásti, které není například z důvodu tvarové složitosti možné zjednodušit, je použita metoda konečných prvků. Na konci práce je proveden hmotový rozbor, který, ač není v požadavcích zadání, je nepostradatelnou součástí návrhu každé součástky letounu.

2 Koncepte ostruhového podvozku

V této části práce budou nejprve prezentována možná uspořádání podvozků letounů, poté budou rozebrány základní parametry ostruhového podvozku a historický vývoj od ostruhy až po zadní (ostruhové) kolo. Dále se kapitola bude věnovat obecnému popisu jednotlivých částí ocasního kola a obvyklým konstrukčním řešením podle dnešních standardů.

2.1 Uspořádání podvozku a jeho základní typy

Pro použití v letadlovém inženýrství bylo vyvinuto velké množství různých konfigurací letadlových podvozků. V současnosti je možné rozdělit podvozky letounů hned podle několika různých kritérií. Jedno z možných dělení je podle aerodynamických požadavků, na pevné a zatahovací. Dalším kritériem je způsob styku letadla s přistávací plochou, a tedy i součást podvozku zprostředkující tento styk. Kola jsou nejčastěji používaným prostředkem, ale lze najít i letadla využívající plováky, lyže nebo kombinaci těchto elementů. Velmi důležitou klasifikací kolových podvozků je rozdělení podle schématu uspořádání. Dnes je nejčastěji užívaným uspořádáním obrácený tricykl, dále pak normální tricykl, tandemový podvozek, jednokolý podvozek s podpěrami a vozíkový podvozek. [1],[2]

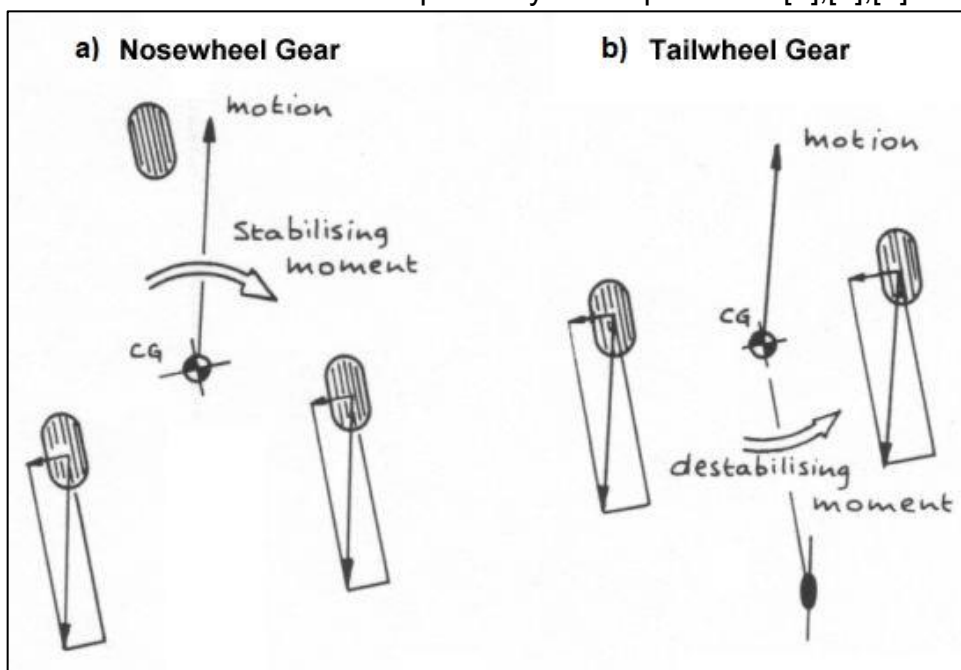


Obr. 1 Základní typy podvozků podle schématu uspořádání [1]

Zatahovacím podvozkem je vybavena naprostá většina současných letadel, a to zejména z důvodu lepších aerodynamických vlastností a menšího odporu vzduchu než u podvozku pevného. Výhody plynoucí z těchto vlastností značně převyšují i nedostatky zatahovacích podvozků, jako je větší hmotnost, složitost

konstrukce a s ní spojené i vyšší náklady na výrobu a údržbu. Téměř všechna současná letadla s letovou rychlostí nad 250 kmh^{-1} využívají podvozků zatahovacích. U letadel s letovou rychlostí menší než 150 kmh^{-1} lze z ekonomických důvodů diskutovat užití podvozku pevného. [1],[3]

Z hlediska schématu uspořádání je dnes nejběžněji užívanou variantou **obrácený tricykl**. Těžiště letadla se při tomto uspořádání nachází mírně před hlavními koly podvozku a příďové kolo je umístěno pod přídílí letounu, jak je vidno na *Obr. 1b*. Větší podíl zatížení u tohoto rozvržení podvozku je na hlavních kolech a na příďové kolo pak připadá v průměru 6-20 % celkového zatížení (o něco více než u uspořádání s ostruhovým kolem). Toto uspořádání je dnes bráno jako výhodnější než normální tricykl, a to hlavně u letadel s vyšší přistávací rychlostí. První z výhod tohoto podvozku je jeho stabilita. Při náhodném vybočení (způsobeném například větrem) vzniká působením třecích sil a síly setrvačné stabilizující moment, který působí proti momentu, který zapříčinil vybočení, viz. *Obr. 2a*. Přistání je také jednodušší než s ocasním kolem. Letadlo dosedá na hlavní kola se zdviženým předkem, při doteku hlavních kol dochází díky setrvačné síle ke zmenšení úhlu náběhu, a tedy i správnému usazení letadla na příďový podvozek bez odskakování. Vzlet a pojíždění je také mnohem snadnější než u ostruhové konfigurace, a to zejména kvůli lepšímu výhledu (malý úhel postoje, $\varphi_S = 2 - 3^\circ$) a menšímu aerodynamickému odporu. Letoun se rozjíždí na třech bodech, po dosažení vzletové rychlosti pilot zvedne pomocí řídicí páky příďové kolo, zvýší úhel náběhu a letadlo získává potřebný vztlak pro vzlet. [1],[3],[4]



Obr. 2 Průběh momentů při vychýlení vnějším působením [11]

Normální tricykl, zvaný také podvozek s ostruhovým kolem, je rozvržení hojně využívané hlavně v době před druhou světovou válkou, během které bylo vytlačeno uspořádáním příďovým. Dnes je tato konfigurace používána jen u velmi

malých a speciálních letadel, které dosahují přistávací rychlosti maximálně 130 kmh^{-1} . Těžiště v klidové poloze se nachází mírně za hlavními koly a ostruhové kolo je umístěné na ocasní části letadla, viz. *Obr. 1a*. Ostruhové kolo přenáší asi 6 - 15% celkového zatížení a úhel postoje letounu je asi $10 - 15^\circ$, což způsobuje špatný výhled pilota a zvyšuje riziko kolize. Při přistávání se zvyšujícím se instalovaným výkonem a razantností brzdění roste riziko převrácení letadla takzvaně „na hlavu“. Při přistání je také před usednutím po přechodovém oblouku nezbytně nutné letadlo chvíli podržet těsně nad zemí, dokud jeho rychlost neklesne, jinak hrozí riziko „vyplavání“ a poškození letounu po pádu z velké výšky. Nevýhodou je také nestabilita při vzniku momentu způsobeného vnějšími vlivy, kdy síly třecí a setrvačné letadlo jen více destabilizují (na rozdíl od uspořádání s obráceným tricyklem), viz. *Obr. 2b*. Výhody a tedy důvody k použití normálního tricyklu jsou v současnosti hlavně menší hmotnost, konstrukční jednoduchost a tudíž i nižší cena. [1],[4]

Tandemový podvozek se skládá ze zadního kola (nebo soustavy kol či podvozkového vozíku) umístěného v ose letadla a z říditelného předního kola. Pod křídly pak letoun podepírají pomocná kola, viz. *Obr. 1c*. Předové kolo pak přenáší asi 45 % z celkového zatížení. Takové podvozky byly používány zejména u bombardérů, u kterých bylo třeba využít prostor v blízkosti těžiště k uložení rozměrných bomb (např. atomových), ale také u letadel s možností kolmého vzletu (např. MDD AV-8A Harrier II, *Obr. 3*), ve kterých jsou v oblasti těžiště nainstalovány vznášející trysky motoru. Šlo tedy převážně o hornokřídla letadla šípovitého provedení, u kterých by bylo velmi problematické zastavět podvozek do křidel nebo motorových gondol. [1],[4]



Obr. 3 McDonnell Douglas AV-8B Harrier II [12]

Vozíkové podvozky jsou takové podvozky, které mají na každé podvozkové noze více než jedno kolo a skládají se ze třech a více nohou, viz. *Obr. 1d*. Tyto podvozky jsou užívány hlavně z důvodu průchodnosti letadla. To v praxi znamená lepší rozložení hmotnosti kvůli únosnosti přistávací dráhy, provozu na nezpevněných nebo částečně upravených přistávacích plochách či provozu

na sněhu. Většinou je tedy nalezneme u těžších letadel jako je např. Antonov An-225 Mriya, Obr. 4. [1],[3]



Obr. 4 Vozíkový podvozek Antonov An-225 Mriya [13]

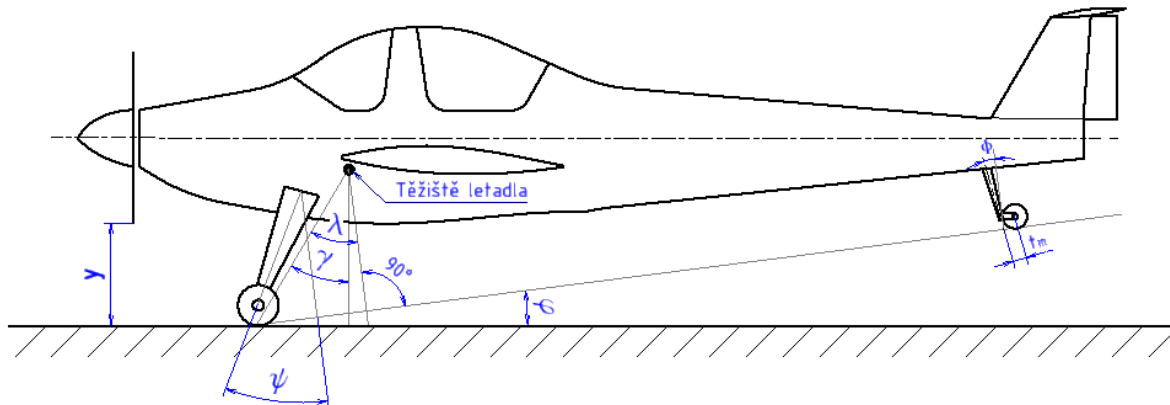
Jednokolové provedení podvozku s postranními podpěrami je pro svou malou hmotnost, jednoduchost a nízký aerodynamický odpor využíváno výhradně pro konstrukci kluzáků. Tato konfigurace je však nepraktická pro větší letouny a tudíž zde své uplatnění ani nenašla. [4]



Obr. 5 Český dvoumístný kluzák HPH 304TS [14]

2.2 Obecné parametry ostruhového podvozku

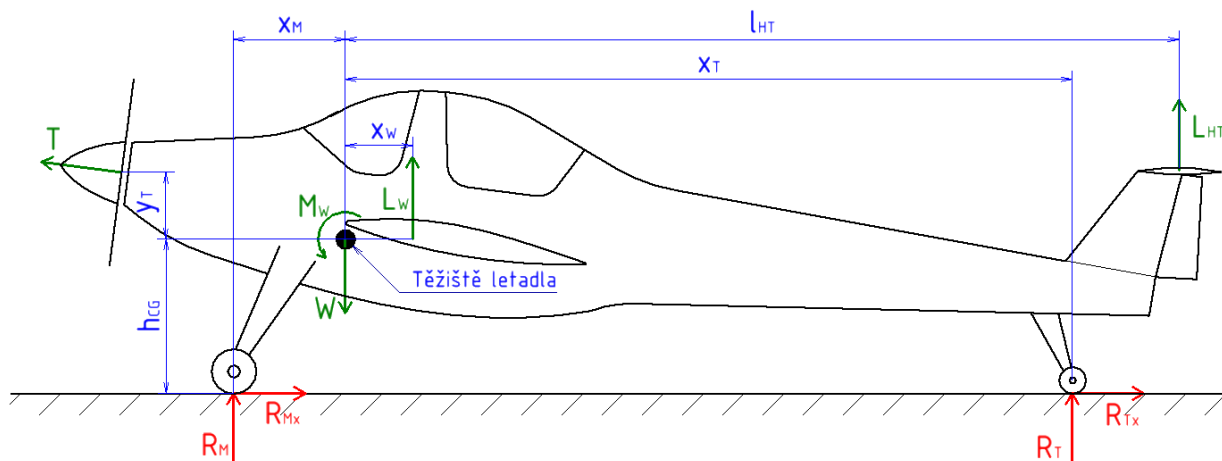
Celková podoba a obecné návrhové parametry ostruhového podvozku jsou dány především jeho geometrií, viz. *Obr. 6*. Tyto geometrické parametry se vztahují k letadlu v klidovém stavu s nedeformovanými pneumatikami a tlumiči.



Obr. 6 Geometrické parametry podvozku s ocasním kolem [3]

Podélná osa stojícího letounu a vodorovná osa spolu svírají úhel postoje φ . Tento úhel bývá z rozpětí 10-15°. Protikapotážní úhel γ při vodorovné poloze osy letounu svírá svislá přímka se spojnici těžiště a působišťe třecích sil na hlavních kolech letounu. Úhel nabývá hodnot v rozmezí 14-18°. Úhel označený na obrázku řeckým písmenem λ se označuje jako úhel vysunutí podvozku. Tento úhel svírá spojnice těžiště a působišťe třecích sil spolu se svislicí při postavení letadla na třech bodech. Výšku podvozku určují parametry jako například minimální vzdálenost mezi koncem listů vrtule a přistávací plochou (na *Obr. 6*. značená y). Tato vzdálenost by se při maximální možné deformaci pneumatik a tlumičů letadla měla rovnat minimálně hodnotě $y = 180 \text{ mm}$. Výška podvozku by také měla být dostatečně velká na to, aby se křídlo při 10° bočním náklonu nesetkalo s povrchem země. Rozchod podvozku, tedy vzdálenost mezi hlavními koly, udává příčnou stabilitu letadla. Ovlivňuje také účinnost tlumení a požadavky na jednotlivé součásti podvozku. Tato vzdálenost nabývá u jednomotorových letadel hodnot 0,18-0,3 velikosti rozpětí křídel. U vícemotorových se kola hlavního podvozku umísťují pod motorové gondoly co nejbliže k trupu a to určuje i velikost jejich rozchodu. Úhel příčného překlopení je úhel, který v příčném řezu svírá spojnice těžiště a bodu dotyku hlavního kola se svislicí. Tento úhel by měl nabývat minimálně velikosti 25°. Úhel ψ je úhel sklonu tlumících vzpěr. Úhel se nachází mezi osou tlumící vzpěry a svislou přímkou při postavení letadla na třech bodech. Pro správnou funkci tlumícího zařízení by tento úhel neměl být menší než 4°. Empiricky bylo zjištěno že ideální velikost tohoto úhlu je okolo 17°. Úhel ϕ je úhel mezi osou otáčení ostruhového kola a mezi svislicí a měl by být asi 5°-7°. Velikost stopy t_m by pak měla odpovídat přibližně 1/10 velikosti průměru ocasního kola. [3]

Znalost rozložení silových účinků při návrhu podvozku letadla je taktéž velmi důležitá. Obr. 7 znázorňuje zjednodušené působení sil na ostruhovou konfiguraci podvozku při konstantní rychlosti během jízdy po zemi. V průběhu pohybu letadla je ostruha stále v kontaktu s podkladem. [2]



Obr. 7 Rozložení silových účinků pro ostruhové uspořádání podvozku [2]

Reakci na ostruhovém kole lze vyjádřit podle [2] jako:

$$R_T = \frac{-T * y_T + (W - L_{HT} - L_W) * (x_M - \mu * h_{CG}) - L_W * x_W - L_{HT} * l_{HT} + M_W}{x_M * x_T} \quad (2.1)$$

Reakci na hlavní kolo pak podle [2] jako:

$$R_M = W - L_{HT} - L_W - R_T \quad (2.2)$$

Kde:

L_W vztlaková síla od křídla [N]

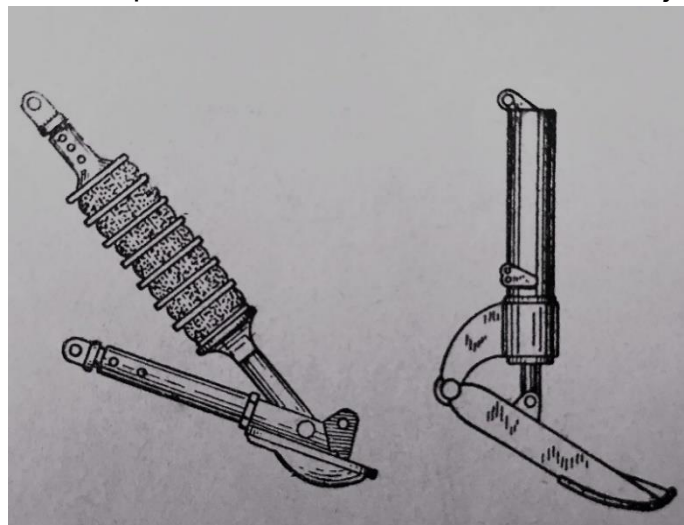
L_{HT} vztlaková síla od ocasních ploch [N]

M_W moment stoupání [Nm]

T síla od tahu vrtule [N]

2.3 Historický vývoj a konstrukce ocasních přistávacích zařízení

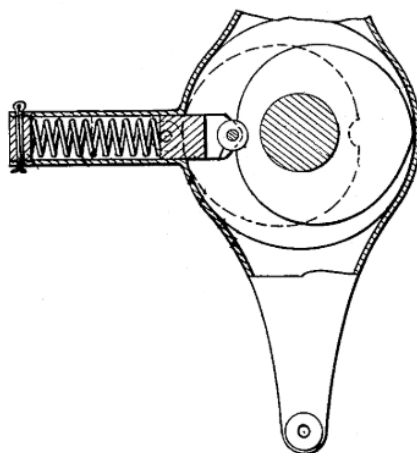
V raném období letectví byla do ocasní části trupu umísťovaná ostruha, která sloužila jako třetí opěrný bod letadla. Šlo také o jeden z nejjednodušších a neúčinnějších prostředků k brždění letounu při přistání. Tyto ostruhy byly nejprve směrově stálé, tedy otočné pouze okolo vodorovné osy. Jedním z možných provedení byla jednoduchá ostruha letounu UT-2, která měla podobu listové pružiny. Na konci této pružiny byla připevněna botka, která zprostředkovávala styk s přistávací plochou. Dalším vývojem se začaly používat ostruhy směrově výkyvné, které umožňují i otáčení kolem osy svislé. Toto řešení zajistilo letcům podstatně lepší manévrovatelnost na zemi. Směrově výkyvnou říditelnou ostruhu můžeme nalézt např. u letounu P-5. Liší se také provedení tlumícího zařízení, které je u tohoto typu letadla řešeno pomocí gumového provazce. Užívalo se také gumových prstencových tlumičů, a to zejména u středních a těžkých letadel. Později se rozšířily tlumiče hydraulicko-pneumatické a pružinově třecí. Velkou nevýhodou ostruh bylo výrazné ničení povrchu letiště, strhávání travního porostu v případě nezpevněné přistávací plochy, a tedy i vznik nerovností. [3]



Obr. 8 Ostruha s gumovým prstencovým tlumičem (vlevo) a ostruha s hydraulicko-pneumatickým tlumičem (vpravo) [3]

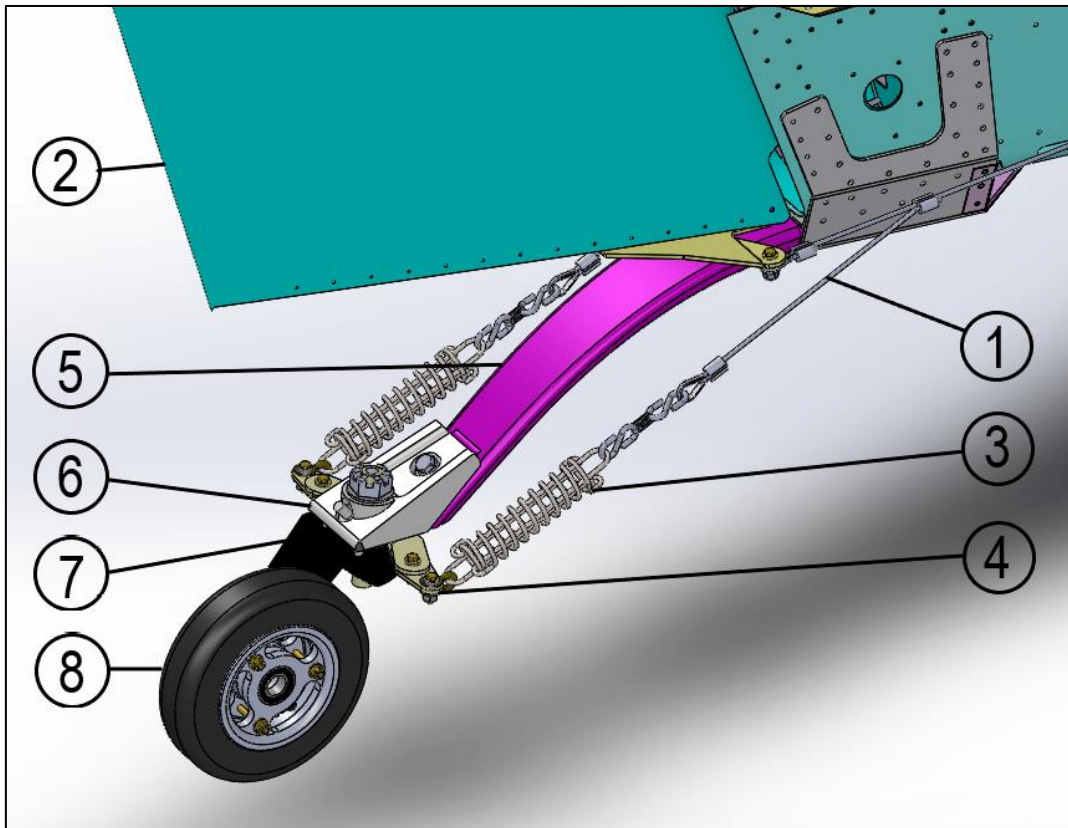
Ostruhy byly postupem času nahrazeny ocasními koly a hlavní podvozková kola byla opatřena brzdami. Při konstrukci prvních ostruhových kol se nejprve zachovávalo nosné schéma ostruhy s hydraulicko-pneumatickým tlumičem. Celková konstrukce i konstrukce jednotlivých částí zadního kola byly nadále zdokonalovány. Z důvodu potřeby snížení odporu vzduchu během letu došlo vývoji zatahovacích systémů ocasních kol. Schémata zatahování lze pak dělit na dva hlavní druhy. U prvního je osa otáčení kola totožná s osou vzpěrového tlumiče. U druhého se tyto dvě osy neshodují. V dnešní době se však používají výše zmíněné zatahovací systémy jen v malé míře, protože u malých letadel, u kterých se normální tricykl ještě používá, má větší význam jednoduchost a nižší hmotnost oproti mírnému zlepšení letových vlastností. K postupnému vývoji došlo také v oblasti řídicích mechanismů. Požadovanou vlastností říditelného ostruhového kola je možnost uvolnění kola z řízení v případě náhle boční síly nebo při manipulaci s letounem na malém prostoru. Jeden z prvních návrhů takového mechanismu lze

vidět na *Obr. 9*, kde při vychýlení mimo neutrální polohu pružina s kolíkem a vačka ve tvaru srdce vytvářejí sílu, která tlačí kolo zpátky do původní pozice. [3]



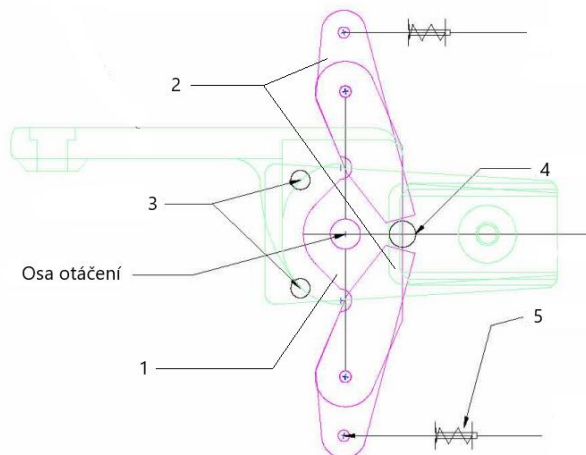
Obr. 9 Jeden z prvních návrhů řídicích mechanismů [3]

Pro popis jednoho z nejtýpčtějších provedení konstrukce ostruhového kola lze použít *Obr. 10.*, na kterém je vidět ocasní kolo sportovního letounu Sling 2. Jak již bylo psáno, zatahovací systémy se v dnešní době příliš nevyužívají. Samotné kolo ale může být opatřeno kapotáží pro snížení aerodynamického odporu. Ocasní kola lze rozdělit na řízená (ovládaná pilotem) a volně otočná. V případě, že se jedná o kolo řízené, je ovládání ostruhy spojeno s ovládáním směrového kormidla (2). To zprostředkovávají u sportovních letadel většinou lanka (1) ovládaná řídicími pedály z kokpitu letounu. Lanka jsou pak prostřednictvím pružin (3) napojena na řídicí ramena (4), která umožňují otáčení kola okolo svislé osy. Ta bývají konstruována buďto v duálním provedení (viz. *Obr. 10.*) nebo v provedení jediného ramena. Samotná ostruha je propojena s ocasní konstrukcí letadla pomocí pružného elementu (5), který má na starost tlumení nárazů. K výrobě této součásti se používá kompozitních materiálů, listové pružiny, nebo kuželové tyče z pružinové oceli. Pro lepší tlumení nárazů mohou být instalovány přídavné tlumiče. Samotné mechanismy otáčení, které umožňují vychýlení kola o větší úhel, než je úhel pod kterým je kolo ještě říditelné, jsou důležitým prvkem. Slouží k tomu, aby nedošlo k poškození ostruhy v případě náhlé boční síly. Také umožňují manipulaci s letadlem na malém prostranství (např. v hangáru). Samotné kolo (8) je pak připevněno k ostruhové vidlici (7). Ta se vyskytuje ve dvou modifikacích. V prvním případě vidlice kolo objímá a čep kola se o ní opírá z obou stran. V druhém případě je vidlice pouze jednostranná a na vidlici a čepu vzniká nežádoucí ohybový moment, z důvodu zapření čepu kola pouze na jedné straně. [5], [6], [7]



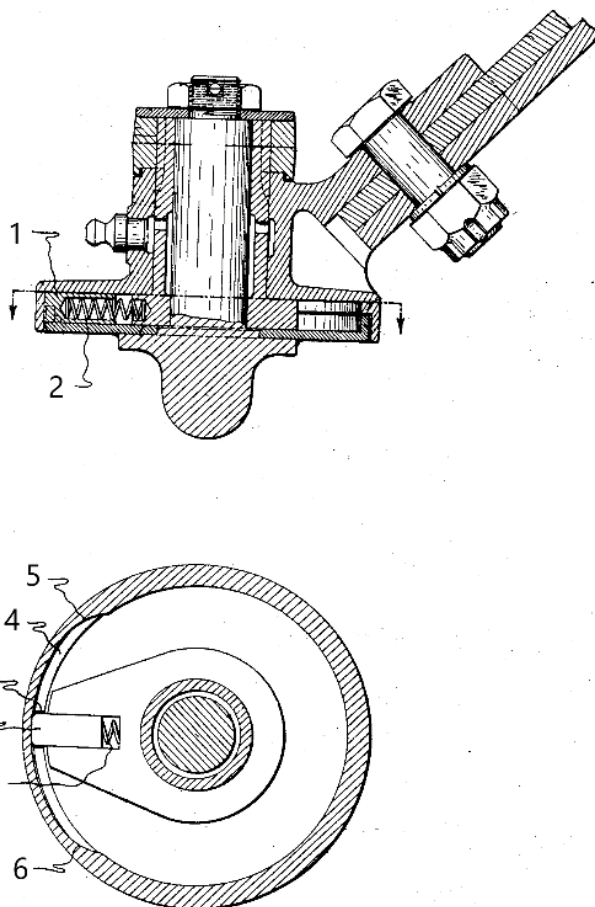
Obr. 10 Konstrukční provedení ocasního kola letounu Sling 2 [15]

Současní výrobci řeší otáčení kola okolo svislé osy dvěma způsoby. První způsob je znázorněn na Obr. 11. Tento mechanismus lze použít pouze v případě duálního provedení řídicích ramen. Skládá se z ramen o třech destičkách, z nichž jedna (1) je napevno připojena k ose otáčení a další dvě (2) jsou připevněny po stranách na otočném čepu. Dále se na něm nachází uvolňovací kolíky (3) a kolík řídicí (4). V případě, že dojde ke styku uvolňovacího kolíku s jedním ramenem a silou dojde k napnutí pružiny (5) a vytlačení pohyblivé destičky, uvolní se dráha pro řídicí kolík a kolo se stává volně otočným až do doby, než se řídicí kolík vrátí zpátky na své původní místo. Úhel, při kterém dojde k uvolnění kola lze ovlivnit velikostí a tvarem destiček. Obvykle se pohybuje mezi 20°-40°. [7]



Obr. 11 Jeden ze způsobů řízení ostruhy [7]

Druhý způsob řešení lze vidět na *Obr. 12*. Zde je pomocí čepu a díry kluzně spojená pohyblivá část, jejíž součástí je vidlice s kolem, a část která pevně navazuje na trup letadla. Řídící mechanismus se skládá z kolíku (1), pružinky (2), vybrání (3) a patřičně upravené dráhy (4). V případě, že dojde působením vnější síly k překročení dovoleného úhlu (*vymezeného oblastmi 5 a 6*) a dovolené síly, kolík zamáčkne pružinu a zaskočí. Kolo se pak může volně otáčet okolo své osy až do doby, než se kolík navrátí zpátky do vymezené oblasti. [5]



Obr. 12 Další ze způsobů řízení ostruhy [5]

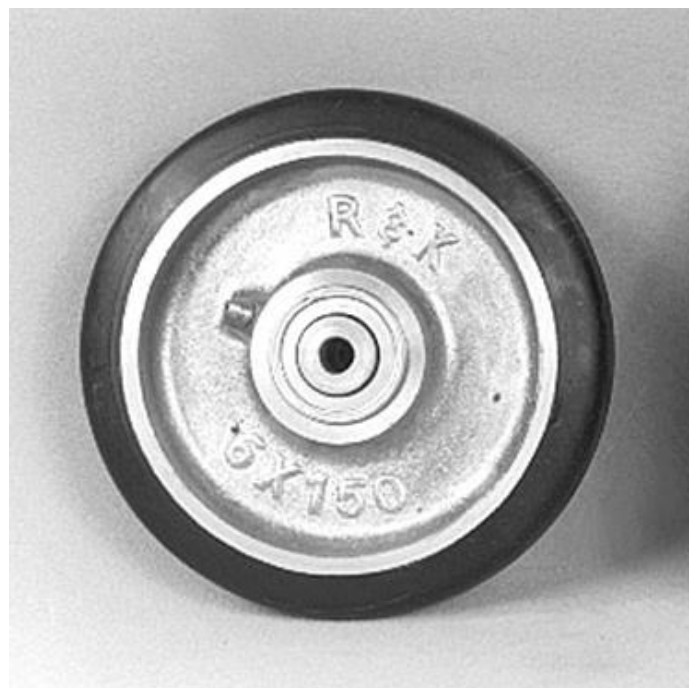
3 Konstrukční návrh ostruhy

Základním požadavkem bylo navrhnout ostruhu tak, aby jí bylo možné ovládat z pilotního prostoru prostřednictvím řídicích lanek. Samotný návrh konstrukce a vedení řídicích lanek není součástí této bakalářské práce. Důležitým parametrem řízené ostruhy je její schopnost se při nadměrném bočním zatížení uvolnit do volně otočného stavu. Při návrhu jakékoli letadlové součásti je také potřeba součásti projektovat tak, aby měly co nejmenší hmotnost (s přihlédnutím k ekonomičnosti) a zároveň splňovaly všechny pevnostní kontroly.

3.1 Volba ostruhového kola

Samotné kolo je voleno podle maximálního zatížení působícího na čep kola spočteného v následující kapitole, $P_a = 1\,773,75\text{ N}$.

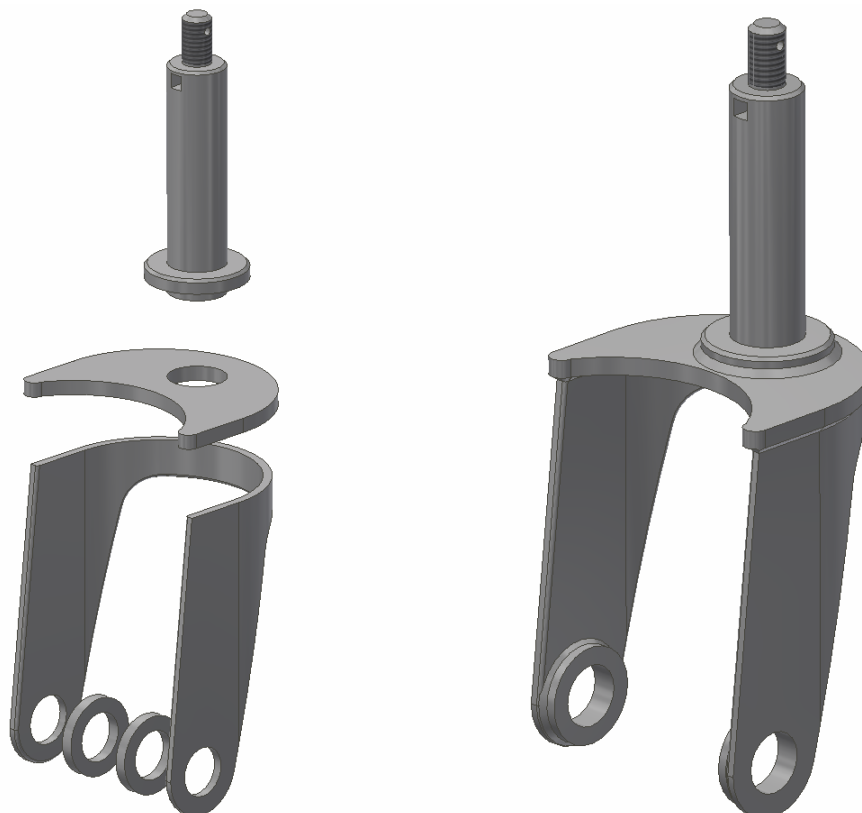
Bylo zvoleno kolo od výrobce WICKS Aircraft and motorsport, *TWNP-6*, 6". Kolo je dle katalogu dimenzované na statické zatížení 460 lb (460 lb \approx 2 050 N), což je vzhledem k maximálnímu zatížení dostačující hodnota. Jedná se o bezvzduchové kolo. Katalogové rozměry jsou uváděny v palcích, kde největší průměr kola má velikost 6", maximální šířka, tedy šířka střední části v místě díry, má velikost 2,25" a samotná díra pro vložení čepu je upravená na metrickou hodnotu $\varnothing 17\text{ mm}$ s tolerancí H7. Výrobce neposkytuje 3D CAD model, kolo bude tedy při návrhu nahrazeno hrubým modelem o základních rozměrech daných katalogem, který je však zjednodušený pro účel návrhu dalších součástí a celkové sestavy. Nejsou v něm vymodelovány detaily jako jsou ložiska atd., protože jsou pro další potřeby práce nepodstatné. [8]



Obr. 13 Ostruhové kolo *TWNP-6*, 6" [8]

3.2 Konstrukční návrh vidlice

Vidlice ostruhy je nejsložitějším dílem celé sestavy. Pro tuto konstrukci bylo voleno dvoustranné provedení vidlice, a to zejména z důvodu odstranění nežádoucího ohybového momentu, který by vznikl při volbě jednostranného provedení. To by mělo za následek nutnost robustnější konstrukce vidlice. Součást byla navržena jako svařenec, viz. *Obr. 14*.

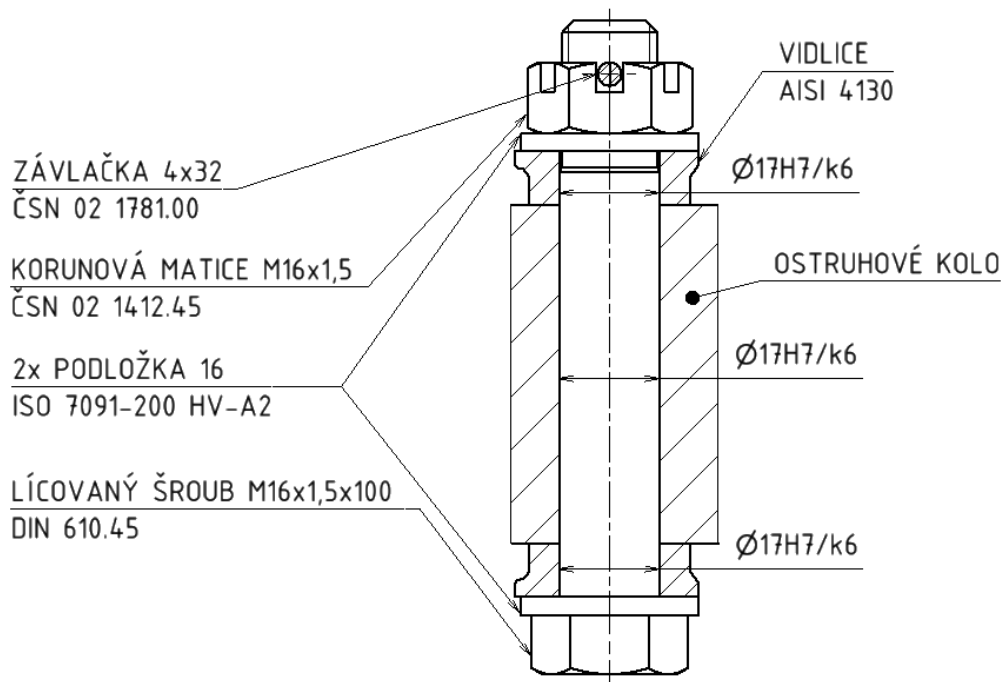


Obr. 14 Zobrazení vidlice před a po svaření

Jednotlivé rozměry a celkový tvar tohoto dílu byly postupně upravovány v závislosti na výsledcích metody konečných prvků, viz. kapitola 5.1. Podložky přivařené na spodní části vidlice nám umožňují zvětšení vzdálenosti mezi vidlicí a kolem a tím je vyloučen jejich styk během provozu. Tyto podložky rovněž zmenšují otlačení otvoru. Vrchní čep je pak součástí otočného říditelného mechanismu. Celá součást je vyrobena z oceli *AISI 4130 (25CrMo4)* v zušlechtěném stavu.

3.3 Spojení kola s vidlicí

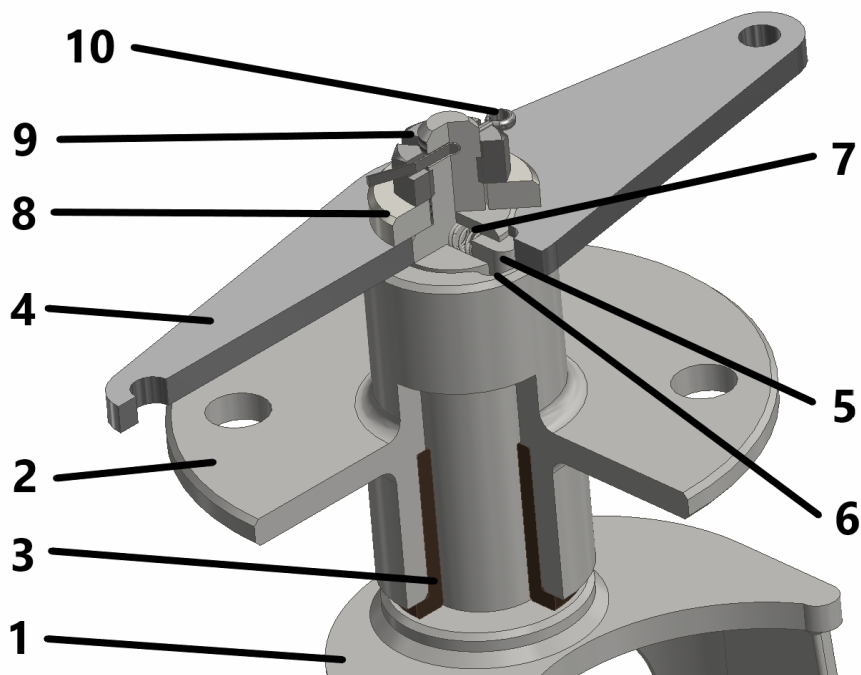
Spojení bude řešeno pomocí lícovaného ocelového šroubu M16x100 DIN 610.45 s vyvrtaným dřikem a korunové matice M16 ČSN 02 1412.45 zajištěné závlačkou. Jedná se o neotočné spojení, na které není vyvíjeno žádné větší tečné zatížení. Jako zajištění proti pootočení tedy stačí dostatečné utažení šroubového spoje. Návrh spojení je zobrazen na *Obr. 15*.



Obr. 15 Konstrukční návrh spojení kola s vidlicí

3.4 Mechanismus řízení ostruhy

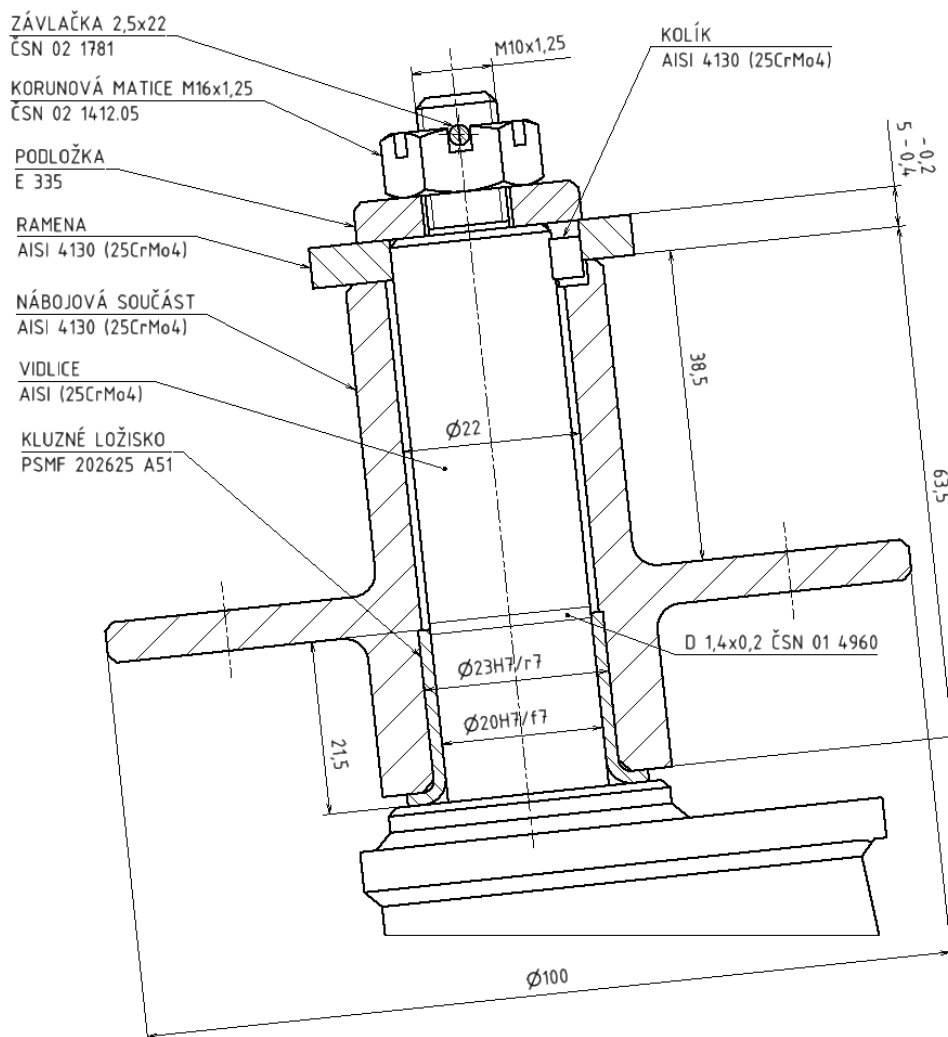
Jako koncept mechanismu řízení byl zvolen druhý způsob ze způsobů uvedených v kapitole 2.2, tedy řešení pomocí kolíku a pružinky. Sestava je znázorněna na Obr. 16.



Obr. 16 Schématická sestava celého mechanismu řízení ostruhy

Otočně pohyblivý styk vidlice (1) a nábojové součásti (2), která je pevně spojená s trupem, je zprostředkován pomocí kluzného ložiska (3). Ložisko bylo vzhledem k nízkým rychlostem otáčení a vzhledem k nízkým požadavkům na údržbu možné volit jako přírubové z kompozitu PTFE. Ložisko bylo vybráno dle potřebných rozměrů v katalogu firmy SKF, PCMF 202321.5 E. Uložení a úprava povrchu byly voleny dle doporučení v katalogu. Nábojová součást je spojena s trupem pomocí čtyř šestihranných šroubů M8 ČSN EN ISO 4014.05 umístěných v dírách ve věnci náboje.

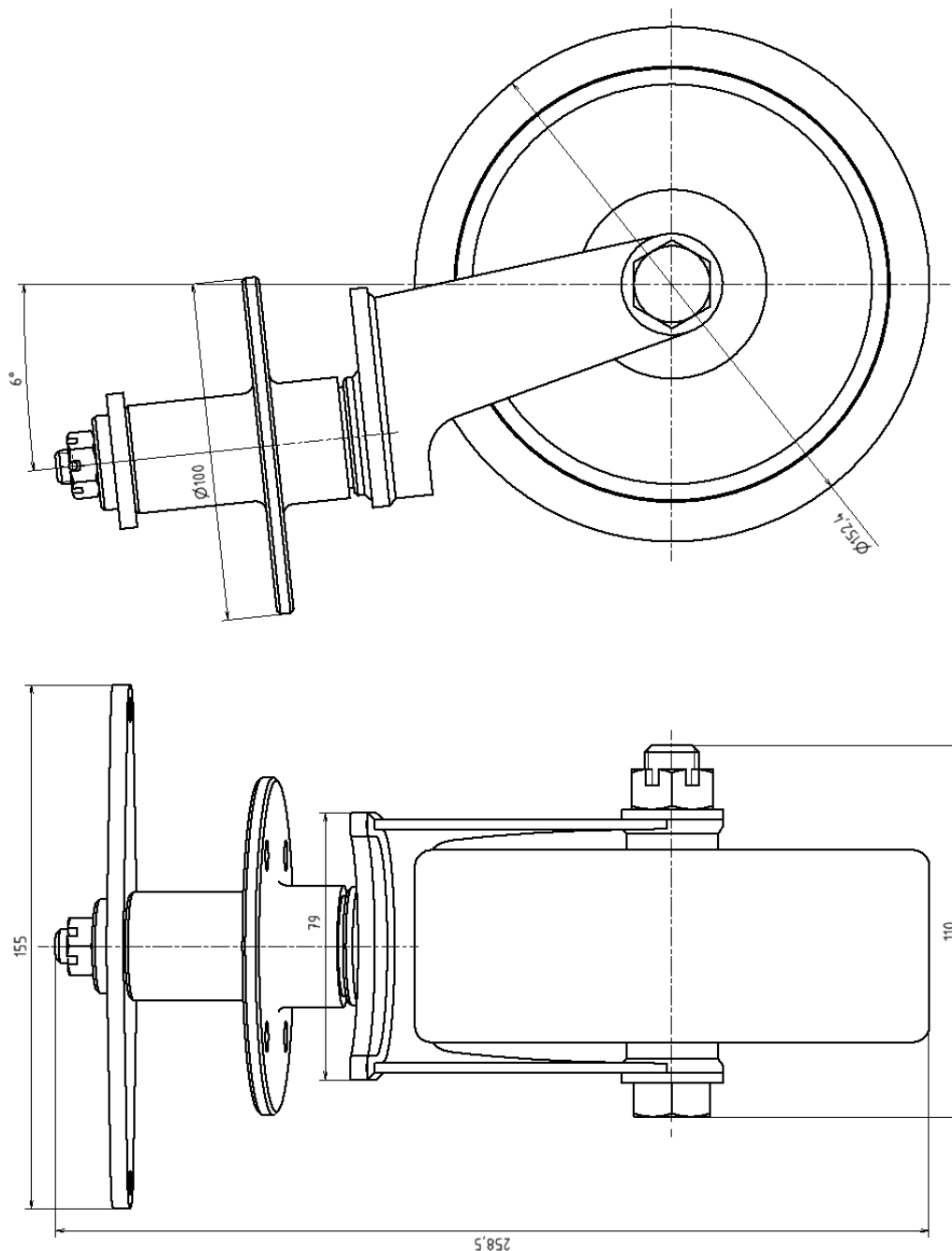
Ostruha je z kokpitu řízena pomocí lanek, které jsou připevněny v otvorech po stranách ramena (4). Rameno, na kterém je silami od lanek vyvolán moment, pak prostřednictvím kolíku (5) tento moment přenáší na vidlici s kolem, která se jeho působením otáčí. Kolo je možné díky drážce (6) v nábojové součásti řízeně pootočit až o 30°. V případě, že dojde k dosažení maximální boční síly počítané níže v kapitole 4.4, tak kolík z důvodu tvaru drážky stlačí pružinu (7) a zapadne. Kolo se stává volně otočné kolem své osy. Celý mechanismus je pak axiálně zajištěný pomocí podložky (8), korunové matice (9) a závlačky (10).



Obr. 17 Konstrukční návrh mechanismu řízení

3.5 Celková sestava

Na Obr. 18 lze vidět celou sestavu se základními rozměry. Osa otáčení by měla se svislou osou při postoji na třech kolech svírat úhel 5-7° (viz. kapitola 2.2). Protože však není znám způsob uchycení ostruhy k draku letadla, tak pro sestavu a pevnostní kontroly uvažujeme střední hodnotu tohoto rozmezí úhlů, tedy úhel 6°. Vidlice, nábojová součást, ramena i kolík budou vyrobeny z oceli vhodné pro konstrukci letadlových podvozků, *AISI 4130 (25CrMo4)* žíhané na měkko. 3D model vytvořený v CAD programu Autodesk Inventor lze nalézt jako součást Přílohy 1.



Obr. 18 Zobrazení celkové sestavy se základními rozměry

4 Výpočet zatížení ostruhy

V této kapitole bude stanoveno zatížení působící na ostruhu. Návrhové výpočty jsou prováděny pro jednomístný letoun, kde je dle požadavků zadání určena hmotnost letounu $m = 350 \text{ kg}$, plocha křídla $S = 5 \text{ m}^2$, délka trupu bez směrového kormidla $L_{TR} = 4,43 \text{ m}$, vzdálenost hlavního podvozku a ostruhového kola při postoji na třech kolech $d = 3,79 \text{ m}$, celková dráha tlumení nárazu při přistání $y = 0,2 \text{ m}$ a pro jehož pádovou rychlost, při které je letoun ještě říditelný, platí $V_{SO} \leq 83 \text{ kmh}^{-1}$. Při výpočtech tedy budeme vycházet z předpisu *UL2 - I. Část: Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky* (dále už jen *UL2 - I. Část*).

Dle předpisu *UL 2 - I. Část* pro Ultralehké letouny, § 471 pro provozní zatížení platí:

„Provozní pozemní zatížení je definováno jako vnější zatížení a setrvačné síly, které působí na konstrukci letounu. Ve všech stanovených podmínkách pozemního zatížení musí být vnější reakce v rovnováze se setrvačnými silami a momenty tak, aby to odpovídalo skutečným podmínkám nebo se jim blížilo z bezpečné strany.“ [9]

| Způsob přistání: | vodorovné přistání | s velkým úhlem náběhu |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Svislá síla v těžišti: | $n_{pr} * G$ | $n_{pr} * G$ |
| Vodorovná síla v těžišti: | $0,25 * n_{pr} * G$ | 0 |
| Svislá síla na kola hl. podvozku: | $(n_{pr} - 0,667) * G$ | $(n_{pr} - 0,667) * G * b/c$ |
| Vodorovná síla na kola hl. podvozku: | $0,25 * n_{pr} * G$ | 0 |
| Svislá síla na ocasní kolo: | 0 | $(n_{pr} - 0,667) * G * a/c$ |
| Vodorovná síla na ocasní kolo: | 0 | 0 |

Tabulka 1: Analytický výpočet sil pro normální tricykl při základních případech přistání dle předpisu *UL 2* [9]

Kde:

n_{pr} ... provozní násobek [–]

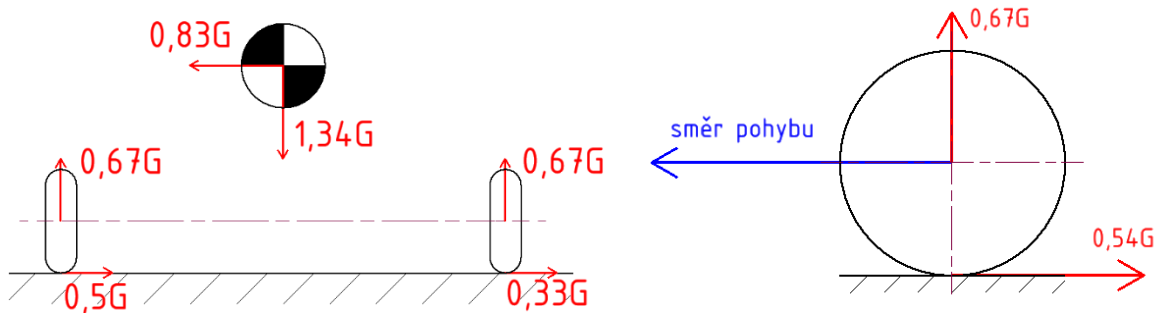
$G = m * g$ [N], m ... hmotnost letadla [kg], g ... tíhové zrychlení [ms^{-2}]

a ... vzdálenost těžiště a hl. podvozku při postoji na třech kolech [m]

b ... vzdálenost těžiště a ocasního kola při postoji na třech kolech [m]

c ... vzdálenost hl. podvozku a ocasního kola při postoji na třech kolech [m]

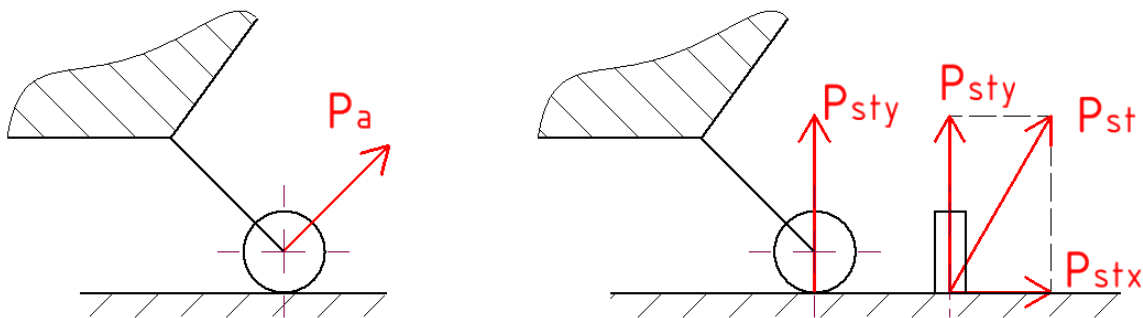
Dodatečné podmínky je potřeba uvažovat při bočním zatížení (viz. Obr. 19), brzdění (viz. Obr. 20) a na ocasní kolo (viz. Obr. 21).



Obr. 20 Dodatečné podm. při bočním zatížení [9]

Obr. 19 Dodatečné podm. během brzdění [9]

Na Obr. 21 vlevo lze vidět maximální reakci působící v čepu kola při přistání při velkém úhlu náběhu. Síla svírá s vodorovnou rovinou úhel 45° . Vpravo je pak znázorněna maximální statická síla, která se skládá ze svislé složky (viz. Tabulka 1) a boční složky. [9]



Obr. 21 Síly působící na ocasní kolo. Vlevo maximální síla zjištěná z analýzy, působí pod úhlem 45° . Vpravo maximální statická síla. [9]

4.1 Stanovení provozního násobku

Nejdříve bude potřeba určit provozní násobek n_{pr} zatížení v těžišti letounu. Pro jeho výpočet vycházíme z [9] ze vztahu:

$$n_{pr} = n_k + 0,067 \quad (4.1)$$

Kde n_k je podle [9] provozní násobek na kolech podvozku:

$$n_k = \frac{0,0132 * \sqrt{\frac{m * g}{S} + \frac{y}{3}}}{y_{ef}} \quad (4.2)$$

Kde:

$m = 350 \text{ kg}$... hmotnost stanovená v těžišti letadla

$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$... tíhové zrychlení

$S = 5 \text{ m}^2$... plocha křídla

$y = 0,2 \text{ m}$... celková dráha tlumení nárazu

$y = y_{PN} + y_{TL}$... součet předpokl. stlačení pneumatiky a tlumiče [m]

y_{ef} ... účinná dráha tlumení [m]

Při výpočtu uvažujeme pružinové tlumiče, pro které podle [9] platí:

$$y_{ef} = 0,5 * (y_{PN} + y_{TL}) = 0,5 * y \quad (4.3)$$

Pokud je n_{pr} větší než 4, pak je potřeba uchycení všech soustředěných hmot kontrolovat na zatížení odpovídající vypočtenému n_{pr} . [9]

Výpočet:

$$n_k = \frac{0,0132 * \sqrt{\frac{m * g}{S} + \frac{y}{3}}}{0,5 * y} = \frac{0,0132 * \sqrt{\frac{350 * 9,81}{5} + \frac{0,2}{3}}}{0,5 * 0,2} \doteq 3,459 \quad (4.4)$$

$$n_{pr} = n_k + 0,67 = 3,459 + 0,67 = \mathbf{4,129} \quad (4.5)$$

Z daných parametrů letadla byl vypočítán provozní násobek $n_{pr} = 4,129$, který byl použit pro další výpočty. Pro provozní násobek platí, že n_{pr} je větší než 4 a je tedy nutné kontrolovat uchycení všech soustředěných hmot v letounu na zatížení odpovídající vypočtenému n_{pr} .

4.2 Stanovení maximální reakce z analýzy

Při určování maximální reakční síly působící na ostruhové kolo lze vycházet z *Tabulky 1. a Obr. 21 vlevo*.

Nejprve bude podle [9] určena síla z analýzy působící v čepu ve svislé ose kola při přistání s velkým úhlem náběhu:

$$P_a = (n_{pr} - 0,667) * G * \frac{a}{c}, \quad P_{stx} = P_{sty} \quad (4.6)$$

Kde:

n_{pr} ... provozní násobek vypočtený v kapitole 3.1

G ... tíha, $G = m * g$ [N], $m = 350 \text{ kg}$, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$

a ... vzdálenost těžiště a hl. podvozku při postoji na třech kolech [m]

c ... vzdálenost hl. podvozku a ocasního kola při postoji na třech kolech [m]

Ostruhové kolo přenáší 6–15 % celkového zatížení působícího v těžišti letadla. Pro tento případ bude uvažováno nejvyšší možné zatížení, tedy 15 %. Tato hodnota je použita k určení poměru vzdáleností a/c , který se bude rovnat poměru zatížení v těžišti a na ostruhovém kole. [1]

$$\frac{a}{c} = 0,15 \quad (4.7)$$

Výpočet:

$$\begin{aligned} P_a &= (n_{pr} - 0,667) * m * g * \frac{a}{c} \\ &= (4,129 - 0,667) * 350 * 9,81 * 0,15 \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$P_a = 1\,773,75 \text{ N} \quad (4.9)$$

Dle první dodatečné podmínky pro zatížení pro záďový podvozek z předpisu *UL2 – I. Část* je třeba také uvažovat maximální reakci P_a působící pod úhlem 45° směrem dozadu v ose čepu kola v rovině symetrie ostruhy (viz. *Obr. 21 vlevo*). [9]

Byla stanovena maximální reakční síla z analýzy působící na ostruhové kolo při dosednutí s velkým úhlem náběhu. Působí síly se nachází v ose čepu kola a její nositelkou je svíslá osa kola. Síla má velikost $P_a = 1\,773,75 \text{ N}$. Tuto sílu je také třeba uvažovat jako sílu působící pod úhlem 45° směrem dozadu (viz. *Obr. 21, vlevo*).

4.3 Stanovení maximální reakce při dosednutí „na ostruhu“

Maximální reakční sílu P'_a při přistání „na ostruhu“, tedy pokud hlavní podvozek není ve styku se zemí, je možné určit pomocí následujícího vzorce. Reakce působí pod úhlem 45° směrem dozadu (stejně jako P_a viz. *Obr. 21, vlevo*). [9]

$$P'_a = 4 * m * g * \frac{i_y^2}{i_y^2 + b^2} \quad (4.10)$$

Kde:

i_y ... poloměr setrvačnosti letounu [m]

b ... vzdálenost ostruhy od těžiště letounu při postoji na třech kolech [m],

Přibližný poloměr setrvačnosti letounu lze určit podle [9] ze vztahu:

$$i_y = 0,225 * L_{tr} \quad (4.11)$$

Kde:

$$L_{tr} = 4,43 \text{ m ... celková délka trupu bez směrového kormidla}$$

Vzdálenost ostruhy od těžiště letounu při postoji na třech kolech b lze vypočítat podle [9] z poměru $a/c = 0,15$, jehož hodnota byla určena v kapitole 4.2 a ze zadáním dané vzdálenosti hlavního podvozku a ostruhového kola při postoji na třech kolech $c = 3,79 \text{ m}$:

$$a + b = c \quad (4.12)$$

$$a/c + b/c = 1 \quad (4.13)$$

$$b = c * (1 - a/c) \quad (4.14)$$

$$b = 3,79 * (1 - 0,15) = 3,222 \text{ m} \quad (4.15)$$

Výpočet reakce P'_a :

$$P'_a = 4 * m * g * \frac{(0,225 * L_{tr})^2}{(0,225 * L_{tr})^2 + b^2} = 4 * 350 * 9,81 * \frac{(0,225 * 4,43)^2}{(0,225 * 4,43)^2 + 3,222^2} \quad (4.16)$$

$$P'_a = 1\,199,91 \text{ N} \quad (4.17)$$

Byla vypočtena maximální reakční síla při přistání „na ostruhu“ $P'_a = 1\,199,91 \text{ N}$. Tato reakce je menší než reakce z analýzy $P_a = 1\,773,75 \text{ N}$ vypočtená v kapitole 4.2, proto tedy bude pro dimenzování jednotlivých částí ostruhy uvažována reakce P_a .

4.4 Stanovení maximální statické reakce

Při určování maximální statické reakční síly působící na ostruhové kolo lze vycházet z Obr. 21 vpravo. Jak je patrné, reakční síla určená ze statiky působí ve dvou směrech z bodu styku ostruhového kola s podkladem při postoji na třech kolech, a to svisle vzhůru a kolmo do boku kola. Obě tyto síly mají stejnou velikost, kterou lze určit podle [9] z tíhové síly letadla působící na ostruhu ze vztahu:

$$F_{stx} = F_{sty} = m * g * \frac{a}{c} \quad (4.18)$$

Výpočet:

$$F_{stx} = F_{sty} = 350 * 9,81 * 0,15 \quad (4.19)$$

$$F_{stx} = F_{sty} = \mathbf{515,03\ N} \quad (4.20)$$

Byla vypočtena maximální statická reakční síla $F_{stx} = F_{sty} = 515,03\ N$. Tato reakce má působiště v bodu styku kola s podkladem při postoji na třech kolech svisle vzhůru a do boku kolmo na směr jízdy.

5 Dimenzování ostruhy

V této kapitole budou provedeny potřebné pevnostní kontroly jednotlivých částí a spojů mechanismů ostruhy. Ke kontrolám budou používány vztahy z teorie pružnosti, materiálové vlastnosti jednotlivých kusů sestavy, rozměry stanovené konstrukcí ostruhy a silové poměry určené v kapitole 4. U složitějších součástí, konkrétně tedy u vidlicového dílu, bude pevnostní kontrola provedena pomocí metody konečných prvků.

Důležitým aspektem při návrhu podvozku je také bezpečnost, na kterou jednotlivé části konstrukce dimenzujeme. Dle předpisu *UL 2 – I. Část* by měl součinitel bezpečnosti dosahovat hodnoty 1,5, pokud není uvedeno jinak. Jiné součinitele bezpečnosti uvažujeme zvláště pak u dílců specifikovaných v *Tabulce 2*. [9]

| | |
|-----------------------------|-------|
| Bezpečnost pro odlitky: | 3,0 |
| Bezpečnost pro spoje: | 1,725 |
| Bezpečnost pro kování: | 1,725 |
| Bezpečnostní pásy a sedačky | 1,995 |
| Bezpečnost pro lana řídící: | 2,0 |

Tabulka 2: Vybrané bezpečnosti pro některé dílce konstrukce dle předpisu UL 2 [9]

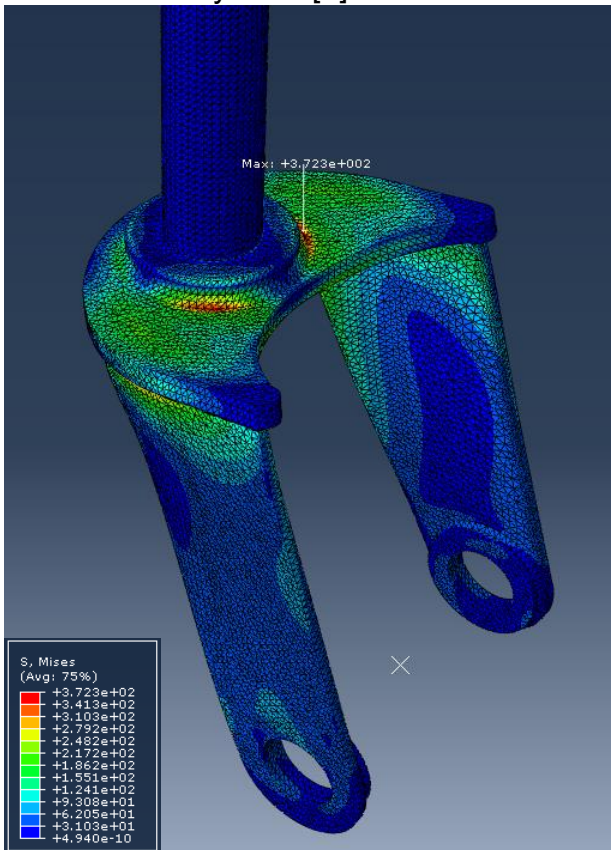
Dle předpisu *UL 2 – I. Část*, § 301 pro pevnost a deformace platí:

1. „Konstrukce musí být schopna přenést provozní zatížení bez trvalých deformací. Při všech zatíženích až do provozního zatížení nesmí vzniklé deformace omezit bezpečný provoz. To platí především pro soustavy řízení.“ [9]
2. „Konstrukce musí být schopna přenášet početní zatížení nejméně 3 sekundy, aniž by došlo k poruše. Třísekundový limit ovšem neplatí, jestliže je pevnostní průkaz prováděn dynamickou zkouškou, při níž jsou prokazovány skutečné zatěžovací podmínky.“ [9]

5.1 Kontrola vidlice

Jak již bylo psáno, tato součást byla kontrolována pomocí metody konečných prvků v programu SIMULIA Abaqus. K tomu, abychom tuto metodu mohli provést, bylo nejprve potřeba definovat silové poměry. Plocha, kde se setkává příruba ložiska s vidlicovou částí, byla nastavena jako vetknutí. Tím se ze staticky neurčitá úloha stává úloha staticky určitá. Měření napětí ve vidlici bylo provedeno pro všechny tři případy zatížení stanovené v kapitole 4. Jednotlivé síly získané ze zatížení bylo nejprve třeba rozložit do os x , y a z a posléze je zanást do programu. Způsob zanesení sil do programu lze vidět na *Obr. 23*. Válcové díry pro spodní čep byly nastaveny jako nedeformovatelné a navzájem souosé

s neměnnou vzdáleností od sebe. Jednotlivé analýzy jsou součástí Přílohy 2. Nejdůležitější informací je maximální zjištěné napětí v jednotlivých případech. Vidlici lze dimenzovat na mez pevnosti materiálu na početním zatížení v případě, že maximální napětí nepřekročí mez kluzu na provozním zatížení materiálu a splní-li se třísekundový limit. [9]



Obr. 22 Průběh napětí pro první způsob zatížení



Obr. 23 Způsob zavedení sil pro první způsob zatížení

Maximální napětí odečtená z výpočtu programu jsou:

$$\sigma_{Fa45^\circ} = 372 \text{ MPa} \dots \text{pro zatížení z analýzy pod úhlem } 45^\circ \text{ vzad, viz. Obr. 22}$$

$$\sigma_{Fa} = 205 \text{ MPa} \dots \text{pro zatížení z analýzy svisle vzhůru}$$

$$\sigma_{Fst} = 544 \text{ MPa} \dots \text{pro zatížení ze statiky}$$

Dovolené napětí vypočteme jako:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_m}{k} \quad (5.1)$$

Kde:

$$\sigma_m = 900 \text{ MPa} \dots \text{mez pevnosti zušlechtěné oceli 25CrMo4 (AISI 4130) [10]}$$

$$k = 1,5$$

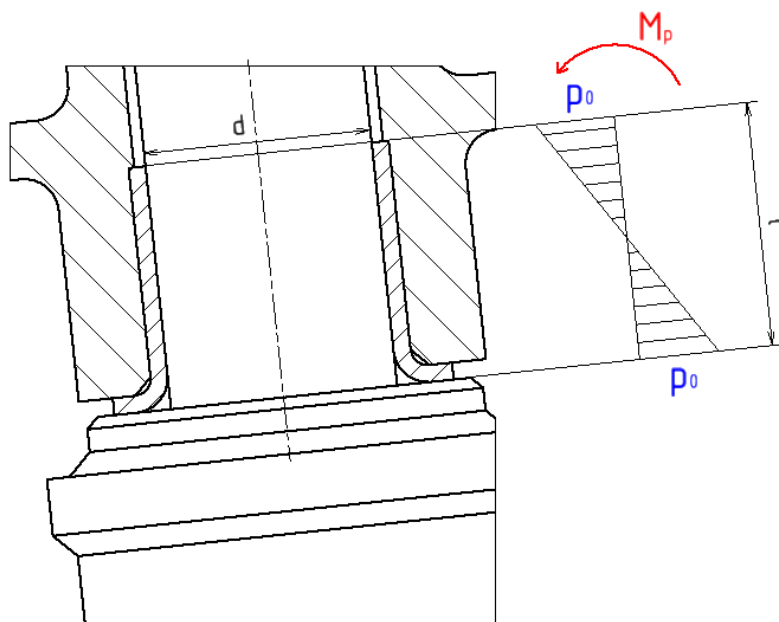
Výpočet:

$$\sigma_D = \frac{900}{1,5} = 600 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

Je patrné, že dovolené napětí je větší než maximální napětí ve všech třech případech zatížení, tudíž součást vyhovuje pevnostním zkouškám.

5.2 Kontrola ložiska

Kluzné ložisko zprostředkovávající styk vidlice a nábojového dílu bude kontrolováno na otláčení. Způsob namáhání tohoto spoje lze vidět na *Obr. 24*. Maximální moment působící na spoj vyvolává zatížení F_a . Tento moment byl určen pomocí uvolnění a rovnováhy reakcí, $M_p = 208,62 \text{ Nm}$.



Obr. 24 Ložiskové spojení a zobrazení průběhu tlaků

Pro kontrolu na otláčení použijeme vztah:

$$\frac{p_p}{k} \geq p_0 = \frac{6 * M_p}{l^2 * d} \quad (5.3)$$

Kde:

$$l = 21,5 \text{ mm}$$

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$p_p = 250 \text{ Nmm}^{-2} \dots \text{přípustné zatížení dle katalogu SKF}$$

$$k = 1,5 \dots \text{bezpečnostní koeficient}$$

Výpočet:

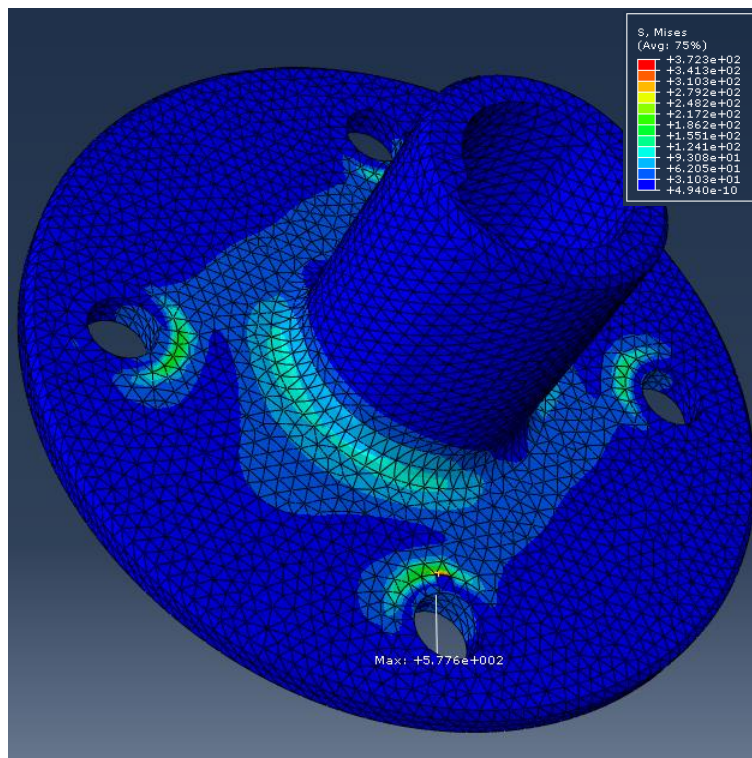
$$p_D \geq k * \frac{6 * M_p}{l^2 * d} \quad (5.4)$$

$$250\,000\,000 \geq 1,5 * \frac{6 * 208,62}{0,0215^2 * 0,02} \quad (5.5)$$

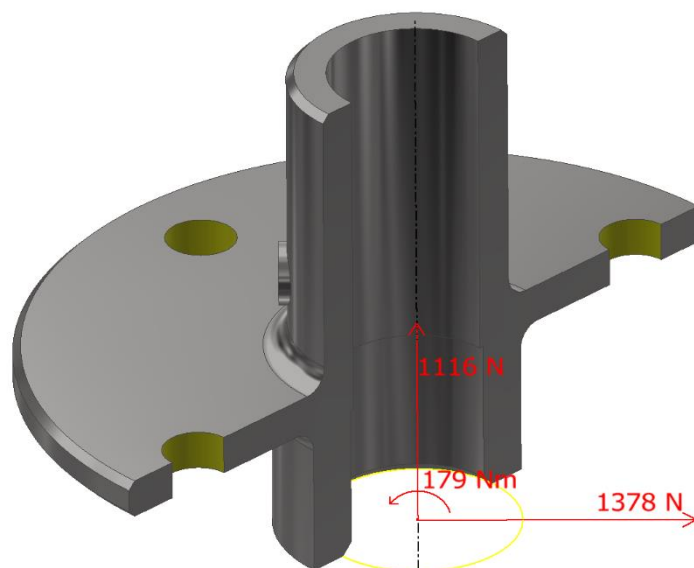
$$250\,MPa \geq 203,1\,MPa \quad (5.6)$$

5.3 Kontrola nábojového dílu

Nejpřesnějším způsobem kontroly této součásti je metoda konečných prvků, která byla provedena obdobně jako kontrola vidlice v kapitole 5.1. Měření napětí bylo opět provedeno pro všechny tři způsoby zatížení. Abychom z této úlohy udělali úlohu staticky určitou, tak bylo potřeba nejprve stanovit vetknutí. Vetknutí bylo stanoveno v děrách pro šrouby, které spojují tento díl a tedy i celou ostruhu s drakem letounu. Síly působící na součást byly dopočteny pomocí uvolnění a rovnováhy reakcí, viz. *Obr. 25*. Samotné analýzy jsou k nalezení v Příloze 3. Pro účely kontroly pevnosti je nejdůležitějším údajem maximální zjištěné napětí pro jednotlivé případy. Tuto součást lze podobně jako vidlici dimenzovat na mez pevnosti materiálu na početním zatížení v případě, že maximální napětí nepřekročí mez kluzu materiálu na provozním zatížení a splní-li se třisekundový limit.



Obr. 25 Průběh napětí pro první způsob zatížení



Obr. 26 Způsob zavedení sil pro první způsob zatížení

Maximální napětí odečtená z výpočtu programu jsou:

$\sigma_{Fa45^\circ} = 578 \text{ MPa}$... pro zatížení z analýzy pod úhlem 45° vzad, viz. Obr. 24

$\sigma_{Fa} = 314 \text{ MPa}$... pro zatížení z analýzy svisle vzhůru

$\sigma_{Fst} = 305 \text{ MPa}$... pro zatížení ze statiky

Dovolené napětí vypočteme jako:

$$\sigma_D = \frac{\sigma_m}{k} \quad (5.7)$$

Kde:

$\sigma_m = 900 \text{ MPa}$... mez pevnosti zušlechtěné oceli 25CrMo4 (AISI 4130) [10]

$k = 1,5$

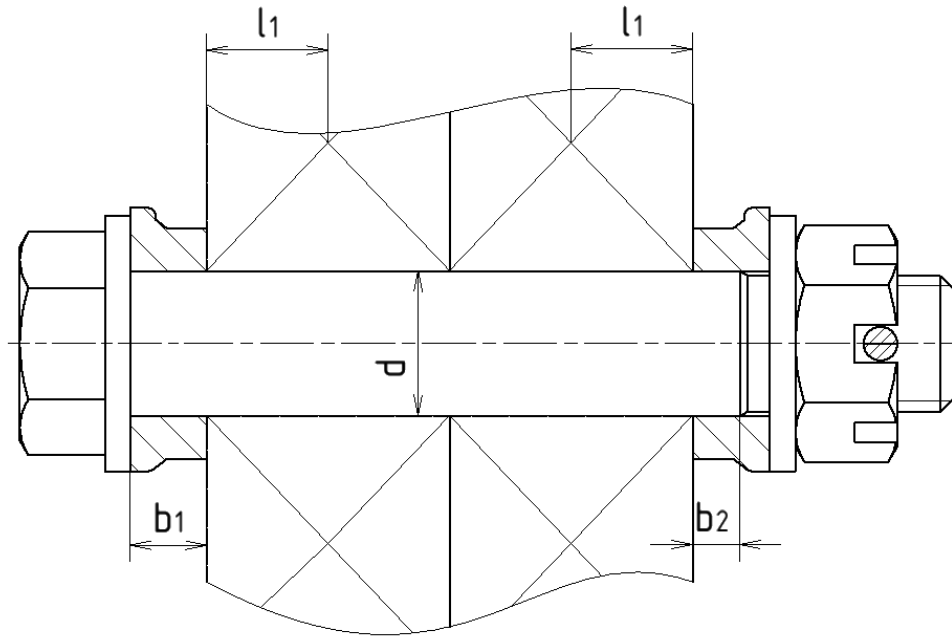
Výpočet:

$$\sigma_D = \frac{900}{1,5} = 600 \text{ MPa} \quad (5.8)$$

Je patrné, že dovolené napětí je větší než maximální napětí ve všech třech případech zatížení, tudíž součást vyhovuje pevnostním zkouškám.

5.4 Kontrola čepu kola – šestihranného lícovaného šroubu

Čepové spojení kola a vidlicového dílu pomocí lícovaného šroubu s dříkem a korunové matice se závlačkou bude kontrolováno na ohyb, stříh a na otláčení. Je zřejmé, že toto spojení bude nejvíce namáháno silou z analýzy, proto budou provedeny výpočty pouze pro tuto variantu. Mez kluzu pro materiál šroubu (ocel C45) je menší než mez kluzu pro materiál vidlicového dílu, proto také bude použit ve výpočtech. Schéma spojení včetně zjednodušeného zobrazení ložisek kola lze vidět na Obr. 27.



Obr. 27 Schéma spojení zahrnující rozměry potřebné pro výpočty

Pro kontrolu na ohyb vycházíme ze vztahů:

$$\frac{\sigma_k}{k} \geq \sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (5.9)$$

$$M_o = \frac{F}{2} * (b_1 + l_1) \quad W_o = \frac{\pi * d^3}{32} \quad (5.10)$$

Kde:

$$d = 17 \text{ mm}$$

$$b_1 = 9 \text{ mm}$$

$$l_1 = 14,25 \text{ mm}$$

$$k = 1,725 \dots \text{součinitel bezpečnosti pro spoje}$$

$$\sigma_k = 640 \text{ MPa} \dots \text{dovolené tahové napětí ve šroubu}$$

Výpočet:

$$\frac{\sigma_k}{k} \geq \frac{16 * F * (b_1 + l_1)}{\pi * d^3} \quad (5.11)$$

$$\frac{640\,000\,000}{1,725} \geq \frac{16 * 1773,75 * (0,009 + 0,01425)}{\pi * 0,017^3} \quad (5.12)$$

$$\mathbf{371\,MPa \geq 22,6\,MPa} \quad (5.13)$$

Pro kontrolu na střih vycházíme ze vztahu:

$$\frac{\tau_k}{k} \geq \tau = \frac{\frac{F_a}{2}}{\frac{\pi * d^2}{4}} \quad (5.14)$$

Kde:

$$\tau_k = 0,6 * \sigma_k = 0,6 * 640 = 384\,MPa \dots \text{dovolené smykové napětí}$$

Výpočet:

$$\frac{\tau_k}{k} \geq \frac{2 * F_a}{\pi * d^2} \quad (5.15)$$

$$128\,000\,000 \geq \frac{2 * 1773,75}{\pi * 0,017^2} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{128\,MPa \geq 3,9\,MPa} \quad (5.17)$$

Je třeba zkontrolovat kombinaci smyku a ohybu pomocí podmínky HMH:

$$\sqrt{\sigma_o^2 + 3 * \tau^2} \leq \frac{\sigma_k}{k} \quad (5.18)$$

$$\sqrt{22,6^2 + 3 * 3,9^2} \leq \frac{640}{1,725} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{23,6\,MPa \leq 371\,MPa} \quad (5.20)$$

Pro kontrolu na otláčení vycházíme ze vztahů:

$$p_D \geq p_1 = \frac{\frac{F_a}{2}}{b_1 * d} \quad p_D \geq p_2 = \frac{\frac{F_a}{2}}{b_2 * d} \quad (5.21)$$

Kde:

$$b_2 = 5,5 \text{ mm}$$

$$p_D = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{640}{3} = 213 \text{ MPa} \dots \text{dovolený tlak na otláčení pro volený šroub}$$

Výpočet:

$$p_D \geq \frac{F_a}{2 * b_1 * d} \quad p_D \geq \frac{F_a}{2 * b_2 * d} \quad (5.22)$$

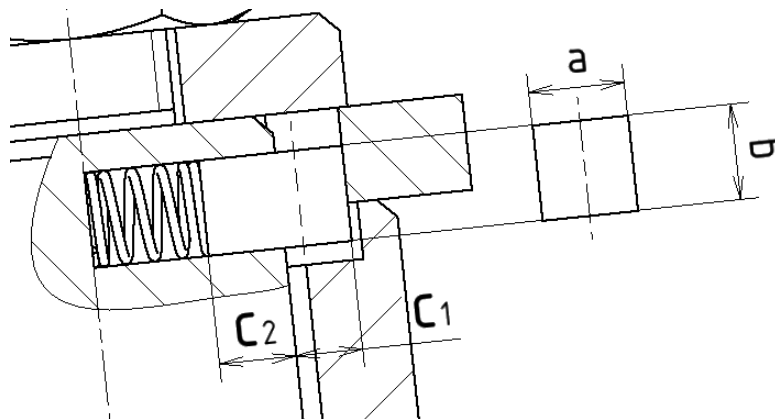
$$213\,000\,000 \geq \frac{1773,75}{2 * 0,009 * 0,017} \quad 213\,000\,000 \geq \frac{1773,75}{2 * 0,0055 * 0,017} \quad (5.23)$$

$$213 \text{ MPa} \geq 5,8 \text{ MPa} \quad 213 \text{ MPa} \geq 9,5 \text{ MPa} \quad (5.24)$$

Čepové spojení vyhovuje pevnostní kontrole na ohyb a střih (podmínka HMH) i na otláčení.

5.5 Kontrola kolíku

Kolík zajišťující zamykání řízení je třeba zkontrolovat na smyk a na otláčení. Kolík bude namáhán maximálním kroutícím momentem na otočném čepu. Tento moment lze získat z maximální reakce ze statiky působící do boku kola (po překonání maximálního momentu by mělo dojít k odemčení řídicího mechanismu). Vzdálenost nositelky síly od osy čepu získáme odečtením ze 3D modelu. Tato vzdálenost má velikost $r_{Fstx} = 28 \text{ mm}$.



Obr. 28 Schéma kolíku zahmující rozměry potřebné pro výpočty

Kroutící moment se vypočte:

$$M_k = F_{stx} * r_{Fstx} = 515,03 * 0,028 = 14,42 \text{ Nm} \quad (5.25)$$

Pro kontrolu na střiž použijeme vztahu:

$$\frac{\tau_k}{k} \geq \tau = \frac{\frac{M_k}{d_{\check{c}}}}{a * b} \quad (5.26)$$

Kde:

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

$$d_{\check{c}} = 20 \text{ mm}$$

$$k = 1,5$$

$$\sigma_k = 700 \text{ MPa} \dots \text{mez kluzu zušlechtěné oceli 25CrMo4 (AISI 4130) [10]}$$

$$\tau_k = 0,6 * \sigma_k = 0,6 * 700 = 420 \text{ MPa}$$

Výpočet:

$$\frac{\tau_k}{k} \geq \frac{2 * M_k}{a * b * d_{\check{c}}} \quad (5.27)$$

$$\frac{420\,000\,000}{1,5} \geq \frac{2 * 14,42}{0,005 * 0,005 * 0,02} \quad (5.28)$$

$$\mathbf{280 \text{ MPa} \geq 57,7 \text{ MPa}} \quad (5.29)$$

Pro kontrolu na otláčení použijeme vztahy:

$$p_D \geq p_1 = \frac{M_k}{c_1 * b * \left(\frac{d_{\check{c}}}{2} + \frac{c_1}{2}\right)} \quad p_D \geq p_2 = \frac{M_k}{c_2 * b * \left(\frac{d_{\check{c}}}{2} - \frac{c_2}{2}\right)} \quad (5.30)$$

Kde:

$$c_1 = 3,5 \text{ mm}$$

$$c_2 = 4 \text{ mm}$$

$$p_D = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{700}{1,5} = 467 \text{ MPa}$$

Výpočet:

$$p_D \geq \frac{M_k}{c_1 * b * \left(\frac{d_c}{2} + \frac{c_1}{2}\right)} \quad p_D \geq \frac{M_k}{c_2 * b * \left(\frac{d_c}{2} - \frac{c_2}{2}\right)} \quad (5.31)$$

$$467 * 10^6 \geq \frac{14,42}{0,0035 * 0,005 * \left(0,02 + \frac{0,0035}{2}\right)} \quad 467 * 10^6 \geq \frac{14,42}{0,004 * 0,005 * \left(0,02 - \frac{0,004}{2}\right)}$$

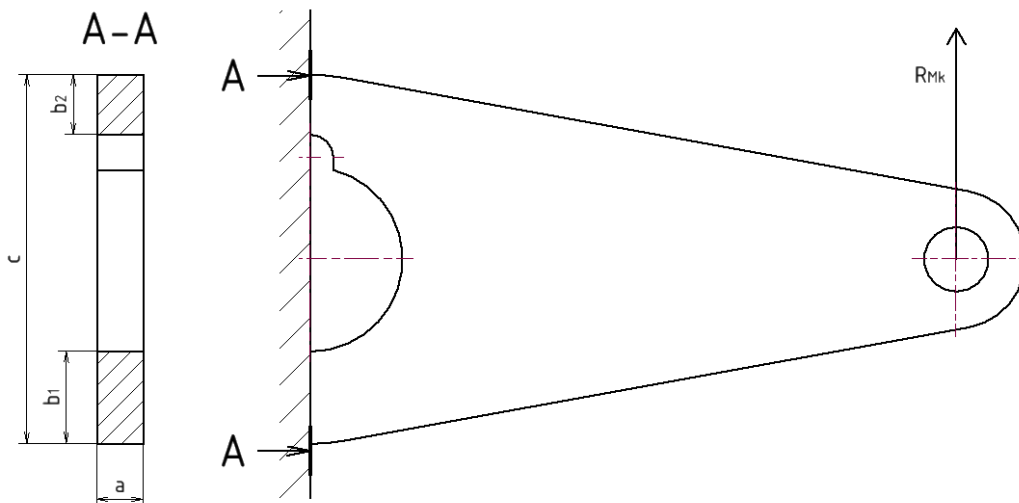
$$467 \text{ MPa} \geq 37,9 \text{ MPa} \quad (5.32)$$

$$467 \text{ MPa} \geq 40,1 \text{ MPa} \quad (5.33)$$

Kolík zajišťující zamykání řízení vyhovuje pevnostní kontrole na smyk i na otlacení.

5.6 Kontrola ramen

Je třeba provést kontrolu ramen na ohyb, který je vyvolaný kroutícím momentem na otočeném čepu. Tento moment je spočítán v kapitole 5.5, $M_k = 14,42 \text{ Nm}$. Součástka bude počítána jako vetknutý nosník, viz *Obr. 26*. Je zřejmé, že nejrizikovějším místem je díra, kterou prochází čep v místě drážky pro kolík, proto budeme pevnost součásti kontrolovat v tomto místě.



Obr. 29 Rameno zobrazené jako vetknutý nosník

Průřezový modul v ohybu v místě díry lze spočítat jako:

$$W_o = \frac{J_z}{\frac{c}{2}} = \frac{a * \left[b_1 * \left(c - \frac{b_1}{2}\right)^2 + b_2 * \left(c - \frac{b_2}{2}\right)^2 \right]}{\frac{c}{2}} \quad (5.34)$$

Kde:

$$a = 5 \text{ mm}$$

$$b_1 = 10 \text{ mm}$$

$$b_2 = 6,5 \text{ mm}$$

$$c = 40 \text{ mm}$$

Výpočet:

$$W_o = \frac{0,005 * \left[0,01 * \left(0,04 - \frac{0,01}{2} \right)^2 + 0,0065 * \left(0,04 - \frac{0,0065}{2} \right)^2 \right]}{\frac{0,04}{2}}$$
$$= 5,257 * 10^{-6} m^3$$
(5.35)

Pro kontrolu na ohyb lze použít vztah:

$$\frac{\sigma_k}{k} \geq \frac{M_k}{W_o}$$
(5.36)

Kde:

$$k = 1,5$$

$$\sigma_k = 700 \text{ MPa} \dots \text{mez kluzu zušlechtěné oceli 25CrMo4 (AISI 4130) [10]}$$

Výpočet:

$$\frac{\sigma_k}{k} \geq \frac{M_k}{W_o}$$
(5.37)

$$467\,000\,000 \geq \frac{14,42}{5,257 * 10^{-6}}$$
(5.38)

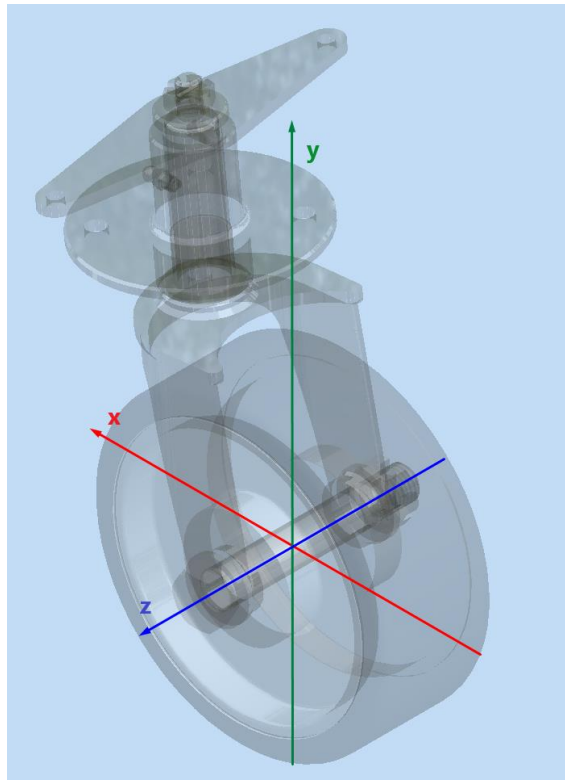
$$467 \text{ MPa} \geq 2,7 \text{ MPa}$$
(5.39)

Ramena vyhovují pevnostní kontrole na ohyb.

6 Hmotový rozbor

Hmotový rozbor je v letadlovém inženýrství důležitou součástí každého konstrukčního návrhu součásti, mechanismu nebo jednotlivých sestav. Je nezbytný k tomu, aby se dalo popsat rozložení hmotnosti a hmoty ve všech částech letadla. Také se pomocí něj dá určit celková hmotnost a souřadnice těžiště celé sestavy letounu.

Nejprve je potřeba si stanovit souřadnicový systém sestavy ostruhu. Počátek byl umístěn do středu čepu kola při postoji na třech kolech, viz. *Obr.30*. Stejně jako i u předešlých výpočtů uvažujeme že osa otáčení svírá se svislou osou úhel 6° . V případě, že by se finální úhel lišil, je potřeba souřadnice těžiště přepočítat. V hmotovém rozboru nebudou zahrnuty šrouby, které spojují ostruhu s drakem letounu, protože neznáme jejich přesnou délku. Hmotnosti budou u normalizovaných součástí odečteny z normy nebo z katalogu, v případě nenormalizovaných součástí budou počítány pomocí známé hustoty materiálu a objemu odečteného ze sestavy vymodelované v 3D CADu (viz. Příloha 1). Souřadnice těžiště jednotlivých součástí budou taktéž odečteny z 3D CADu.



Obr. 30 Zobrazení souřadnicového systému

Hmotnost a souřadnice těžiště pro normalizované součásti budou:

| Součást | Hmotnost [kg] | x [mm] | y [mm] | z [mm] |
|----------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| Ostruhové kolo TWNP-6, 6" | 1,249 | 0 | 0 | 0 |
| Ložisko PCMF 202321.5 E | 0,020 | 46,21 | 105,16 | 0 |
| Lícovaný šroub M16x1,5x100 | 0,200 | 0 | 0 | 1,18 |
| 2x Podložka 16 | 0,011 | 0 | 0 | 0 |
| Korunová matice M16x1,5 | 0,027 | 0 | 0 | -45,81 |
| Závlačka 4x32 | 0,004 | 0 | 0 | -50,5 |
| Korunová matice M10x1,25 | 0,010 | 53,48 | 173,96 | 0 |
| Závlačka 2,5x22 | 0,001 | 53,90 | 177,30 | 0 |
| Pružinka | HMOTNOST ZANEDBATELNÁ | | | |

Tabulka 3: Hmotové vlastnosti normalizovaných součástí

Souřadnice těžiště pro nenormalizované součásti budou odečteny stejným způsobem jako v případě normalizovaných součástí. Hmotnost zjistíme pomocí známé hustoty materiálu a objemu odečteného ze 3D CADu. Všechny zbylé součásti jsou ocelové a hustota oceli při 20°C je podle [4] $7\,850\text{ kgm}^{-3}$. Hmotové vlastnosti jsou zaneseny v Tabulce 4:

| Součást | Objem [mm ³] | Hmotnost [kg] | x [mm] | y [mm] | z [mm] |
|------------------|--------------------------|---------------|--------|--------|--------|
| Vidlice | 73 093 | 0,574 | 33,2 | 84,73 | 0 |
| Nábojová součást | 64 297 | 0,505 | 48,1 | 122,75 | 0 |
| Podložka | 2 561 | 0,020 | 53,0 | 167,8 | 0 |
| Ramena | 18 409 | 0,145 | 52,36 | 162,92 | 0 |
| Kolík | 174 | 0,001 | 42,5 | 162,0 | 0 |

Tabulka 4: Hmotové vlastnosti nenormalizovaných součástí

Součtem jednotlivých hmotností zjistíme celkovou hmotnost ostruhy:

$$m_c = \sum m_i \quad (6.1)$$

$$m_c = 2,767\text{ kg} \quad (6.2)$$

Jednotlivé souřadnice těžiště sestavy lze určit pomocí souřadnic těžišť jednotlivých dílů a jejich hmotností:

$$x_T = \frac{\sum(m_i * x_i)}{m_c} \quad (6.3)$$

$$x_T = \frac{2,391}{2,771} \doteq 19\text{ mm} \quad (6.4)$$

Ekvivalentně pak určíme i souřadnice y_T, z_T :

$$y_T \doteq 51\text{ mm} \quad (6.5)$$

$$z_T \doteq 0\text{ mm} \quad (6.6)$$

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout říditelnou ostruhu pro malý sportovní letoun. V teoretické části byly rozebrány jednotlivé druhy podvozků a vlastnosti ostruhového podvozku. Dále byly rozepsány možné způsoby konstrukce říditelných ostruh, což posloužilo jako důležitý poklad pro návrh konkrétní ostruhy.

Při samotné konstrukci ostruhy dle parametrů stanovených zadáním byl nejprve zvolen způsob řešení řídicího mechanismu. Z důvodu snadného provedení byl zvolen způsob s použitím kluzného spojení a zámku skládajícího se z kolíku a pružinky. Poté byly voleny a navrženy jednotlivé díly a jejich spojení v celkovou sestavu. Sestava byla navržena jako 3D model v CAD programu Autodesk Inventor 2019. Návrh kluzného uložení by se ještě dal vylepšit přidáním mazací soustavy, což by zlepšilo kluzné vlastnosti a výdrž ložiska.

Dále bylo spočteno maximální zatížení působící na ostruhu sportovního letounu. Byly spočteny čtyři možné případy zatížení dle předpisu UL2 - I. Část.

V další části byla ostruha dimenzována na spočtené zatížení. Byly provedeny pevnostní kontroly jednotlivých dílů pro zatížení, které díl nebo spojení namáhaly nejvíce. Pro každou kontrolu byla stanovena bezpečnost dle předpisu a dovolené napětí dle vlastností jednotlivých materiálů. Pro dva nejsložitější díly byla pevnostní kontrola provedena pomocí metody konečných prvků. Všechny pevnostní kontroly vyhověly.

V poslední části práce byla spočtena hmotnost celé sestavy a souřadnice těžiště ostruhy v předem stanoveném souřadnicovém systému. Výsledná hmotnost celé ostruhy by se dala ještě snižovat. Je patrné, že některé součásti by bylo s přihlédnutím k dimenzování možné zmenšit nebo odlehčit. Nejvíce hmotnosti by se dalo ušetřit na ostruhovém kolu a také na jeho čepu, který by se při jiném konstrukčním řešení dal navrhnout jako dutý. Dále by bylo možné odlehčit díly jako je vidlice nebo ramena úběrem materiálu v některých nepříliš namáhaných částech.

8 Použité zdroje

- [1] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03338-4.
- [2] GUDMUNDSSON, Snorri. *General aviation aircraft design: applied methods and procedures*. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5.
- [3] SULŽENKO, M. N. a KOPECKÝ, Pavel (překl.). *Konstrukce letadel. 2.* opravené vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [4] SLAVĚTÍNSKÝ, Dušan. *Koncepce přistávacího zařízení. O letadlech* [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: http://www.slavetind.cz/stavba/koncepce/Koncepce_prist_zar.aspx (2010)
- [5] CORWIN, Howard. *Steerable tail wheel*. US2338572A.
- [6] BINGELIS, Tony. *Tail Wheel Installations*. EAA [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: <https://www.eaa.org/en/eaaircraft-building/building-your-aircraft/while-youre-building/building-articles/landing-gear-wheels-and-brakes/tail-wheel-installations> (1979)
- [7] HAPP, R. G. *Tail Wheel Assemblies*. MATCO mfg [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: <http://www.matcomfg.com/TailWheelAssemblies-tp2-28.html>
- [8] WICKS. *TWNP-6, 6" Non-Pneumatic Tailwheel* [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: <http://aircraftproducts.wicksaircraft.com/item/tailwheels/6-non-pneumatic-tailwheel/twnp-6>
- [9] LETECKÁ AMATÉRSKÁ ASOCIACE ČR. UL2 - I. Část: Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. Praha: LAA ČR, 2002.
- [10] BOLZANO. *Přehled vlastností oceli 25CrMo4* [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_25CrMo4.pdf
- [11] SCOTT, Jeff. *Aircraft Landing Gear Layouts*. Aerospaceweb [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: <http://www.aerospaceweb.org/question/design/q0200.shtml>
- [12] MOSESHVILI, Giga. *AV-8B Harrier II Plus* [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: <https://i.pinimg.com/564x/45/ff/e2/45ffe2d145c5e55de9064e1728c54868.jpg>
- [13] BROWN, Patrick. *Antonov An-225 Mriya* [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/655555289486030757/>
- [14] KOLMANN, Petr. *Kluzák HpH 304MTS Twin Shark* [online]. [cit. 2019-07-1] Dostupné z: https://www.flying-revue.cz/imagebank/35877648/800/600/shark_7.jpg
- [15] THE AIRPLANE FACTORY. *CONSTRUCTION MANUALS & IMAGES - TAILDRAGGER. Sling Aircraft* [online]. Dostupné z: https://airplanefactory.co.za/wp-content/uploads/2018/12/Tailwheel-Assembly-1-360x277_c.png